

“最美的无外乎于自然！”

-caDesign设计

售价:¥159

版权所有,侵权必究

ECO

生态辅助设计技术

Eco-Aided Design Technology

包瑞清

ECO_A

2013-10-20

设计师从来没有放弃过对生态设计的探讨，寻找最切合自然规律的设计方式来增加居住的舒适性和防止安全隐患。但是碍于技术和专业间的协同合作，很多的设计和处理只能依靠定向的分析，例如风的流动对建筑区域的影响，河流的流速与水深，建筑内外温湿度的变化等。对于一个成熟的设计公司，一般设计师可以与水利、环境工程、建筑环境以及环境监测等领域的研究人员合作，推进设计的健康发展。但是，作为项目主体的设计师在进行方案规划与设计的时候，一个项目往往有多个解决策略，每一个设计策略又会往复修改多次，如果每一次都得集聚多专业的人员进行讨论，方案设计的进度必然受到影响。现在，计算机辅助设计的发展，已经可以将过去繁复的计算过程作为计算机程序处理的一个模块，模块的核心是相关专业研究的重点，例如计算流体的各种算法，模块的输入条件、计算模型的选择，设计师可以自己处理，而具体繁复的计算过程就交与计算机完成。因此，可以尝试环境的各种模拟，而各专业的协同合作可以归并为几次重要的设计决策，以利于方案的顺利发展。当然，不可否认，要重新调整知识架构，纳入更多相关专业的知识与技术，这也是在新的世纪之初对设计师提出的新挑战。

本书主要包括五个部分，气象数据分析、热湿环境与计算机模拟、流体CFD：风+水、日照+光环境和生态环境分析技术报告。其中气象数据分析是所有分析的基础。传统中对于气象部分的认识一般来说都是文字性的描述，例如北京气候的主要特点是四季分明，春季干旱，夏季炎热多雨，秋季天高气爽，冬季寒冷干旱，风向有明显的季节变化，冬季盛行西北风，夏季盛行东南风等。如果涉及到具体的量化也是针对主要的特点进行的描述，例如隆冬1月份平原地区平均温为-4℃以下，山区低于-8℃，极端最低气温平原为-27.4℃等。而以计算机计算为基础的模拟分析中，则以逐时气象数据为基础，如使用《中国建筑热环境分析专用气象数据集》和美国能源部网站提供的气象数据，这些气象数据资料是模拟分析时需要输入的数据。

热环境、风环境、水环境和光环境是在获得逐时气象数据前提下进行模拟分析的。热、风、光、水是人

类生存的基本环境，人类对热、风、光的要求有个基本的舒适度，例如冬季室温在16~22℃，夏季空调房间的气温多规定为24~28℃，最适宜的相对湿度应为50%~60%，对人体舒适的气流速度应小于0.3m/s，采光系数为5%，最低照度为2501ux时适合于处理一些特别精细的作业等。可以发现所有人类适宜生存的环境评价都可以转换为具体的数值，即可以使用计算机，对设计项目所形成的人类基本生存条件进行模拟或评估其适宜性，并进行有的放矢的设计修正，以最大限度的满足人类基于生存之上—舒适度的满足。同时，除了考虑了人类自身的生存环境之外，更应该关注自然环境，尽量节约自然资源，减少对自然环境不可逆转的破坏。水环境主要是关注自然的河流、湖泊、湿地，以计算机辅助设计的方式，有效的设计湿地环境。

最后一个章节简要论述了生态环境分析技术报告的必要性，将之前的四个部分统一在一个分析报告中，有效地指导设计过程并对设计做出评估。例如热环境分析指导维护结构的设计和材料的选择，联合风环境和光环境分析指导建筑布局和单体形态；河床设计是否满足20年一遇的洪水位要求，以保护生命安全；设计后采光系数是否符合《建筑采光设计标准》等等。生态环境分析报告不仅可以在设计开始前对设计场地做出评估以指导设计的方向，同时在设计过程中需要反复的进行相关模拟，以使方案朝着适合于舒适性、节约性、环保性、可持续性的方向发展，并且在设计后作为评估的手段。在生态辅助设计部分并没有涉及声环境分析，以及温室气体排放，资源消耗分析等方面内容，这些也应是生态环境分析技术报告中重要的内容。

作为计算机辅助设计手册，本书并不是单纯的讲述计算机的操作，单纯的操作并不能解决各项分析的问题，例如热环境分析中会涉及湍流模型的选择，包括k- ϵ 模型、大涡模拟Large-Eddy Simulation等等，以及设置边界条件、松弛因子、离散格式和材料的各种属性，包括密度、粘度、比热容等；光环境中则需要知道太阳辐射的有关知识，太阳辐射强度、光通量密度等，因此生态计算机辅助模拟不只是软件操作，而是由多专业多学科联合构建的一个体系，这个体系不仅

是本部分所涉及的内容，例如流体力学、辐射知识、气象知识、水文知识、材料学、水利知识、计算机学等等，一切有助于人类建造并协同自然设计的相关知识都可以纳入到这个体系当中来。这些均对设计（从城市规划、风景园林、建筑到室内设计）提出了更多的专业要求以及多学科融合的要求，以使设计更合乎自然的本质。

因此作为计算机辅助设计手册，必然涉及到不同的专业领域，设计师可以将它作为参考书来使用，在遇到问题时查找本书的相关章节或者查看有哪些模拟可以协助设计的发展；或者从头读起，系统的了解目前计算机模拟所能做到的事情有哪些。对于其中的知识没有必要强记，在计算机模拟时需要相关领域知识作为支持再查找理解即可，例如材料参数的设置。

对于如此庞大的跨专业体系，限于作者水平，书中难免出现错误和疏漏之处，恳求读者惠予批评指正。

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Richard".

Weather Tool™ 2011

Weather Converter Version1.1.33

Autodesk Ecotect Analysis 2011

Energy Plus 1.3.0.018

DesignBuilder Version 2.2.5.004

Fluent Revision:12.0.16 for the ANSYS Version 12.0.1

ANSYS Workbench 2.0 Framework Version:12.0.1

FLOW-3D(R) Solver version 9.3 win32-ifl 2008

Interface version 9.3 8/8/2008

AutoCAD Civil 3D 2012

ESRI®ArcMap™10.0

PHOENICS

CONTENTS : 目录

序

11 第一部分	气象数据分析	
	1.气候与建筑	12
	2.获取气象数据	17
	3.气象数据分析	23
	4.热舒适性与焓湿图（温湿图表）	29
49 第二部分	热湿环境与计算机模拟	
	1.热湿环境基础	50
	2.建筑热环境动态模拟	56
103 第三部分	流体CFD：风+水	
	1.流体力学理论基础	104
	2.流体力学的求解流程与基本参数	114
	3.PHOENICS的FLAIR模块	138
	4.人体和周围环境的热交换	141
	5.风环境模拟	154
	6.水环境模拟	187
233 第四部分	日照+光环境	
	1.日照	234
	2.太阳辐射	243
	3.光环境	254
267 第五部分	生态环境分析技术报告	
266 附录		272

第一部分

气象数据分析

事关生存（Survival）是必定要做的，而只关系到舒适（Comfort），人类很可能“将就”

气候与建筑

人类的居所，最本质的功能就是为人类的生存提供庇护，庇护之一就是大自然的风雨雪的变化，四季更替的寒暑，所有这些都是气候的问题。而不同地区因为气候的差异，建筑形式也会不同，以适应该区域的气候条件，使居所获得相对的舒适性，例如南方的骑楼，湿热地区的干阑式建筑，北方的窑洞。气候影响着建筑的形式，因此建筑适应气候是建筑首要考虑的因素之一。

气候：

气候包括温度、湿度、气压、风力、降水量、大气粒子数及众多其他气象要素在很长时期及特定区域内的统计数据。与气候相比，天气是指这些气象要素在近两周内的实时状态。

一个地方的气候是受该地的纬度、地形、海拔、冰雪覆盖情况、以及附近水体及其水流状况影响的。气候可根据不同气象要素的平均范围和特殊范围进行分类，最常采用温度和降水量。其中最普遍使用的分类系统是Koppen气候分类系统。1948年开始使用的桑斯维特费气候分类系统，在温度和降水量两个变量的基础上增加土壤水分蒸散量，该系统应用于研究动物物种多样性和气候变化的潜在影响。伯杰龙和空间天气分类系统侧重于通过气团的形成来确定某些地区的气候状况。

柯本气候分类法：

Effektiven Klimaklassifikationen (德语：意为“有效气候分类法”)——最被广泛使用的气候分类法，是由德国气候学家弗拉迪米尔·彼得·柯本所发展出来的气候分类法，1918年发表分类法的第一个完整版本，1936年发表最后修订版。

柯本气候分类法是基于认为自然植被的生成乃源自气候的特性，故描述气候的最佳方式为自然植被。

A：热带型 / 高温植物型气候

柯本气候分类 - 热带型气候的特征是水平面与低海拔地区全年高温炎热，每月平均气温在 18°C (64.4°F) 以上，根据降水的差异分为三个主要气候型。

- Af: 热带雨林气候 (英语: Tropical rain forest climate)，受赤道无风带支配，全年高温多雨，没有明显的季节，每月平均降水在60毫米 (mm) 以上，一般都在赤道南北5到10度，在一些陆地东部靠海地带，会到赤道南北25度。
- Am: 热带季风气候 (英语: Tropical monsoon climate)，主要分布在南亚与西非，由于受到季风的影响，不同的季节风向会有明显的变化，且在冬季时会有旱月，降水量可能会出现小于60毫米 (mm) 的情况。判定条件为最干月降水量少于60 (mm) 且高于 ($100-0.04 \times \text{年平均降水量}$)。
- Aw: 热带疏林草原气候 (英语: Tropical wet and dry or savanna climate)，有旱季和湿季的分别，最干旱月份降水可能会在60毫米 (mm) 以下。判定条件为最干月降水量同时少于60毫米 (mm) 和 ($100-0.04 \times \text{年平均降水量}$)，且旱季位于冬季。

B：干旱型 / 半干旱型气候

柯本气候分类 - 干旱型气候处的夏季和冬季指4-9月和指10-3月。

夏雨区指70%以上的降水集中在夏季，冬雨区指70%以上的降水集中在冬季，年雨区指不是夏雨区和冬雨区的地区。

气候型：不同降水季节分配的地区有不同的指标。

- Bw: 沙漠气候，冬雨区 $r < 10t$ ，夏雨区 $r < 10(t+14)$ ，年雨区 $r < 10(t+7)$;
- Bs : 草原气候，冬雨区 $10t < r < 20t$ ，夏雨区 $10(t+14) < r < 20(t+14)$ ，年雨区 $10(t+7) < r < 20(t+7)$;

C: 温暖带

柯本气候分类 – 温暖带最热月均大于10°C，最冷月均温在-3~18°C之间。根据降水季节分配再分为三个气候型：

- Cs: 夏干温暖气候，或称地中海型气候，夏半年最干月降水量小于40毫米，且小于冬季最多雨月降水的三分之一；
- Cw: 冬干温暖气候，冬半年最干月降水量小于夏半年最多雨月降水的一成；
- Cf : 常湿温暖气候，降水不足上述比例者；

D: 冷温带

柯本气候分类 – 冷温带最热月均温在10°C以上，最冷月均温在0°C以下。再根据降水的季节分配，分为以下两种气候型：

- Df: 常湿冷温气候，全年降水分配均匀；
- Dw: 冬干冷温气候，夏季最多雨月降水至少10倍于冬季最干月降水；

E: 极地带

柯本气候分类 – 极地带全年寒冷，最热月均温在10°C以下；

- ET: 苔原气候，最热月均温在10°C以下，0°C以上，可生长苔藓、地衣等植被；
- EF: 冰原气候，最热月均温在0°C以下，终年积雪；

柯本气候分类法：

首先根据全球的气候分成五个主气候带（A、B、C、D、E），其中除B（干旱带）是干旱气候外其余为湿润气候，各带中又以气温和降水为基础，考虑年度与每月气温，以及降雨季节的变化，参考植被分布来确定划分出若干气候型。

主气候区：

A: 赤道带 B: 干旱带 C: 温暖带 D: 降雪带 E: 极地带降水 W: 沙漠型 S: 草原型 f: 湿地型 s: 夏天旱季型

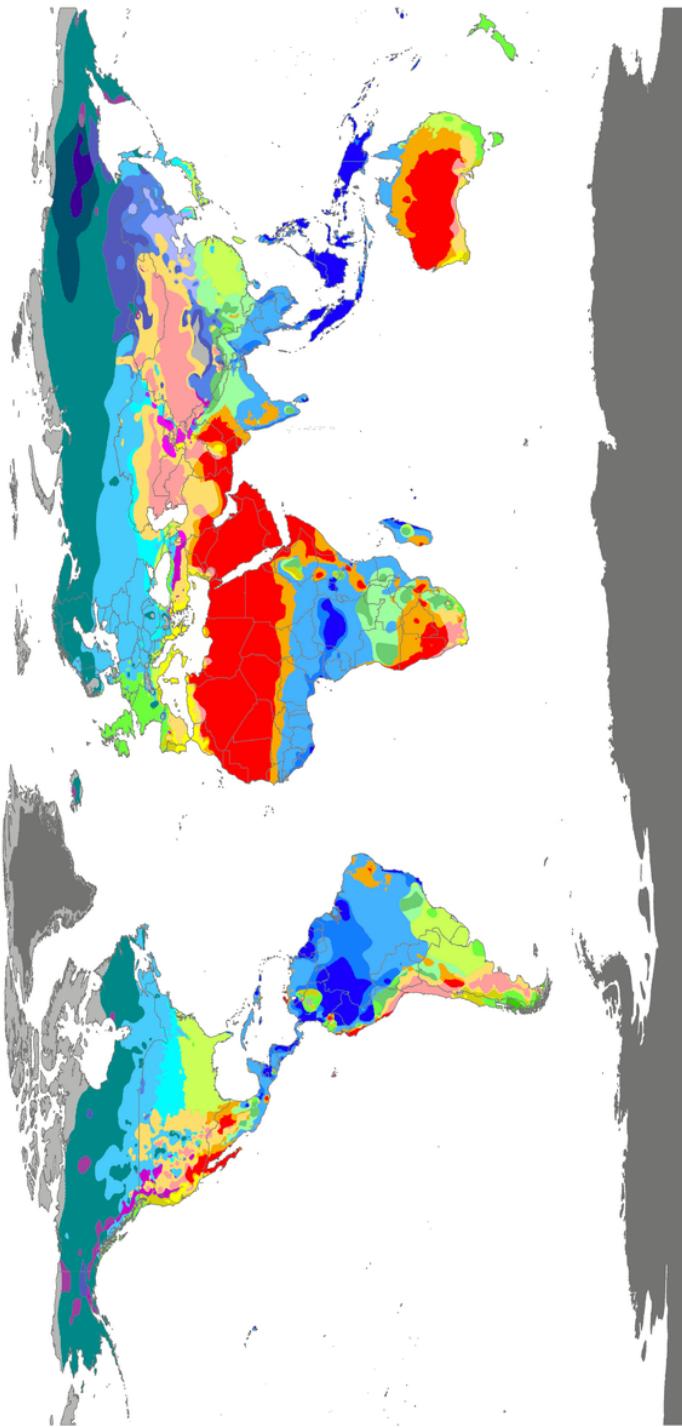
降水：

w: 冬天旱季型 m: 季风型

气温：

h: 炎热干燥 k: 寒冷干燥 a: 夏季炎热 b: 夏季温暖 c: 夏季凉快 d: 显著大陆型
F: 极地冰帽 T: 极地苔原

World map of Köppen-Geiger climate classification



Af	BWh	Csa	Cfa	Dfa	Dwa	Dsa	ET
Am	BWK	Csb	Cfb	Dfb	Dwb	Dsf	EF
Aw	BSh	Cwb	Cfc	Dsc	Dwc	Dfc	
	BSk	Cwc	Cfa	Dsd	Dwd	Dfd	

DATA SOURCE : GHCN v2.0 station data
Temperature (N = 4,844) and
Precipitation (N = 12,396)

PERIOD OF RECORD : All available

MIN LENGTH : ≥30 for each month.

RESOLUTION : 0.1 degree lat/long

Contact : Murray C. Peel (mpeel@unimelb.edu.au) for further information



气候要素：

研究热舒适性进行建筑设计时，主要涉及到的气候要素有：太阳辐射、空气温度、湿度、风、雨、雪等。

太阳辐射：太阳辐射是大气的主要热源，是决定气候的主要因素。是指太阳核融合所产生的能量，经由电磁波传递到各地的辐射能（Radiant energy）。太阳辐射的光学频谱接近温度5800K的黑体辐射。大约有一半的频谱是电磁波谱中的可见光，而另一半有红外线与紫外线等频谱。如果紫外线没有被大气层或是其他的保护装置吸收，它会影响人体皮肤色素的变化。

测量上通常都用全天日射计（Pyranometer）与银盘日射计（Silver-disk pyrheliometer）等仪器来测量太阳辐射。

太阳辐射对建筑的影响包括：光效应，太阳辐射中可见光部分影响建筑的采光和室内照明；热效应，太阳辐射是建筑外部的主要热源，太阳辐射通过窗口直射室内和使墙体增温加热室内空气，对人体产生影响；紫外线作用使许多建筑材料，特别是塑料等有机材料老化而损失。太阳辐射作用一方面造成夏季室内温度过高，另一方面又是改善室内热环境和节省采暖能耗的天然资源。

空气温度：简称“气温”，是衡量热状况最常用的一个量，是热量交换，传输的最终结果，是标志任何一个地区热量条件的重要气候要素。室外气温通常指距地面1.5m高，背阴处的空气温度，主要受太阳辐射照度，气流状况以及地形等因素的影响。其中与太阳辐射照度最为密切相关，所以气温随纬度呈带状分布最为明显。研究认为，舒适的气温应适当低于人体温度，以24~26℃为宜，不宜低于17℃，高于33℃。

气温对建筑物影响很大，通过热传导影响建筑外维护结构温度和室内温度的变化，直接决定着建筑热工性能计算，采暖和空调负荷计算中使用的各项气候参数，从而也决定着建筑物外维护结构保温或隔热设计，决定着建筑室内通风或空调设计等。

大气湿度：指空气中的潮湿程度，它表示当时大气中水汽含量距离大气饱和的程度，一般用相对湿度百分比来表示大气湿度的程度。在一定气温下，大气中相对湿度越小，水汽蒸发也就越快；反之，大气中相对湿度越大，水汽蒸发也就越慢。在人们实际生活中，冬春季会感到空气干燥，夏季出现天气闷热的现象，这都是由于大气中湿度的变化在起作用。

人体中丧失热量的多少也取决于大气中水分的饱和程度，一般将37℃时空气饱和差称为生理饱和差，它对人体呼吸过程中水汽蒸发有重要意义。大气湿度对人体的热量代谢和水盐代谢有很大影响。在不同的湿度条件下，人体的散热方式是不一样的。因此，大气湿度和气温往往共同对人体健康产生影响。在低温潮湿的天气中，由于大气中水蒸气吸收了人体的热辐射，而使人体感到阴冷并容易着凉；在高温潮湿的季节，大气中的水气会阻碍人的体表蒸发，而影响到散热过程，如果排汗不及时，人还容易中暑。在冬季低温情况下，潮湿的空气容易让人得风湿病和气管炎，相对湿度如果达到80%以上，有碍人的机体蒸发散热，对人们患有肾病、结核病、慢性腰腿病都有不良影响；而大气中湿度太小时则会造成人们的皮肤干燥等，特别是长期在室外、田间劳作的人们来说，特别容易出现手脚干裂的现象。

风：相对于地表面的空气运动，通常指它的水平分量，以风向、风速或风力表示。风向指气流的来向，常按16方位记录。风速是空气在单位时间内移动的水平距离，以米/秒为单位。大气中水平风速一般为1.0~10米/秒，台风、龙卷风有时达到102米/秒。而农田中的风速可以小于0.1米/秒。风速的观测资料有瞬时值和平均值两种，一般使用平均值。风的测量多用电接风向风速计、轻便风速表、达因式风向风速计，以及用于测量农田中微风的热球微风仪等仪器进行；也可根据地面物体征象按风力等级表估计。

风对建筑的影响：风荷载是建筑设计中的主要荷载之一，直接影响到建筑的经济，安全和适用；室外风速的大小对房间换气量及外维护结构换热能力都有很大影响，从而直接影响室内热环境。因此，风向和风速对建筑的安全，布局，自然通风效果和舒适性等有至关重要的影响。

降水：指在大气中冷凝的水汽以不同方式下降到地球表面的天气现象。大气中的水汽几乎全部集中于对流层中，温度越高，大气可以容纳的水汽含量就越多，反之就越少。一定温度下，当空气不可容纳更多的水汽时，称为饱

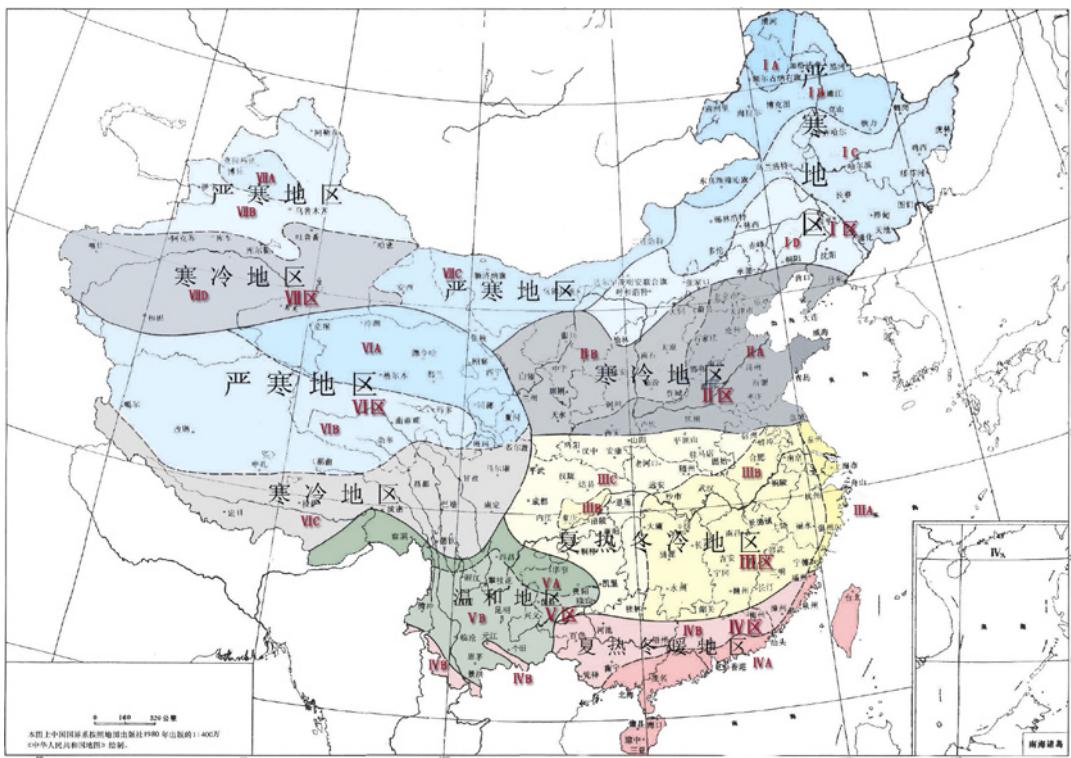
和空气。当饱和空气中的水汽和温度相匹配时，不会出现水汽凝结现象，但当空气达到过饱和状态时，则会产生多余的水汽并发生水汽凝结。过饱和空气的形成主要是由于空气的上升运动，造成气温下降，

分区名称	分区指标		设计要求
	主要指标	辅助指标	
严寒地区	最冷月平均温度 $<-10^{\circ}\text{C}$	日平均温度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数 ≥ 145 天	必须充分满足冬季保温要求，一般可不考虑夏季防热；
寒冷地区	最冷月平均温度 $\sim -10^{\circ}\text{C}$	日平均温度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数 $90\sim 145$ 天	应满足冬季保温要求，部分地区兼顾夏季防热；
夏热冬冷地区	最冷月平均温度 $0\sim -10^{\circ}\text{C}$ 最热月平均温度 $25\sim 30^{\circ}\text{C}$	日平均温度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数 $0\sim 90$ 天 日平均温度 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ 的天数 $40\sim 110$ 天	必须满足夏季防热要求，适当兼顾冬季保暖；
夏热冬暖地区	最冷月平均温度 $> 10^{\circ}\text{C}$ 最热月平均温度 $25\sim 29^{\circ}\text{C}$	日平均温度 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ 的天数 $10\sim 100$ 天	必须充分满足冬季保暖，一般可不考虑夏季防热；
温和地区	最冷月平均温度 $0\sim -13^{\circ}\text{C}$ 最热月平均温度 $8\sim 25^{\circ}\text{C}$	日平均温度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数 $0\sim 90$ 天	部分地区应考虑冬季保暖，一般可不考虑夏季防热；

形成过饱和水汽；加上吸湿性较强的凝结核的作用，水汽凝结成云，来自云中的云滴、冰晶体积太小，不能克服空气的阻力和上升气流的顶托，从而悬浮在空中。当云继续上升冷却，或者云外不断有水汽输入云中，使云滴不断地增大，以致于上升气流再也顶不住时候，才能从云中降落下来，形成雨、雪、雹等降水天气。

对建筑而言，降水量和降水强度关系到屋面、地面和地下排水系统的设计。如果雨水通过墙壁上的缝隙向室内渗透，则会导致墙体内部受潮，从而降低建筑的热工性能，并可能使屋面油毡鼓泡、变形、裂缝造成渗漏，面层剥落。

中国建筑气候区划图



I 区：冬季漫长严寒，夏季短促凉爽，气温年较差较大，冻土期长，冻土深，积雪厚，日照较丰富，冬季半年多大风，西部偏于干燥，东部偏于湿润；

II 区：冬季较长且寒冷干燥，夏季炎热湿润，降水量相对集中。春秋季节短促，气温变化剧烈。春季雨雪稀少，大风风沙天气较多，夏季多冰雹和雷暴。气温年较差大，日照丰富；

III 区：夏季闷热，冬季湿冷，气温日较差大。年降水量大，日照偏少。春末夏初为长江中下游地区的梅雨期，多阴雨天气，常有大雨和暴雨天气出现。沿海及长江中下游地区夏季常受热带风暴及台风袭击，易有暴雨天气；

IV区：夏季炎热，冬季温暖，湿度大，气温年较差和日较差小，降雨量大，大陆沿海及台湾，海南诸岛多热带风暴及台风袭击，常伴有狂风暴雨。太阳辐射强，日照丰富；

V区：立体气候特征明显，大部分地区冬湿夏凉，干湿季节分明，常年有雷暴雨，多雾，气温年差较小，日较差偏大，日照较强烈，部分地区冬季气温偏低；

VI区：常年气温偏低，气候寒冷干燥，气温年较差小而且日较差大，空气稀薄，透明度高，日照丰富强烈。冬季多西南大风，冻土深，积雪厚，雨量多集中在夏季；

VII区：大部分地区冬季长而严寒，南疆盆地冬季寒冷。大部分地区夏季干热，吐鲁番盆地酷热。气温年较差和日较差大。雨量稀少，气候干燥，冻土较深，积雪较厚。日照丰富强烈，风沙大；

《民用建筑热工设计规范》GB 50176-93
《建筑气候区划标准》 GB 50178-1993

获取气象数据

●《中国建筑热环境分析专用气象数据集》中国气象局气象信息中心气象资料室，清华大学建筑技术科学系 著

《...数据集》中主要观测数据的内容：

日期	时刻	小时	干球温度	相对湿度	含湿量	水平面总辐射强度	水平面散射辐射强度	湿球温度	露点温度	水汽压	焓值
			℃	%	g/kg干空气	W/m ²	W/m ²	℃	℃	Pa	kJ/kg干空气
法向直射辐射强度	东向总辐射强度	南向总辐射强度	西向总辐射强度	北向总辐射强度	天空有效温度	地表温度	云量	风速	风向		
W/m ²	K	℃	成	m/s							

地面气候资料：

1-气温（空气干球温度）：

气温是指离地面1.5m高度处的空气温度。气温的单位以摄氏度（℃）表示，取一位小数；

2-湿球温度：

湿球温度是为了获取空气湿度而进行的一种温度观测，是在地面1.5m高度处使用安装在百叶箱中的湿球温度计观测的空气温度。湿球温度的单位以摄氏度（℃）表示，取一位小数；

3-水汽压：

水汽压是指离地面1.5m高度处的空气中水汽作用在单位面积上的压力。水汽压的单位以百帕(hPa)表示，取一位小数；

4-相对湿度：

相对湿度是指离地面1.5m高度处的水汽压与当时气温下的饱和水汽压之比。相对湿度的单位以百分数（%）表示，取整数；

5-地面温度（地表温度）：

地面温度是指直接与土壤表面接触的温度计所示的温度。地表温度的单位以摄氏度（℃）表示，取一位小数；

6-风向风速

风向风速是指离地面10~12m高度处的风向风速。风向用16方位加静风(N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W, NW, NNW, C)表示；风速单位为米/秒（m/s），取一位小数；

7-本站气压：

气压（本站气压）是指近地面的空气作用在单位面积上的压力。气压的单位以百帕（hPa）表示，取一位小数；

8-日照时数：

日照时数是指在指定时间段内太阳直射光线照射到地面的时间。日照时数以小时（h）为单位，取一位小数；

9-云量:

云量是指云遮蔽天空视野的成数。云量是用人的肉眼观察的，因此，测量的主观因素比较大，尤其是在没有月亮的夜间由于视野能力的限制，可能会有较大的误差；

气象辐射资料：

10-总辐射:

总辐射（短波），是指水平表面上在 2π 立体角内所接收到的太阳直接辐射和太阳散射辐射之和。总辐射用总辐射计（天空辐射计）测量；

11-散射辐射:

散射辐射（短波），是指太阳辐射经过大气散射或云的反射，从天空 2π 立体角以短波形式向下到达地面的那部分辐射。散射辐射用总辐射计遮住太阳直接辐射的方法测量；

建筑热环境分析常用参数补充：

12-含湿量d(g/kg干空气)

在湿空气中与1kg干空气同时并存的水蒸气量称为含湿量；

13-湿球温度t_s (°C)

理论上，湿球温度是在定压绝热条件下，空气与水直接接触达到稳定热湿平衡时的绝热饱和温度，也称热力学湿球温度。工程计算当中，通常在焓湿图上通过等焓线来确定某一状态（干球温度t，含湿量d）湿空气对应的湿球温度；

14-露点温度 (°C)

露点温度为空气结露与否的临界温度，即在含湿量不变的条件下，湿空气达到饱和时的温度，其值取决于空气的含湿量，在焓湿图上，等含湿量线上的饱和点对应的空气温度即为该含湿量对应的露点温度；

15-焓i (kJ/kg干空气)

在空调工程中，湿空气的状态经常发生变化，经常需要确定状态变化过程中的热交换量。空调工程中湿空气的状态变化过程可看作是定压过程，因此可用空气状态前后的焓差来计算空气热量的变化；

16-辐射强度:

（法向太阳辐射强度，东西南北向垂直壁面上的太阳辐射强度 W/m^2 ）照射到面元上的辐射通量与该面元面积之比，单位为 W/m^2 ；

《中国建筑热环境分析专用气象数据集》中以北京为例气象数据图表分析：

台站名称：北京

台站号：54511

台站类型：基本站

所属省份：北京

地理北纬(度)：39.80

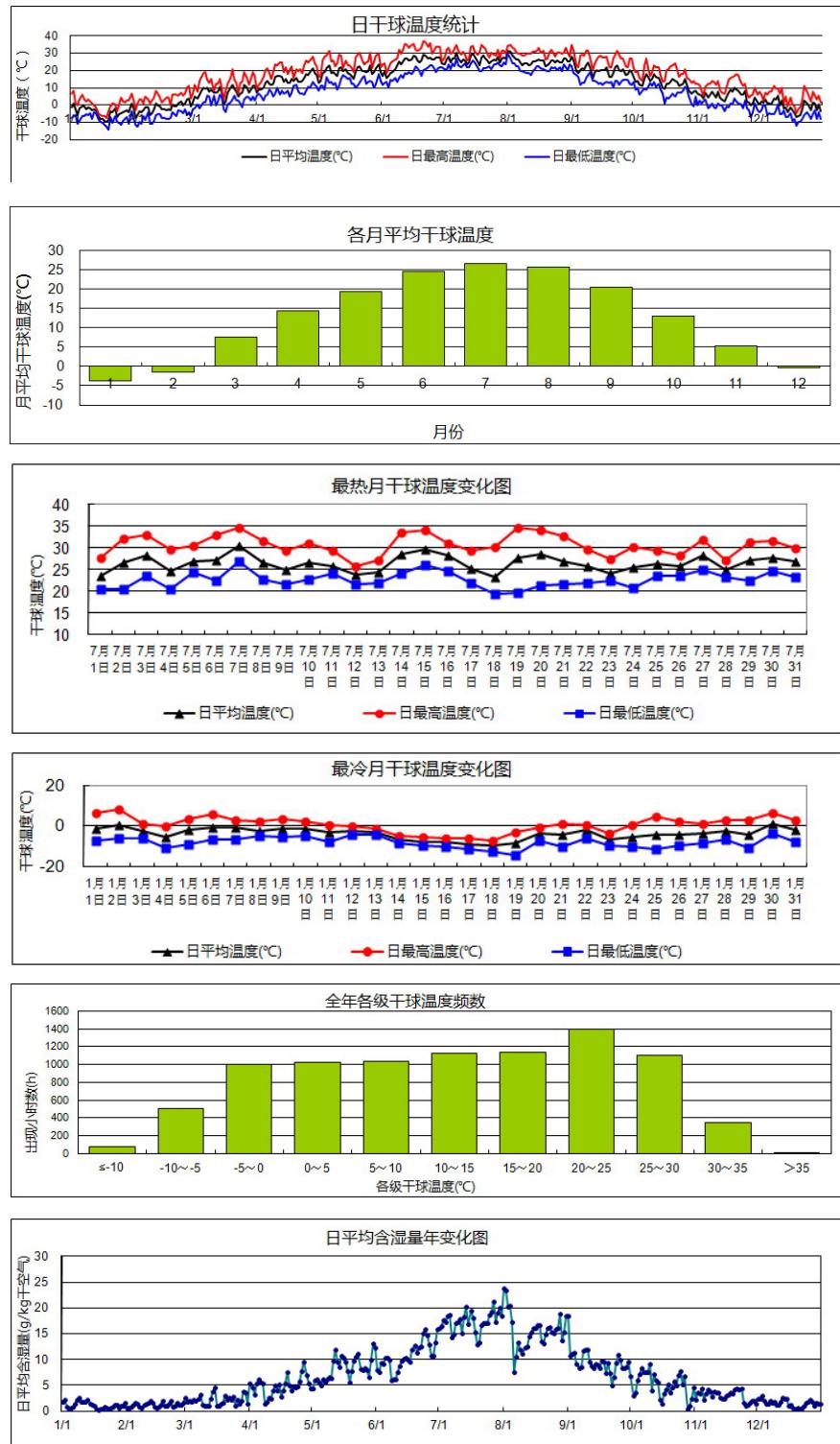
地理东经(度)：116.47

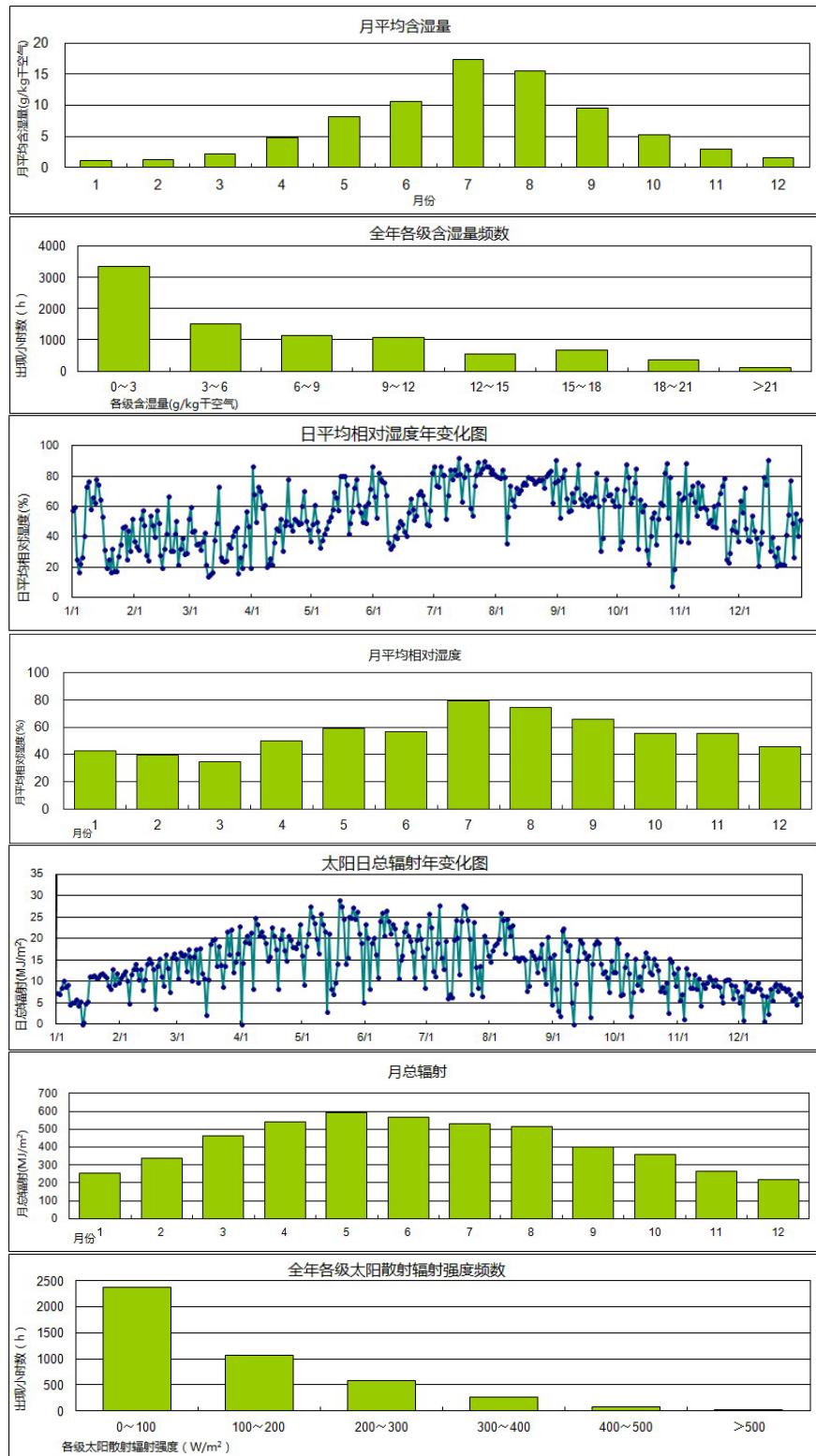
海拔高度(米)：31.3

常年大气压(帕)：101169

气象年类型：典型气象年

典型气象(设计典型)年逐时参数报表





	单位	数值
采暖控制温度	℃	18.0
采暖度日数HDD18	℃·日	2794.8
采暖度小时数HDD18	℃·小时	69230.6
空调控制温度	℃	26.0
空调度日数CDD26	℃·日	70.9
空调度小时数CDH26	℃·小时	3698.5

度日数和度小时数

设计用室外气象参数	省份	北京	单位
站名	北京		
采暖室外计算温度	-7.5	℃	
设计计算用采暖期日数	122	日	
设计计算用采暖期初日	11月14日		
设计计算用采暖期终日	3月15日		
冬季通风室外计算温度	-7.6	℃	
冬季空气调节室外计算温度	-9.8	℃	
冬季空气调节室外计算相对湿度	37	%	
冬季室外平均风速	2.7	m/s	
冬季室外最多风向的平均风速	4.5	m/s	
冬季最多风向	NNW		
冬季最多风向的频率	14	%	
冬季室外大气压力	102573	Pa	
冬季日照百分率	57	%	
夏季通风室外计算温度	29.9	℃	
夏季通风室外计算相对湿度	58	%	
夏季空气调节室外计算干球温度	33.6	℃	
夏季空气调节室外计算湿球温度	26.3	℃	
夏季空气调节室外计算日平均温度	29.1	℃	
夏季室外平均风速	2.2	m/s	
夏季最多风向	SE		
夏季最多风向的频率	12	%	
夏季室外大气压力	99987	Pa	
年最多风向	SSW		
年最多风向的频率	10	%	
极端最高温度	41.9	℃	
极端最低温度	-18.3	℃	

(中国建筑热环境分析专用气象数据集)

下载的数据包含三种格式文件：

EPW: EnergyPlus 的气象文件EnergyPlus weather files

DDY: 区域设计条件文件design conditions files for the location

STAT: 数据摘要a summary report on the data

名称	修改日期	类型	大小
CHN_Beijing.BeiJing.545110_CSWD.ddy	2010/5/25 18:50	IDFEditor Document	17 KB
CHN_Beijing.BeiJing.545110_CSWD.epw	2010/5/25 18:50	EPW 文件	1,731 KB
CHN_Beijing.BeiJing.545110_CSWD.stat	2010/5/25 18:50	STAT 文件	19 KB

在美国能源网站下载同一地区的气象数据资料可能会存在多种来源不同的文件：

• • •	
Beijing Beijing 545110 (CSWD)	
Beijing Beijing 545110 (CTYW)	
Beijing Beijing 545110 (IWEC)	
Beijing Beijing 545110 (SWERA)	
Beijing Miyun 544160 (CSWD)	

对于不同文件的来源可以查询该网站的气象数据说明 http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm?region=2_asia_wmo_region_2&country=CHN&cname=China

Weather Data Sources

Chinese Standard Weather Data (CSWD)

Developed for use in simulating building heating and air conditioning loads and energy use (一般用于热湿环境模拟), and for calculating renewable energy utilization, this set of 270 typical hourly data weather files. These data were developed by Dr. Jiang Yi, Department of Building Science and Technology at Tsinghua University and China Meteorological Bureau. The source data include annual design data, typical year data, and extreme years for maximum enthalpy, and maximum and minimum temperature and solar radiation.

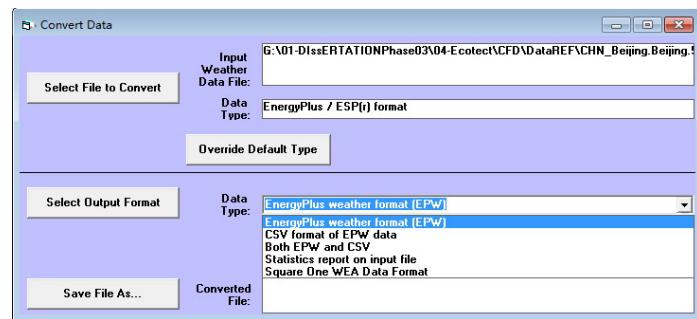
Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)

The Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) project, funded by the United Nations Environment Program, is developing high quality information on solar and wind energy resources in 14 developing countries. (一般用于日照和风分析) Typical year hourly data are available for 156 locations in Belize, Brazil, China, Cuba, El Salvador, Ethiopia, Ghana, Guatemala, Honduras, Kenya, Maldives, Nicaragua, and Sri Lanka. The data are available from the SWERA project website.

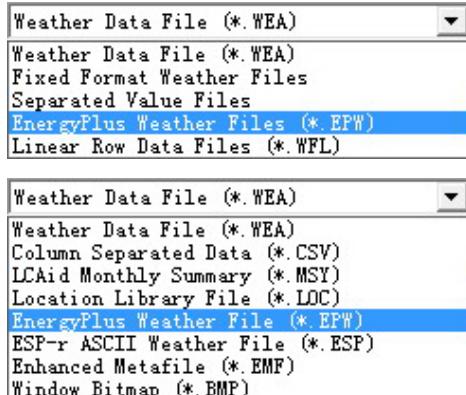
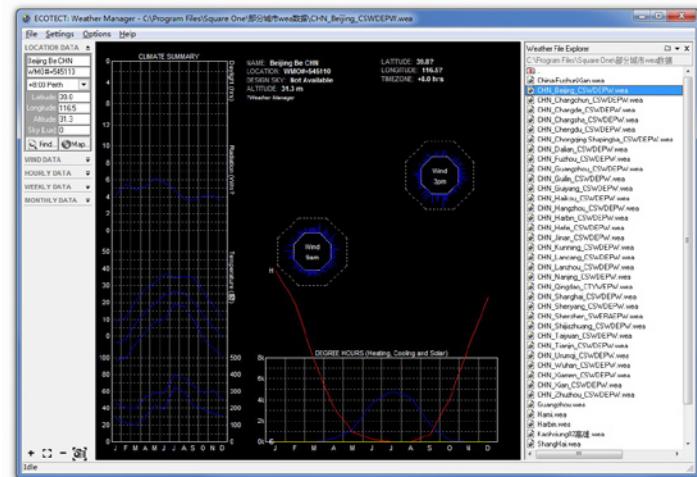
借助EnergyPlus Weather Converter 工具可以将U.S DEPARTMENT OF ENERGY 官网气象数据格式进行转换，用于Energyplus之外的分析程序，例如Ecotect 的WEA 格式。



Weather Statistics and Conversions



数据的转换除了可以使用 EnergyPlus Weather Converter 之外，也可以使用单独或者嵌入 Ecotect中的Weather Manager工具。



在WeatherManager中可以打开的文件格式，其中包括 EnergyPlus Weather Files(*EPW)格式文件

在WeatherManager中可以导出转换的文件格式

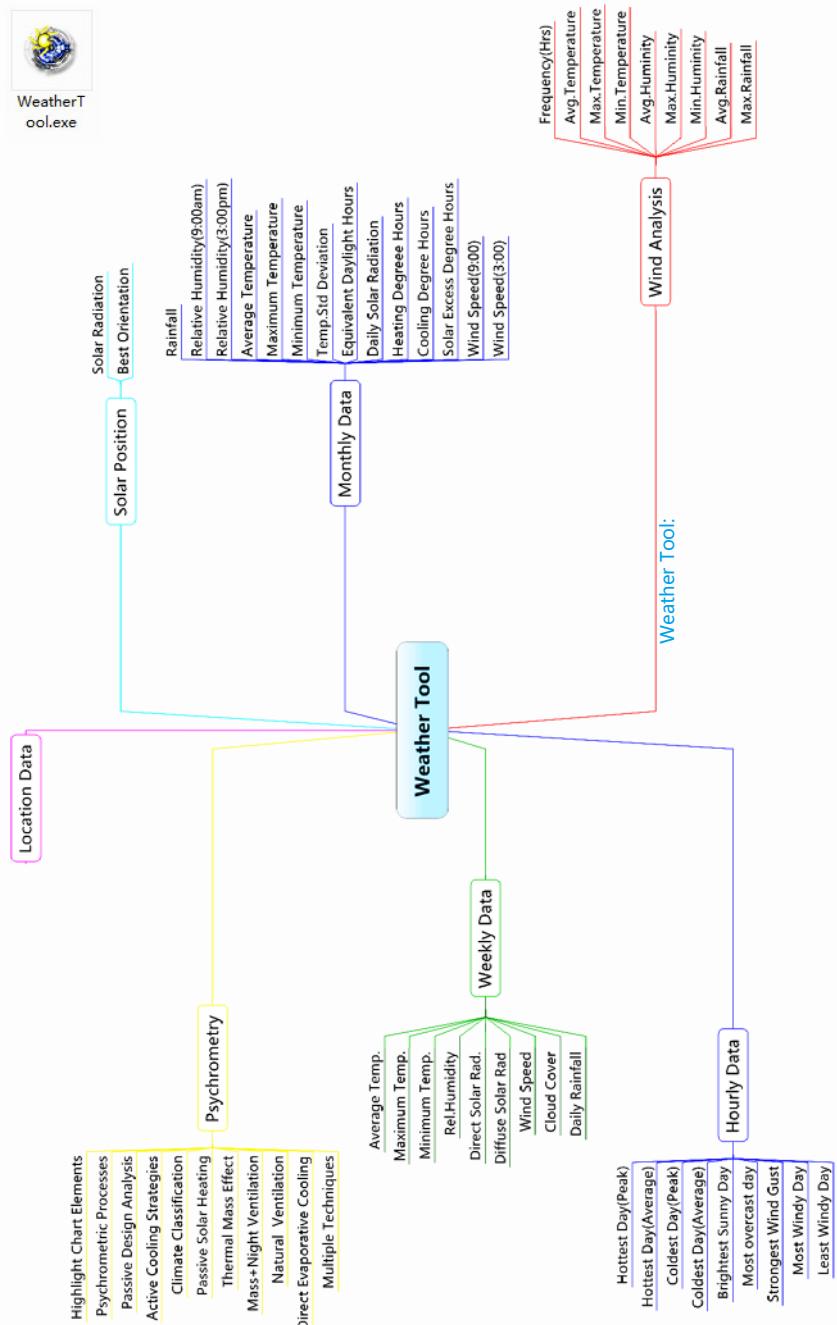
•国家和地方气象局

可以在国家和地方气象局获取一定的气象数据资料，但是，一般气候特点和气象预报，仅可以作为设计区域气象分析的辅助参考信息；

气象数据分析

注：学习Weather Tool和Ecotect软件的推荐书籍《Autodesk Ecotect Analysis绿色建筑分析应用》和《ECOTECT 建筑环境设计教程》。

针对建筑设计过程中的特点和要求，Square One公司开发了可视化的逐时气象数据分析和转换工具Weather Tool，WT除了可以将气象数据以可视化的方式直观显示，同时可以计算最佳朝向，使用焓湿图分析热环境，给出主、被动式策略参考。



数据分析的架构需要原始数据的完整性，如果某一项，例如云量(Cloud Cover)数据短缺的话，Weather Tool就无法进行相关的分析与图示。

典型年逐时气象数据：

计算机技术的发展，以及室内热环境控制要求和系统运行品质要求的提高，通过计算机模拟计算的方法可以有效地预测建筑热环境在没有环境控制系统和存在环境控制系统时可能出现的状况。然而，计算机模拟计算所需要的气象资料，以EnergyPlus，Ecotect为例需要的是逐时气象数据，那么对气象数据提出了新的要求。一是为具有代表性的统计气象数据，二是适合更详细计算的逐时气象数据，《中国建筑热环境分析专用气象数据集》即为适于此模拟要求的气象数据研究成果，具有较高的权威性。对于美国能源部网站所提供的逐时气象资料，其提供气象数据的城市数量要多于《中国建筑热环境分析专用气象数据集》，但是数据的真实可靠性需要针对不同区域模拟的数据进行核实。

注：典型气象年-以近30年的月平均值为依据，从近10年的资料中选取一年各月接近30年的平均值作为典型气象年。

日轨分析

Sun Path Diagrams-Stereographic Diagram :

可以在日轨图中直接读出任何时日的太阳高度和方位角，比从一般图表中读取更加的方便和有价值。Weather Tool中给出了几种日轨图表示的方法，上图为Stereographic Diagram水平太阳轨迹图。

水平太阳轨迹图是绘有高度角和方位角网格线的天穹，如同世界地图，通常以墨卡托圆柱投影法或南北极投影法形成。高度角以一系列的同心圆表示，而方位角沿最外圆环从0~180度 °标示出来。因此可以从水平太阳轨迹图中读取任何时间的太阳高度角和方位角。

图中也标示出来了时间线，为真太阳时 (True Solar Time)，从6:00到18:00，太阳从正东方升起，在正西方落下。

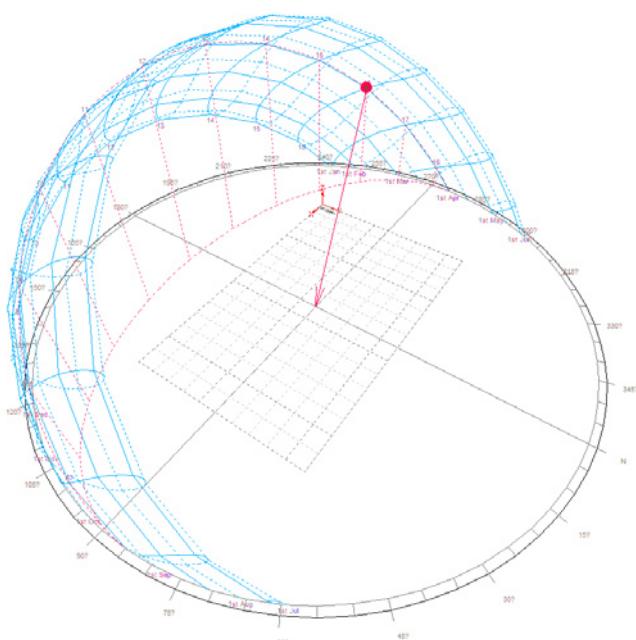
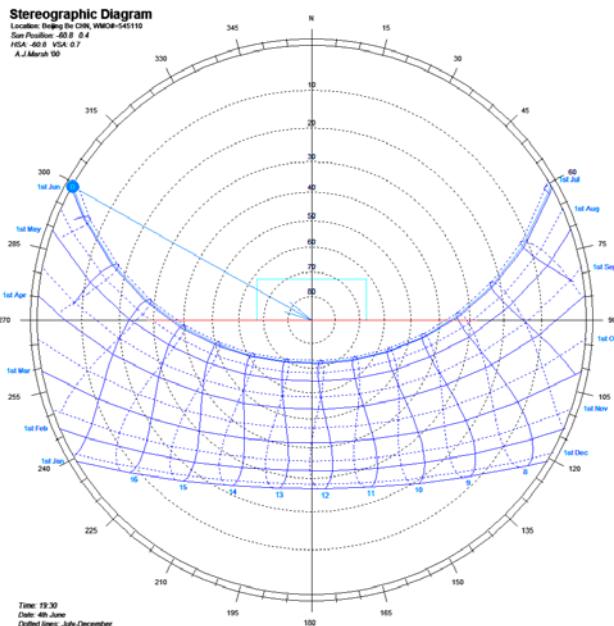
最佳朝向 Optimum Orientation

与热辐射 Incident Solar Radiation :

在Weather Tool中可以对各朝向面上的全年太阳辐射进行分析对比，并可以根据全年中过热期和欠热期内的太阳辐射得热量计算本地的相对最佳朝向，适合协助建筑平面布局和规划设计。

所谓最佳朝向是考虑了过冷时间里得到太阳辐射较多，过热时间里得到太阳辐射较少，二者权衡折中 (Compromise) 的一个方向。

图中：橘黄色箭头 (Ecotect中黄色) 代表最佳朝向为162.5度；



粗的蓝线箭头 (Ecotect中粗的红色) 代表最差朝向为72.5度;

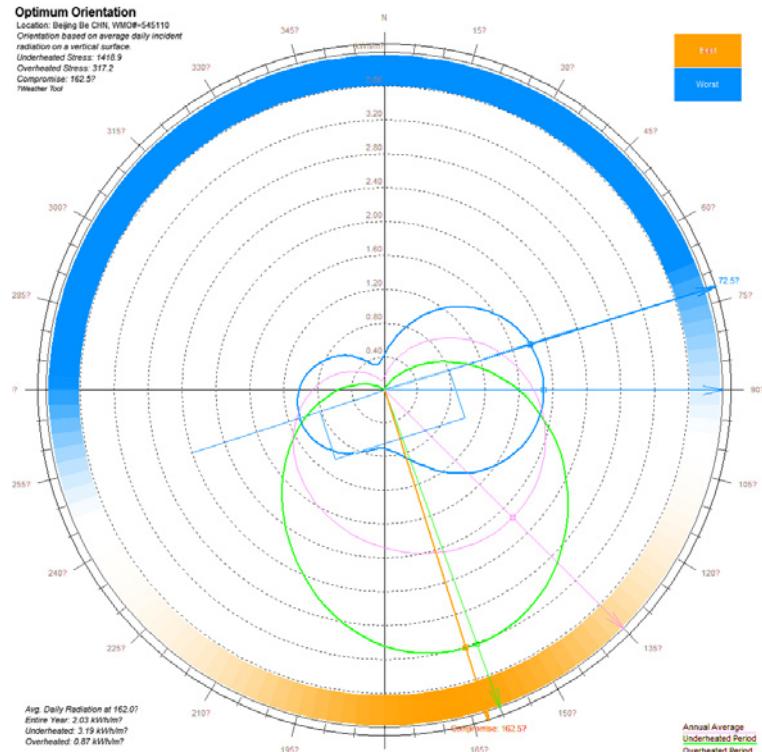
粉色箭头 (Ecotect中绿色箭头) 代表全年平均曝辐射量最多的朝向, 约为135度;

绿色箭头 (Ecotect中蓝色箭头) 为过冷时间内曝辐射量最多的朝向为160度;

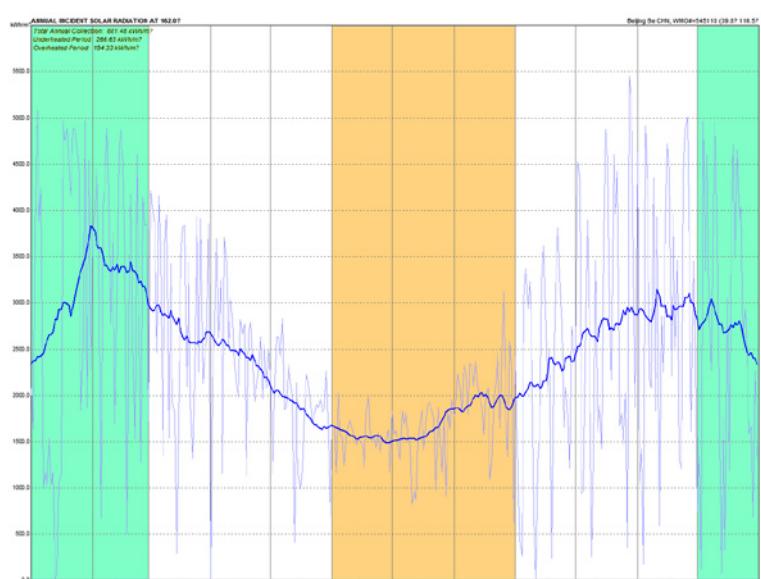
细蓝色箭头 (Ecotect中细红色箭头) 为过热时间内曝辐射量最多的朝向为90度。

左上角的文字Underheated Stress表示过冷时间内各个朝向的总曝辐射量, 为 1418.9Wh/m^2 (图中绿色圈 (Ecotect中蓝色圈) 包含的总曝辐射量); Overheated Stress表示过热时间内各个朝向的总曝辐射量, 为 $317.21\text{418.9}\text{Wh/m}^2$ (图中蓝色圈 (Ecotect中红色圈) 所包含的总曝辐射量); Compromise表示最佳朝向为162.5度。

左下角的文字中Entire Year表示全年平均曝辐射量最多朝向的曝辐射量, 为 2.03kWh/m^2 (图中粉色圈与粉色箭头 (Ecotect中绿色圈与绿色箭头) 相交点所表示的曝辐射量); Underheated表示过冷时间内曝辐射量最多朝向的曝辐射量, 为 $3.192.03\text{kWh/m}^2$ (图中绿色圈与绿色箭头 (Ecotect中蓝色圈与蓝色箭头) 相交点所表示的曝辐射量); Overheated表示过热时间内曝辐射量最多朝向的曝辐射量, 为 $0.87192.03\text{kWh/m}^2$ (图中蓝色圈与细蓝色箭头 (Ecotect中红色圈与细红色箭头) 相交点所表示的曝辐射量)。

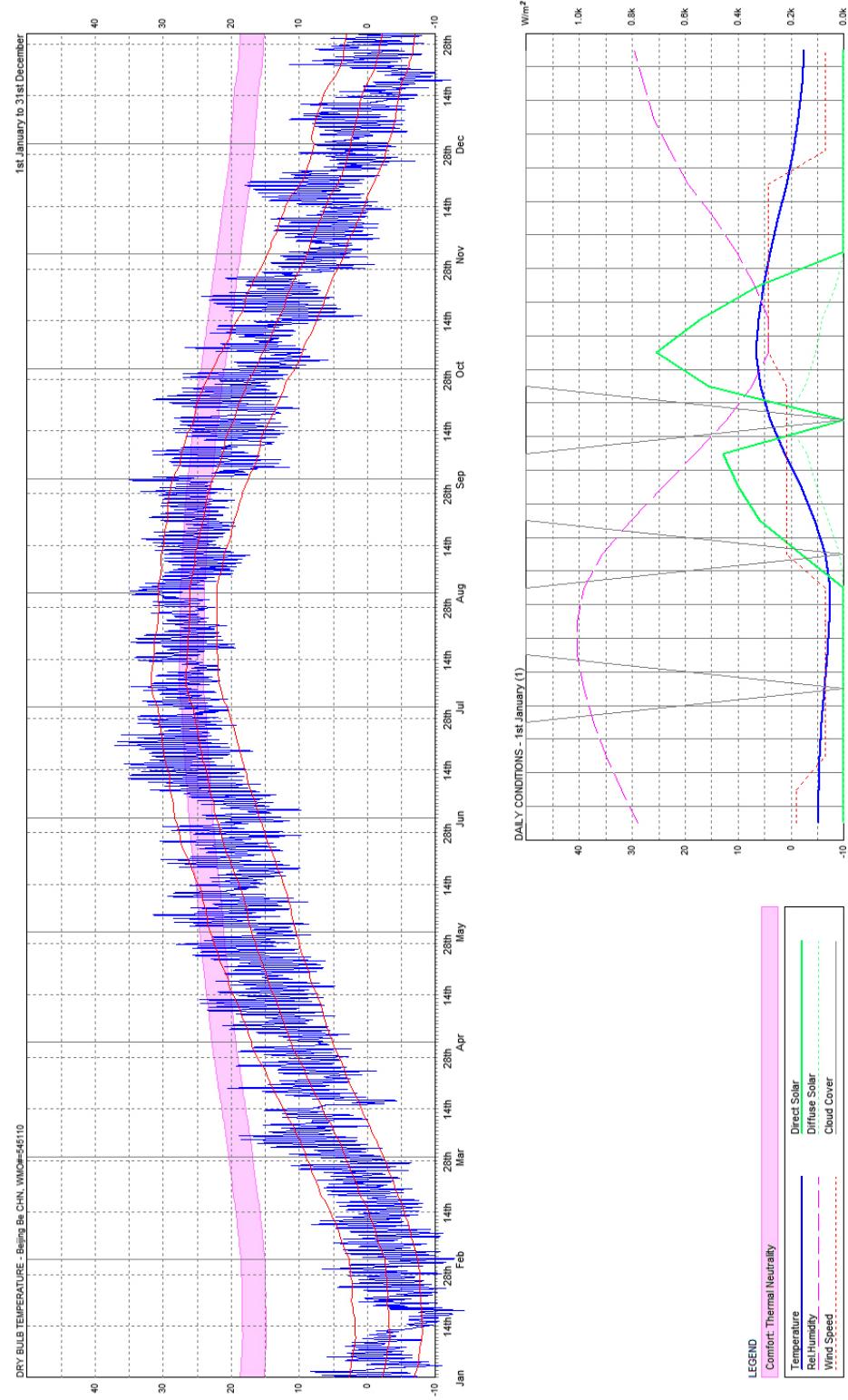


不同方向 (指建筑朝向) 的年太阳辐射计算, 方向范围 ($-180^\circ \sim 180^\circ$) , 图中给出了基于计算最佳辐射朝向北京区域 (162度) 的年辐射变化。

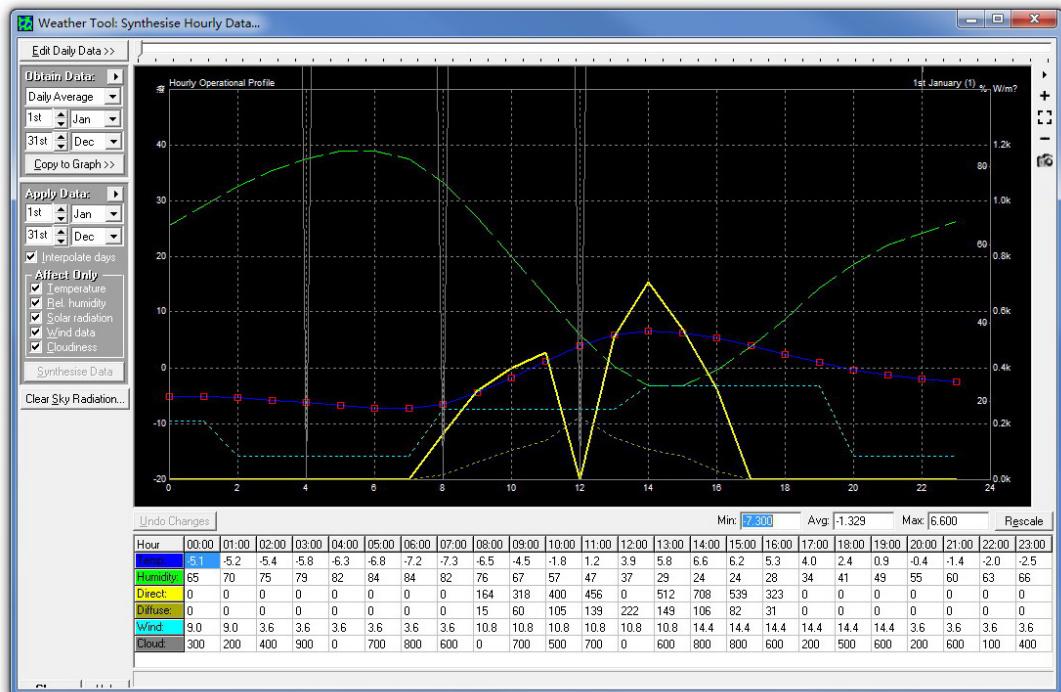


气象数据的可视化 Weather Data Visualization:

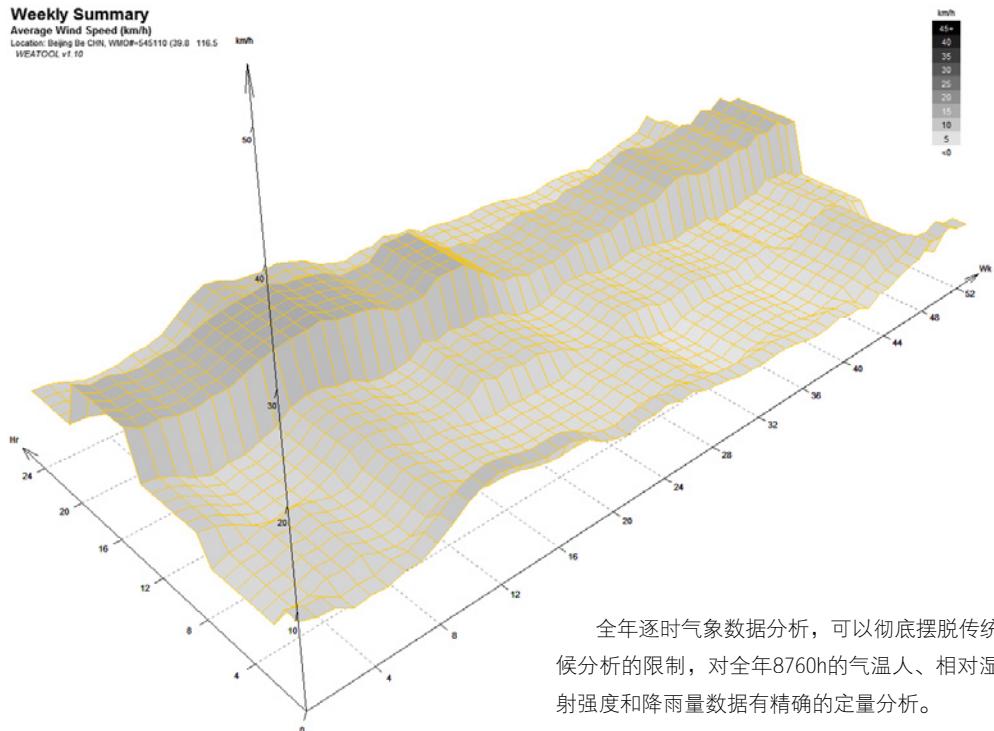
基于Weather Tool工具对Energy Plus官方网站气象数据的图表统计分析。下图为北京干球各月温度以及1月1日太阳直射辐射强度、相对湿度、太阳散射辐射强度、风速、云量的图表显示。



在Weather Tool中可以编辑所获得的气象数据

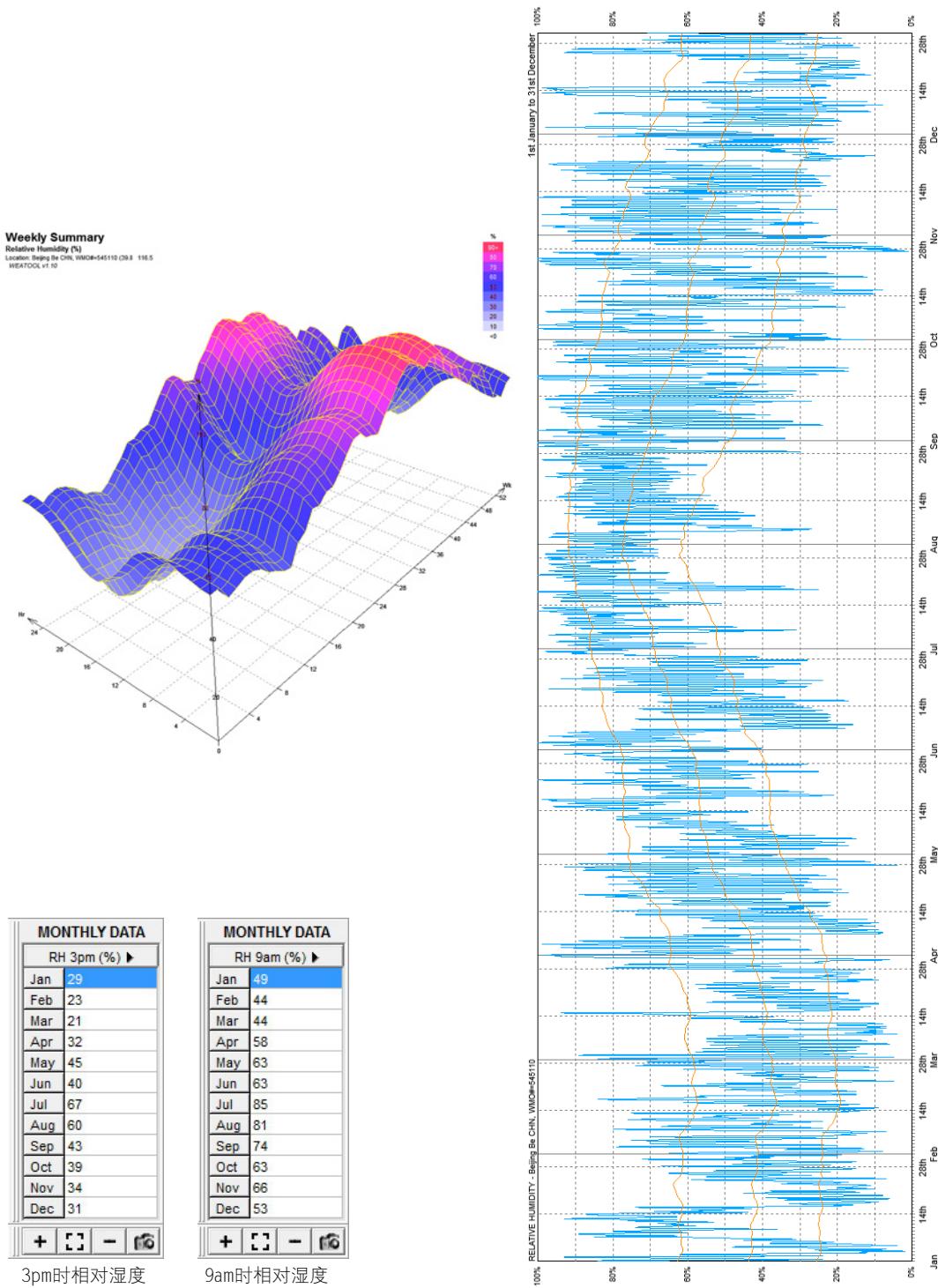


通过气象数据可视化处理，可以方便的读出数据变化的特点，例如图中按星期划分气象数据的统计图示，易于读出风速年变化在24星期时，年风速降低，在每日风速变化规律中，16时风速有较大幅度提升。



全年逐时气象数据分析，可以彻底摆脱传统描述气候分析的限制，对全年8760h的气温、相对湿度、辐射强度和降雨量数据有精确的定量分析。

在描述过程中根据设计时对设计的要求，可以查看小时数、星期数、月数上气象数据的变化。下面是以相对湿度的气象数据为例，依据不同时间长度上的统计图示。



热舒适性与焓湿图（温湿图表） The Psychrometric Chart:

热舒适性

“热舒适性是指对热环境感到满意的心理状态。”——美国采暖，制冷，空调工程师协会标准（ASHARE Standard）

影响人体热舒适性的因素-环境物理状况

与人热舒适度密切相关的环境物理因素的主要四个环境条件：

室内气温

- 室内温度的相应规定：冬季室内气温一般应在16~22℃；夏季空调房间的气温多规定为24~28℃，并以此作为室内计算温度；
- 室内实际温度则由房间内得热和失热、围护结构内表面的温度及通风等因素构成的热平衡所决定，设计者的任务就在于使实际温度达到室内计算温度；

室内空气湿度

- 室内空气湿度直接影响人体的蒸发散热；
- 一般认为最适宜的相对湿度应为50%~60%。在多数情况下，即气温在16~25℃时，相对湿度在30%~70%范围内变化，对人体的热感觉影响不大；
- 如湿度过低（低于30%）则人会感到干燥、呼吸器官不适；湿度过高则影响正常排汗，尤其在夏季高温时，如湿度过高（高于70%）则汗液不易蒸发，最令人不舒适；

室内风速

- 室内气流状态影响人体的对流换热和蒸发换热，也影响室内空气的更新。在一般情况下。对人体舒适的气流速度应小于0.3 m/s；但在夏季利用自然通风的房间，由于室温较高，舒适的气流速度也应较大；

均辐射温度

- 如果平均辐射温度（MRT）与气温相差很多的话，就必须考虑MRT的作用。在冬季面南的窗户，因为阳光的辐射导致MRT增高，会使人体感觉到热，即使此时的环境温度在舒适的24℃；当夜晚，情况则相反，会感觉到冷。同时，必须注意到人体皮肤和衣物的平均温度约在29℃左右，这个温度决定了人体与周围环境的辐射交换状态；

室内热环境的量化表示及综合评价

- 热环境各个因素是互不相同的物理量，但对人们的热感觉来说，它们相互之间又有着密切的关系；改变其中一个因素往往可以补偿其他因素的不足，如室内空气温度低而平均辐射温度高和室内空气温度高而平均辐射温度低的房间就可以有同样的热感觉。

影响人体热舒适性的因素-个体差异

不同个体对于热舒适的感觉是有差异的：

热舒适的瞬感现象

在冬季早晨，当人进入阳光暖照的房间时立即就感到温暖，这是温室效应的辐射和瞬感现象综合作用的结果，即使此时周围的空气温度可能低于0℃，身体也并没有真正加热，人仍然有愉快的温暖感。同样，当人从不舒适的热环境进入到凉快环境时，也同样立即感到轻松，因为人的热调节机制能够用调节皮肤和血液温度的办法预感出最终状况；

服装调节

在热舒适方面，服装的作用不仅仅是御寒，而且还可以用来控制辐射和对流交换，起到遮阳和防风通风的作用。服装调节热舒适是有限度的，由于生活习惯的差异，服装的热舒适调节作用也是不同的；

性别差异

实验表明，热舒适感觉在性别之间是有差异的，女性选择的舒适温度比男性稍高一点，但是实验也表明热舒适感的性别差异非常小；

个体状况

一般来说，瘦人比胖人耐热。虽然在坐着时两者对温度的选择没有差异，但是一旦增加活动量，新陈代谢显然对肥胖者不利，特别是在炎热的地区或季节更是如此；

适应性差异

适应环境是人在一个全新的环境中减轻所受困扰的过程。不同人的适应性是有差异的，一般来说，80%的困扰可以在短时间内减轻，而剩下的困扰可能需要很长时间才能减轻，调节新陈代谢产热的内分泌也要经过长期才能适应当地环境，而且，有些人对某些情况永远都不能适应；

民族差异

当其他条件相同时，各民族对水土、气候、服装、精神等环境因素的适应性是不一样的。肤色除防止对皮肤深层侵害外，在适应环境方面意义不大。事实表明，居住在湿热地区的人喜欢的温度比适应了寒冷地区的人更高一些，他们极少甚至没有经受过低于19°C的气候，因此他们冬季在寒冷的北方地区旅行时，往往会比当地人穿的少；

年龄差异

医学研究表明，儿童和老人在平衡热和失热方面不如成人，因此他们对热环境的敏感性更高，对舒适性的要求更高；

恒定与变化

一般认为，热环境不舒适会降低脑力和体力劳动的工作效率，因此有必要保持环境的热舒适性。但是，恒温恒湿的环境也不能获得最大的工作效率和最舒适的主观评价；相反，环境因素的小幅度变化可以改善人们的工作行为，这种反应称为唤起。在人工空调环境中，模仿自然条件下的温度和风速的小幅度波动，已经引起人们的研宄兴趣；

稳态热环境下热舒适的评价指标：

建筑核心目标是为人们提供一个舒适、健康的室内生活与工作热环境。对热环境的评价可以根据三类不同的标准：

生存标准

- 人是一种高度复杂的恒温动物

恒温动物和人都需要相当稳定的温度。人体的温度维持在37°C (98.6°F)，对这一温度的任何微小变化都能造成严重的后果甚至死亡；

- 人对环境有适应性的生理反应

人体中的若干机制，用以保证散失的热与获得的热相当，从而维持人体正常的体温，例如寒冷气候条件下，人体会通过加速血液循环，肌肉产热等措施弥补热量的损失，而在炎热的环境，可以通过汗腺分泌汗液蒸发达到降温的目的；

- 适应性局限在一定的范围之内

人体各个部分的温度存在明显的梯度，以保护体内重点器官免受过冷过热的侵扰，但是这种适用性仅局限在一定范围之内，超出这个范围就会感到不舒适；

- 活的人体会不断发出热量。如果这种热量不能通过传导、对流和辐射而散热的话，人体就会感到不适，严重时至于极度难受，最终生理功能停止；

舒适性标准

- 舒适就是将人从热难受中解脱出来；
- 对舒适，不同的人有不同的反应；
- 如果紧邻的外部环境引起过多的传导、对流和辐射热量损失，也会产生不舒适感；
- 到底散热多少就算过多，到底总散热量中通过传导、对流和辐射去散热的比例如何，这对每一个人来说是各不相同的，但是如果考虑到人都有个适应环境的过程，那就可定出对众人都接近的“舒适区”；

工作效率标准

- 热环境会影响人的敏感、警觉、疲乏、专注和厌烦程度，通过上述作用对体力劳动和脑力劳动的效率产生影响；

目前应用最广泛的稳态热环境舒适标准是被编入国际标准ISO7730的预测平均投票数和预测不满意百分数(PMV-PPD)Predicted mean vote -predicted percentage dissatisfied评价指标，它是在大量实验数据统计分析的基础上，并结合人体的热舒适方程，提出表征人体热舒适的一个较为客观的指标。该指标综合考虑了人体活动程度、衣服热阻、空气温度、平均辐射温度、空气湿度和空气流动速度等因素，并从心理、生理学主观热感觉得等级为出发点，是迄今为止考虑人体热舒适感诸多因素最全面的评价指标。

PMV指标是将反映人体对热平衡偏离程度的人体热负荷TL引入得出的。人体热负荷TL的定义为人体产热量与假定人体保持舒适条件下的平均皮肤温度 t_{sk} 和出汗造成的潜热 E_{sw} 时向外界散出的热量之间的差值。Fanger收集了1396名美国和丹麦受实验者的冷热感觉资料，得出：

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & [0.303 \exp(-0.036 M) + 0.0275] \times \\ & \{M - W - 3.05[5.733 - 0.007(M - W) - p_a] - 0.42(M - W - 58.15) - 1.73 \times 10^{-2} M (5.867 - p_a) - \\ & 0.0014 M (34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cf} [(t_{cf} + 273)^4 - (t_a + 273)^4] - f_{cf} h_c (t_{cf} - t_a)\} \end{aligned}$$

PMV指标代表了同一环境下绝大多数人的感觉，但是人与人之间存在生理差别，因此PMV指标并不一定能够代表所有个人的感觉。因此Fanger又提出了预测不满意百分比PPD指标来表示人群对热环境不满意的百分比，并利用概率分析方法，给出了PMV与PPD之间的定量关系：

$$\text{PPD} = 100 - 95 \exp[-(0.03353 \text{ PMV}^4 + 0.2179 \text{ PMV}^2)]$$

1984年国际标准化组织提出了室内热环境评价与测量的新标准化方法ISO 7730，它对PMV-PPD指标的推荐值在-0.5~+0.5之间，相当于人群中允许有10%的人感觉不满意。

此外，与PMV模型相似的还有Gagge教授提出的有效温度指标ET*和标准有效温度指标SET。这类模型共同的特点是稳态，以人体热平衡方程为基础，即认为环境参数不随时间改变，而人体是外界热刺激的被动接受者。通过两者之间的热湿交换来影响人体的生理参数，进而产生不同的热感觉。

由于PMV是在试验条件下得出的，对于中性、稳态、风速较小的环境，可以较好的预测人体的热感觉状况，而且公式推导采用了热舒适的条件（即皮肤温度、出汗率与人的活动水平呈线性关系），没有考虑偏离舒适时实际出汗的热损失，故当偏离热舒适较远（如PMV值小于-2或大于2时），就会产生较大偏差。尤其是在热的一端，由于汗液的蒸发散热，会使结果明显失真。

不少实验结果表明，按PMV计算的最适温度同实验有出入。香港理工大学的研究指出，无论冬季还是夏季，按PMV计算的温度要比实际温度低约1.5℃。1998年，澳大利亚的麦觉里大学(Macquarie University)的Richard等提出了“适应性模型(Adaptive Model)”。这一模型是在来自四大洲宽广的气候区域的2100分现场研究的数据上建立的。其核心思想是：人不仅是环境热刺激的被动接受者，同时还是积极的适应者，人的适应性对热感觉的影响超出了自身热平衡，对环境的适应会使逐渐对该环境满意。

越来越多的研究表明，在20世纪70年代欧美等国家认为研究对象通过实验得到的PMV-PPD指标是不适合所有国家和地区的。因而绝对数值往往没有太多的实际意义，但是不同环境下PMV值得相对变化，对设计的策略提供了很

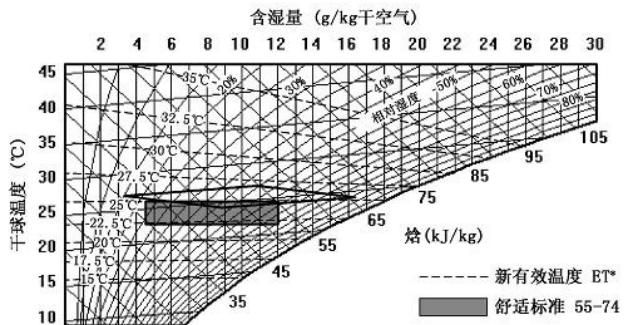
好的参考。

卡他冷却能力是1914年由HILL最早提出的。该指标综合了平均辐射温度，空气温度和空气流速的影响。1929年Dufton研制了一种拟人器 (Eupatheostat)，该装置能够在空气温度、热辐射、空气速度变化的条件下保持室温恒定。1936年，Dufton提出了当量温度 (Equivalent Temperature)指标。同年，Bedford用卡他温度计，Mark I型拟人器等几种仪器对工厂的热环境进行了现场测量和问卷调查。通过回归分析，得到了当量温度的解析表达式。1976年，Mcintyre提出了主观温度 (Subjective Temperature)指标，并给出了计算公式。该指标将人体变量分开，更便于实际应用。

1923年Houghton和Yaglou确定了包括温度、湿度两个变量的裸体男子的等舒适线，并由此创立了对热环境研究具有深远影响的有效温度指标ET (Effective Temperature)。1924~1925年Houghton, Yaglou和米勒又进一步研究了包括空气流动和衣着影响的实验。1932年Vernon和Warner使用黑球温度代替干球温度对热辐射进行了修正，产生了修正有效温度CET (Corrected Effective Temperature)。1950年Yaglou等对热辐射进行了修正，提出了当量有效温度的概念。1971年Pierce研究所的Gagge提出了新的有效温度ET* (Net Effective Temperature)指标。该指标综合了温度、湿度对人体热舒适的影响，适用于穿标准服装和坐着工作的人群，并已为ASHRAE55-74舒适标准所采用。随后，又综合考虑了活动水平和服装热阻的影响，提出了众所周知的标准有效温度指标SET (Standard Effective Temperature)。有效温度ET的定义：将干球温度、湿度、空气流速对人体温暖感或冷感的影响综合成一个单一数值的任意指标，数值上等于产生相同感觉的静止饱和空气的温度。

新有效温度 ET* 改变了有效温度过高估计湿度在低温下对凉爽和舒适状态的影响，把皮肤湿润度的概念引进来。标准有效温度SET*是一个等效的干球温度。即SET*把真实环境下的空气温度、相对湿度和平均辐射温度规整为一个温度参数，使具有不同空气温度、相对湿度和平均辐射温度的环境能用一个SET*值相互比较。

ASHRAE舒适区：图中斜画的一组虚线即为等有效温度线，它的数值是在 $\Phi=50\%$ 的相对湿度线所标注对应的温度值。如 $t=25^{\circ}\text{C}$, $\Phi=50\%$ 两线交点的虚线即为 25°C 等有效温度线，这些等有效温度线是在室内空气流动为 0.15m/s ，对静坐着，服装热阻为 0.6clo 的人员实测所得。菱形面积适用条件：身着服装热阻为 $0.6\sim 0.8\text{clo}$ ，静坐的人。平行四边形面积适用条件：身着服装热阻为 $0.8\sim 1.0\text{clo}$ ，坐着的人，活动量较大些。两块舒适区重叠处是被推荐的室内空气设计条件。



www.ehvacr.com

相关指标判定

风速相关描述与舒适性：

有多种对于风速以及其舒适性的描述，在具体计算时可以结合不同软件平台本身的设置进行选择，或者根据使用分析目的进行选择；

风速 m/s	英尺/分钟	英里/小时	相当于温度下降的幅度 (F)	对舒适度的影响
0.0508	10	0.1	0	空气静止，稍微感觉不舒适
0.2032	40	0.5	2	几乎感觉不到风，但比较舒适
0.4064	80	1	3.5	可以感觉有风而且比较舒适
0.8128	160	2	5	感觉较大的风，但在某些多风地带，当空气较热时，还可以接受
1.016	200	2.3	6	空调房间的上限风速
2.032	400	4.5	7	在气候炎热干燥地区自然通风的良好风速
4.572	900	10	9	在气候炎热潮湿地区自然通风的良好风速

1英尺 (ft) = 0.3048米 (m)

引自《建筑师技术设计指南·采暖·降温·照明》

风速 m/s	评价标准
0	Still静止的
0.1	Not Noticeable 不明显的
0.3	Barely Noticeable 可以略微察觉的
0.5	Pleasant Breeze 令人愉悦的微风
0.7	Light Breeze 微风
1.0	Hair and Papers Move 头发和纸张被吹动
1.4	Noticeably Draughty 明显通风的
1.7	Unpleasant Breeze 不愉快的风速
2.0	Gusting 强风

Cite Ecotect

风速与舒适性：	
风速 AirSpeed	人的感觉 Feeling
V<1.6m/s	感觉不到风
V<5m/s	舒适
5m/s < V < 10m/s	不舒适，行动受到影响
10m/s < V < 15m/s	很不舒适，行动受到严重影响
15m/s < V < 20m/s	不能忍受
V>20m/s	危险

代谢率：

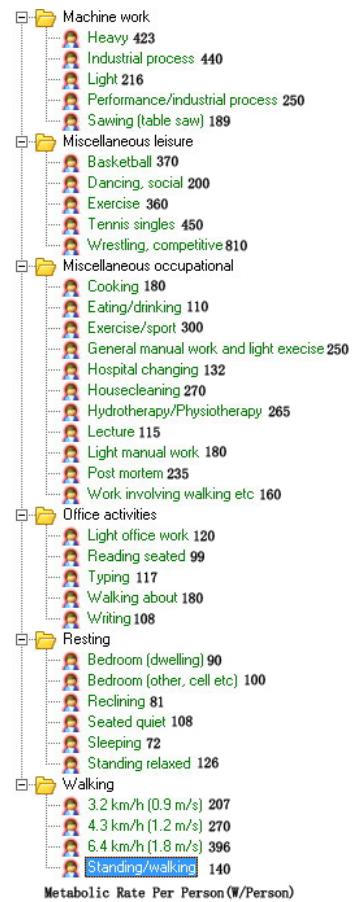
代谢率与风速一样，在具体计算时可以结合不同软件平台本身的设置进行选择，或者根据使用分析目的进行选择。

活动状态	每小时产热 (btu/h) 相当的瓦数 (W)	每小时产热 (btu/h) 相当的瓦数 (W)
睡眠	300	100
轻度劳动	600	200
行走	900	300
慢跑	2400	800

引自《建筑师技术设计指南—采暖·降温·照明》

Metabolic Rate (Met)	Criteria
0.8	Reclining 躺卧
1.0	Seated, Relaxed 休闲坐姿
1.2	Sedentary Activity(Office, Dwelling, School, Laboratory) 活动坐姿 (办公室, 处所, 学校, 实验室)
1.6	Standing, Light Activity(Shopping, Laboratory, Light Industry) 站立, 轻微活动 (购物, 实验室, 轻工业)
2.0	Standing, Medium Activity(Shop Assistant, Domestic Work, Machine Work) 站立, 中度运动 (店员, 家务, 机械加工)
1.9	Walking on the level at 2km/h 步行
2.4	Walking on the level at 3km/h
2.8	Walking on the level at 4km/h
3.4	Walking on the level at 5km/h

Cite Phoenics



Metabolic Rate Per Person (W/Person)

Cite DesignBuilder (EnergyPlus)

穿衣指数：

	Clothing Units 穿衣指数	European Unit of Thermal Insulation Thermal Insulation	
Clothing Insulation	clo	tog	$m^2 (2 K) / W$
Naked裸体	0	1tog=0.645clo	$1clo=0.195m^2 (2 K) / W$
Underpants Only仅内衣	0.2		舒适度评价时, 需要确定穿衣指数, 在
Shorts and T-Shirt短裤与T恤	0.4	Phoenics	
Trousers and Shirt长裤与衬衫	0.6		EcoTect, Design Building (EnergyPlus) 中, 基本是以clo为单位, 选定数值进行相关计算。
Light Business Suit西装	1.0		
Business Suit + Thermal保暖西装	1.5		
Jacket and Overcoat夹克和大衣	2.0		
Heavy Winter Gear冬季服装	2.5		
Arctic-Type Clothing防寒服	3.0		
Eskimo Clothing爱斯基摩人服装	4.0		

Cite EcoTect

关于单位SI (International System of Units) :

1948年召开的第九届国际计量大会作出了决定，要求国际计量委员会创立一种简单而科学的，供所有米制公约组织成员国均能使用的实用单位制。1954年第十届国际计量大会决定采用米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、开尔文(K)和坎德拉(cd)作为基本单位。1960年第十一届国际计量大会决定将以这六个单位为基本单位的实用计量单

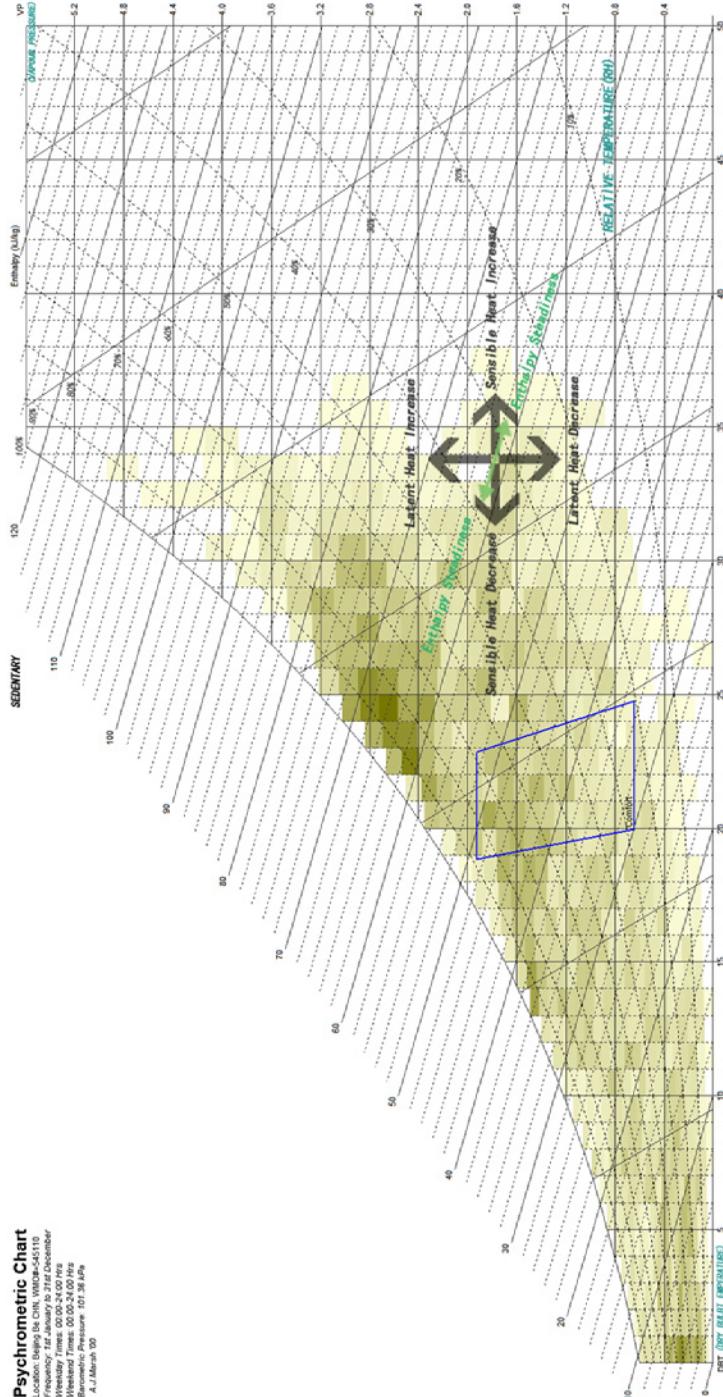
位制命名为“国际单位制”，并规定其符号为“SI”。以后1974年的第十四届国际计量大会又决定增加将物质的量的单位摩尔(mol)作为基本单位。因此，目前国际单位制共有七个基本单位。

SI base units			
Name	Unit symbol	Quantity	Symbol
米metre	m	长度length	l (a lowercase l)
千克kilogram	kg	质量mass	m
秒second	s	时间time	t
安培ampere	A	电流electric current	I (a capital i)
开kelvin	K	热力学温度thermodynamic temperature	T
坎德拉candela	cd	发光强度luminous intensity	I _v (a capital i with lowercase v subscript)
摩尔mole	mol	物质的量amount of	n

焓湿图（温湿图表）The Psychrometric Chart:

焓湿图是理解热环境个条件之间相互关系的便捷有效的工具。Weather Tool中所提供的焓湿图表示方法，可以修改纵轴变量为：相对湿度（%）、绝对湿度（g/kg）或者水蒸气分压力（kPa）。其它不同的参数，可以根据分析目的进行选择：

None	
Dry Bulb Temperature	干球温度
Wet Bulb Temperature	湿球温度
Absolute Humidity	绝对湿度
Relative Humidity	相对湿度
Vapour Pressure	水蒸气分压力
Specific Volume	比体积
Enthalpy	焓



北京的气候特征(引自北京市气候中心)

<http://www.bjclimate.com/Article/ViewArticle.aspx?id=60>

发布时间: 2005-7-28 11:28:09

北京在全国气候区划中属暖温带半湿润季风大陆性气候区。但境内地貌复杂，山地高峰与平原之间相对高差悬殊，从而引起明显的气候垂直地带性。大体以海拔700—800米为界，此界以下到平原为暖温带半湿润季风气候；此界以上山区为温带半湿润一半干旱季风气候；约在海拔1600米以上为寒温带半湿润一湿润季风气候。

北京气候的主要特点是四季分明。春季干旱，夏季炎热多雨，秋季天高气爽，冬季寒冷干燥；风向有明显的季节变化，冬季盛行西北风，夏季盛行东南风。四季气候特征如下：

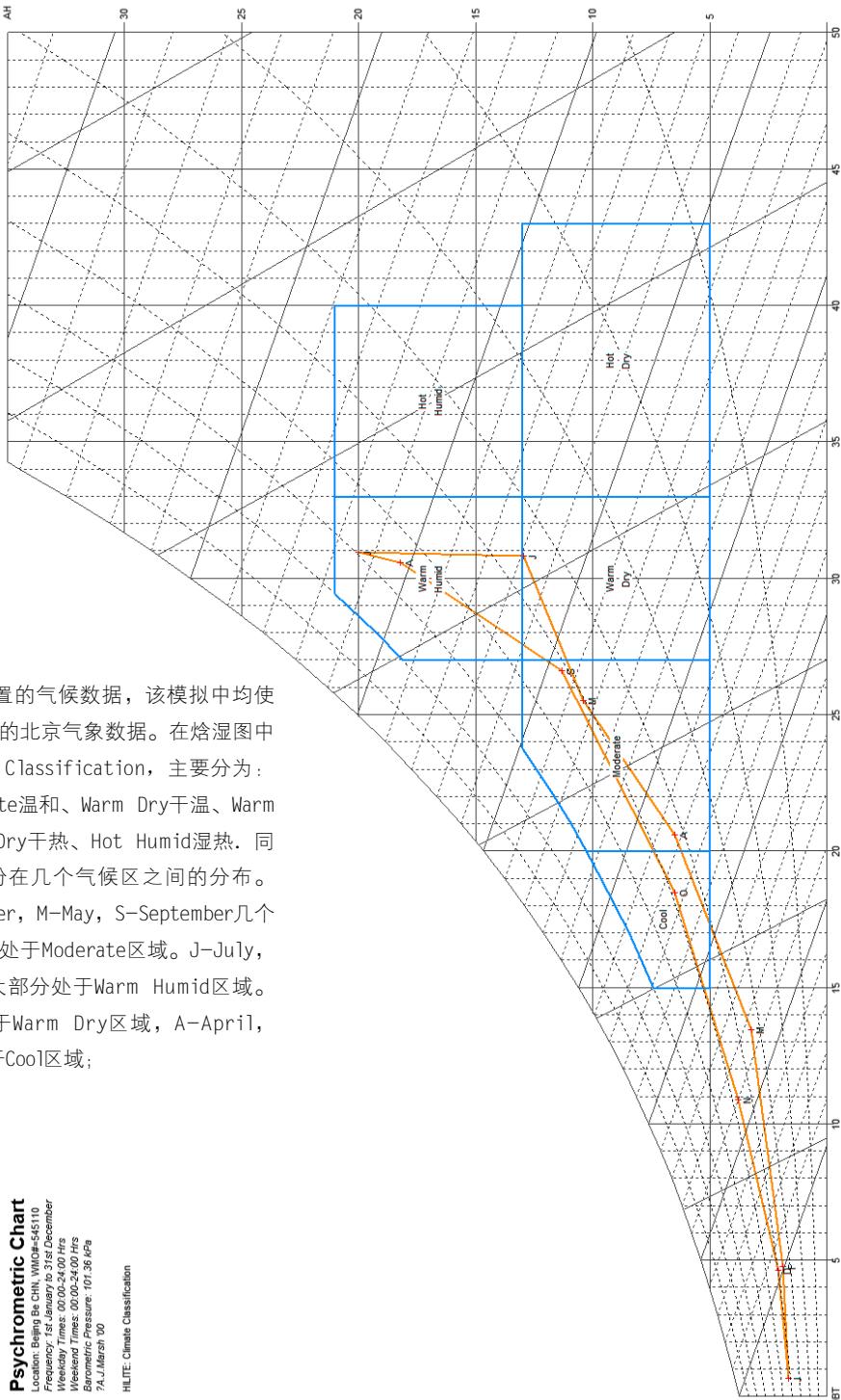
春季：气温回升快，昼夜温差大，干旱多风沙。春季随着太阳高度角的逐渐增大，白昼时间加长，地面所得热量超过支出，因而气温回升迅速，月平均温可升高9—6℃，3月平均温4.5℃，4月为13.1℃。白天气温高，而夜间辐射冷却较强，气温低，是昼夜温差最大的季节。一般气温日较差12—14℃，最大日较差达16.8℃。此外，春季冷空气活动仍很频繁，由于急剧降温，出现“倒春寒”天气，易形成晚霜冻。并多大风，8级以上大风日数占全年总日数的40%。当大风出现时常伴随浮尘、扬沙、沙暴天气。春季降水稀少，加重春旱，素有“十年九春旱”之说。

夏季：酷暑炎热，降水集中，形成雨热同季。夏季除山区外，平原地区各月平均温都在24℃以上。最热月虽不是6月份，但极端最高温多出现在6月份，1961年6月10日极端最高温为43.5℃。进入盛夏7月，是全年最热月份，平均温接近26℃，高温持久稳定，昼夜温差小。夏季降水量占全年降水量的70%，并多以暴雨形式出现。本市最大的一日降水量曾达到479毫米（1972年7月27日）。因此，山区易出现山洪，平原造成洪涝，暴雨是北京夏季主要自然灾害之一。此外，山区热对流作用较强，形成局部地区雷阵雨，并伴有冰雹，给农业造成一定损失。

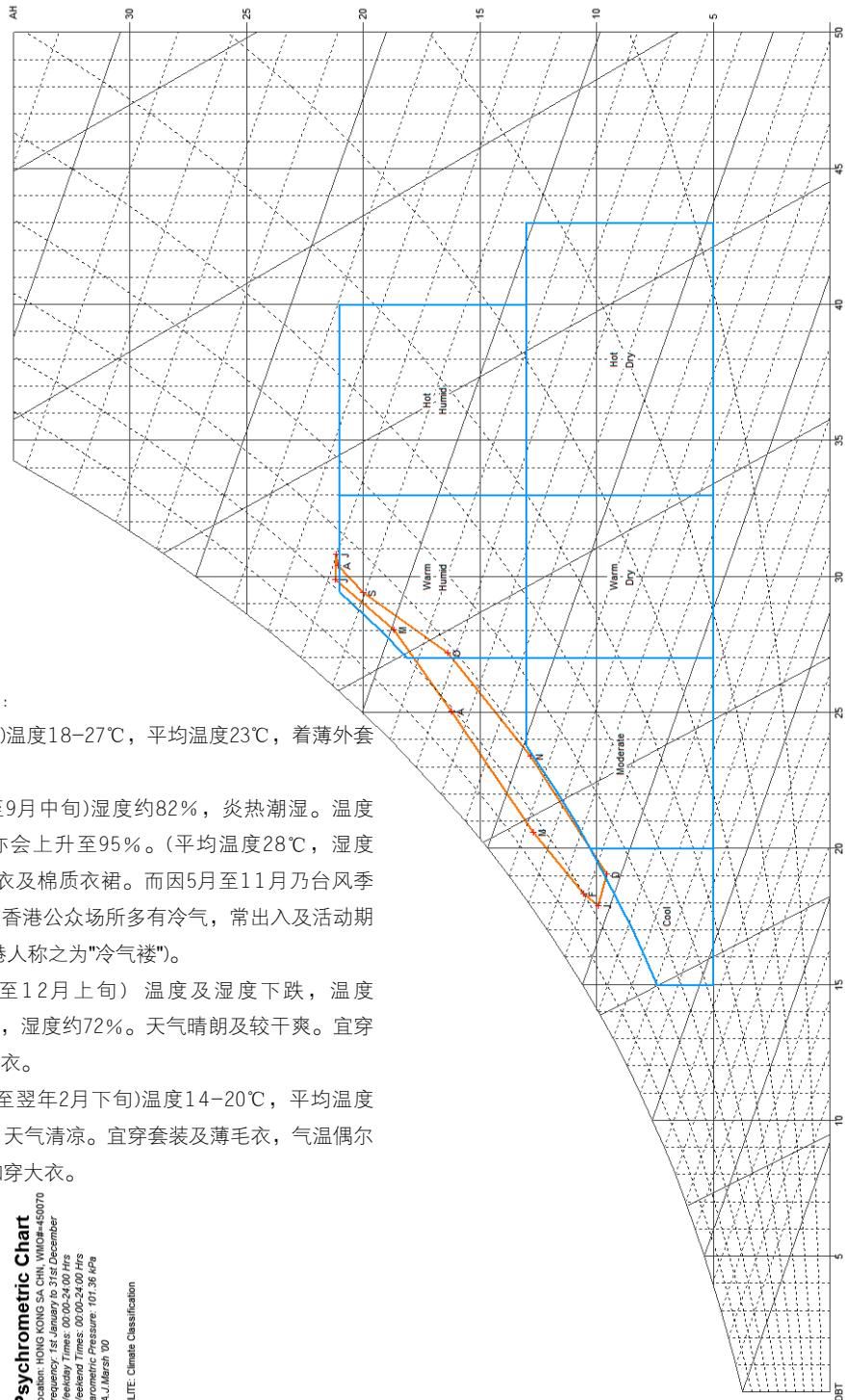
秋季：天高气爽，冷暖适宜，光照充足。入秋后，北方冷空气开始入侵，降温迅速。因此，初霜冻的过早来临时有发生。

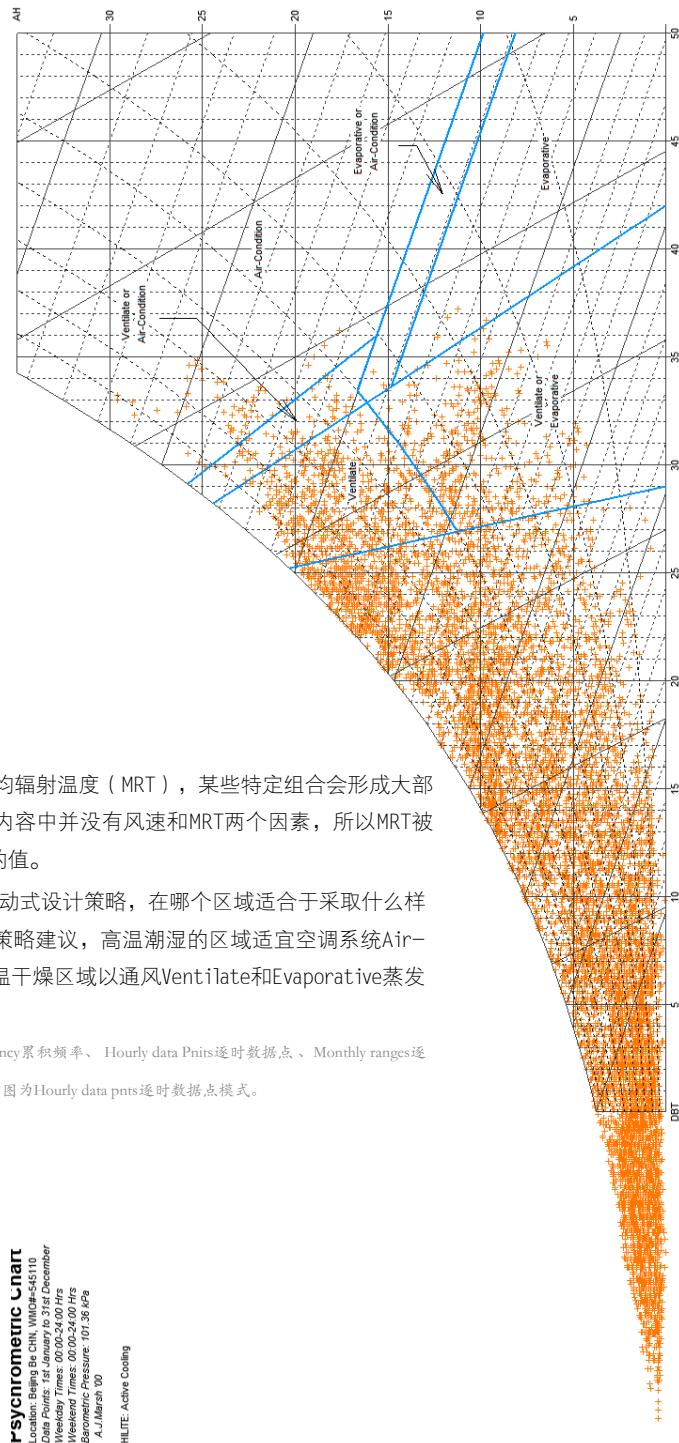
冬季：寒冷漫长。冬季长达5个月，若以平均温0℃以下为严冬，则有3个月（12—2月）。隆冬1月份平原地区平均温为-4℃以下，山区低于-8℃，极端最低气温平原为-27.4℃。冬季降水量占全年降水量的2%，常出现连续一个月以上无降水（雪）记录。冬季虽寒冷干燥，但阳光却多，每天平均日照在6小时以上，为开发利用太阳能创造了有利条件。

利用焓湿图，以数据为依托，能够更直观的观察设计区域气候特点，判断采取怎样的设计策略：



在这里，加入香港的气象数据进行气候分区模拟，能够明显的判断出地域气候的差异：



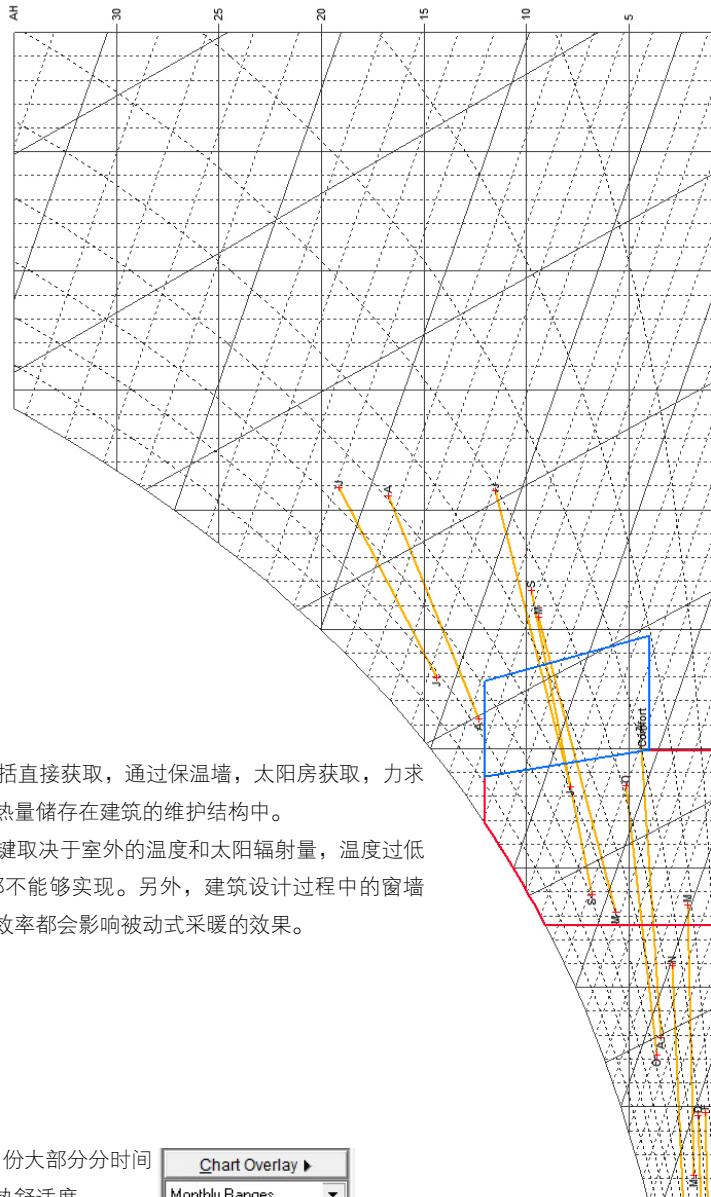


气温、相对湿度 (RH) 、风速和平均辐射温度 (MRT) , 某些特定组合会形成大部分人所认可的舒适性。焓湿图所包含的内容中并没有风速和MRT两个因素，所以MRT被设置为与气温接近，风速被设置为舒适的值。

Weather Tool会给设计师提供一些主动式设计策略，在哪个区域适合于采取什么样的方法来增加舒适性。这是北京的设计策略建议，高温潮湿的区域适宜空调系统Air-Condition 结合通风Ventilate设计，高温干燥区域以通风Ventilate和Evaporative蒸发降温为主。

注：在Weather Tool中，数据的显示可以以Cuml.Frequency累积频率、Hourly data Pnts逐时数据点、Monthly ranges逐月范围、Av.Monthly Max月均最高值四种方式显示，该图为Hourly data pnts逐时数据点模式。

1-Passive Solar Heating 被动式太阳能采暖策略



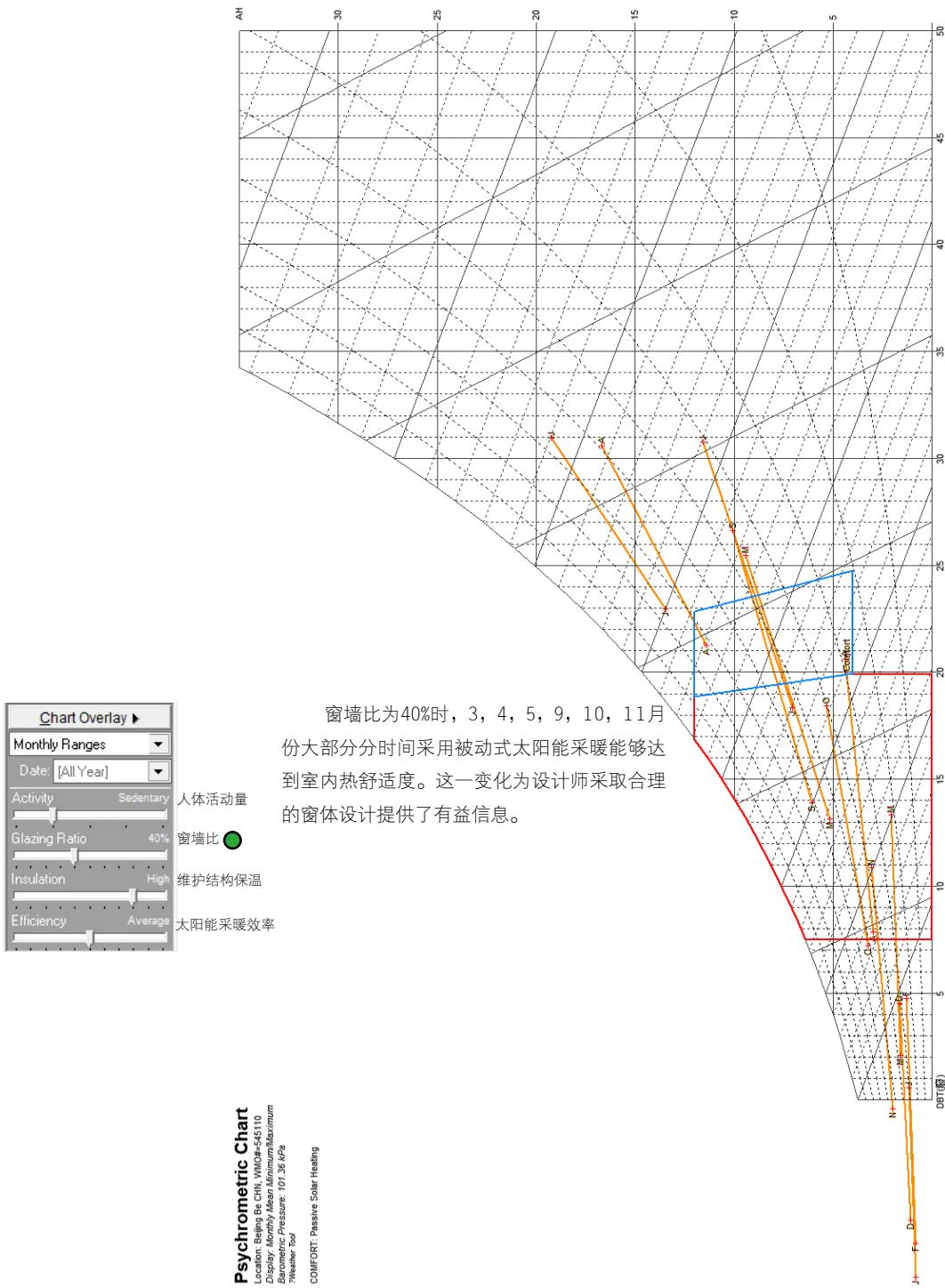
Passive Solar Heating策略，包括直接获取，通过保温墙，太阳房获取，力求最大限度的引入太阳辐射得热，并将热量储存在建筑的维护结构中。

被动式太阳能设计的气候因素关键取决于室外的温度和太阳辐射量，温度过低或辐射量过小，被动式太阳能采暖都不能够实现。另外，建筑设计过程中的窗墙比，维护结构保温性能与太阳能采暖效率都会影响被动式采暖的效果。

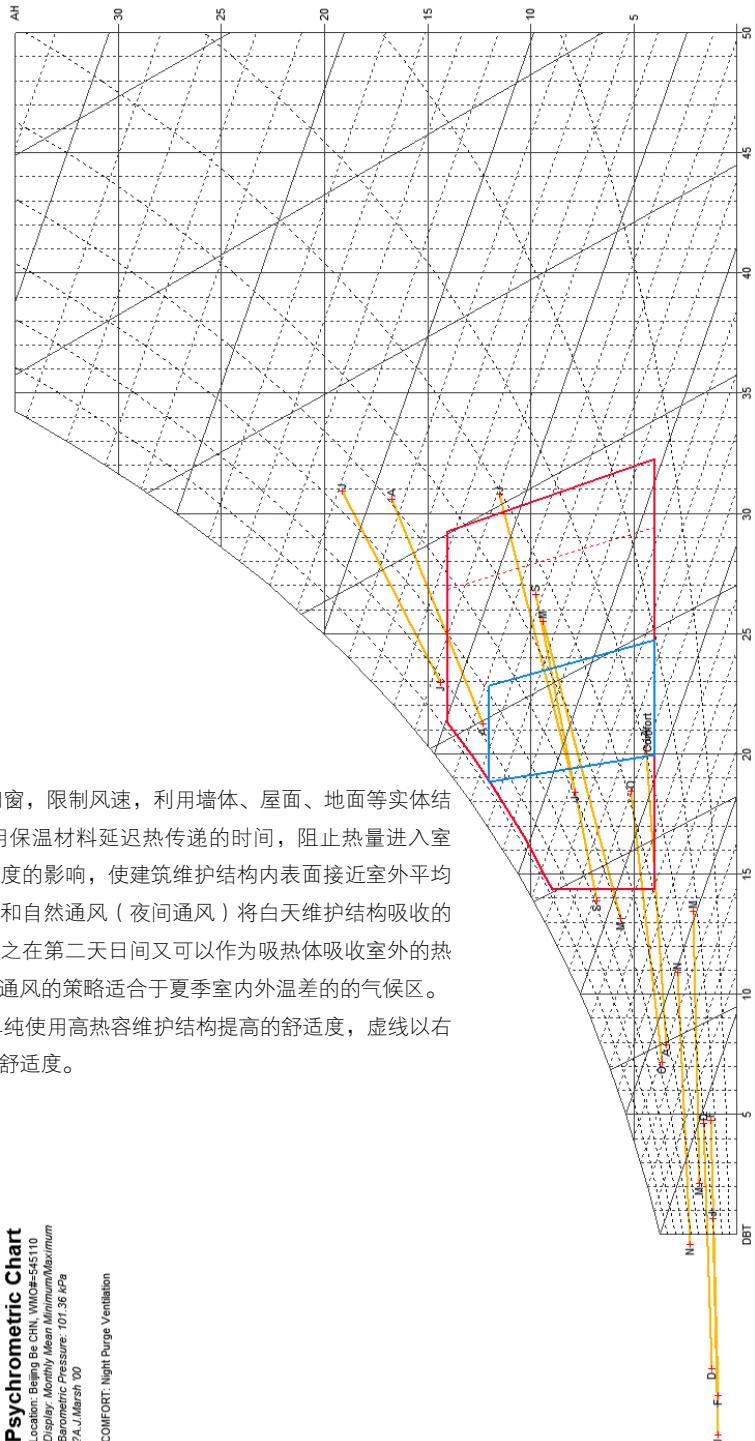
注：数据Monthly ranges显示模式

窗墙比为20%时，4，5，9，10月份大部分时间采用被动式太阳能采暖能够达到室内热舒适度。





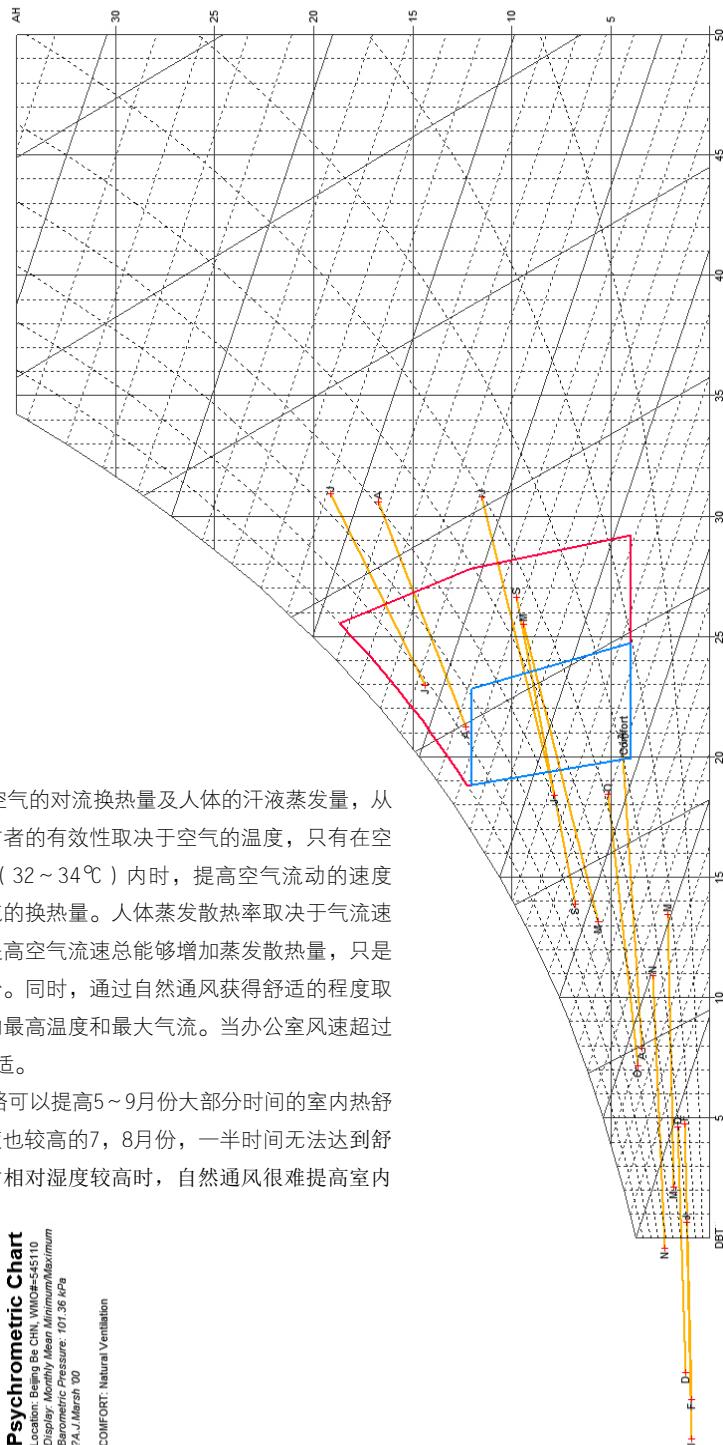
2-Mass (Thermal Mass Effects) +Night Purge Ventilation 高热容维护结构 + 夜间通风



在夏季的白天，关闭建筑门窗，限制风速，利用墙体、屋面、地面等实体结构的隔热性和蓄热性，例如使用保温材料延迟热传递的时间，阻止热量进入室内，降低室外温度波动对室内温度的影响，使建筑维护结构内表面接近室外平均温度；夜间则利用长波辐射散热和自然通风（夜间通风）将白天维护结构吸收的热量散发出去，降低其温度，使之在第二天日间又可以作为吸热体吸收室外的热量。使用高热容维护结构和夜间通风的策略适合于夏季室内外温差的气候区。

图中红色虚线以左部分是单纯使用高热容维护结构提高的舒适度，虚线以右是同时采用了夜间通风后提高的舒适度。

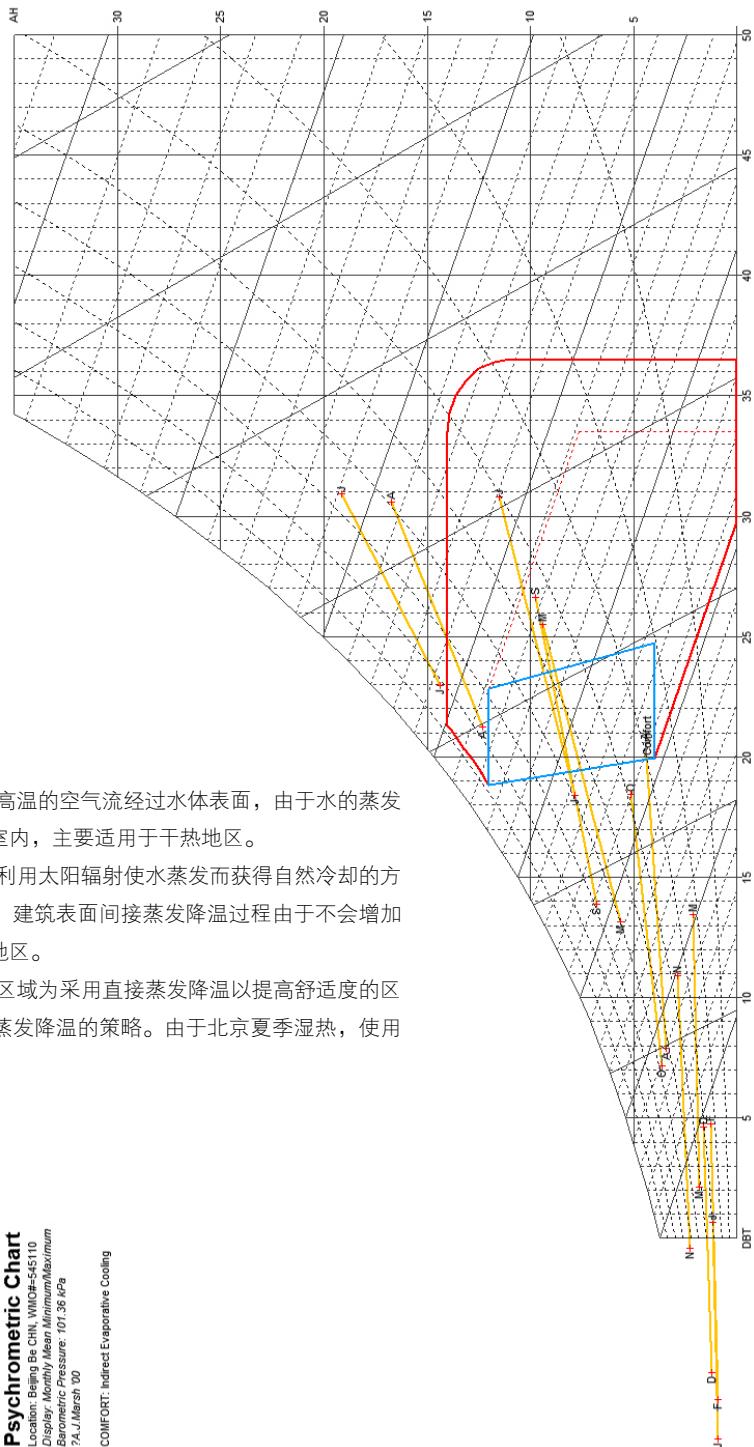
3-Natural Ventilation 自然通风策略



空气流动增加了人体与周围空气的对流换热量及人体的汗液蒸发量，从而使人体在热环境下感觉舒适。前者的有效性取决于空气的温度，只有在空气温度低于皮肤表面温度的范围（ $32\sim34^{\circ}\text{C}$ ）内时，提高空气流动的速度才能达到增加人体与周围空气对流的换热量。人体蒸发散热率取决于气流速度与空气的水蒸气压力大小。而提高空气流速总能够增加蒸发散热量，只是在高的水蒸气压下散热率相对减少。同时，通过自然通风获得舒适的程度取决于在通风情况下人们能够接受的最高温度和最大气流。当办公室风速超过 1.5m/s 时，就会吹动纸张，感到不适。

对于北京地区自然通风的策略可以提高5~9月份大部分时间的室内热舒适度，但是在温度较高，相对湿度也较高的7、8月份，一半时间无法达到舒适度，即温度高于 $32\sim34^{\circ}\text{C}$ ，同时相对湿度较高时，自然通风很难提高室内热舒适度。

4-Direct Evaporative Cooling 直接蒸发降温策略 Indirect Evaporative Cooling 间接蒸发降温策略



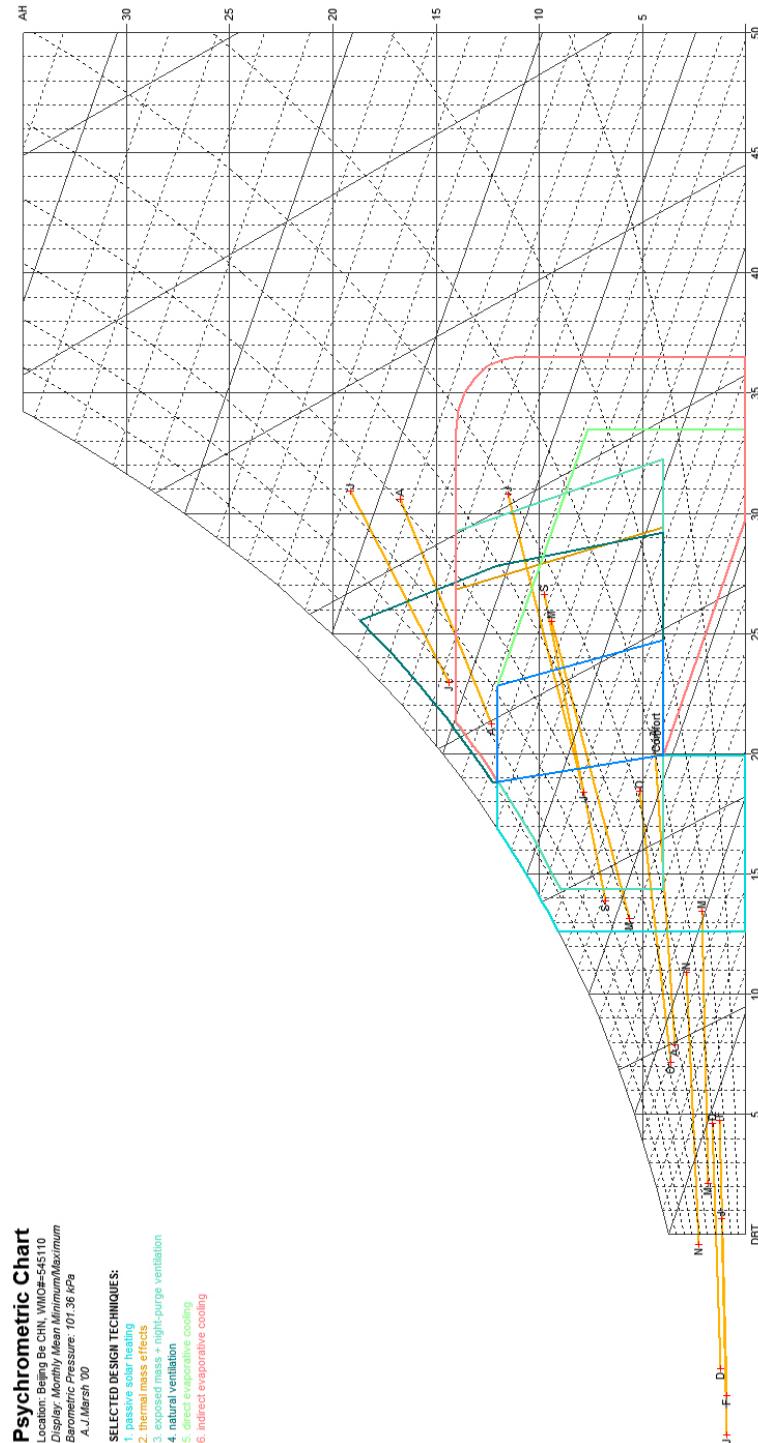
直接蒸发降温：室外干燥高温的空气流经过水体表面，由于水的蒸发吸热，使空气温度降低后流入室内，主要适用于干热地区。

间接蒸发降温：建筑表面利用太阳辐射使水蒸发而获得自然冷却的方法，如淋水屋面、蓄水屋顶等，建筑表面间接蒸发降温过程由于不会增加室内的湿度，因此适合于湿热地区。

图中红色虚线和蓝线包围区域为采用直接蒸发降温以提高舒适度的区域，红色实线部分为采取间接蒸发降温的策略。由于北京夏季湿热，使用间接蒸发降温具有一定作用。

5-Multiple Techniques组合策略分析

Weather Tool可以将几种热舒适度的策略进行叠加，协助设计师进行判断，找出适合的策略或组合策略方式；

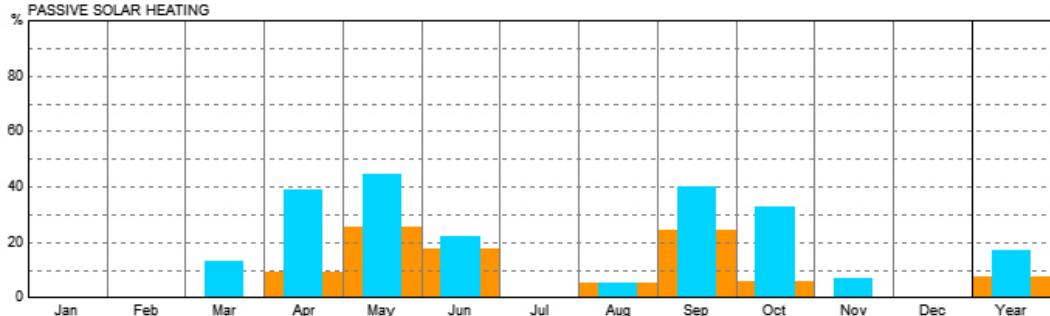
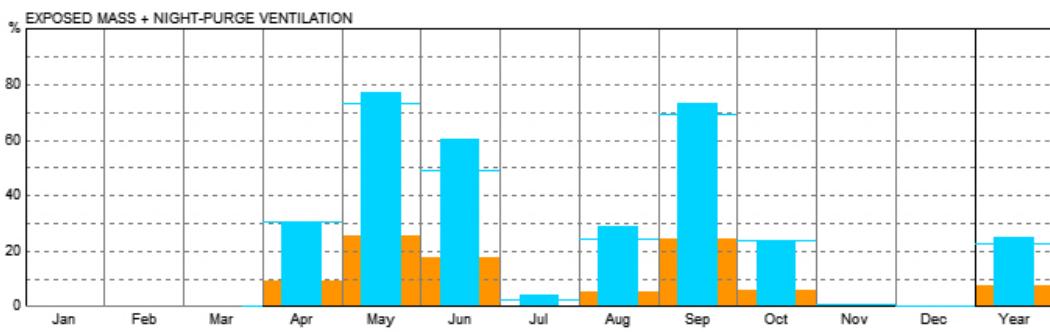
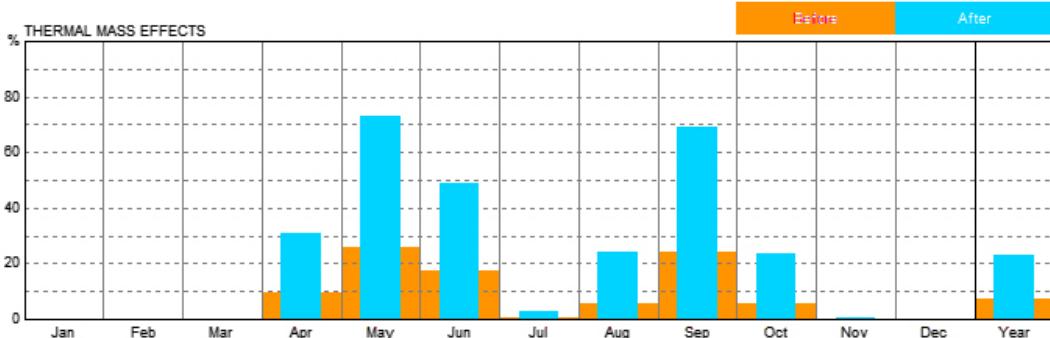
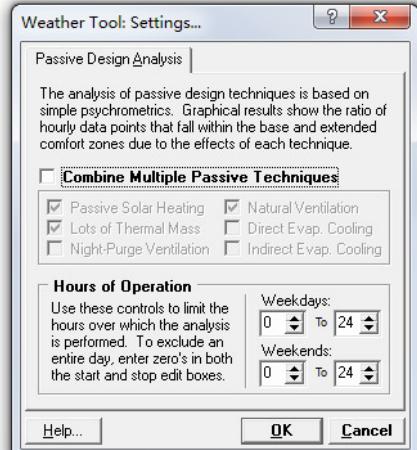


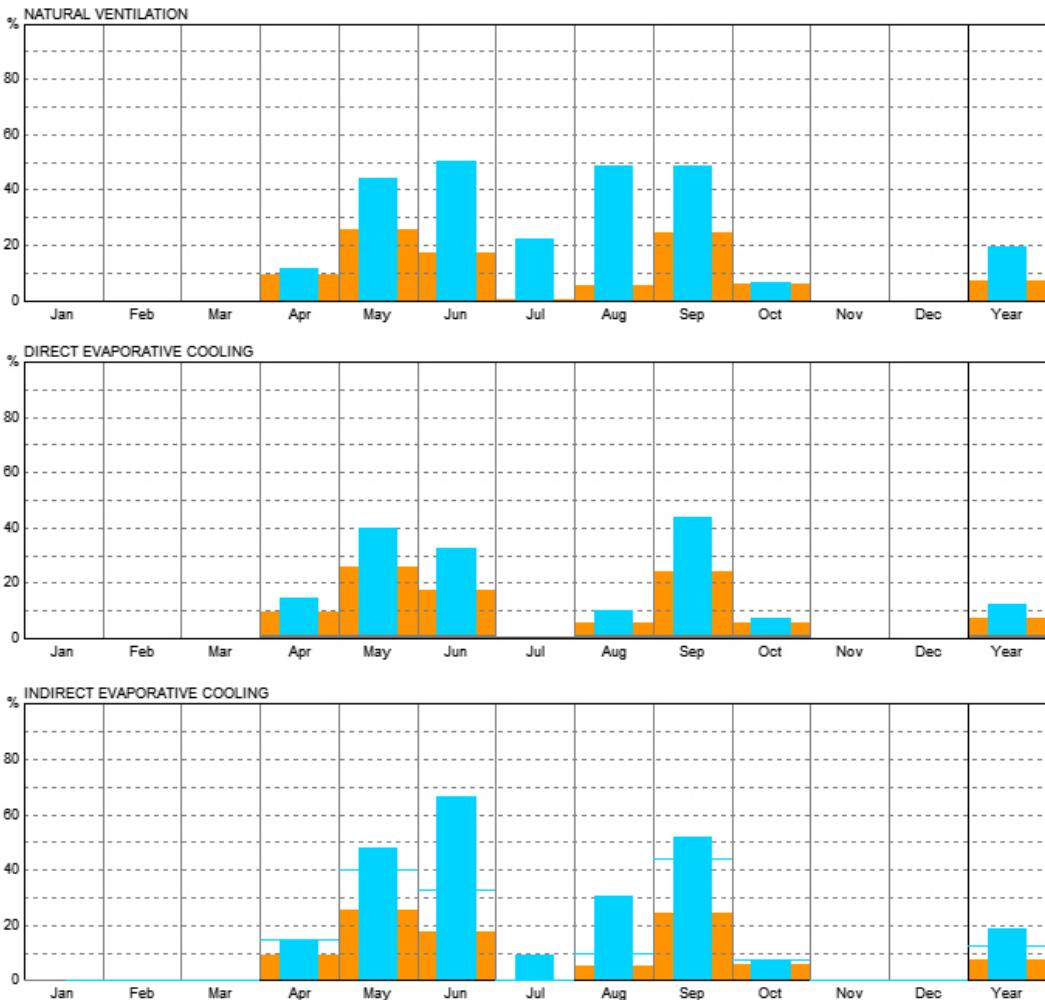
Weather Tool/Psychrometry/Chart Overlay/Passive Design Analysis
工具，协助分析多种被动式策略适合组合方式。

Comfort Percentages

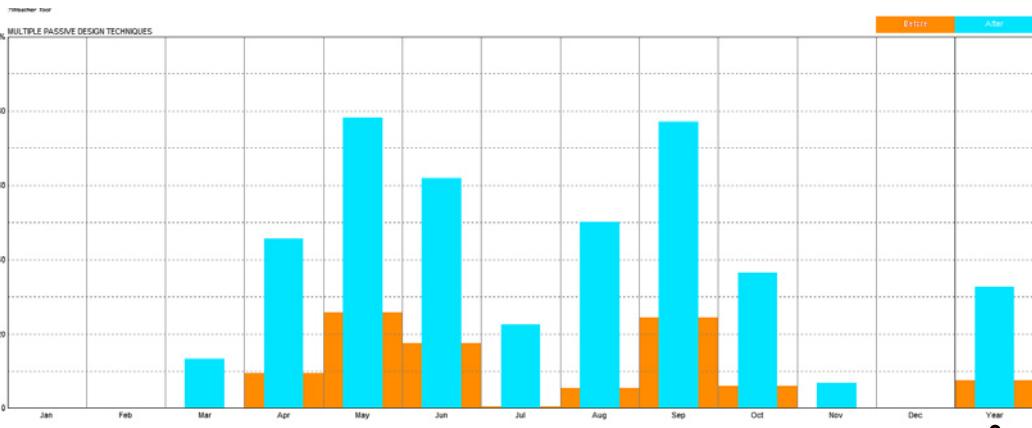
NAME: Beijing Be CHN
LOCATION: WMO#-545110
WEEKDAYS: 00:00 - 24:00 Hrs
WEEKENDS: 00:00 - 24:00 Hrs
POSITION: 39.87 116.5?

?Weather Tool





对被动式方法分项和综合统计分析，对于北京地区可得出被动式太阳能采暖策略在冬季和过渡季节具有较好效果，高热容维护结构和自然通风在夏季作用明显。总体来说，通过使用被动式策略，可以将全年舒适度从8%提高到32%，约4倍的时间长。



第二部分

热湿环境与计算机模拟

热湿环境基础

模拟与调节热环境，增加人的热舒适性，应采取哪种设计策略，在进行相关模拟实验之前，需要重新温习基本的物理机制、热和能量，从而有效的理解和采取适当的设计策略以改善环境舒适度。

热能：

• **显热Sensible Heat:** 物体分子随机运动本身就是能量的一种形式，称为显热。例如太阳辐射引起物体温度的升高，这种热可以用温度计来测量，是可感知或测知的热。物体所具有的显热量是质量和温度二者的函数。

• **潜热Latent Heat:** 相变潜热的简称，指单位质量的物质在等温等情况下，从一个相变化到另一个相吸收或放出的热量。物体在固、液、气三相之间以及不同的固相之间相互转变时具有的特点之一。固、液之间的潜热称为溶解热（或凝固热），液、气之间称为汽化热（或凝结热），固、气之间称为升华热（或凝华热）。

	美国系统		S. I. 系统（国际标准单位）
热量	btu	J（焦耳）或cal（卡）	°C=5/9 (°F-32)
温度	°F（华氏度）	°C（摄氏度）	°F = (9/5 × °C) + 32 ° K = °C + 273.15
华氏温标 (Fahrenheit) (°F)			
	摄氏温标 (Celsius)	(°C)	
	开尔文温标 (Kelvin)	(° K)	

热传递：

热从温度高的物体传到温度低的物体，或者从物体的高温部分传到低温部分的过程。热传递是自然界普遍存在的自然现象。只要物体直接或者同一物体的不同部分直接存在温度差，就会有热传递现象发生，并且将一直持续到温度相同的时候为止。发生热传递的唯一条件是存在温度差，与物体的状态，物体间是否接触都无关系。热传递的结果是温差消失，即发生热传递的物体或物体的不同部分达到相同的温度。热传递方式有辐射Radiation(自由空间热传递的主要方式)、对流Convection(流体内热传递的主要方式)和导热Conduction(固体内热传递的主要方式)。

• **辐射Radiation:** 自然界中的一切物体，只要温度在绝对温度零度以上，都以电磁波的形式时刻不停地向外传送热量，这种传送能量的方式称为辐射。物体通过辐射放出的能量，称为辐射能。辐射按伦琴/小时 (R) 计算。辐射不受地球重力的影响，物体向下与向上的辐射量是相等的。物体的辐射受到与其发生作用的其它物质，特别是其表面的极大影响。这种相互作用存在四种可能的形式：

- 1.透射 (Transmittance) :指辐射穿过物质传送的情况;
- 2.吸收 (Absorb) :指辐射转换为物体中显热的情况;
- 3.反射 (Reflection) :指辐射被物体的表面反射的情况;
- 4.发射 (Emission) :指物体通过其表面向外辐射，从而降低其显热的情况;

反射、吸收和透射与入射辐射的比值分别叫做物体对辐射的反射系数（反射率） γ 、吸收系数（吸收率） ρ 和透过系数（透过率） τ ：以入射辐射为1，则：

$$\gamma + \rho + \tau = 1; \text{对于多数不透明的物体透过稀疏 } \tau = 0, \text{ 则: } \gamma + \rho = 1$$

在理论上将外来辐射全吸收的物体($\rho = 1$)称为黑体，对外来辐射全部反射的物体($\gamma = 1$)称为白体，对外来辐射全部透过的物体($\tau = 1$)称透明体。而自然界中没有理论上所定义的绝对黑体、白体、透明体，自然界中的不透明体多数介于黑体与白体之间，近似称为灰体 (Grey Body)。

黑体辐射的3个基本定律：

普朗克定律： 普朗克定律揭示了黑体辐射能按照波长的分步规律，或者说它给出了黑体单色辐射力 $E_{b\lambda}$ 与波长和温度的依变关系，即 $E_{b\lambda} = f(\lambda, T)$ 。根据量子理论得到的普朗克定律数学表达式：

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1 \lambda^5}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}$$

λ —波长，m；

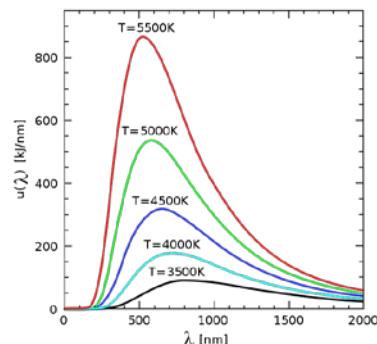
T—黑体的热力学温度，K；

e—自然对数的底数；

C_1 —第一辐射常数，其值为 $3.743 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ；

C_2 —第二辐射常数，其值为 $1.4387 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ ；

普朗克定律说明了黑体辐射波长由0连续升至 ∞ 的全部射线，单色辐射力随波长变化而变化（ $\lambda=0$ 和 $\lambda=\infty$ 时， $E_{b\lambda}=0$ ），各波长的单色辐射力随热力学温度升高而增大，并且向短波方向移动。



斯蒂芬·波尔兹曼定律： 又称四次方定律，黑体单位表面积，单位时间以波长 $\lambda=0 \sim \infty$ 的全波段向半球空间辐射的全部能量，称为黑体的全辐射力（ E_b ），其单位为 W/m^2 。根据斯蒂芬·波尔兹曼定律，黑体的全辐射力同它的绝对温度4次方成正比，其数学表达式：

$$E_b = C_b \left(\frac{T_b}{100} \right)^4$$

E_b —波黑体全辐射力， W/m^2 ；

C_b —黑体的辐射系数，常数，其值为 $5.68 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ；

T_b —黑体表面的绝对温度，K；

灰体的辐射特性与黑体近似，但是在同温度下其全辐射力低于黑体。在工程上将多数建筑材料（实际物体）均近似认为是灰体以便于计算。

发射率（黑度），是物体辐射系数与黑体辐射系数之比：

$$\frac{C}{C_b} = \varepsilon$$

在一定温度下，物体对辐射热的吸收系数（ ρ_n ）在数值上与其黑度相等。即物体辐射能力愈大，它对未来辐射的吸收能力也愈大，反之亦然；对多数不透明的物体来说，对外来的辐射只有吸收和反射，即吸收系数与反射系数之和为1。吸收系数愈大，则反射系数愈小。另外，不同物体不仅对外来辐射的总吸收系数不同，而且对各种波长辐射的单色吸收系数的差异也很大。可以说，不同物体表面的反射系数随表面性质的不同而对入射的各种波长辐射呈现出各自的反射特性；常用的普通玻璃一般认为是透明材料，但它对波长为 $2 \mu\text{m} \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的可见光和近红外线有很高的透过率，而对波长为 $4 \mu\text{m}$ 以上的远红外辐射的透过率却很低，这样在建筑中可以通过玻璃获取大量的太阳辐射，使室内构件吸收辐射而温度升高，但室内构件发射的远红外辐射则基本不能通过玻璃再辐射出去，从而提高室内温度，即温室效应。

• 对流Convection: 当气体或液体通过传导得到热量时，流体本身会膨胀，密度会降低。因而受热的部分会浮升到较冷的和较密的部分之上。其结果是形成热传递的气流和液流，这种机制称之为自然对流Free Convection。这其中热传递机制是依赖重力形成的，因而热不可能向下对流。自然对流对于生活在大气中的我们来说是一种非常

重要的热传递机制。

自然对流会把流体划分成不同温度的层。比如在房间中，靠近顶棚的空气热，靠近地板的空气冷。这种分层作用在夏季具有优势，在冬季则不利。在平静的湖泊中，湖表水温比深水的水温高。

当空气在风扇或风的驱动下，水在泵的驱使下流动时，被加热的流体在冷热区域之间循环，构成强制对流 Forced Convection。

表面对流换热/Convection Heat Flow: 在空气温度与物体表面温度不等时，由于空气沿壁面流动而使表面与空气之间产生热交换。这种传递方式常发生在建筑的外表面或者建筑构造内的空气层。表面对流换热的多少除与温差成正比外，还与热流方向（从上到下，或从下到上，或水平方向），气流速度及物体表面状况（形状、粗糙程度）等因素有关。对于平壁表面，当空气与表面温度一定时，表面对流换热主要取决于“边界层”的空气状况。边界层指处于由壁面到气温恒定区之间的区域。在一般情况下，边界层是由层流区（层流底层），过渡区和湍流区3部分组成。表面对流换热所交换的热量一般可以表示为：

$$q_c = a_c (\theta - t)$$

q_c -单位面积，单位时间内表面对流换热量，W / m²；

a_c -对流换热系数，W/ (m²•K)，即当表面与空气温差为1K (1 °C) 时，在单位面积，单位时间内通过对流所交换的热量；

θ -壁面温度，°C；

t -气温恒定区的空气温度，°C；

(a_c -对流换热系数，不是一个固定不变的常数，而是一个取决于许多因素的物理量，由于对其影响因素很多， a_c 多是由模型试验结果用数理统计方法得出的计算公式。)

• 导热Conduction: 也称热传导，指物体的各部分之间没有相对位移时在温度差作用下发生热量由高温部分流向低温部分的传热现象。温度不同的物体直接接触时的传热也属于导热。按照物体内部温度分布状况的不同，可分为一维、二维和三维导热现象。同时，根据热流及各部分温度分布是否随时间而改变，又分为稳定导热（传热）和不稳定导热（传热）。

冬季采暖建筑外维护结构的保暖设计一般按一维稳态导热计算：

$$q = -\lambda \frac{t_2 - t_1}{d}$$

t_2 -低温表面温度，°C；

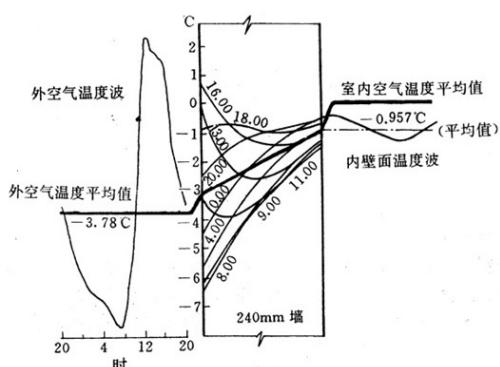
t_1 -高温表面温度，°C；

q -热流密度，W / m²，即单位面积上单位时间内传导的热量；

d -单一实体材料厚度，m；

λ -材料导热系数，W/ (m•K)；

一维非稳态导热现象产生于物体在一个方向上有温差，但温差方向上的温度不是恒定而是随时间变化的情况，在建筑上遇到的非稳态导热多属于周期性非稳态导热，即热流和物体内部温度呈周期性变化。按照热量的情况又可分单向周期性热流和双向周期性热流，前者如空调房间的隔热设计，墙体内表面温度保持稳定，而外表面温度在太阳辐射的作用下，呈周期性的变化；后者如在干热性气候区，白天在太阳辐射作用下，墙体外表



面温度高于内表面温度，热量通过墙体从室外向室内传导，到太阳下山后，墙体外表面温度逐渐降低，直至夜间低于内表面温度，此时热量通过墙体从室内向室外传导，直至次日早晨太阳升起，形成一天为周期的双向周期性热作用。而非稳态导热过程中，由于温度不稳定，维护结构不断吸收或释放热量，即材料在导热的同时还伴随着蓄热量的变化，这是区分非稳态导热和稳态导热的重要特点。

建筑材料和构造的热工特性：

建筑材料的热工特性包括绝热特性和蓄热特性，绝热特性主要取决于材料的热阻，而蓄热特性取决于材料的热容和体积，并且与导热性能有关。

比热容 (Specific Heat Capacity, 符号c)，简称比热，亦称比热容量：是热力学中常用的一个物理量。比热容是单位质量的某种物质升高单位温度所需的热量。其国际单位制中的单位是焦耳每公斤开尔文 (J kg⁻¹K⁻¹ 或 J kg⁻¹°C⁻¹，J是指焦耳，K是指热力学温标，与摄氏度°C相等)，即令1公斤的物质的温度上升1摄氏度所需的能量。

导热系数 (热导率) Thermal Conductivity:在稳态导热状态下，当材料层厚度为1m，两表面的温差为1°C时，在1小时内通过1m²截面积的导热量。导热率是反映材料导热能力的主要指标，用λ表示。

热导率的数值取决于物质的种类和温度等因素。金属的热导率很高，常温(20°C)条件下金属热导率的典型数值是：纯铜399W/(m•K)；碳钢(含碳量ω_c≈1.5%)为36.7W/(m•K)。气体的热导率很小，如20°C时空气的导热率为0.0259W/(m•K)。液体的数值介于金属和气体之间，如20°C时水的热导率为0.599W/(m•K)。非金属固体的热导率在很大范围内变化，数值高的同液体相近，如耐火粘土转20°C时的热导率为0.71~0.85W/(m•K)，数值低的接近甚至低于空气热导率的数量级。

习惯上把热导率小的材料称为保温材料(又称隔热材料或绝热材料)。至于小到多少才算是保温材料则依各国的具体情况而定。我国国家标准规定，凡是平均温度不高于350°C时热导率不大于0.12W/(m•K)的材料称为保温材料，矿渣棉、硅藻土等都属于保温材料，以及岩棉板、岩棉玻璃布缝毡、膨胀珍珠岩、膨胀塑料及中孔微珠等新型隔热材料，其容重小，隔热性能好，价格合理，施工方便，如岩棉玻璃布缝毡在0°C时热导率为0.031W/(m•K)。

热阻Resistivity:在建筑热工中，通常把材料厚度与导热系数的比值称为材料层的热阻R=d/λ，单位为(m²•K)/W，d为材料的厚度，λ为材料的热导率。知道了一种材料的热阻，就能预测这种材料传热的速度。建筑材料的热阻很大程度上是材料所包含间隙大小和多少的函数。例如，2.54cm木板与30cm混凝土板热阻相同，因为木板中细胞排列导致了大量间隙的存在。这个结论只在稳态情况下成立，及材料各处的温度在很长时间内保持温度的情况。在动态的温度环境下，30cm混凝土板所具有的热阻要大于2.54cm的木板，因为混凝土时滞高于木板。

蓄热系数Thermal Mass:当某一足够厚度单一材料层一侧受到周期性波动热作用时，表明温度将按同一周期而波动，通过表面热流波动的振幅A_v与材料表面温度波动的振幅A_t之比，叫做材料的蓄热系数，它反映了这种材料对波动热作用反应的敏感程度。在同样波动热作用下，蓄热系数大的材料，表面温度波动较小，即热稳定性好。

围护结构热惰性指标 (D):当维护结构的表面受到周期性热作用后，温度波将向结构内部传递，同时不断衰减，直到背波面(如波动热作用于内侧，则指内表面)。热惰性指标是标明波面上温度波衰减程度的一个主要数值，它标明围护结构抵抗周期性温度波动的能力。

对单一材料围护结构，热惰性指标即为其热阻与材料蓄热系数的乘积：D=R•S

一般建筑外围护结构的热惰性指标 (D) 均应大于1，且在外表面有周期性热作用的情况下，围护结构的D值越大，其内表面的温度波动越小，如200mm厚加气混凝土(密度700kg/m³)D值为3.26，370mm厚砖墙D值为4.86，在同样条件下，后者内表面温度波动小，温度较稳定。

建筑材料热物理性能计算参数						
序号	材料名称	计算参数				
		干容量 ρ [kg/m³]	导热系数 λ [W/m·K]	蓄热系数 S (周期 24 小时) [W/(m²·K)]	比热 C [kJ/(kg·K)]	蒸汽渗透系数 μ [g/(m·h·Pa)]
1	2	3	4	5	6	7
1.1	混凝土					
	普通混凝土					
	钢筋混凝土	2500	1.74	17.20	0.92	0.0000158*
	碎石、卵石混凝土	2300	1.51	15.36	0.92	0.0000173*
		2100	1.28	13.50	0.92	0.0000173*
1.2	轻骨料混凝土					
	膨胀矿渣珠混凝土	2000	0.77	10.54	0.96	
		1800	0.63	9.05	0.96	
		1600	0.53	7.87	0.96	
	自然煤矿石、炉渣混凝土	1700	1	11.68	1.05	0.0000548*
		1500	0.76	9.54	1.05	0.00009
		1300	0.56	7.63	1.05	0.000105
		1700	0.95	11.40	1.05	0.0000188
	粉煤灰陶粒混凝土	1500	0.7	9.16	1.05	0.0000975
		1300	0.57	7.78	1.05	0.000105
		1100	0.44	6.30	1.05	0.000135
	粘土陶粒混凝土	1600	0.84	10.36	1.05	0.0000315
		1400	0.70	8.93	1.05	0.000039
		1200	0.53	7.25	1.05	0.0000405
		1500	0.77	9.70	1.05	0.0000315
	页岩陶粒混凝土	1300	0.63	8.16	1.05	0.000039
		1100	0.50	6.70	1.05	0.0000435
	浮石混凝土	1500	0.67	9.09	1.05	
		1300	0.53	7.54	1.05	0.0000188
		1100	0.42	6.13	1.05	0.0000353
1.3	轻混凝土					
	加气、泡沫混凝土	700	0.22	3.56	1.05	0.000098*
2	砂浆和砌体					
2.1	砂浆					
	水泥砂浆	1800	0.93	11.26	1.05	
	石灰、水泥、轻砂浆石灰、砂砂浆	1700	0.87	10.79	1.05	0.000021*
	石灰、石膏、砂砂浆保温砂浆	1600	0.81	10.12	1.05	0.0000975*
		1500	0.76	9.44	1.05	0.0000443*
		800	0.29	4.44	1.05	
2.1	砌体					
	重砂浆砌筑粘土砖砌体	1800	0.81	10.53	1.05	0.000105*
	轻砂浆砌筑粘土砖砌体	1700	0.76	9.86	1.05	0.00012
	灰砂砖砌体	1900	1.10	12.72	1.05	0.000105
	硅酸盐砖砌体	1800	0.87	11.11	1.05	0.000105
	炉渣砖砌体	1700	0.81	10.39	1.05	0.000105
	重砂浆砌筑 26、33 及 36 孔粘土空心砖砌体	1400	0.58	7.52	1.05	0.0000158
3	热绝缘材料					
3.1	纤维材料					
	矿棉、岩棉 - 板	<150	0.064	0.93	1.22	
		150~300	0.07~	0.98~1.60	1.22	0.000488
	玻璃棉 - 板	≤150	0.093	0.94	1.34	
	麻刀 - 砂	≤100	0.058	0.56	0.84	0.000488
		150	0.047	1.34	2.10	0.000488
	0.070					
3.2	膨胀珍珠岩、蛭石制品					
	水泥膨胀珍珠岩	800	0.26	4.16	1.17	0.000042*
		600	0.21	3.28	1.17	0.00009*
		400	0.16	2.35	1.17	0.000191*
	沥青、乳化沥青膨胀珍珠岩	400	0.12	2.28	1.55	0.0000293*
		300	0.093	1.77	1.55	
	水泥膨胀蛭石	350	0.14	1.92	1.05	0.0000675*
3.3	泡沫材料及多孔聚合物					
	聚乙烯泡沫塑料	100	0.047	0.69	1.38	
		30	0.042	0.35	1.38	
	聚氯脂硬泡沫塑料	50	0.037	0.43	1.38	
		40	0.033	0.36	1.38	
	聚氯乙烯硬泡沫塑料	130	0.048	0.79	1.38	
	钙塑	120	0.049	0.83	1.59	
	泡沫玻璃	140	0.058	0.70	1.84	0.0000225
	泡沫石灰	300	0.116	1.63	1.05	
	炭化泡沫石灰	400	0.14	2.06	1.05	
	泡沫石膏	500	0.19	2.65	1.05	0.0000375
4	木材、建筑板材					
4.1	木材					
	橡木、枫树(横木纹)	700	0.23	5.43	2.51	0.0000562
	橡木、枫树(顺木纹)	700	0.41	7.18	2.51	0.0003
	松、纵木、云杉(横木纹) 松、枫木、云杉(顺木纹)	500	0.17	3.98	2.51	0.0000345
		500	0.35	5.63	2.51	0.000168
4.2	建筑板材					
	胶合板	600	0.17	4.36	2.51	0.0000225
	软木板	300	0.093	0.95	1.89	0.0000255*
		150	0.058	1.09	1.89	0.0000285*
	纤维板	1000	0.34	7.83	2.51	0.00012
		600	0.23	5.04	2.51	0.000113
	石棉水泥板	1800	0.52	8.57	1.05	0.0000135*
	石棉水泥隔热板	500	0.16	2.48	1.05	0.00039
	石膏板	1050	0.33	5.08	1.05	0.000079*
	水泥刨花板	1000	0.34	7.00	2.01	0.000024*
		700	0.19	4.35	2.01	0.000105
	稻草板	300	0.105	1.95	1.68	0.0003
	木屑板	200	0.065	1.41	2.10	0.000263

5	松散材料					
5.1	无机材料					
	锅炉渣	1000	0.29	4.40	0.92	
	粉煤灰	1000	0.23	3.93	0.92	0.000193
	高炉炉渣	900	0.26	3.92	0.92	
	浮石、凝灰岩	600	0.23	3.05	0.92	0.000203
	膨胀蛭石	300	0.14	1.80	1.05	0.000263
	膨胀蛭石	200	0.10	1.28	1.05	
	硅藻土	200	0.076	1.00	0.92	
	膨胀珍珠岩	120	0.07	0.84	1.17	
	膨胀珍珠岩	80	0.058	0.63	1.17	
5.2	有机材料					
	木屑	250	0.093	1.84	2.01	
	稻壳	120	0.06	1.02	2.01	0.000263
	干草	100	0.047	0.83	2.01	
6	其它材料					
6.1	土壤					
	夯实粘土	2000	1.16	12.99	1.01	
		1800	0.93	11.03	1.01	
	加草粘土	1600	0.76	9.37	1.01	
		1400	0.58	7.69	1.01	
	轻质粘土	1200	0.47	6.36	1.01	
	建筑用砂	1600	0.58	8.30	1.01	
6.2	石材					
	花岗岩、玄武岩	2800	3.49	25.49	0.92	0.0000113
	大理石	2800	2.91	23.27	0.92	0.0000113
	砾石、石灰岩	2400	2.04	18.03	0.92	0.0000375
	石灰石	2000	1.16	12.56	0.92	0.00006
6.3	木材、沥青材料					
		600	0.17	3.33	1465	
	沥青油毡、油毡纸	2100	1.05	16.31	1680	0.0000075
	地沥青混凝土	1400	0.27	6.73	1680	
	石油沥青	1050	0.17	4.71	1680	0.0000075
6.4	玻璃					
	平板玻璃	2500	0.76	1069	840	0
	玻璃钢	1800	0.52	9.25	1260	
6.5	金属					
	紫铜	8500	407	323.5	420	0
	青铜	8000	64.0	118.0	377	0
	建筑铜材	7850	58.2	126.1	480	0
	铝	2700	230	203.3	920	0
	铸铁	7250	49.9	112.2	480	0

导热系数 λ 及蓄热系数 S 的修正系数 α 值

序号	材料、构造、施工、地区及使用情况	α
1	作为夹芯层浇筑在混凝土墙体及It构件中的块状多孔保温材料(如加气混凝土、泡沫混凝土及水泥膨胀珍珠岩等), 因干燥缓慢及灰缝影响	1.7
2	铺设在密闭It中及作为夹芯层浇筑在混凝土构件中的泡沫塑料等, 因干燥缓慢	1.5
3	铺设在密闭It中及作为夹芯层浇筑在混凝土构件的半硬质矿棉、岩棉、玻璃棉板等, 因压缩及吸湿	1.5
4	作为夹芯层浇筑在混凝土构件中的泡沫塑料等, 因压缩	1.3
5	开孔型保温材料(如水泥刨花板、木丝板、稻草板等), 表抹灰或与混凝土浇筑在一起, 因灰浆渗入	1.3
6	加气混凝土、泡沫混凝土砌块墙体及加气混凝土条板墙体、It, 因灰浆影响	1.25
7	填充在空心墙砖及It构件中的松散保温材料(如稻壳、木屑、矿棉、岩棉等), 因下沉	1.2
8	矿渣混凝土、炉渣混凝土、浮石混凝土、粉煤灰陶粒混凝土、加气混凝土等实心墙体及It构件, 在严寒地区, 且在室内平均相对湿度超过 65% 的采暖房间内, 因干燥缓慢	1.15

注:

(1)在寒冷及炎热地区正常使用条件下, 材料的热物理性能计算参数可按附表3直接采用;

(2)在有附表“修正系数”所列情况者, 材料的导热系数计算值应按下式修正: $\lambda_c = \lambda \cdot \alpha$ λ —材料的导热系数, 按附表“建筑材料热物理性能计算参数”采用; α —修正系数, 按附表“修正系数”采用;材料的蓄热系数计算值应按下式修正: $S_c = S \cdot \alpha$ S —材料的蓄热系数, 按附表“建筑材料热物理性能计算参数”采用; α —修正系数, 按附表“修正系数”采用;(3)在西北等干燥地区, 重砂浆砌筑的粘土砖砌体计算导热系数允许采用 $\lambda = 0.76W/(m \cdot K)$, 计算蓄热系数允许采用 $S = 10.16W/(m^3 \cdot K)$; 轻砂浆砌筑的粘土砖砌体计算导热系数允许采用 $\lambda = 0.70W/(m \cdot K)$, 计算蓄热系数允许采用 $S = 9.47W/m^3 \cdot K$;(4)附表“建筑材料热物理性能计算参数”中比热C的单位为法定单位。但在实际计算中比热C的单位应取 $W \cdot h/(kg \cdot K)$, 因此, 表中数值应乘以换算系数 0.1778;

(5)附表“建筑材料热物理性能计算参数”中带*号者为测定值, 试验温度为 20°C 左右, 未扣除两侧边界层蒸汽透阻的影响;

常用薄片材料和涂层的蒸汽渗透阻 H_c 值

序号	材料及涂层名称	厚度 [mm]	H_c [m ² · h · Pa/g]
1	普通纸板	1	16.0
2	石膏板	8	120.0
3	硬质木纤维板	8	106.7
4	软质木纤维板	10	53.3
5	三层面合板	3	226.6
6	石棉水泥板	6	266.6
7	热沥青一道	2	266.6
8	热沥青二道	4	480.0
9	乳化沥青二道	-	520
10	偏氯乙烯二道	-	1239.9
11	环氧煤焦油二道	-	3733.0
12	油漆二道(先做油灰嵌缝、上底漆)	-	639.9
13	聚氯乙烯涂料二道	-	3866.3
14	氯丁橡胶涂料二道	-	3466.3
15	玛王帝脂涂料一道	-	599.9
16	沥青玛王帝脂涂料一道	-	639.9
17	沥青玛王帝脂涂料二道	1.5	1079.9
18	石油沥青油毡	0.4	293.3
19	石油沥青油纸	0.16	733.3
20	聚乙烯薄膜		

建筑热环境动态模拟

建筑热环境一般由室外气候条件，室内各种热源的发热状况以及室内外通风状况所决定。建筑环境控制系统的运行状况也必须随着建筑环境状况的变化不断进行相应的调节，以形成满足舒适性及其他要求的建筑环境。由于建筑环境变化是由众多因素所决定的一个复杂过程，因此只有通过计算机模拟计算的方法才能有效地预测建筑环境在没有环境控制系统和存在环境控制系统时可能出现的状况，例如室内温度随时间的变化，采暖空调系统的逐时能耗以及建筑物全年环境控制所需要的能耗。建筑模拟主要在建筑物能耗预测和空调系统性能预测方面得到广泛的应用。随着人们对建筑环境质量要求的不断提高和对建筑节能的日益重视，建筑模拟也越来越成为建筑与建筑环境控制系统的设计、评价、分析工具中必不可少的重要工具之一。

1. 空调系统仿真

TRNSYS, SPARK, HVACSIM+主要是用于空调系统部件的控制过程的仿真，主要模拟由各种模块搭成的系统动态特性及其在各种控制方式下的响应。其采用的是简单的房间模型和复杂的系统模型，可以根据需要由使用者灵活的组合系统形式和控制方法，适用于系统的高频（如以几秒为时间步长）动态特性及过程的仿真分析。

空调仿真系统适合于暖通等专业的设计人员使用，具有较强的专业性，对建筑设计过程，不适宜使用该部分软件协助建筑师处理建筑形态、空间划分以及材料选择，和主动、被动式设计的策略。

2. 建筑能耗模拟软件

DOE-2, eQUEST, EnergyPlus, ESP-r以及IES VE, Ecotect可以用于建筑和系统的动态模拟分析，模拟的目的是建筑和系统的长周期的动态热特性（往往以小时为时间步长），采用的是完备的房间模型和较简单的系统模型及简化的或理想化的控制模型，适于模拟分析建筑物围护结构的动态热特性，模拟建筑物的全年运行模拟。

该类软件程序是从建筑物出发，基于建筑物几何形式来预测建筑热性能和不同围护结构形式对能耗的影响。在分析之前都需要对建筑模型进行处理，能够协助建筑师处理建筑几何与热性能之间的关系，从而利于建筑设计的发展。

DOE-2:

<http://www.doe2.com/DOE2/> 官方网站

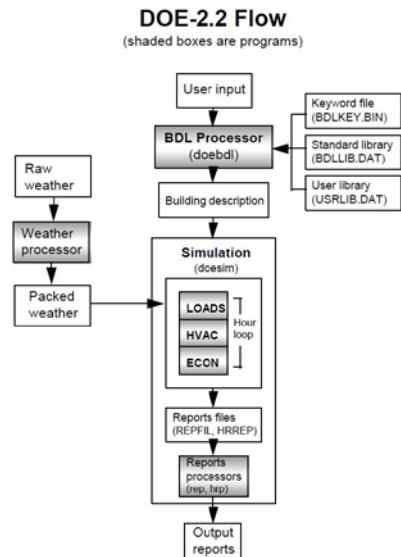


软件以及说明手册都可以在其官网免费下载，但是软件部分需要申请解压密码。

<DOE-2 ENGINEERS MANUAL Version 2.1A>—Energy and Environment Division Building Energy Simulation Group Lawrence Berkeley Laboratory University of California Berkely, CA 94720 and Group Q-11, Solar Energy Group, Energy Division Los Alamos National Laboratory Los Alamos, NM 87545, November 1982

<Overview of DOE-2.2>—Developed by Simulation Research Group Lawrence Berkeley National Laboratory University of California and James J. Hirsch & Associates Camarillo, California, June 1998

DOE-2是公认的建筑能耗分析结果最为准确的软件之一。该软件通过“建筑描述语言”Building Description Language (简称BDL)来解决大量的建筑体型、构造、设备性能甚至房间使用时间安排等输入的问题，并更新了HVAC系统分析模型，能耗计算、系统性能分析以及经济分析等的内核程序采用这方面比较成熟的



软件NECAP (the NASA Energy–CostAnalysis Program)的算法。

NECAP是较早采用动态分析方法对建筑进行能耗分析的软件之一。它采用逐时的气象数据，并考虑了围护结构热容量的影响。在房间热响应分析中采用了加权系数法（即房间反应系数法），并能选择不同性能的制冷、采暖设备(包括中央系统和终端系统)以及可以安排设备的工作时间，可以对与建筑能耗有关的其它要求（如设备容量、系统整体性能以及能源经济等）作出评估。后来的美国能源部(the U.S.Department of Energy，简称DOE)继承了该软件，并于1978年将软件改名为DOE-1.4面世。之后在该软件的基础上，由劳伦斯-伯克利实验室(U.S.Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)发展为现在流行的DOE-2.0、DOE-2.1等系列。

eQUEST：

<http://doe2.com/equest/index.html>官方网站

软件以及说明手册都可以在其官网免费下载

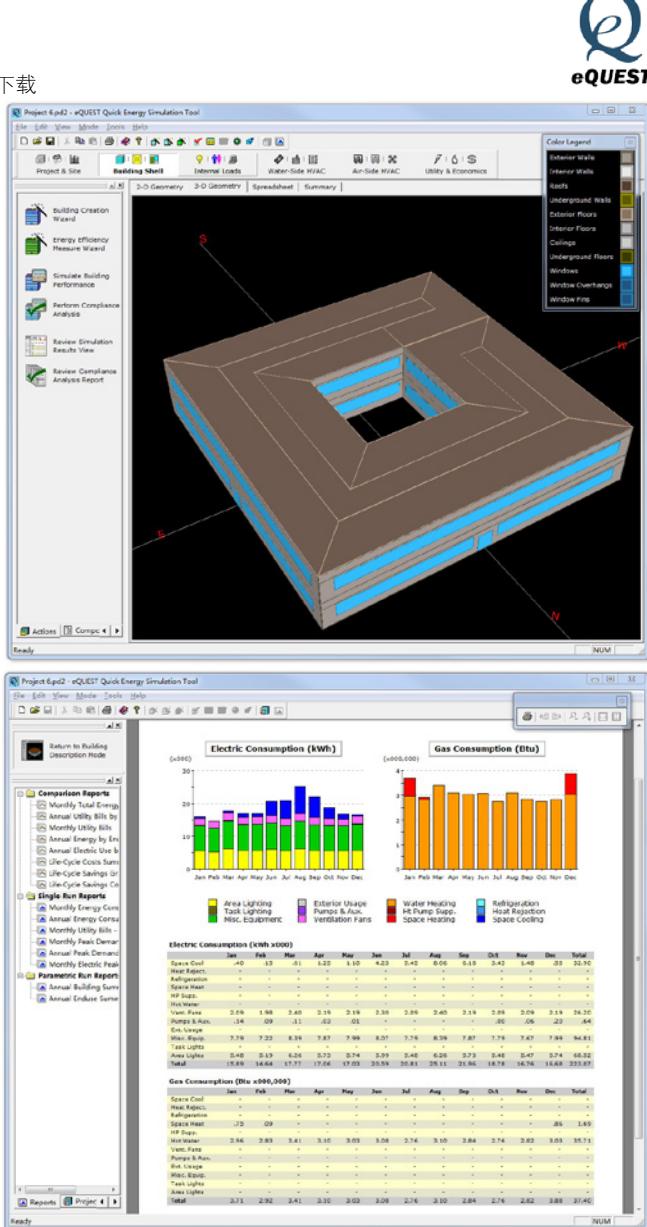
<eQUEST Quick Energy Simulation Tool Introductory Tutorial>

eQUEST是一款基于DOE-2基础上开发的建筑能耗分析软件,由美国能源部(U.S. Department of Energy)和电力研究院资助,美国劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)和J.J. Hirsch及其联盟(Associates)共同开发。它允许设计者进行多种类型的建筑能耗模拟,并且向设计者提供建筑物能耗经济分析、日照和照明系统的控制以及通过从列表中选择合适的测定方法自动计算能源利用效率。

eQUEST主要特点是为DOE-2输入档的写入提供了向导。用户可以根据向导的指引写入建筑描述的输入档。同时,软件还提供了图形结果显示的功能,用户可以非常直观的看到输入档生成的二维或三维的建筑模型,并且可以查看图形的输出结果。从而让逐时能耗模拟能够为更多的设计人员更方便的应用,在极短的时间内,做出一份非常专业的建筑能源分析报告。

eQUEST适合于建筑设计的各个阶段,包括概念设计阶段,对任何设计团队(建筑师或者工程师而言)都适用。

eQuest= “DOE-2.2” +Wizards+Graphics



ESP-r :

<http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm> 官方网站

软件以及说明手册都可以在其官网免费下载



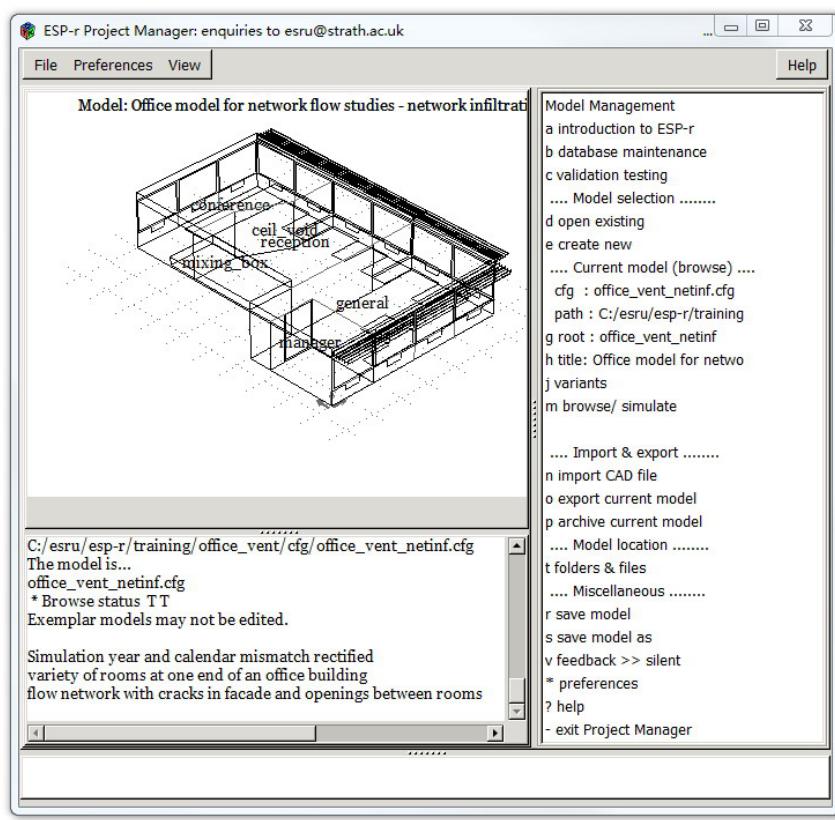
ESP-r是由位于格拉斯哥的斯特拉思克莱德大学能源系统研究中心 (Energy System Research Unit) 开发的一款综合建筑模拟分析软件，Esp-r具有悠久的历史和丰富的工程实践经验，Joe Clarke教授及其同事早在20世纪70年代就着手于相关的研究和开发，现在Esp-r在科研和工程领域应用非常广泛。

其基本的分析方法为计算流体力学 (Computing Fluid Dynamic , 简称 CFD) 中的有限容积法 (Finite Volume Method)，可以对建筑内外空间的温度场、空气流场以及水蒸汽的分布进行模拟，因此它不仅可以对建筑能耗进行模拟，还可以对建筑的舒适度、采暖、通风、制冷设备的容量及效率，气流状态等参数作出综合的评估。除此之外，该软件还集成了对新的可再生能源技术 (如光伏系统、风力系统等) 的分析手段。

功能：

ESP-r 是在欧洲应用非常广泛的建筑能耗模拟分析软件。Esp-r采用了计算流体动力学中常用的有限体积法，不需要对基本传热方程进行线性化处理，相对于反应系数法来说，其具有较高的灵活性和更宽广的适用范围，但同时对硬件要求也有一定程度的提高。Esp-r是一个集成化的模拟分析工具，除了可以模拟建筑中的声、光、热以及流体流动等现象外，还可以对建筑能耗以及温室气体排放作出评估，其可模拟的领域几乎涵盖了建筑物理及环境控制的各个方面。

ESP-r的操作界面人性化较低，与基于EnergyPlus的DesignBuilder相比，需要付出较多的时间在菜单理解上和参数设置上。但是所有建筑热环境模拟的基本流程都是相似的，也就是说设计师理解了一种模拟的流程(例如DesignBuilder)，基于其它平台的模拟操作(例如ESP-r)，eQuest就相对容易的多。其主要的操作区别只是在于模型构建方式，以及相关参数设置的方法上。



Structure of the Program

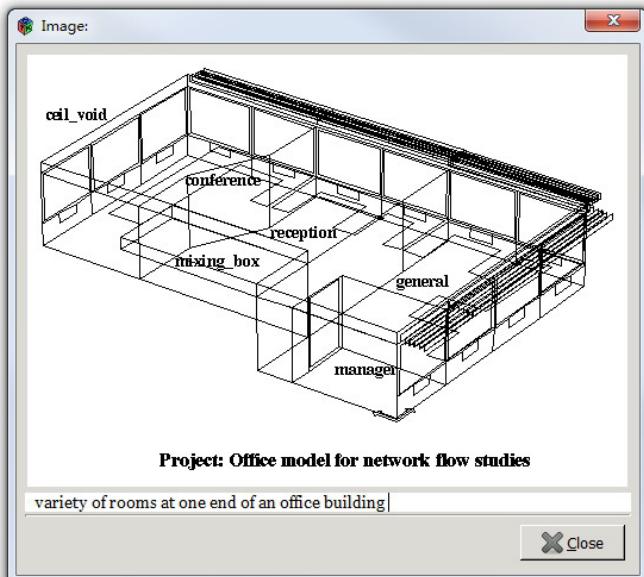
程序结构

ESP-r模拟分析过程可以划分为明显的三个部分，模型构建、相关模拟、结果获取与分析。在开始一个项目时往往需要建立一个或者多个文件夹（可以由使用者根据模拟的对象进行选择）。

虚拟项目（‘duplex’）默认文件组成：

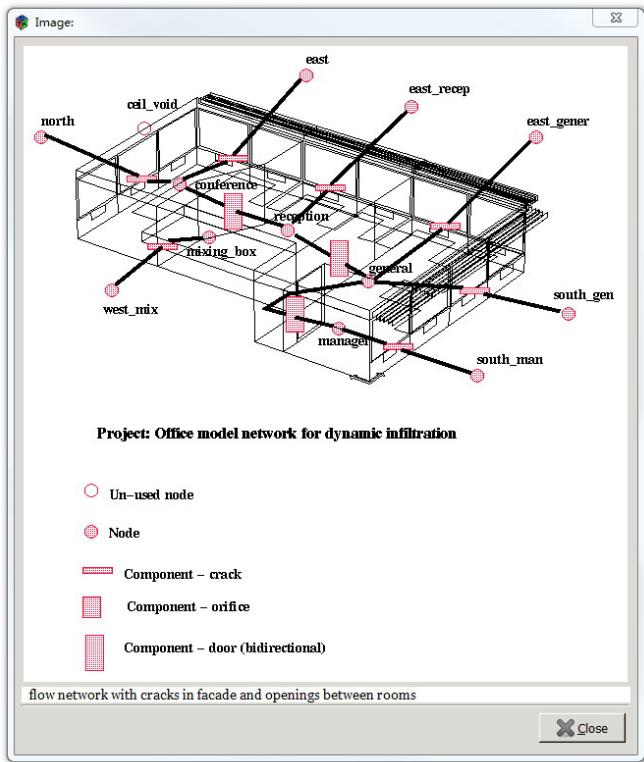
folders文件夹 type类型

duplex	project folder 项目文件夹
duplex/cfg	system files 系统文件
duplex/ctl	control files 控制文件
duplex/zones	zone files 域文件
duplex/nets	networks 网络系统
duplex/doc	reports and notes 报告与注释
duplex/temp	odds+ends 临时文件
duplex/dbs	project databases 项目数据库



ESP-r提供的扩展文件类型：

File type	文件类型	Extension 扩展
System Configuration		.cfg
System control		.ctl
Geometry		.geo
Construction		.con
Operators		.opr
Shading/Insolation		.shd
View factors		.vtf
Air flows		.air
Convention Coefficients		.hcf
Site obstructions		.obs
Mass Flow Network		.mfn
Transparent		.tmc
Constructions		.con
Casual Gains Control		.cgc



IES VE:

<http://www.iesve.com/> 官方网站



说明手册可以在其官网免费下载

IES是总部在英国的Integrated Environmental Solutions公司的缩写，IES<VE>是旗下建筑性能模拟和分析软件。它整合了一系列模块化的组件用以进行计算分析，包括：

- ModelIT: 三维建模工具；提供IDM (Integrated Data Model) 集合数据模型
- ApacheCal: 供暖，制冷负荷计算工具。使用CIBSE 制定的流程
- ApacheSim: IES<VE>的核心组件。动态负荷计算工具，可逐时模拟分析建筑的负荷
- ApacheHVAC: 建筑空调系统模拟工具
- Flucs: 采光分析，设计工具。分为FlucsDL 和 FlucsPro。前者只能进行日光分析。
- RadianceIES: 非常权威的建筑采光模拟组件，使用高级光追踪技术。
- SunCast: 日照分析工具
- CostPlan: 初投资分析工具
- LifeStyle: 运行费用分析工具
- Simulex: 疏散分析工具，模拟正常/紧急情况下的人流疏散行为
- Lisi: 电梯分析工具
- IndusPro: 管路尺寸计算
- Pisces: 冷热水 管路尺寸计算
- Taps: 自来水管路尺寸计算
- Field: 电线尺寸计算
- MicroFlo: 室内外流体力学模拟

IES(VE)最主要的特点是将对于建筑生态设计有关系的模块集成化，这样设计师可以不用再在各个软件平台下分别处理不同的模拟分析，尤其数据接口的繁琐转换。

其功能处理与Ecotect软件类似，都是综合性的分析模拟平台，但是IES (VE) 更加集成，也更容易和各种绿色建筑标准（例如LEED）相结合。

IES(VE)在英国以至欧洲占有较大的市场，它兼容gbXML格式，同时提供了Revit和SketchUp的插件，可以精确传递模型信息。

Energy Plus+DesignBuilder:

<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> EnergyPlus官方网站

EnergyPlus由美国能源部（Department of Energy, DOE）和劳伦斯●伯克利国家实验室（Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL）共同开发。二十多年里，美国政府同时出资支持两个建筑能耗分析软件——DOE-2和BLAST的开发，其中DOE-2由美国能源部资助，BLAST由美国国防部资助。这两个软件的主要区别就是负荷计算方法——DOE-2采用传递函数法（权重系数）；而BLAST采用热平衡法。这两个软件在世界上的应用都比较广泛。但是美国能源部于1996年决定重新开发一个新的软件——EnergyPlus，并于1998年停止BLAST和DOE-2的开发。EnergyPlus是一个全新的软件，它不仅吸收了DOE-2和BLAST的优点，并且具备很多新的功能。EnergyPlus被认为是是用来替代DOE-2的新一代的建筑能耗分析软件。



<http://www.designbuilder.co.uk/content/view/43/64/> DesignBuilder官方网站



DesignBuilder是针对建筑能耗动态模拟程序（EnergyPlus）开发的综合用户图形界面模拟软件。它可以应用

在设计过程中的任何阶段，通过提供性能数据来优化设计和评估，甚至在设计初期整个设计还未确定时就可以开展。

DesignBuilder适用于建筑师、暖通工程师、能源顾问公司和大学等研究机构。

主要用途：

- 对建筑外围护结构相关设置项从过热、用能及视觉效果等方面进行评估；
- 优化自然光使用，对照明控制系统进行模拟并计算照明节能量；
- 用CFD模块计算建筑物内外部场的速度，温度和压力分布；
- 场地布局的可视化和遮阳；
- 模拟建筑物自然通风；
- 暖通空调设计，包括供暖制冷设备容量的计算；

DesignBuilder使用非常简便，即使是非专业用户也可将复杂的建筑物迅速进行模型化。使用数据模板，通过从下拉列表中选择，可以载入一般性建筑结构、建筑物内部的人物活动、HVAC (Heating、Ventilating and Air Conditioning) 及照明系统到模型。同样类型的建筑物可反复使用，还能添加到模板。此功能与数据库联动，可对建筑物及其周边的区域进行变更，在设计、评估流程的阶段，可对各个建筑模型进行详细设定。

DesignBuilder主要功能：

- DesignBuilder采用了易于操作的OpenGL固体建模器。由此，在3D空间中配置「块」，通过拉伸、剪切可直观地进行建筑物模型的制作。可对建筑部件的厚度、房间的面积及体积进行可视化掌控；
- CFD功能结合了模拟模型，可根据Energyplus输出的数据来定义CFD边界条件；
- 英国EPCS（3级和4级）标准是采用SBEM的计算方法；
- 自然通风模拟；
- 自然采光模块——对照明控制系统进行模拟并计算照明节能量；
- 遮阳，可以通过百叶、悬挂遮阳板、侧面遮阳板、内部遮阳以及窗帘的设置来实现；
- 可以按一年、一月、一日、一小时、及更小的时间间隔进行所有模拟数据的显示；
 - ※ 建筑能耗，表示为燃料或电能的消耗
 - ※ 室内温度
 - ※ 气象数据
 - ※ 通过墙体、屋顶、通风等围护结构的热传递
 - ※ 供热、制冷负荷
 - ※ CO₂产生量
- 参考当地气象资料确定供暖或制冷设备的容量；
- ‘Compact HVAC’ 提供了一个简单的方法对常用的加热和冷却系统进行详细的分析；
- 可导入CAD数据或者扫描图，三维CAD模型可用gbXML格式导入；
- 可以通过参数分析面板对设计参数在其作用范围内进行调整从而分析其影响效果；
- 可输出建筑设计的渲染图像和动画，包括遮阳的效果；
- Designbuilder中包含了最新的ASHRAE（美国冷暖气空调学会）世界气象数据和观测地点数据（4429套数据），可免费使用EnergyPlus的每小时气象文件；

导入、输出文件的格式：

- 输入：DXF、PDF、BMP、JPG、PNG、GIF、TIFF、detailed survey data.
- 输出：EnergyPlus Heating/Cooling design IDF file、model image (DXF、BMP、JPG、PNG、GIF、TIFF) 、3-D DXF model、CSV report file;

Designbuilder V3模块功能：

Designbuilder V3版本共有5个模块：

1.Visualisation – OpenGL、三维渲染和报告

2.Simulation --EnergyPlus 动态热模拟

3.HVAC-- 详细的EnergyPlus HVAC 模拟

4.CFD--风环境计算

5.Daylighting --采光计算和报告

Designbuilder可视化功能

通过DesignBuilder的可视化功能，可以花最少的时间得到鲜明的真实质感的图像；

HVAC 暖通分析模块

Designbuilder v3 提供更专业、更灵活的方式访问EnergyPlus暖通模型，采用完整的ASHRAE 90.1 标准暖通系统类型，进行气体负荷和水路分析；

Daylighting日照分析

采用国际公认的美国Radiance采光分析核心，绘制等照度线、计算平均采光系数等，通过Energyplus采光节能分析，可以缩短人工照明时间从而降低能源消耗，减少碳排放。采用Radiance渲染生成逼真的采光分析图，依据LEED EQ8.1, BREEAM HW1 and GreenStar IEQ4 标准出具详细报告；

DesignBuilder CFD

建筑物模型中整合CFD的概念，可对建筑物内外的空气流动和温度环境进行模拟；

注：学习DesignBuilder可以结合官方网站的教程，尤其视频教程部分，可以免费下载。

基于DesignBuilder (DB) 覆土建筑的热环境模拟：



模型构建

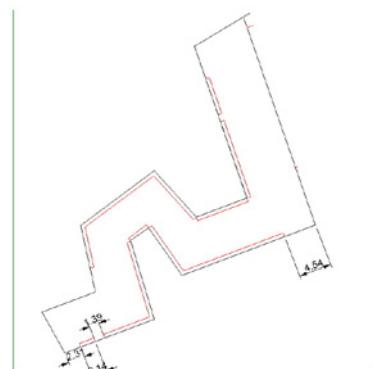
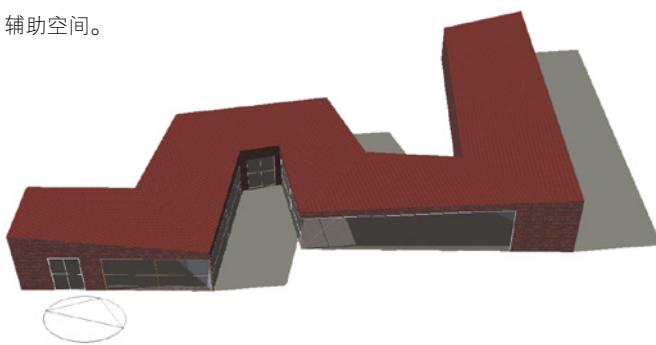
进行设计一般不会在热环境分析软件中进行模型的构建和方案的推敲，设计推敲使用Rhinoceros, SketchUp, MAYA, 3DMAX等三维软件进行设计模型的构建（关于模型构建的部分参考《参数模型构建手册》）。由上述三维软件构建的模型以直接导入到模拟软件的方法也不是很理想，最多只能处理一些基础的光影分析，才不会对分析结果造成太大的影响。因此，目前通常只将三维模型转化为二维平面，并尽可能的只保留结构线部分，例如墙体中线。使用Rhino建立的模型（本例），用Make 2-D-Drawing 等手段，获得简单的建筑二维平面导入到DB中简化模型，而将重点放在模型的热环境分析条件上，多余的几何模型需要排除。

在Rhinoceros中建立体量模型，以空间为基础，其墙体、地面、楼板厚度为零，类似于gbXML格式文件，但是没有属性数据，为纯粹的几何体。在Rhinoceros中建立的体量模型可以导入到Revit中处理，或者直接在Revit中建立基本模型，或者就将Rhinoceros中建立的模型导入到Ecotect中进一步增加BIM信息数据，例如墙体材料等。对于不同软件平台的不同组合方式的选择，主要看设计者对设计几何处理的要求，每个平台都有其各自的优势，目

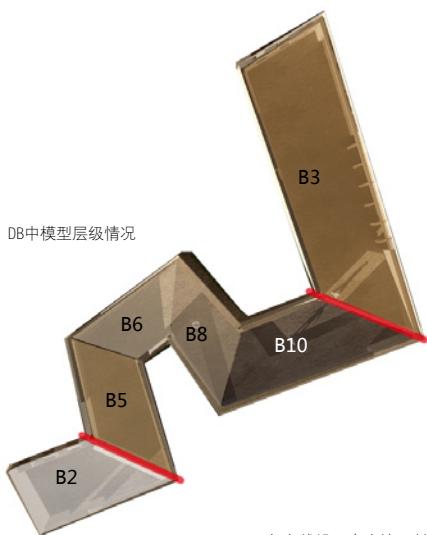
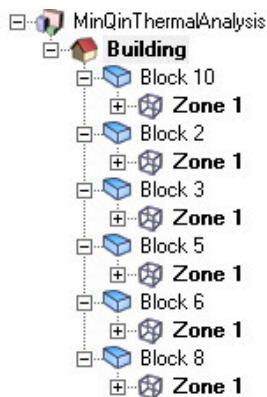
前无法实现在一个平台方便完成所有类型的设计几何，例如基于Rhinoceros的Grasshopper参数化处理在目前Revit是无法很好的实现的，而Revit的BIM方面又是目前Rhinoceros+Grasshopper的弱项。因此对于不同的设计任务，需要我们来判断哪一个阶段使用何种平台能够更好的完善设计。



用于导入到DB中的DXF文件，只有墙体的中心线，另外窗户和门的位置也需要标注出来，这里一侧全部为玻璃幕墙，当然可以在DB中设计门窗位置，模拟设计合理后再在Rhino中详细设计，同时图中标出了基本的辅助空间。



根据导入的DXF二维文件，在DB中构建基本模型，图为Visualise 显示模式。不同的材料也以不同的纹理和颜色显示。光影显示的时间为15 Sep, 15点。



根据建筑功能，位置以及建立的方式，内部分成6个区块，Block1、2、3、4、5、6，在热环境计算时能够分别计算，获得各域的热环境数据。

北立面



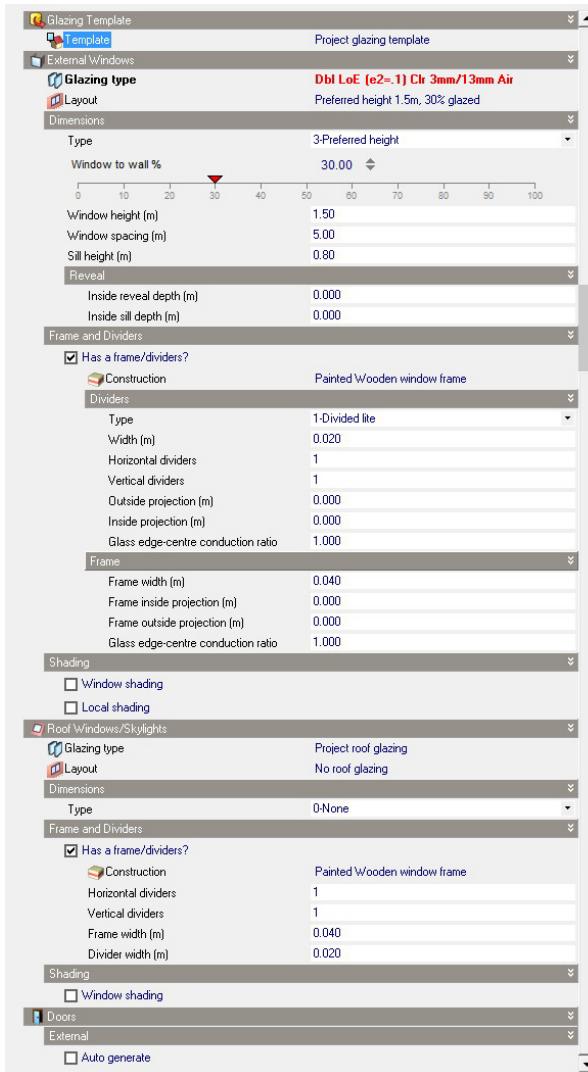
南立面



建筑构造与材料选择 (Construction and Openings)

用于模拟的模型构建完成后，需要给出建筑墙体、地面、屋顶的各部分构造，类型选择主要在Construction和Openings部分进行，Openings部分为门窗和洞口。在处理建筑构造时，需要同时考虑材料的选择，DB能够根据设计的需要调整构造的方式，可以选择内置的构造以及材料，也可以自行设置。对于国内的气候环境以及施工特点，DB内置的部分往往需要根据国内情况作出调整。

The screenshot shows the 'Construction' tab for 'Untitled, GreenHouse, Block 1, Zone 3'. The 'Construction Template' is set to 'Project construction template'. Under 'External walls', 'Best practice Semi-exposed wall, Heavyweight' is selected. The 'Floor' section shows 'Project ground floor', 'Project external floor', and '19mm wooden floor'. The 'Subsurfaces' section includes 'Project wall sub-surface construction', 'Project internal wall sub-surface construction', 'Project soil sub-surface construction', and 'Project external door'. The 'Internal Thermal Mass' section lists 'Project internal mass' and 'Exposed area (m²)' at 0.00. The 'Adjacency' section is set to '1-Auto'. The 'Surface Convection' section shows 'Having Design' with 'Inside convection algorithm' at '1-Detailed' and 'Outside convection algorithm' at '6-DOE-2'. The 'Cooling Design' section also has '1-Detailed' and '6-DOE-2' settings. The 'Model validation' section includes a 'Content rate [ach/h]' input field set to 0.700. On the right side, there are tabs for 'Info, Data', 'Data Report (Not Editable)', 'General', 'Layers', 'Outermost layer', 'Layer 1', 'Layer 2', 'Layer 3', 'Innermost layer', and 'View & Simulation'.



Openings设置部分

Data Report (Not Editable)			
General			
ECO Roof			Source
			Category
Region			Roofs
General			
Layers			
Number of layers			2
Outermost layer			
Material			ECO roof material
Thickness (m)			0.2000
Bridged?			No
Innermost layer			
Material			Aerated Concrete Slab
Thickness (m)			0.2000
Bridged?			No
Outside Surface			
Fix convective heat transfer coefficient			No
Inside Surface			
Fix convective heat transfer coefficient			No
Cross Section			
Outer surface			
200.00mm ECO roof material			
Inner surface			
200.00mm Aerated Concrete Slab			
Inner surface			
Convective heat transfer coefficient (W/m ² K)			4.460
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² K)			5.540
Surface resistance (m ² K/W)			0.100
Outer surface			
Convective heat transfer coefficient (W/m ² K)			19.870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² K)			5.130
Surface resistance (m ² K/W)			0.040
No Bridging			
U-Value surface to surface (W/m ² K)			0.522
R-Value (m ² K/W)			2.057
U-Value (W/m ² K)			0.496
With Bridging (BS EN ISO 6946)			
Upper resistance limit (m ² K/W)			2.057
Lower resistance limit (m ² K/W)			2.057
U-Value surface to surface (W/m ² K)			0.522
R-Value (m ² K/W)			2.057
U-Value (W/m²K)			
			0.496

屋顶绿化模型说明：

- 植物冠层内长短波辐射的交换；
- 植物冠层影响对流热交换；
- 植被与土壤的水分蒸发损失总量；
- 土层部分的热传导；

绿色屋顶Green Roof参数： DB针对屋顶绿化，提供了具有绿化设置参数的屋顶土壤种植层用于构造的外表皮Outer Surface部分。并可以加入灌溉，以及区域降雨模拟。

屋顶绿化方式已经被实验观测数据以及实践证明是减少建筑能耗的有效方式。DB通过调整各种模拟变量，例如土壤类型和厚度、灌溉选项、植物类型，帮助建筑师和开发商更好的评估屋顶绿化的能源节约，以及发展屋顶绿化的丰富形式和技术。

屋顶绿化模型：

- 两个土壤层（顶部与根部）之间，沉淀、灌溉、水汽的传输平衡；
- 土壤和植物冠层能量平衡计算是基于The Army Corps of Engineers' FASST 的植被模型；
- 土壤表层和植物叶子温度平衡解算基于换向CTF，获得能量平衡计算的热通量。更深一步的能量平衡解析方程式较为复杂，可以参考FASST文件。最终使用两个模拟方程式解算温度，一个为土壤表层解算，一个为植物叶片解算。

ECO Roof Material参数：

Height of plants(m): 植物平均高度；

Leaf area index: 土壤表面每一单位面积的植物叶面积投影，值范围0.001 ~ 5.0；

Leaf reflectivity: 每一叶面所反射的太阳直接辐射。太阳直接辐射包括可见光部分、红外与紫外波长部分，值范围0.1 ~ 0.4；

Leaf emissivity: 叶表面的热辐射与同温度下理想黑体的热辐射的比率。给参数用于计算叶表面长波辐射能量交换，值范围：0.8 ~ 1.0；

Minimum Stomatal Resistance: 最小气孔阻力，是植物抵抗水汽蒸发的能力，单位为s/m，具有较小阻力值的植被将导致高的土壤水分蒸发，值范围：50 ~ 300.0；

Max volumetric moisture content of the soil layer

(saturation)：最大土壤层的容积含水率（饱和状态），该值由土壤的属性尤其土壤孔性所确定；

Min (residual) volumetric moisture content of the soil layer: 最小土壤层的容积含水率；

Initial volumetric moisture content of the soil layer: 原始土壤层的容积含水率，为模拟开始前土壤层的容积含水率，含水量会因为表面的蒸发、灌溉、降雨等因素在模拟的过程中不断更新；

Data Report (Not Editable)	
General	
ECO roof material	
Source	Other
Category	General
Region	General
Default thickness (m)	0.0100
Detailed properties	Yes
Thermal Bulk Properties	
Conductivity (W/m·K)	0.300
Specific Heat (J/kg·K)	1000.0000
Density (kg/m³)	1000.00
Resistance (R-value)	No
Surface Properties	
Thermal absorptance (emissivity)	0.900
Solar absorptance	0.700
Visible absorptance	0.700
Roughness	Rough
Colour	Brushed flat concrete
Texture	Brushed flat concrete
Green Roof	
Green roof	
Name of soil layer	name
Height of plants (m)	0.1000
Leaf area index	5.0000
Leaf reflectivity	0.220
Leaf emissivity	0.950
Minimum stomatal resistance (s/m)	100.000
Max volumetric moisture content at saturation	0.500
Min residual volumetric moisture content	0.010
Initial volumetric moisture content	0.150
Embodied Carbon	
Embodied Carbon Available	No

墙体构造与材料选择：

材料的主要参数

• **U-Value:** U值 (U-Factor)，也称为Overall Heat Transfer Coefficient总传热系数，在标准条件下，通常是24°C，50%的湿度，无风，通过给定面积的建筑元素热传递的比率，单位W/(m² K) (SI单位)，U值是热阻(Thermal resistance)的倒数， $U\text{-value} = 1/\text{Thermal resistance}$ ，U值愈低的物料就愈隔热、保温。在北欧、北美的建筑物大多是会在外墙加上隔热绵，目的是降低U-value，增加保温程度。但就香港而言，由于夏天很热，所以大厦都没有加上隔热绵，尽量令大厦内的热力散至室外。为了降低U值，通常在玻璃表面增加一层Low-E (Low-Emittance低反射度) 涂料，减少热量的损失，改善保暖，制冷的效果，例如在夏季，将阳光的热力反射出室外，而阳光可以射入室内；

• **R-Value:** 是热阻值 (Thermal Resistance)，一般用于建筑和构造工业。单位为m² · K/W (SI单位)；

Data Report (Not Editable)		
General		
Best practice Semi-exposed wall, Heavyweight		
Source	DesignBuilder	
Category	Walls	
Region	General	
Layers		
Number of layers	4	
Outermost layer		
Material	Brickwork (Outer Leaf)	
Thickness (m)	0.1050	
Bridged?	No	
Layer 2		
Material	XPS Extruded Polystyrene - CO2 Blowing	
Thickness (m)	0.1182	
Bridged?	No	
Layer 3		
Material	Concrete Block (Medium)	
Thickness (m)	0.1000	
Bridged?	No	
Innermost layer		
Material	Gypsum Plastering	
Thickness (m)	0.0130	
Bridged?	No	
Outside Surface		
Fix convective heat transfer coefficient	No	
Inside Surface		
Fix convective heat transfer coefficient	No	
Cross Section		
Outer surface		
	105.00mm Brickwork (Outer Leaf)	
	118.20mm XPS Extruded Polystyrene - CO2 Blowing	
	100.00mm Concrete Block (Medium)	
	13.00mm Gypsum Plastering (not to scale)	
Inner surface		
Inner surface		
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	2.152	
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.540	
Surface resistance (m ² -K/W)	0.130	
Outer surface		
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19.870	
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.130	
Surface resistance (m ² -K/W)	0.040	
No Bridging		
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0.261	
R-Value (m ² -K/W)	4.000	
U-Value (W/m ² -K)	0.250	
With Bridging (BS EN ISO 6946)		
Upper resistance limit (m ² -K/W)	3.979	
Lower resistance limit (m ² -K/W)	3.979	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0.261	
R-Value (m ² -K/W)	4.000	
U-Value (W/m²-K)	0.250	

建筑构造截面由四部分材料组成，材料可以在DB的材料库中选择，并根据当地的材料选择适当调整。

材料的主要参数

Thermal Bulk Properties 热性质：

该部分参数在热湿环境基础部分有详细说明

- **Conductivity(W/(m·K))** 热导率；
- **Specific Heat(J/kg·K)** 比热；
- **Density(kg/m³)** 密度；
- **Resistance(R-value)** 热阻；

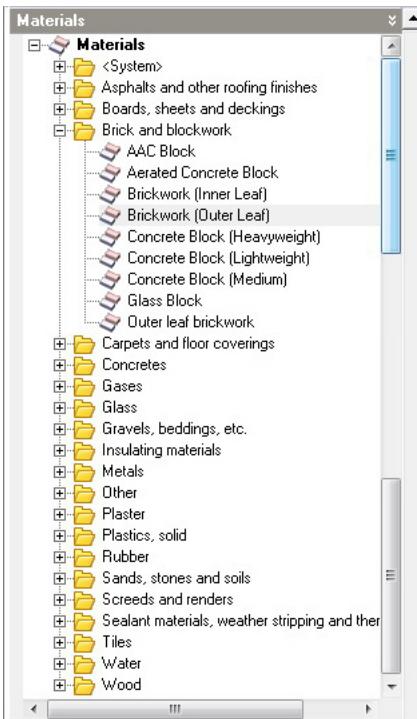
Surface Properties 表面性质：

- **Thermal absorptance(emissivity)**: 热量吸收率(发射率)描述了材料吸收入射长波辐射，通常用来计算不同材料表面间长波辐射交换，影响表面的热平衡(包括内外)，值范围0.0~1.0(黑体通常为1)；
- **Solar absorptance**: 太阳吸收率，描述材料吸收的太阳直接辐射，包括可见光，红外线和紫外线波长。该参数用来计算不同材料表面间吸收太阳直接辐射数量，并影响表面热平衡(包括内外)，参数值范围0.0~1.0；
- **Visible absorptance**: 可见波长吸收率，描述材料吸收可见波长的辐射，可见光波长比太阳辐射波长窄的多。参数用来计算材料表面间可见波长的吸收数量，并影响表面热平衡(包括内外)，参数值范围0.0~1.0；

Roughness: 粗造度，描述材料层的相对粗造程度，参数仅影响外部散热系数；

Outer Surface最外层表面材料

Data Report (Not Editable)	
General	
Gypsum Plastering	
Source	ISO 10456
Category	Plaster
Region	General
Default thickness (m)	0.0100
Detailed properties	Yes
Thermal Bulk Properties	
Conductivity (W/m-K)	0.400
Specific Heat (J/kg-K)	1000.0000
Density (kg/m ³)	1000.00
Resistance (R-value)	No
Surface Properties	
Thermal absorptance (emissivity)	0.900
Solar absorptance	0.500
Visible absorptance	0.500
Roughness	3-Rough
Colour	
Texture	Brushed flat concrete
Green Roof	No
Embodied Carbon	
Embodied Carbon Available	Yes
Embodied Carbon (kgCO ₂ /kg)	0.38
Conversion Factor Name	Plasterboard
Data Source / Database	ICE v1.6
Assumption / factor boundary	Cradle to gate
Equivalent CO ₂ Available	Yes
Embodied Carbon (kgCO _{2e} /kg)	0.40



Inner surface内层材料: Gypsum Plastering

Data Report (Not Editable)	
General	
Brickwork (Outer Leaf)	
Source	Brick and blockw
Category	Brick and blockw
Region	General
Default thickness (m)	0.0100
Detailed properties	Yes
Thermal Bulk Properties	
Conductivity (W/m-K)	0.840
Specific Heat (J/kg-K)	800.0000
Density (kg/m ³)	1700.00
Resistance (R-value)	No
Surface Properties	
Thermal absorptance (emissivity)	0.900
Solar absorptance	0.700
Visible absorptance	0.700
Roughness	3-Rough
Colour	
Texture	Red brick with lig
Green Roof	
Green roof	No
Embodied Carbon	
Embodied Carbon Available	Yes
Embodied Carbon (kgCO ₂ /kg)	0.22
Conversion Factor Name	General brick
Data Source / Database	ICE v1.6
Assumption / factor boundary	Cradle to gate
Equivalent CO ₂ Available	Yes
Embodied Carbon (kgCO _{2e} /kg)	0.23

Layer 2 Material第2层材料: XPS Extruded Polystyrene CO2 Blowing

Data Report (Not Editable)	
General	
XPS Extruded Polystyrene - CO2 Blowing	
Source	Uralita
Category	Insulating materials
Region	General
Default thickness (m)	0.0100
Detailed properties Yes	
Thermal Bulk Properties	
Conductivity (W/m·K)	0.034
Specific Heat (J/kg·K)	1400.000
Density (kg/m³)	35.00
Resistance (R-value) No	
Surface Properties	
Thermal absorptance (emissivity)	0.900
Solar absorptance	0.600
Visible absorptance	0.600
Roughness	3-Rough
Colour	GranulatedBrown7413M
Texture	
Green Roof	
Green roof	No
Embodied Carbon	
Embodied Carbon Available	Yes
Embodied Carbon (kgCO₂/kg)	2.88
Conversion Factor Name	Polystyrene, extruded (XPS), at plant
Data Source / Database	Ecoinvent v 2.01
Assumption / factor boundary	Cradle to gate
Equivalent CO₂ Available	Yes
Embodied Carbon (kgCO₂e/kg)	9.58

Layer 3 Material第3层材料:Concrete Block(Medium)

Data Report (Not Editable)	
General	
Concrete Block (Medium)	
Source	Brick and blockwork
Category	General
Region	General
Default thickness (m)	0.0100
Detailed properties Yes	
Thermal Bulk Properties	
Conductivity (W/m·K)	0.510
Specific Heat (J/kg·K)	1000.000
Density (kg/m³)	1400.00
Resistance (R-value) No	
Surface Properties	
Thermal absorptance (emissivity)	0.900
Solar absorptance	0.600
Visible absorptance	0.600
Roughness	3-Rough
Colour	Brushed flat concrete
Texture	
Green Roof	
Green roof	No
Embodied Carbon	
Embodied Carbon Available	Yes
Embodied Carbon (kgCO₂/kg)	0.08
Conversion Factor Name	Concrete block
Data Source / Database	ICE v1.6
Assumption / factor boundary	Average of BATH ICE BLOCKS: Block - 8 Mpa, Block - 10 Mpa, Block - 12 Mpa, Block - 13 MPa
Equivalent CO₂ Available	Yes
Embodied Carbon (kgCO₂e/kg)	0.08

窗体构造与材料选择：

Activity Template

Template: SocClub_Tea

Sector: Social clubs

Zone type: 1-Standard

Zone multiplier: 1

Include zone

Occupancy

Density (people/m²): 0.1100

Schedule: SocClub_Tea_Occ

Metabolic

Activity: Standing/walking

Factor (Men=1.00, Women=0.85, Children=0.75): 0.90

Clothing

- Winter clothing (clo): 1.00
- Summer clothing (clo): 0.50

DHW

Consumption rate (l/m²·day): 0.000

Environmental Control

Heating Setpoint Temperatures

- Heating (°C): 20.0
- Heating set back (°C): 12.0

Cooling Setpoint Temperatures

- Cooling (°C): 23.0
- Cooling set back (°C): 28.0

Ventilation Setpoint Temperatures

Natural Ventilation

- Nat vent cooling (°C): 22.0
- Max in-out delta T (deltaC): -50.0

Mechanical Ventilation

- Mech vent cooling (°C): 10.0
- Max in-out delta T (deltaC): -50.0

Minimum Fresh Air

- Fresh air (Vs-person): 10.000
- Mech vent per area (Vs-m²): 0.000

Lighting

- Target Illuminance (lux): 200
- Default display lighting density (W/m²): 0

Computers

On

- Gain (W/m²): 0.00
- Schedule**: SocClub_Tea_Equip
- Radiant fraction: 0.200

Office Equipment

On

- Gain (W/m²): 10.00
- Schedule**: SocClub_Tea_Equip
- Radiant fraction: 0.200

Miscellaneous

- On
- Catering
- Process
- On

玻璃的材质选用了Dbl Loe (e3=.1) Clr 3mm/13mm Air 构造为：

Data Report (Not Editable)

General

Dbl Loe (e3=.1) Clr 3mm/13mm Air

Source: EnergyPlus dataset

Category: Region

Layers

Number layers: 2

Outermost pane

- Pane type: Generic CLEAR 3MM
- Flip layer: No

Window gas 1

- Window gas type: AIR 13MM

Innermost pane

- Pane type: Generic LoE CLEAR 3MM Rev
- Flip layer: No

Outside Surface

Fix convective heat transfer coefficient: No

Inside Surface

Fix convective heat transfer coefficient: No

Calculated Values

Value	Value
Total solar transmission (SHGC)	0.643
Direct solar transmission	0.538
Light transmission	0.769
U-value (EN 673) (W/m ² ·K)	1.798
U-value (W/m ² ·K)	1.798

Outermost pane Material 外层玻璃: Generic CLEAR 3MM

材料属性

Data Report (Not Editable)

General

Generic LoE CLEAR 3MM Rev

Source: EnergyPlus dataset

Category: Coated

NFRC ID: 0

Data Type

Data type: 1-Broadband

Thermal Properties

Property	Value
Thickness (mm)	3.0000
Conductivity (W/m·K)	0.9000

Solar Properties

Property	Value
Solar transmittance	0.63000
Outside solar reflectance	0.22000
Inside solar reflectance	0.19000

Visible Properties

Property	Value
Visible transmittance	0.85000
Outside Visible reflectance	0.07900
Inside Visible reflectance	0.05600

Infra-Red Properties

Property	Value
Infra red transmittance	0.00000
Outside emissivity	0.10000
Inside emissivity	0.84000

Spectral Data

Innermost pane Material内层玻璃: Generic CLEAR 3MM Rev材料属性

Data Report (Not Editable)	
General	
Generic	CLEAR 3MM
Source	EnergyPlus dataset
Category	Clear glass
NFRC ID	0
Data Type	
Data type	1-Broadband
Thermal Properties	
Thickness [nm]	3.0000
Conductivity [W/m·K]	0.09000
Solar Properties	
Solar transmittance	0.83700
Outside solar reflectance	0.07500
Inside solar reflectance	0.07500
Visible Properties	
Visible transmittance	0.89800
Outside Visible reflectance	0.08100
Inside Visible reflectance	0.08100
Colour	
Infra-Red Properties	
Infra red transmittance	0.00000
Outside emissivity	0.84000
Inside emissivity	0.84000
Spectral Data	

活动设置 (Activity)

活动设置可以选择适当的模板快速设置，再根据实际计算情况进行调整。该部分设置的内容包括每平米的人数量 (Occupancy)、代谢率 (Metabolic)、DHW (热水消耗量)、环境控制 (Environmental Control)、计算机 (Computers)、办公室设备 (Office Equipment)以及多样性 (Miscellaneous)、餐饮服务 (Catering)、加工 (Process)。

绝大部分设置DB都给出了明确的分类与参数，只要根据实际进行选择即可，例如Metabolic代谢率：环境控制Environmental Control部分可以参考《采暖通风与空气调节设计规范》、《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》和《民用建筑热工设计规范》相关部分进行设置：例如采暖部分，冬季室内计算温度应根据建筑物的用途，采取不同的标准：

民用建筑的主要房间，宜采用16~24°C；

工业建筑的工作地点，宜采用：

轻作业 18~21°C

中作业 16~18°C

重作业 14~16°C

过重作业 12~14°C

注：• 作业种类的划分，应按国家现行的《工业企业设计卫生标准》（GBZ1）执行；

• 当每名工人占用较大面积 (50~100m²) 时，轻作业时可以低至10°C，中作业时可以低至7°C，重

作业时可以低至5°C；

辅助建筑物及辅助用室，室内计算温度：

浴室 25°C、更衣室25°C、休息室18°C、食堂18°C、盥洗室、厕所12°C

注：当工艺或使用条件有特殊要求时，各类建筑物的室内温度可以按照国家现行有关专业标准，规范执行。——《采暖通风与空气调节设计规范》

《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》中有关参数：

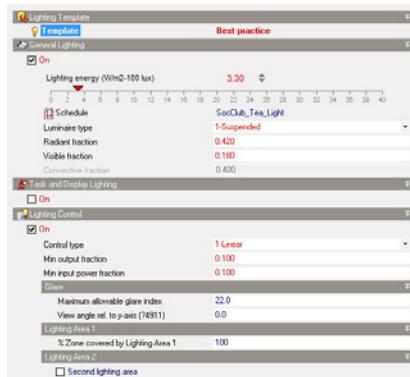
冬季采暖室内热环境设计指标，应符合下列要求：

- 卧室、起居室室内设计温度取 16~18°C；
- 换气次数取 1.0次/h。

Metabolic rates	
Metabolic rates	
Machine work	
Miscellaneous leisure	
Miscellaneous occupational	
Office activities	
Resting	
Walking	
3.2 km/h (0.9 m/s)	
4.3 km/h (1.2 m/s)	
6.4 km/h (1.8 m/s)	
Standing/walking	

Data Report (Not Editable)	
General	
Source	CIBSE
Category	Walking
Region	General
Archive	
Metabolic rate per person (...	140.0

居住建筑通过采用增强建筑围护结构保温隔热性能和提高采暖、空调设备能效比的节能措施，在保证相同的室内热环境指标的前提下，与未采取节能措施前相比，采暖、空调能耗应节约50%。



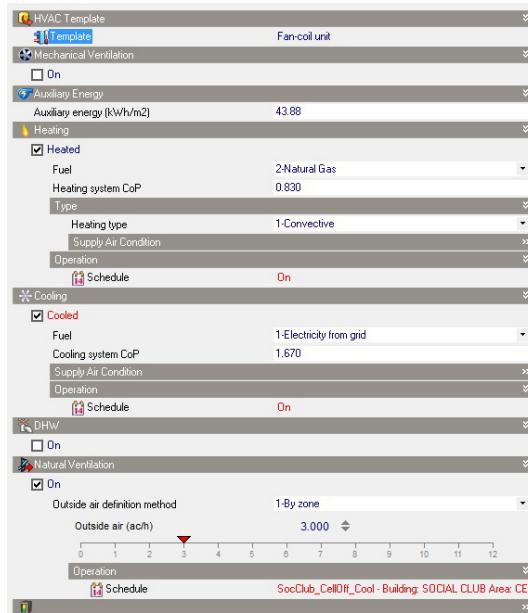
照明设置 (Lighting)

照明设置可以选择预先设置的模板，再进行调整：

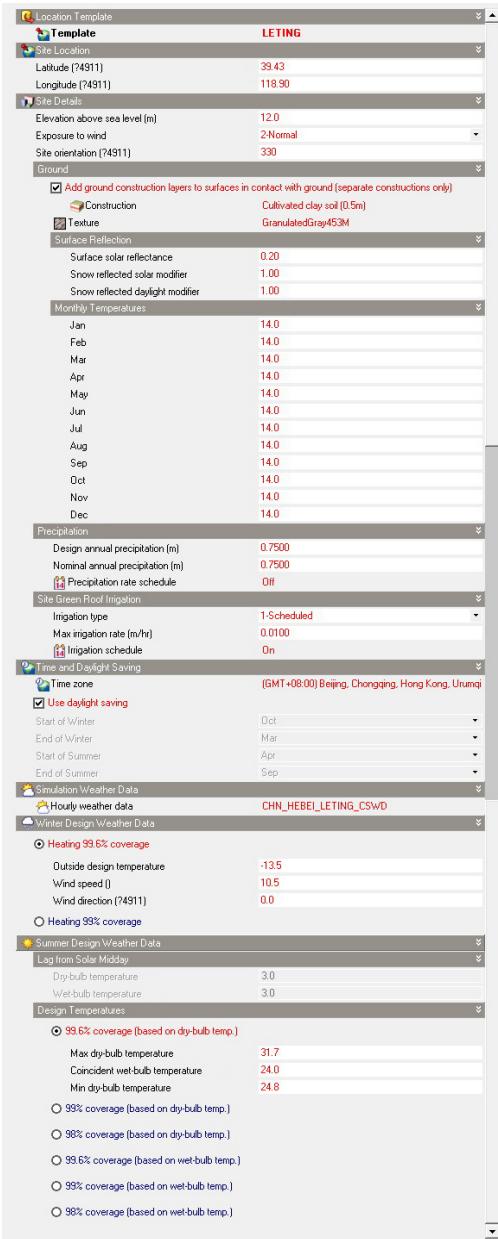
采暖通风与空气调节

(HVAC, Heating, Ventilation, and Conditioning)

关键需要注意几点：一个是设计区域的气候数据需要加载。EnergyPlus提供了中国和世界其它国家地区的很多气象数据，这里选择了中国甘肃民勤的数据。另外，注意指北针的方向，可以点击Title的部分，在Location Site Orientation中调整。



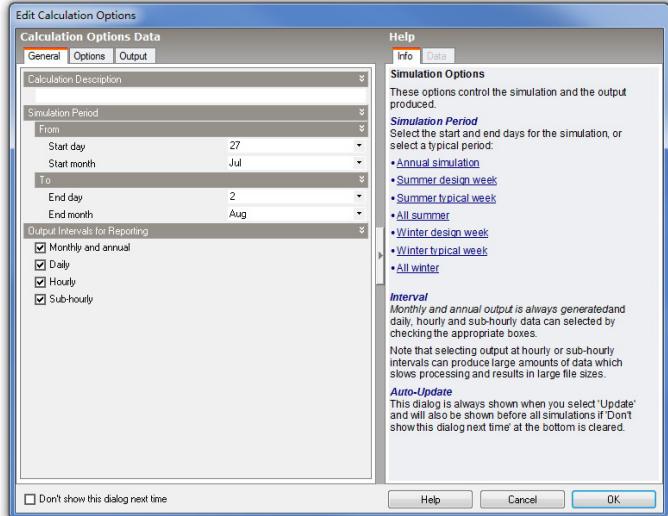
HVAC设置参考《采暖通风与空气调节设计规范》，该参数部分给出了燃料选择项，也可以使用机械通风，也可以设定为自然通风进行分析和方案的对比，同时可以设置时间表，进一步控制采暖通风的条件，本次模拟只使用自然通风，而不考虑机械采暖与制冷，所以仅勾选Natural Ventilation。



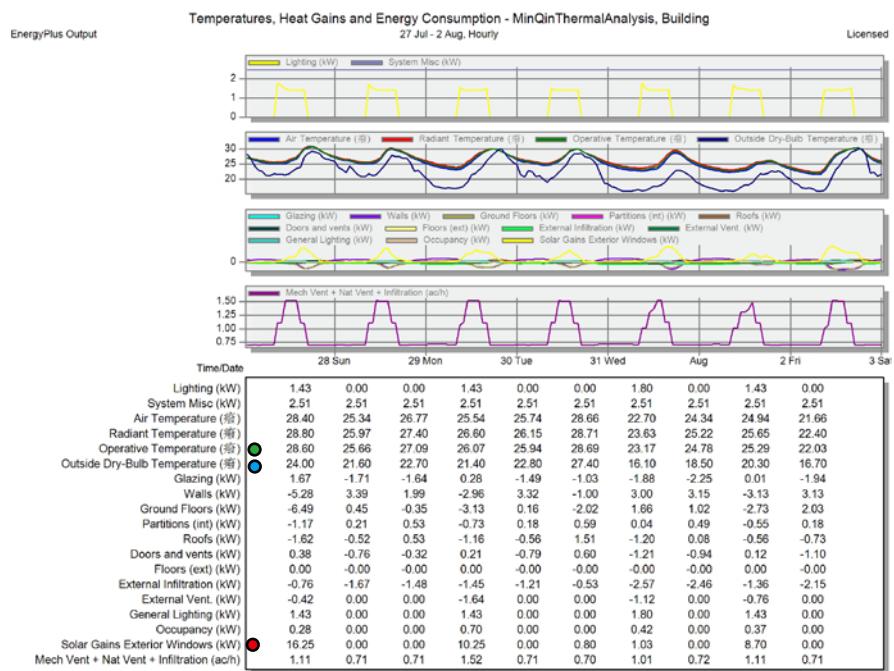
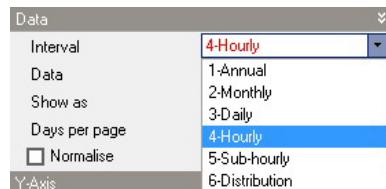
Simulation模拟

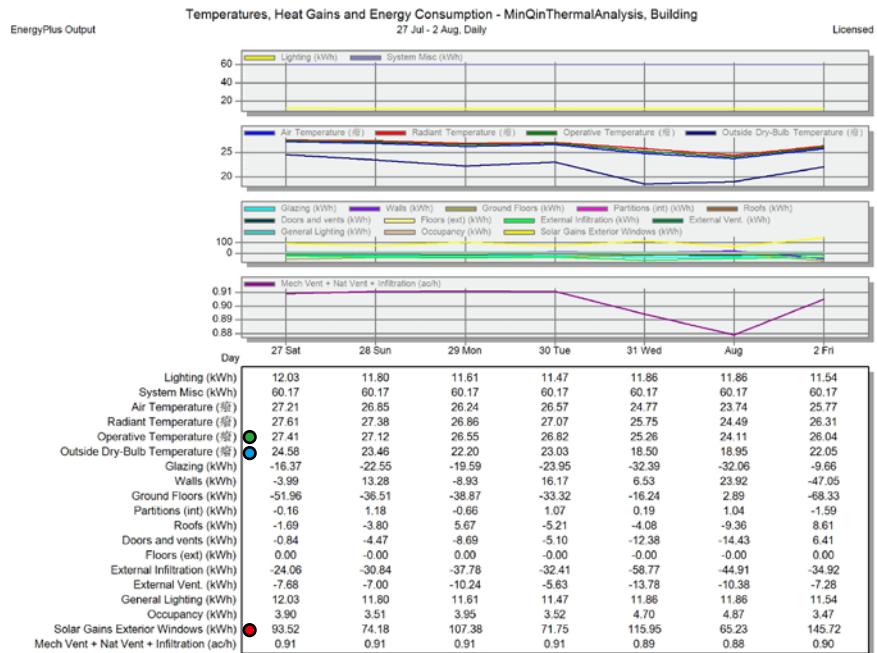
所有的模型设置完成后，就可以开始进行模拟了，DB结合EnergyPlus的模拟目前有Heating design, Cooling design, Simulation 和 CFD，这里主要进行Simulation的模拟，比较在无机械采暖制冷条件下的热环境情况。

在simulation计算前的设置，可以选择模拟的周期，现在是Summer design week 夏季设计星期区段，可以根据实际情况进行调整：



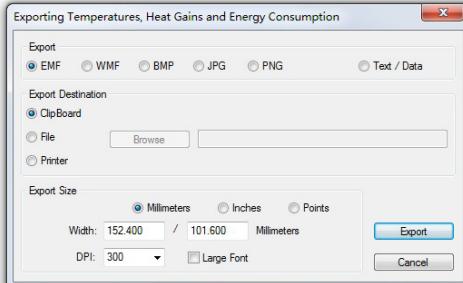
显示Interval间隔为Hourly小时。显示方式根据对设计模拟分析的目的进行选择。





Summer design week 夏季设计星期模拟

基于Building层级的数据观察



输出的文本格式文件，可以根据分析目的进一步在其它分析平台（例如SPSS, EXCEL）上编辑、统计分析。

模拟后能够清晰的观察到夏季设计日模拟的几天中，Operative Temperature比室外Outside Dry-Bulb Temperature高，如果观察细部数据时图表Graph显示不是很清楚的时候，可以在Table中分析数据，另外可以选择其它Interval的方式。例如，Daily。

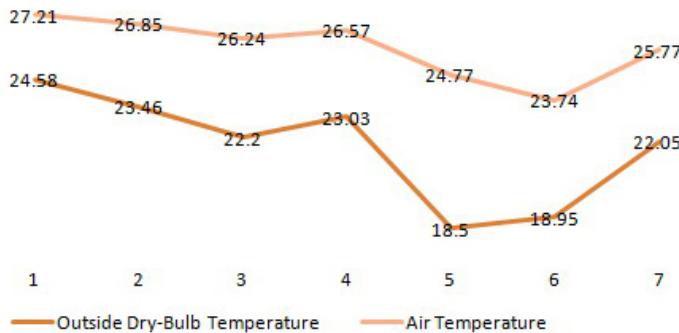
在Daily显示模式下，能够更好的读出数据变化的关系，建筑得热最主要的方式是Solar Gains Exterior Windows(kWh)。其它参数General Lighting, Occupancy都会对室内得热有所贡献。

ExportDataT.txt - 记事本

Air Temperature (°C)	2002/7/27 0:00	27.21
Air Temperature (°C)	2002/7/28 0:00	26.85
Air Temperature (°C)	2002/7/29 0:00	26.24
Air Temperature (°C)	2002/7/30 0:00	26.57
Air Temperature (°C)	2002/7/31 0:00	24.77
Air Temperature (°C)	2002/8/1 0:00	23.74
Air Temperature (°C)	2002/8/2 0:00	25.77
Operative Temperature (°C)	2002/7/27 0:00	27.41
Operative Temperature (°C)	2002/7/28 0:00	27.12
Operative Temperature (°C)	2002/7/29 0:00	26.55
Operative Temperature (°C)	2002/7/30 0:00	26.82
Operative Temperature (°C)	2002/7/31 0:00	25.26
Operative Temperature (°C)	2002/8/1 0:00	24.11
Operative Temperature (°C)	2002/8/2 0:00	26.04
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	2002/7/27 0:00	24.58
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	2002/7/28 0:00	23.46
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	2002/7/29 0:00	22.20
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	2002/7/30 0:00	23.03
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	2002/7/31 0:00	18.50
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	2002/8/1 0:00	18.95
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	2002/8/2 0:00	22.05

图表输出可以右键/Export Dialog获得图片格式或者文本格式文件。

为了比较Air Temperature的变化与Outside Dry-Bulb Temperature变化的关系，选择这两个数据在EXCEL中做统计分析：



Air Temperature 的变化范围 $23.74 \sim 27.21^{\circ}\text{C}$ ，平均值为 $25.87857143^{\circ}\text{C}$ ；
 Outside Dry-Bulb Temperature 的变化范围 $18.5 \sim 24.58^{\circ}\text{C}$ ，平均值为 $21.82428571^{\circ}\text{C}$ ；
 二者平均值之差为： 4.054285714 ，即在夏季设计星期室内温度较室外高。

主要参数解释：

Air Temperature: 域内空气 (the Zone Air)的平均温度；

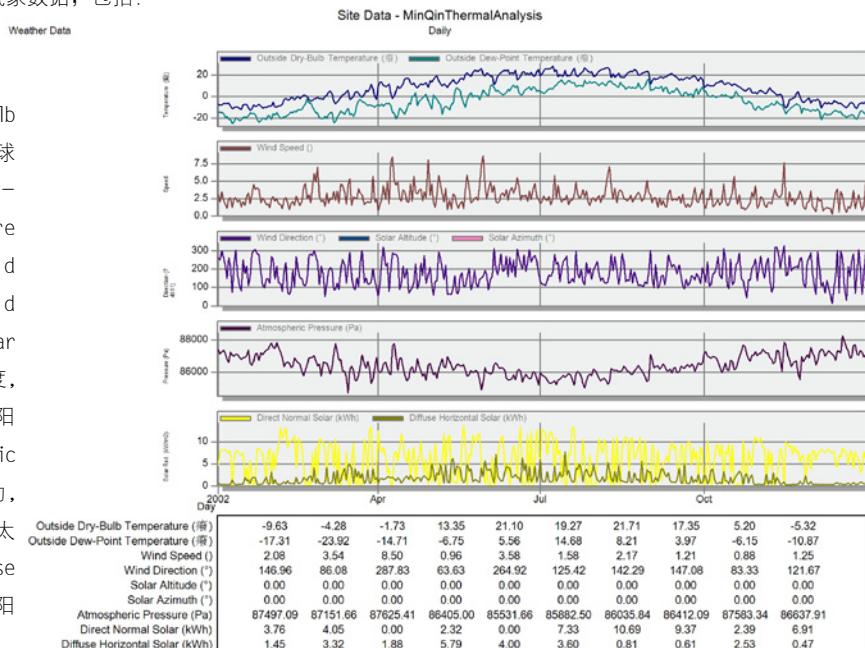
Radiant Temperature: 域内平均辐射温度 Mean Radiant Temperature (MRT)为了确定一个物体从整体上讲是辐射能量的获得者还是供给者，必须将其温度和其周围物体在该物体视野中所曝光的角度一并考虑。平均辐射温度描述的就是空间中一指定点所处的辐射环境。例如，当一个人面向壁炉时，因为壁炉的温度可以高达 1000°F (538°C)，就会从壁炉处获得较高的辐射效果，完全可以弥补较小的曝光角所带来的损失；而一个辐射顶棚，因为表面积大，曝光角大，只需要较低的温度如 90°F (32°C) 就可以达到同样的加热效果，辐射效果也可以是负值，例如人面向较冷的窗户时。如果向壁炉移动，MRT就会增加，向冷窗户移动就会减少。MRT对热环境的舒适性具有重要意义；

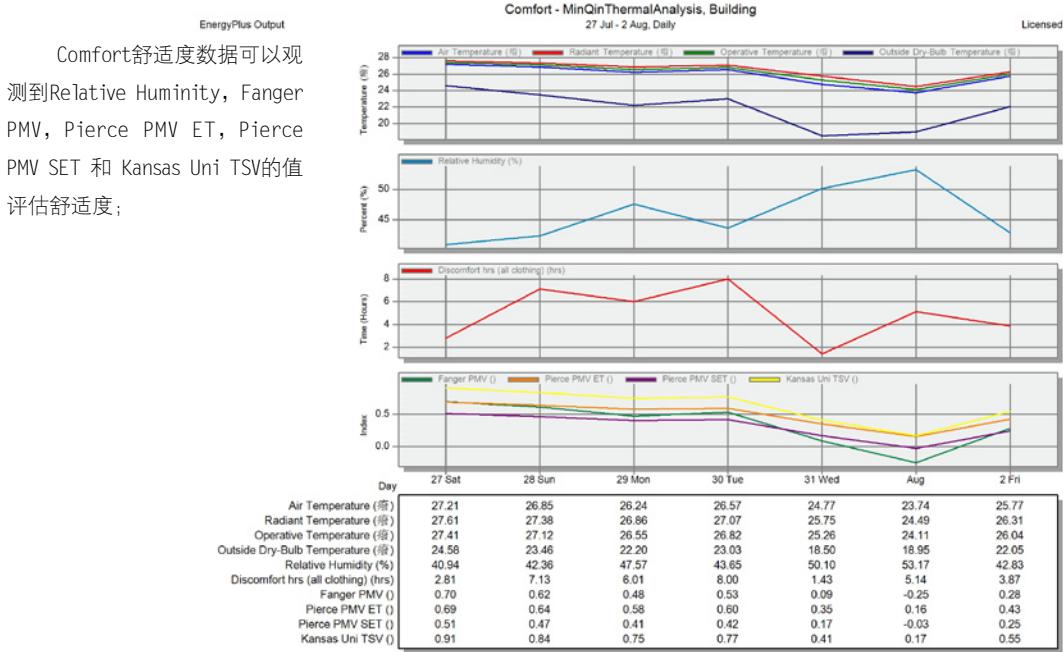
Operative Temperature: 域内空气与辐射温度的均值；

Outside Dry-Bulb Temperature: 室外干球温度；

DB能够给出Site Data (区域气象数据)的数据，可以通过图表的方式对区域气候环境有个直观的认识，例如以Daily显示的基本气象数据，包括：

Outside Dry-Bulb
Temperature 室外干球
温度，Outside Dew-
Point Temperature
室外露点温度，Wind
Speed 风速，Wind
Direction 风向，Solar
Altitude 太阳高度，
Solar Azimuth 太阳
方位角，Atmospheric
Pressure 大气压力，
Direct Normal Solar 太
阳直接辐射，Diffuse
Horizontal Solar 太阳
散射辐射等；





主要参数解释: (可参考热舒适性一节)

Relative Humidity: 相对湿度;

Discomfort Hrs: 湿度比humidity ratio 和操作温度operative temperature 不在ASHRAE 55-2004标准区域内的小时数;

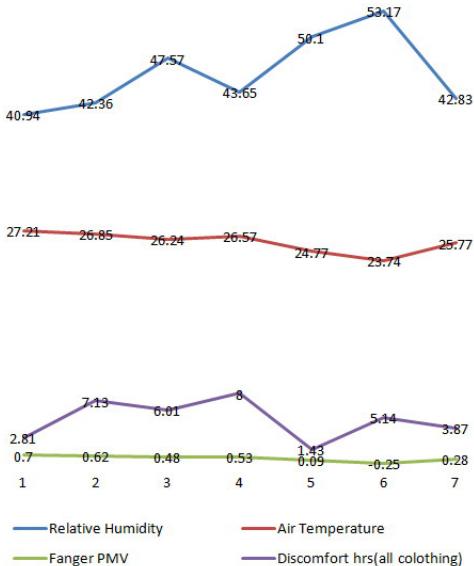
Fanger PMV: Fanger提出的PMV预测平均投票数;

Pierce PMV ET: 使用有效温度和Pierce提出的two-node thermal comfort model热舒适模型计算获得的PMV;

Pierce PMV SET: 使用标准有效温度指标和Pierce提出的two-node thermal comfort model热舒适模型计算获得的PMV;

Kansas Uni TSV: 使用KSU two-node thermal comfort model热舒适度模型计算的the Thermal Sensation Vote 热感觉平均投票值 TSV;

为了图表更加清晰, 选择感兴趣的数据, 在EXCEL中进一步处理数据。

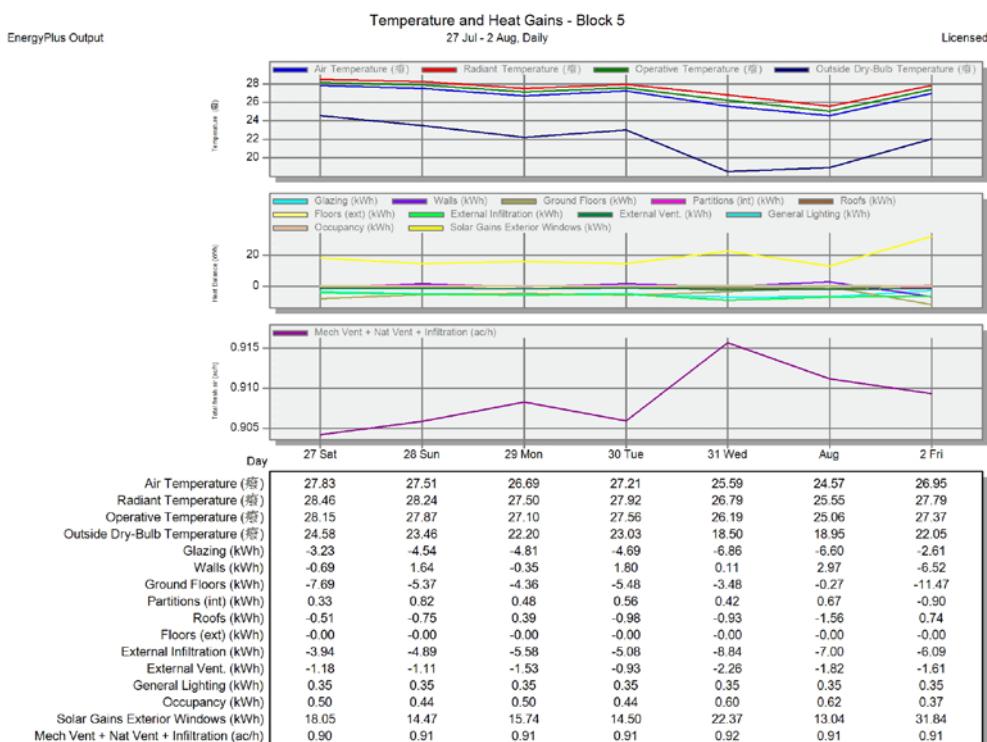
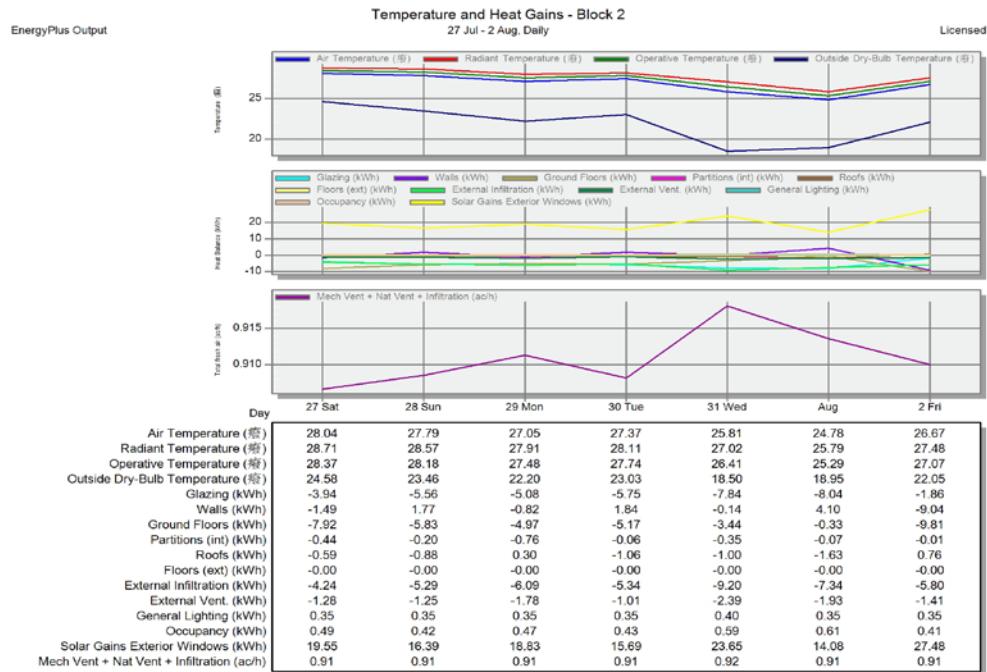


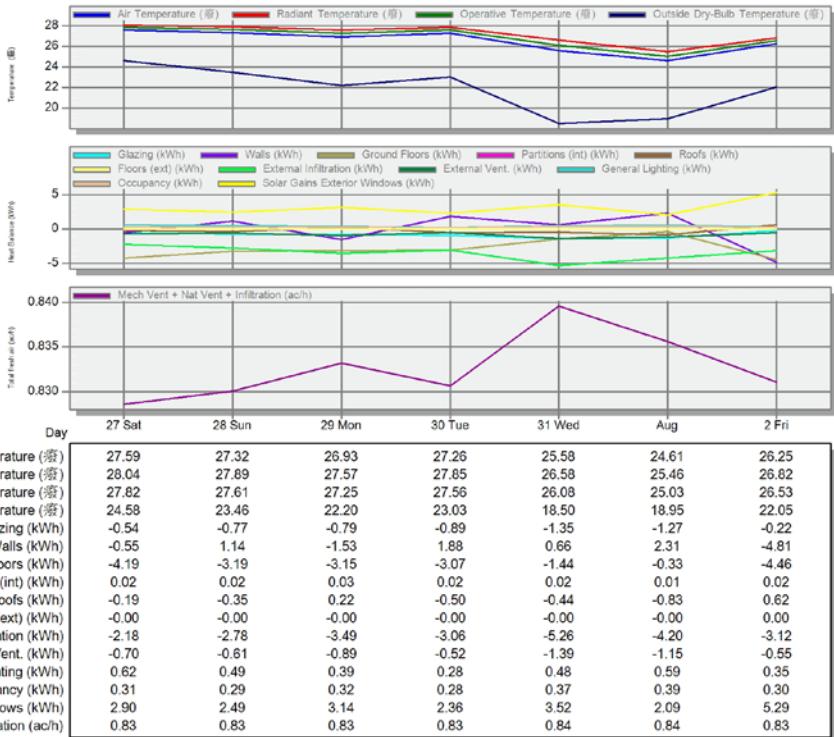
对于ISO(International Organization for Standardization) 世界标准组织, ISO 7730标准, 冬季舒适温度范围是 $T_0=20.0^{\circ}\text{C} \sim 24.0^{\circ}\text{C}$, 夏季舒适温度范围是 $T_0=23.0^{\circ}\text{C} \sim 26.0^{\circ}\text{C}$. $\text{PMV}<0.5$.

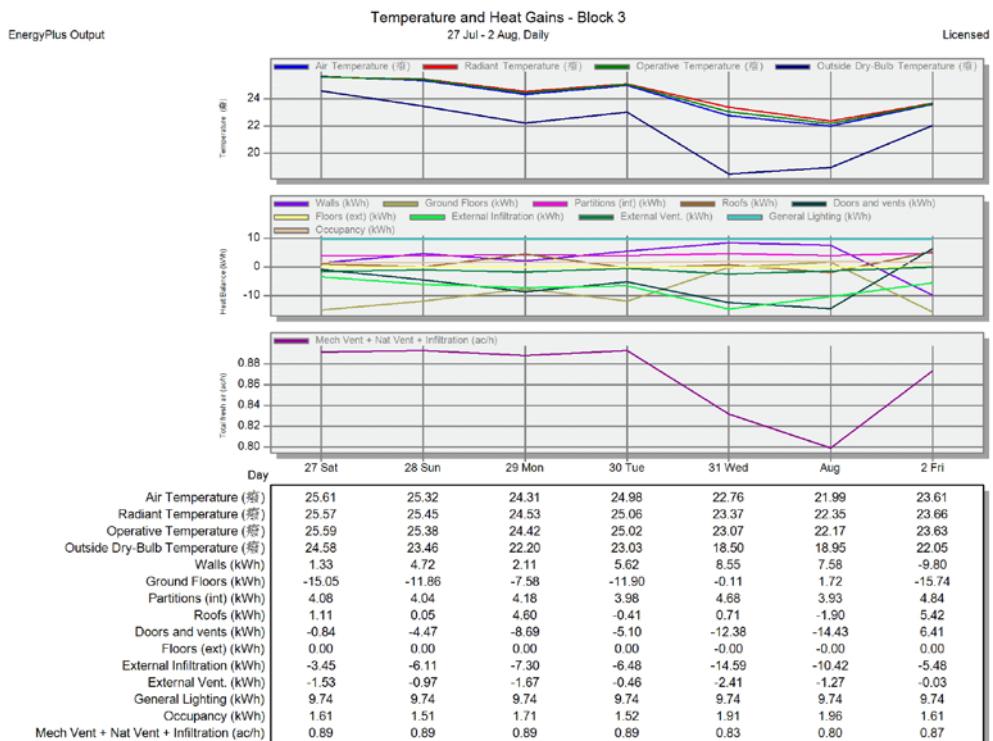
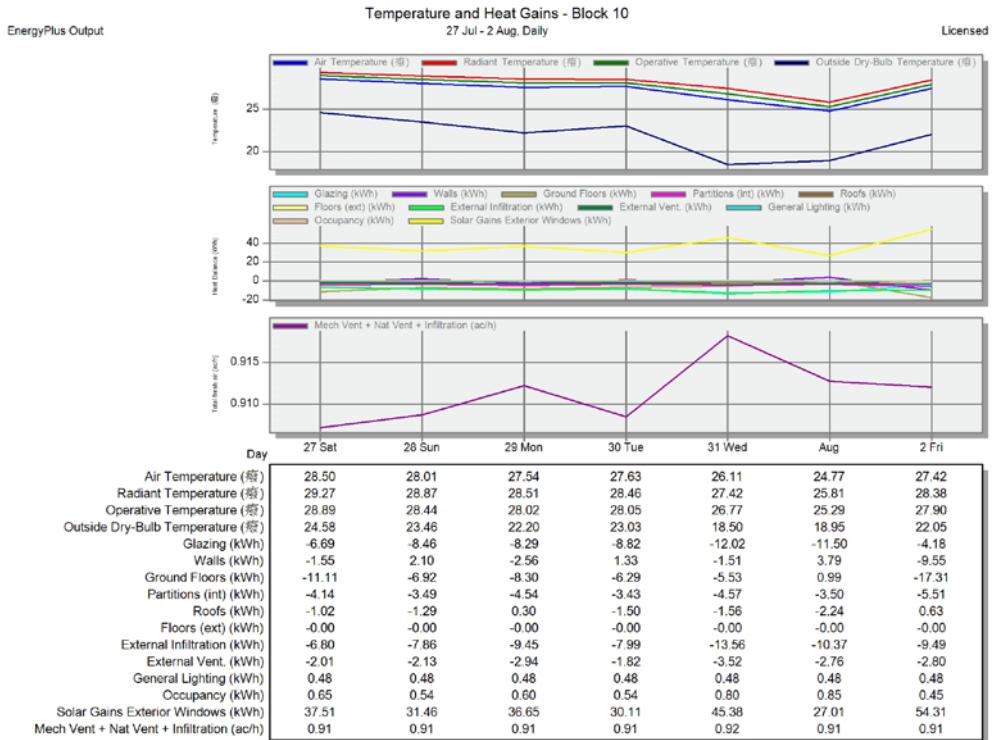
在夏季设计日区间, Air Temperature在 $23.74 \sim 27.21^{\circ}\text{C}$ 之间变化, 部分在ISO夏季舒适温度范围外。

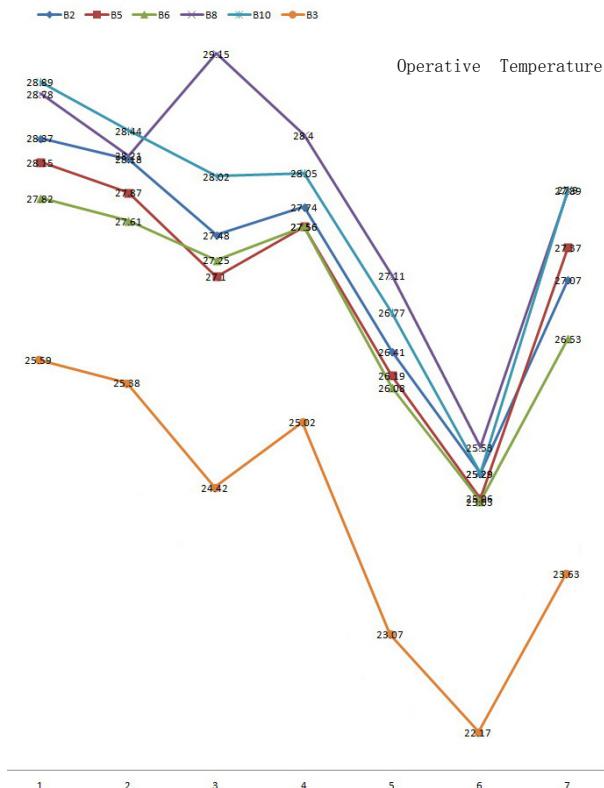
PMV范围部分在0.5外变化, 针对0.5外变化的值对应相对湿度可以发现, 相对湿度普遍在50%以下。虽然相对湿度基本在适宜范围40%~60%, 但是最适宜的区间在50%~60%, 因此相对湿度相对偏低。

现在分别点选Block2, 3, 5, 6, 8, 10, 对比不同区域的热环境变化情况:







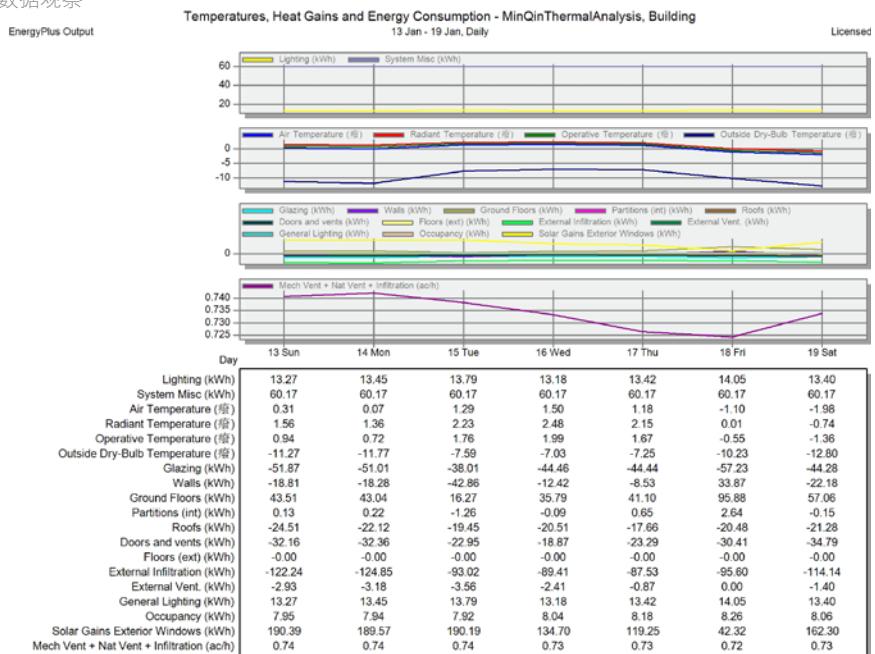


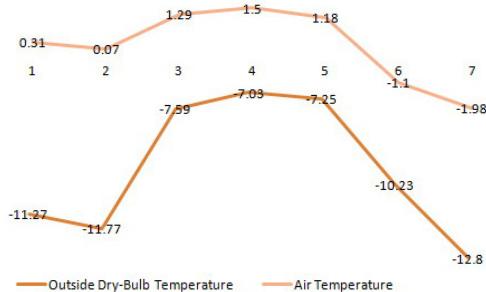
比较6个区域的域内温度Operative Temperature, B3温度相对最低,最主要的原因在于B3为东西向,接受日照最少,获得太阳辐射能量最小,因此室内温度较低。



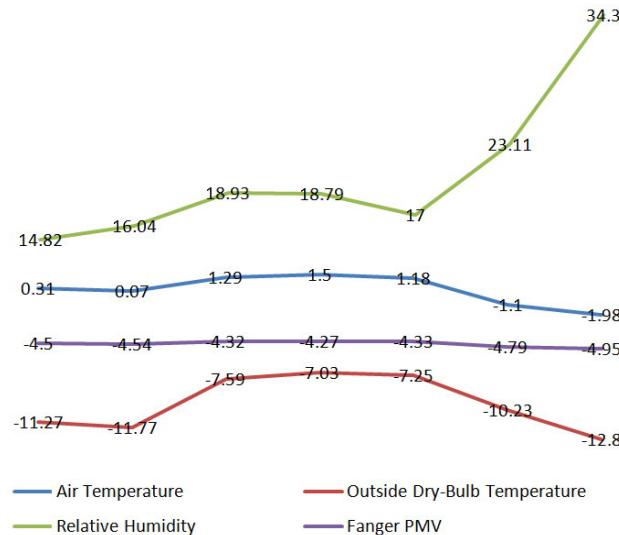
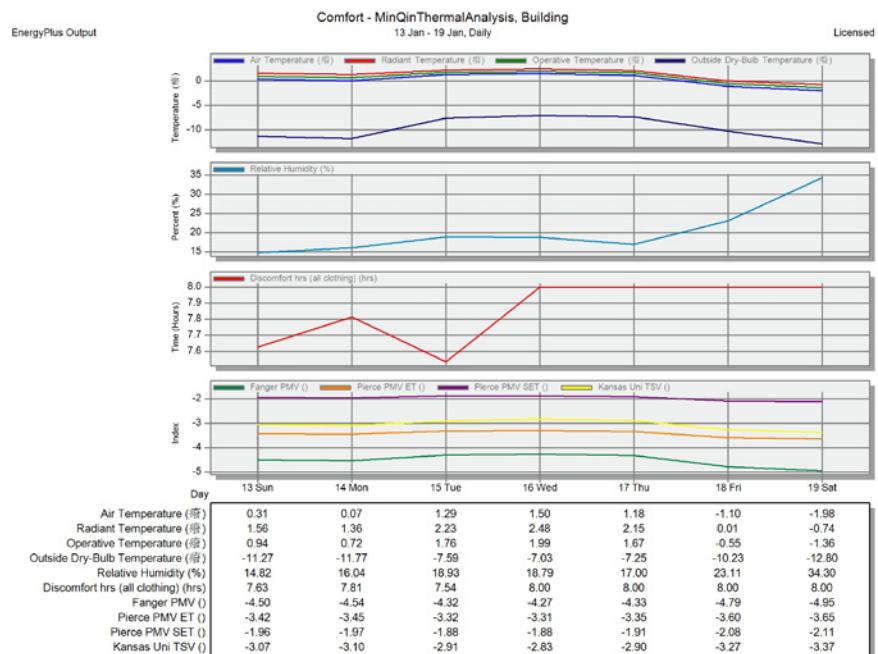
Winter design week 冬季设计星期模拟

基于Building层级的数据观察



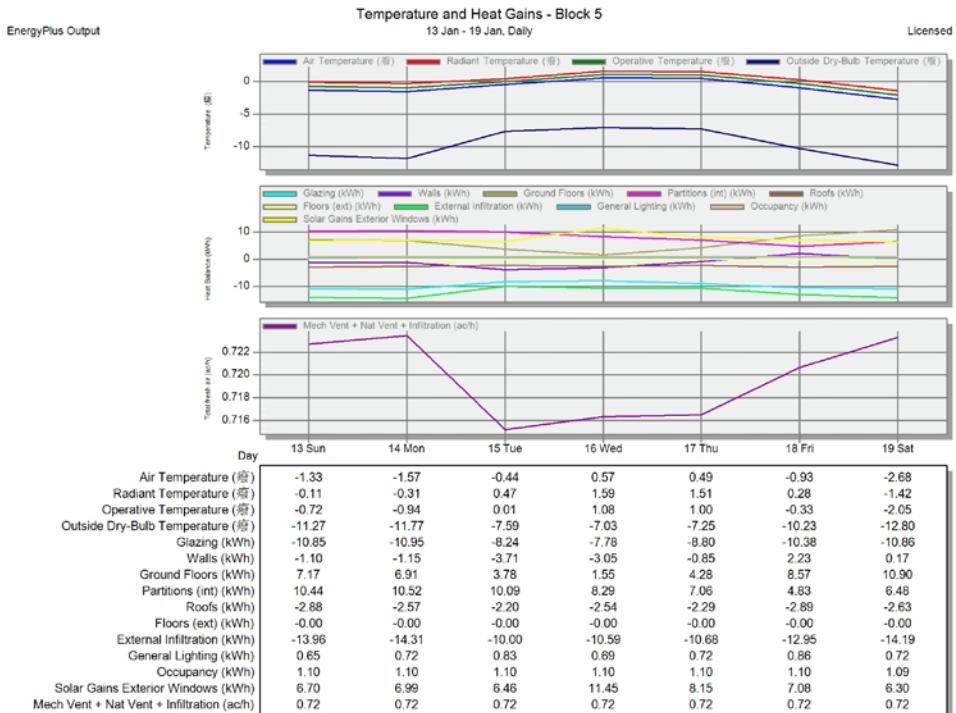
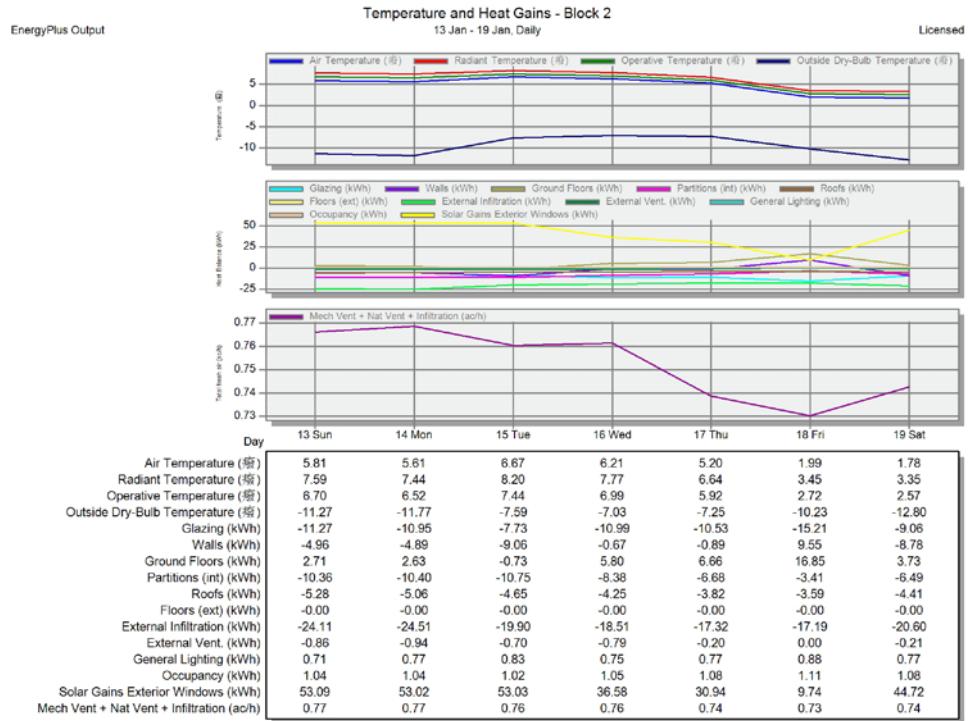


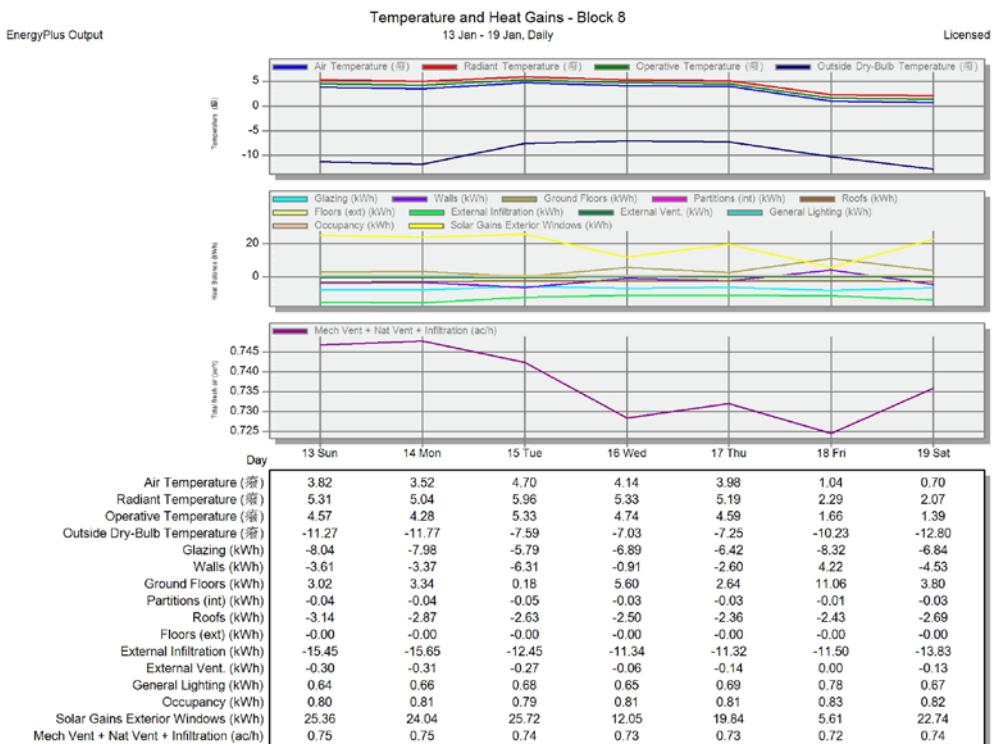
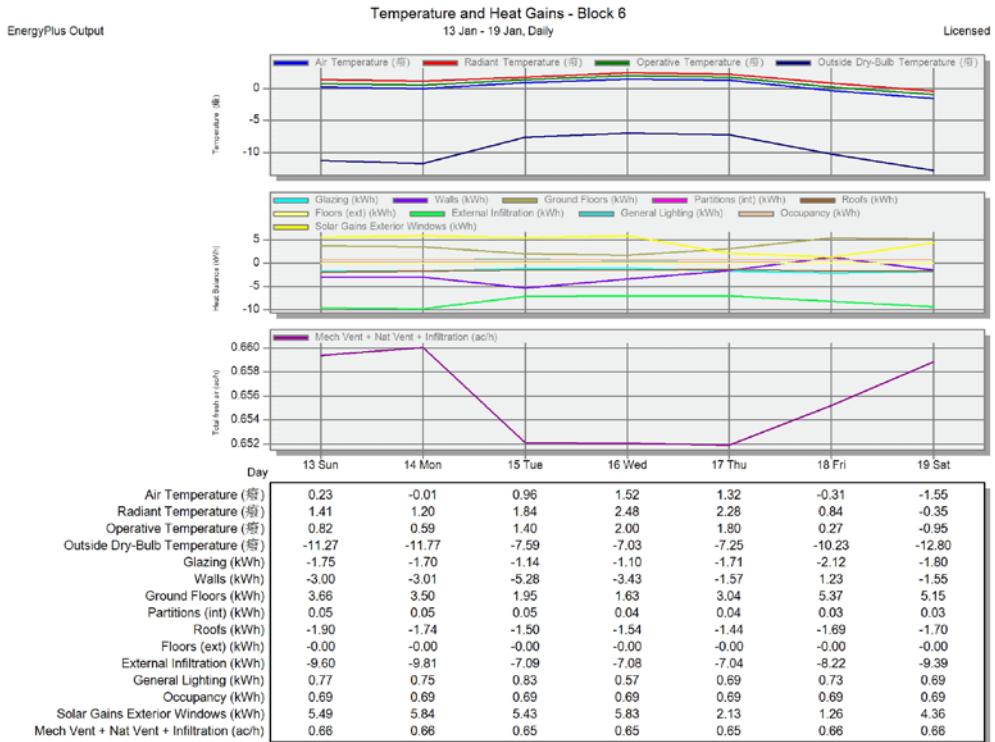
因为维护结构以及Solar Gains Exterior Windows窗体得热，室内温度比室外温度有明显的提升，Air Temperature 变化范围在-1.98~1.5°C，平均空气温度为0.181428571°C，Outside Dry-Bulb Temperature变化范围在-12.8~-7.03°C，均为-9.7705714286°C，之间平均温度差值为9.88714285°C；

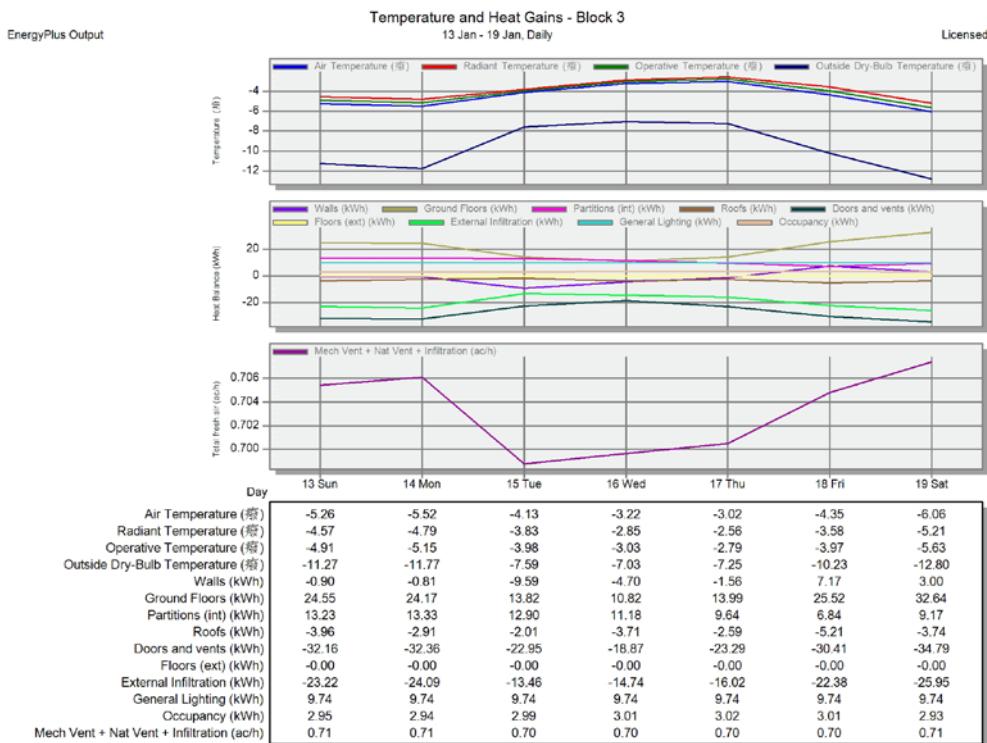
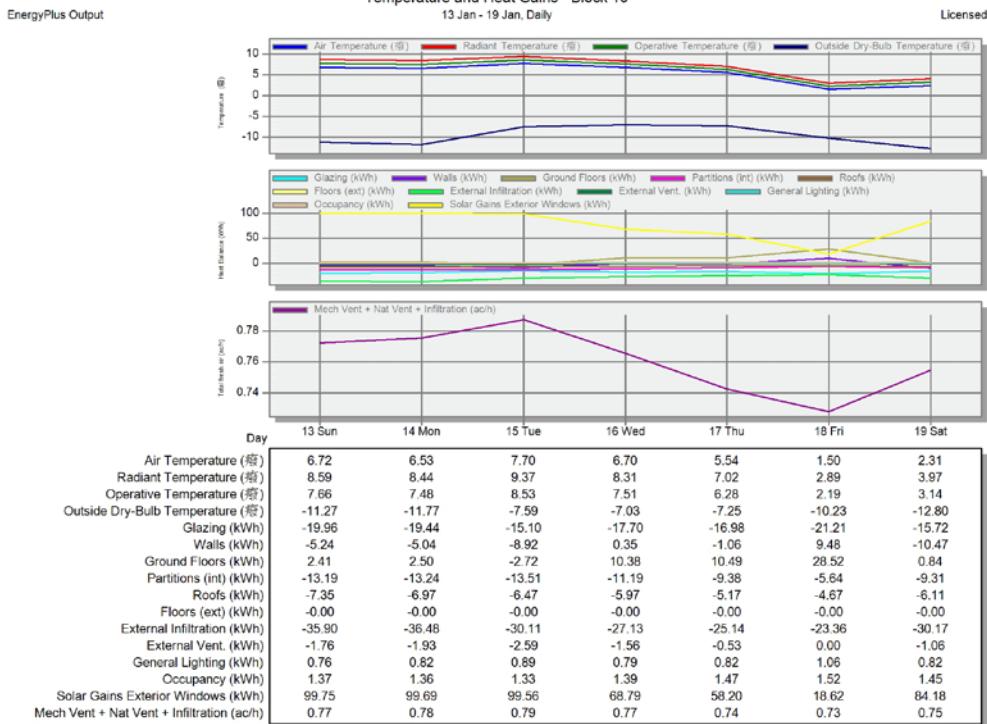


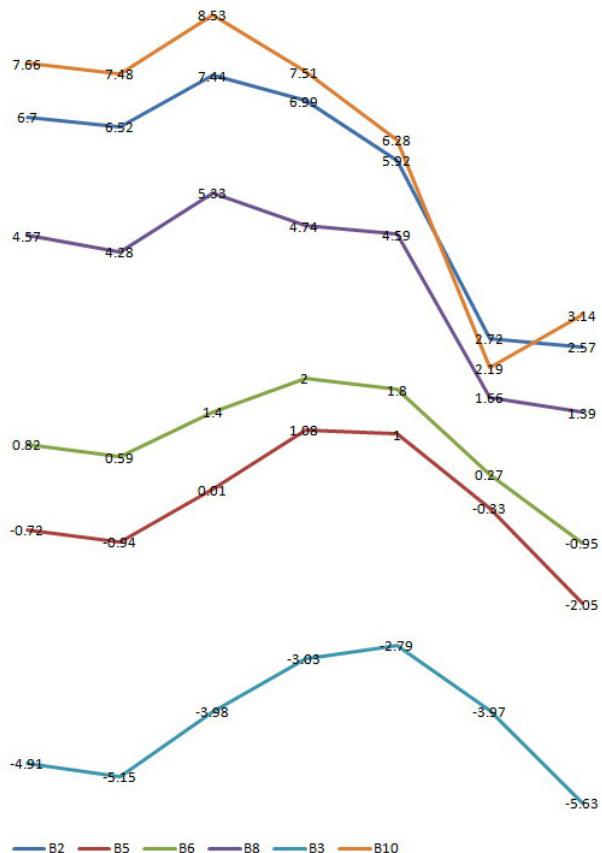
虽然冬季设计日模拟，室内温度有很大提升，但是由于地方气候冬季寒冷，位于我国建筑热工设计分区的寒冷地区，在建筑气候策略上应该是最大限度的保温。使用设备进行室内的加热。

现在分别点选Block2, 3, 5, 6, 8, 10, 对比不同区域的热环境变化情况:









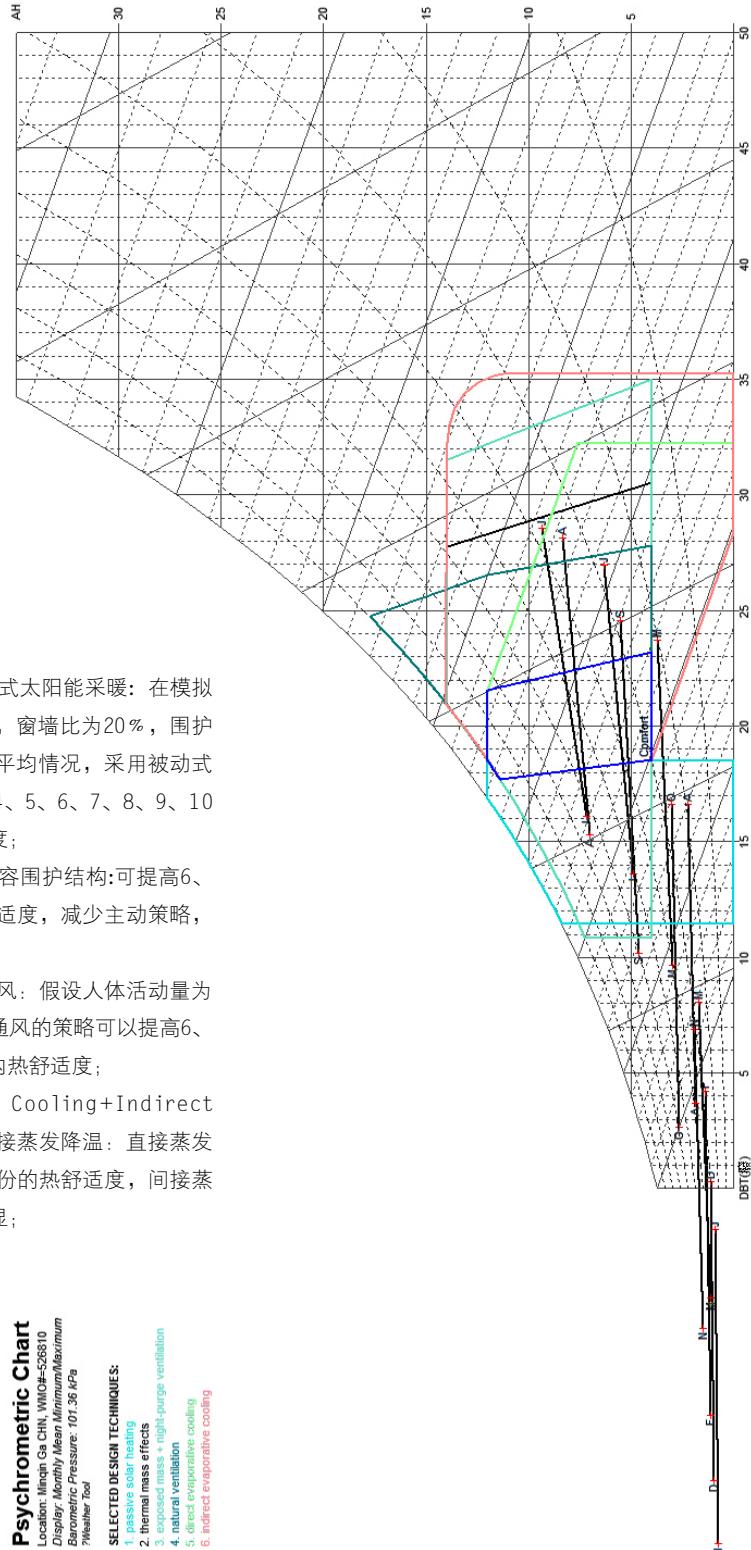
冬季设计日模拟，室内综合温度最低的区域是B3，即东西向建筑。而综合温度相对较高的区域为B10，这与其朝向为南，并且具有较大开窗有关。B10窗墙面积：

Wall - 79.405 m² - 159.1° B10窗墙比：1 : 1.73
 External - 29.090 m²
 Window [External] 50.315 m²

B2与B10建筑朝向一致，但室内综合温度略低于B10，B2的窗墙面积：

Wall - 53.141 m² - 159.1° B2窗墙比：1 : 1.05
 External - 26.037 m²
 Window [External] 21.019 m²
 Window [External] 6.086 m²



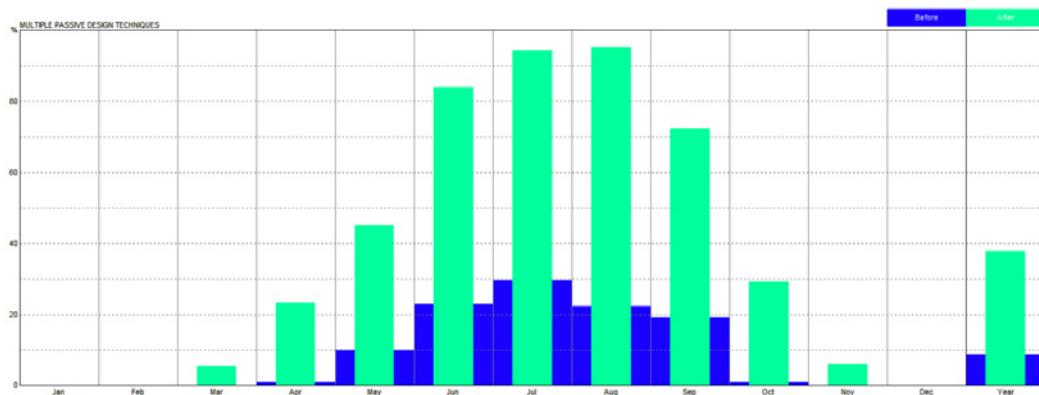


采取高热容围护结构、自然通风、太阳能采暖、直接蒸发降温的组合式策略，金昌地区的热舒适度有10%提高到约40%，其中6、7、8、9月尤为显著，采用高热容围护维护结构和夜间通风的组合策略效果最佳，将年热舒适度由10%提高到30%。

Comfort Percentages

NAME: Minqin Ga CHN
LOCATION: WMO#-526810
WEEKDAYS: 00:00 - 24:00 Hrs
WEEKENDS: 00:00 - 24:00 Hrs
POSITION: 38.6° 103.1°
?Weather Tool

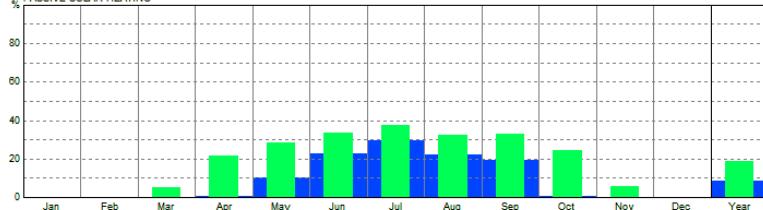
SELECTED DESIGN TECHNIQUES:
1. passive solar heating
2. thermal mass effects
3. exposed mass + night-purge ventilation
4. natural ventilation



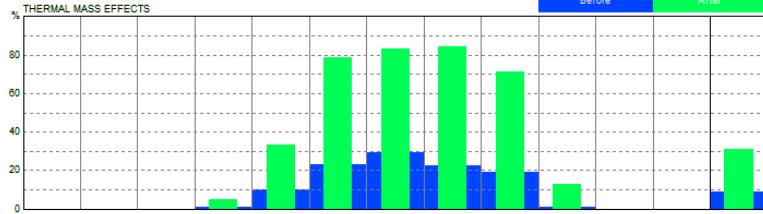
Comfort Percentages

NAME: Minqin Ga CHN
LOCATION: WMO#-526810
WEEKDAYS: 00:00 - 24:00 Hrs
WEEKENDS: 00:00 - 24:00 Hrs
POSITION: 38.6° 103.1°
?Weather Tool

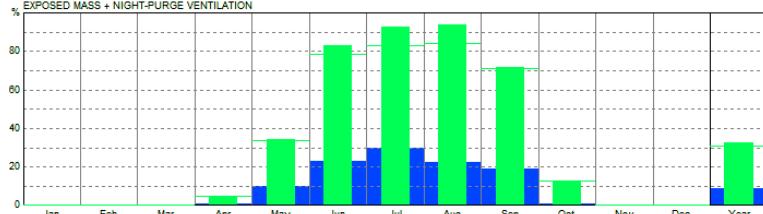
PASSIVE SOLAR HEATING

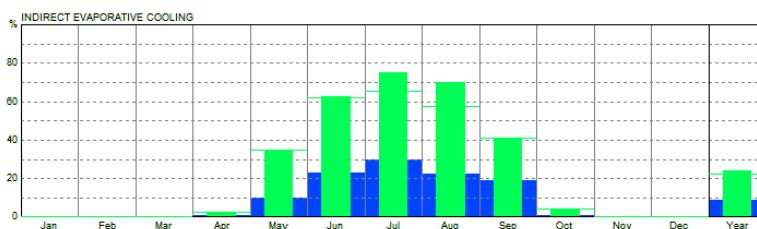
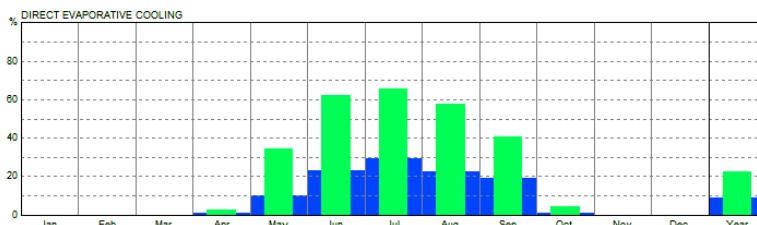
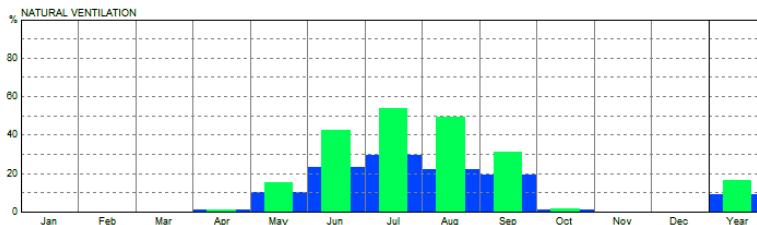


THERMAL MASS EFFECTS

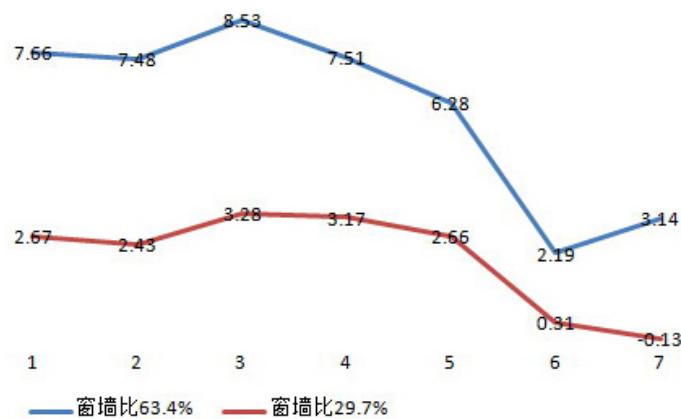


EXPOSED MASS + NIGHT-PURGE VENTILATION

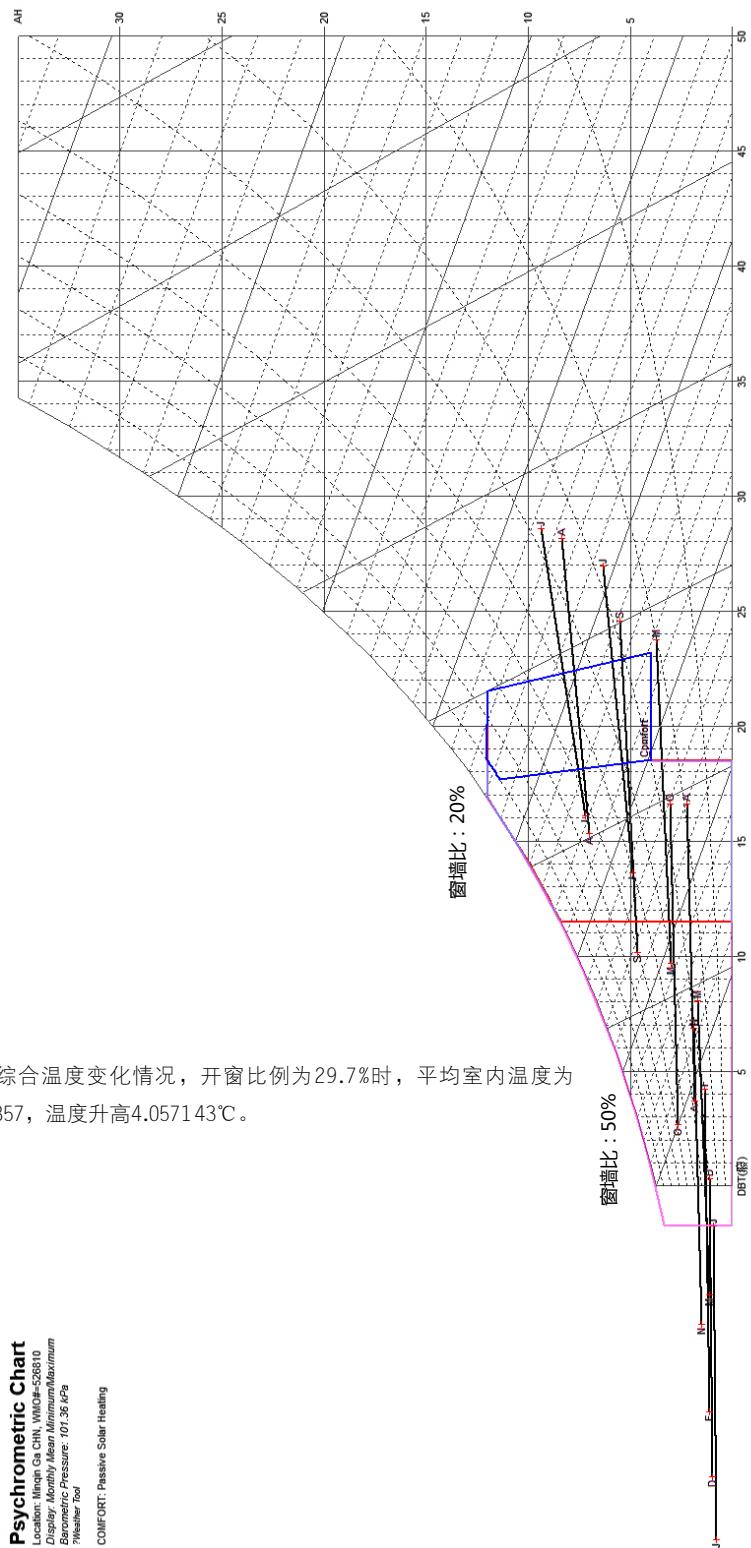




当其它因素不变的情况下，将窗墙比由20 % 提高到50 %，被动式太阳能采暖可以提高金昌地区4、5、6、7、8、9、10、11、12月更多时间的室内热舒适度和部分时间的室内热舒适度，因此增加窗体面积，有助于室内温度的提升，和热舒适度的改善。

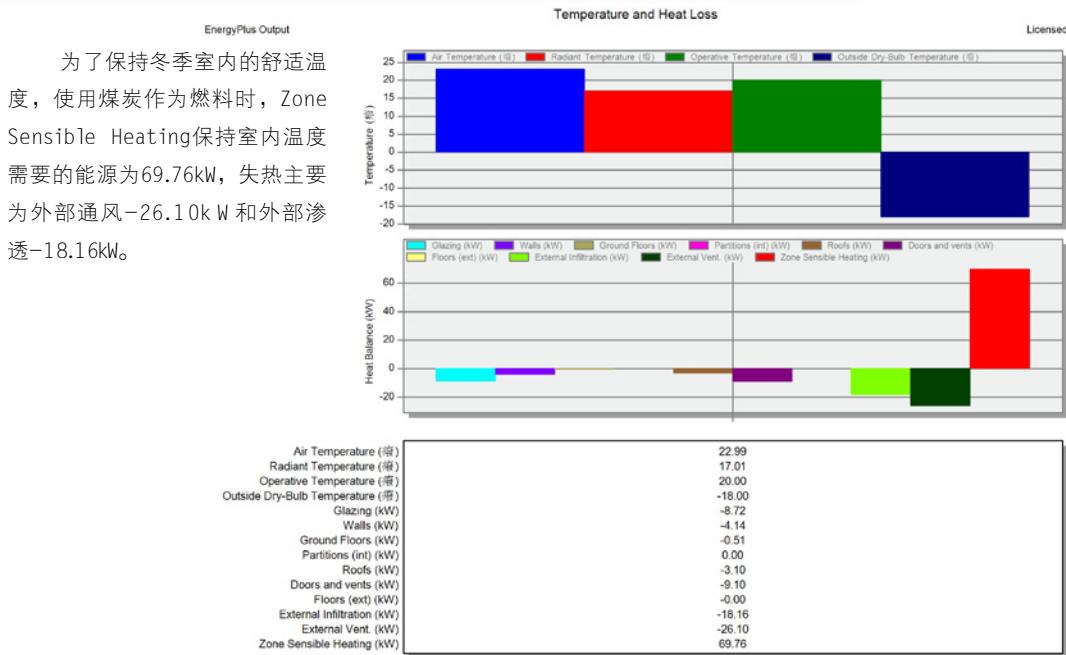
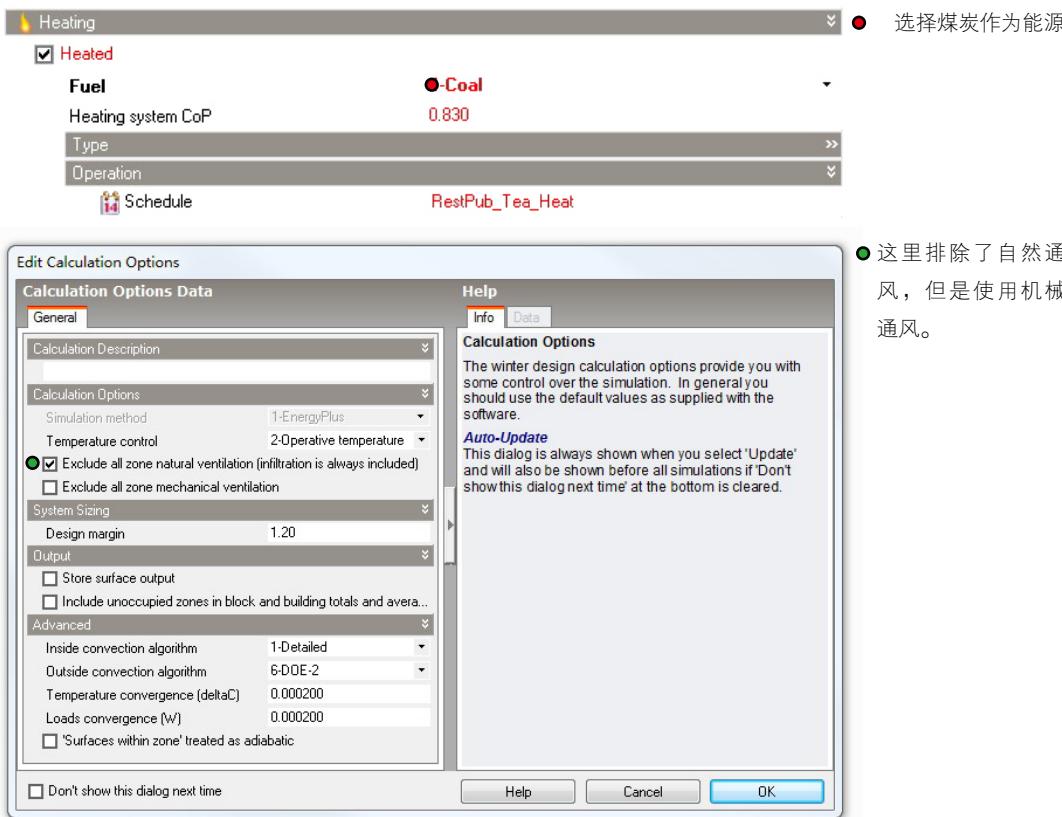


针对B10，调整其窗体的面积大约为原来的一半，其它条件不变的情况下模拟冬季设计日，比较B10室内温度的变化情况。



变化B10窗墙比，室内综合温度变化情况，开窗比例为29.7%时，平均室内温度为2.055714℃，63.4%时为6.112857，温度升高4.057143℃。

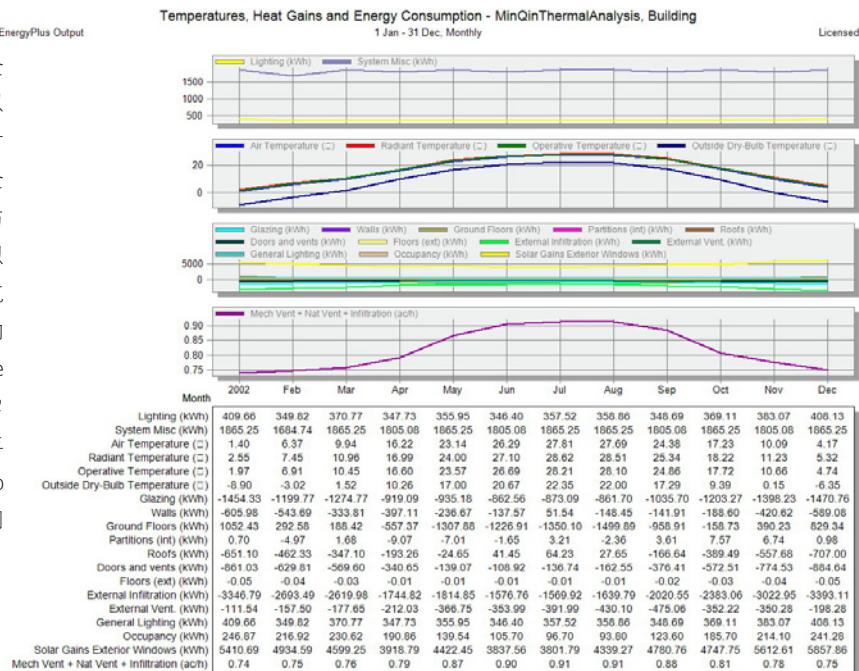
Heating Design 供暖设计：



- **Air Temperature** – the calculated average temperature of the air.
- **Radiant Temperature** – the (area * emissivity) weighted average of the zone inside surface temperatures.
- **Operative Temperature** – The mean of the internal air and radiant temperatures.
- **Outside Dry** – Bulb Temperature.
- **Glazing** – heat loss through all glazing.
- **Walls** – heat loss through all external walls.
- **Ceilings (int)** – heat loss through internal ceilings (e.g. zone above is colder).
- **Floors (int)** – heat loss through internal floors (e.g. zone below is colder).
- **Floors (ext)** – heat loss through external floors (not ground floor, e.g. floor in cantilevered space, roof eaves etc).
- **Doors and Vents** – conduction heat loss through doors and vents.
- **Ground Floors** – heat loss through ground floors.
- **Partitions (int)** – heat loss through all internal partitions (e.g. adjacent zone is colder).
- **External Infiltration** 外部渗透 – heat loss through air infiltration (non-unintentional air entry through cracks and holes in building fabric).
- **External Mechanical Ventilation** 外部机械通风 – is the heat loss due to the entry of outside air through the air distribution system. View can exclude mechanical ventilation from the heating design calculations by unchecking the 'Mechanical ventilation On' Model Data.
- **Internal Natural Ventilation** 内部自然通风 – heat loss due to air exchange through open internal windows, doors, vents, holes and virtual partitions to adjacent spaces.
- **Zone Sensible Heating** 热负荷 – heat delivered to maintain the internal heating design temperature

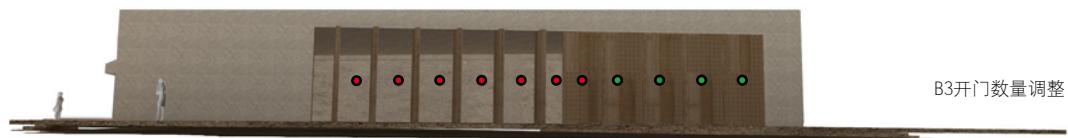
引自DesingBuilder网络帮助<http://www.designbuilder.co.uk/helpv2/>

运行Annual全年Simulation, 以Monthly的Interval方式显示模拟结果。全年模拟设计日区段与上述冬夏设计日模拟结果是一致的。建筑的围护结构将室内的温度Air Temperature控制在1.40~27.81°C区间, 而全年Outside Dry-Bulb Temperature变化区间为-8.09~22.35°C:

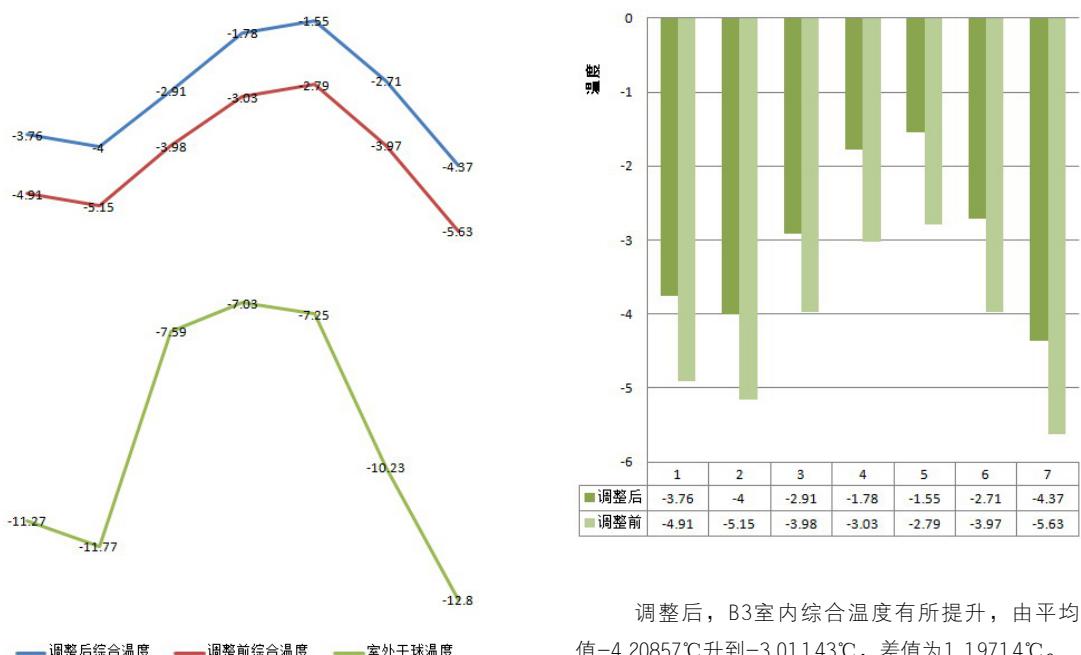


设计调整尝试：

通过对建筑冬夏两季设计日的模拟，东西朝向的B3区域在冬季太阳辐射得热较小，室内温度较其它区域低，因此为了减小B3区域对邻近区域的影响，在B3与B10之间设置内墙，开门相通，同时在B2与B5之间也同样处理，控制朝南区域的温度。对于B3室内舒适度的改善，减小冬季温度过低的情况，酌情减小开门的数量，由固定的透明窗体代替。



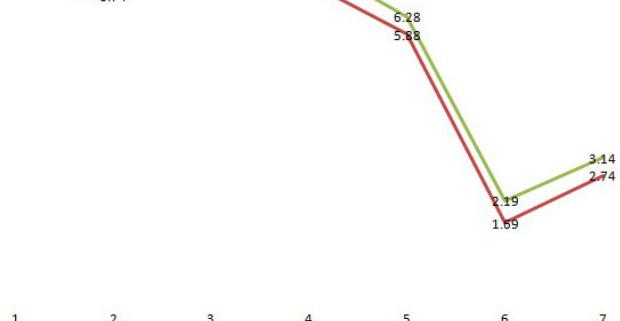
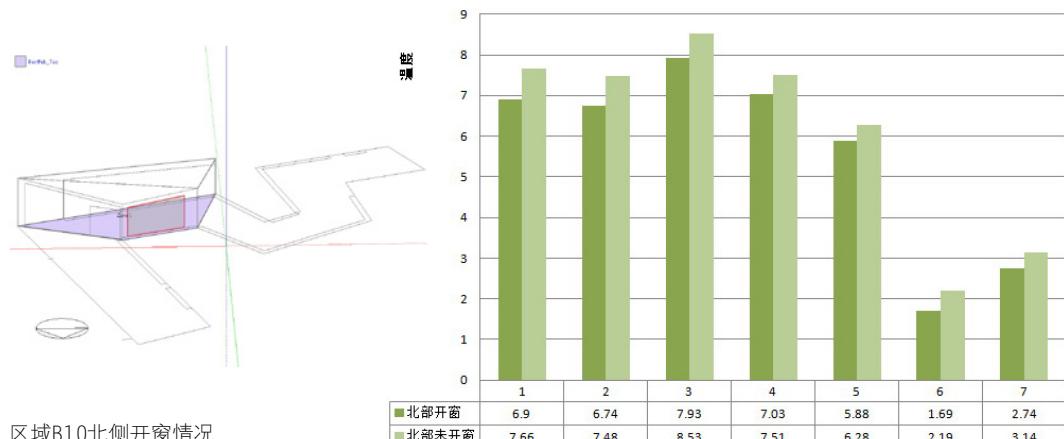
将B3东西向建筑红点区域改为固定的透明玻璃窗，而绿色圆点设置为门，再进行冬季设计日的模拟，与原有B3室内温度进行比较：



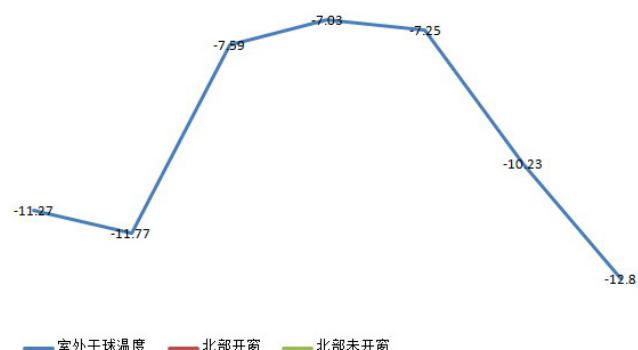
调整后，B3室内综合温度有所提升，由平均值 -4.20857°C 升到 -3.01143°C ，差值为 1.19714°C 。

关于北侧开窗：

在不考虑冬季风、夏季风对建筑影响的前提下，比较建筑北侧开较大窗体时建筑室内温度的变化情况，这里以区域B10为例，比较冬季室内综合温度变化：



未开窗前室内平均综合温度为
6.112857°C，开窗后室内平均综合温度
为5.554851°C，温度降低0.554286°C。



在未考虑冬季风、夏季风的情况下，在朝阳方位增加开窗面积能够较大的提升室内的温度，而北向墙体开窗，因为不能够接收太阳直接辐射，获取的太阳能，对室内温度变化影响较小。

ECOTECT:

<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/pc/index?id=12602821&siteID=123112>

官方网站

Autodesk®

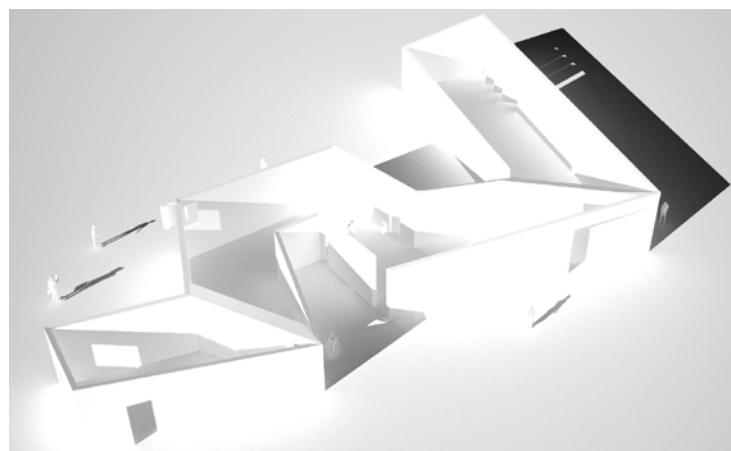


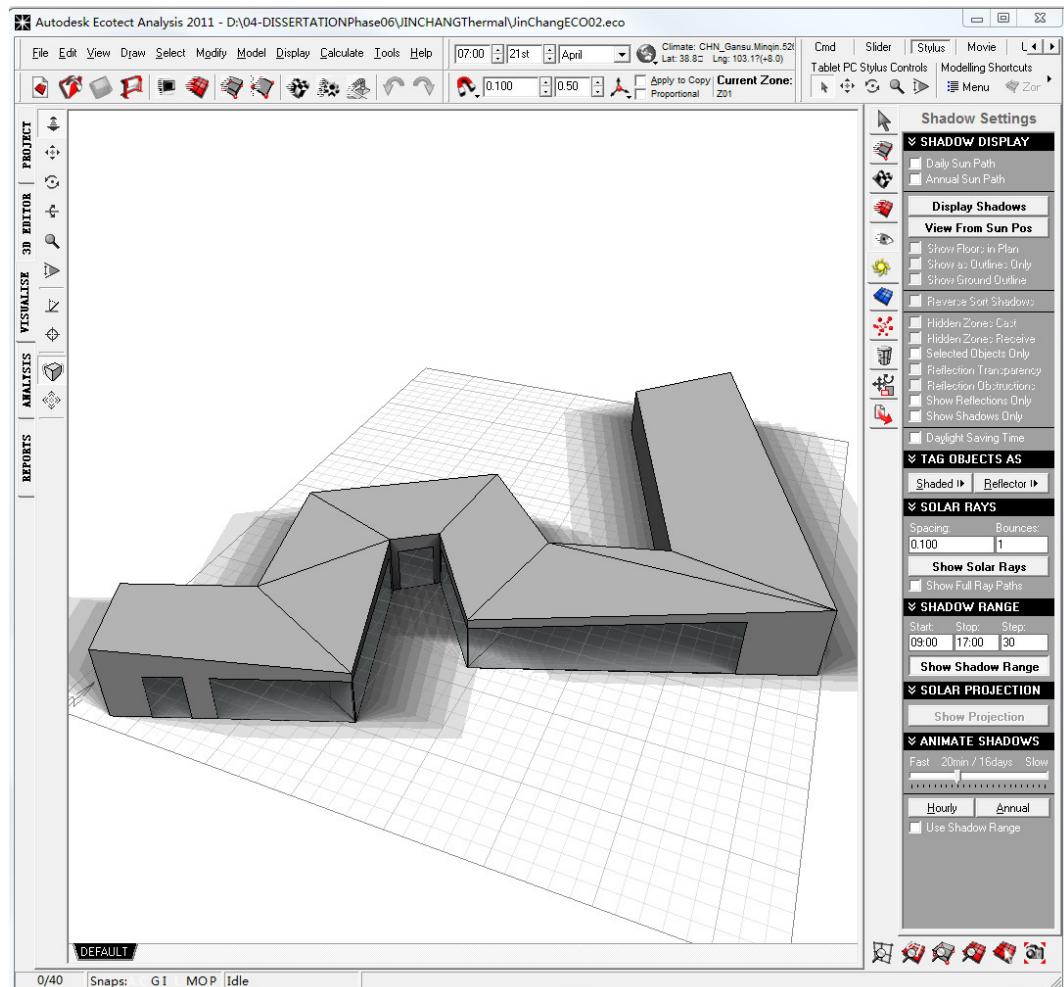
2008年，为了进一步支持在工程建设（AEC）行业的可持续设计和绿色建筑实践，国际设计软件巨头欧特克公司（NASDAQ:ADSK）从Square One Research有限公司和安德鲁·马歇尔博士（Dr. Andrew Marsh）手中收购与Ecotect概念化建筑性能分析软件工具相关的所有资产。

Autodesk Ecotect在全新的2010版更名为Ecotect Analysis。Ecotect Analysis（生态建筑大师）是一个全面的技术性能分析辅助设计软件，提供了一种交互式的分析方法，只要输入一个简单的模型，就可以提供数字化的可视分析图，随着设计的深入，分析也越来越详细。Ecotect Analysis可提供许多即时性分析，比如改变地面材质，就可以比较房间里声音的反射、混响时间、室内照度和内部温度等的变化；加一扇窗户，立刻就可以看到它所引起的室内热效应、室内光环境等的变化，甚至可以分析整栋建筑的投资。它的操作界面友好，与建筑师常用的辅助设计软件SketchUp、ArchiCAD、3DMAX、AutoCAD有很好的兼容性，3DS、DXF格式的文件可以直接导入，而且软件自带了功能强大的建模工具，可以快速建立起直观、可视的三维模型。然后只需根据建筑的特定情况，输入经纬度、海拔高度，选择时区，确定建筑材料的技术参数，即可在该软件中完成对模型的太阳辐射、热、光学、声学、建筑投资等综合的技术分析。计算和分析过程简单快捷，结果直观。模型最后还可以输出到渲染器Radiance中进行逼真的效果图渲染，还可以导出成为VRML动画，为人们提供一个三维动态的观赏途径。

Ecotect Analysis采用权威的核心算法，与RADIANCE、POV Ray、VRML、EnergyPlus、HTB2热分析软件均有导入导出接口。它是对方案设计理念的一个重要的提升，是建筑节能设计的一个很好的体现，尤其和SketchUp的配合使用充分体现作品向生态建筑方向的延伸。

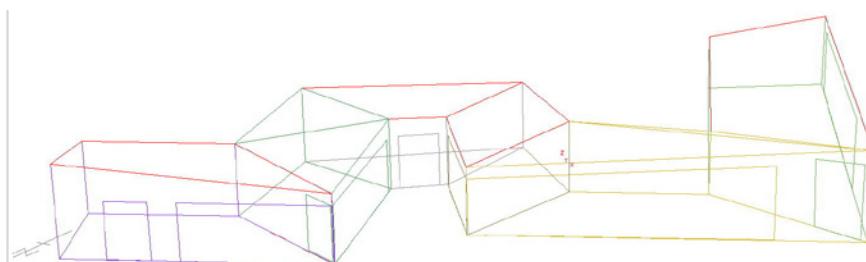
使用EnergyPlus模拟中所使用的模型，在Ecotect中也可以做热环境模拟。





Rhinoceros与Ecotect有很多类型的几何体接口，例如OBJ,STL,DXF等等。其中阴影遮挡分析、可视度分析可以是纯粹的几何体，并且对于几何的精度略微宽松。但是涉及到热环境、室内光环境、声环境、太阳辐射分析以及资源消耗量与环境影响，对Zone区域的精度就很高了。对于Revit建立的模型，也需要首先进行一定的处理（创建房间构件）输出为ghXML格式文件在Ecotect中加载。

对于在RHINO中使用Grasshopper与Ecotect协同设计可以参考《参数模型构建手册》相关部分。



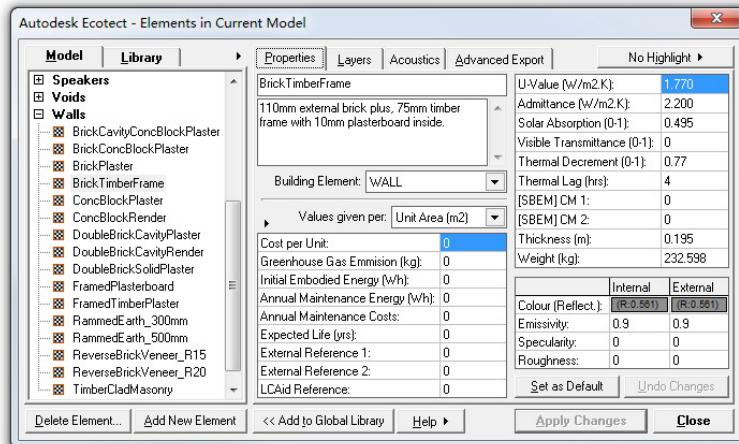
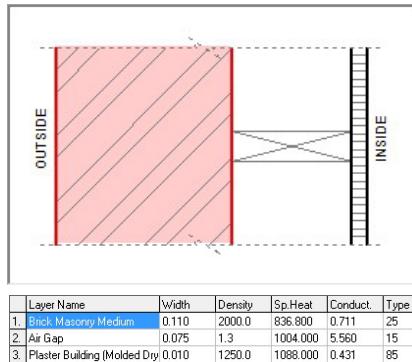
在Ecotect中修正模型，并加入窗、门、洞等构件；

材料选择 Material Assignments

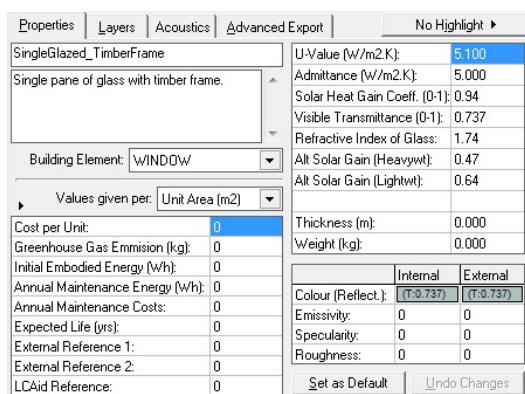
墙体材料与构造

PRIMARY	ALTERNATE
BrickTimberFrame	BrickTimberFrame
BrickCavityConcBlockPlaster	BrickCavityConcBlockPlaster
BrickConcBlockPlaster	BrickConcBlockPlaster
BrickPlaster	BrickPlaster
BrickTimberFrame	BrickTimberFrame
ConcBlockPlaster	ConcBlockPlaster
ConcBlockRender	ConcBlockRender
DoubleBrickCavityPlaster	DoubleBrickCavityPlaster
DoubleBrickCavityRender	DoubleBrickCavityRender
DoubleBrickSolidPlaster	DoubleBrickSolidPlaster
FramedPlasterboard	FramedPlasterboard
FramedTimberPlaster	FramedTimberPlaster
RammedEarth_300mm	RammedEarth_300mm
RammedEarth_500mm	RammedEarth_500mm
ReverseBrickVeneer_R15	ReverseBrickVeneer_R15
ReverseBrickVeneer_R20	ReverseBrickVeneer_R20
TimberCladMasonry	TimberCladMasonry

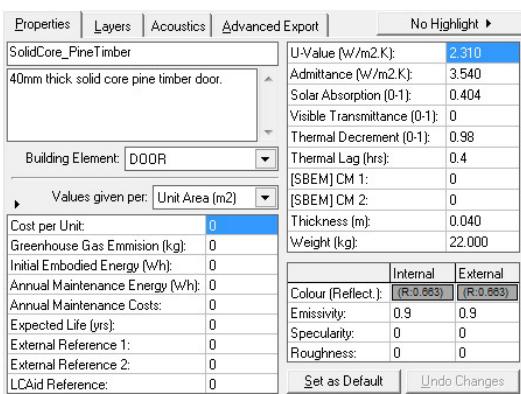
材料的构造设置



窗体材料



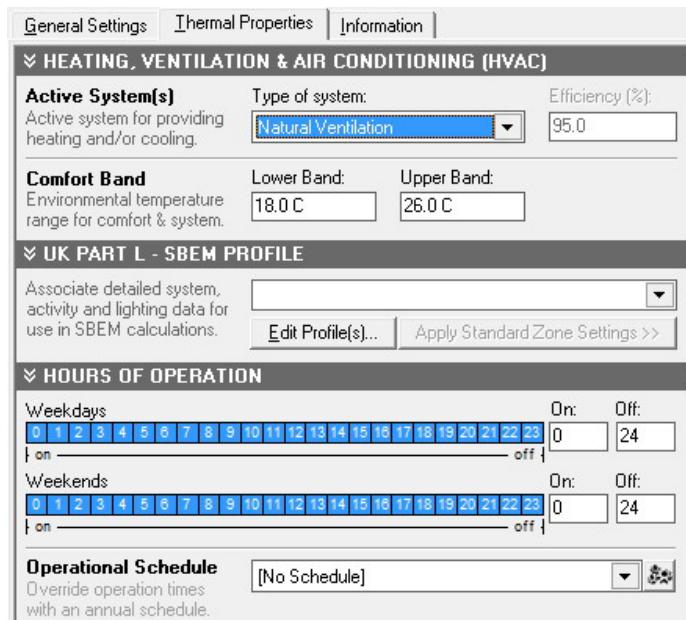
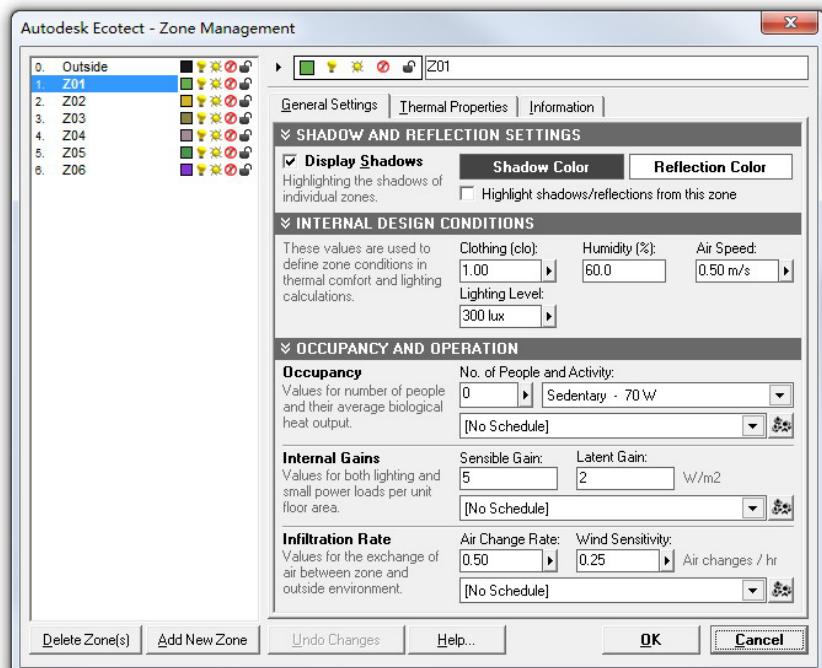
门材料



对于材料属性的说明可以参考前文“建筑材料和构造的热工特性”部分；

区域属性设置 Zone Management

在区域属性中可以设置：Internal Design Conditions室内设计条件（Clothing衣着量、Humidity相对湿度、Air Speed风速、Lighting Level室内照度），Occupancy and Operation人员与运行设置（Occupancy人员情况，Internal Gains室内的热情况，Infiltration Rate渗透率）；



逐时气象数据选择甘肃民勤地区，进行模拟



Thermal Properties热环境属性，在Type of System下可以选择：None (无系统)，Natural Ventilatin(自然通风)，Mixed-Mode System(混合模式系统)，Full Air Conditioning(全空调系统)，Heating Only(仅采暖)，Cooling Only(仅制冷)，本次模拟选择自然通风。



在能耗模拟分析中，可以选择要进行模拟的内容。

统计分析

设计学科中，并没有重点的强调统计学在设计分析中本应该具有的分量，即使如何统计分析场地使用功能的民意调查，也并没有被设计师广泛的使用以作为设计中的影响因子。

而在地理信息系统中发展了统计学的一个重要分支地统计分析 Geostatistics，是法国著名统计学家G.Matheron在大量理论研究基础上逐渐形成的一门新的统计学分支。以区域化变量为基础，借助变异函数研究既具有随机性又具有结构性，或具有空间相关性和依赖性的自然现象的一门科学。对于地统计学的论述可以参考《地理信息系统与规划设计》设计的相关内容。

从地理信息系统中对于海量数据的测定、收集、整理、归纳和分析反映客观现象总体数量的数据就可以看到统计学在设计学科中的重要作用。在生态分析数据研究中，统计学的应用同样是研究的必要手段。其中一部分数据实际上已经由相关的分析软件平台进行分析并将结果信息传递给设计师，设计师也可以利用统计分析的理论来进一步获得数据的分析，以便为设计提供更多的分析依据或者使数据反映的内容更加清晰。

Temperature Distribution 温度分布分析；

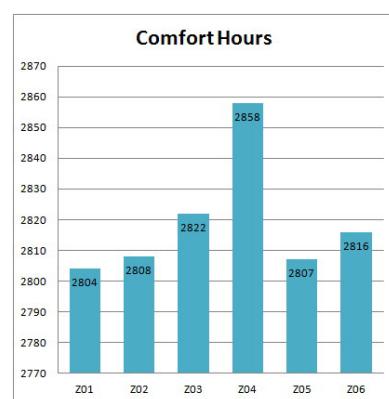
温度分布分析可以统计分析各区域的全年各小时室内温度的数量。在高亮区 Highlight Zone 中可以选择某一区域，获得其温度分布数据，并且根据设置的温度舒适区域计算舒适温度的时间与时间百分率。

TEMP.	HOURS	PERCENT
0.0	806	12.0%
2.0	387	5.7%
4.0	374	5.6%
6.0	261	3.9%
8.0	262	3.9%
10.0	458	6.8%
12.0	473	7.0%
14.0	409	6.1%
16.0	436	6.5%
18.0	553	8.2%
20.0	788	11.7%
22.0	753	11.2%
24.0	467	6.9%
26.0	247	3.7%
28.0	57	0.8%
30.0	3	0.0%
32.0	0	0.0%
34.0	0	0.0%
36.0	0	0.0%
38.0	0	0.0%
40.0	0	0.0%
42.0	0	0.0%
44.0	0	0.0%
46.0	0	0.0%
COLD	2808	41.7%

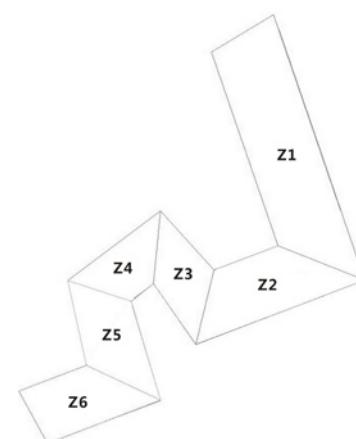
图表中列出了Zone2的温度分布情况，累积计算小时数为2808，处于18.0–26.0°C温度舒适区域的百分比为41.7%。

Zone	Hours	Percent%
Z01	2804	41.50%
Z02	2808	41.70%
Z03	2822	41.70%
Z04	2858	41.90%
Z05	2807	41.60%
Z06	2816	41.70%

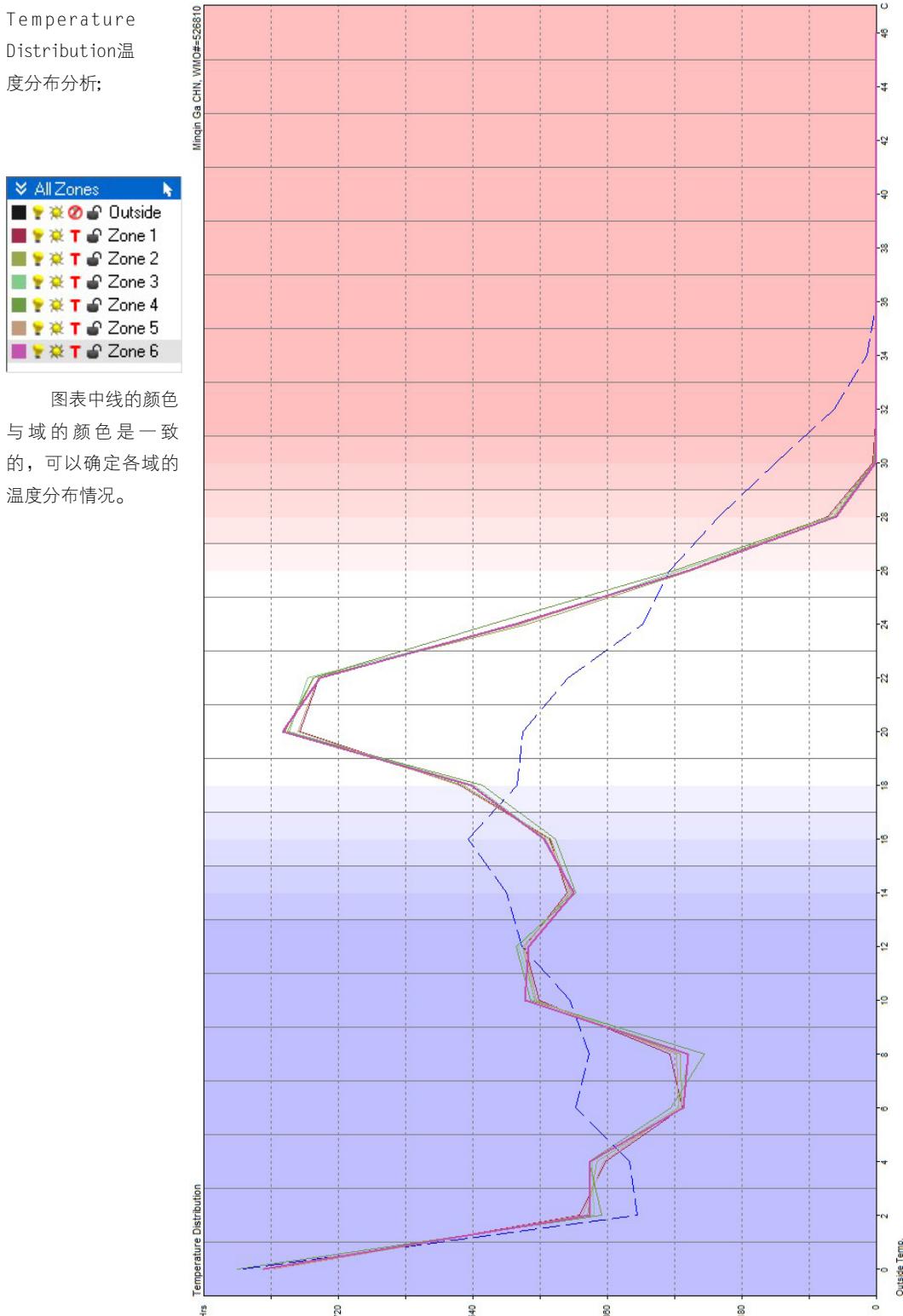
可以将数据在EXCEL中处理为更加直观的图表形式：



ANNUAL TEMPERATURE DISTRIBUTION		
Zone 2		
Operation: Weekdays 00–24, Weekends 00–24.		
Comfort Band: 18.0 – 26.0 C		
In Comfort: 2808 Hrs (41.7%)		
TEMP.	HOURS	PERCENT
0.0	806	12.0%
2.0	387	5.7%
4.0	374	5.6%
6.0	261	3.9%
8.0	262	3.9%
10.0	458	6.8%
12.0	473	7.0%
14.0	409	6.1%
16.0	436	6.5%
18.0	553	8.2%
20.0	788	11.7%
22.0	753	11.2%
24.0	467	6.9%
26.0	247	3.7%
28.0	57	0.8%
30.0	3	0.0%
32.0	0	0.0%
34.0	0	0.0%
36.0	0	0.0%
38.0	0	0.0%
40.0	0	0.0%
42.0	0	0.0%
44.0	0	0.0%
46.0	0	0.0%
COLD	2808	41.7%



Temperature
Distribution 温
度分布分析;



图表中线的颜色
与域的颜色是一致的，
可以确定各域的
温度分布情况。

空间舒适度分析

GRID SETTINGS

- Show Gridlines
- Shade Grid Squares
- Show Contour Lines
- Clip To Minimum
- Show Grid Axis

- Show Node Values
 - Peaks & Troughs
 - Selected Only
- Show Average Value
- Show Values in 3D

[Grid Management...](#)

[Display Analysis Grid](#)

DATA & SCALE

Mean Radiant Temp	▼
Minimum:	13.00
Maximum:	18.50
Contours:	0.10

[Colours...](#) [Volumetrics...](#)

2D SLICE POSITION

Axis: XY Axis

Offset: 1.600

Snap to Cell Boundary

[Auto-Fit Grid to Objects...](#)

[Adjust Grid Extents...](#)

HIDDEN NODES

[Hide](#) [Show](#)

[Select Grid Nodes](#)

CALCULATIONS

- Lighting Levels
- Insolation Levels
- Spatial Comfort
- CFD Cell Blockages
- Load CFD Data

[Perform Calculation...](#)

在Ecotect中也可以进行空间舒适度分析，关于空间舒适度的论述可在本书相关章节找到，该处设置热环境为自然通风条件下的模拟，模拟之前需要设定网格。

DATA & SCALE

[No Data Available]	▼
Minimum:	13.00
Maximum:	18.50
Contours:	0.50

[Colours...](#) [Volumetrics...](#)

模拟时间：

12:00 ▾ 16st ▾ April ▾ Climate: CHN_Gansu.Mingjin.521 Lat: 38.62 Lng: 103.17(+8.0)

REPORT: GRID ANALYSIS

Description: Percentage of nodes by contour band.

Model: D:\04-DISSERTATIONPhase06\JINCHANGThermal\JinChangECO03.eco

[No Data Available]

Contour Band (from-to)	Within Pts (%)	Above Pts (%)
13-13.5	0 0.00	0 0.00
13.5-14	0 0.00	0 0.00
14-14.5	0 0.00	0 0.00
14.5-15	0 0.00	0 0.00
15-15.5	0 0.00	0 0.00
15.5-16	0 0.00	0 0.00
16-16.5	0 0.00	0 0.00
16.5-17	0 0.00	0 0.00
17-17.5	0 0.00	0 0.00
17.5-18	0 0.00	0 0.00
18-18.5	0 0.00	0 0.00

Ecotect/Grid Management/Manage Grid

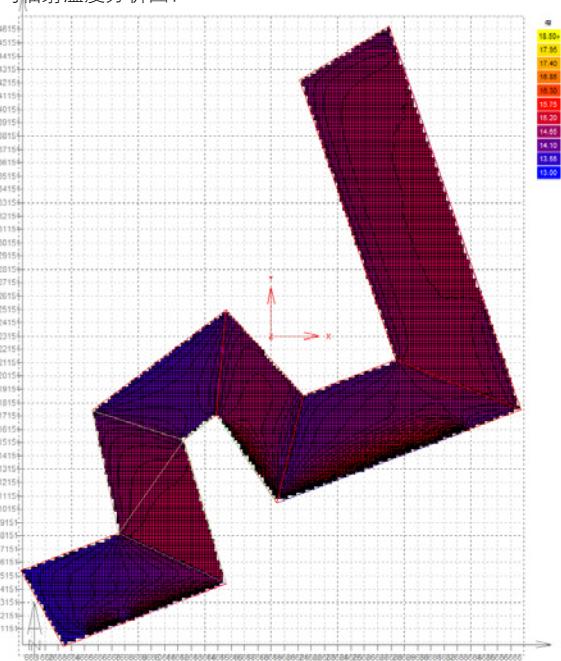
Data/Analysis Data中可以初步统计分析

网格数据；

Mean Radiant Temp平均辐射温度分析图：

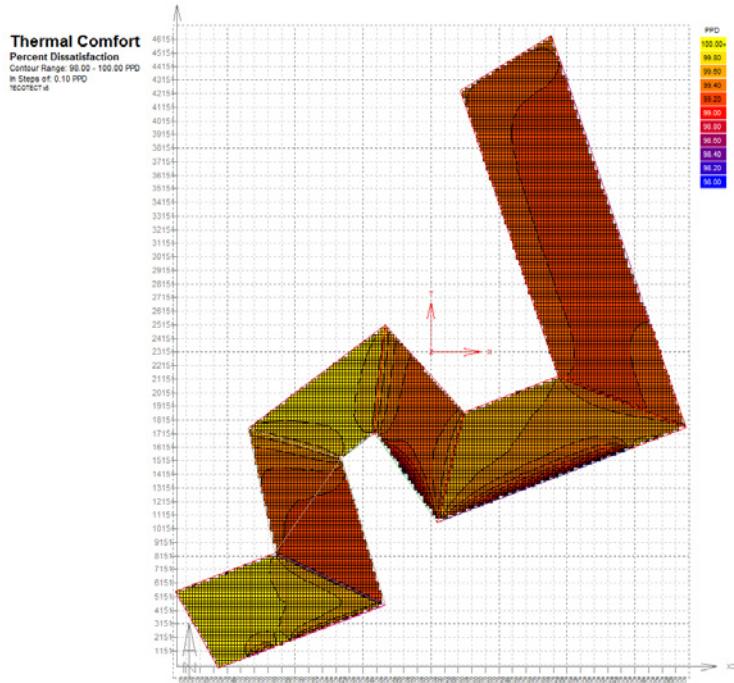
Thermal Comfort
Mean Radiant Temp
Contour Range: 13.00 - 18.50
In Steps of 0.10
Resolution: 1

对于具体的临界值的判定，Ecotect中可以使用Show Contour Lines显示等值线或者设置Minimum与Maximum，勾选Clip To Minimum等方式具体观察，也可以参考《参数模型构建手册》中GEO章节使用Grasshopper处理；



Percent Disstisfaction(PPD):

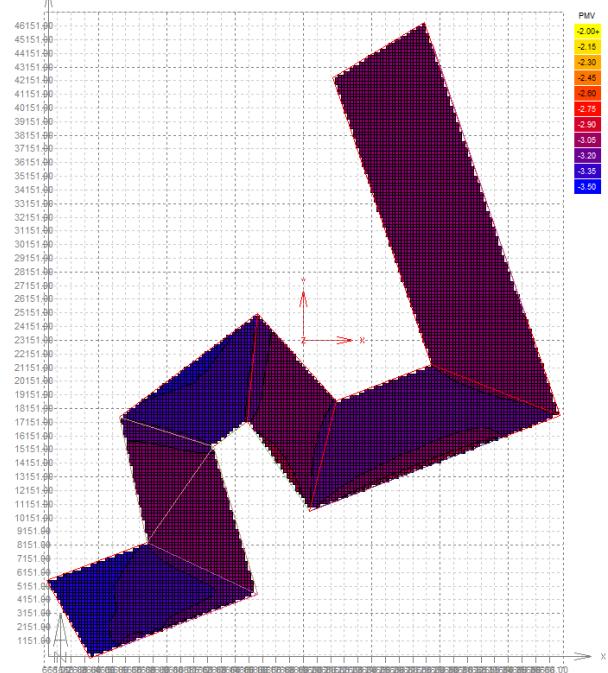
图中亮黄色的区域基本为不满意度为100%的区域，如何在不使用机械设备，仅在自然通风条件下增加其空间舒适性是其设计改进的主要研究方向；



Predicted Mean Vote(PMV):

PMV与平均辐射温度相关，可以看到其舒适性分布与平均辐射温度分布的基本关系一致；

Thermal Comfort
Predicted Mean Vote
Contour Range: -3.50 - -2.00 PMV
In Steps of 0.10 PMV



第三部分

流体CFD：风+水

流体力学理论基础

依靠流体的分析来增加设计的深度，可以通过流体分析模拟软件的协助分析与模拟，在流体分析软件模拟的过程中，会涉及到材料属性（Material Type）、边界条件（Boundary Conditions）、物理模型（Physical Model）等设置，因此在运用流体分析软件处理环境问题时，有必要掌握一定的流体力学知识，增强分析判读计算结果正确与否、合理与否的能力。

主要流体力学事件：

- 1738年瑞士数学家伯努利在名著《流体动力学》中提出了伯努利方程；
- 1755年欧拉在名著《流体运动的一般原理》中提出理想流体概念，并建立了理想流体基本方程和连续方程，从而提出了流体运动的解析方法，同时提出了速度势的概念；
- 1781年拉格朗日首先引进了流函数的概念；
- 1823年法国工程师纳维，1845年英国数学家、物理学家斯托克斯提出了著名的N-S (Navier-Stokes) 方程；
- 1876年雷诺发现了流体流动的两种流态：层流和紊流；
- 1858年亥姆霍兹指出了理想流体中旋涡的许多基本性质及旋涡运动理论，并于1887年提出了脱体绕流理论；
- 19世纪末，相似理论提出，实验和理论分析相结合；
- 1904年普朗特提出了边界层理论；
- 20世纪60年代以后，计算流体力学得到了迅速的发展。流体力学内涵不断地得到充实与提高；

物质的三态：

在地球上，物质存在的主要形式有：固体、液体和气体。

流体和固体的区别：

从力学分析的意义上看，在于它们对外力抵抗能力的不同。

固体：既能承受压力，也能承受拉力与抵抗拉伸变形；

流体：只能承受压力，一般不能承受拉力与抵抗拉伸变形。

液体和气体的区别：

(1) 气体易于压缩；而液体难于压缩；

(2) 液体有一定的体积，存在一个自由液面；气体能充满任意形状的容器，无一定的体积，不存在自由液面；

液体和气体的共同点：

两者均具有易流动性，即在任何微小切应力作用下都会发生变形或流动，故二者统称为流体。

流体质点与流体的连续介质模型：

• **微观：**流体是由大量做无规则运动的分子组成的，分子之间存在空隙，但在标准状况下， 1cm^3 液体中含有 3.3×10^{22} 个左右的分子，相邻分子间的距离约为 $3.1 \times 10^{-8}\text{cm}$ 。 1cm^3 气体中含有 2.7×10^{19} 个左右的分子，相邻分子间的距离约为 $3.2 \times 10^{-7}\text{cm}$ 。

• **宏观：**考虑宏观特性，在流动空间和时间上所采用的一切特征尺度和特征时间都比分子距离和分子碰撞时间大得多。

• **流体质点：**流体力学研究的对象是流体宏观物理量，因此研究的最小单元不是分子，而是具有确定统计平均特性且体积很小的（流体微团）流体质点。其尺度大小同一切流动空间相比微不足道但又含有大量分子，具有一定质量。

• **连续介质 (continuum/continuous medium) :** 质点连续地充满所占空间的流体或固体。

· **流体连续介质模型(continuum continuous medium model)**：如固体一样，流体也是由大量的分子所组成，而分子间都存在比分子本身尺度大得多的间隙，同时，由于每个分子都不停的在运动，因此，从微观的角度看，流体的物理量在空间分布上是不连续的，且随时间而不断变化。

但在流体力学中仅限于研究流体的宏观运动，其特征尺度（如米、厘米、毫米那样的量级）比分子自由程大得多。描述宏观运动的物理参数，是大量分子的统计平均值，而不是个别分子的值。在这种情形下，流体可近似用连续介质模型处理。

连续介质模型认为，物质连续地分布于其所占有的整个空间，物质宏观运动的物理参数是空间及时间的可微连续函数。对于连续介质模型，微积分等现代数学工具可以加予应用。

连续介质假设成立的条件：

$$l \gg \lambda$$

l : a characteristic length ;

λ : the mean free path ;

优点：

- 排除了分子运动的复杂性；
- 物理量作为时空连续函数，则可以利用连续函数这一数学工具来研究问题。

流体的物理性质：

流体具有惯性、压缩性、膨胀性、粘性和表面张力等物理特性，其中粘性是区别于固体的一个重要的物理特性。

1-惯性

一切物质都具有质量，流体也不例外。质量是物质的基本属性之一，是物体惯性大小的量度，质量越大，惯性也越大。单位体积流体的质量称为密度（density），以 ρ 表示，单位： kg/m^3 。对于均质流体，设其体积为 V ，质量 m ，密度则为：

$$\rho = m/V$$

对于非均质流体，密度因点而异。若取包含某点在内的体积，其中质量，则该点密度需要用极限方式表示：

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

式中 ρ 为流体密度（ kg/m^3 ）， m 为流体质量（kg）， V 为流体体积（ m^3 ）

2-压缩性 (Compressibility)

流体的压缩性是在指温度不变的条件下，流体体积和密度随所受压力的变化而变化的性质。可用体积压缩率(Coefficient of Volume Compressibility)度量压缩性的大小，即压强增大一个单位值时，流体体积的相对减小值，表达式：

$$\beta = (dV/V)/dp$$

式中 β 为体积压缩率（ Pa^{-1} ）， p 为所受的外部压强（Pa）

3-膨胀性

流体的膨胀性为压强不变时，体积随温度变化的性质。与压缩性类似，用温度变化1K时体积的相对变化来表示膨胀性的大小，表达式：

$$\alpha_v = \frac{dV/V}{dT}$$

式中 α_v 为体胀系数（ K^{-1} ）， T 为流体温度（K）

4-粘性 (Viscosity)

粘性：即在运动的状态下，流体所产生的抵抗剪切变形的性质。体现为流体流动时，流体层内部出现内摩擦力，

阻碍质点做相对运动。此内摩擦力又称为切应力，其大小可由牛顿内摩擦定律计算得出：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

式中 τ 为切应力 (Pa)， μ 为流体动力粘度 (Pa·s)， du/dy 为速度梯度 (s^{-1})

注：速度梯度实质上是流体运动时的剪切变形角速度，即流体的切应力与剪切变形角速度成正比。

粘度的定义

- 流体的粘度：粘性大小由粘度来量度。流体的粘度是由流体的内聚力和分子的动量交换所引起的。

分类

- 动力粘度 μ ：又称绝对粘度、动力粘性系数、粘度，是反映流体粘滞性大小的系数，单位： $N\cdot s/m^2$ 。

$$\mu = \tau / (du/dy)$$

- 运动粘度 v ：又称相对粘度、运动粘性系数。

$$v = \mu / \rho$$

式中 v 为运动粘度 (m^2/s)

粘度的影响因素

流体粘度 μ 的数值随流体种类的不同而不同，并随压强、温度变化而变化。

1) 流体种类：一般地，相同条件下，液体的粘度大于气体的粘度。

2) 压强：对常见的流体，如水、气体等， μ 值随压强的变化不大，一般可忽略不计。

3) 温度：是影响粘度的主要因素。当温度升高时，液体的粘度减小，气体的粘度增加。

a. 液体：内聚力是产生粘度的主要因素，当温度升高，分子间距离增大，吸引力减小，因而使剪切变形速度所产生的切应力减小，所以 μ 值减小。

b. 气体：气体分子间距离大，内聚力很小，所以粘度主要是由气体分子运动动量交换的结果所引起的。温度升高，分子运动加快，动量交换频繁，所以 μ 值增加。

5-表面张力特性

液体表面由于分子引力（分子间的内聚力）不均衡而产生的沿表面作用于任一界限上的张力，称为表面张力。如自由表面上，气体分子内聚力与液体分子内聚力有显著差别，使液体分子有向内部收缩倾向，这一性质称为表面张力特性。

细管插入液体时，表面张力会使管中的液体自动上升或下降一个高度，这就是由于表面张力作用而导致的毛细现象。当液体与固体壁面接触时，若固体壁面吸附力大于液体内聚力，则液体与固体壁面的接触面有扩大的趋势，称为浸润现象（例如水），反之成为不浸润现象（例如水银）。

由于表面张力很小，一般情况下可以忽略不计，但在液体中模拟气泡运动时需要考虑表面张力的作用。

流体的分类：

根据流体的压缩性：

1-可压缩流体 (Compressible Flow) 与不可压缩流体 (Incompressible Flow)

根据流体压缩性的大小，可以将流体分为可压缩流体 (Compressible Flow) 与不可压缩流体 (Incompressible Flow)。密度随压强变化较大且不可视为常数的流体，称为可压缩流体；反之，密度随压强变化很小且可视为常数的流体，称为不可压缩流体。

注：

- (a) 严格地说，不存在完全不可压缩的流体；
- (b) 一般情况下的液流运动都可视为不可压缩流体进行分析计算（水击现象除外）；
- (c) 对于气体，当所受压强变化相对较小时，可视为不可压缩流体；
- (d) 管路中压降较大时，应作为可压缩流体；、

- (e) 低速气体 ($v < 50 \text{ m/s}$) 也可视为不可压缩流体, 这是由于低速气体的压力和温度在整个流动过程中变化很小, 它的重度 (重度表示单位体积物质的重量) 和密度 (密度表示单位体积物质的质量) 变化也很小, 可近似看成常数;
- (f) 高速气流需考虑密度变化的影响, 作为可压缩流体处理;

根据流体的粘性:

2-理想流体与实际流体

- 理想流体: 是指忽略粘性 ($\mu = 0$) 的流体, 在运动时也不能抵抗剪切变形;
- 实际流体: 指具有粘度的流体, 在运动时具有抵抗剪切变形的能力, 即存在摩擦力, 粘度 $\mu \neq 0$;

在理论研究的初期, 学者们通常将流体看作没有粘性的理想流体来考虑, 大大简化了问题。现在进行流体运动仿真时通常需要考虑流体的粘性, 作为实际流体处理, 模拟的结果更接近于真实。

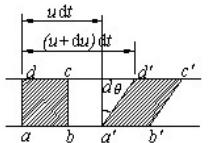
在Fluent中, Define→Models→Viscous Model→Inviscid选项, 可以实现理想流体流动的数值模拟

根据是否满足牛顿内摩擦定律:

牛顿内摩擦定律: 液体运动时, 相邻液层间所产生的切应力与剪切变形的速率成正比。即 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 式中 τ 为粘性切应力, 是单位面积上的内摩擦力。

注:

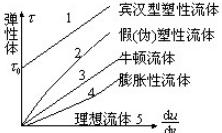
- 1) 流体的切应力与剪切变形速率, 或角变形率成正比。——区别于固体的重要特性: 固体的切应力与角变形的大小成正比。
- 2) 流体的切应力与动力粘度 μ 成正比。
- 3) 对于平衡流体 $du/dy = 0$, 对于理想流体 $\mu = 0$, 所以均不产生切应力, 即 $\tau = 0$ 。



流体的切应力与剪切变形速率, 或角变形率成正比

3-牛顿流体(Newtonian Fluids)与非牛顿流体 (Non-Newtonian Fluids)

- 牛顿流体 (Newtonian fluids): 是指任一点上的切应力都同剪切变形速率呈线性函数关系的流体, 即遵循牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体, 符合牛顿内摩擦定律。
- 非牛顿流体 (Non-Newtonian Fluids): 不符合上述条件的均称为非牛顿流体。



流体类别	定义	实 例
理想流体	无粘性的一种假想流体	$\mu = 0, \tau = 0, \tau = 0$
实际流体 牛顿流体	有粘性、可压缩的液体 $\mu \neq 0$	满足牛顿内摩擦定律
非牛顿 宾汉型塑性流体 假塑性流体 膨胀性流体	$\mu = \text{Const}, \tau = 0, n=1$ $\mu \neq 0, \tau = 0, n=1$ $\mu \neq 0, \tau = 0, n < 1$ $\mu \neq 0, \tau = 0, n > 1$	水、空气、汽油、煤油、甲苯、乙醇等 牙膏、泥浆、血浆等 橡胶、油漆、尼龙等 生面团、浓淀粉糊

- 塑性流体: 受力后不能立刻变形, 必须施加足以破坏其结构的力才能发生剪切变形, 即流动。因此该类流体存在屈服切应力 τ_0 , 只有克服屈服切应力后, 才能开始流动。

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy}$$

τ_0 为屈服切应力 (Pa)

- 假塑性流体: 粘度随速度梯度的增大而减小, 其切应力与速度梯度的关系:

$$\tau = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n, n < 1$$

式中 k 为稠度系数, 取决于流体性质; n 为流变指数, 无因次。(无因次量(dimensionless)是指没有单位的物理量, 这种物理量与单位制度(公制或英制)无关。)

膨胀性流体：其粘度随速度梯度的增大而增大，其切应力与速度梯度的关系：

$$\tau = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n, n > 1$$

所分析模拟涉及的流体主要是牛顿流体、水、空气等

作用于流体上的力：

无论是平衡还是运动状态的流体都受到各种力的作用。作用在流体隔离体上的力，按其表现形式可以分为质量力和表面力两种。

1-质量力

作用在流体每一质点上，且与所作用流体的质量成正比的力为质量力。单位质量流体所受的质量力为单位质量力，它是一个矢量，形式为：

$$\vec{f} = \frac{\vec{F}}{m} = f_x \vec{i} + f_y \vec{j} + f_z \vec{k}$$

式中 下标x,y,z表示x, y, z三个方向，f为单位质量力 (N/kg)

最常见的质量力为重力和惯性力两种。

- 重力：

$$G = mg$$

式中G为重力 (N)，m为质量 (kg)，g为重力加速度 (m/s^2)。若z轴铅直向上，则单位质量重力的3个分力为：

$$f_x = f_y = 0, \quad f_z = -g$$

(由于g随纬度变化不大，因此国际上将在纬度45°的海平面精确测得物体的重力加速度 $g=9.80665 \text{ m/s}^2$ 作为重力加速度的标准值。)

- 直线惯性力：

$$I = -ma$$

式中 I 为直线惯性力 (N)，a为直线加速度 (m/s^2)。单位质量直线惯性力为：

$$f_x = -a_{ex}, \quad f_y = -a_{ey}, \quad f_z = -a_{ez}$$

- 离心惯性力：

$$R = m\omega^2 r$$

式中R为离心惯性力 (N)， ω 为角速度 (rad/s)。若为xoy平面的旋转加速运动，其3个方向的单位质量离心惯性力为：

$$f_x = \omega^2 x, \quad f_y = \omega^2 y, \quad f_z = 0$$

2-表面力

作用在流体表面上，并与受作用流体表面积成正比的力为表面力。表面力可以分为垂直于作用面的压力和平行于作用面的切力。

- 静止流体只受到压力作用，而单位面积上的压力称为压强，对流体内部一点而言，压强大小与方向无关。
- 理想流体运动时只受到压力作用，而实际运动的流体既受到压力作用，也受到切力作用。

流体流动的分析描述：

描写流体运动的方法有两种，即拉格朗日方法和欧拉方法。

拉格朗日方法——着眼于流体质点，设法描述每个流体质点的位置随时间变化的规律。通常利用初始时刻流体质点的直角坐标或曲线坐标a、b、c作为区分不同流体质点的标志。流体质点的运动规律可表示为 $r = r(a, b, c, t)$ ，其中r是流体质点的矢径；t为时间；a、b、c、t统称为拉格朗日变量。

欧拉方法——着眼于空间点，设法在空间每一点上描述流体运动随时间的变化状况。流体质点的运动规律可用速度矢量 $v = v(r, t)$ 表示，其中r、t称为欧拉变量。人们广泛采用欧拉方法，较少采用拉格朗日方法，因为用欧拉变量确定的速度函数是定义在时间和空间点上，所以是速度场，称为流场，可运用场论知识求解；其次，

在欧拉方法中，由于加速度是一阶导数，所以运动方程组是一阶偏微分方程组，比拉格朗日方法中的二阶偏微分方程组容易处理。

流动的几何描述：

流体质点在空间运动时所描绘的曲线称为迹线；在流场中每一点上都与速度矢量相切的曲线称为流线。

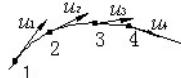
迹线(Path line): 是同一流体质点在不同时刻形成的曲线，它是在拉格朗日方法中流体质点运动规律的几何表示；

流线 (Stream line) : 是同一时刻不同流体质点所组成的曲线，它是在欧拉方法中流体质点运动规律的几何表示。只有在定常运动中，两者才重合在一起。

流线的作法：

在流场中任取一点，绘出某时刻通过该点的流体质点的流速矢量 \mathbf{u}_1 ，再画出距1点很近的2点在同一时刻通过该处的流体质点的流速矢量 \mathbf{u}_2 ……，如此继续下去，得一折线1234……，若各点无限接近，其极限就是某时刻的流线。

流线是分析流动的重要概念。



流线的性质：

- a. 同一时刻的不同流线，不能相交。
- b. 流线不能是折线，而是一条光滑的曲线。
- c. 流线簇的疏密反映了速度的大小（流线密集的地方流速大，稀疏的地方流速小）。

流体流动的分类：

1-定常流动(恒定流Steady Flow) 与非定常流动 (非恒定流Unsteady Flow)

根据流体流动的物理量（如速度、压力、温度等）是否随时间变化，将流动分为定常流动(恒定流Steady Flow)与非定常流动 (非恒定流Unsteady Flow)。当流动的物理量不随时间变化， $\frac{\partial \Omega}{\partial t} = 0$ 时，为定常流动；当流动的物理量随时间变化， $\frac{\partial \Omega}{\partial t} \neq 0$ 时，为非定常流动。许多流体机械在启动或者关机时的流体流动一般是非定常流动，正常运转时可看作是定常流动。

在Fluent中，Define→Models→Solver→Time(Steady:Unsteady)选项，可以利用Fluent模拟定常流动和非定常流动。

在模拟三维湍流流动的时候，湍流模型中的大涡模拟 (LES) 或离散涡模拟 (DES) 只能用于非定常流动的模拟，因为这两个模型需要在时间上进行统计，本身就是为非定常流动而设计的。通过时间上的统计平均也可以得到不随时间发生变化的定常流动的结果：平均值以及脉动值。

2-层流 (Laminar Flow) 与湍流(Turbulent Flow)

自然界中的流体流动状态主要有两种形式，即层流和湍流。

- 层流——指流体的流动是分层或分片的。
- 湍流 (紊流) ——则与之相反，在湍流中，速度分量在其平均值上还叠加有随机的湍流脉动。

嵌入层流中的染料和墨水会显示出一条细线，而且总是由相同的流体质点组成。但是在湍流中，染色会很快地变粗，并且随着流动会和周围的流体混合，我们将会观测到许多细丝和浑浊的流团逐渐变粗和弥散。

确定流动是层流还是湍流，对于特定的流体，则由流动的速度和通道的形状或大小来确定。当流动的速度变大时，流动就会经过一个过渡状态，从层流变成湍流。在自然界中，层流和湍流都存在。不过，湍流更为普遍。

粘性效应一直存在于湍流中。但是被占优势的湍流剪切力所掩盖掉了。

对于圆管内的流动，定义雷诺数(Reynolds number): $Re = \rho UD/\mu$ 加。其中： ρ 为流体的密度， U 为流体的平均流速， D 为管径， μ 是流体的粘性系数。当 $Re \leq 2300$ 时，管流一定为层流； $Re \geq 8000-12000$ 时，管流一定为湍流；当 $2300 < Re < 8000$ 时，流动处于层流与湍流间的过渡区。

对于一般流动，在计算雷诺数时，可以用水力半径R代替管径D。这里水力半径是通流截面积与湿周之比。所谓湿周就是通流截面上流体与固体接触的周界长度，对于液体要注意不包括自由液面以上的气体与固体接触的部分；对于气体，就是通流截面的周界长度。水力直径或当量直径等于两倍的水力半径。

层流特点：

- (1) 有序性；
- (2) 水头损失与流速的一次方成正比；
- (3) 在流速较小且雷诺数Re较小时发生；

层流遵循牛顿内摩擦定律，粘性抑制或约束质点作横向运动。

湍流特点：

- (1) 无序性、随机性、有旋性、混合性；
- (2) 水头损失与流速的 $1.75 \sim 2$ 次方成正比；
- (3) 在流速较大且雷诺数较大时发生；

注：水头损失 (Head loss)：水流中单位质量水体因克服水流阻力做功而损失的机械能。

在Fluent中，Define→Models→Viscous Model→Laminar选项。

粘性模型面板中，通过选择其中的Laminar实现对层流流动的数值模拟；通过选择其他的湍流模型实现对湍流流动的数值模拟。所模拟的定常湍流流动的结果包括平均值和各种脉动值(视所选择的湍流模型而定，如K-E双方程模型可以获得湍动能，雷诺应力模型还可以获得各个方向的脉动分量)。

3-均匀流 (Uniform flow) 与非均匀流(Nonuniform Flow)

按质点运动要素是否随流程变化分为：

- 均匀流——流线是平行直线的流动。均匀流中各过水断面上的流速分布图沿程不变，过水断面是平面，沿程各过水断面的形状和大小都保持一样。例：等直径直管中的液流或者断面形状和水深不变的长直渠道中的水流都是均匀流。
- 非均匀流——流线不是平行直线的流。非均匀流中流场中相应点的流速大小或方向或同时二者沿程改变，即沿流程方向速度分布不均。例：流体在收缩管、扩散管或弯管中的流动。(非均匀流又可分为急变流和渐变流)

4-渐变流(Gradually Varied Flow)与急变流(Rapidly Varied Flow)

非均匀流中如流动变化缓慢，流线的曲率很小接近平行，过流断面上的压力基本上是静压分布者为渐变流 (gradually varied flow)，否则为急变流(Rapidly Varied Flow)。

- 渐变流——沿程逐渐改变的流动。

特征：流线之间的夹角很小即流线几乎是平行的，同时流线的曲率半径又很大(即流线几乎是直线)，其极限是均匀流，过水断面可看作是平面。渐变流的加速度很小，惯性力也很小，可以忽略不计。

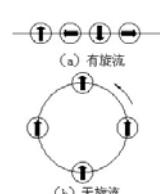
- 急变流——沿程急剧改变的流动。

特征：流线间夹角很大或曲率半径较小或二者兼而有之，流线是曲线，过水断面不是一个平面。急变流的加速度较大，因而惯性力不可忽略。

5-有旋流(Rotational Flow,Vortex)与无旋流(Irrotational Flow,Potential Flow)

- 有旋流 (vortex) :亦称“涡流”。流体质点(微团)在运动中不仅发生平动(或形变)，而且绕着自身的瞬时轴线作旋转运动。如旋风即为空气的涡流。当流体速度变化较大，由于流体粘滞阻力、压强不均匀等因素的影响，就容易形成涡流。
- 无旋流 (potential flow) :亦称“势流”、“有势流”。流体在运动中，它的微小单元只有平动或变形，但不发生旋转运动，即流体质点不绕其自身任意轴转动。

注：无旋流和有旋流决定于流体质点本身是否旋转，而与运动轨迹无关。



6-内部流动与外部流动

根据流体流动的情况和形状分类。基本上存在两种流体形状或流动空间区域的类型：外部流动和内部流动。通常也可以简称外流与内流。内部流动是指管道和渠道中的流动，以及类似的限制在一定结构中的流动。外部流动则是流过物体的流动，例如空气动力学中的绕流。

- 外部流动——围绕着物体的流动区域可以分成三个区域。远离物体的流动本质上是理想的，因为其中摩擦力并不重要。邻接物体的流动发展出一个剪切层(因为在物体的表面上流体的相对速度必须为零)，剪切层中粘性和湍流是必须考虑的。这内摩擦层称为边界层。边界层可以是层流的，也可以是湍流的。物体后面的尾迹(第三个不同的区域)发展出一个通常是高湍流度的低压区(因此由尾迹产生阻力)。给出有尾迹的绕圆柱流动。尾迹是由于边界层从物体表面分离出来所形成的。事实上，物体后面的理想流动区域(尾迹以外的区域)和尾迹区域的分界处，很清楚是一层剪切层。

由流体粘性所带来的边界层是尾迹形成的原因。如果完全没有粘性，那么在这种绝对的理想情况下，流体是无摩擦的，流动就不会分离，也就不会有尾迹。如果不存在尾迹，物体前后的流动图像(理想情形) 定是对称的，则物体前后的压强相同，那么浸没入流体流动中的障碍物上就投有阻力。

如果物体是流线型的，尾缘做成很平缓光滑的轮廓，就不会发生分离，整个边界层紧贴在物体上。流线型可以充分降低(压差)阻力，所以绝大多数空气动力学部件(机翼等)都是流线型的。在这种情况下，除去边界层和一层很薄的尾迹之外，环绕物体的流动都是理想的，这种情形下的边界层根薄，除去计算摩擦阻力之外，流动图像可以很好地用理想流体的流动图像来描写。在亚声速空气动力学中，升力由(理想的)位势流来确定，而阻力在实质上是由边界层来确定的。

边界层本身可以是层流的，也可以是湍流的，依赖于所包含的参量。在大多数的实际情形中，边界层沿着物面从层流变成湍流。边界层过渡到湍流，通常会延迟分离。但是，在一部分流线型物体中，分离并不明显，最后湍流边界层并入尾迹。

如果流动速度很小，则密度的变化就很小，流动可以认为是不可压缩的。

如果流动速度增加到马赫数大于0.3，则密度的变化就显得重要了。但是，一般的流动图像仍旧如图所示。不过，当马赫数的数值增加到超过1之后，就会出现激波，流动的图像。

如果马赫数的数值增加到超过5甚至6以上，则离解和电离就会发生。

注：激波 (Shock wave)：在气体、液体和固体介质中，应力(或压强)、密度和温度等物理量在波阵面上发生突跃变化的压缩波。

- 内部流动——在管道、渠道和喷管内，以及在流体机械中，流体的流动受到壁面的限制，这种流动就是通常所指的内部流动。对于气体而言，内部流动在通道内的主要部分可以近似地认为理想流体。虽然如此，在管壁上由于粘性的作用会发展出边界层(通常是湍流的)。在既是粘性又是湍流的流动中，边界层厚度随着流动向下游增加，最后扩展到渠道或管道、通道的整个横截面上。

边界层 (Boundary Layer) :

• 边界层：

由于流体的黏滞性，在紧靠其边界壁面附近，流速较势流流速急剧减小，形成流速梯度很大的薄层流体。

边界层 (boundary layer) 是高雷诺数绕流中紧贴物面的粘着力不可忽略的流动薄层，又称流动边界层、附面层。这个概念由近代流体力学的奠基人，德国人Ludwig Prandtl于(普朗特) 1904年首先提出。从那时起，边界层研究就成为流体力学中的一个重要课题和领域。在边界层内，紧贴物面的流体由于分子引力的作用，完全粘附于物面上，与物体的相对速度为零。

在流体力学软件中进行流体数值模拟时，边界层内需要布置较多的网格，增加计算的准确性和精度。

• 边界层分离:

边界层流动从物体表面脱离的现象。二维边界层分离有两种情况，一是发生在光滑物面上，另一是发生在物面有尖角或其他外形中断或不连续处。光滑物面上发生分离的原因在于，边界层内的流体因克服粘性阻力而不断损失动量，当遇到下游压力变大（即存在逆压梯度）时，更需要将动能转变为压力能，以便克服前方压力而运动，这种情况越接近物面越严重。因此边界层内法向速度梯度越接近物面下降越快，当物面法向速度梯度在某位置上小到零时，表示一部分流体速度已为零，成为“死水”，边界层流动无法沿物面发展，只能从物面脱离，该位置称为分离点。分离后的边界层在下游形成较大的旋涡区；但也可能在下游某处又回附到物面上，形成局部回流区或气泡。尖点处发生边界层分离的原因在于附近的外流流速很大，压强很小，因而向下游必有很大的逆压梯度，在其作用下，边界层即从尖点处发生分离。三维边界层的分离比较复杂，是正在深入研究的课题。边界层分离导致绕流物体压差阻力增大、飞机机翼升力减小、流体机械效率降低、螺旋桨性能下降等，一般希望避免或尽量推迟分离的发生；但有时也可利用分离，如小展弦比尖前缘机翼的前缘分离涡可导致很强的涡升力。

• 边界层转捩:

边界层中的流态由层流过渡为湍流的过程。转捩是一个十分复杂的流动变化过程，工程上常把转捩过程简化为一个突变现象。影响转捩的主要因素是雷诺数，若边界层当地雷诺数达到某一临界值时，即发生转捩。转捩还受其他许多因素影响，如外流的原始湍流度、逆压梯度、流过曲面时离心力的作用、物面粗糙度、噪声、系统的稳定性以及流体与物体间的热交换等。

• 边界层控制:

控制边界层发展，影响其结构，从而控制边界层转捩或分离的技术，其目的一般是减小绕流物体阻力或增加飞行器的举力。经常采用以下几种控制方法：①采用良好或可变的物面形状，使边界层尽量处于有利的顺压梯度下，避免出现过早或过大的逆压梯度，例如采用细长的流线形物体。②降低物面粗糙度。③采用吹气或引射方法增加边界层气流的动量，或将边界层底部低动量流体吸除，均可避免分离。④通过扰流作用（如安装扰流片等），使层流边界层变成湍流边界层，提高其抗分离能力。又如高尔夫球面的小坑，是为了让流动提前转捩，形成湍流边界层，流体微团由于湍流脉动，动量交换能力比层流强，加强了抗逆压梯度的能力，减小了分离区，从而减小了压差阻力，球可以飞得更远。

气体动力学基础：

气体动力学是流体力学的一个分支，在连续介质假设下，研究与热力学现象有关的气体的运动规律及其与相对运动物体之间的相互作用。气体在低速流动时属不可压缩流动，其热力状态的变化可以不考虑；但在高速流动（如马赫数大于0.3左右）时，气体的压缩效应不能忽略，其热力状态也发生明显的变化，气体运动既要满足流体力学的定律，也要满足热力学的定律。流体力学和热力学的紧密结合，便形成了气体动力学。

声速与马赫数 (Mach number) :

- 声速：是指微弱压力扰动波在可压缩介质中的传播速度。在实际气流中，由于气体具有可压缩性，某一扰动不能在一瞬间传遍整个流场，而是以波面的形式逐渐向前推进。例如在等直管的左端放一个活塞，以速度 V 向右轻微推断 dt 时刻，此时活塞先压缩于活塞面直接接触的那一层气体，该层气体进而压缩邻层，邻层再压缩下一邻层，从而在直管中一直传遍下去，形成一道微弱的压缩波。波面为未扰动和已扰动区域的分界面，称为波头。波面向前传播的速度就是声速。

- 马赫数 (Mach number)：为流体速度 v 与该处声速 c 的比值，记作 Ma 。

$$Ma = v/c$$

Ma 为气体动力学中十分重要的一个无量纲物理参数，可衡量气体压缩性的大小， Ma 越大，可压缩性影响就越大。 $Ma > 1$ 的气流为超声速气流， $Ma < 1$ 的气流为低声速气流， $Ma = 1$ 的气流为声速气流。

滞止参数 (Stagnate Parameters) :

滞止参数是指气流在某一断面的流速设想以无摩擦的绝热过程（即等熵过程）降低为零时，该断面上的其它参数所达到的数值。

为了描述流场中一点的状态，可以给出该点气体压力、温度和速度等参数的数值。但是，在工程应用上，往往是给出该点气流的滞止参数(滞止温度、滞止压力等)和数的数值。这是因为运用滞止参数分析或计算问题比较方便，同时滞止参数也比较容易测量。

计算流体力学基本方程：

流体流动要受物理守恒定律的支配，基本的守恒定律包括：质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。如果流动包含有不同组分的混合或相互作用，系统还要遵守组分守恒定律。如果流动处于湍流状态，系统还要遵守附加的湍流输运方程。控制方程就是这些守恒定律的数学描述。

CFD一般应用阶段：

- 概念设计阶段
- 设计深入阶段
- 发现问题，改进设计

CFD是物理实验的补充，能够更快速的分析问题，与设计过程结合的更加紧密，同时节省费用和人力；

注：基于Fluent的市面流体类书籍很多，可以有针对性的选择深入学习，同时可以结合官方教程加以学习，但是针对水利方面，景观生态设计方面的深入说明和相关案例则很少。对于Fluent的学习建议使用ANASYSWorkbench，而不是早些版本的Fluent6.3等。Fluent整合到ANASYSWorkbench后，操作性、流畅性、易用性都得以很大的提升，基本可以不借助外在的网格划分工具，后处理工具，在Workbench下完成所有的工作。

流体力学的求解流程与基本参数 (基于ANSYS-Fluent的解释)



ANSYS-Fluent

<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/>

ANSYS+Fluent官方网站

ANSYS FLUENT 最初是由FLUENT Inc, 于1983年开始发行, 2006年2月ANSYS Inc收购了FLUENT Inc, 目前Fluent作为模块被集成到ANSYS产品中。

ANSYS FLUENT软件拥有模拟流动、湍流、热传递和反应等广泛物理现象的能力, 例如:

- 水轮机、风机和泵等流体机械内部的流体流动;
- 石油、天然气的地下渗透、开采及储运;
- 飞机和航天器等飞行器的设计;
- 汽车流线外形对性能的影响;
- **洪水波及河口潮流计算**;
- 流体机械的结构设计与优化;
- 风载荷对大桥, **高层建筑物稳定性及结构性能的影响**;
- **温室及室内空气流动及环境分析**;
- 电子元器件的冷却;
- 换热器性能的分析及换热器片形状的选取;
- **河流中污染物的扩散**;
- **汽车尾气对街道环境的污染**;
- 食品中细菌的运移;

ANSYS FLUENT先进的求解技术可提供快速、准确的CFD结果、灵活的移动和变形网格, 以及出众的并行可扩展能力。用户自定义函数可实现全新的用户模型和扩展现有模型。ANSYS FLUENT中的交互式的求解器设置、求解和后处理能力可轻易暂停计算过程, 利用集成的后处理检查结果, 改变设置, 并随后用简单的操作继续执行计算。ANSYS CFD-Post可以读入Case和Data文件, 并利用其先进的后处理工具开展深入分析, 同时对比多个算例。

ANSYS Workbench集成ANSYS FLEUNT后给用户提供了与所有主要CAD系统的双向连接功能, 其中包括ANSYS DesignModeler强大的几何修复和生成能力, 以及ANSYS Meshing先进的网格划分技术。该平台通过使用一个简单的拖放操作便可以共享不同应用程序的数据和计算结果, 例如, 在结构力学模拟中使用流体流动的求解结果作为其边界负荷定义。

计算流体力学CFD的求解过程:

FLUENT 分析模拟计划:

1—分析与模拟的目的是什么

确定设计研究需要的数据类型与精度, 并能够用计算流体分析软件协助处理;

确定几何形状, 生成计算网格 (用**GAMBIT**, 也可以读入其它指定程序生成的网格)

选择2D或3D来模拟计算

输入网格

检查网格

选择解法器

选择求解的方程: 层流或湍流(或无粘流), 化学组分或化学反应, 传热模型等。确定其它需要的模型如: 风扇、热交换器、多孔介质等模型。

确定流体物性

指定边界条件

条件计算控制参数

流场初始化

计算

检查结果

保存结果, 后处理等。

2-构建几何计算模型

对要进行模拟的几何模型进行抽象概括和简化，确定计算域包括哪些区域，在模型计算域的边界上使用什么样的边界条件，模型按二维还是三维进行构造，什么样的拓扑结构最适合于该问题；

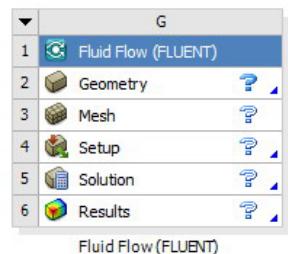
3-选择物理模型

在Fluent中每一种具体的物理模型都有具体规定的设置，所以要求我们在计算之前就要考虑好选择什么样的物理模型。如湍流模型，定常还是非定常，是否考虑能量的交换，以及可压缩性等；

4-决定求解过程

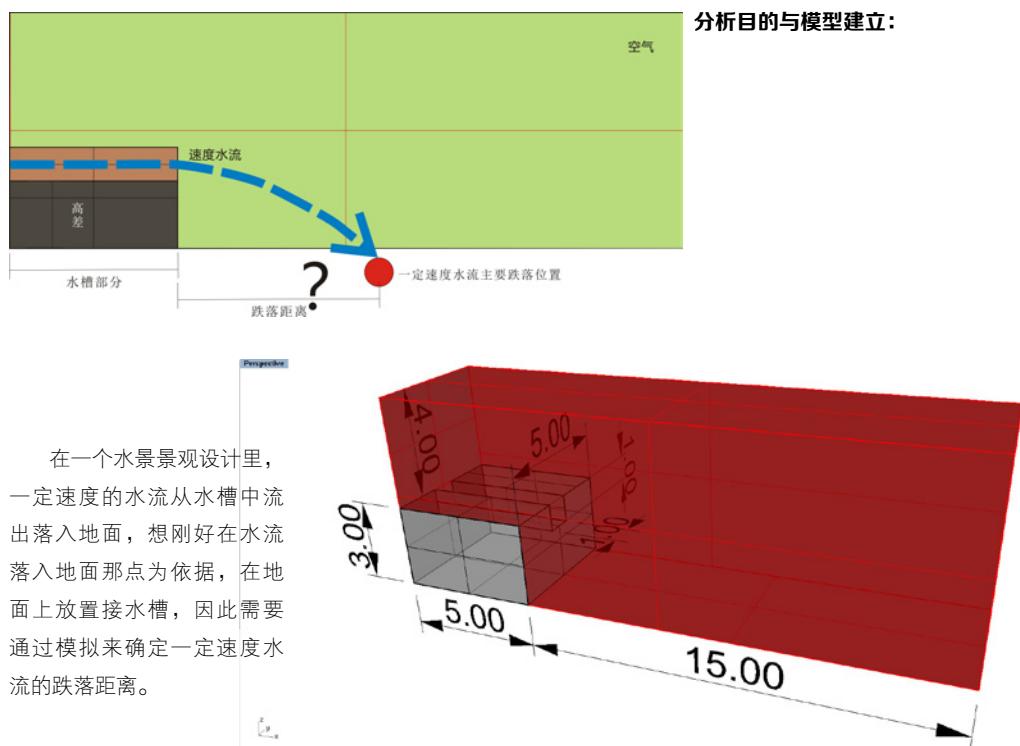
确定该问题是否可以利用求解器现有的公式和算法直接求解，是否需要增加和修改部分参数加快收敛速度；

WorkBench中集成的流体分析系统，可以帮助工程师，设计师方便流程化的操作；

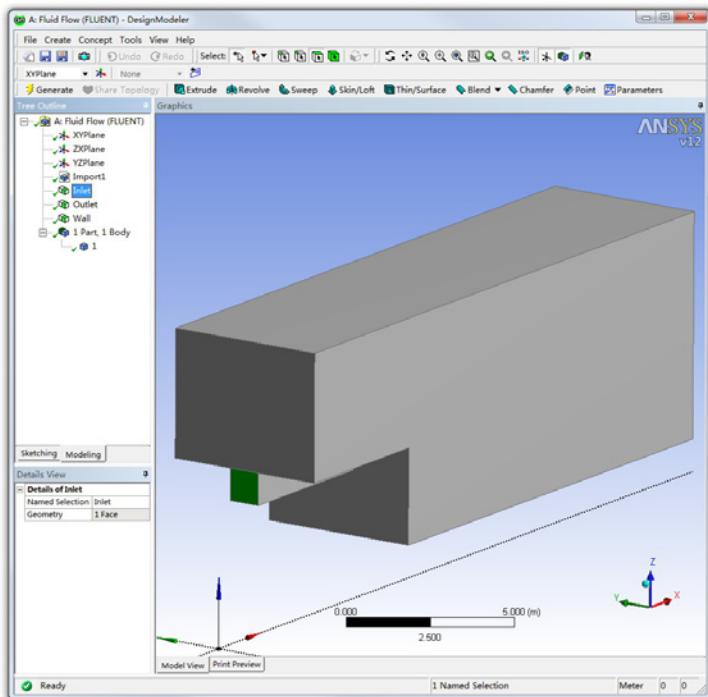


关于几何建模Geometry(DesignModeler) 与生成计算网格Mesh(Meshing):

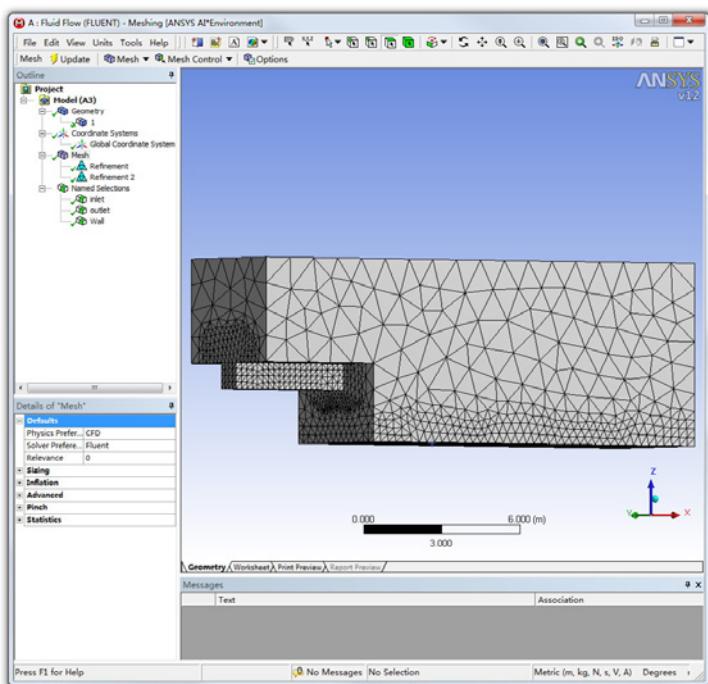
Fluent未集成到ANSYS Workbench之前，需要使用GAMBIT等网格划分工具生成计算网格。集成后，在Workbench下可以使用DesignModeler建立简单几何模型，或者导入外部CAD模型进行调整，再在Meshing模块下处理网格划分。当然，仍然支持使用外部导入的计算网格文件。



在Rhinoceros里建立的几何模型，单位米（m），需要注意实际水景水槽（灰色部分）与模拟需要建立的几何模型部分（红色部分）之间的关系，不能直接使用实际水槽的形体，需要根据模拟的目的，模拟的方式建立水体流动部分可能接触到的表皮部分（即流动界面）即可，因为计算区域主要为空气，将定义空气为基本相，充满红色区域。



在Meshing中设置网格和部件命名



将Rhinoceros里建立的几何模型导出为ANSYS可以输入的几何文件，此处为stp格式文件再在DesignBuilder中加载，使用Named Selection定义主要界面，包括水流进入的入口、出口，与水流接触的界面，在DesignBuilder中为部件命名可以一开始就检查界面的正确性，并使后期操作方便，也可以在Meshing中为部件命名。

生成计算网格：

ANSYS的网格划分工具根据不同求解器提供对应的网格文件，主要包括两种不同的网格文件，有限元网格和计算流体力学网格。

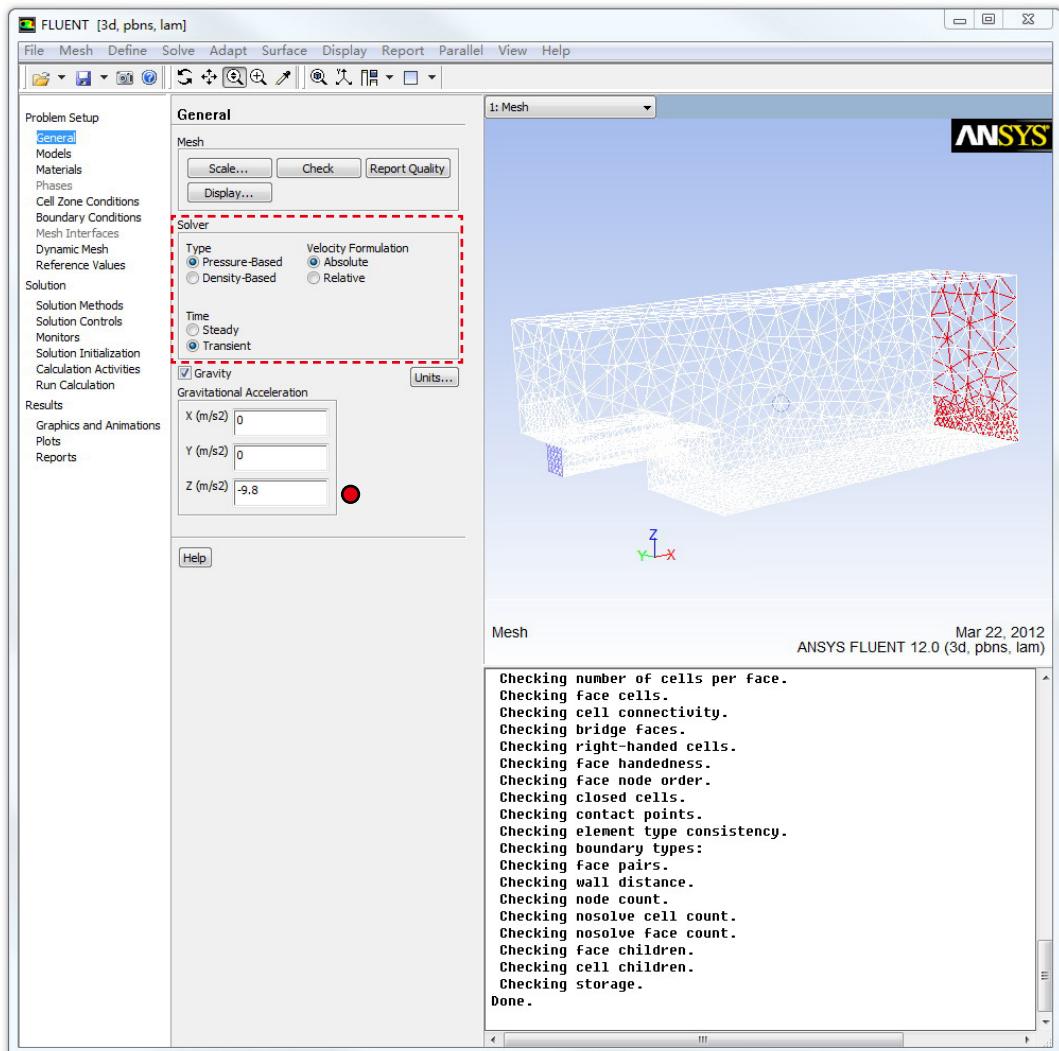
有限元分析（FEM）网格包括：

- 用于机械动力学（隐式）仿真的网格；
- 用于显式动力学仿真（ANSYS LS DYNNA&AUTODYN）计算的网格；
- 用于电磁场仿真的网格；

计算流体力学（CFD）网格包括：

- 用于ANSYS CFX计算的网格；
- 用于ANSYS FLUENT计算的网格；

此例使用了Fluent计算的网格，在计算网格过程中可以根据分析目的选择需要加密Refinement网格的区域细化计算精度，此处主要是与水流接触的壁面。如果在DesingModeler中定义的部件命名在Meshing中没有出现，需要重新在Meshing中为主要部件命名，以在fluent分析中再具体设置部件的进口、出口等参数。



检查网格与设置重力加速度：

建立几何模型，生成计算网格之后，就可以在Fluent模块中进一步设置边界条件，选择模型、设置材料、迭代算法及松弛因子、初始化及迭代计算。但是，最开始时需要使用Problem Setup/General/Mesh/Check工具来检查网格，防止计算错误。如果出现问题，需要返回模型和网格划分部分再做调整。模拟过程中因为水流出水槽，会受重力加速度作用落下，需要设置重力加速度，在Z轴方向上输入数值 -9.8 m/s^2 。

求解器 (Solver) :

Fluent: Define→General→Solver

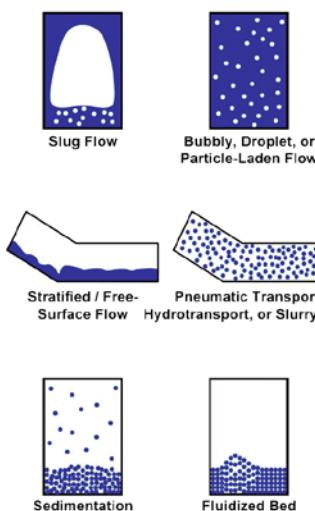
Pressure Based Solver是基于压力法的求解器，擅长求解不可压缩流动，对于可压流动也可以求解；Density-Based Solver是从Fluent 6.3新发展出来的，它是基于密度法的求解器，有比较好的求解可压缩流动的能力。对于有些计算模型，不能使用基于密度的求解器而使用基于压力的求解器。例如，多相流中的VOF、Mixture和欧拉Euler模型，燃烧模型中的PDF、预混合燃烧、部分混合燃烧等。

Fluent计算模型:

1)多相流模型 Multiphase Model:

提供有VOF(Volume of Fluid)、Mixture (混合) 与 Eulerian (欧拉) 三种模型。

- 一般具有可定义的边界，对周围的流场有特定的动力响应；
- 相一般分为固体、液体和气体，但也指其它形式：有不同化学属性的材料，但属于同一物理相，例如液-液；
- 多相流体系分为一种主流体相和多种次流体相：其中一种流体是连续的（主流体），其它相是离散的，存在于连续相中，可以有多种次流体相，代表不同尺寸的颗粒；



关于VOF:

VOF(Volume of Fluid Model)模型的适用性：

- VOF模型适用于被清晰界面分开的不相容流体；
- 在分子水平上相混合的气体不适用于使用 VOF模型；
- 液/液之间仅当两种液体不相容时才可以使用VOF模型；
- VOF模型的求解器仅能使用基于压力法的求解器 Pressure Based；
- VOF模型均适用于定常Steady和非定常Unsteady流；

- 气/液/液** {
- 气泡流_连续液体中存在离散的气泡，如气体吸收器，蒸发设备，鼓泡设备；
 - 液滴流_连续气体中的离散液滴，如喷雾器，燃烧器；
 - 柱塞流_连续液体中的大尺度气泡；
 - 分层/自由表面流_不相容的液体被清洗的界面分开，如自由表面流；
- 气/固** {
- 颗粒流_连续气体中的离散固体颗粒，如旋风分离器，空气净化器，吸尘器；
 - 硫化床_硫化床反应器；
- 液/固**
- 泥浆流_液体中的固体颗粒，固体悬浮，沉积，液体输送；

Explicit显式：该方案会获得没有数值扩散的清晰界面，但是对于偏斜的网格或可压缩的相，不易收敛；

Implicit隐式：该方案不会受到Courant number柯朗数的限制，能够运行更大的时间步长或者处于恒稳态，能够计算网格质量不高和复杂的流体。但是界面的数值扩散不能获得界面曲率的精确预测，对于需要精确

Fluent: Solve→Define→Models

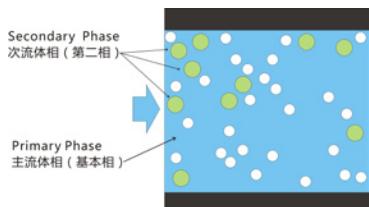
Models

Models

- Multiphase - Off
- Energy - On
- Viscous - Standard k-e, Standard Wall Fn
- Radiation - Off
- Heat Exchanger - Off
- Species - Off
- Discrete Phase - Off
- Solidification & Melting - Off
- Acoustics - Off

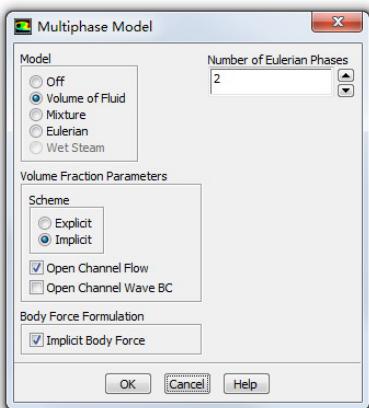
Edit...

Help



此次模拟的是水流跌落，计算区域中气体占据空间较多，为基本相。空气和水流是不相容的气体和液体，形成分层自由表面流，水流为第二相。并选择VOF多相流模型。

VOF模型下权衡使用Implicit隐式与Explicit显式：



预测表面张力位置的流体分析不会选择隐式Implicit方案，可以使用显示Explicit方案；

Implicit Body Force: 用于较大质量力的流体，例如受到重力作用具有较大密度差异的各相流体或者较强的旋转加速度；

2)能量模型(Energy):

如果勾选Energy Equation，表示计算过程中使用能力方程，考虑热交换。一般的液体流动问题，例如水利工程以及水利机械流场分析，可以不考虑传热，而在气流流动模拟时，往往需要考虑传热。

在Fluent中使用其它模型时，如果考虑传热，需要激活相应的模型，提供热边界条件，给出控制传热或依赖于温度变化的各种介质参数。

在湍流模型中，希望能量方程中包含粘性生成热，需勾选Viscous Heating，并只能用于分离式求解器；耦合式求解器包含粘性生成热。

3)湍流模型 (Viscous) :

见下文叙述

4)辐射模型 (Radiation Model):

借助辐射模型，可以在其计算中考虑由于辐射引起的加热、冷却的问题。辐射模型应用的场合：火焰辐射传热、表面辐射传热、导热、对流与辐射的耦合问题，采暖、通风、空调中通过窗口的辐射散热及汽车车厢的传热分析，玻璃加工及玻璃纤维拉拔耦合陶器加工等。

5)组分模型 (Species Model) :

组分模型用于对化学组分的输运和燃烧等化学反应进行模拟。

6)离散相模型 (Discrete Phase Model) :

Fluent在求解流体流动（连续相）输运方程的同时，求解还存在有颗粒、液滴、气泡、粒子（离散相）的多相流问题，例如油气混合其中，空气是连续相，油滴是离散相。

求解带有粒子存在的流动，最直观和容易理解的就是离散相模型，粒子被当作离散存在的一个个颗粒，首先计算连续相流场，再结合流场变量求解每一个颗粒的受力情况获得颗粒加速度，从而追踪每一个颗粒的轨道。这就是在拉式坐标下模拟流场中离散的第二相。

Fluent提供的Discrete Model 可以计算这些颗粒的轨道以及由颗粒引起的热量、质量的传递，即颗粒发生化学反应，燃烧等现象。

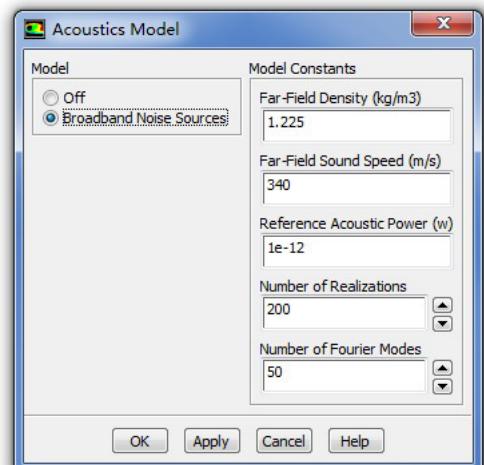
7)凝固和熔化 (Solidification/Melting) :

Fluent 可以用来求解包含有凝固 (Solidification) 和熔化 (Melting) 的流体流动问题，这种凝固和融合现象可以在特定温度下（例如纯金属的熔化），也可以在一个温度范围内发生（如二元合金的熔化）。

8)声学特性 (Acoustic Model) :

Fluent 可以用来预测空气动力学所产生的声学特性 (Acoustic)，如噪声。

Fluent: Solve→Define→Models→Acoustics



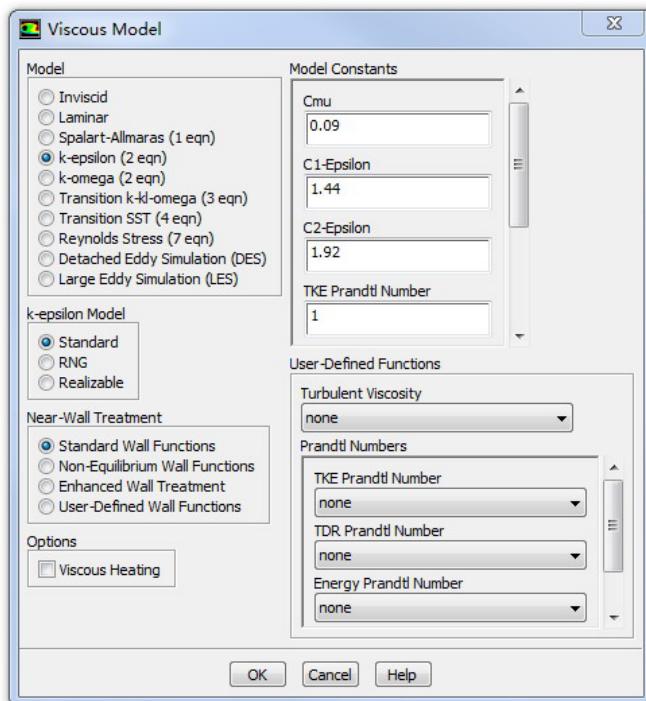
湍流模型 (Turbulent Model) :

湍流是自然界广泛存在的流动现象，大气、海洋环境的流动，飞行器与船舰的绕流，叶轮机械，化学反应器，核反应器中的流体，以及建筑师所进行的建筑风环境模拟等都是湍流。

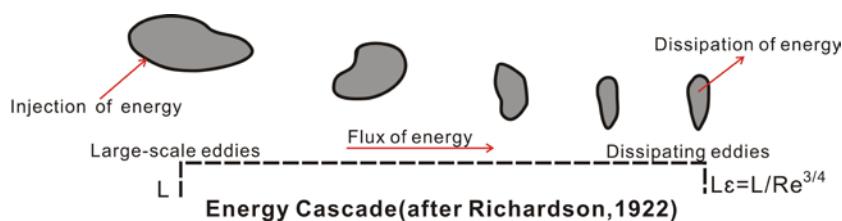
湍流是一种高度复杂的三维非稳态、带旋转的不规则流动。在湍流中流体的各种物理参数，如速度、压力、温度等都随时间与空间发生随机的变化。从物理结构上说，可以把湍流看成是由各种不同尺度的涡旋叠合而成的流动，这些漩涡的大小及旋转轴的方向分布是随机的。大尺度的涡旋主要是由流动的边界条件所决定，其尺寸可以与流场的大小相比拟，是引起低频脉动的原因；小尺度的涡旋主要是有粘性力所决定，其尺寸可能只有流场尺度的千分之一量级，是引起高频脉动的原因。大尺度的涡旋破裂后形成小尺度涡旋。较小尺度的涡旋破裂后形成更小尺度的涡旋。因而在充分发展的湍流区域内，流体涡旋的尺度可在相当宽的范围内连续地变化。大尺度的涡旋不断地从主流获得能量，通过涡旋间的相互作用，能量逐渐向小的涡旋传递。最后由于流体粘性的作用，小尺度的涡旋不断消失，机械能就转化（或称为耗散）为流体的热能。同时，由于边界作用、扰动及速度梯度的作用，新的涡旋又不断产生，这就构成了湍流运动。

流体内部多尺度涡旋的随机运动构成了湍流的一个重要特点：物理量的脉动。

要注意的是，湍流运动尽管是流体微团的运动，但远未达到分子水平。无论湍流运动多么复杂，非稳态的N-S方程对于湍流的瞬时运动仍然是适用的。



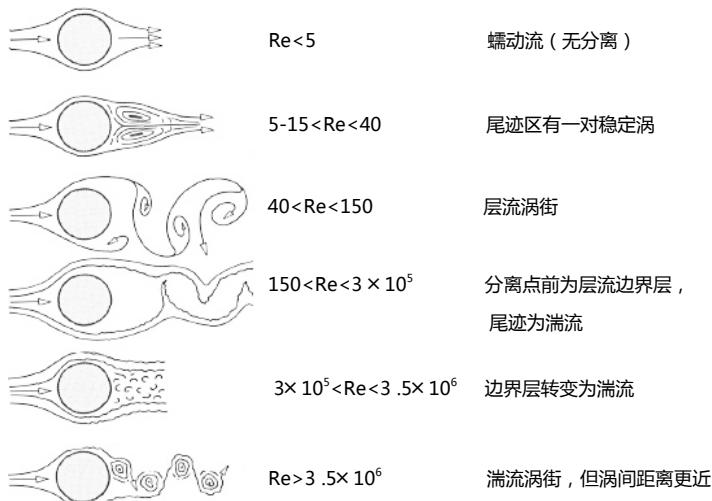
湍流结构:



判断是否为湍流：

外流	}	Where $Re_L = \rho UL / \mu$ $L = x, d, d_s, \text{etc}$
$Re_x \geq 500,000 \text{ along a surface}$		
$Re_d \geq 20,000 \text{ around an obstacle}$		
内流		Other factors such as free-stream turbulence, surface conditions, blowing, suction, and other disturbances etc. may cause transition to turbulence at lower Reynolds numbers
$Re_{dh} \geq 2,300$		
自然对流		
$Ra / Pr \geq 10^9$ Where $Ra = \beta g L^3 \Delta T / \nu a = \rho^2 c_p \beta g L^3 \Delta T / \mu k$ (Rayleigh number)		
		$Pr = \nu / \kappa = \mu c_p / k$ (Prandtl number)

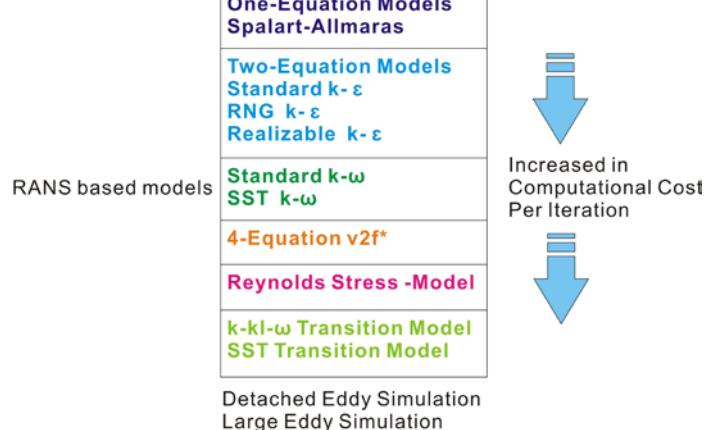
雷诺数的效果：



注：

脉动 (Fluctuation)：紊流中一点处某物理量围绕其时间平均值随机变动的现象。在水力学上的紊流中，某空间点的瞬时速度虽随时间不断变化，但却是围绕某一个平均值不断跳动，这种跳动称为脉动。其平均值称为时间平均流速。

耗散 (Dissipation)：在热力学中，通过反抗黏滞力做功将动能转变为内能的过程。



Fluent提供的湍流模型包括：单方程模型（Spalart-Allmaras）、双方程模型（标准 $k-\epsilon$ 模型Standard $k-\epsilon$ 、重组化群 $k-\epsilon$ 模型RNG $k-\epsilon$ ，可实现 $k-\epsilon$ 模型Realizable $k-\epsilon$ ）、雷诺应力模型Reynolds-Stress Model<RS>、大涡模拟Large-Eddy Simulation<LES>，在Fluent12中增加了Transition $k-k1-\omega$ (3 eqn), Transition SST(4 eqn), Detached Eddy Simulation(DES)等湍流模型。

1-单方程模型 (Spalart-Allmaras) : Spalart-Allmaras模型是相对简单的单方程模型，只需求解湍流粘性的输运方程，并不要求解当地剪切层厚度的长度尺度。该模型对于求解有壁面影响的流动及有逆压力梯度的边界层问题有很好的模拟效果。但是，Spalart-Allmaras模型不能预测均匀各向同性湍流的耗散。并且，单方程模型没有考虑长度尺度的变化，这对一些流动尺度变换比较大的流动问题不太适合。

2-标准 $k-\epsilon$ 模型Standard $k-\epsilon$: 该模型假设流动为完全湍流，分子粘性的影响可以忽略，因此，Standard $k-\epsilon$ 模型只适合完全湍流的流动过程模拟。

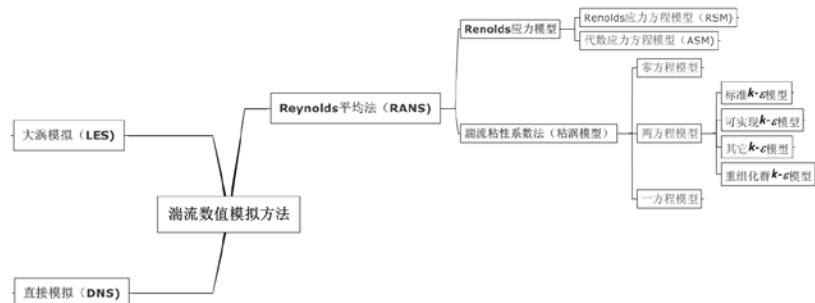
3-重组化群 $k-\epsilon$ 模型RNG $k-\epsilon$: 在FLUENT中，如果是默认设置，用重组化群 $k-\epsilon$ 模型的时候是针对高雷诺数流动问题。如果对低雷诺数问题进行数值模拟，必须进行相应的设置。

4-可实现 $k-\epsilon$ 模型Realizable $k-\epsilon$: 该模型适合的流动类型比较广泛，包括有旋均匀剪切流、自由流、腔道流动、边界层流动和有分离的流动等。

5-雷诺应力模型Reynolds-Stress Model<RS>: RSM也属于高Re数湍流计算模型。在固体壁面附近，由于分子粘性的作用，湍流脉动受到阻尼，雷诺数很小，需要同时采用壁面函数法处理。它对于复杂流动有更高精度预测的潜力。但是这种预测仅仅限于与雷诺压力有关的方程。压力张力和耗散速率被认为是使RSM模型预测精度降低的主要因素。RSM模型并不总是因为比简单模型好而花费更多的计算机资源。但是要考虑雷诺压力的各向异性时，必须用RSM模型。例如飓风流动、燃烧室高速旋转流、管道中二次流。

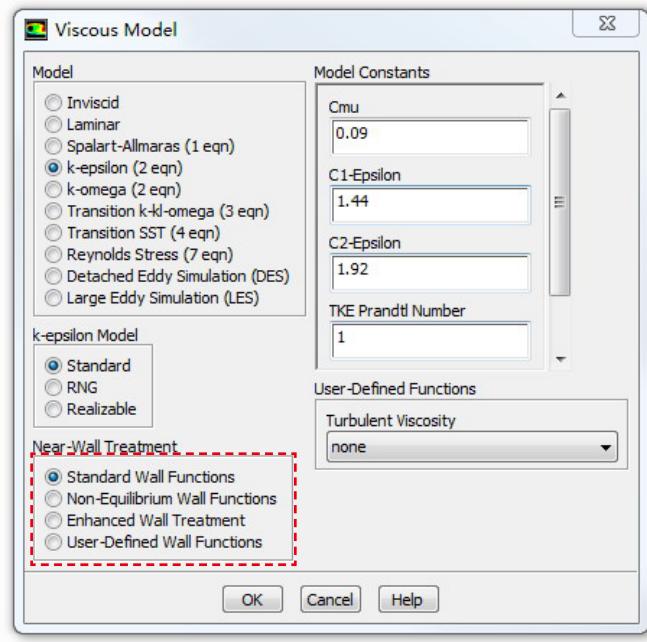
6-大涡模拟Large-Eddy Simulation<LES>: LES模型属于高Re数湍流计算模型。在求解近壁面区内的低Re数流动时，需采用壁面函数法或其它处理方式。LES多在超级计算机或网络机群的并行环境下进行。

7-Detached Eddy Simulation(DES): 分离涡流模拟是RANS模型的一个修改，其中模型在细到足够使用LES计算的区域切换到亚格点尺度来表述。接近固体边界的区域和涡流长度尺度小于最大格点尺寸的区域被交给RANS模式来解决。随着涡流长度尺度超出格点尺寸，区域使用LES模式。所以格点分辨率不像纯LES要求那样高，因此大大减少了计算开销。虽然DES最初为Spalart-Allmaras模型而建立(Spalart等人, 1997年)，但它可以用其它RANS模型实现(Strelets, 2001年)，通过适当的修改RANS模型中隐含或显示地涉及到的长度尺度。所以虽然基于Spalart-Allmaras模型的DES像带墙模型的LES一样作用，基于其它模型的DES(譬如两方程模型)行为就像混合RANS-LES模型。格点的生成比简单的RANS或LES更为复杂，因为要做RANS-LES切换。DES是一种非区域途径，并会产生一个跨越解的RANS和LES区域的单一的光滑速度场。



模型名字	优点	缺点	雷诺平均模型的比较：
Spalart-Allmaras	计算量小，对一定复杂程度的边界层问题有较好效果。	计算结果没有被广泛测试，缺少子模型，如考虑燃烧或浮力问题。	
标准 $k-\epsilon$	应用多，计算量合适，有较多数据积累和相当精度。	对于流向有曲率变化，较强压力梯度，有旋问题等复杂流动模拟效果欠佳。	
RNG $k-\epsilon$	能模拟射流撞击，分离流，二次流，旋流等中等复杂流动。	受到涡旋粘性各向同性假设限制。	
Realizable $k-\epsilon$	和 RNG 模型差不多，还可以模拟圆口射流问题。	受到涡旋粘性各向同性假设限制。	
雷诺应力模型	考虑的物理机理更仔细，包括了湍流各向异性影响。	CPU 时间长（2~3 倍），动量和湍流量高度耦合。	

此次水流跌落模拟湍流模型选择
k-epston(2 eqn)/Standard



在近壁区使用 $k-\epsilon$ 模型，雷诺应力模型 Reynolds-Stress Model<RSM>的问题：

无论是标准 $k-\epsilon$ 模型 Standard $k-\epsilon$ 、重组化群 $k-\epsilon$ 模型 RNG $k-\epsilon$ 、可实现 $k-\epsilon$ 模型 Realizable $k-\epsilon$ 、雷诺应力模型 Reynolds-Stress Model<RSM>都是针对充分发展的湍流才有效，这些模型均是高Re数的湍流模型。只能用于求解湍流核心区的流动。而在壁面区，流动情况变化很大，特别是在粘性底层，流动几乎是层流。湍流应力几乎不起作用。

壁面区子层的划分：

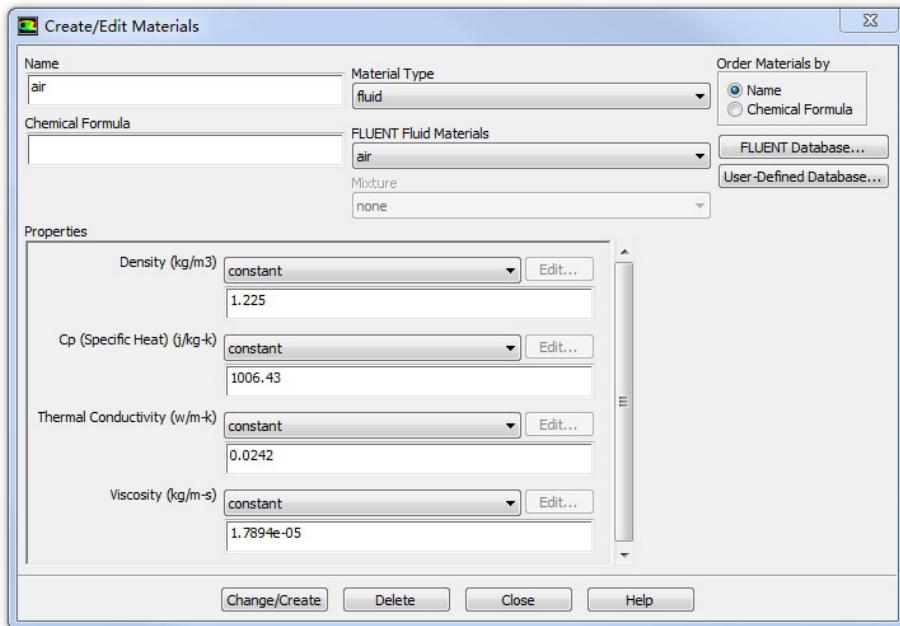
对于有固体壁面充分发展的湍流流动，沿壁面法线的不同距离上，可将流动划分为壁面区（或称内区，近壁区）和核心区（或称外区）。在壁面区，流体运动受壁面条件的影响比较明显，又可分为3个子层：粘性底层（流动几乎是层流运动）、过渡层（厚度极小，可以归入对数律层）、对数律层（粘性力的影响不明显，湍流切应力占主要地位）。

解决近壁区高Re数的方法：

- 1-壁面函数法：用一组半经验的公式（壁面函数）将壁面上的物理量与湍流核心区内的相应物理量联系起来。
- 2-采用低Re数的 $k-\epsilon$ 模型求解粘性影响比较明显的区域。在壁面区要划分比较细密的网格，越靠近壁面网格越细。

材料的定义 (Materials Define) :

在Fluent中，常用的材料包括Fluid (流体) 与Soild (固体) 两种，在组分计算中专门定义了Mixture (混合) 材料，在离散相模型中还定义了附加的材料类型。

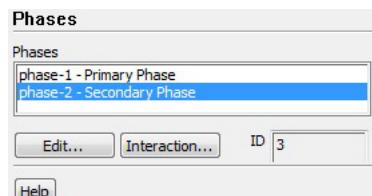


Fluent: Solve→Define→Materials

Fluid材料包含的属性有：

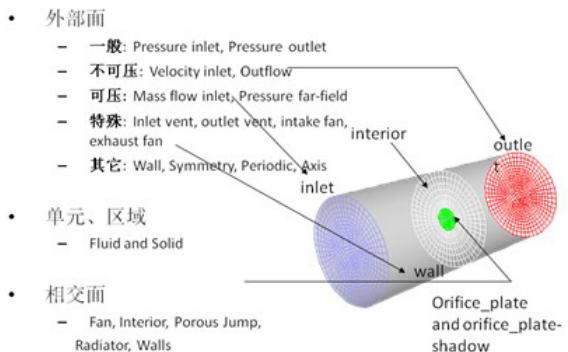
- 密度或分子量 (Density and/or molecular weights)
- 粘度 (Viscosity)
- 比热容 (Heat Capacity)
- 热传导系数 (Thermal Conductivity)
- 质量扩散系数 (Mass Diffusion Coefficients)
- 标准状态焓 (Standard State Enthalpies)
- 分子运动论参数 (Kinetic Theory Parameters)

水流跌落模拟中涉及到两种材料：空气和水。设置Primary Phase基本相为空气，Secondary Phase第二相为水。



Fluent 边界条件(Boundary Condition):

在Fluent中进行分析模拟的模型不能够在Fluent中进行几何建模与网格划分，需要借助于前处理软件完成模拟对象的几何建模与网格划分，例如前述的DesignModeler、Meshing 以及GAMBIT、ICEM-CFD、POINTWISE(GRIDGEN)等，该类前处理软件一般也包含边界条件的设置。



基本的边界类型

Gambit: Operation→Zones →| Fluent/File/Import, Fluent中| Fluent: Define→Boundary Conditions
Specify Boundary Type→可以导入的数据类型;| Fluent中的边界条件设置;
Type;Gambit中的边界条件;

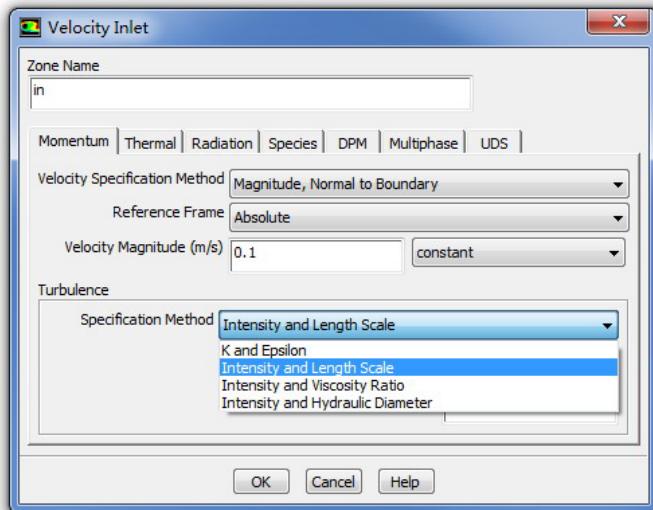
WALL	Mesh...	Boundary Conditions	
Axes	Case...	Zone	
EXHAUST_FAN	Data...	airconditioningwall back bottom default-interior front in left out right top	
FAN	Case & Data...		
INLET_VENT	ABAQUS		
INTAKE_FAN	CFX		
INTERFACE	CGNS		
INTERIOR	EnSight ...		
INTERNAL	FIDAP...		
MASS_FLOW_INLET	GAMBIT...		
OUTFLOW	HYPERMESH ASCII...		
OUTLET_VENT	IC3M...		
PERIODIC	I-deas Universal...		
POROUS_JUMP	LSTC		
PRESSURE_FAR_FIELD	Marc POST...		
PRESSURE_INLET	Mechanical APDL		
PRESSURE_OUTLET	NASTRAN		
RADIATOR	PATRAN		
RECIRCULATION_INLET	PLOT3D		
RECIRCULATION_OUTLET	PTC Mechanica Design...		
SYMMETRY	Tecplot...		
VELOCITY_INLET	FLUENT 4 Case File...		
	PreBFC File...		
	Partition		
	CHEMKIN Mechanism...		

类别	边界条件名称	物理意义
进口边界	速度进口 (Velocity Inlet)	用于定义流动入口边界的速度和标量
	压力进口 (Pressure Inlet)	用来定义流动入口边界的总压和其它标量
	质量进口 (Mass Flow Inlet)	用来规定进口的质量流量, 即进口边界上质量流量固定, 而总压等可变。该边界条件与压力进口边界条件相反。该边界条件只用于可压流动, 对于不可压流动, 使用速度进口边界条件。
	出流 (Outflow)	用于规定在求解前流速和压力未知的出口边界。该边界条件适用于出口处的流动是完全发展的情况。在该边界上, 用户不需定义任何内容(除非模拟辐射传热, 离散相及多口出流)。该条件不能用于可压流动, 也不能与压力进口边界条件一起使用, 这是可用压力出口边界条件。
	压力出口 (Pressure Outlet)	用于定义流动出口的静压(在回流中还包括其它的标量)。当出现回流时, 使用压力出口边界条件来代替质量出口条件常常有更好的收敛速度
	压力远场 (Pressure Far-Field)	用来描述无穷远处的自由可压流动。该边界条件只用于可压流动, 气体的密度通过理想气体定律来计算。为了得到理想计算结果, 要将该边界远离我们所关心的计算区域。
	进风口 (Inlet Vent)	用于模拟具有指定的损失系数, 流动方向以及周围(入口)环境总压和总温的进风口
	排风口 (Outlet Vent)	用来描述具有指定的损失系数, 周围(排放处)的静压和温度的排风口。
	进气扇 (Exhaust Fan)	用于模拟外部进气扇, 它具有指定的压力跳跃, 流动方向以及周围(进口)总压和总温。
壁面重复	排气扇 (Exhaust Fan)	用于模拟外部排气扇, 它具有指定的压力跳跃以及周围环境(排放处)的静压。
	壁面 (Wall)	用于限定流体和固体区域。在粘性流动中, 壁面处默认为无滑移边界条件, 但用户可以根据壁面边界区域的平移或者转动来指定一个切向速度分量, 或者通过指定剪切来模拟一个“滑移”壁面。
	对称 (Symmetry)	用于物理外形以及所期望的流动的解具有镜像对称特征的情况, 也可用来描述粘性流动中的零滑移壁面。在对称边界上, 不需定义任何边界条件, 但必须定义对称边界的位置。注: 对于轴对称问题中的中心线, 应使用轴边界条件来定义, 而不是对称边界条件。
	周期 (Periodic)	用于所计算的物理几何模型和所期待的流动的解具有周期性重复的情况。
内部单元区域	轴 (Axis)	用于描述轴对称几何体的中心线。在轴边界上, 不必定义任何边界条件
	流体 (Fluid)	流体区域是个单元组, 所有激活的方程都要在这些单元上求解。向流体区域输入的信息只是流体介质(材料)的类型。对于当前材料列表中没有的材料, 需要用户自行定义。注: 多孔介质也当作流体区域对待。
	固体 (Solid)	固体区域也是一个单元组, 只不过这组单元仅用来进行传热求解计算, 不进行任何流动计算。作为固体处理的材料可能事实上是流体, 但是假定其中没有对流发生。固体区域仅需要输入材料类型。
内部表面边界	风扇 (Fan)	风扇是集总参数模型, 用于确定具有已知特性的风扇对于大流域流场的影响。这种边界条件允许用户输入风扇的压力与流量关系曲线, 给定风扇旋流速度的径向和切向分量。风扇模型并不提供对风扇叶片上的流动的详细描述, 它只预测通过风扇的流量。
	散热器 (Radiator)	是热交换器(如散热器或冷凝器)的集总参数模型, 用于模拟热交互器对流场的影响。在这种边界条件下, 允许用户指定压降与传热系数作为正对散热器方向的速度的函数。
	多孔介质跃变 (Porous Jump)	用来模拟速度和压降特性均为已知的薄膜。它本质上是内部单元区域中使用的多孔介质模型的一维简化。这种边界条件可用于通过筛子和过滤器的压降模拟, 及不考虑热传导影响的散热器模拟。该模型比完整的多孔介质模型更可靠, 更容易收敛, 应尽可能采用。
	内部界面 (Interior)	用在两个区域(如水泵中间叶轮一起旋转的流体区域与周围的非旋转流体区域)的界面处, 将两个区域“隔开”。在该边界上, 不需要用户输入任何内容, 只需指定位置。

湍流参数：

在进行流动与传热计算时，多数情况下流动处于湍流状态，在计算区域的进口、出口以及远场边界，就需要给定输运的湍流参数。

Fluent: Define→Boundary Conditions→Edit



- K and Epsilon : 湍动能k和湍动耗散率 ε ;
- K and Omega : 湍动能k和比耗散率 ω ;
- Reynolds-Stress Components : Reynolds应力分量 μ_i/μ_j ;
- Modified Turbulent Viscosity : 修正的湍流粘度 $\tilde{\nu}$;
- Intensity and Length Scale : 湍流强度 I 和湍流长度尺度 ℓ ;
- Intensity and Viscosity Ratio : 湍流强度 I 和湍流粘度比 μ_r / μ ;
- Intensity and Hydraulic Diameter : 湍流强度 I 和水力直径 DH ;
- Turbulent Viscosity Ratio : 湍动粘度比 μ_t / μ ;

湍流模型 (Turbulent Model)	湍流参数组合(Turbulent Parameter Match)
Spalart-Allmaras	Modified Turbulent Viscosity ; Intensity and Length Scale; Turbulent Viscosity Ratio; Intensity and Hydraulic Diameter;
Standard k- ε	K and Epsilon; Intensity and Length Scale; Intensity and Viscosity Ratio; Intensity and Hydraulic Diameter;
RNG k- ε	K and Epsilon; Intensity and Length Scale; Intensity and Viscosity Ratio; Intensity and Hydraulic Diameter;
Realizable k- ε	K and Epsilon; Intensity and Length Scale; Intensity and Viscosity Ratio; Intensity and Hydraulic Diameter;
Reynolds-Stress Model<RSM>	K and Epsilon; Intensity and Length Scale; Intensity and Viscosity Ratio; Intensity and Hydraulic Diameter; Reynolds-Stress Components;
K-Omega	K and Omega; Intensity and Length Scale; Intensity and Viscosity Ratio; Intensity and Hydraulic Diameter;

湍流参数在边界上不是均匀分布的情况可以用型函数和UDF（用户自定义函数）来定义。

在大多数情况下，湍流是在入口后面一段距离经过转换形成的，因此在边界上设置均匀湍流条件是一种可以接受的选择。特别是在不知道湍流参数的分布规律时，在边界上采用均匀湍流条件可以简化模型的设置。在设置边界条件时，首先应该定性地对流动进行分析，以便边界条件的设置不违背物理规律。

1-湍流强度 I (Turbulence Intensity) :

湍流强度 I 的定义如下：

$$I = \frac{\sqrt{u'^2 + v'^2 + w'^2}}{u_{avg}}$$

上式中， u' ， v' ， w' 是速度脉动量， u_{avg} 是平均速度。

湍流强度小于 1% 时，可以认为湍流强度是比较低的，而在湍流强度大于 10% 时，则可以认为湍流强度是比较高的。

较高的。在来流为层流时，湍流强度可以用绕流物体的几何特征粗略地估算出来。比如在模拟风洞试验的计算中，自由流的湍流强度可以用风洞的特征长度估计出来。在现代的低湍流度风洞中，自由流的湍流强度通常低于0.05%。

内流问题进口处的湍流强度取决于上游流动状态。如果上游是没有充分发展的未受扰流动，则进口处可以使用低湍流强度。如果上游是充分发展的湍流，则进口处湍流强度可以达到几个百分点。如果管道中的流动是充分发展的湍流，则湍流强度可以用下公式计算得到，这个公式是从管流经验公式得到的：

$$I = \frac{u^*}{u_{avg}} = 0.16 (Re_{D_H})^{-\frac{1}{8}}$$

式中下标 D_H 是Hydraulic Diameter(水力直径)。雷诺数是由水力直径为特征长度求出的。

2-湍流的长度 (Turbulent Length) 与水力直径 (Hydraulic Diameter) :

湍流能量主要集中在大涡结构中，而湍流长度尺度 l 则是与大涡结构相关的物理量。在充分发展的管流中，因为漩涡尺度不可能大于管道直径，所以 l 是受到管道尺寸制约的几何量。湍流长度尺度 l 与管道物理尺寸 L 关系可以表示为：

$$l=0.07L$$

式中的比例因子0.07是充分发展管流中混合长的最大值，而 L 则是管道直径。在管道截面不是圆形时， L 可以取为管道的水力直径。

湍流的特征长取决于对湍流发展具有决定性影响的几何尺度。在上面的讨论中，管道直径是决定湍流发展过程的唯一长度量。如果在流动中还存在其他对流动影响更大的物体，比如在管道中存在一个障碍物，而障碍物对湍流的发生和发展过程起着重要的干扰作用。在这种情况下，湍流特征长就应该取为障碍物的特征长度。

上式对于大多数管道流动是适用的，但并不是普遍适用的，在某些情况下需要进行调整。

1) 对于充分发展的内流，可以用Intensity and Hydraulic Diameter (湍流强度与水力直径) 方法定义湍流，其中湍流特征长度就是Hydraulic Diameter (水力直径) D_H 。

2) 对于导向叶片或分流板下游的流场，可以用Intensity and Hydraulic Diameter (湍流强度与水力直径) 定义湍流，并在Hydraulic Diameter (水力直径) 中将导向叶片或分流板的开口部分的长度 L 定义为特征长度。

3) 如果进口处的流动为受到壁面限制且带有湍流边界层的流动，可以在Intensity and Length Scale 面板中用边界层厚度 δ_{99} 通过公式 $l=0.4 \delta_{99}$ 计算得到湍流长度尺度 l 。最后在Turbulence Length Scale (湍流长度尺度) 中输入 l 的值。

3-湍流粘度比 (Viscosity Ratio) :

湍流粘度比 μ_t / μ 与湍流雷诺数 Re_t 成正比。湍流雷诺数的定义为：

$$Re_t = \frac{k^2}{\epsilon v}$$

Re_t 在高雷诺数边界层、剪切层和充分发展的管道流动中的数值较大，其量级大约在100到1000之间。而在大多数外部流动的自由流边界上， μ_t / μ 的值很小。在典型情况下， μ_t / μ 的值在1 到10 之间。

用湍流粘度比定义流动时，可以使用Turbulent viscosity Ratio (湍流粘度比) 或Intensity and Viscosity Ratio (湍流强度和粘度比) 进行定义。前者适用于Spalart-Allmaras 模型，后者适用于 $k-\epsilon$ 模型、 $\kappa-\omega$ 模型和RSM 模型。

4-推导湍流变量时采用的关系式：

为了从前面讲到的湍流强度 I 、湍流长度尺度 l 和湍流粘度比 μ_t / μ 求出其他湍流变量，必须采用几个经验关系式。在FLUENT 中使用的经验关系式主要包括下面几种：

- 从湍流强度和长度尺度求出修正的湍流粘度：

在使用 Spalart–Allmaras 模型时，可以用湍流强度 I 和长度尺度 ℓ 求出修正的湍流粘度 $\tilde{\nu}$ 具体公式如下：

$$\tilde{\nu} = \sqrt{\frac{3}{2} u_{avg} I \ell}$$

在使用 FLUENT 时，如果在Spalart–Allmaras 模型中选择Intensity and HydraulicDiameter (湍流强度与水力直径) 选项，则修正的湍流粘度就用这个公式求出。其中的长度尺度 ℓ 则用式 $\ell=0.07L$ 求出。

- 用湍流强度求出湍流动能：

湍流动能 k 与湍流强度 I 的关系如下：

$$k = \frac{3}{2} (u_{avg} I)^2$$

u_{avg} 为平均流速。

如果在使用 FLUENT 时没有直接输入湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 的值，则可以使用Intensity and Hydraulic Diameter (湍流强度与水力直径) 、Intensity and Length Scale (湍流强度与长度尺度) 或Intensity and Viscosity Ratio (湍流强度与粘度比) 等方法确定湍流动能。

- 用长度尺度 ℓ 求出湍流耗散率 ε ：

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\ell}$$

C_μ 为湍流模型中的一个经验常数，其值约等于0.09。

在没有直接输入湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 的情况下，可以用Intensity and Hydraulic Diameter (湍流强度与水力直径) 或Intensity and Length Scale (湍流强度与长度尺度) 等办法，利用上述公式确定湍流耗散率 ε 。

- 用湍流粘度比 μ_t / μ 求出湍流耗散率 ε ：

$$\varepsilon = \rho C_\mu \frac{k^2}{\mu} \left(\frac{\mu_t}{\mu}\right)^{-1}$$

C_μ 为湍流模型中的一个经验常数，其值约等于0.09。

在没有直接输入湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 的情况下，可以用Intensity and Viscosity Ratio (湍流强度与粘度比) 定义湍流变量。

- 湍流衰减过程中湍流耗散率的计算：

如果计算风洞阻尼网下游试验段中的流场，可以用下式求出湍流耗散率 ε ：

$$\varepsilon \approx \frac{\Delta k U_\infty}{L_\infty}$$

式中 Δk 是湍流动能 k 的衰减值，比如可以设为入口处 k 值的 U_∞ 是自由流速度， L_∞ 是自由流区域的长度。

上式是对高雷诺数各向同性湍流衰减指数律的线性近似，其理论基础是衰减湍流中湍流动能 k 的方程：

$$\text{如果用这种方法计算 } \varepsilon \text{ , 还需要用 } \varepsilon = \rho C_\mu \frac{k^2}{\mu} \left(\frac{\mu_t}{\mu}\right)^{-1}$$

式检验计算结果，以保证湍流粘度比 μ_t / μ 不过大。虽然这种方法在FLUENT 中没有使用，但是可以用这种方法估算出自由流中的湍流耗散率 ε ，然后再用

$$k = \frac{3}{2} (u_{avg} I)^2$$

式确定 k ，最后在Turbulence Specification Method (湍流定义方法) 下拉列表中选择K and Epsilon (k 和 ε) 并将 k 和 ε 的计算结果输入到相应的栏目中。

- 用长度尺度计算比耗散率 ω :

$$\omega = \frac{k^{0.5}}{C_\mu^{0.25} l}$$

式中 C_μ 和长度尺度 l 的取法与前面段落中所述相同。在使用 Intensity and HydraulicDiameter (湍流强度与水力直径) 或 Intensity and Length Scale (湍流强度与长度尺度) 定义湍流时, FLUENT 用的就是这种方法。

- 用湍流粘度比计算比耗散率:

$$\omega = \rho \frac{k}{\mu} \left(\frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1}$$

在使用 Intensity and Viscosity Ratio (湍流强度与粘度比) 方法定义湍流时, FLUENT 就是使用上述关系式对湍流进行定义的。

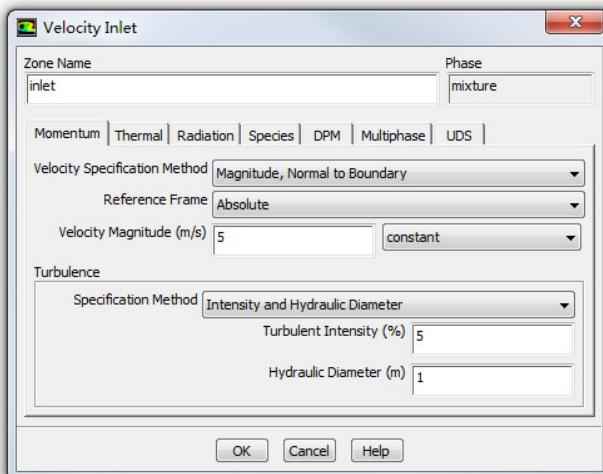
- 用湍流动能定义雷诺应力分量:

在使用 RSM (雷诺应力模型) 时, 如果用户没有在 Reynolds-Stress Specification Method (雷诺应力定义方法) 的 Reynolds-Stress Components (雷诺应力分量) 选项中直接定义雷诺应力的值, 则雷诺应力的值将由给定的 k 值计算得出。假定湍流是各向同性的, 即: $\overline{\mu_i / \mu_j} = 0$

且: $\overline{\mu_a \mu_a} = \frac{2}{3} k$ (不对 a 隐含求和)

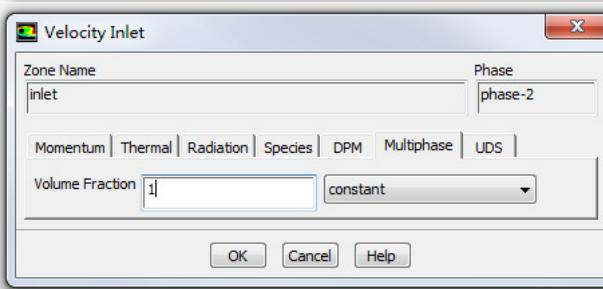
如果用户在 Reynolds-Stress Specification Method (雷诺应力定义方法) 下拉列表中选择 K or Turbulence Intensity (k 或湍流强度) 时, FLUENT 就用这种方法定义湍流。

5-在大涡模拟方法 (LES) 中定义进口湍流:



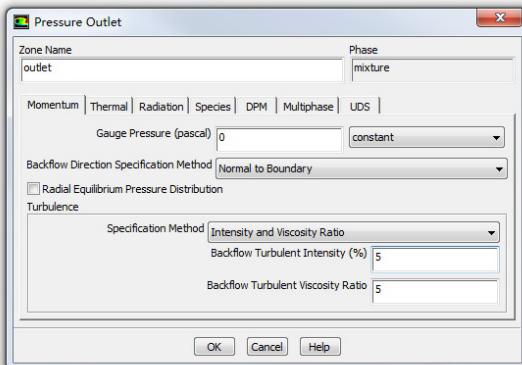
设置进口边界:

在使用速度进口条件时, 可以将湍流强度作为对LES 进口速度场的扰动定义在边界条件中。在实际计算中, 根据湍流强度求出的随机扰动速度分量与速度场叠加后形成LES 算法边界上的、随机变化的速度场。

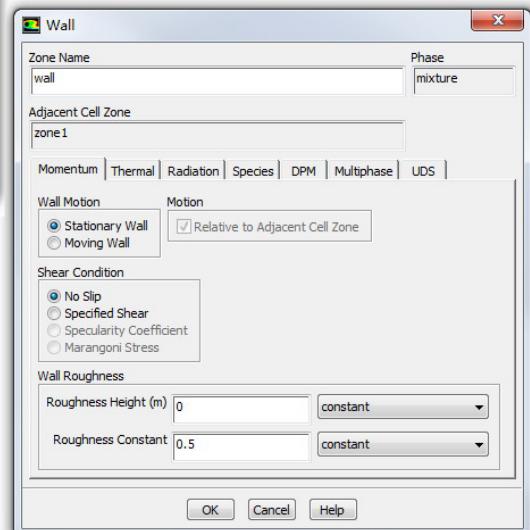


进口为水流进入口, 选择速度为 5m/s, 可以设置不同的速度以便进行方案比较。水流方向垂直于边界 Normal to Boundary。使用 Intensity and Hydraulic Diameter 方法, 5% 的湍流强度介于 1%, 10% 即较低湍流强度和较高湍流强度之间, 水利直径为 1m。

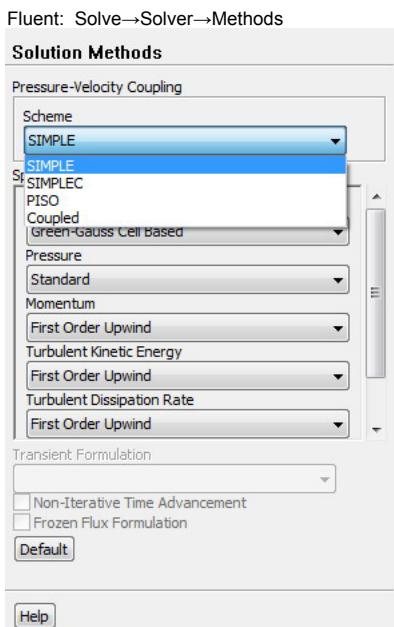
在入水口下选择第二相即水, 设置 Volume Fraction 体积分数为 1。

**设置出口边界：**

出口边界为Pressure-outlet压力出口，保持总压力为0，湍动方式为Intensity and Viscosity Ratio。

**设置Wall（与水接触界面）边界：**

使用wall类型，参数为默认值。

**求解参数设置 (Solution Methods/Solution Controls) :**

在设置完计算模型和边界条件后，即可开始求解计算了，因为常会出现求解不收敛或者收敛速度很慢的情况，所以就要根据具体的模型制定具体的求解策略，主要通过修改求解参数来完成。在求解参数中主要设置求解的控制方程、选择压力速度耦合方法、松弛因子、离散格式等。

在VOF模型中，PISO比较适合于不复杂的流体，SIMPLE和SIMPLEC适合于可压缩的流体或者处于封闭域中的流体。

• 求解的控制方程：

在求解参数设置中，可以选择所需求解的控制方程。可选择的方程包括Flow(流动方程)、Turbulence(湍流方程)、Energy(能量方程)、Volume Fraction(体积分数方程)等。在求解过程中，有时为了得到收敛的解，先关闭一些

方程，等一些简单的方程收敛后，再开启复杂的方程一起计算。

• 选择压力速度耦合方法:

在基于压力求解器中，FLUENT提供了压力速度耦合的4种方法，即SIMPLE、SIMPLEC(SIMPLE . Consistent)、PISO以及Coupled。定常状态计算一般使用SIMPLE或者SIMPLEC方法，对于过渡计算推荐使用PISO方法。PISO方法还可以用于高度倾斜网格的定常状态计算和过渡计算。需要注意的是压力速度耦合只用于分离求解器，在耦合求解器中不可以使用。

在FLUENT中，可以使用标准SIMPLE算法和SIMPLEC算法，默认是SIMPLE算法，但对于许多问题如果使用SIMPLEC可能会得到更好的结果，尤其是可以应用增加的亚松弛迭代时。

对于相对简单的问题(如没有附加模型激活的层流流动)，其收敛性可以被压力速度耦合所限制，用户通常可以使用SIMPLEC算法很快得到收敛解。在SIMPLEC算法中，压力校正亚松弛因子通常设为1.0，它有助于收敛，但是，在有些问题中，将压力校正松弛因子增加到1.0可能会导致流动不稳定，对于这种情况，则需要使用更为保守的亚松弛或者使用SIMPLE算法。对于包含湍流或附加物理模型的复杂流动，只要用压力速度耦合做限制，SIMPLEC就会提高收敛性，它通常是一种限制收敛性的附加模拟参数，在这种情况下，SIMPLE和SIMPLEC会给出相似的收敛速度。

对于所有的过渡流动计算，推荐使用PISO算法邻近校正。它允许用户使用大的时间步，而且对于动量和压力都可以使用亚松弛因子1.0。对于定常状态问题，具有邻近校正的PISO并不会比具有较好的亚松弛因子的SIMPLE或SIMPLEC好。对于具有较大扭曲网格上的定常状态和过渡计算推荐使用PISO倾斜校正。

当使用PISO邻近校正时，对所有方程都推荐使用亚松弛因子为1.0或者接近1.0。如果只对高度扭曲的网格使用PISO倾斜校正，则要设定动量和压力的亚松弛因子之和为1.0(例如，压力亚松弛因子0.3，动量亚松弛因子0.7)。

• 松弛因子:

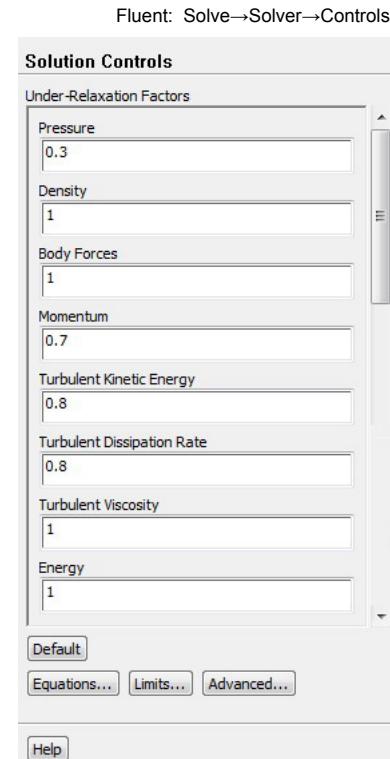
在求解过程中，控制变量的变化是很必要的，这就是通过松弛因子来实现的。它控制变量在每次迭代中的变化，也就是说，变量的新值为原值加上变化量乘以松弛因子。

松弛因子可控制收敛的速度和改善收敛的状况：

- 为1，相当于不用松弛因子
- 大于1，为超松弛因子，加快收敛速度
- 小于1，欠松弛因子，改善收敛的条件

一般来讲，大家都是在收敛不好的时候，采用一个较小的欠松弛因子。Fluent里面用的是欠松弛，主要防止两次迭代值相差太大引起发散。

松弛因子的值在0~1之间，越小表示两次迭代值之间变化越小，也就越稳定，但收敛也就越慢。



使用默认的亚松弛因子开始计算是很好的习惯，对于大多数流动，不需要修改默认亚松弛因子，如果经过4~5步的迭代，残差仍然增长，就需要减小亚松弛因子。压力、动量、 k 和 ε 的亚松弛因子默认值分别为0.3、0.7、0.8和0.8。对于SIMPLEC格式一般不需要减小压力的亚松弛因子。在密度和温度强烈耦合的问题中(如相当高的Rayleigh曲数的自然或混合对流流动)，应该对温度或密度(所用的亚松弛因子小于1.0)的亚松弛因子进行设置。当温度和动量方程没有耦合或者耦合较弱时，流动密度是常数，温度的亚松弛因子可以设1.0。对于其他的标量方程，如漩涡、组分、PDF变量，对于某些问题默认的亚松弛因子可能过大，尤其是对于初始计算，可以将松弛因子设为0.8以使收敛更容易。

• 离散格式：

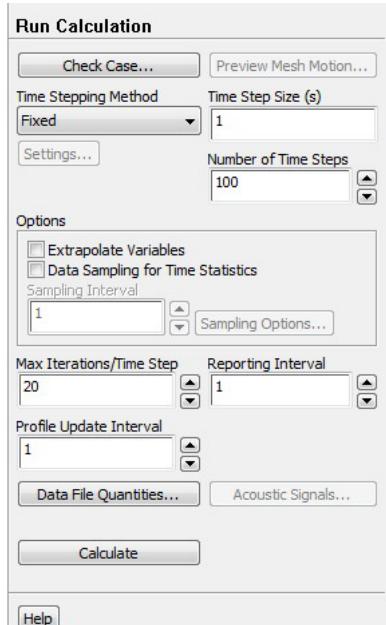
当流动与网格对齐时，如使用四边形 / 六面体网格模拟层流流动，使用一阶精度离散格式是可以接受的。但当流动斜穿网格线时，一阶精度格式将产生明显的离散误差(数值扩散)。因此，对于2D三角形及3D四面体网格，注意要使用二阶精度格式，对复杂流动更是如此。一般来讲，在一阶精度格式下容易收敛，但精度较差，有时，为了加快计算速度，可先在一阶精度格式下计算，然后再转到二阶精度格式下计算。如果使用二阶精度格式遇到难于收敛的情况，则考虑改换一阶精度格式来计算。

对于转动及有旋流的计算，在使用四边形 / 六面体网格时，具有三阶精度的QUICK格式可能产生比二阶精度更好的结果。但是，一般情况下，用二阶精度就已足够，即使使用QUICK格式，结果也不一定好。乘方格式一般产生与一阶精度格式相同的精度结果。中心差分格式一般只用于大涡模拟模型，而且要求网格很细的情况。

初始化 (Solution Initialization) :

所有的非稳态流动及波动现象、非稳态传热均属于步进问题，这类问题的控制方程为双曲型或抛物型，他们的最大特点在于：计算域中的物理量依赖于边界上的初始值。对于稳态问题，由于不求解瞬态项，因此初始值不会对计算结果产生影响。但是一个好的初始值能加快迭代求解收敛速度。

开始计算 (Run Calculation) :

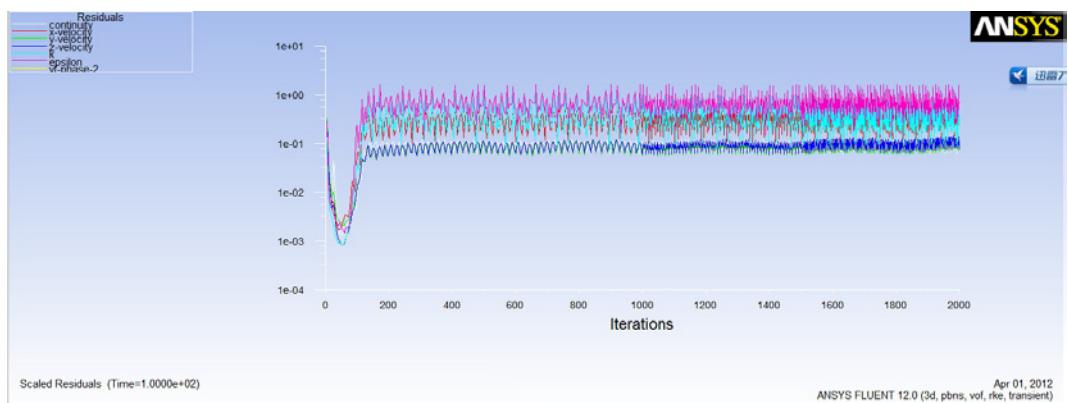


计算前需要迭代设置，如果对于之前的参数设置没有把握，可以将迭代次数Number of Time Steps减小，初步确定无误后再设置较大的值，Time Step Size(s)为迭代时长，一般根据流体速度和分析目的进行设置。

监测 (Monitors) :

判断收敛:

判断收敛性的常规方法是观察残差的变化——如果残差曲线下降则意味着计算收敛，反之则意味着发散。除此之外，还可以观察流场变量的变动情况，如果重要的流场变量在经过一段时间的计算不再变化，则意味着计算已经收敛，可以结束计算。影响收敛性的因素很多，包括亚松弛因子、初始流场、物理模型等都会对计算是否收敛形成直接影响。正因为如此，所以很难给出一个统一的收敛判据。在大多数情况下，残差下降3个数量级就可以认为计算已经收敛了，但是如果初始流场非常靠近最终解，同时残差计算以初始场为基准进行比例计算，则残差下降的幅度可能不会达到3个数量级。与此相反，如果初始流场设置的非常粗糙，则在达到收敛时残差的下降幅度可能又远远超过3个数量级。因此，在用残差下降幅度判断收敛之外，还可以用残差在计算过程中的行为进行收敛性判断，即残差持续下降时间或迭代步数达到一定的值，就可以认为计算已经收敛了。另外，因为在定常计算中，“收敛”的真实含义就是流场变量的变化幅度已经足够小，以致我们可以认为流场不再变化，所以也可以直接用流场变量的变化幅度作为计算是否收敛的判据。



残差曲线

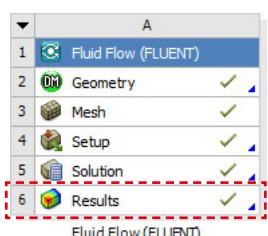
加速收敛:

在计算发散时最容易想到的解决办法是减小亚松弛因子的值，在很多情况下，这个办法是有效的，因为计算发散的最常见原因是由方程的非线性引起的，而亚松弛因子是用线性稳定性分析得到的，因此减小亚松弛因子可以让计算回到稳定域中。

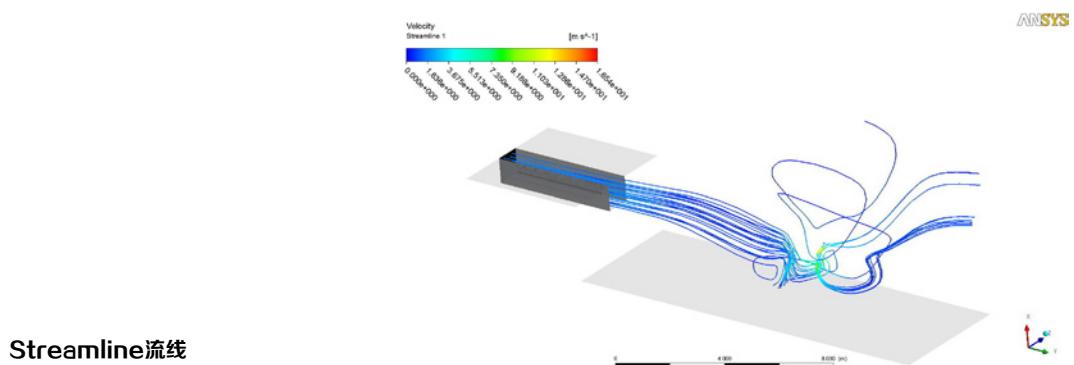
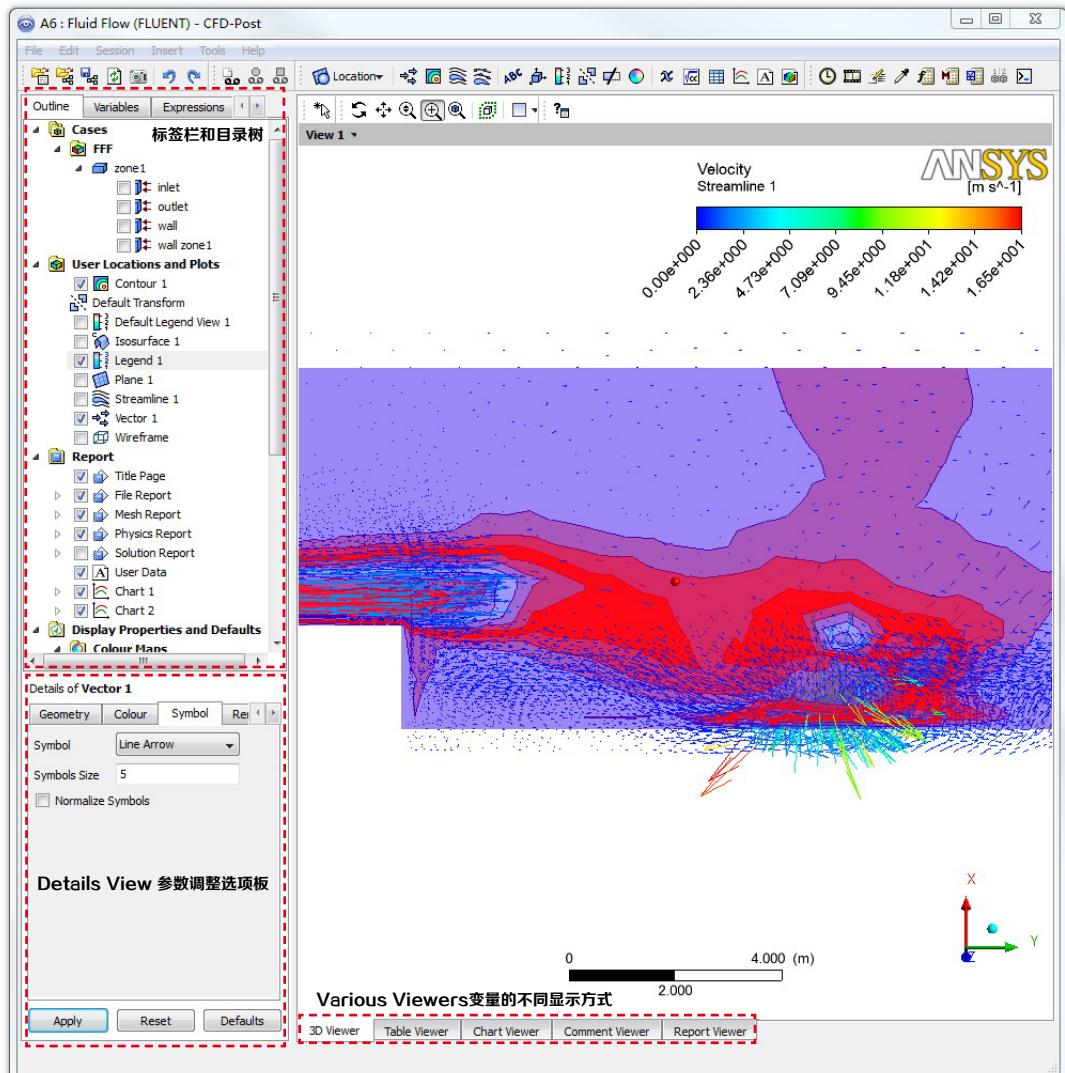
计算发散还可能由初始流场的设置引起，即如果初始流场给的过分粗糙，也有可能引起计算的发散。在这种情况下，解决问题的办法当然应该从改善初始流场入手。如果计算中涉及的物理模型非常复杂，可以考虑先计算简化流场，再以简化流场为初始流场继续进行计算。比如，在多相流计算中，可以先计算连续相流场，然后再加入弥散相进行计算。在带有化学反应的流场计算中，可以先计算混合物流场或冻结流流场，再计算带化学反应模型的流场等等。

后处理 (CFD-Post) :

Workbench的Analysis System下的各整合系统往往已经加入了Results模块，如果是单独处理的，可以在Component Systems下拖动Results到面板中即可。

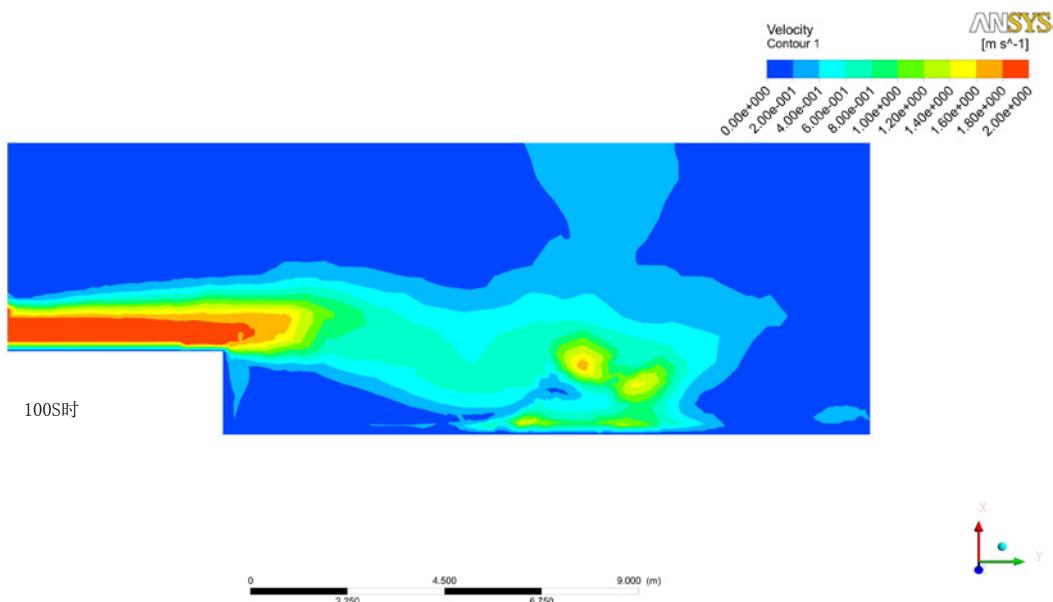


CFD-Post可以协助处理统计分析各项数据，在Fluent未整合到ANSYS Workbench中时，需要借助其它分析软件平台处理数据，例如Tecplot360等后处理软件。



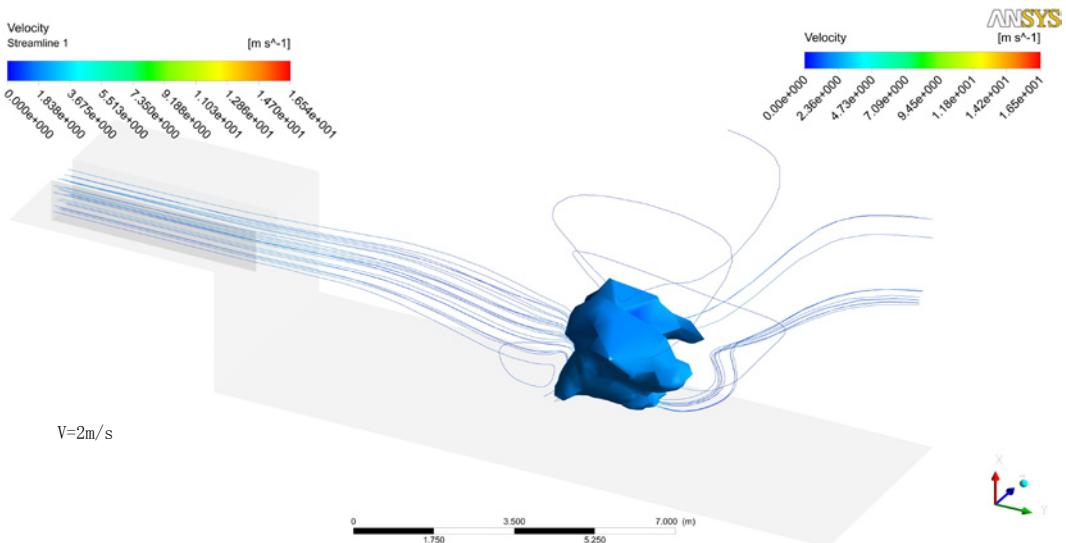
Streamline流线

Contour等值线

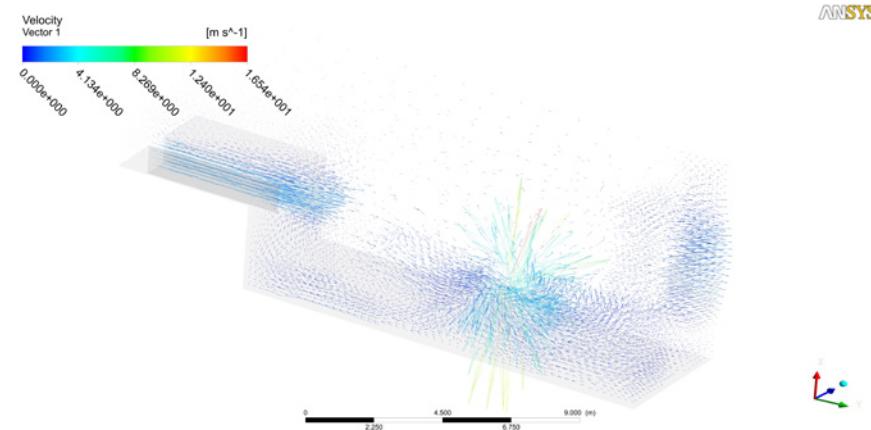


在CFD-Post后处理中，可以根据分析需要获得多种数据，例如速度、压强、密度、体积分数、涡流粘度、壁面剪切力等等，可以以3D Viewer三维视图、Chart、Table图表方式表达。

Isosurface等值面



Vector向量



CFD分析基础的跨专业性，使得设计师对流体分析的模拟有些棘手，尤其Fluent中诸多参数的设置及其背后繁复的理论，都得需要有所了解，才能够使分析的设置更加的合理。以Fluent为基础入手CFD的分析，能够较详细的对该领区域有个较清晰地认识，而一些具体的公式只是协助设计师对概念的理解更加容易些，具体的算法不需过多的深究。针对建筑的CFD分析软件在协助进行分析时更有针对性，例如Phoenics的FLAIR模块、Fluent的Airpak以及前文叙述的诸多热环境模拟软件也包含CFD（多为风环境）的分析。CFD是一个知识结构的体系，对Fluent的理解，必然也同样适用于其他CFD软件平台的参数设置，这与对热湿环境的理解是一致的。

PHOENICS的FLAIR模块

PHOENICS

<http://www.cham.co.uk/>



PHOENICS是 Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series 几个字母的缩写，这意味着只要有流动和传热都可以使用PHOENICS来模拟计算。作为世界上第一套计算流体与计算传热学商业软件,它是国际计算流体与计算传热的主要创始人、英国皇家工程院院士D.B.Spalding教授及40多位博士20多年心血的典范之作。

1.开放性: PHOENICS最大限度地向用户开放了程序, 用户可以根据需要任意修改添加用户程序和用户模型。PLANT 及INFORM功能的引入使用户不再需要编写FORTRAN源程序; GROUND程序功能使用户修改添加模型更加任意和方便; In-Form: 用户接口功能, 完成用户数学表达式的输入、IF判断等功能。方便了用户控制自定义的边界条件、初始条件、材料物性等参数的输入。

2.CAD接口: Phoenics可以读入任何CAD软件的图形文件。 Shapemaker: 三维造型功能。

3.MOVOBJ: 运动物体功能可以定义物体运动, 避免了使用相对运动方法的局限性。

4.大量的模型选择: 20多种湍流模型, 多种多相流模型, 多流体模型、燃烧模型、辐射模型。

5.提供了欧拉算法也提供了基于粒子运动轨迹的拉格朗日算法。

6.计算流动与传热时能同时计算浸入流体中的固体的机械和热应力。

7.VR (虚拟现实) 用户界面引入了一种崭新的CFD建模思路。

8.PARSOL (CUT CELL) : PHOENICS独特的网格处理技术, 特别对于CAD图形的导入, 网格能自动生成。

9.软件自带1000多个例题, 附有完整的可读可改的原始输入文件。

10.PHOENICS专用模块: 建筑模块 (FLAIR) 、电站锅炉模块 (COFFUS)

11.自动收敛控制: 无论输入参数是否充分和一致, 都能保证结果具有较好的收敛效果。

12.细网格: 适合小范围内网格的精确划分。

13.固体应力计算; 前后处理有了较大改进; 对所有模型均使用动态内存分配; 初始数组的给定勿需再通过FORTRAN编译。

14.在VR下, 增加了新的物体类型 (曲面、斜板); 增加了力的积分功能; 监视点参数变化曲线。

PHOENICS应用领域 :

能源动力、两相、多相流、航空航天、传热传质、化工、燃烧、爆炸、船舶水利、化学反应、建筑、暖通空调、流体机械、冶金、磁流体、环境、材料

PHOENICS-FLAIR建筑模块

FLAIR是英国CHAM公司针对建筑及暖通空调专业设计的CFD专用模块。

FLAIR基本功能:

- 通风机特性曲线, 通风机运行工况点计算;

- 舒适度计算: 提供了3种舒适度计算方法, 可以选择一种或多种;

Dry resultant temperature (TRES) (CIBSE Guide)

Predicted mean vote (PMV) (ISO 7730)

Predicted percentage dissatisfied (PPD)(ISO 7730)

- 空气龄计算;

- 湿度计算;

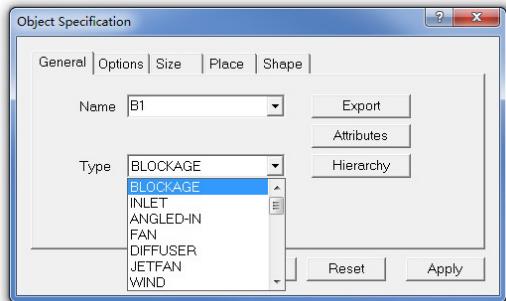
- 烟气计算: 烟气浓度、烟气密度、可视度。
- 灭火喷淋模型;
- 太阳辐射: 窗户面积及其投影;
- 散流器类型选择: 圆形散流器、矩形散流器;
- 通风机组: 单个及多个通风机组合运行;
- 人体形状: 坐、站姿选择;
- 用户自定义设备组件功能;
- LEVEL湍流模型: PHOENICS独特的湍流模型, 在实际应用中取得了很大的成功;
- IMMERSOL辐射模型: 能计算任意形状的固体在流体中的辐射传递;

注: 目前市面上尚无讲解Phoenics的中文教程, 但是其自带的帮助文件足够帮助掌握相关的内容, 并且附有实际的案例。对于Fluent的相关知识的理解, 有助于Phoenics参数输入, 因为二者均为CFD分析工具, 具有基本相同的内核算法, 操作流程。

Phoenics-Flair Model 的Object Type对象类型:

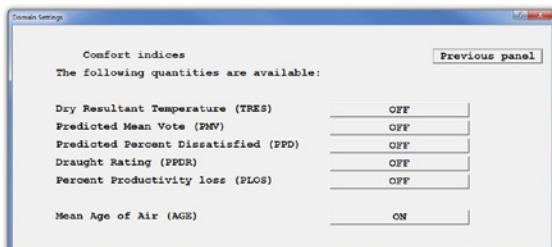
- Blockage • Inlet • Angled-In • Fan • Diffuser • Jetfan • Wind
- Wind-Profile • Opening • Angled-Out • Fire • Spray-Head • Plate
- Thinplt • Person • People • PCB • Point_History • Fine_Grid_VOL
- Pressure_Relief • Null • User Defined • Celltype • Drag_Lift
- Transfer • RAD_Surf • Assembly • Clipping_Plane

对象类型	Brief Description
Blockage	3D, solid or fluid. Can apply heat and momentum sources. 3D, 固体或者液体, 能够用于热, 动能的源
Inlet	2D, fixed mass source. 2D, 质量进口
Angled-in	3D, fixed mass source on surface of underlying BLOCKAGE object. 3D, 以Blockage物体面作为质量进口
Wind	3D, whole domain, applies wind profiles at domain boundaries 3D, 整个域, 以域的边界作为风截面
Wind_Profile	2D, fixed mass source following atmospheric boundary layer. 2D, 跟随大气边界层的质量入口
Outlet	2D, fixed pressure. 2D, 固定压强
Angled-out	3D, fixed pressure on surface of underlying BLOCKAGE object. 3D, 以Blockage物体面作为压力出口
Plate	2D, zero thickness obstacle to flow. May be porous. 2D, 零厚度障碍物, 可能带有气孔
Thin Plate	2D, nominal thickness for heat transfer. 2D, 为考虑传热设置额定厚度
Fan	2D, fixed velocity 2D, 固定速度
Point_history	single cell transient monitor point. 单独的变态检测点
Fine Grid Vol	3D region of fine grid. 细化网格的3D区域
User Defined	2D or 3D, for setting user-defined sources (PATCH/COVAL). 2D或者3D, 用户自定义源
Celltype	2D or 3D, for setting user-defined sources (cannot affect grid). 2D或者3D, 用户自定义源(不会影响网格)
Null	2D or 3D. Used to cut the grid for mesh control. 2D或者3D, 用于剪切控制网格
PCB	3D, solid or fluid with non-isotropic thermal conductivity 3D, 固体或者液体, 带有各向异性的导热性
Pressure Relief	single cell fixed pressure point. 单独确定的压力点
ROTOR	3D, rotating co-ordinate zone in cylindrical-polar grid
Drag_lift	3D, region over which momentum imbalance (force) will be calculated.
Assembly	2D or 3D container object for multi-component object
Transfer	2D, transfers sources between calculations
Clipping_plane	3D, graphically clips the image. No effect on solution.



FLAIR: Obj→Object→New→New Object

FLAIR:Menu→Models→Comfort indeces→Settings



Phoenics-Flair Model 的舒适指数

Comfort Index:

- Dry resultant temperature (TRES)
- Predicted mean vote (PMV)
- Predicted percentage dissatisfied (PPD)
- Draught rating (PPDR)
- Predicted productivity loss (PLOS)
- Mean age of air (AGE)

Dry resultant temperature (TRES) :

Radiant temperature User-set 25.00000 deg C

TRESs是反映空间舒适性水平的一个标准指标。它是空气温度 (Air Temperature)、气流速度 (Air Velocity)以及平均辐射温度 (MRT) 的函数。CIBSE(Chartered Institution of Building Services Engineers)手册卷A中定义的公式为：

$$Tres = (Trad + Tair * (10^*vel)^{0.5}) / (1 + (10^*vel)^{0.5})$$

根据外部条件与居住类型，舒适的TRES温度值在16~28°C区间。

Predicted mean vote (PMV):

Radiant temperature User-set 25.00000 deg C
 Clothing insulation 0.600000 clo
 Metabolic rate Sedentary_activity
 External work 0.000000 met
 Relative humidity User-set 50.00000 %

PMV可参考热舒适性章节中的论述。它是ISO7730中定义的量度，分为7个温度感觉点：

+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
hot 热	warm 温暖	slightly warm 稍暖	neutral 正常	slightly cool 稍凉	cool 凉	cold 冷

Clothing insulation参数以及Metabolic rate参数，参考热舒适性相关指标判定章节，获得模拟参考值；

Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) :

PPD可参考热舒适性章节中的论述。

Draught Rating (PPDR) :

PPDR在IS07730中定义为由于通风造成感觉不舒适的人数百分比，适用的公式为：

$$\text{PPDR} = (34 - T_a)^*(V - 0.05)^{0.62} * (0.37 * V * I + 3.14)$$

式中Ta 为本地气温，V为风速， I 为本地湍流强度，在FLAIR中为百分比：计算公式为：

$$I = 100 * k^{0.5} / V \quad K \text{为湍动能}$$

Predicted productivity Loss (PLOS) :

PLOS, the loss in performance in % by people occupying the space, is defined by Roelofsen as:

$$\text{PLOS} = b_0 + b_1 \text{PMV} + b_2 \text{PMV}^2 + b_3 \text{PMV}^3 + b_4 \text{PMV}^4 + b_5 \text{PMV}^5 + b_6 \text{PMV}^6$$

Mean Age of Air :

空气龄指房间内某点处空气在房间内已经滞留的时间。由于单个空气分子做的是不规则随机运动，没有哪个空气分子所做的运动是完全一样的，因此观测点附近的不同空气分子在房间内停留的时间也会各不相同。观测点的空气龄不是指位于该点的某一个空气分子在室内停留的时间，而是在该点附近的空气分子群的平均停留时间。这个分子群在宏观上是无限小的，因此具有均匀的温湿度等物理特性；在微观上是无限大的，体现出连续流体，即无限多的微观粒子的统计特性，而非单个粒子的随机运动特性。

人体和周围环境的热交换

人体如一台热力机，在体内不断产生热量，保证人体体温始终维持在36–37°C,将产生的热量散发到体外。人体与周围环境散热的途径主要是：对流散热、辐射散热、蒸发散热以及呼吸散热。

现在可以利用CFD模拟人体周围流体状况，判定风速，温度等热环境变化。这里使用PHOENICS的FLAIR模块进行模拟分析。

在分析之前，为确定模拟分析的条件，首先确定分析的目的：

- 在不同送风条件下，人体周边风速、温度、空气龄变化情况；
- 自然通风条件，人体周边风速、温度、空气龄变化情况；
- 空气龄与空气品质预测，数值解析；
- 多人条件下室内空间风速、温度、空气龄变化情况；
- 人体不同姿态条件下，风速、温度、空气龄变化情况；
- 开场、室外空间，自然通风与人体周边热环境条件变化情况解析；

模型分析条件的确定：

- 建筑几何模型：

3.0m × 5.0m × 2.7m

- 人体身高与代谢率：

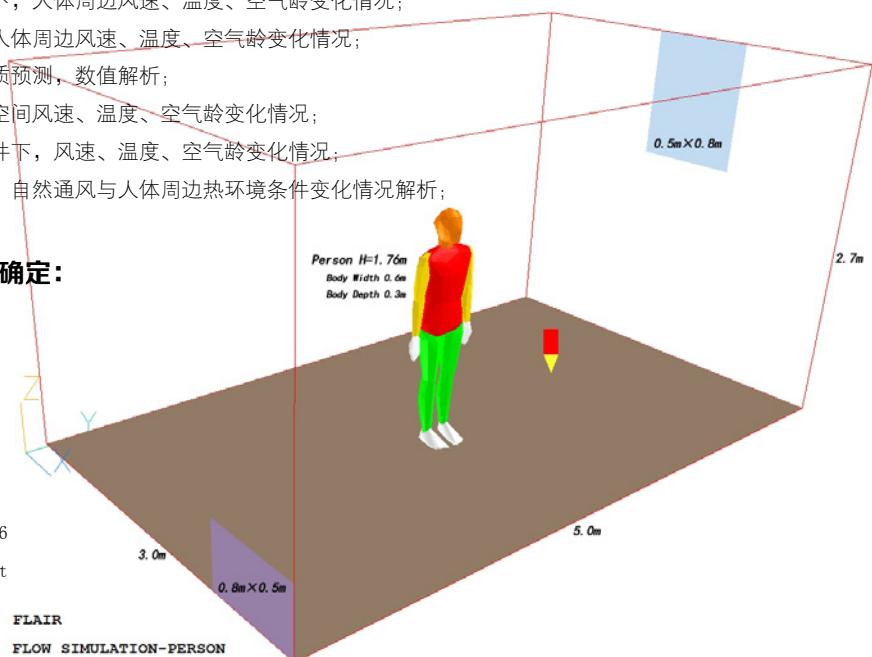
H=1.7m;

Metabolic Rate=1.6

met (Standing Light

Activity) :

Heat source=80w



湍流模型Turbulence Model: LVEL

Numerics: Total number of iteration 迭代总数=500

Global convergence criterion 全局收敛性判断标准=0.1%

Pressure 大气压强: 1.013E+05Pa

Temperature 温度: 20°C

PMV(Predicted Mean Vote)设置:

Radiation temperature 辐射温度: 25.0°C

Clothing insulation 穿衣指数: 0.6clo

Metabolic rate 代谢率: Standing light activity

Relative humidity 相对湿度: 50.0%

Person Attributes 人体模型特征:

Posture: Standing

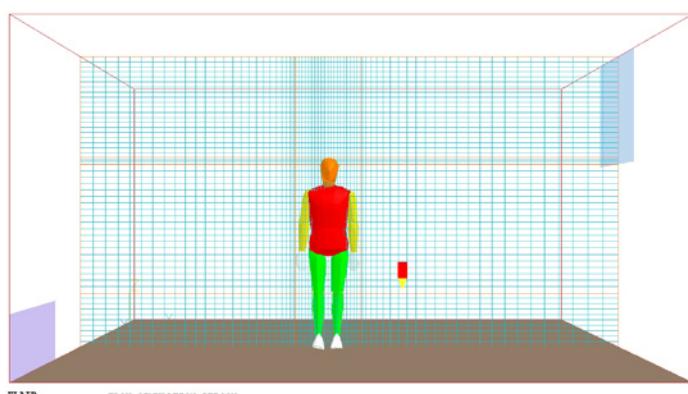
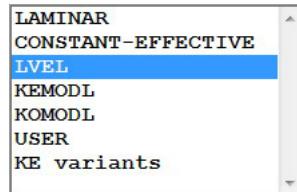
Body width: 0.6m

Body depth: 0.3m

Body height: 1.76m

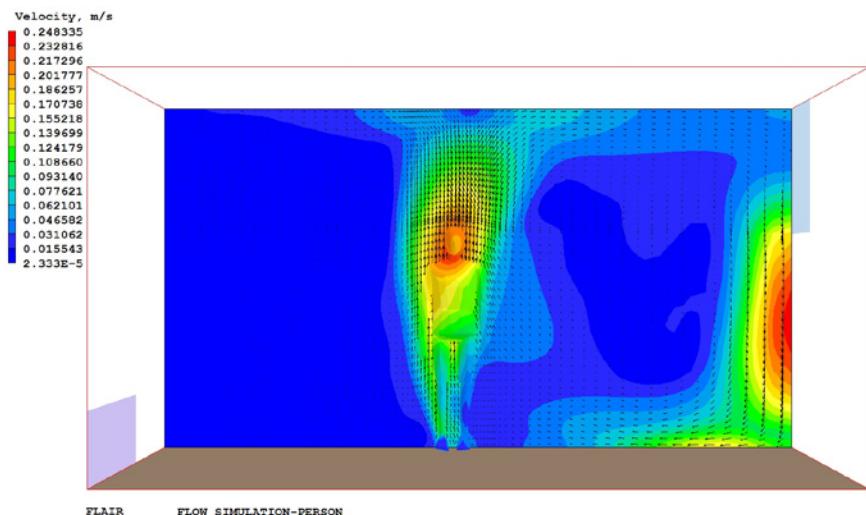
Heat source total heat: 80.0w

四壁视为绝热绝湿



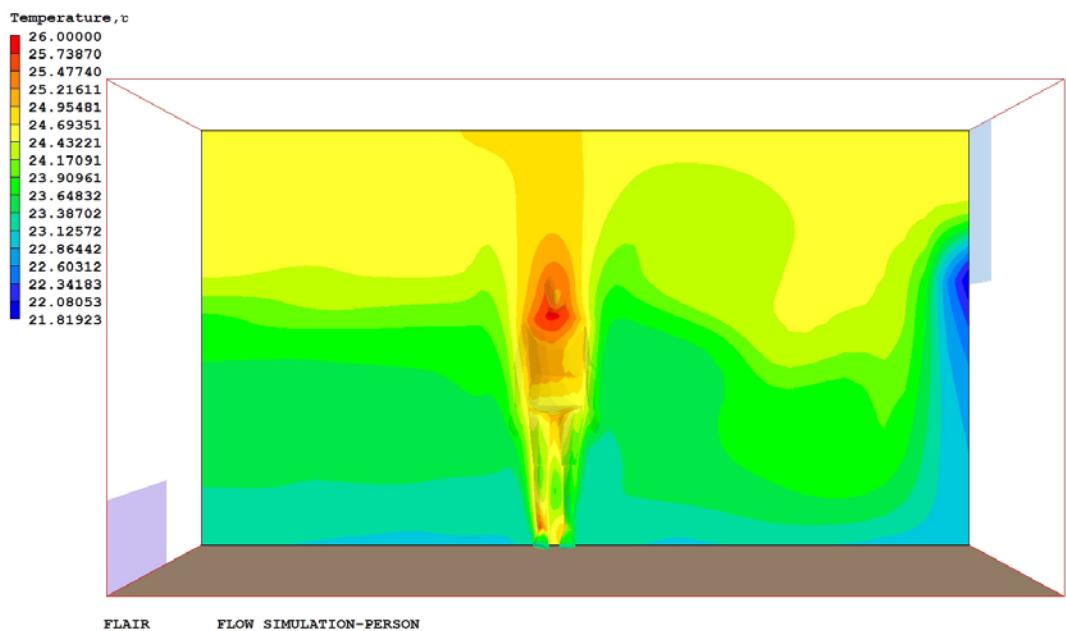
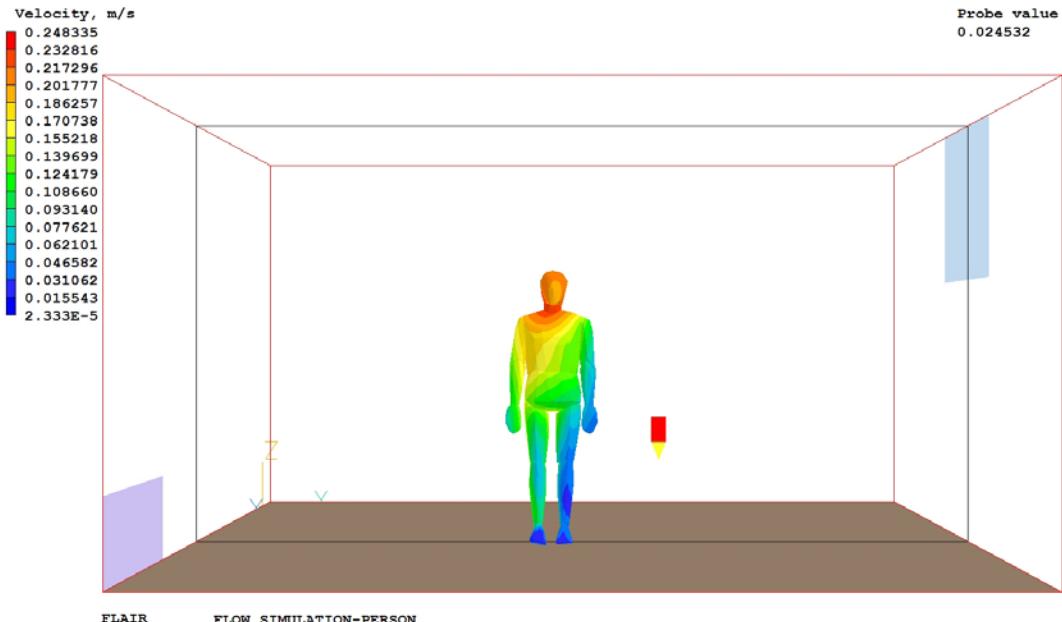
1-静风条件模拟:

假定进风口风速为零，通过模拟观察人体周边气流变化状况。

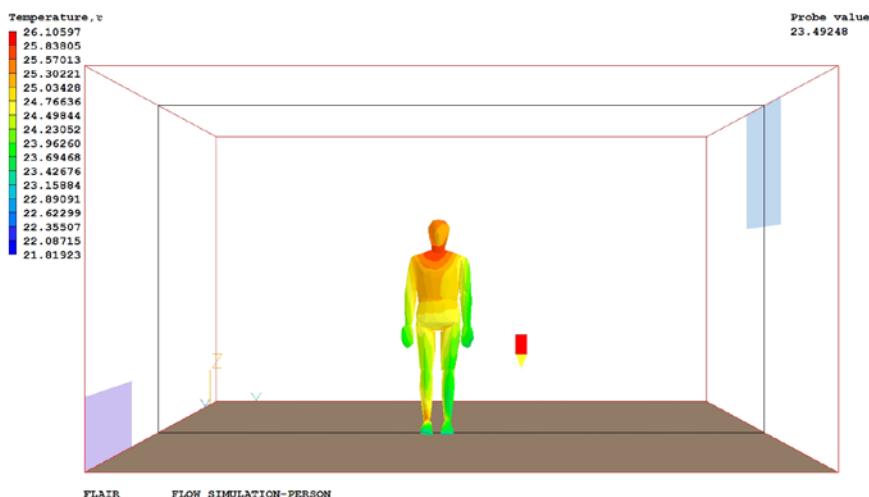


人体代谢释放热量，在身体周边形成上升气流。气流从脚部开始形成，向上速度逐渐增加，在头顶风速最大，模拟显示风速约为 0.20m/s 。在空间的其它位置，靠近回风口的区域初始设定风速为零，环境大气压，温度为 20°C ，风速相对房间内部区域扩大，并沿墙壁向下流动，到人体部位，形成上升气流。

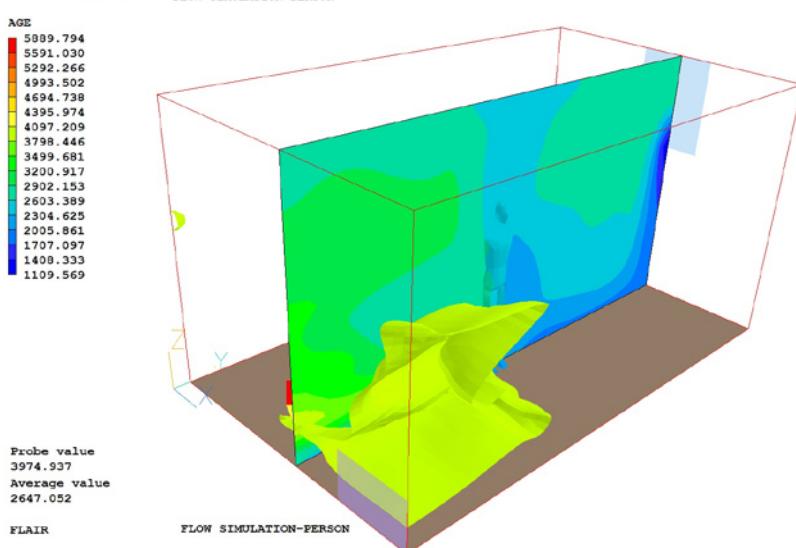
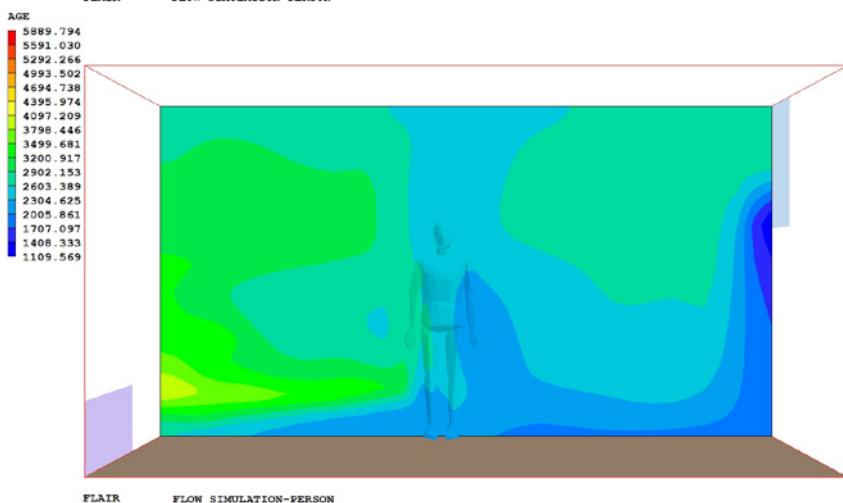
体表面的风速分布，基本规律为顶部大于脚部，靠近回风口一侧小于内侧。



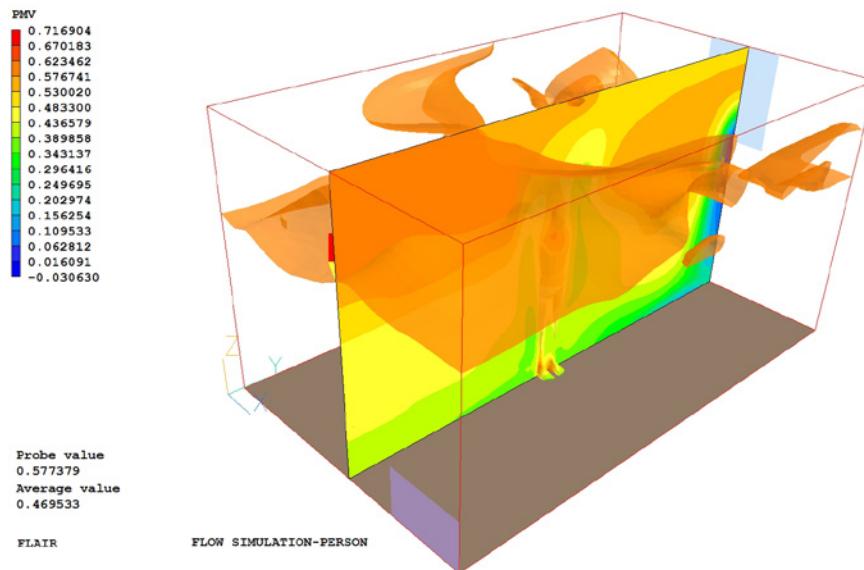
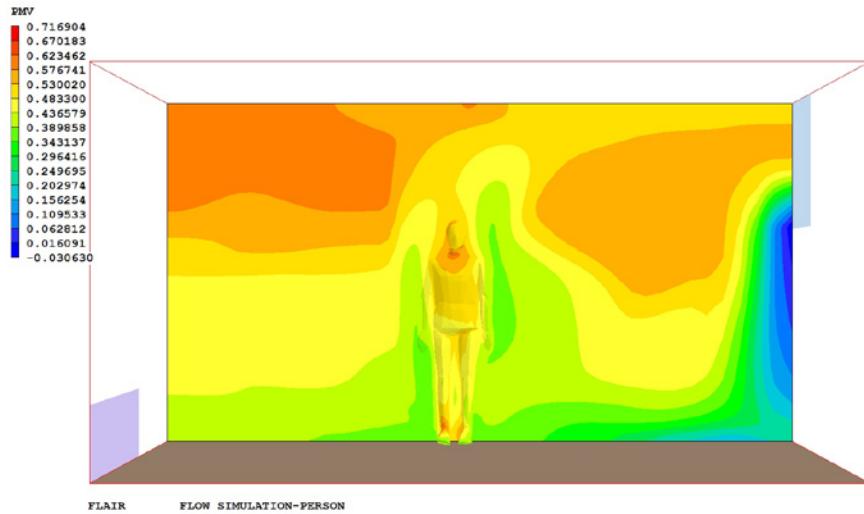
人体热量通过辐射，对流加热周边空气，温度分布基本由脚部向头部逐渐升高。头部区域温度最高约为 25.4°C 。



人体表面的温度分布，基本规律为顶部大于脚部，靠近回风口一侧小于内侧。与风速的分布规律基本一致。



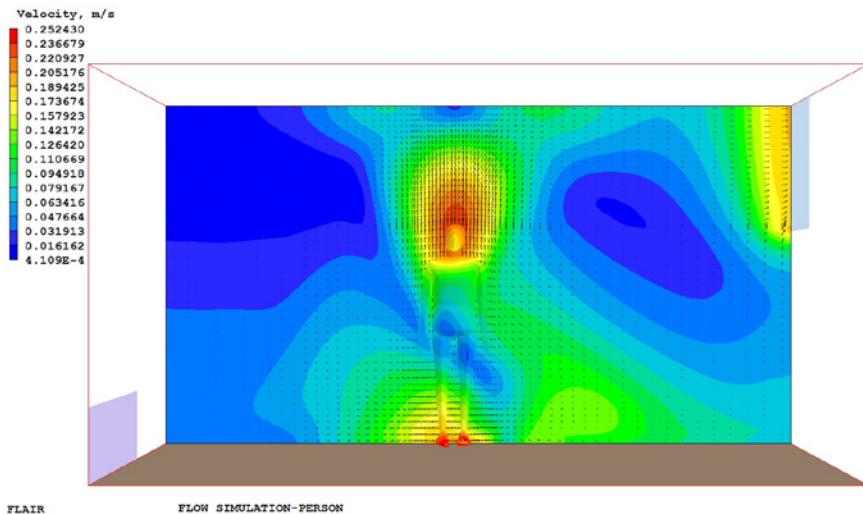
因为设置的初始条件—进风口并没有风速，也没有自然通风，回风口类似与敞开的窗户，但是为静风，因此，空气的流动主要是因为人体作为热源的作用，空气龄最大的区域位于进风口（此时进风口关闭）处，在三维模式下显示了均值为2647.052s的面域。在静风条件下，该区域明显空气龄大，空气流动不畅，空气品质很弱。



温度设置为20°C，相对湿度为50%，基本处于热舒适度合适的状态下，模拟所得到的值也主要在0~0.7之间变化，与初始条件设置的结果吻合。在三维模拟图中，给出了约0.6的值，其高度主要在1.85左右之上，位于人体上方。

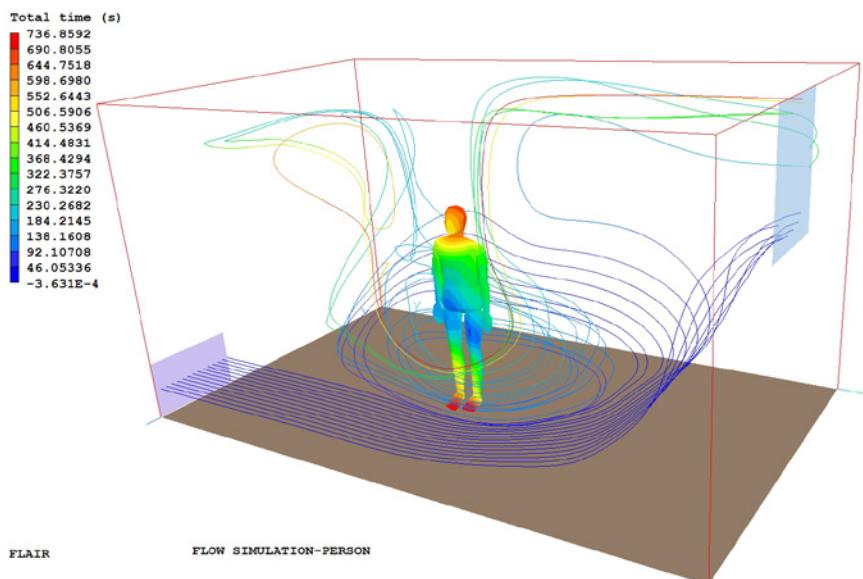
2-送风条件模拟（送风口位于墙壁底部）：

- 送风条件 (Inlet) : 温度20°C; Vol.flow rate 进风量0.2m³/s ; Position;
- 回风口 (Opening) : 温度20°C;

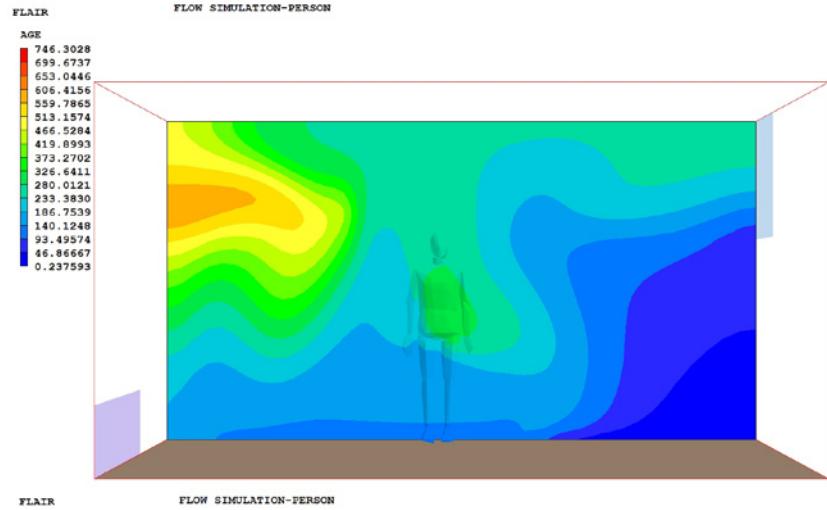
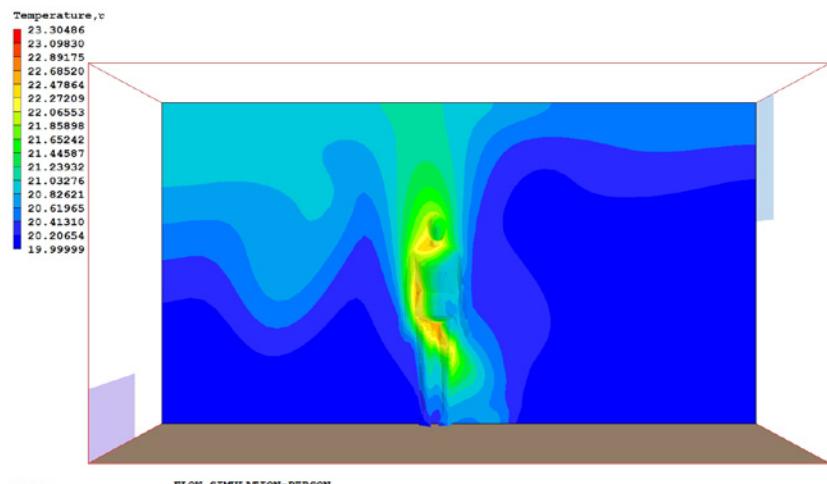


设置进风量之后，风从进风口进入，在人体周边形成与静风模拟类似的上升气流，并从回风口出。在头部上方形成较高的风速约0.23m/s，略高于静风模拟。

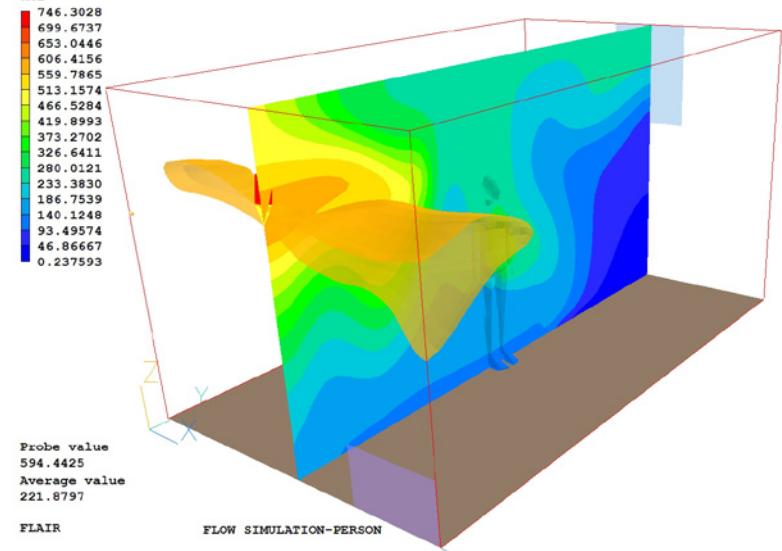
设置Steamline之后，能够在三维空间中清晰的观察到气流流动变化，部分气流沿地表流动后从回风口流出，部分在人体表面形成上升气流，颜色越趋向于暖色，在房间内滞留的时间也就越久，最长耗时时间约为736s。



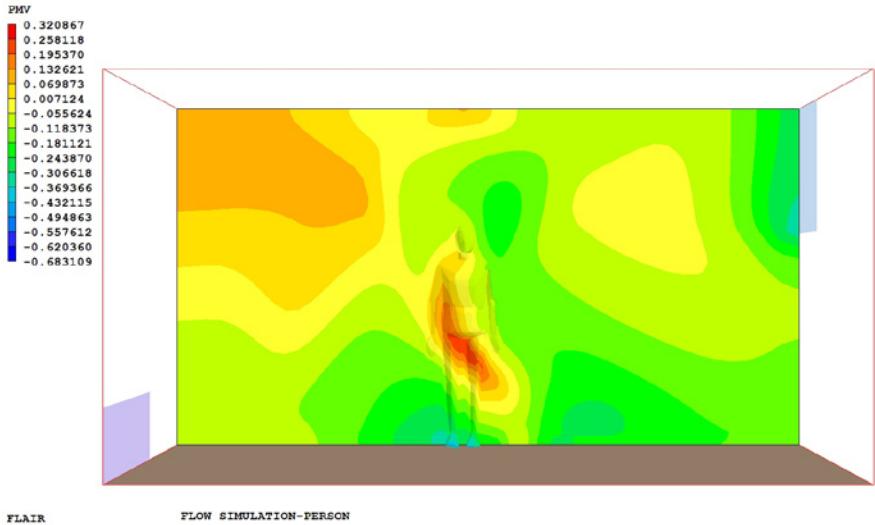
增加进风量之后，因为通风降温的作用，温度与静风比相对小，在头部温度最高约为 22.5°C ，比静风 25.4°C 时低。



增加进风量之后，空气龄明显减少，由最高 5889s 到最高 746s ，空气品质明显得以改善。同时将Probe放置在较高的滞留时间区域内，观察在 594.4425 位置的Iso-Surface等值面，较静风条件下的滞留时间最长等值面要小。



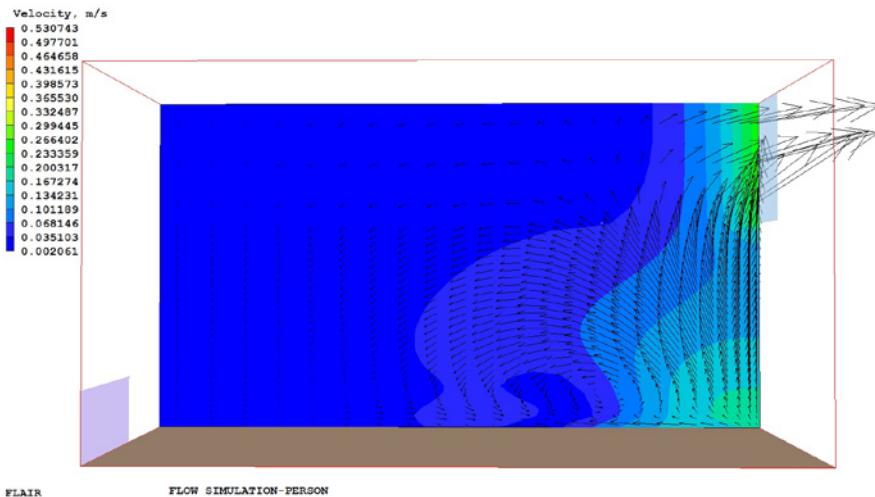
增加进风量之后, PMV值相对静风时向-1方向变化, 即+1 (slightly warm) 、 0 (neutral) 、 -1 (slightly cool) 变化趋势。



3-空屋模式模拟（假定不存在人）：

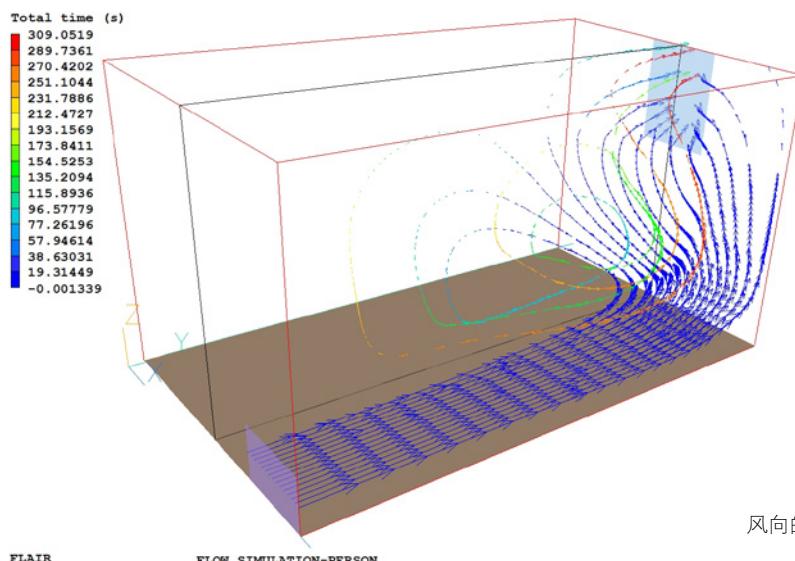
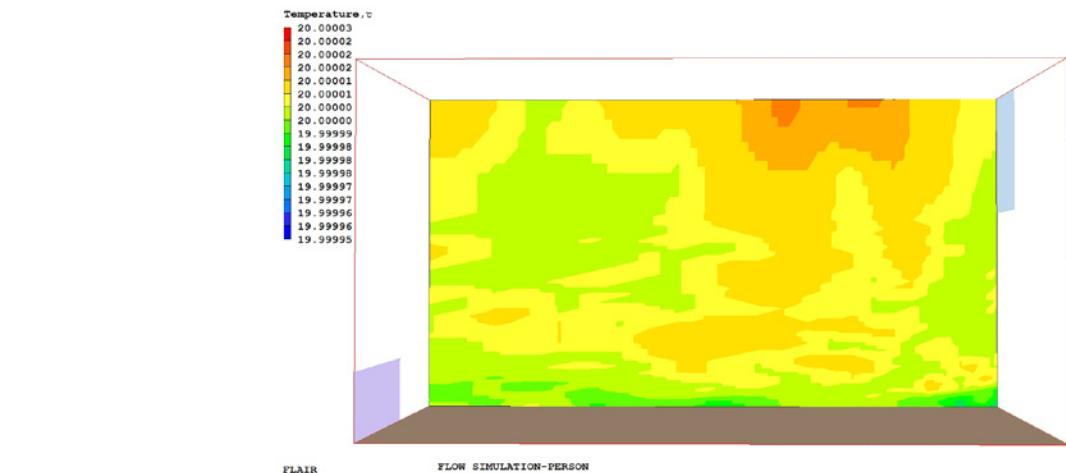
在进行送风条件模拟（送风口位于墙壁顶部）之前, 将人体去除, 模拟空房间的状态, 对比加入人体之后环境的改变:

- 送风条件 (Inlet) : 温度20°C; Vol.flow rate 进风量 $0.2\text{m}^3/\text{s}$; Position;
- 回风口 (Opening) : 温度20°C;

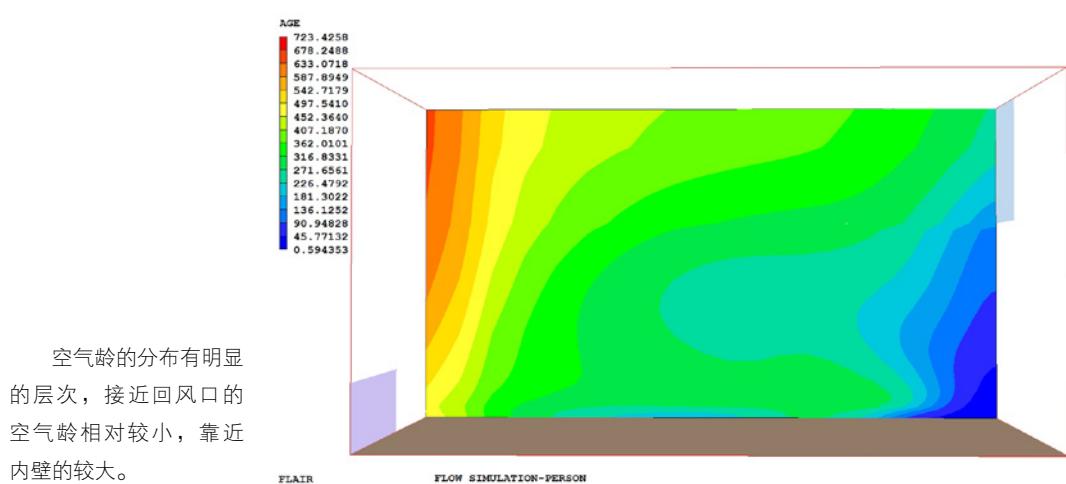


位于同一个X轴截面, 进行比较分析, 风速与风向因为没有人体的影响, 主要受四壁影响发生方向的转变。在虚拟人体的位置竖向截面, 风速较低在 $0.0\text{m}/\text{s}$ ~ $0.1\text{m}/\text{s}$ 之间变化, 与加入人体之后头部风速达到 $0.23\text{m}/\text{s}$ 有显著不同。从而能够确定人体作为热源对居室本身的热环境存在影响。

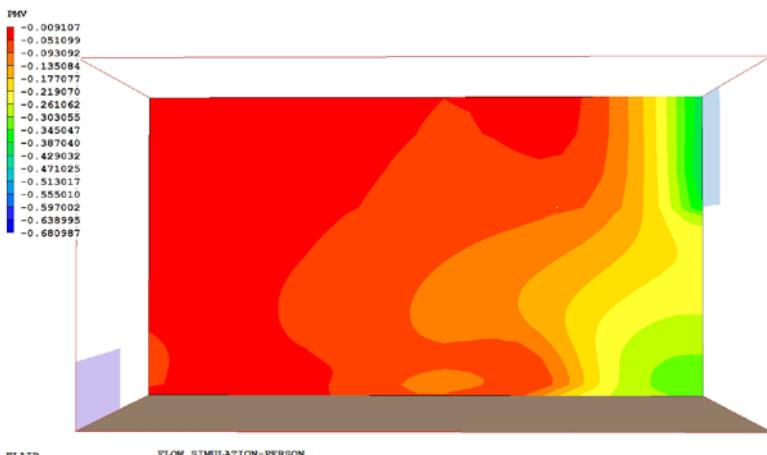
分析截面位置的温度变化很微弱。加入人体热源后, 最高温度有约2~3°C的上升。



风向的变化基本是受到墙壁的影响



空气龄的分布有明显的层次，接近回风口的空气龄相对较小，靠近内壁的较大。

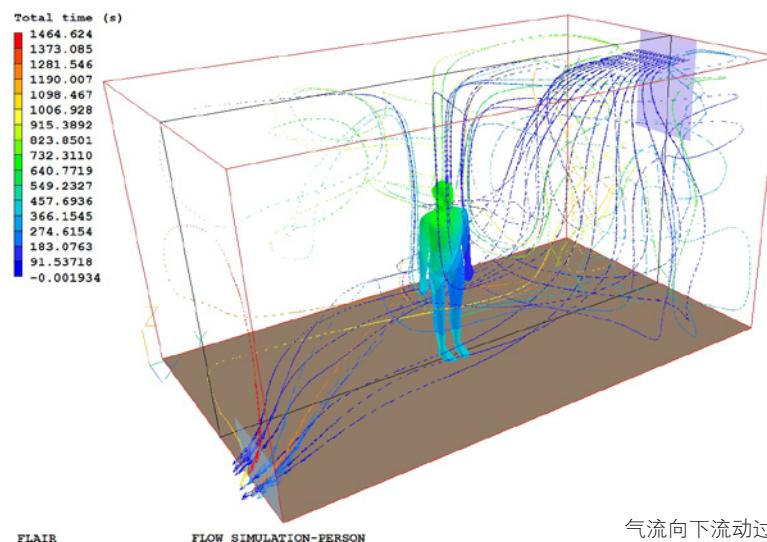
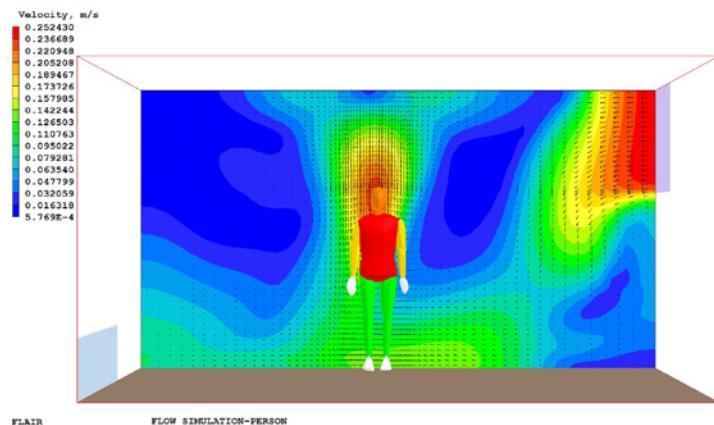


PMV值在人体没有加入前，
成降温趋势。

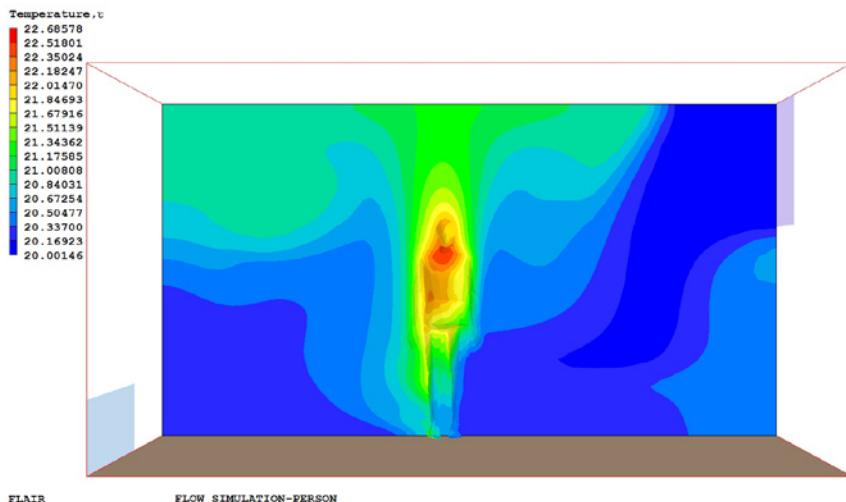
4-送风条件模拟（送风口位于墙壁顶部）：

- 送风条件 (Inlet) : 温度20°C ;
Vol.flow rate 进风量 $0.2\text{m}^3/\text{s}$;
- 回风口 (Opening) : 温度20°C ;

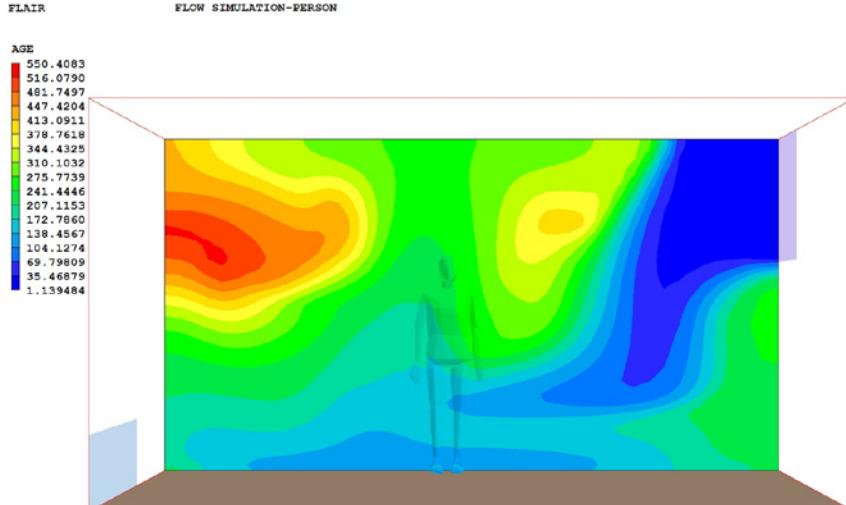
当送风口位于墙壁顶部时，风向首先向下部流动，在人体部位形成与送风口在底部以及静风时类似的上升气流。并在头顶部达到约 0.22m/s 的上升风速，其值大小与底部侧壁送风近似。



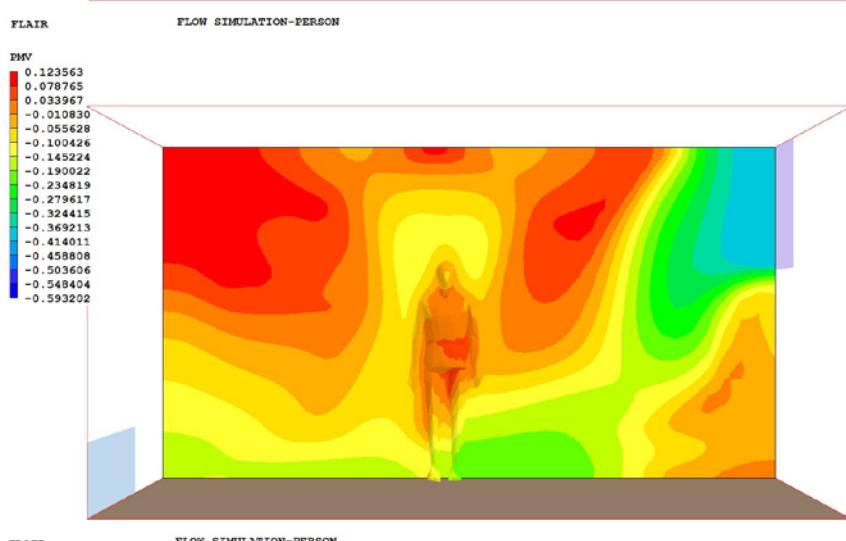
气流向下降过程中，在人体处形成上升气流。



模拟温度变化，显示头部温度约为 22.18°C 与底侧壁风值相当。基本温度分布也是由地板到天花板逐渐升高分层的趋势。但是顶部区域温度值较底侧壁送风值要高。



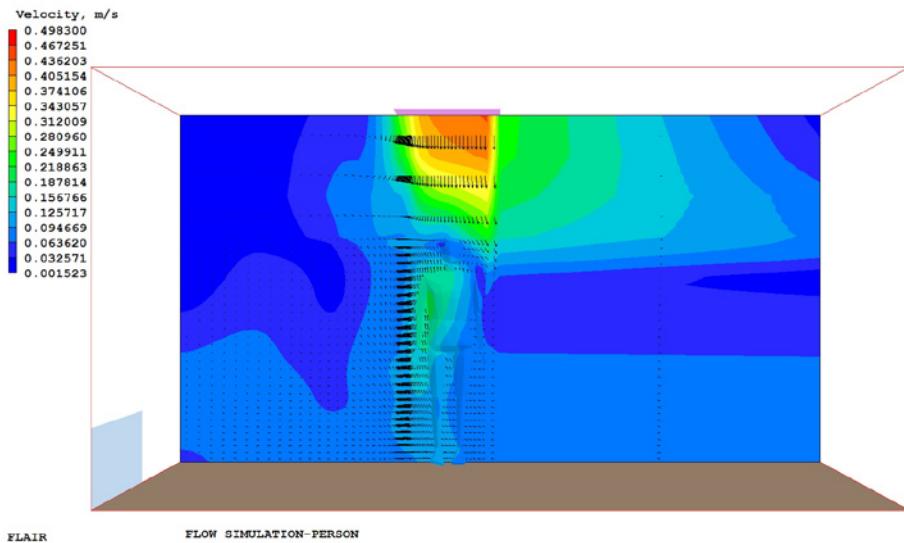
由顶侧壁送风较底侧壁送风，空气龄相对要小。但是空气龄值分布情况基本类似。



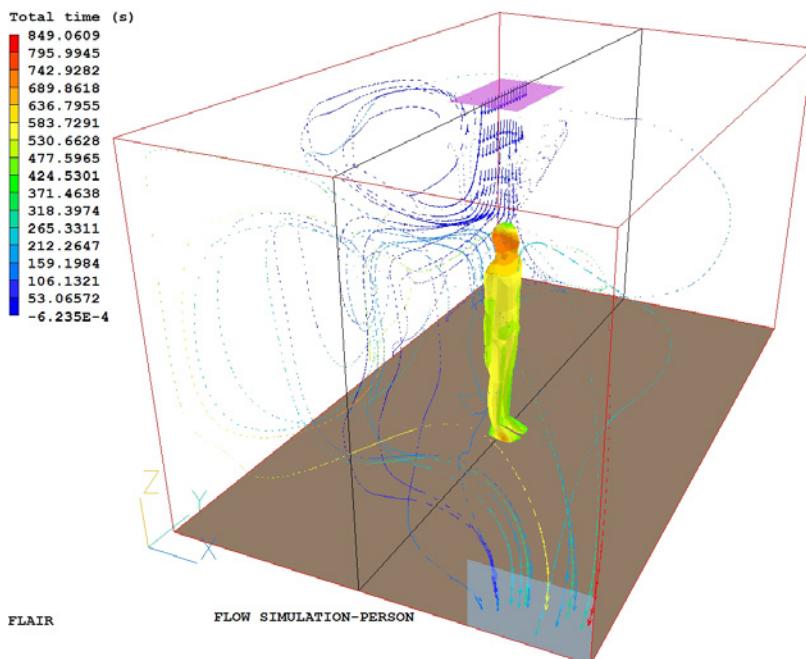
在侧壁上下位置进行模拟，模拟的热环境略有出入。人体作为热源将气流加热，产生向上的运动，如果在设计的时候将进风口设置在天花板位置，模拟后的分析结果会有什么变化，是否与人体热源产生的上升气流相对。进行下面的模拟，比较热环境的变化。

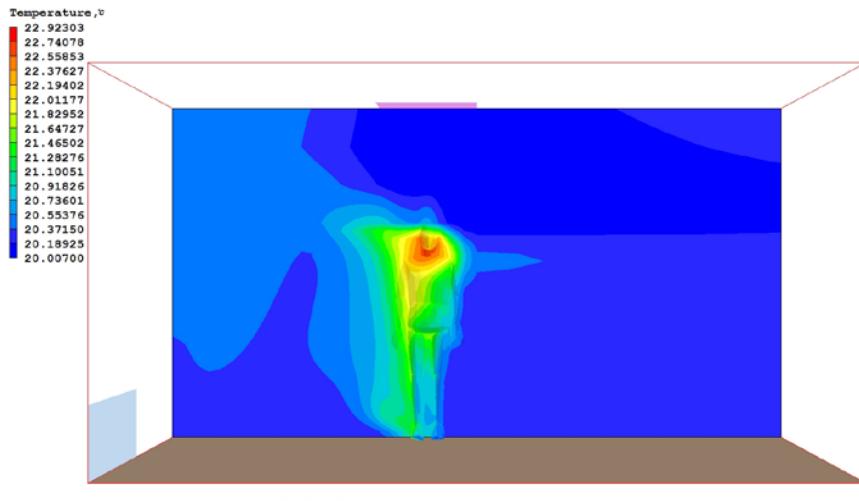
5-送风条件模拟（送风口位于人体上部天花板位置）：

- 送风条件 (Inlet) : 温度20°C; Vol.flow rate 进风量 $0.2\text{m}^3/\text{s}$;
- 回风口 (Opening) : 温度20°C;

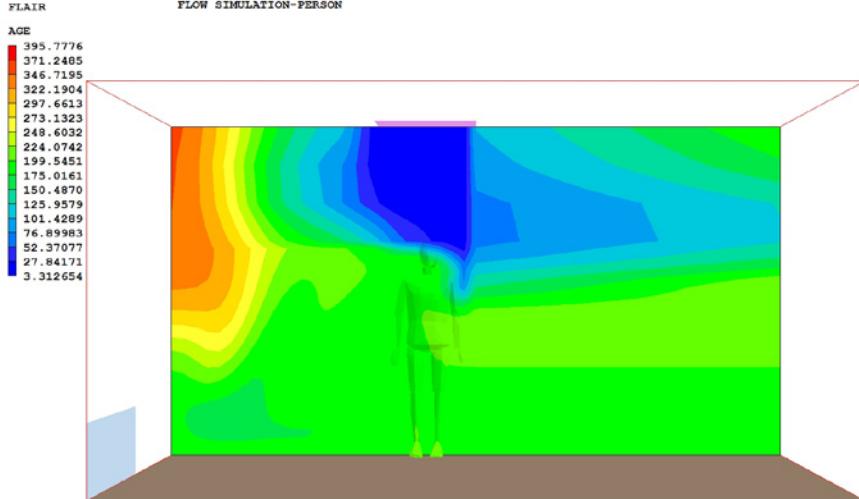


当送风口位于天花板位置时，从顶部吹出的气流和人的头顶相遇后发生分流，在人的肩部再次和人体相遇后发生分流。在靠近人体表面的分流的内侧，可以观察到由人体发热形成的上升气流。

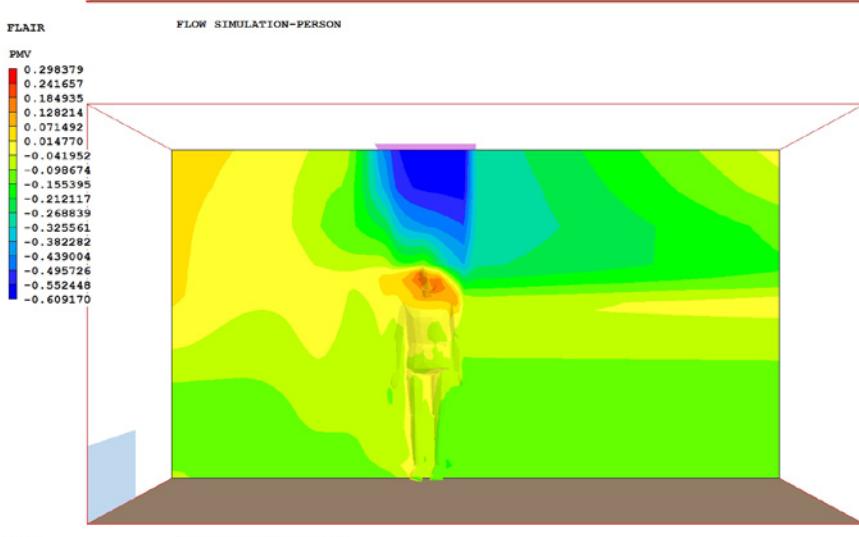




来自顶部的下降气流温度为20°C，完全的压制了静稳环境下人体头部所能看到的上升气流，在头部顶未形成相对高温区，导致人体的散热被转移到身体下部。



空气龄最大值相对偏小，是因为本次模拟过程中，将进风口放置于房间的中部，减少了与出风口间的距离，空气龄相对较大的位置仍旧位于室内侧。



PMV值也在与人体头部相遇时，发生明显的变化，上部靠近进风口出偏冷感，中部区域偏热感。

风环境模拟

关于风:

• 风的定义:

相对于地表面的空气运动，通常指它的水平分量，以风向、风速或风力表示。风向指气流的来向，常按16方位记录。风速是空气在单位时间内移动的水平距离，以米/秒为单位。大气中水平风速一般为1.0~10米/秒，台风、龙卷风有时达到102米/秒。而农田中的风速可以小于0.1米/秒。风速的观测资料有瞬时值和平均值两种，一般使用平均值。风的测量多用电接风向风速计、轻便风速表、达因式风向风速计，以及用于测量农田中微风的热球微风仪等仪器进行；也可根据地面物体征象按风力等级表估计。

• 风的成因:

形成风的直接原因，是气压在水平方向分布的不均匀。风受大气环流、地形、水域等不同因素的综合影响，表现形式多种多样，如季风、地方性的海陆风、山谷风、焚风等。简单地说，风是空气分子的运动。要理解风的成因，先要弄清两个关键的概念：空气和气压。空气的构成包括：氮分子（占空气总体积的78%）、氧分子（约占21%）、水蒸汽和其他微量成分。所有空气分子以很快的速度移动着，彼此之间迅速碰撞，并和地平线上任何物体发生碰撞。

气压可以定义为：在一个给定区域内，空气分子在该区域施加的压力大小。一般而言，在某个区域空气分子存在越多，这个区域的气压就越大。相应来说，风是气压梯度力作用的结果。

而气压的变化，有些是风暴引起的，有些是地表受热不均引起的，有些是在一定的水平区域上，大气分子被迫从气压相对较高的地带流向低气压地带引起的。

大部分显示在气象图上的高压带和低压带，只是形成了伴随我们的温和的微风。而产生微风所需的气压差仅占大气压力本身的1%，许多区域范围内都会发生这种气压变化。相对而言，强风暴的形成源于更大、更集中的气压区域的变化。

• 风的能量:

空气流动所形成的动能即为风能。风能是太阳能的一种转化形式。

太阳的辐射造成地球表面受热不均，引起大气层中压力分布不均的空气沿水平方向运动形成风。风的形成乃是空气流动的结果。风能利用形式主要是将大气运动时所具有的动能转化为其他形式的能。

在赤道和低纬度地区，太阳高度角大，日照时间长，太阳辐射强度强，地面和大气接受的热量多，温度较高；高纬度地区太阳高度角小，日照时间短，地面和大气接受的热量小，温度较低。这种高纬度与低纬度之间的温度差异，形成了南北之间的气压梯度，使空气作水平运动，风应沿水平气压梯度方向吹，即垂直于等压线从高压向低压吹。地球在自转，使空气水平运动发生偏向的力，称为地转偏向力，这种力使北半球气流向右偏转，南半球向左偏转，所以地球大气运动除受气压梯度力外，还要受地转偏向里的影响。大气真实运动是这两力综合影响的结果。

实际上，地面风不仅受这两个力的支配，而且在很大程度上受海洋、地形的影响，山隘和海峡能改变气流运动的方向，还能使风速增大，而丘陵、山地磨擦大使风速减少，孤立山峰却因海拔高使风速增大。因此，风向和风速的时空分布较为复杂。

海陆差异对气流运动的有所影响，在冬季，大陆比海洋冷，大陆气压比海洋高，风从大陆吹向海洋；夏季相反，大陆比海洋热，风从海洋吹向内陆。这种随季节转换的风，称为季风。所谓的海陆风也是，白昼时，大陆上的气流受热膨胀上升至高空流向海洋，到海洋上空冷却下沉，在近地层海洋上的气流吹向大陆，补偿大陆的上升气流，低层风从海洋吹向大陆称为海风，夜间（冬季）时，情况相反，低层风从大陆吹向海洋，称为陆风。在山区由于热力原因引起的白天由谷地吹向平原或山坡，夜间由平原或山坡吹向谷地，前者称谷风，后者称为山风。这是由于白天山坡受热快，温度高于山谷上方同高度的空气温度，坡地上的暖空气从山坡流向谷地上方，谷地的

空气则沿着山坡向上补充流失的空气，这时由山谷吹向山坡的风，称为谷风。夜间，山坡因辐射冷却，其降温速度比同高度的空气快，冷空气沿坡地向下流入山谷，称为山风。

(当太阳辐射能穿越地球大气层时，大气层约吸收 $2 \times 10^{16} \text{W}$ 的能量，其中一小部分转变成空气的动能。因为热带比极带吸收较多的太阳辐射能，产生大气压力差导致空气流动而产生“风”。至于局部地区，例如，在高山和深谷，在白天，高山顶上空气受到阳光加热而上升，深谷中冷空气取而代之，因此，风由深谷吹向高山；夜晚，高山上空气散热较快，于是风由高山吹向深谷。另一例子，如在沿海地区，白天由于陆地与海洋的温度差较大，而形成海风吹向陆地；反之，晚上陆风吹向海洋。)

• 风的分类：

根据风对地上物体所引起的现象将风的大小分为13个等级，称为风力等级，以0~12等级数字记载。

风力等级表：

风级和符号	名称	风速(米)	陆地景象	海面波浪	浪高(米)
0	无风	0.0~0.2	烟直上	平静	0.0
1	软风	0.3~1.5	烟示风向	微波峰无飞沫	0.1
2	轻风	1.6~3.3	感觉有风	小波峰未破碎	0.2
3	微风	3.4~5.4	旌旗展开	小波峰顶破裂	0.6
4	和风	5.5~7.9	吹起尘土	小浪白沫波峰	1.0
5	劲风	8.0~10.7	小树摇摆	中浪折沫峰群	2.0
6	强风	10.8~13.8	电线有声	大浪到个飞沫	3.0
7	疾风	13.9~17.1	步行困难	破峰白沫成条	4.0
8	大风	17.2~20.7	折毁树枝	浪长高有浪花	5.5
9	烈风	20.8~24.4	小损房屋	浪峰倒卷	7.0
10	狂风	24.5~28.4	拔起树木	海浪翻滚咆哮	9.0
11	暴风	28.5~32.6	损毁普遍	波峰全呈飞沫	11.5
12	飓风	32.7+	摧毁巨大	海浪滔天	14.0

注：本表所列风速是指平地上离地10米处的风速值。

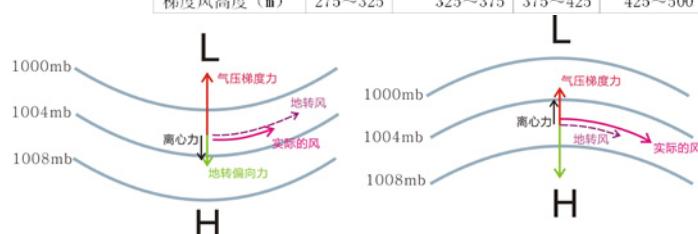
• 梯度风：

自由大气中，当空气作曲线运动时，水平气压梯度力、地转偏向力、惯性离心力三个力达到平衡时的空气水平运动，称为梯度风。

在北半球，高压内 G （气压梯度力）+ C （惯性离心力）= A （地转偏向力），即空气质点绕中心作顺时针旋转运动，在低压内 $A+C=G$ ，即空气绕低压中心作逆时针旋转运动，这就是梯度风原理。

梯度风高度：由于受到地表摩擦的作用，接近地表的风速随着离地面距离的减小而降低。只有离地面300~500米以上的地方，风才不受地表的影响，能够在气压梯度的作用下自由流动，达到所谓梯度速度，而将出现这种速度的高度称之为梯度风高度。

地貌	海面	空旷平坦地面	城市	大城市中心
梯度风高度(米)	275~325	325~375	375~425	425~500



Wind 与 Wind Profile对象:

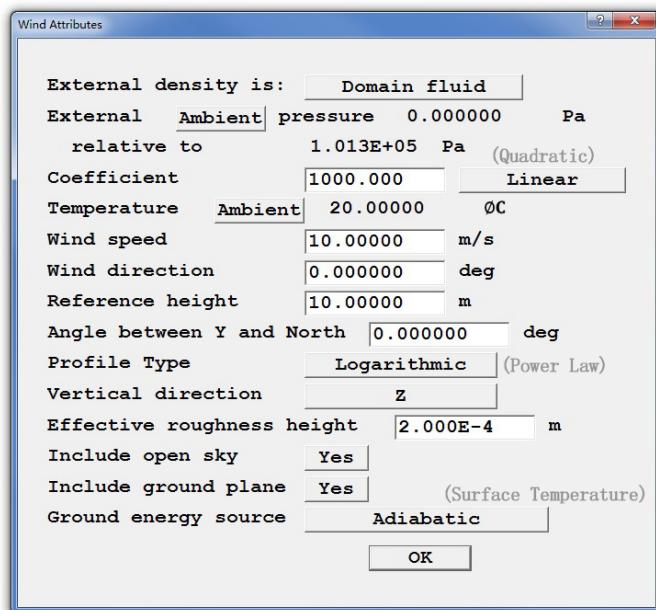
Wind对象:

Wind风对象通常在区域边界指定大气边界层截面，给出盛行风向和风速。

风模块包含几个功能选项：

- 1.在区域的上风向，设置风截面；
- 2.在区域的下风向设置出口；
- 3.在区域顶部天空边界可选择设置出口；

Wind对象，与Wind-profile对象非常相似。只是Wind对象只可以设置一个风的对象，充满整个模拟区域。在区域的边界使用对数或者幂算法设置上风面，在下风面设置固定的压力边界。另外，在上部，天空边界也能够设置固定压力边界，在地面设置适当的摩擦条件。



FLAIR: Obj→Object→New→New Object→Type/Wind→Attributes

参数说明：

External density: 外部密度用于计算质量流入，通常与域材料密度一致，或者设置为用户指定的值。如果域的密度是压力（或者温度）的函数，外部压力与外部密度可以用来评估该函数；

External pressure: 外部压力，该选项用于设置域外部的压力，用于所有的面域。并可以用于计算进口密度。外部压力一般被设置为相对固定的参考压力，参考压力的设置可以在主菜单属性面板中完成。当设置为环境值时，外部压力采取主菜单设置的值；为用户设定值时，由用户设定输入的值；

Coefficient: 系数，该选项用于控制在上边界天空激活的条件下，使下游边界内部压力接近设定的外部压力。当设定为线性Linear时，通过压力边界的质量流入是一个压力差的线性函数，被指定一个相当大的值1000用于保持内部压力与外部压力相接近，来控制任何边界内部的压力梯度。当设置为二次方Quadratic时，系数表示为跨边界动力头的损失，质量流入与压力差的平方根成正比。一个小的值可以减小压力的损失。

Temperature: 温度，用于设置外部域环境温度，该值被指定为作用于所有面的同一值，并且可以用于计算流入密度，当设置为环境时，外部温度采取主菜单属性里设置的值。为用户指定时，用户可以输入值；

Wind speed: 设置风速;

Wind direction: 设置风向;

Reference height: 设置风速的参考高度;

Angle between Y (or X or Z) axis and North: 垂直角度用于设置风向在铅锤面上的旋转幅度，可以使风向上或向下方向变动;

Profile type: 截面类型，边界层速度界面可以设置为高于地面的对数或者幂律函数;

Vertical direction: 用于控制垂直轴向;

Effective roughness height: 有效粗糙高度，该选项用于设置域边界粗糙高度。Wind profile中给出了典型值，可以选择适当的值用于控制地面（或表面）的复杂程度。一般设置对象与地面相同的粗糙高度值是可取的;

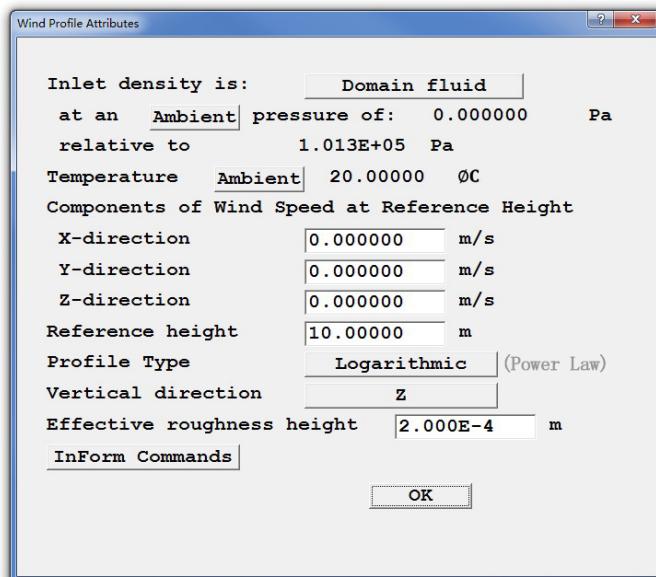
Include open sky: 包括开敞天空。当设置为NO时，顶部边界作为没有摩擦不可渗透的盖子。当设置为Yes时，顶部边界作为固定的压力边界。外部压力，压力系数和温度与下风向的边界一致。用高于地面一定高度边界层公式计算自由流体的速度和湍流强度;

Ground energy source: 地面热能来源，当包含地面时，地表面可以被设置为绝缘或者固定的表面温度。这个温度可以设定为与流入面相同的温度。如果需要其他的热条件，地面选项应该关闭，用Plate对象替代;

Radiative Heat Loss: 如果immersol辐射模型激活，域边界可以改变为周边辐射加热。如果外部相对辐射链接设置为yes，可以设置周围环境温度;

Wind Profile:

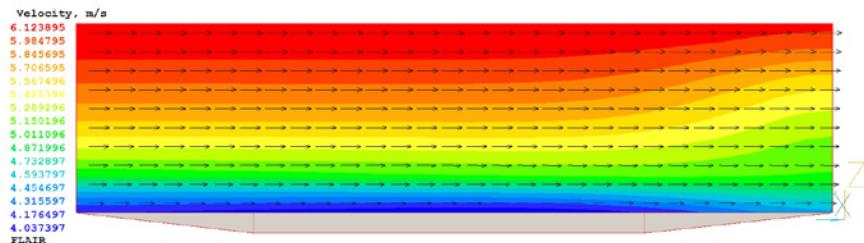
Wind Profile 对象参数与Wind对象参数基本一致。



典型地面粗糙高度值的参考:

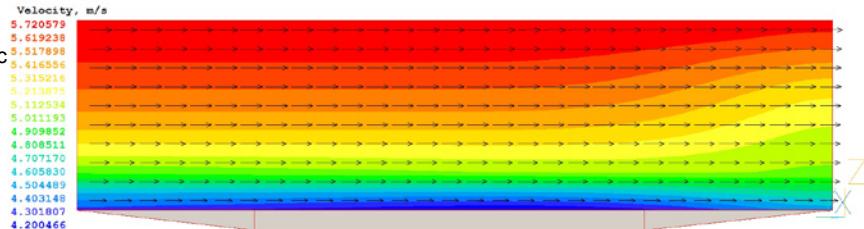
Surface type 表面类型	Roughness height z_0 (m) 粗糙高度	Power-law exponent α 幂指数
Open flat terrain, grass, few isolated obstacles 开敞的平坦区域，草地，基本没有障碍	0.03	0.13
Open sea 开敞海面	0.0002	0.16
Low crops, occasional large obstacles 低矮的作物，偶然会有大的障碍物	0.1	0.16
High crops, scattered obstacles 较高的作物，分散的障碍物	0.25	0.19
Parkland, bushes, numerous obstacles 公园用地，灌木丛，很多障碍物	0.5	0.21
Suburb, forest, regular large obstacle coverage 城郊，森林，均匀较大的障碍物覆盖	0.50 to 1.0	0.21 to 0.24

原始条件模拟



变化条件:

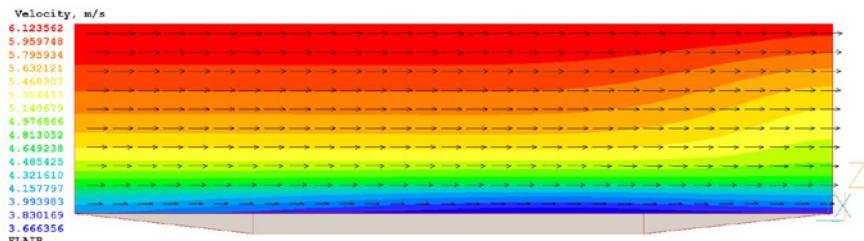
Profile Type: Logarithmic



在其它条件不变的条件下，采取Logarithmic与Power law (0.13) 不同的计算方法模拟结果趋势一致，但略有偏差。在Logarithmic中不提供Power law计算所要输入的power law index值，power law index影响模拟结果。

变化条件:

改变地面环境



Effective roughness height: 0.03m

Power Law index 0.13(Open flat terrain, grass, few isolated obstacles)

在改变了地面条件之后，由粗糙度较大的郊区、森林覆盖到开场草地、基本没有障碍物遮挡的区域。明显可以看到模拟结果的差异，地面速度由1.94m/s提升到4.04m/s,而高空区域的速度有所下降。

基于Wind 对象空模型的风环境模拟:

基本模型:

域的尺度: 200m × 200m × 50m

External ambient pressure (Pa): 101325.0

Coefficient: 1000 Linear

Temperature: 20°C

Wind speed: 5.0m/s

Wind direction: 0 °

Reference height: 10m

Profile Type: Power Law

Power Law index 0.24

Vertical direction: z

Effective roughness height: 1.0m (Suburb, forest, regular large obstacle coverage)

Include open sky: yes

Include ground plane: yes

Ground energy source: adiabatic

Ground:Plate: Roughness:1.0m

Wall function law:Fully rough

Energy source:Adiabatic

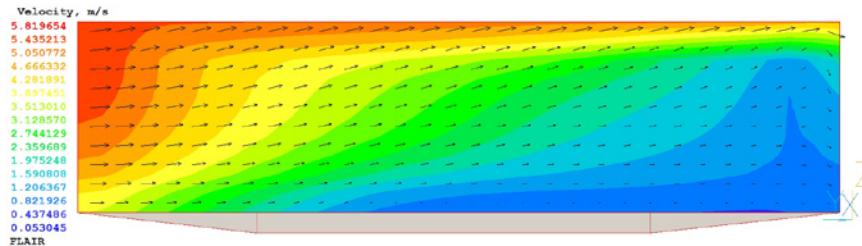
Turbulence models: kemodel

Mesh: 30 × 30 × 10

变化条件:**观察系数变化影响**

Coefficient:

1000 Quadratic

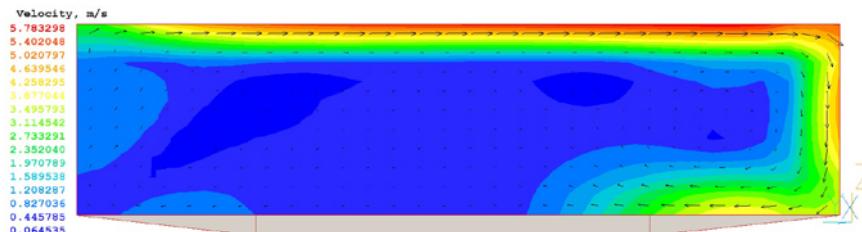


采用同样值, quadratic方法, 模拟结果与Linear趋势一致, 但值有偏差。

变化条件:**观察系数变化影响**

Coefficient:

0 Linear

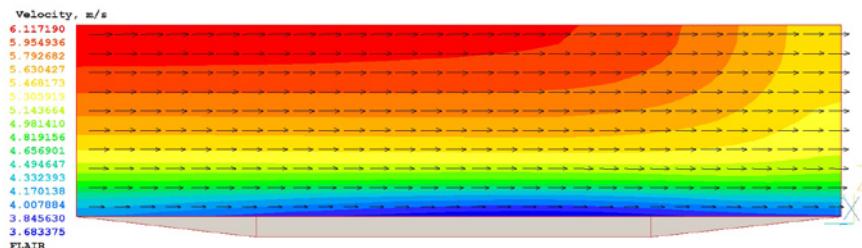


内部压力与外部压力较大的差值, 使得天空上部产生较高流速。

变化条件:

Include open sky:

No



当设置为NO时, 顶部边界作为没有摩擦不可渗透的盖子。

建筑外风环境模拟External Flows:

建筑外风环境的模拟, 建筑通风、换气、污染物的扩散等问题, 以及作用于建筑物的风荷载, 构造物的风震动等与建筑结构相关的问题。可以首先借助CFD模拟, 快速的分析建筑外风环境, 确定风环境与建筑问题, 改善设计。

流场中建筑物前面的冲击, 构成的淤塞处, 屋顶面的剥离与再附着, 尾流中的循环用于自层断面等各种流体特征同时存在, 形成复杂的湍流流场。

风作用的范围较大, 因此建议设置Wind对象区域的时候, 域高度为建筑高度的3倍, 来流方向为建筑物该方向尺度的3倍, 出流方向为建筑物该方向尺度的10倍, 计算区域宽度为建筑物该方向尺度的6倍。

基本模型:

域的尺度: 420m × 180m × 90m

Reference height: 10m

External ambient pressure (Pa): 101325.0

Profile Type: Power Law

Coefficient: 1000 Linear

Power Law index 0.13

Temperature: 20°C

Vertical direction: z

Wind speed: 5.0m/s

Effective roughness height: 0.03m (Open flat

Wind direction: 180 °

terrain, grass, few isolated obstacles)

Include open sky: yes

Include ground plane: yes

Ground energy source: adiabatic

Turbulence models: kemode1

虚拟建筑: 30×30×30 Blockage

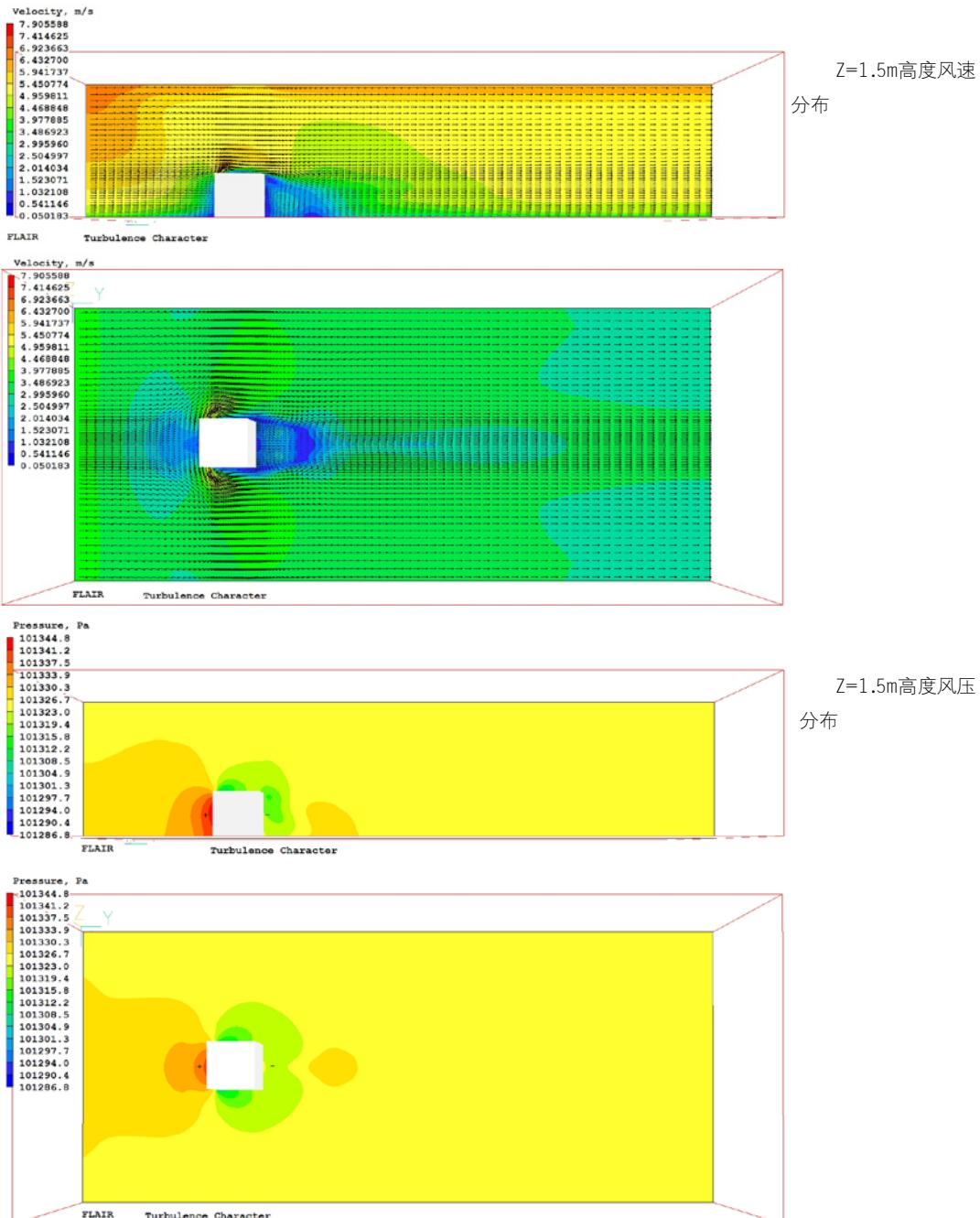
Ground:Plate:

Roughness:0.03m

Wall function law:Fully rough

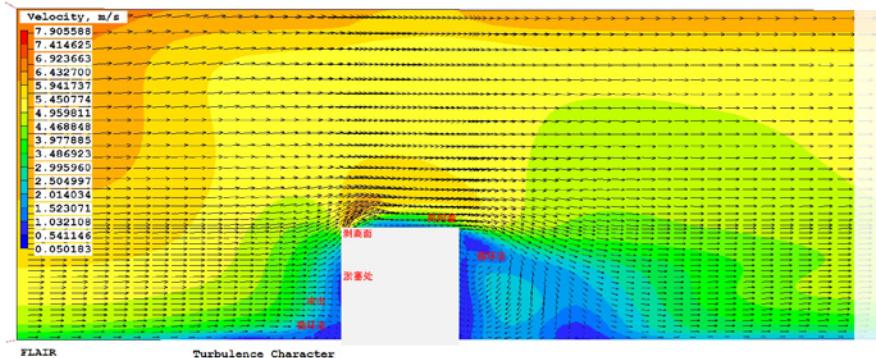
Energy source:Adabatic

Mesh: 在建筑周边网格加密



高气压区和低气压区：

风在建筑迎风面处，挤压形成正压区（+），在背风面，空气被吸走形成负压区（-），房屋的两侧也往往会产生负压区。这些风压会随着风的流动时刻变化。对于建筑外环境的模拟，能够与建筑设计结合，设计房屋内部气流流动状态。

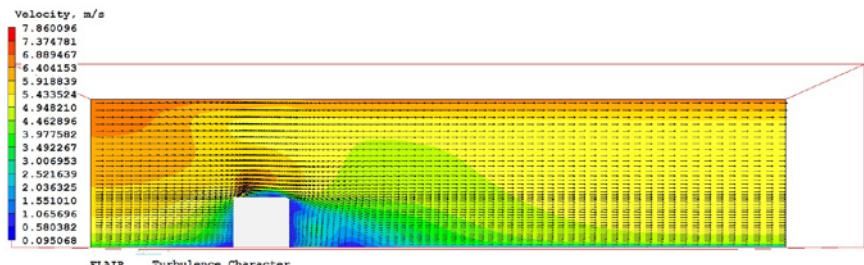


上述模拟采用了Turbulence models: kemodel 模型，Phoenics提供了几种湍流模型，在这里同时以同一条件，采用其他湍流模型进行模拟，对比模拟结果的变化。

变化条件：

Turbulence models:

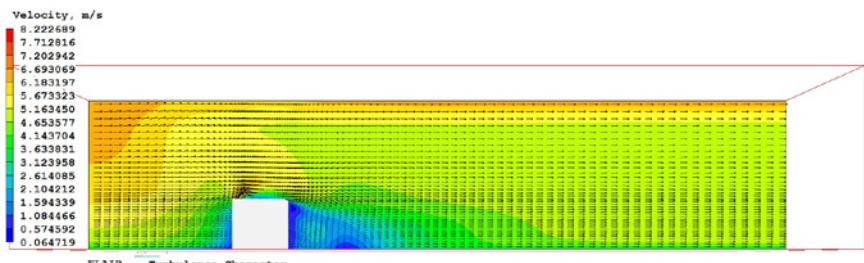
LVEL



变化条件：

Turbulence models:

KOMODL

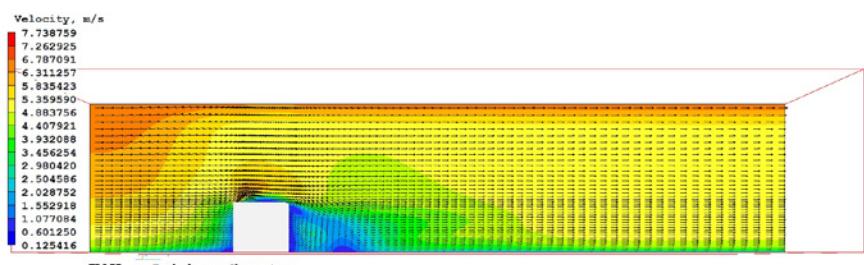


变化条件：

Turbulence models:

KE VARIANTS-

KECHEN



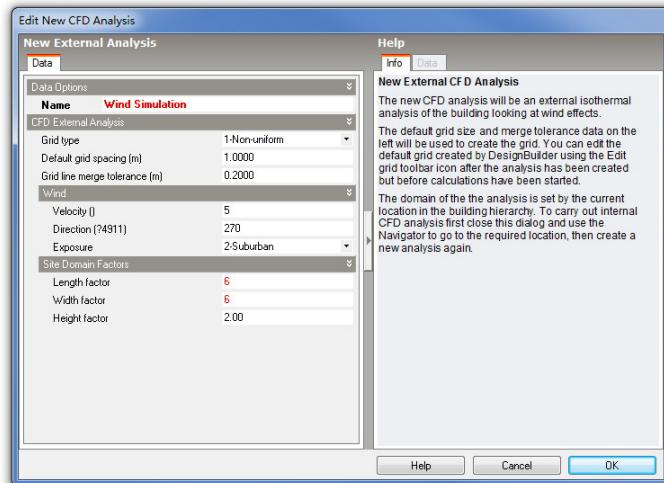
采用不同湍流模型，比较风速的分布，各湍流模型模拟的结果基本一致，但是在屋顶剥离处以及回流可以看出分布的差异，流速也存在基本的不同。

Design Builder中CFD模拟:

Design Builder中也有CFD模拟，只是设置的选项相对Phoenics较少，利用DB (Design Builder) 设定基本相同的条件进行模拟，模拟、计算时间较长。

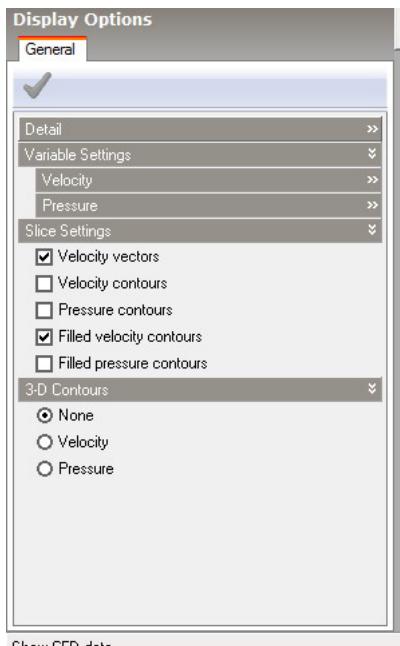
模拟条件：

Component Block: $30 \times 30 \times 30$



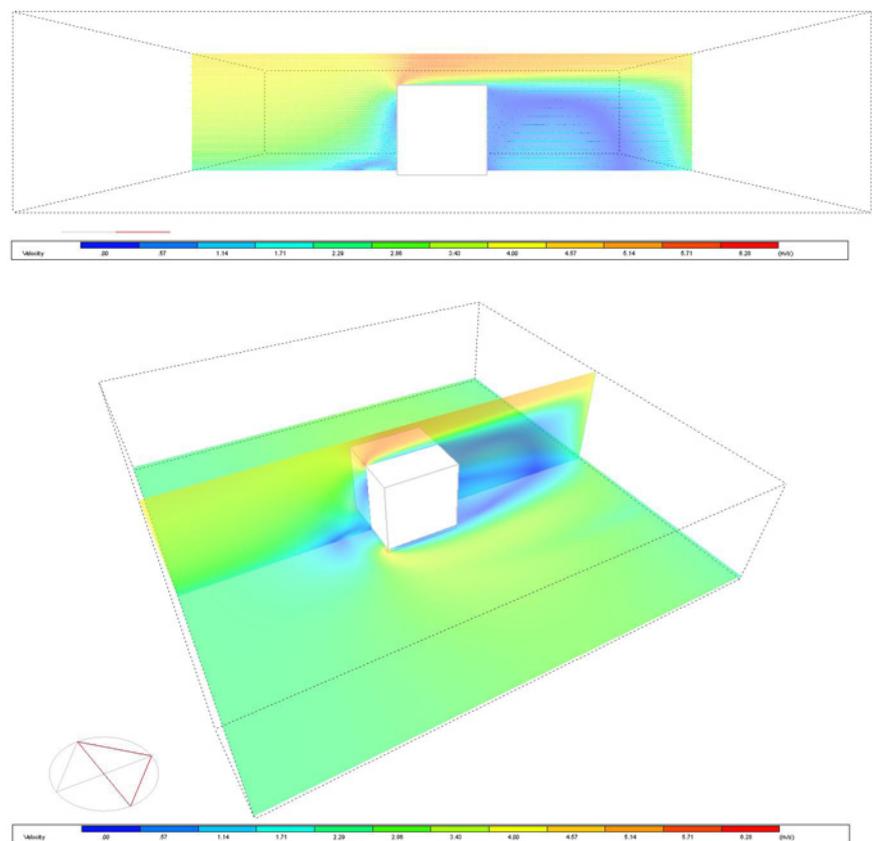
目前版本Version 2.2.5.004 Design Builder 在CFD模块模拟的设置上较专业的Phoenics，Airpak相对要简单。但是在设计前做风环境趋势的预测，能够起到协助的作用，同时可以进行热湿环境模拟。

关于Desing Builder 中CFD的模拟可以参考Design Builder Help文件Creating a New CFD External Analysis.另外其官方网站<http://www.designbuilder.co.uk/content/view/105/161/>可以下载非常详细的教学视频。

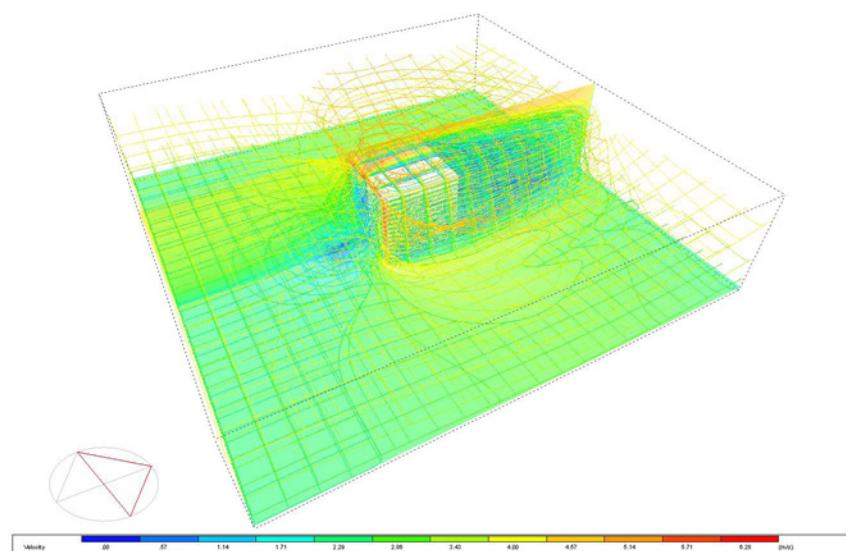


在Energy plus 的Design Builder中CFD显示选项里，可以选择速度和压力分布选项，并设置分析结果显示选项。

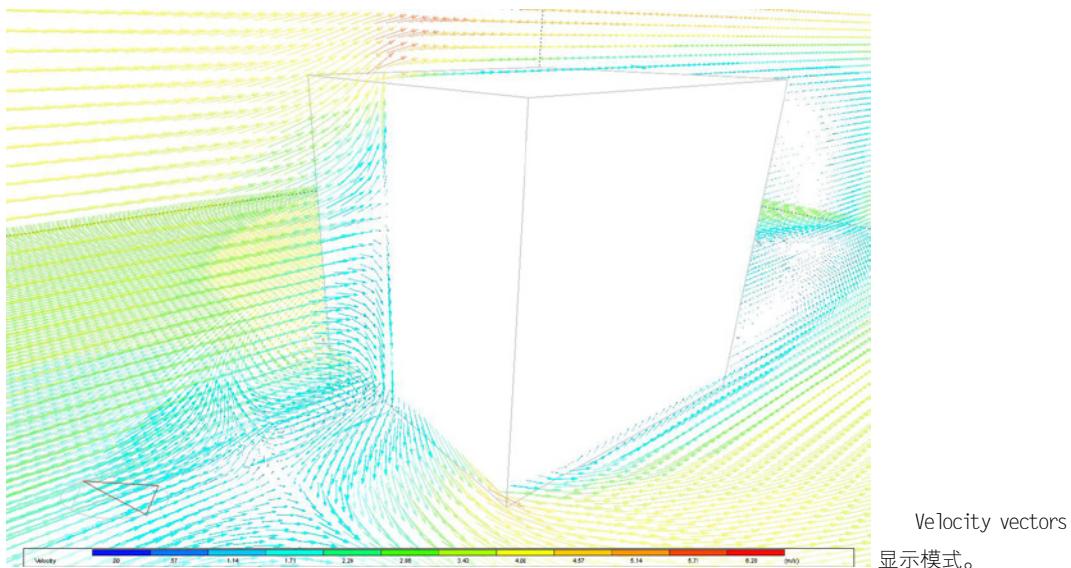
竖向风速分布模拟结果



可以设置多个风速截面，便于观察，上图为Filled velocity vectors模式。

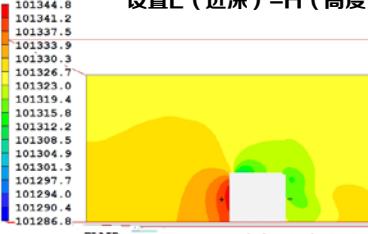


3-D Contours Velocity显示方式，可以明确的观察到流体的特征变化。



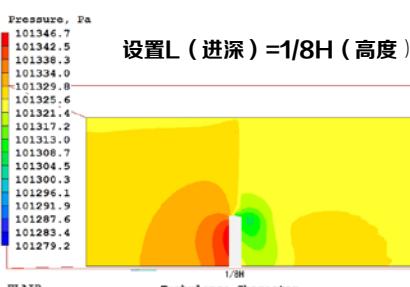
建筑物进深与建筑前后压强差变化模拟分析:

设置 L (进深) = H (高度)

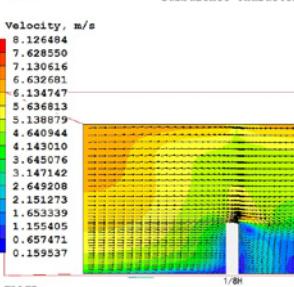


建筑前后压力差 $\Delta P \approx 29.0 \text{ Pa}$

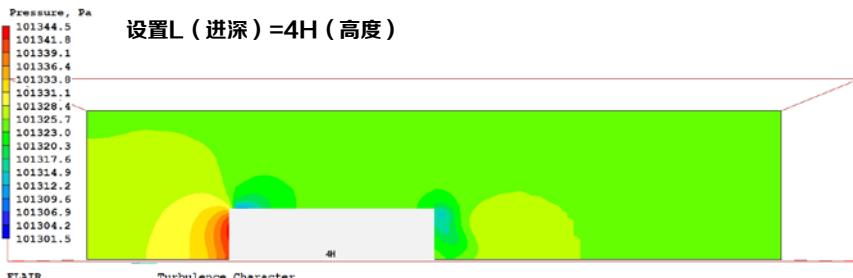
设置 L (进深) = $1/8H$ (高度)



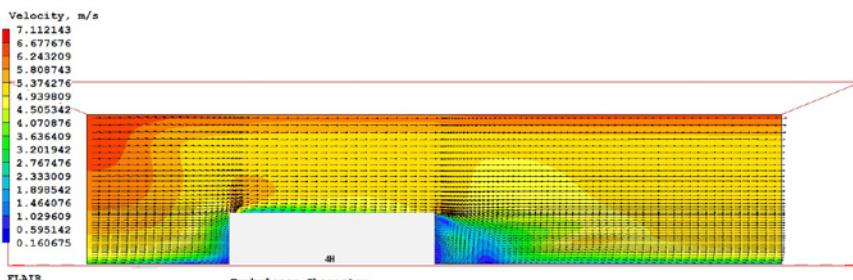
建筑前后压力差 $\Delta P \approx 33.1 \text{ Pa}$, 压力有所增加。



在建筑进深减小之后，建筑后漩涡区域相对长度增加。压力差增加，利于建筑内部的通风设计。



建筑前后压力差
 $P \approx 24.2\text{Pa}$, 压力差
有所减少。

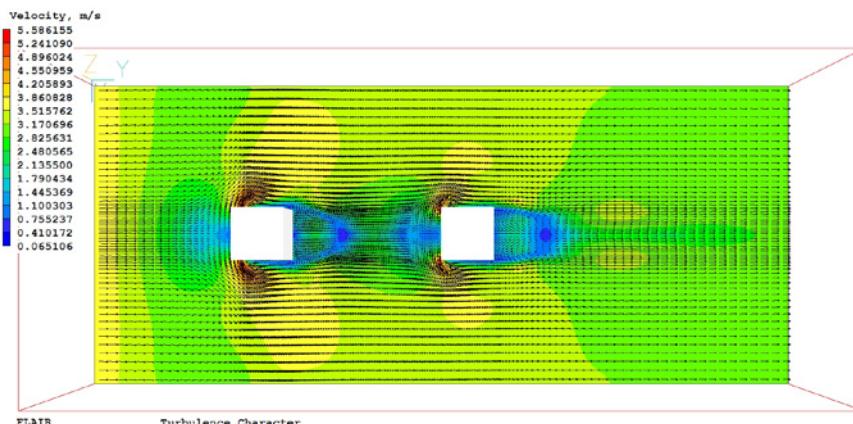
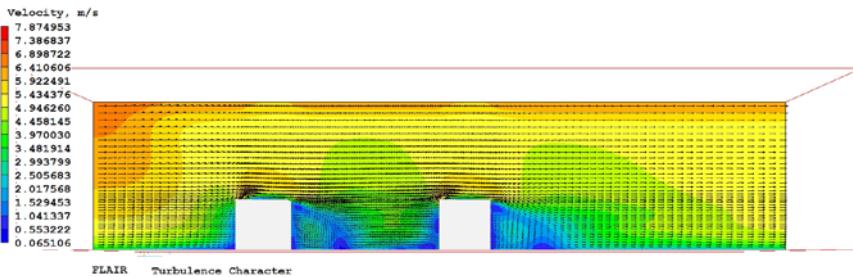


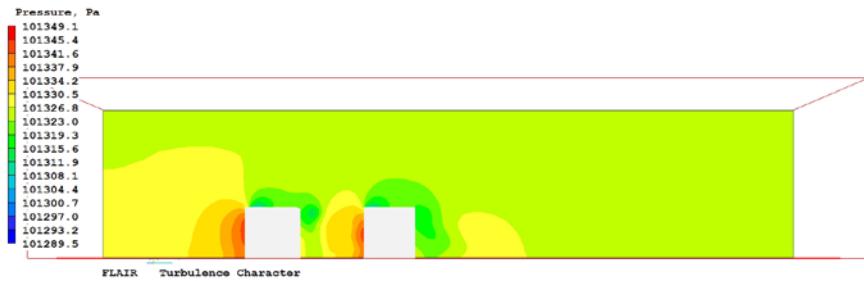
在建筑进深增
加之后，建筑后漩
涡区域相对长度减
少。压力差减小，
不利于建筑的通风
设计。

建筑间风的流动干扰：

独立的紊流（湍流）

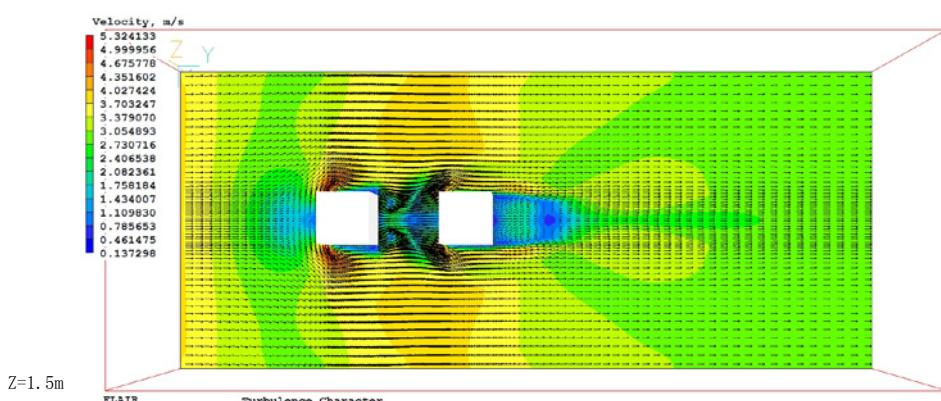
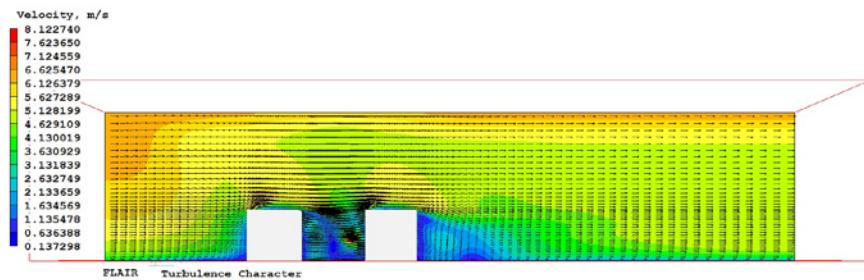
在建筑布局的过程中，对迎风向的建筑进行模拟，能够获得建筑后循环流区域（涡流）范围，从而避免迎风建筑对后方建筑通风的不良影响，



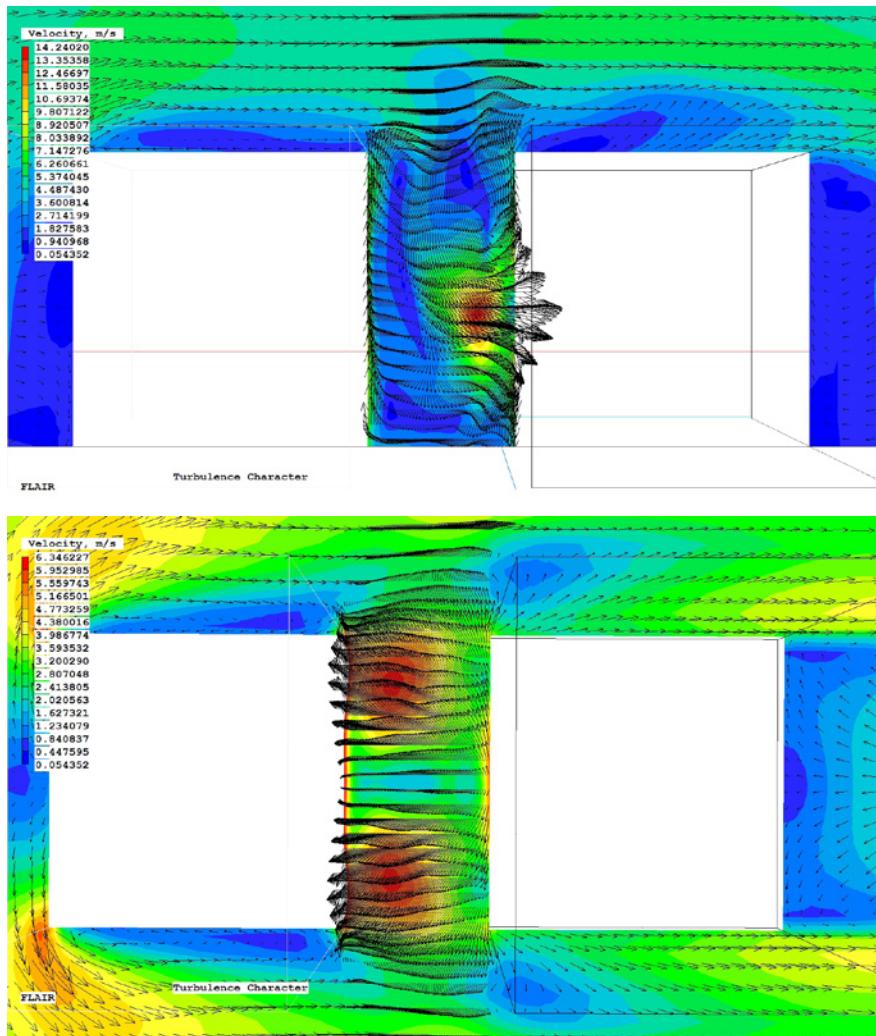


尾流干扰风

后排建筑接近迎风建筑，比产生向上和向下涡流所需总的间隔小，迎风建筑的涡流与后排建筑相干扰，形成尾流干扰式风。



将后排建筑与迎风建筑的间距进一步拉近，观察涡流的变化。拉近的建筑间，产生了较大的局部风速变化，高达14.5m/s。在风速变化上，对后排建筑有较大的影响。



建筑风环境模拟-1:

气象数据:

该区域气象数据选用美国能源部网站以及《中国建筑热环境分析专用气象数据集》提供的中国河北乐亭的气象数据；

使用FLAIR模块模拟建筑外风环境，一般需要设置的气象数据包括大气压力，计算温度、风速、风向等；

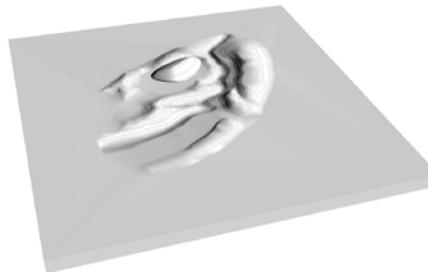
模型构建:

在RHINO中构建基本的建筑几何体与地形，模型应以实体的方式表示，并需要检查几何体的法线方向，应一致向外，地形的构建可以使用RHINO的插件Rhino Terrain建立。

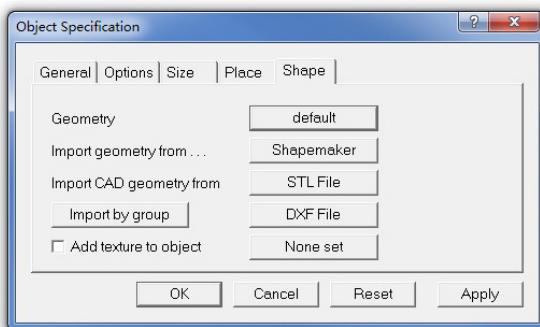
气象数据:

设计用室外气象参数		
	省份	河北
	站名	乐亭
	单位	
采暖室外计算温度	-9.9	℃
设计计算用采暖期日数	138	日
设计计算用采暖期初日	11月11日	
设计计算用采暖期终日	3月28日	
冬季通风室外计算温度	-9.2	℃
冬季空气调节室外计算温度	-12.4	℃
冬季空气调节室外计算相对湿度	53	%
冬季室外平均风速	2.5	m/s
冬季室外最多方向的平均风速	3.5	m/s
冬季最多风向	ENE	
冬季最多风向的频率	26	%
冬季室外大气压力	102903	Pa
冬季日照百分率	59	%
夏季通风室外计算温度	28.5	℃
夏季通风室外计算相对湿度	67	%
夏季空气调节室外计算干球温度	31.7	℃
夏季空气调节室外计算湿球温度	26.2	℃
夏季空气调节室外计算日平均温度	27.4	℃
夏季室外平均风速	2.4	m/s
夏季最多风向	SW	
夏季最多风向的频率	11	%
夏季室外大气压力	100287	Pa
年最多风向	ENE	
年最多风向的频率	9	%
极端最高温度	38.7	℃
极端最低温度	-23.7	℃

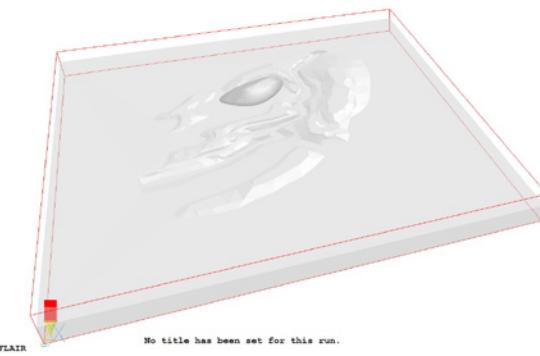
《中国建筑热环境分析专用气象数据集》

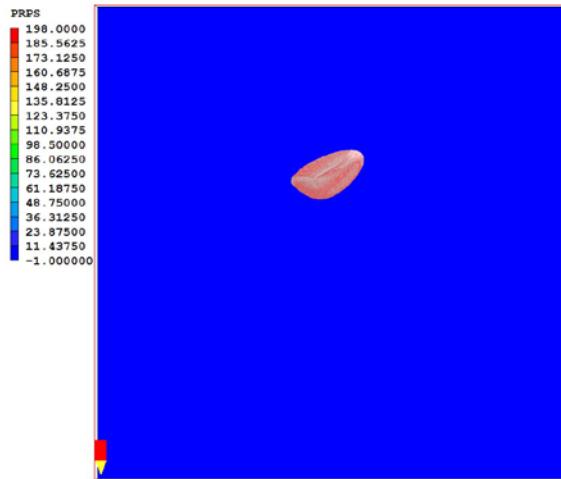
地形模型:

将Rhino中构建的模型导出STL格式在PHOENICS中加载（1-将地形与建筑一次导入；2-将地形和建筑分次导入）：

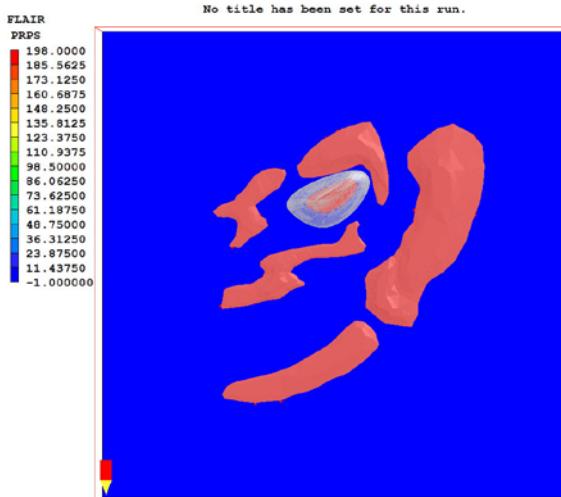
**检查模型:**

导入到PHOENICS的模型首先需要进行检查，根据模型的尺度和精细度设置分析网格的数量，本例使用 $200 \times 200 \times 50$ ，并将Menu/Numerics中的迭代次数修改为2次，回到Top Menu，点击OK，运行计算Run/Solver。打开Run/Post processor/GUI，选择变量为PRPS，并将模型显示模式改为网格方式或者增加透明度，以便观察检查模型，其中红色区域即为探测w到的实体部分，可以用于正确计算。

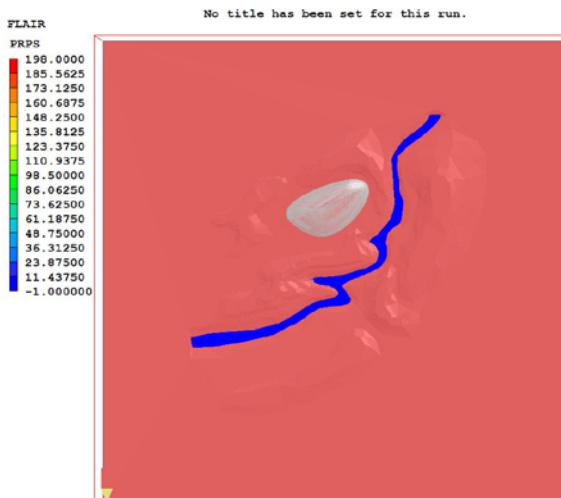




Z=15m时，建筑部分为红色显示，实体几何正确；

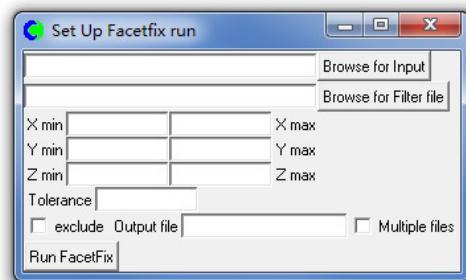


Z=5m时，建筑部分与地形部分均红色显示，实体几何正确；



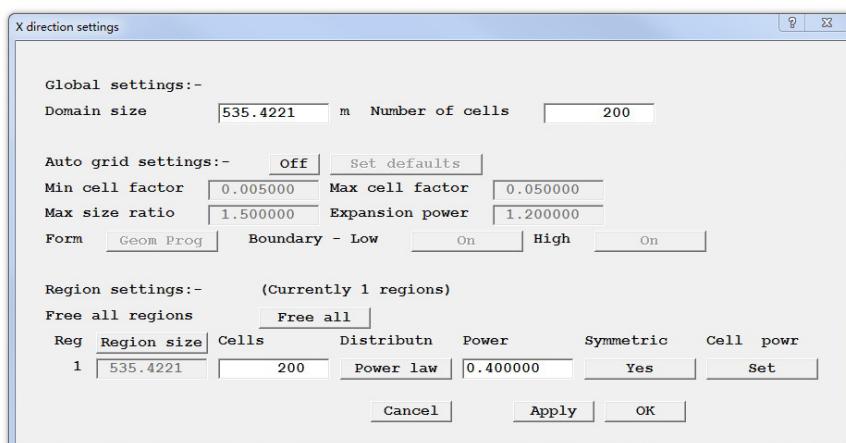
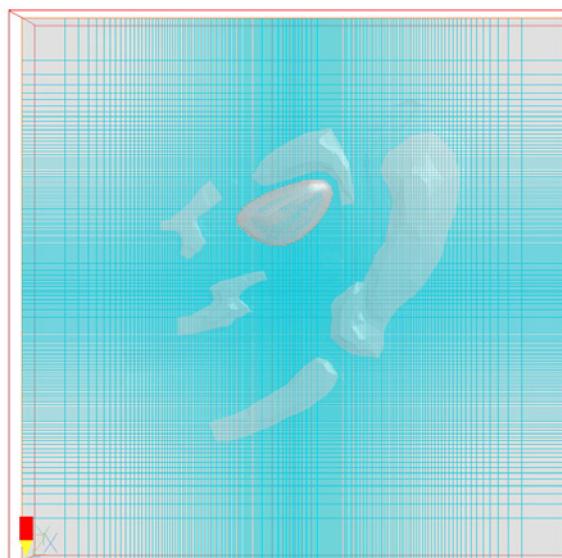
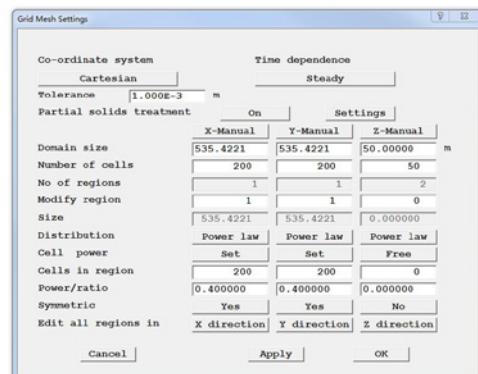
Z=-1m时，蓝色部分是标高低于地平面的部分，红色为地形实体内部；

模型检查如果没有错误就可以进行模拟计算，如果存在实体不正确，例如法线反向错误，无法探测到实体，显示为黑色，可以回到Rhino等三维构建软件中修改模型，也可以使用PHOENICS提供的FaceFix工具修复，位于Run/Utilities/FaceFix。



分析网格设置：

Mesh的设置，一般将密集的网格集中在建筑、地形设计分析区域，周边区域减少网格数量，可以在与网格集中区域过渡的边界使用Power law的渐变方式过渡。



X-direction方向设置

参数设置：

使用Wind模块进行模拟，模拟条件的设定：

冬季盛行风模拟

冬季最多风向: ENE (Wind Direction 97 °)

冬季室外最多风向的平均风速 (m/s) : 3.5

参考高度Reference Height: 10m

Angle between Y and North: 0°C

Coefficient: 1000 Linear

Temperature: -9.2°C (室外通风计算温度的选择可以参考《中国建筑热环境分析专用气象数据集》)

Profile Type: Power Law

Power Law Index: 0.24(设定地形上面生长为树木，为森林的地表条件)

Include open sky: Yes

Include ground plane: Yes

Effective roughness height: 1m

Ambient Pressure: 102903

Turbulence models: LVEL

地形参数设置：

Roughness 1m

Wall function law: Fully rough

Probe Postion: x=300, y=300, z=25.5

计算机配置：

Intel(R) Core™ i7 CPU 860@2.80GHz Memory: 4.00G

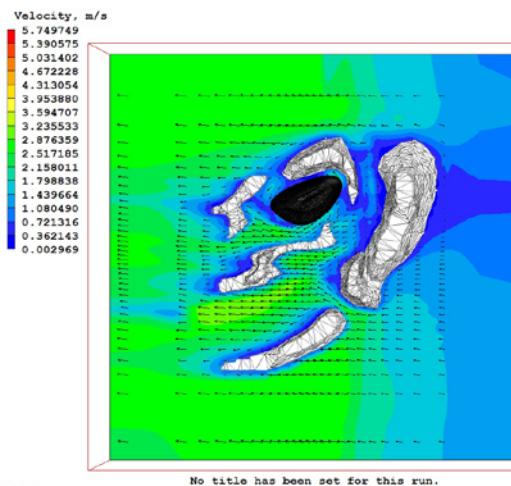
显卡: NVIDIA Quadro FX580

Time计算时间长度: 16.2Minute

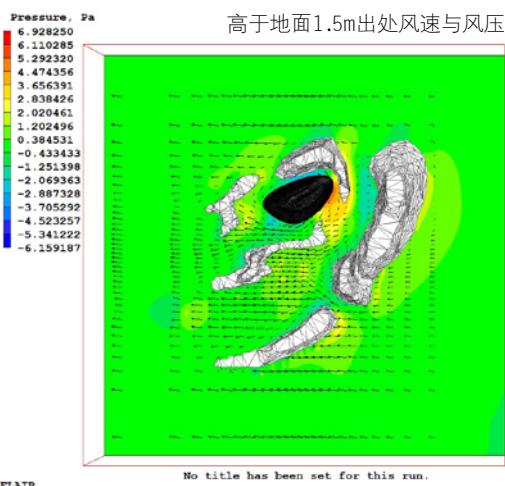
残差曲线



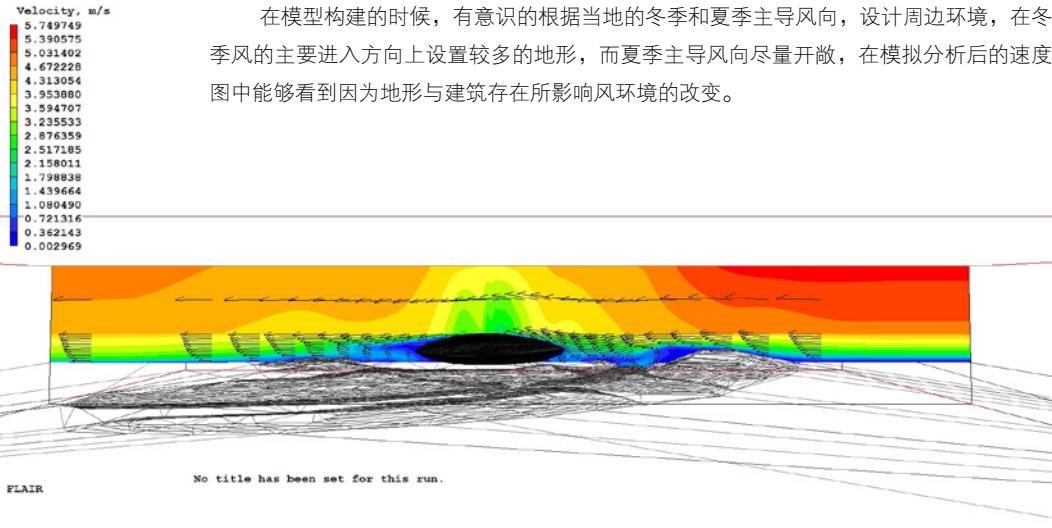
模拟软件的计算前设置，对于模拟结果影响很大。在开始计算之前，要仔细，多次检查设置内容并检查模型是否为模拟软件能够识别的几何体，同时可以先将网格的数量少设置一些，初步计算看一下，模拟结果是否有明显的错误，例如，残差曲线明显的抖动，设置的观测值变化幅度偏大，或者显示模拟结果图形抖动异常，以及几何体内出现风速值，风流体穿过几何体而没有沿几何体扰动或停止。在进行各种模拟时，除了CFD也包括热辐射、光、声等模拟，建议以不同物理模型进行模拟比较，确定其结果是否接近，从而判断模拟结果的正确性。



FLAIR



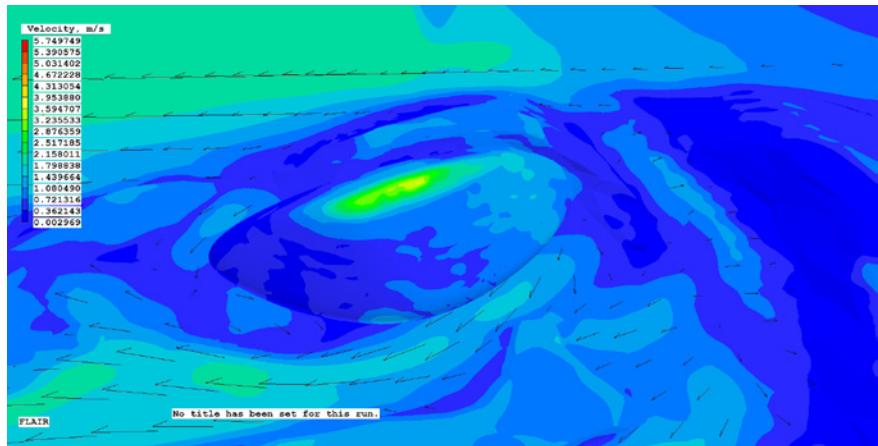
高于地面1.5m处风速与风压

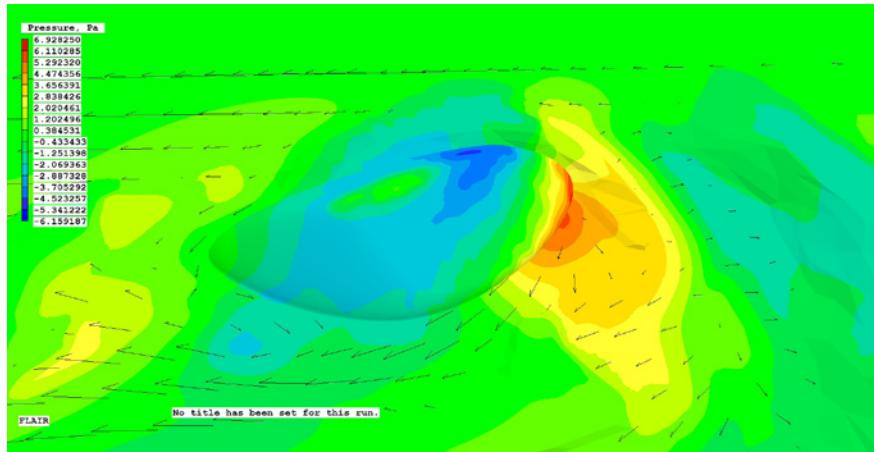
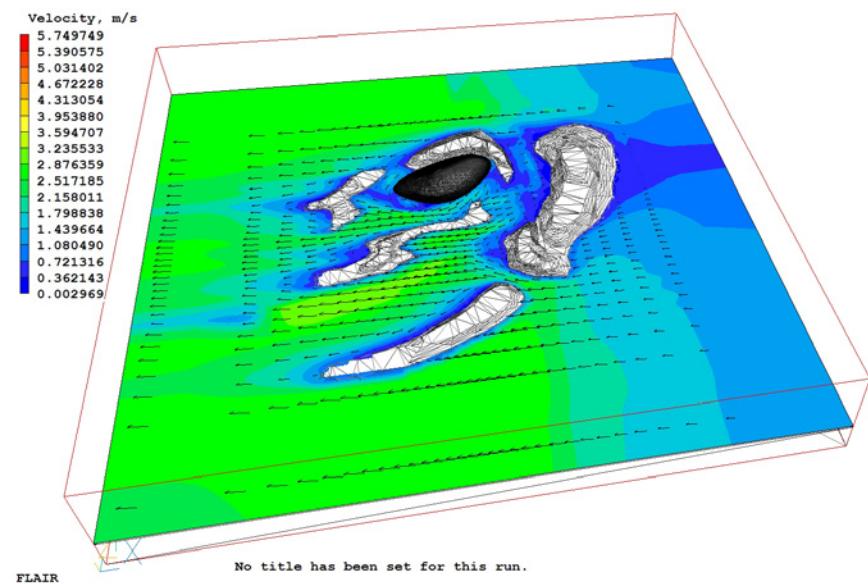
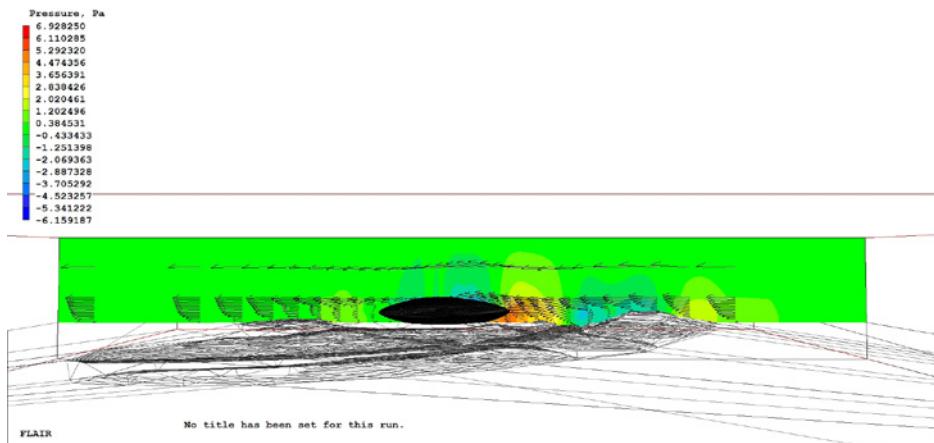


FLAIR

No title has been set for this run.

可以选
Surface Contour
(O b j e c t
Management/Object
name/右键/Surface
Contour) , 观察
建筑、地形表面的
风速与风压, 尤其
对于建筑部分风
压、风速的分析有
助于建筑结构的
设计。





夏季风的模拟:

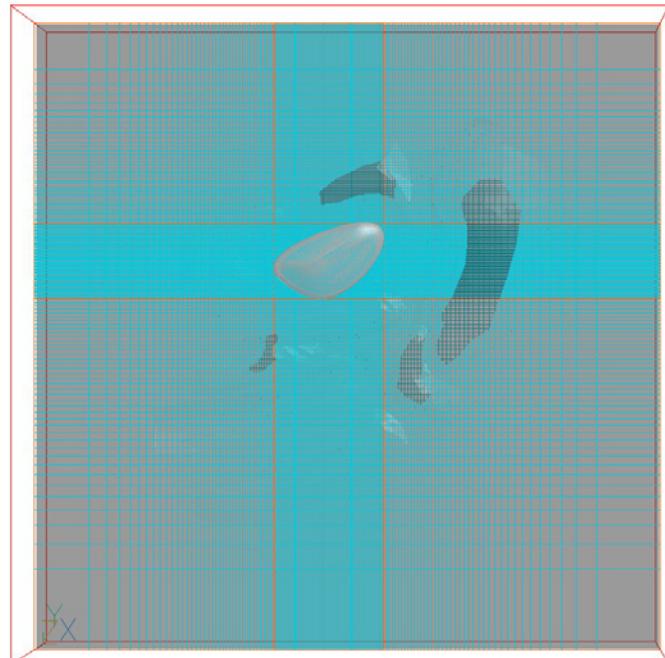
夏季最多风向: SW (本案Wind Direction -105 °或 255 °)

冬季室外最多风向的平均风速 (m/s) : 2.4

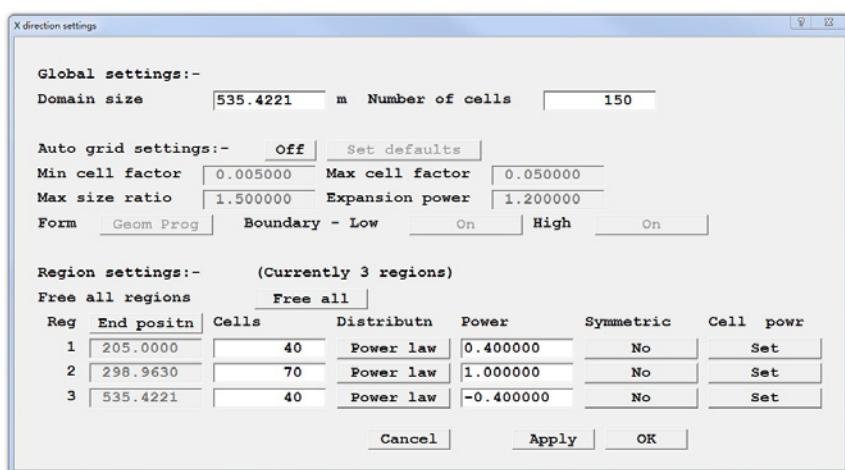
Ambient Pressure: 100287

Temperature: 28.5°C

将Rhino中构建的模型导出STL格式在PHOENICS中加载 (1-将地形与建筑一次导入; 2-将地形和建筑分次导入):

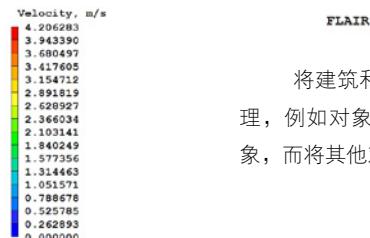
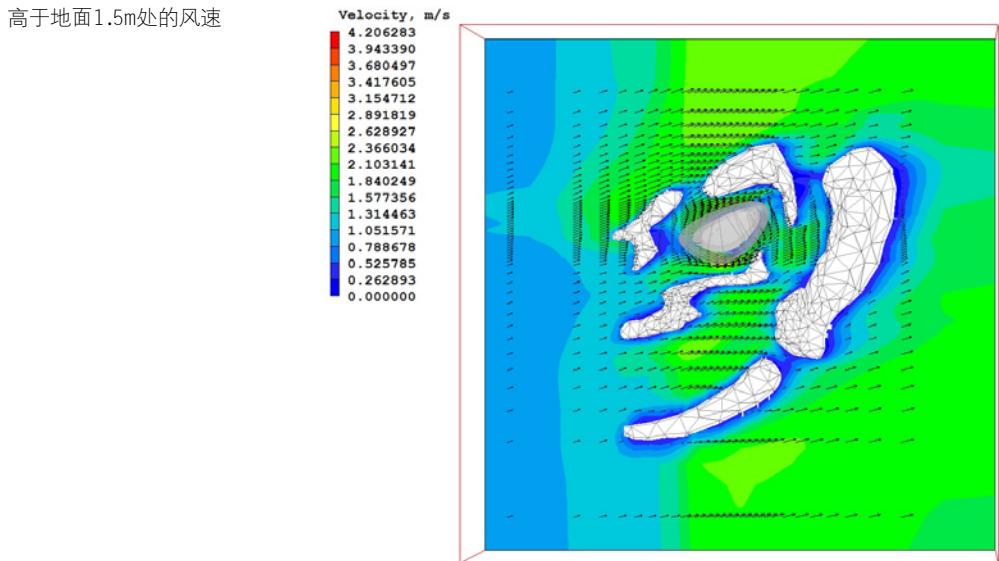


将地形和建筑分别导入到PHOENICS中，网格会自动根据对象划分为不同的域，进行不同级别的网格划分。

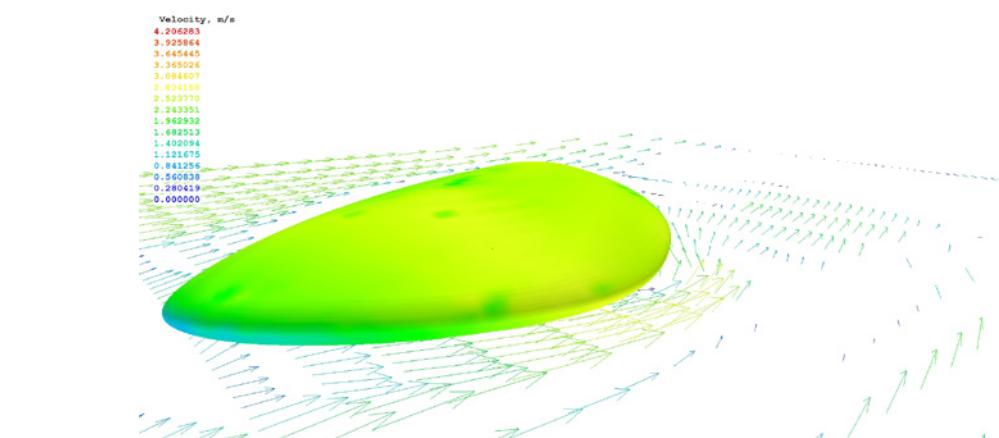
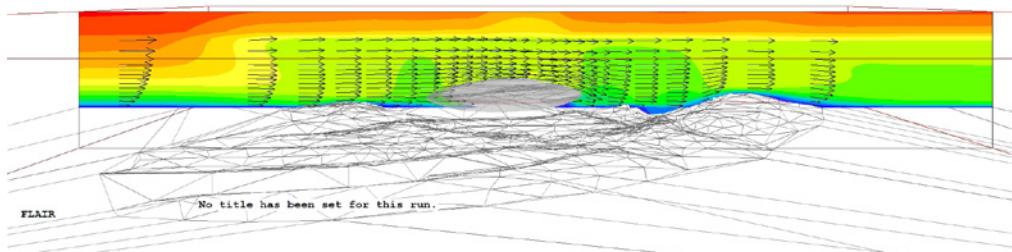


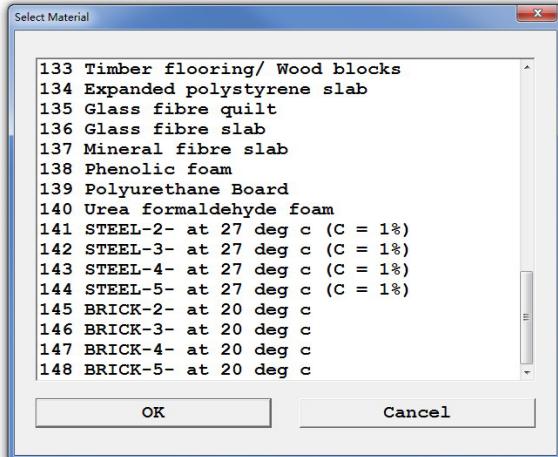
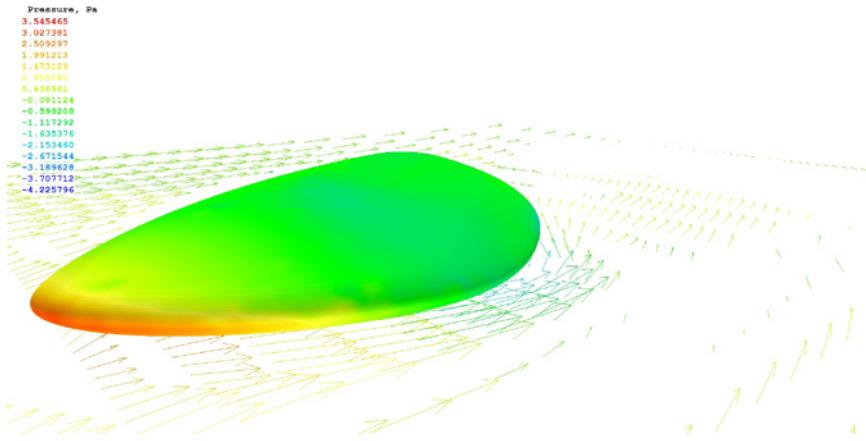
X-Direction方向事例的网格划分

高于地面1.5m处的风速



将建筑和地形分别导入，可以设置各自的对象属性，使分析的结果更加合理，例如对象材料等。在显示设置时也可以根据分析的需要选择需要显示的对象，而将其他对象隐藏。图中只显示了建筑对象表面的风速与风压的分布。





PHOENICS中内置可以选择的材料

建筑风环境模拟-2:

使用热湿环境与计算机模拟章节中的建筑做风环境模拟

设计用室外气象参数

省份	甘肃	单位
站名	民勤	
采暖室外计算温度	-13.3	℃
设计计算用采暖期日数	153	日
设计计算用采暖期初日	10/28	
设计计算用采暖期终日	03/29	
冬季通风室外计算温度	-12.3	℃
冬季空气调节室外计算温度	-17.1	℃
冬季空气调节室外计算相对湿度	54	%
冬季室外平均风速	1.6	m/s
冬季室外最多方向的平均风速	2.7	m/s
冬季最多风向	E	
冬季最多风向的频率	9	%
冬季室外大气压力	86987	Pa
冬季日照百分率	70	%
夏季通风室外计算温度	28.1	℃
夏季通风室外计算相对湿度	34	%
夏季空气调节室外计算干球温度	33	℃
夏季空气调节室外计算湿球温度	19.3	℃
夏季空气调节室外计算日平均温度	26.8	℃
夏季室外平均风速	2.5	m/s
夏季最多风向	E	
夏季最多风向的频率	14	%
夏季室外大气压力	85573	Pa
年最多风向	WNW	
年最多风向的频率	9	%
极端最高温度	41.1	℃
极端最低温度	-26.9	℃

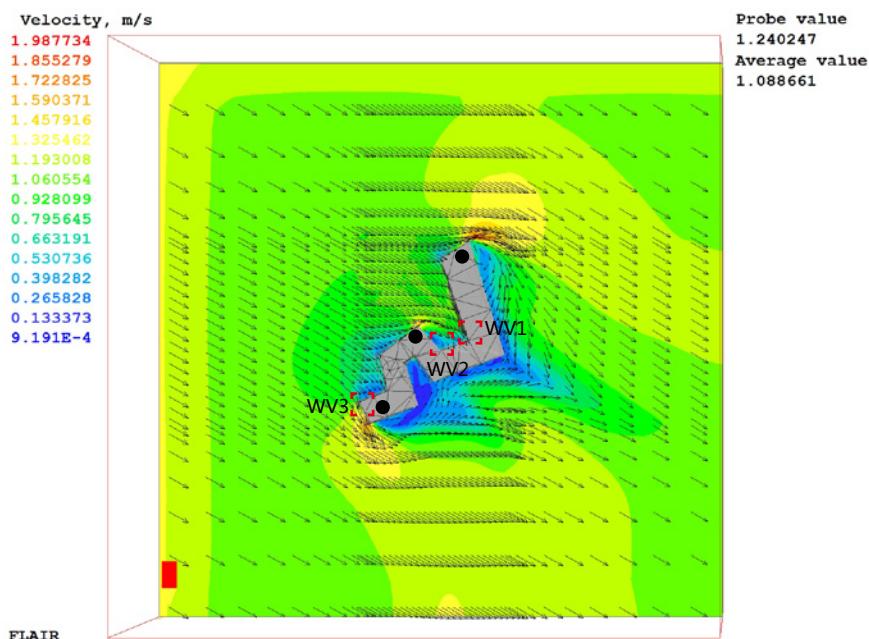
《中国建筑热环境分析专用气象数据集》

对于风的模拟需要获知冬季/夏季大气压，室外计算温度，风速与风向等气象数据，可以在《中国建筑热环境分析专用气象数据集》中获得，也可以使用逐时气象数据利用Weather Tool工具分析获得。

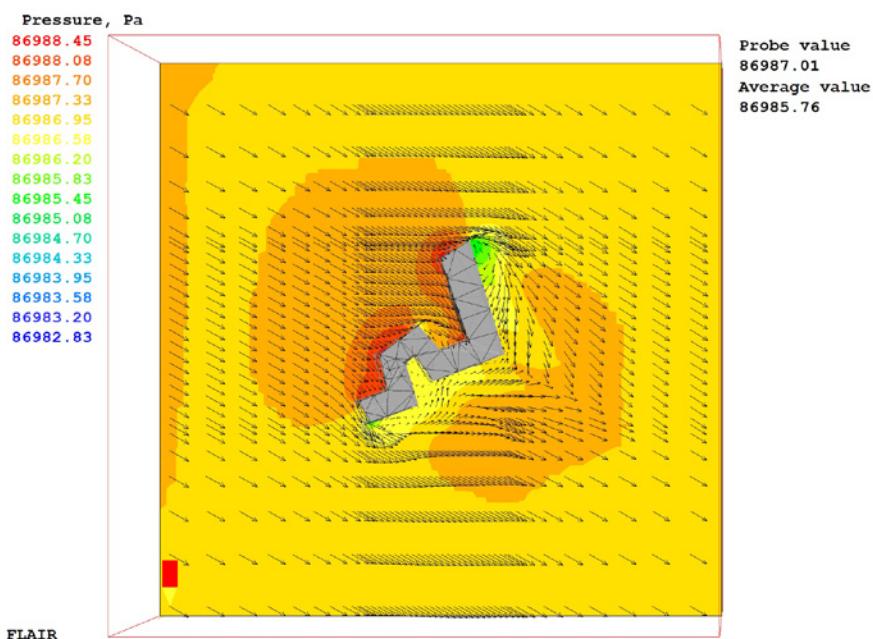
考虑到建筑周围多为林木，在参数设置时将地面的粗糙高度Effective roughness height设置为1m，幂指数Power Law为0.24，即为森林的地表条件。

冬季风模拟:

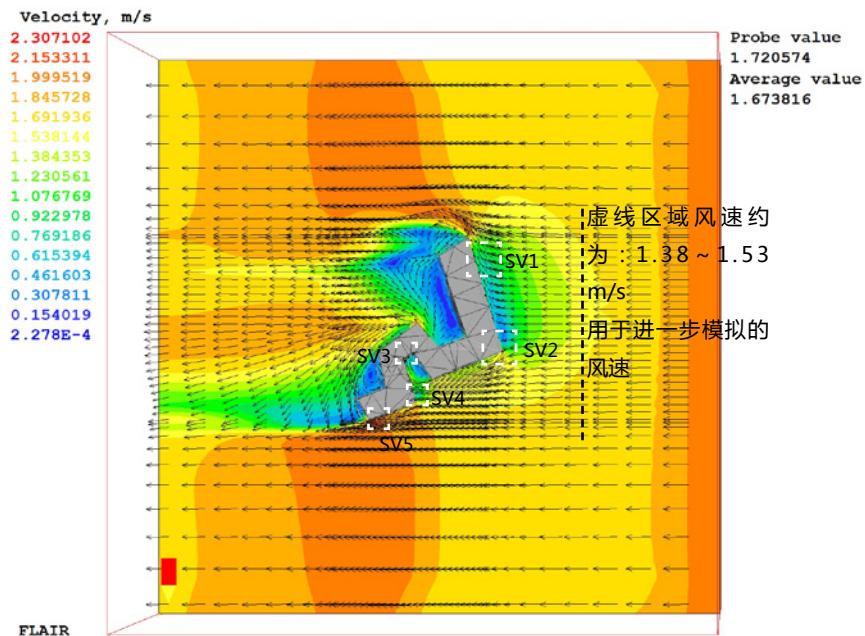
注: 冬季风模拟使用了年最多风向。



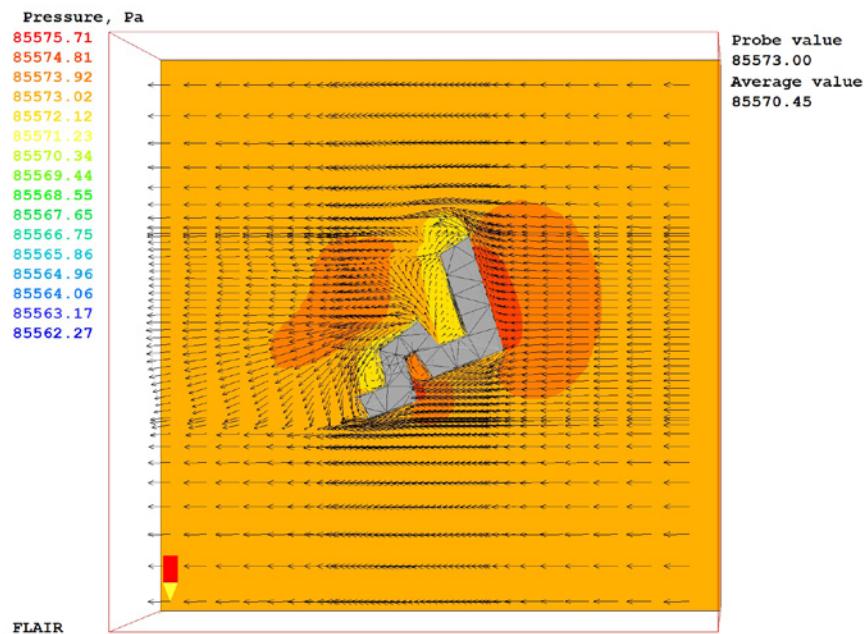
在西北偏西风向作用下，建筑南部蓝色区域基本形成了静风区域，为背风区，在三个转角处风速则有所提升。建筑北部压强高于建筑南部。



夏季风模拟:

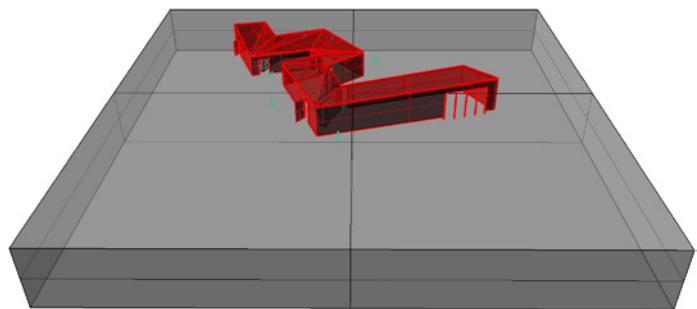


夏季风为东风，在朝向风向的建筑区域的风压大于背风向，背风区域基本为静风。



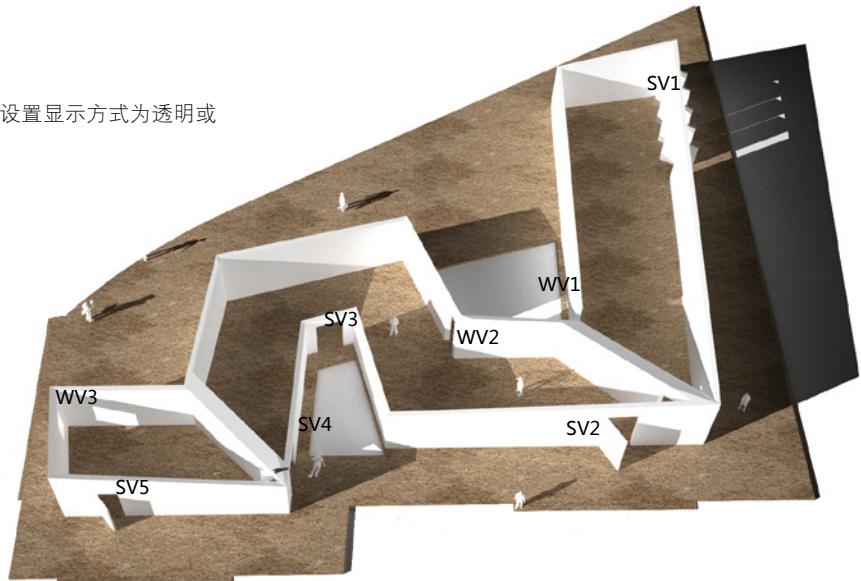
初次建立通风口+风环境模拟

上述模拟仅是把建筑当作一个体块来处理，以此来观察建筑外风环境的变化情况，再根据模拟的结果初步确定建筑夏季开窗通风的位置，来组织建筑内部的风环境，在SV1区域，夏季东风受到建筑的阻挡向北部流动，结合门的位置，采用平开门的设计方式，使门开启时与墙体约成45度角，形成潜在的鳍板墙，采集风的数量，引导风向，发挥最佳的通风效果；SV2与SV5采取同样的处理方法；在SV3与SV4区域，风向基本垂直于墙体，使用推拉窗的方式。为了形成穿堂风，考虑北部建筑设置开口，开口位置尽量避免冬季风的垂直风向，WV1部位设置通风口，WV2部位设置为门，WV3部分设置为离地面有一定距离的窗。在RH中建立好模型后导出STL文件在Phoenics中加载进行夏冬季风环境模拟。



注：进行风环境模拟，在RH中建立的模型一般为体，针对建筑内部风环境模拟，只建立通风口（包括部分窗体，门），未考虑开启的窗体不需要建立。为了在Phoenics中方便显示，将屋顶以及除屋顶外其他部分单独导出为STL文件，在Phoenics中加载。

（以后在Phoenics中设置显示方式为透明或者隐藏。）



模拟条件:

使用Wind模块进行模拟，模拟条件的设定：

夏季盛行风模拟

夏季最多风向: E (Wind Direction 90 °)

夏季室外最多风向的平均风速 (m/s) : 1.45(选取建筑体块风环境模拟中与本次相似区域位置的风速用于本次模拟)

参考高度Reference Height: 10 m

Angle between Y and North: 0°C

Coefficient: 1000 Linear

Temperature: 28.1°C (室外通风计算温度的选择可以参考《中国建筑热环境分析专用气象数据集》)

Profile Type: Power Law

Power Law Index: 0.24(设定地形上面生长为树木，为森林的地表条件)

Include open sky: Yes

Units for humidity: Relative humidity

Inlet humidity: 34%

Include ground plane: Yes

Effective roughness height: 1m

Ambient Pressure: 85573

Turbulence models: LVEL

Comfort indices舒适度指数: Clothing insulation:0.6 clo

External work: 1.0 met (休闲坐姿)

Relative humidity: 50%

使用Wind模块进行模拟，模拟条件的设定：

冬季风向模拟

年最多风向: WNW (Wind Direction -60 °)

冬季室外最多风向的平均风速 (m/s) : 1.6(选取建筑体块风环境模拟中与本次相似区域位置的风速用于本次模拟)

参考高度Reference Height: 10m

Angle between Y and North: 0°C

Coefficient: 1000 Linear

Temperature: -12.3°C (室外通风计算温度的选择可以参考《中国建筑热环境分析专用气象数据集》)

Profile Type: Power Law

Power Law Index: 0.24(设定地形上面生长为树木，为森林的地表条件)

Include open sky: Yes

Units for humidity: Relative humidity

Inlet humidity: 54%

Include ground plane: Yes

Effective roughness height: 1m

Ambient Pressure: 86987

Turbulence models: LVEL

Comfort indices 舒适度指数:

Clothing insulation: 0.6 clo

External work: 1.0 met (休闲坐姿)

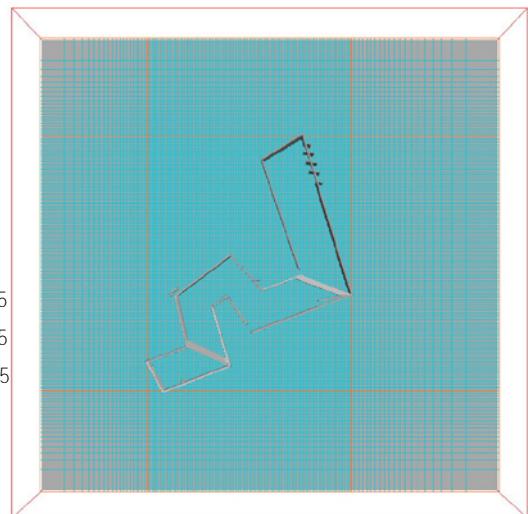
Relative humidity: 50%

分析网格设置:

X Direction: $20/0.5+100/1+20/-0.5$

Y Direction: $20/0.5+120/1+20/-0.5$

Z Direction: $30/1+5/1+1/1+20/-0.5$



SV1 使用类似鳍板墙的平开门方式引导风与最初预测的风流动一致，并与西侧的WV1组合，构成良好的通风；

SV2与SV5因为风向基本平行于南部墙体，使用的平开窗形成的鳍风板与风向垂直，并没有引导风，因此风并未引导进入到建筑内部；

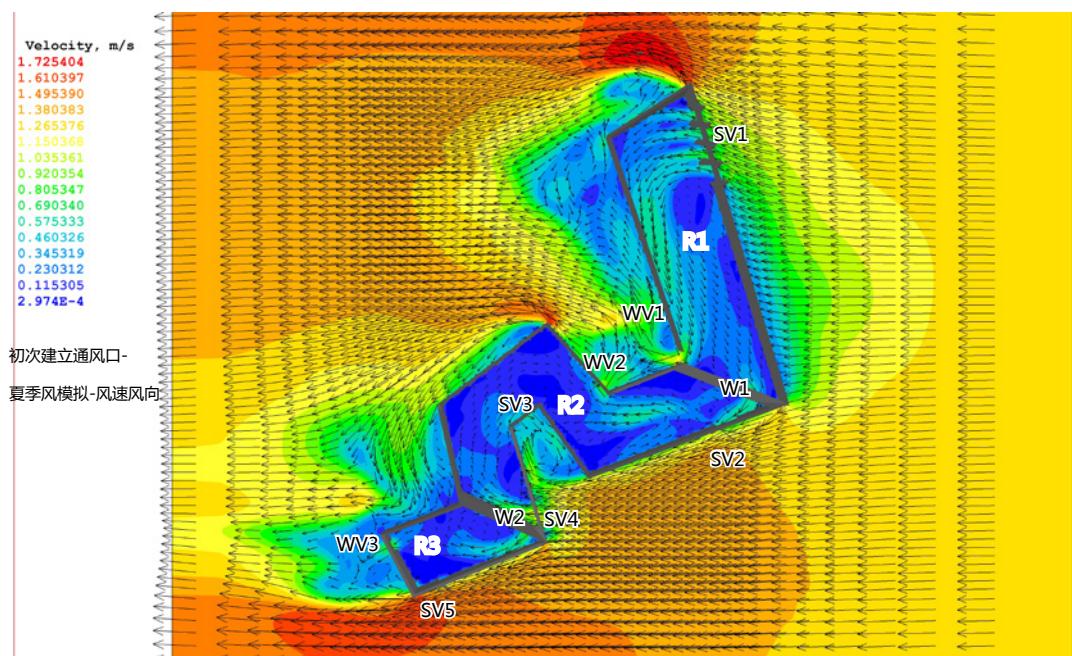
SV4墙体基本垂直于风向，因此可以进入到建筑内部；

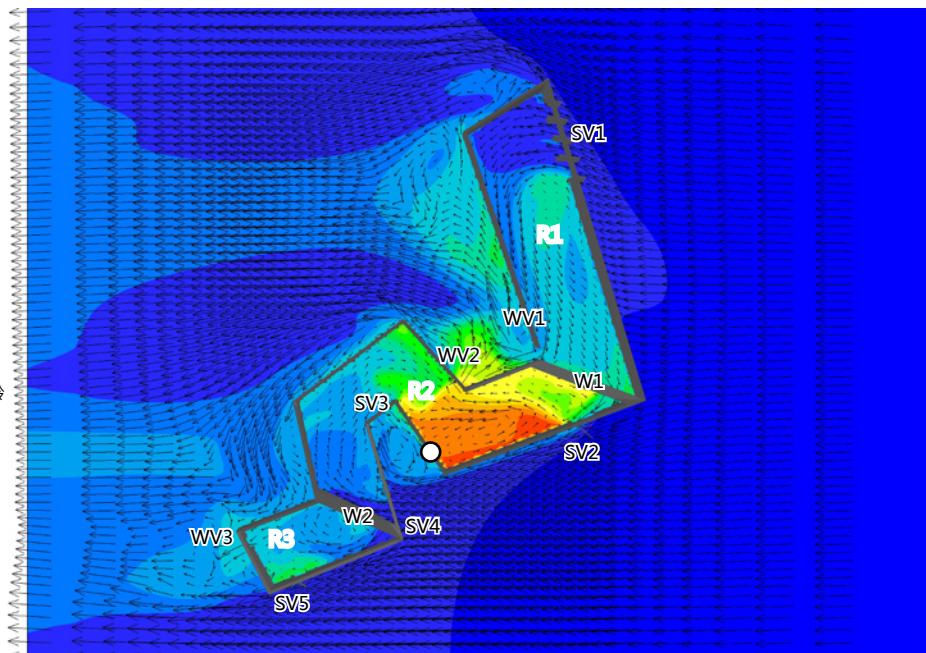
W1、W2为内墙门洞，风被很好地从这两个门洞中导引，W2与WV3的组合构成良好的内部通风；

WV2引导风流出建筑；

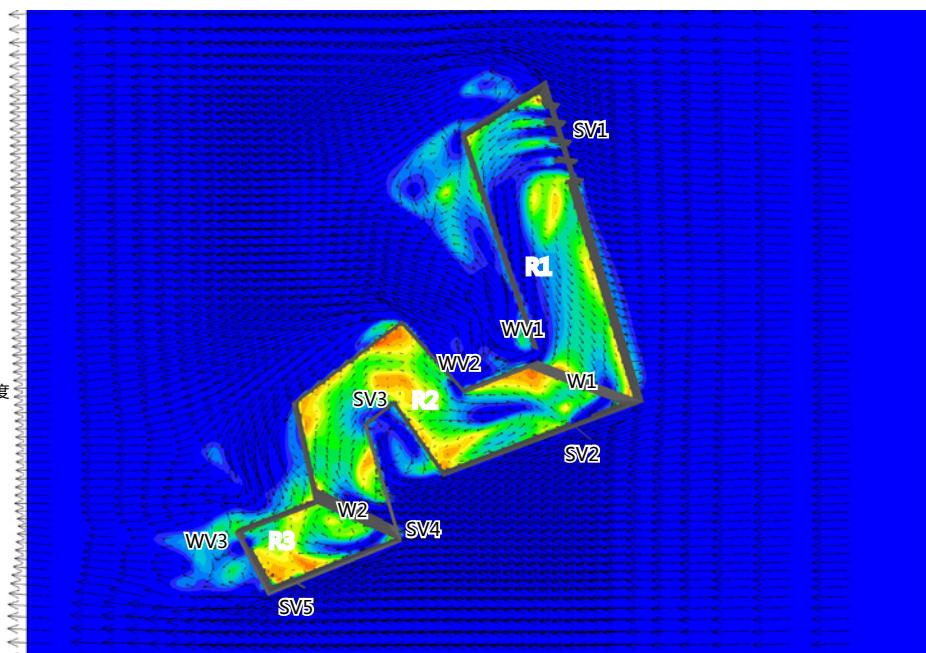
但是SV3因为建筑外涡流，风并没有被引导进入到建筑内部；

建筑内部风速基本都在1m/s以下，大部分为0.1~0.2m/s之间，属于基本感觉不到风，但比较舒适的范围。

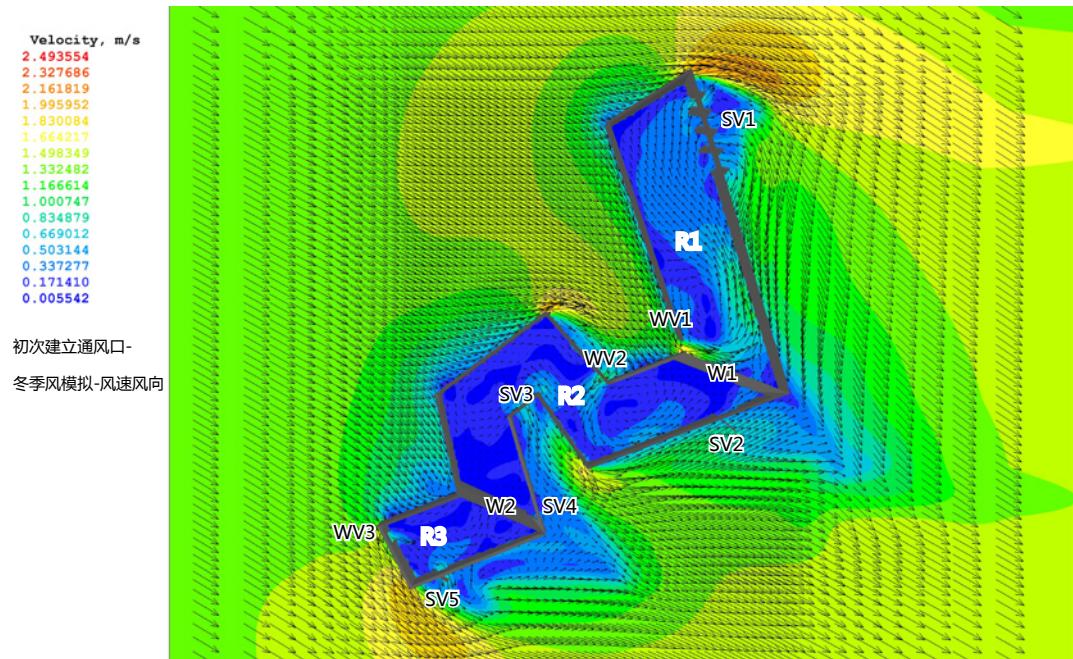




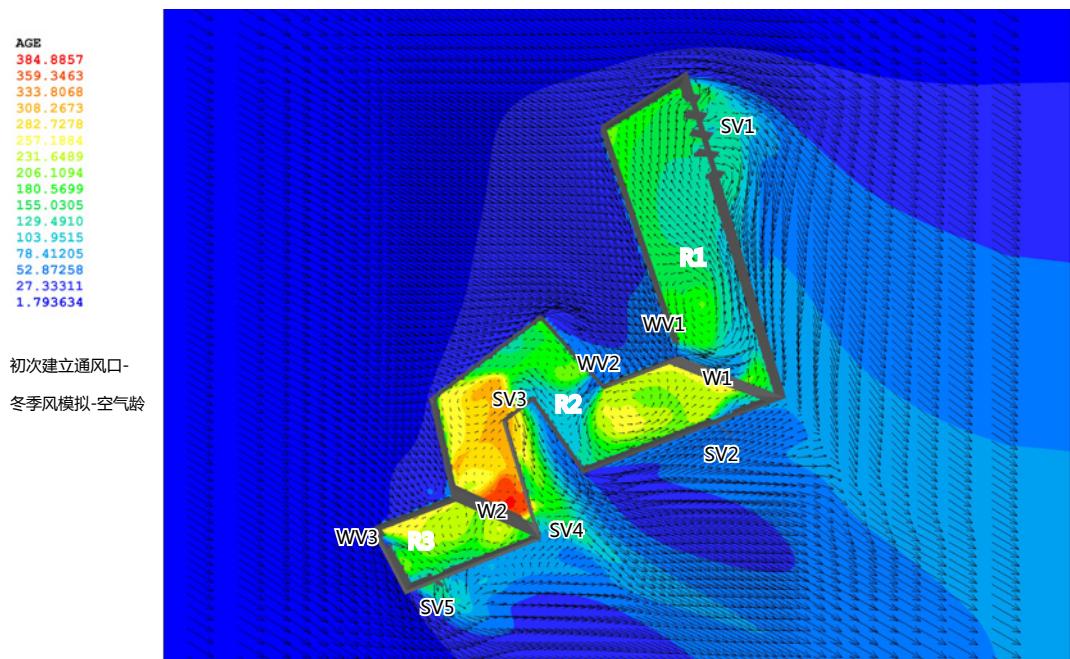
R1、R2、R3三个建筑内部区域，最大空气龄约为500s，即空气在房间内某点已经滞留的时间约为500s（大约8分半的时长），其最大空气龄基本分布于R2的右侧区域，可以尝试在临近墙体上建立通风口（开启的窗体），减小区域内的空气龄。R1、R3区域空气龄最大在270s左右（大约4.5分钟）。



PMV的值普遍偏小，一般位于 $-0.5 \sim 0.5$ 之间为舒适， $-2 \sim -3$ 区间感觉为凉。当地夏季相对湿度约34%，较50~60%的舒适区域低，可以考虑在建筑右侧修建静水池，使进入到建筑内部的风经过静水面，增加空气中的水汽，并带入到建筑内部，增加建筑内部的相对湿度，并能够进一步降低空气温度。

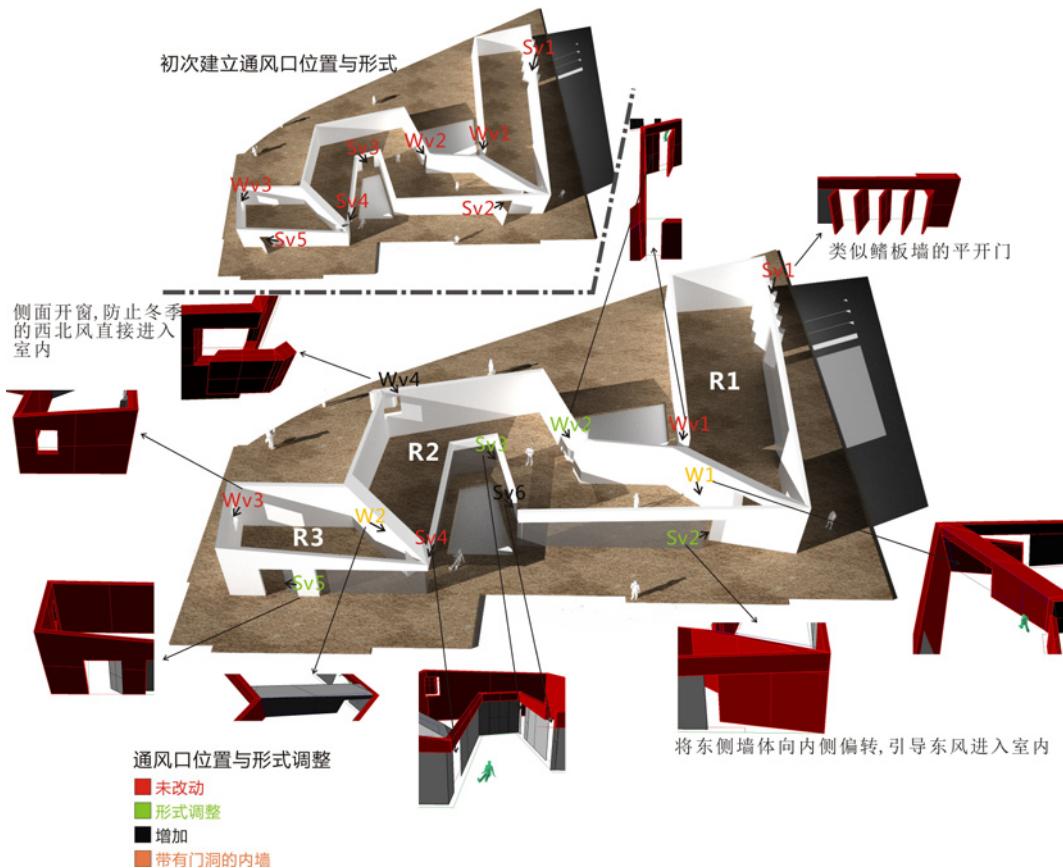


北部和西部的通风口WV1、2、3，在夏季东风时作为出风口，在年最多风向西北偏西时则作为进风口，R3区域的WV3与SV5，R1区域的WV1与SV1构成了良好的室内通风条件，但是R2区域风向流动不明确。室内风速基本为0.1~0.3m/s之间，仅在通风口的进风处风速约为1.5m/s，感觉到较大的风，但是在气候炎热干燥地区为自然通风的良好风速。

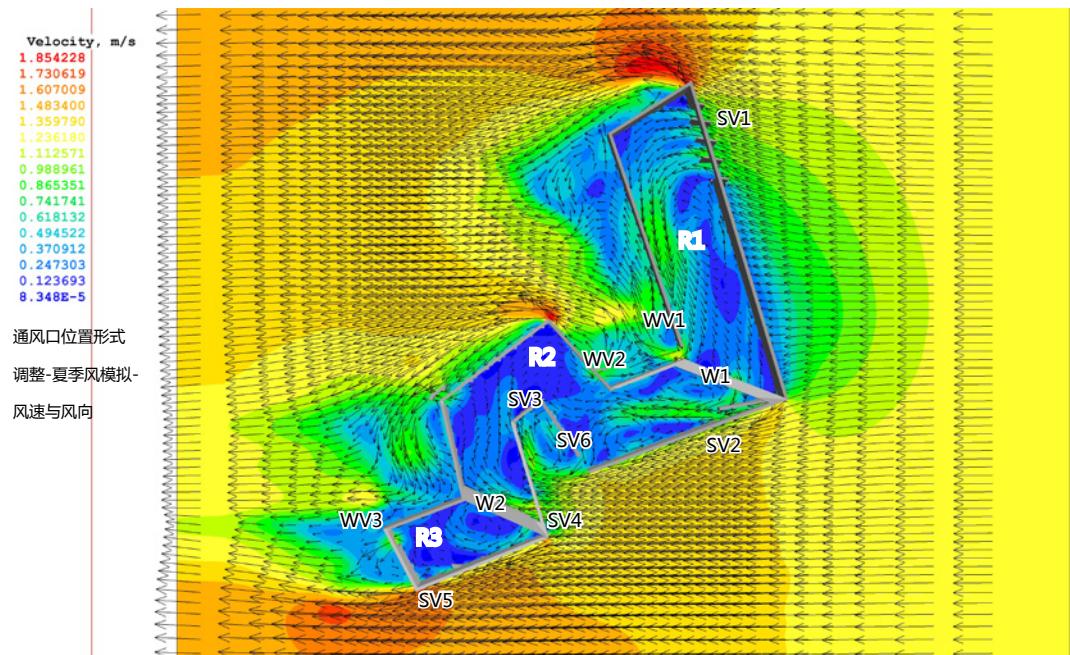


空气龄相对较大的值仍然出现在R2区域，约为380s（约6.33分钟）。R1、R2区域在180s上下（约3分钟）。

对初次建立通风口位置和形式进行修改+风环境模拟

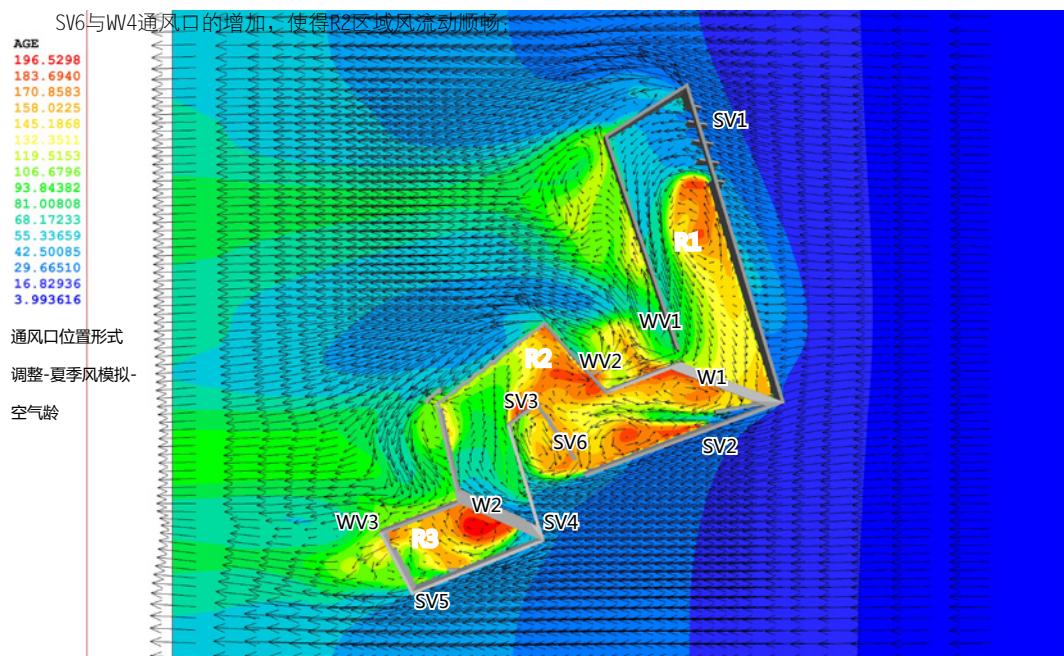


使用模拟工具对设计进行模拟分析的过程, 是对不同设计阶段的设计成果的模拟, 在模拟后发现问题进行修正, 再次进行模拟, 如果仍旧存在问题, 则需要进行再次修正和再次模拟的一个循环往复的过程, 直至达到满足设计要求的目的。在根据建筑体块模拟后初次建立的通风口进行模拟后, 发现部分区域通风不顺畅, 与最初的设计存在矛盾, 例如Sv2未引导风进入建筑内部, 因此做出了相应的修改, 使该位置的东侧墙体偏转; R2区域在东风和西北偏西风的模拟过程中, 部分区域的空气龄相对较大, 因此重新调整了通风口的位置, 使建筑内部的通风顺畅。

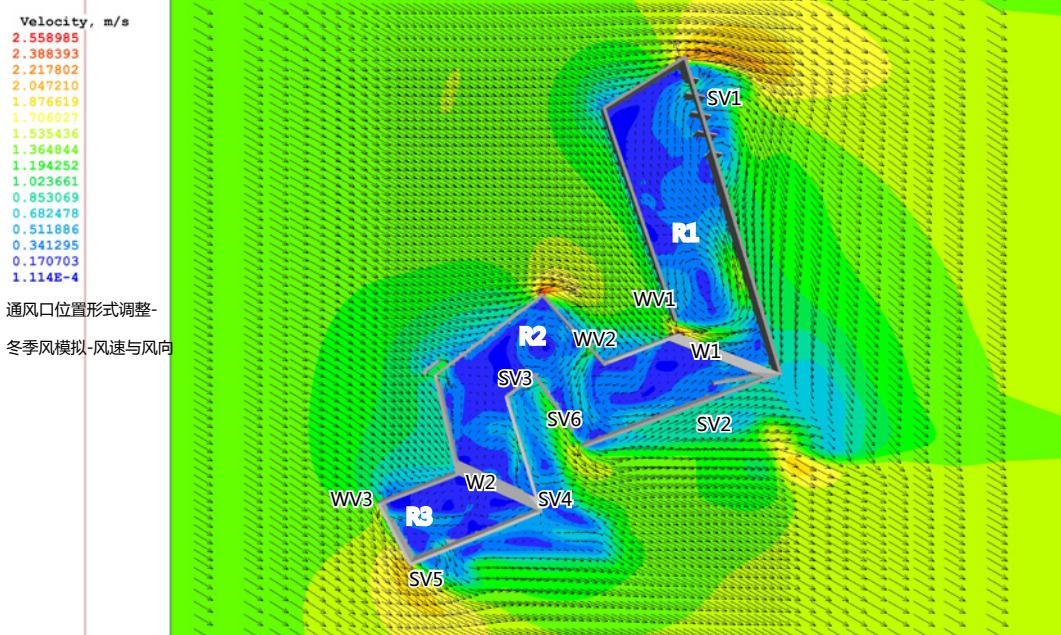


对通风口位置与形式进行了调整，SV2的东侧墙体内偏转的方式能够引导东风进入到室内；

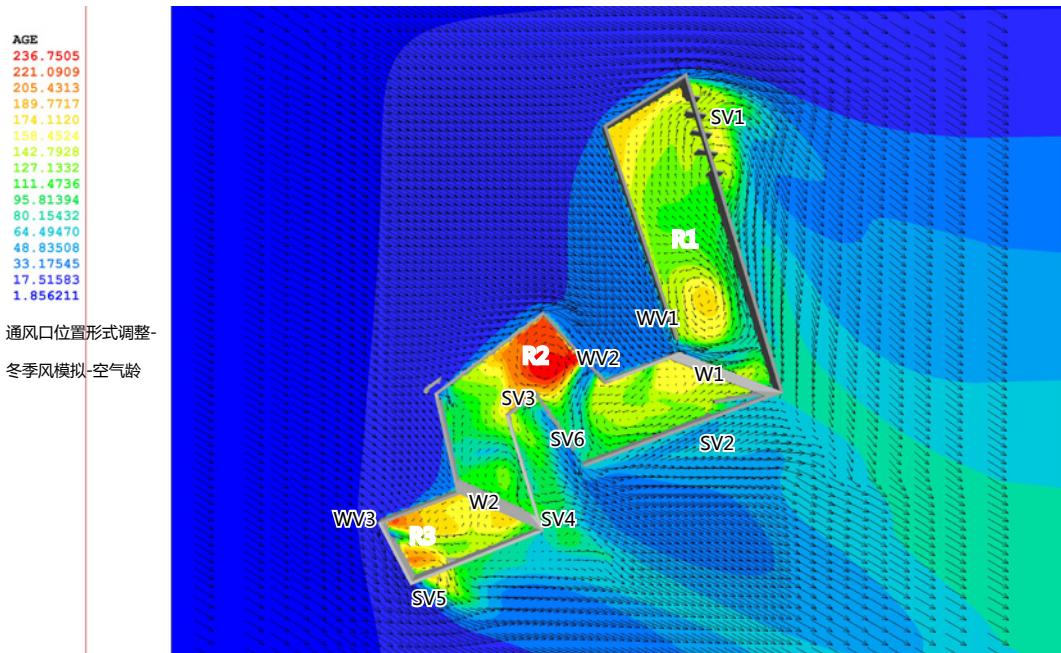
但是SV5由于偏转的距离较小，在引导东风进入室内的效果并不明显（但是在西北风环境下，能够成为很好的出口）；



通过对通风口的调整，建筑内部区域的夏季风空气龄有明显减小，从最大空气龄500s降到200s（约3.33分钟）；R2区域因为增加了Sv6部位的开窗，使原先集聚于该位置的风涡流得以顺畅流出室外；W4的增加也提升了R2区域风流动的质量。



对修正的通风口做西北偏西风向的风环境模拟，WV4能够有效的减小进入到建筑内部冬季风的风速，WV1则相对较高，因为WV3基本与风向平行，进入到室内的风向不是垂直方向，因此风速并未被加速，相反有所减小。各区域室内风的流动基本顺畅。



建筑内部西北偏西风向的空气龄最大约为240s（约4分钟），较之初次通风口模拟的空气龄380s有所减小。

水环境模拟

关于水:

规划、景观、建筑设计中，尤其景观方面会涉及到较多水文处理的问题，例如湿地、河流的恢复以及重建项目。这个时候往往需要与环境专业，水利专业以及生态专业协作来共同处理涉及到水的多方面问题。

设计之前，往往可以拿到设计区域的水文数据以及相关的防洪规划，用于指导进一步的设计，保证设计的安全，但是设计不是简单的圈地，所修复的河床是否能够满足目标水生植物的生长，又或限制某种植物生长来防止富营养化的发生，水中的鱼虾类生存的需求，从水流速度、水深、紊流状况，到适合鱼类的食物所生长的环境，以及北方鱼儿越冬的水深要求，水环境不仅是钢筋混凝土所筑起，只为人类安全着想的自私的建筑，而正是这最终造成人类生存环境的恶化。因此，对规划设计人员提出了更高的要求，在专业协调的前提下，应进一步扩展设计师处理水环境的能力。

- **水文 (Hydrology)** : 指研究自然界水的时空分布、变化规律的一门学科。

水文特征指标

要研究一个地方的水文，进而为生产、生活、服务提供指导，离不开对水文的表现把握。主要确定一些重要指标进行衡量。一般而言，针对河流湖泊来说，重点看以下几个方面：

- **水位高低**: 水位高低反应水文系统的含量储备能力。它可以决定这个水文系统的负载能力和自我调节限度。比如，通航力就得首先考察水位高低。
- **水量大小**: 水量大小直接影响一个地方经济发展的规模和人口的承载力，人们的生活生产。
- **含沙量**: 含沙量的多少直接涉及水源未来的演变趋势和可能带来的一些不良后果。因为，含沙量直接与水系地带的生态环境（例如水土流失严重度）相关联。对未来水源的存在及可能的开发都有很大影响。
- **汛期长短**: 这也是反应地区水文的重要指标。汛期长，则意味着本区降水量大，降水期长，这为人们做好防洪工作提供现实客观依据，也为大力开展航运服务提供前景；汛期短，意味着降水量较小，水量不可能太大，在本区大部分时间产生对人们生活生产的限制作用。但另一方面，也有短期的防洪任务，但重点还是为未来抗旱工作提供依据。

另外，反应水文的指标还有其他一些方面。比如，一个地方的水系是否会存在结冰期以及时间的长短等等。这些都是水文工作者和其他相关人员必须了解和研究的方面。

• 常用水文名词：

流域和水系 :

流域是地表水与地下水分水线所包围的集水区或汇水区，因地下水分水线不易确定，习惯上将地表水的集水区称为流域。河道干流流域是由所属各级支流流域所组成。流域面积的确定，可根据地形图勾出流域分水线，然后求出分水线所包围的面积。河流流域面积可以计算到河流的任一段，如水文站控制断面，水库坝址或任一支流的汇口处。流域里大大小小的河流，构成脉络相通的系统，称为河系或水系。

河流的分段及其特点 :

每条河流一般都可分为河源、上游、中游、下游、河口等五个分段。

河源——河流开始的地方，可以是溪涧、泉水、冰川、沼泽或湖泊等。

上游——直接连着河源，在河流的上段，它的特点是落差大，水流急，下切力强，河谷狭，流量小，河床中经常出现急滩和瀑布。

中游——中游一般特点是河道比降变缓，河床比较稳定，下切力量减弱而旁蚀力量增强，因此河槽逐渐拓宽和曲折，两岸有滩地出现。

下游——下游的特点是河床宽，纵比降小，流速慢，河道中淤积作用较显著，浅滩到处可见，河曲发育。

河口——河口是河流的终点，也是河流入海洋、湖泊或其它河流的入口，泥沙淤积比较严重。

河流的断面：

河流的断面分为纵断面及横断面。

1. 纵断面。沿河流中线（也有取沿程各横断面上的河床最低点）的剖面，测出中线以上（或河床最低点）地形变化转折的高程，以河长为横坐标，高程为纵坐标，即可绘出河流的纵断面图。纵断面图可以表示河流的纵坡及落差的沿程分布。

2. 横断面。河槽中某处垂直于流向的断面称为在该处河流的横断面。它的下界为河底，上界为水面线，两侧为河槽边坡，有时还包括两岸的堤防。横断面又称为水断面，它是计算流量的重要参数。

水尺与水位

水尺是直接观读江河、湖泊、水库、灌渠水位的标尺。水尺的历史悠久，直到现代仍在广泛使用。

河流或者其它水体的自由水面离某一基面零点以上的高程称为水位。水位的单位是米，一般要求记至小数点后2位，即0.01m。以水位为纵轴，时间为横轴，可绘出水位随时间的变化曲线，称为水位过程线。

基面

变化曲线基面是指计算水位和高程的起始面。在水文资料中涉及的基面有：绝对基面、假定基面、测站基面、冻结基面等四种。

流速

流速是指水流质点在单位时间内所通过的距离。渠道和河道里的水流各点的流速是不相同的，靠近河(渠)底、河边处的流速较小，河中心近水面处的流速最大，为了计算简便，通常用横断面平均流速来表示该断面水流的速度。

径流与径流量

流域地表面的降水，如雨、雪等，沿流域的不同路径向河流、湖泊和海洋汇集的水流叫径流。在某一时段内通过河流某一过水断面的水量称为该断面的径流量。径流是水循环的主要环节，径流量是陆地上最重要的水文要素之一，是水量平衡的基本要素。

径流量的表示方法及其度量单位

流量Q：指单位时间内通过某一过水断面的水量。常用单位为立方米每秒(m^3/s)。各个时刻的流量是指该时刻的瞬时流量，此外还有日平均流量、月平均流量、年平均流量和多年平均流量等。

径流总量W：时段 Δt 内通过河流某一断面的总水量。以所计算时段的时间乘以该时段内的平均流量，就得径流总量W，即 $W=Q\Delta t$ 。它的单位是立方米(m^3)。以时间为横坐标，以流量为纵坐标点绘出来的流量随时间的变化过程就是流量过程线。流量过程线和横坐标所包围的面积即为径流量。

径流深R：指计算时段内的经流总量平铺在整个流域面积上所得到的水层深度。它的常用单位为毫米(mm)。若时段为 $\Delta t(s)$ ，平均流量为 $Q(m^3/s)$ ，流域面积为 $A(km^2)$ ，则径流深R(mm)由下式计算： $R=Q\Delta t/(1000A)$

径流模数M：一定时段内单位面积上所产生的平均流量称为径流模数M。它的常用单位为 $m^3/(s \cdot km^2)$ ，计算公式为： $M= Q/A$

径流系数α：为一定时段内降水所产生的径流量与该时段降水量的比值，以小数或百分数计。

径流的形成过程

从降雨到达地面至水流汇集、流经流域出口断面的整个过程，称为径流形成过程。

径流的形成是一个极为复杂的过程、为了在概念上有一定的认识，可把它概括为两个阶段，即产流阶段和汇流阶段。

1. 产流阶段：当降雨满足了植物截留、洼地蓄水和表层土壤储存后，后续降雨强度又超过下渗强度，其超过下渗强度的雨量降到地面后，开始沿地表坡面流动称为坡面漫流，是产流的开始。如果雨量继续增大，漫流的范围也就增大，形成全面漫流，这种超渗雨沿坡面流动注入河槽，称为坡面径流。地面漫流的过程，即为产流阶段。

2. 汇流阶段：降雨产生的径流，汇集到附近河网后，又从上游流向下游，最后全部流经流域出口断面，叫做河网汇流，这种河网汇流过程，即为汇流阶段。

• 河流的横向生态链（河流缓冲带）：

河流缓冲带是保护水资源最有效的方法之一。缓冲带内的植物，可以过滤受污染的径流，并在水体和其它功能用地间形成一片过渡区域。缓冲带是一个复杂的生态系统，能够为河流生物群落提供栖息地与避难场所。

过滤径流，吸收养分，改善河流水质

缓冲带可以过滤和截留地表径流中的沉积物和动植物残骸等粗大有机物。根据缓冲带的宽度和复杂性，附着在上面50%~100%的沉积物和有机残骸能够被吸收分解。宽阔的、草木混生的缓冲带要比狭窄的、单一草本构建的缓冲带具有更强的截污分解效率。缓冲带能够同时截留分解地下水及地表水中的污染物质。当径流流过缓冲带时，污水中的磷会被土壤颗粒吸附，去除80%~85%的磷含量。土壤的化学和生物作用，特别是依森林而构建的缓冲带，能够吸附截留大量的氮磷及其他污染物质并将其转化成低害或无害形态，担当转化器的角色。当营养物质和过多的水分被植物根系吸收并存储时，此时的缓冲带的作用就相当于一个贮存池。当然，那些来自农药化肥和畜禽粪便的氮磷等营养物质，如果超过植物能够吸收的范围时会造成水体富营养化，从而带来严重的污染。

调节河流流量，降低洪、旱灾害几率

缓冲带可以降低地表径流的流速，增大水流入渗和补给地下水。与没有植被缓冲带的河岸相比，具有缓冲带的河岸其地下水能够在一个较长的时间内以较缓慢的流速进入河流，保持河流流量的相对稳定。因此缓冲带具有明显削减河流洪峰流量，稳定河流流量的作用。

保护河岸，稳定河势

缓冲带植被有助于稳固河岸和减少侵蚀。根系将堤坝土壤紧密结合起来，茎干通过自身对水浪、冰块和暴雨径流的抵制来保护河岸。缓冲带同样可以通过吸收地表径流和降低流速来减少水流对河岸和河床的冲刷。当植被覆盖被清除后，更多的地表径流迅速流入河道中，致使在暴雨或是融雪时水头增高。强烈的水流可以冲刷河床并干扰水生生物的生存和繁衍。

为陆地动植物提供栖息地及迁徙通道，为水生生物提供能量及食物，改善生存环境

缓冲带所形成的特定空间是众多植物和动物的栖息地，这些生物中还包括在缓冲带以外很难找到的一些物种。缓冲带的不断延伸还可成为野生动植物各个群落之间的往来通道。草木丛生的缓冲带通过遮蔽、过滤和降低河水流速等作用来改善周边的水质条件，从而改善水生生物栖息地。在酷夏，特别是在小型溪流中，遮蔽作用能够维持较低的水温。凉爽的水体能够保存更多的氧气，利于鱼类和其他水生生物更好地生存。温度的小幅变化都会对水生生物的存活造成很大的影响。植物残骸对河岸、河床的侵蚀能起到很好的控制。特别是大型树木残骸滞留在河道中，会形成很好的河道梯度结构，增加河流内部流态复杂性，水流流速大幅度降低，水流带来的冲刷侵蚀减少。当水流经过枝条和树干时，由于撞击作用，增加了水中的溶解氧；由于阻碍作用，植物残骸周边的流场分布不一致，间接造成了水生动植物多样性。植物残骸除了有提供遮蔽、改变水流流态和变化水深等物理作用之外，还有许多重要的生态作用。为藻类的生长营造一片安全而平静的水面，为水生无脊椎动物提供栖息地等。大型树木残骸还能截留水流中树叶碎片和其他有机物质，成为各种动物食物的主要来源和生命活动的重要场所。

• 生态河流缓冲带构建技术：

缓冲带的连续性：缓冲带建设和恢复过程中要维护河流缓冲带的连续性，使缓冲带的功能更好的发挥出来。连续的缓冲带方便水生动植物及陆生动植物的迁移、交流。植物传播体、动物或其他物质可以通过河岸在陆地和河流之间运动，这对两栖类和爬行类是最明显的。

降低河道边坡：拓展河道，降低河道边坡的坡度，采用较大的斜坡方式和自然驳岸。

自然河道原则：河流的恢复是对人工化河道的自然修复，尽量保持和恢复河道的自然弯曲的形态，河道断面的收放随地就势，关键是保证水道能够保证不同水位和水量的河床。

水体曝气复氧:采用人工方式向水体中充氧,加速水体的复氧过程,提高水中好氧微生物的活力,增强河流自净能力,以改善水质。

生物浮床、沉床:自20年前德国BESTMAN公司开发出第一个人工浮床之后,以日本为代表的国家和地区成功地将人工浮床应用于地表水体的污染治理和生态修复。近年来,人工浮床技术的开发及应用正好处于快速发展时期。研究与应用结果表明,对藻化严重的富营养化水体修复过程中,采用人工浮床作为先锋技术可以使得一部分水生动物得到自然恢复或在人工协助下恢复。

底泥疏浚:底泥中含有大量的有机物、氮、磷、重金属等污染物质。清除水底淤泥,可削减水体内源性污染物的释放量,同时还可达到增大环境容量的目的。

引水冲污:这原先是一种湖泊净化技术,在湖泊富营养化治理中有应用实例,对于污染严重且流动缓慢的城市河流也可考虑采用。

水力调度技术:水力调度技术是根据生命体的生态水力特性,营造出特定的水流环境和水生生物所需要的环境,抑制藻类大量繁殖。采取水系连通等方式,遵循“湖程取长、渠程取短”的原则。但应注意防洪、防涝、防沙、防螺、防污染迁移和防内源释放。

人工湿地技术:人工湿地的污染净化过程涉及物理、化学、生物等多方面综合作用。人工湿地对污染河水的净化主要有以下几个途径:通过过滤和截留去除颗粒物;通过湿地介质的吸附、络合、离子交换等作用去除磷和重金属离子;通过湿地微生物作用,降解有机污染物,去除水中的氮;通过植物吸收去除水中的氮、磷、富集重金属。人工湿地净化河水的效能受湿地水流流态、水力负荷、种植植物类型和数量、温度、pH、填充介质类型、运行方式等因素的影响。

生物调控技术:人为调节生态环境中各种生物的数量和密度,通过食物链中不同生物的相互竞争的关系,来抑制藻类的生长。该技术具有以下优点:处理效果好,工程造价低,运行成本低,不会形成二次污染,还可适当提高水库的经济效益。

• 植被类型对缓冲带作用的影响:

优先选择优势物种,并加入不同种,以利于构建更加丰富的栖息地,延长落叶期,增加落叶种类,为水生昆虫化蛹提供各种食物。并能够有针对性的避免特定植物病虫害的发生。植物还能够遮蔽水体、降低水温、保证更多溶解氧的含量,使得更多的鱼类和水生生物可以生存。优先考虑有多重价值的植物,例如深根系加固堤岸,并为其它生物提供食物,供鸟类筑巢。

植被类型对缓冲带作用的影响			
作用	草地	灌木	乔木
稳固河岸	●	●●●	●●●
过滤沉淀物, 营养物质, 杀虫剂以及附着于其上的病原体	●●●	●●	●●●
从地表径流中过滤营养物质, 杀虫剂和微生物	●●	●	●●
保护地下水和饮用水的供给	●	●●	●●●
改善水生生物栖息地	●	●●	●●●
为牧场动物改善生物栖息地	●●●	●●	●
为森林动物改善生物栖息地	●	●●	●●●
提供经济作物的生产	●●	●●	●●●
提供景观视觉影响	●	●●	●●●
地质洪水	●	●●	●●●

• 河流缓冲带的宽度:

河流缓冲带的宽度(m)	说明
14	在小型的溪流中, 覆盖植被的缓冲带就具有良好的侵蚀控制作用
20	控制较大河流侵蚀的最低要求
14	过滤沉淀物质, 吸收径流中的污染物质, 并且高宽比小于15%的斜坡
40	在较陡峭斜坡, 土壤渗透能力较差地带, 过滤径流中可溶解营养物质和杀虫剂
200	如果缓冲带建立在粘土上, 去除径流中的污染物质
40	使水生生物的食物网保持健康的最低宽度
120	用于保护野生动物栖息地, 缓冲带最低宽度要求

缓冲带的宽度一般由缓冲带所要发挥的功能决定,一般认为30m是缓冲带的最小值。

廊道类型	提出者	年代	宽度 (m)	说明
河流生态系统缓冲带	Cobrett E S	1978	30	使河流生态系统不受伐木的影响
	Budd W W	1987	30	使河流生态系统不受伐木的影响
鸟类保护的廊道宽度	Tassone J E	1981	50~80	松树硬木林带内几种内部鸟类所需要的最小生境宽度
	Stauffer Best	1980	200	保护鸟类种群
	Forman R T T	1986	12~30.5	对于草本植物和鸟类, 12m 是区别线状和带状廊道的标准, 12~30.5m 能够保护多数边缘物种, 但多样性较低。
			61~91.5	具有较大的多样性和丰富的内部种
	Brown M T	1990	98	保护雪白鹭的河岸湿地栖息地较为理想的宽度
无脊椎动物, 哺乳动物以及爬行类	Newbold JD	1980	30	伐木活动对无脊椎动物的影响会消失
			9~20	保护无脊椎动物种群
	Brinson	1980	30	保护哺乳、爬行和两栖类动物
边缘效应宽度	Cross	1985	15	保护小型哺乳动物
	Ranney J W	1981	20~60	边缘效应在 10~30m
	Harris	1984	4~6 倍树高	边缘效应为 2~3 倍树高
	Wukcive	1985	1200	森林鸟类捕食的边缘效应大约范围为 600m
	Couti C	1989	1200	理想的廊道宽度依赖于边缘效应宽度, 通常森林松林的边缘效应有 200~600, 小于 1200m 的廊道不会有真正的内部生境
植物群落	Peter John WT	1984	100	维持耐荫树种山毛榉种群最小的廊道宽度
			30	维持耐荫树种槭种群最小的廊道宽度
鱼类保护通道宽度	Williamson	1990	10~20	保护鱼类
	Rabent	1991	7~60	保护鱼类, 两栖类
生物多样性	Juan A	1995	168	保护蓝翅黄森莺 (<i>Prothonotary</i>) 为理想的硬木和柏树林的宽度
			3~12	廊道宽度与物种多样性之间相关性接近于零
			12	草本植物多样性平均为狭窄地带的 2 倍之上
			60	满足生物迁移和生物保护功能的道路缓冲带宽度
			600~1200	创造自然化的物种多样性的景观结构
	Rigkubg	1998	46~152	保护生物多样性的合适宽度

• 河流生态修复的一些方法:

河流中深潭, 浅滩: 河流运动过程中, 水文动力在地形作用下形成浅滩和深潭, 是河流中众多生物赖以生存的自然生境。

河流的“曲折蜿蜒”: 河流之所以弯曲, 主要是因为河水在两岸流动的速度不同, 一边快些, 另一边则慢些。河水流速较快的一边, 河岸受到的冲击力也较大, 泥土也较易冲塌。河岸冲塌了, 便会使河道弯起来。河道弯了, 便会呈现出如 S形的河岸 (两岸犹如一凹一凸), 而且会继续发展, 水流冲向凹岸, 而凸岸的一边水流速度较慢, 河流带来的碎石和泥土慢慢沉积。经年累月, 凹岸会愈来愈凹, 而凸岸则会愈来愈凸, 河流便呈现出弯弯曲曲的外貌。

还有复杂的地形使得河流绝对不可能沿着直线方向向前流动, 这是最常见的原因之一。但就是在宽阔的平原地区, 河流也总是弯弯曲曲的。因为江河两岸的土壤内部所含的盐碱等化学成分及其数量也不可能完全溶于水, 就不同程度的改变了两岸土壤承受水流冲击的能力。由于地球自转的方向是自西向东, 这也会改变河流的直线方向, 它会使北半球的河流冲洗右岸比左岸厉害些, 而南半球的河流则刚好相反。

由于水流是在沿着曲线流动, 而当水流在某个地方偏移一些以后, 它在离心力的作用下, 要压向凹入的一岸; 同时, 河床也要脱离开凸出的一岸。这样, 河流不但没有机会恢复它的直线方向, 反而使偏移越来越大, 成了一条弯曲的曲线了, 而且曲线率越来越大。由于离心力也不断加大, 与此同时河流又不可能顺着河床一边流, 而总是从一边折向另一边, 即从凹入的一边折向最近凸出的一边。于是, 河流便呈现出了弯弯曲曲的流向。

这样经过千万年的冲刷, 无数的重复和循环, 再加上由于凸出的一岸水流速度偏慢, 泥沙的沉淀越来越多, 蜿蜒曲折的河流便形成了。

河道: 水流流动的通道, 水生动植物栖息生长的主要场所。

生态堤岸带: 临近或直接影响一部分水体的所有陆地, 包括: 河流旁的土地、河岸、常年蓄满水的集水沟、小池塘、湖泊周边的区域、湿地和洪泛区。

块石护岸: 可以抵制河道水流作用的侵蚀。影响块石抵制河流侵蚀能力强弱的因素: 块石形状、大小、重量和耐冲刷能力, 块石的物质组成、结构和特性、冲刷特征与堤角设计。

块石本身的空隙可以为植物根系的生长提供空间，在块石护岸上覆土，为植物的营造栖息生境。

翼形导流设施（侧堰）：堰顶轴线与渠道水流方向平行或近于平行的堰。

堆石堰：主体用石料填筑，配以防渗体建成的坝。它是土石坝的一种。这种坝的优点是可充分利用当地天然材料，能适应不同的地质条件，施工方法比较简便，抗震性能好等。其不足是一般需在坝外设置施工导流和泄洪建筑物。堆石坝有悠久的历史。中国公元前256~前251年修建的四川都江堰水利工程，就是用竹笼装卵石叠成的。

鱼巢：人工鱼巢

人工鱼巢主要是为那些产黏性鱼卵的观赏鱼准备的，使鱼卵受精后可以黏附其上，便于孵化。如果受精卵没能黏附在物体上，则沉到水底，或因挤压透水条件不好，影响孵化，或被池(缸)底污物埋住而腐败死亡。

人工鱼巢的种类很多。选择的原则是：制作鱼巢的材料要无毒、耐用、附着面积大，来源广，价格低；最好能漂浮在水中，散开后面积要大，便于鱼卵黏附；制作鱼巢的材料质地要柔软，亲鱼追逐碰触时不会伤及鱼体。此外，要求人工鱼巢不易腐烂，不影响水质变化，有利于受精卵孵化成鱼苗。金鱼藻、聚草、凤眼莲、水浮莲、轮叶黑藻、杨柳须根、棕榈皮和生麻丝等均可制成鱼巢。

• 土地利用方式影响河流生态系统的主要机制：

Principal Mechanisms by Which land Use Influence Stream Ecosystem	
环境因子 Environmental Factor	影响 Effect
泥沙沉降 Sedimentation	增加河水浊度，冲刷和磨损河道；破坏附着生物和生物膜的生长机制；由于初级生产力和食物质量的下降，造成食物网的上行作用；由于河道，河底缝隙生境被填充而造成占据缝隙生存的无脊椎动物和砾石产卵鱼类的减少；覆盖鱼鳃和上呼吸道表面；减少河流水深的异质性，并导致深潭物种的减少。
营养盐富集 Nutrient Enrichment	增加自养生物的生物量极其生产力，从而导致其群落结构的改变，也包括丝状藻类的增值，光线同时增强时，这种现象更加严重；加速落叶的分解速率而引起溶解氧的下降，生物由环境敏感向耐受型（常为非本地种）转变。
有毒污染物污染 Contaminant Pollution	造成悬浮沉积物与有机组织中的重金属，人工合成物质和有毒有机物浓度的升高；增加无脊椎动物的死亡率，并对其丰度，迁徙及孵化造成影响；抑制鱼类的生长，繁殖与存活率；破坏内分泌系统。
水文条件变化 Hydrologic Alteration	改变径流量与蒸散发量间的平衡，造成洪水规模与频率的增加，基流降低；改变河道动态平衡，增加河道及其周边区域侵蚀，降低洪水漫滩频率；营养盐，沉积物和有毒污染物的运移更迅速，从而进一步造成河流生境的退化；不透水地面，城市排涝系统，农业排水系统与紧实的土壤质地都对水文条件产生强烈影响。
植被缓冲带破坏 Riparian Clearing	减少阴影，造成河流温度升高，光线穿透幅度增大以及植物生长的增加；造成河岸的不稳定，减少落叶，残木的输入及降低营养盐与有毒污染物的截留能力；减少泥沙截留，造成河岸和渠道侵蚀增大；改变进入河流的溶解性有机物的特性和含量；由于直接输入的减少和截留结构的损失导致水底有机物的滞留量的降低；改变食物网结构。
粗木质残体损失 Loss of Large Debris	底栖生物取食，附着，孵化的基质减少；造成泥沙和有机物储量减少；降低河岸稳定性；影响无脊椎动物和鱼类多样性与群落功能。

+传统山水认知

从《江山秋色图》谈宋代写意山水园

包瑞清 刘静 胡浩

摘要:

宋代园林是宋城建设的一个重要组成部分，上至宋廷兴建皇家园林、官办园苑；下则官僚、贵族建造自己的私人花园，以及众多的寺院庙宇，但是除了仅存的几座宋代建筑，园林部分早已经消失殆尽。关于那个时代辉煌的园林艺术，在通过古籍文献去了解的同时，结合宋代绘画艺术探索宋代写意山水园是最直接的一种方式。

关键词:

风景园林；《江山秋色图》；宋代园林；写意山水园；

Talking about the Song Dynasty Impressionistic Landscape Garden from <Jiang Shan Qiu Se Tu>

Bao_Ruiqing

Beijing Forestry University Landscape Architecture Ph.D

Abstract:

Song Dynasty garden is an important component of the Song Dynasty City, for one thing building Royal or Government Garden, for another bureaucratic aristocracy constructing its own private garden. But besides several Song Architectures is the only remaining, garden has already disappeared. To explore the Song Dynasty impressionistic landscape garden by ancient literature, combined with the art of painting to understand the glorious era of garden art is the most direct way.

Keywords:

Jiang Shan Qiu Se Tu; Song Dynasty Garden; Impressionistic Landscape Garden;

宋朝（960年—1276年）从开国皇帝赵匡胤建都到1276年忽必烈破宋都临安亡南宋，历经三百一十六年，是我国封建社会内部一个巨大的变革时期。在距今已相隔七百多年的历史中，现今存在于世上的宋代遗构不多，山水园林更是早已消失殆尽，人们对它的了解自然无法与明清相比，然而从现有的宋代遗存建筑中，不管是创建于北宋太平兴国九年（公元984年）的晋祠圣母殿，还是建于北宋皇佑元年（1049年）的铁塔（又名开宝寺塔）都能窥视到当年的繁华与那个年代的艺术气质。在《营造法式》、《林泉高致》、《东京梦华录》、《宋东京考》等文献中，也给我们提供了可以追溯那个年代辉煌成就的途径。在欣喜能够找到探索那个时代建筑艺术的时候，对宋代园林艺术的记载资料的查找少之又少，确有记述其营造之法的记述寥寥无几，正如明人郑元勋所云：“古人百艺，皆传之于书，独无传造园者何？曰园有异宜，无成法，不可得而传也”，或许其言切中造园本质，然而造园者总须有其学习的过程，诚如绘画的临摹，广纳前人技法而后才有所为并自成一派，若有法可循，或能作为抛砖引玉之用。

现今研究宋代园林多以描绘、探索园林意境为主，像《作庭记》一样详述其造园技术的寥寥无几，同时研究宋代园林多以宋代皇家、私家园林为主，由相关古籍文献及宋人笔中的记载作为依据研究宋代园林的特征。本文则试图结合古籍文献从宋代绘画中找到园林设计的技法作为提供设计的支持或是一种尝试，结合所绘制的内容，从宋画全景式的构图中以绘画理论为基础，结合实际园林设计方法探讨写意山水园林形式。

1 <江山秋色图>



站在时间的纬度上，宏观的看待远古一直到明清中国古代绘画史，两宋时期的绘画呈现出巨大的张力，一方面来自于五代日渐成熟的绘画语言，另一方面它是中国绘画史上最为重要的历史转型期。山水画至宋代，技法、品类已全面成熟，高手辈出，画风迭变，达到了前所未有的高度。在宋人绘画艺术中，因为历史的变迁形成有不同的表达倾向，北宋时期多以游观山水为主，追求壮丽恢弘的理想境界，并且因为宋元贵族兴建园林，带动了亭台楼阁界画创作的兴盛，将文人情趣与园囿相结合，形成庭园山水，在写意山水园的探索中，根据尺度的不同，同样可以分为游观山水园与庭院山水园，本文则着重探讨游观山水园林。

游观山水追求可望、可行、可游、可居，置身其中，观赏山水风景、花草虫鱼，欣赏优美建筑和雕刻，品味庭院艺术，又可以垂钓、品茗、博弈、书法绘画，所以选择画品为长卷全景式的山水画《江山秋色图》(图1)作为探索宋代写意山水园的蓝本。

多数从绘画理论角度对古画的分析与研究中，必然会论述到画的始末及其所画的内容，对其画法的研究自然成为关注的重点，“…又因山形，石脉之势，或作皴擦，或为点跺…”，而从全景式古画中探索写意山水园技法，除了获知其绘画要点外，更多倾向于山水形态的关联及空间气势迎合变化，山水画本身就是一种设计创作，其每一峰、每一峦、每一泉、每一瀑、每一桥、每一亭、以及山林、人物无不经过精心设计，进而山水空间自然跃然于纸上，从而能将绘画中山水设计应用于实际的山水园营造中。

2 山水体系

分析山水体系，必须先明白山水的形态，并且通过名称加以确认，缕清楚景物内容后，胸中才有方略，再分析山水形态景物之间的关系，最后融入到现代的设计中加以运用。前人对山水形态的描述词汇极其丰富，基本涵盖了所有形态，不过其中很多词汇描述内容基本相同，各自具体含义只有细微差别，例如汀与滩，汀释义为：水边平地、小洲，滩释义为河海边淤积成的平地或水中的沙洲及江河中水浅多石而水流很急的地方，可见汀与滩具有部分相同释义的内容，在进一步阐释形态关系选择具体描述词汇时，可以根据这些细微的差别进行选择，如果两者都可以使用，则选择其中一个即可，或者它们的组合，例如汀渚、丘坡、峰峦等。其中描述山形态的词汇大概有：山脉、山岭、山谷、主脉、支脉、山系、峰峦、堑、峭壁、悬崖、山崖、岩、峦、洞、穴、涧、壑、坡、峰、岫、冈、壁、野筋、丘、麓、川、阜、陇、嶂、颠等；

描述水（水际）形态的词汇大概有：岛、沼、塘、洼、泽、洲、岸、泷、矶、池、潭、渊、山溪、泉、河、海、滩、汀、瀑、湖、滨、源、渠、岬、津等。

2.1 山势

《江山秋色图》中画面视域山脉走势主要为内外走势成峰像，欲有由内向外喷吐的气势，视域中部喷吐的气势逐渐增强，空间形态内凹，山脉走势东西走向渐次减弱，整体走势可以看出东西诸山脉向中部区域延伸，有环



图1: (宋)刘伯驹(传)•江山秋色图

注：“《江山秋色图》为青绿色绢本长卷，纵56.6cm，横323.2cm，藏北京故宫博物馆。

画中群山漫延起伏，峰峦、山谷、幽壑、叠嶂更替变化，瀑布、泉水和溪流、江河萦绕，映带其间。在经营位置，安排大局的基础上，树木、花草、竹林多姿多彩，亭台、楼阁、廊榭与寺观因山势而散落点缀，观山、赏瀑、张网、架船等生产活动进行其中，将山水景色和人的活动自如结合。整个画面在纵横交错中彼此呼应，局部与整体非常和谐，将雄伟的气势和画家的情趣统一为一体，流露出天人合一的况味。

引自《宋代绘画研究》

抱的趋向。山脉走势虽为内外走向，但是山脉之间多为互相穿插，有“自山前而窥山后，谓之深远”之意；而且山脉之间留有空隙，其间谷壑深邃，犹如在密集的崇山峻岭间一丝舒畅之气，山水顿生活力；山脉的延伸则多为曲折呈之字样，峰谷交错，凸凹盘缠，一条山脉本身前后掩映，营造出无限的意境空间。观察画面视域各山脉走势，空间深远、宽广应当首先考虑，空间开合当属自由布置，以合意为准，疏密有致。“山近看如此，远数里看又如此，远十数里看又如此，每远每异，所谓‘山形步步移’也。山正面如此，侧面又如此，背面又如此，每看每异，所谓‘山形面面看’也。如此是一山而兼数十百山之形状，可得不悉乎”，山的形态、表情因视域不同而差异万分，正是“正看成岭，侧成峰”，峰面峰峦交错、升起、臣服、姿态各异万千，山脉内外走势气势逼人，岭面谓之平远，连绵数里而不绝，那么山水园的营造自当首先确定山脉走势并且同时考虑峰岭的差异。“山，大物也，其形欲耸拔、欲偃蹇、欲轩豁、欲箕踞、欲盘礴、欲浑厚、欲雄豪、欲精神、欲严重、欲顾盼、欲朝揖、欲上有盖、欲下有乘、欲前有据、欲后有倚、欲下瞰而若临观、欲下游而若指麾，此山之大体也”，山的姿态丰富多样，《林泉高致》所述具详，如果能够领会它们具体的含义、精神，再营造一隅山水自然会胸有成竹。其中对山姿态描述词汇中，具体到实际形式的大概有：耸拔、偃蹇、轩豁、箕踞、盘礴、顾盼、朝揖、盖、乘、据、依；描述山气质的大概有：浑厚、雄豪、精神、严重。然而现在山水的营造，多为石砌护岸或者堆山只到山麓，汀滩之名空无，人工之气陡增，山水之味尽失，因此有必要深入的学习宋人对山水的体悟，提供营造的技术。“山有高有下，高者血脉在下，其肩股开张，基脚壮厚，峦岫冈势培拥相勾连，映带不绝，此高山也。故如是高山谓之不孤，谓之不仆。下者血脉在上，其颠半落，项领相攀，根基庞大，堆阜臃肿，直下深插，莫测其浅深，此浅山也”，其中高山之“基脚壮厚”与浅山之“堆阜臃肿”都一定程度上表达了山的基脚要有一定的力度感，有“直下深插”之势，故山之基脚多圆厚，等高线的分布自山麓密而至上逐渐减疏。

2.2 水脉

“山以水为血脉，以草木为毛发，以烟云为神彩，故山得水而活，得草木而华，得烟云而秀媚。水以山为面，以亭榭为眉目，以渔钓为精神，故水得山而媚，得亭榭而明快，得渔钓而旷落，此山水之布置也”，

《江山秋色图》里水脉有7条，或为低瀑、溪流，或为深潭与飞瀑，或为河样，水脉强度关系变化和谐，自然位于山谷之中，谷的大小、宽窄与水脉的尺度相关联，高低起伏，远近悠扬。同时注重水远端位置关系像山脉一样，前后掩映，锄锋与锹形连绵交错，使其成S型态，曲曲有情与山脉互为缠绕，水脉忽隐忽现，空间深远。海河之样水际多为滩涂，其汀样平坦多丘，随河流冲刷的态势，或凸或凹，型尖如锄锋，凹似锹形，又随海河之水涨落，汀形变化无穷；汀尖之处渐没于水中，树木、山石踞后而置，或伴石矶突于水际，汀滩多皱纹为水力冲刷所致；汀形诸样丰富，因地质不同亦差异万千，或为土丘陂陀，或夹以砂石，或为伏草，或多芦荡，山水的营造宜因地制宜，选择形式，塑造各种风情；岛渚之形在《作庭记》中论述详细，其诸样为山岛、野岛、杜岛、矶岛、云形、霞形、州滨形、片流样、干濕杨、松皮样，这些形态描述都是来自真实的山水，而岛渚之外缘形态多似汀形，似乎受到水的侵蚀一样，模拟真实的自然形态。而瀑布亦称跌落，为河水在流经断层、凹陷等地垂直跌落，瀑布本身因为侵蚀，必然会随着时间的推移，向上游消退。瀑布依据外形和地形构造，有多种分类：

- 1.据瀑布水流的高宽比例划分：垂帘型瀑布，细长型瀑布
- 2.据瀑布岩壁的倾斜角度划分：悬空型瀑布，垂直型瀑布，倾斜型瀑布
- 3.据瀑布有无跌水潭划分：有瀑潭型瀑布，无瀑潭型瀑布
- 4.据瀑布的水流与地层倾斜方向划分：逆斜型瀑布，水平型瀑布，顺斜型瀑布，无理型瀑布
- 5.据瀑布所在地形划分，名山瀑布，岩溶瀑布，火山瀑布，高原瀑布

瀑布种类多元，形态各有风采，《作庭记》中所描述的类型有向落、片落、离落、梭落、布落、丝落、重落、左右落、横落等，不仅对瀑布的表现类型分化得很细，并给出了立泷之法，为园林师提供了详细的参考。瀑布理法必须先定水流形态，然后精心设计水流线，置水落石，水落石受水面承接水流，如多横襞，水流激其面，多翻越，水落面多顺襞，襞之大小确定水流分向的广狭。水落石两侧为肋石之态，或为山壁、或为置石，控制水流的主要方向。

3 理石

理石前人多有论述，其中《园治》中就详述了掇山的方法，但是宋代多为置石，强调的是自然野趣。《作庭记》对置石论述详细，从立石要旨到立石诸样均有介绍：，例如

“因地形，就池状，于其要处，巧设风情，师法自然山水，随宜因之而立石”；

“由正面可见反桥下部者，大忌，故于桥下多立大石”；

“池中立石，若于池底布置入诘石，以为支撑，坚固之用，即时经年历久，也无倒崩之虑，且于枯水时，其形宜佳”；

.....

同时也论述了立石诸样，分别叙述了大海洋、大河样、山河样、池沼样、苇手样等，论述颇为精要；

置石的方法论述与理山相似，首先要缕清楚山石的一些描述名称，例如峰、岭、壑、岫、岩、壁、谷、涧、陇、坡、丘等，然后再加以运用，然而石的形态万千，组石的方式多样，现有不少文献记载相关置石的方法，例如如山石踏跺、蹲配、抱角、镶隅以及孤置、对置、散置、群置等。日本园林里论述置石的方法是由石的位置形态与功用详细对各石命名，例如守护石、副石、月阴石、水盆石、桥夹石、二神石、请造石、座胴石、上座石、游鱼石、跨石、拜石、座禅、礼拜石、引瀑石、童子石、受水石、分水石、鱼头石、鱼手石、鱼脚石、水鸟石、垂钓石、落水石、尘流石、客拜石、腰息石、安居石、吐影石、虎溪石、豹阴石……，从对石的命名可以推知石的用途和对石的隐喻他的存在，使置石有理、有意、石之有味，与宋代之后追求繁缛而失之本质与内容的掇山形式迥然有异。

4 建筑

“在世之笃论，谓山水有可行者，有可望者，有可游者，有可居者。画凡至此，皆入善品。但可行可望不可居可游之为得，何者？观今山川，地占数百里，可游可居之处十无三四，而必取可居可游之品。君子之所以渴林泉

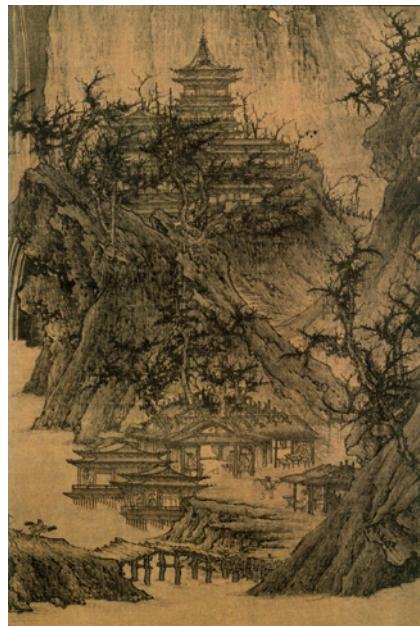
者，正谓此佳处故也。故画者当以此意造，而鉴者又当以此意穷之，此之谓不失其本意”，又言“山之人物以标道路，山之楼观以标胜槩，山之林木映蔽以分远近，山之溪谷断续以分浅深。水之津渡桥梁以足人事，水之渔船钓竿以足人意，大山堂堂为众山之主”，宋山水画中多有人文部分，或为建筑桥梁，或为栈道石级，或为船只码头，或为车马牲畜，或为人物，山水的营造目的，自然是为生活在城市中的人们以自然之趣，因此必然会存在人文事物，满足功能上的需求，也是用以标道路、胜槩、足人事、人意。《江山秋色图》中建筑位置基本位于可攻可守之处，屋前视野开阔，屋后高山守护，位于山麓汀渚处建筑或深入水中，或居于岸际；山麓丘陵处多位于山凹处，成环抱形；山岬处多有大型建筑群组，依山势层层跌落，气势滂沱；山腰多有突出平台、居上围栅栏或建廊，可凭栏远眺，并有屋多间；峡谷溪涧处多为桥廊，下为深谷，可供行人临时驻足远眺。

4.1 桥梁

宋代绘画里的桥梁是画作中重要的点睛之笔，桥的架设意味着溪流河谷、山涧沟壑，与其所处的自然环境紧密相连。《江山秋色图》中所出现的桥梁形式多样，共有七座，弧形梁桥、拱桥、折线梁桥、平桥及廊桥、虹桥。桥梁虽然多作为配景出现，但是功能彰显，“水之津渡桥梁以足人事”，它提示人行和车马的方向，例如建筑的入口、山涧和山崖的关节；在桥梁形式的选择上，必然不是凭空放置，形式与桥所处的环境相协调，或为荒山、或为村野、或为别墅与城区；桥的规格等级层次分明，从朴实无华到精雕细琢，从简易梁桥到美轮美奂的虹桥。根据桥的形式可以归纳为弧形、折线形、折形平板、廊桥等。桥的构造以木桥为主，也有石桥，晋祠圣母殿与献殿之间架有鱼沼飞梁为北宋与圣母殿同时修建，“此式石柱桥，在古画中偶见，实物则仅此一孤例，洵为可贵”。《作庭记》中亦有对桥设计的意见“由正面可见反桥（拱桥）下部者，大忌，故于桥下多立大石。岛上架桥，当避阶隐（抱厦）之正中，宜想错而置，以桥之东柱，对阶隐之西柱。（秦殿造庭院，池岸与中岛间所架之桥，一般前为拱桥，后为 平桥）”。与桥相类似，在《江山秋色图》中可以看到多处绘有栈道，置于山麓、峭壁、山脊或山谷处，其势陡峭、险要，材料多为木材，树枝铺设，架设方式有直接铺设或在险峻之处挑出成悬臂式，一般设有栏杆。栈道的设置以架设的方式处理，避免了对自然环境本身过多的干扰，成为虚实相生融入环境的优美景观。

4.2 建筑

宋画中建筑多以崇宁法式为基调，整体风格去唐五代的硕大而易以纤靡，实际宋代山水园营造中，园中的主建筑宜秀整，如雨花宫、晋祠；点景建筑、临水阁榭宜装饰绮丽、精巧如团扇画；村舍茅屋宜朴实简洁，憨中带巧，无规制之束缚而留晋唐古制；园入口建筑易于雄劲而醒目。而宋代绘画中表现出的另一番建筑风格则是山水画中江南意向的淡雅，以李唐、马远、夏圭、刘松年为代表，画中的建筑多是依《法式》建造，斗栱、脊兽、彩画皆具，只是融于山水中而不分你我，山水秀而亦秀，这正是宋山水园林所追求的建筑与山水一体而随山水淡雅的意境。在宋代绘画中体现的建筑组合大致分为两类：一类是宗教建筑的寺庙院落，一类是宫苑建筑群。塔与楼阁是寺庙院落里常用到的元素，代表作为李成（传）的《晴峦萧寺图》（图2），这种塔下屋顶环绕的建筑格局成为中国建筑布局的经典格式；宫苑建筑因为历代政权更替而少有保存，以隋唐离宫九成宫为题材的绘画集中反映了宋代宫苑建筑布局的古典风格。除此之外，刘松年《四景山水图》中的别墅建筑组合也是宋代院落的代表。论及北宋建筑类型，宋代李诫著的



《营造法式》给出了最为宝贵的参考资料，《营造法式》是我国古代最为严密和科学的建筑专业技术典籍，系统全面的记载了宋代建筑的制度、做法、用工、图样等珍贵资料。宋代绘画中园林建筑分为木构建筑主体和杂式两类。按照《法式》，可以把木构建筑主体分为柱梁、厅堂、殿阁三种构架类型。宋代遗构中多为殿阁厅堂混合式与厅堂式，宋画中可见柱梁式房屋。按屋顶类型可以分为悬山（不厦两头造）、攒尖、歇山（厦两头造、九脊殿）、盔顶、船篷顶和庑殿（四阿顶）。按屋顶瓦作分类，首先分为茅草屋（多见于宋画中的草屋、四角亭，如《清明上河图》、《千里江山图》）和瓦屋，瓦屋中又按脊作分为简单的瓦脊（高士图轴）、兽头（水殿招凉图）和鸱尾（清明上河图城楼）。宋画园中建筑以瓦脊居多，茅草屋和施兽头者次之，屋脊鸱尾没有或置一、二。

然而，《营造法式》中尚未论及建筑布局的方面，因此对于宋代建筑布局的方式，宋代绘画作品仍旧给出了最为直观的表达。除了《江山秋色图》，王希孟的《千里江山图》崇山峻岭、江天浩渺、屋宇寺观、桥梁舟船，气势雄壮开阔，绘有的大量建筑物，住宅、园林、寺观、酒店、桥梁、水磨以及舟船，对于了解宋代建筑布局，具有一定的参考价值。宋代建筑尤其园林里建筑布局不像明清建筑多用游廊相接，而是重于位势和点缀，这在小幅山水中表现尤为突出。建筑在画面中的位置、大小及其与周围山水的关系是画家经营的重点，也是山水园设计布局的重点。

5 结语

虽然我国古代造园两千年来的发展千姿百态，然而时至今日多为明末清初所营造的园林，反映的也仅是古代灿烂造园文化的余辉，“遗构的淹没，史料的缺乏，使得对早期造园及其演变过程的研究成为我国造园史研究上的难点及薄弱环节”，但是“礼失而求诸野”，通过借鉴东亚造园体系，尤其日本园林能够完善和拓展自己的造园体系方式，尤其形成于与中国宋代时期基本平行的日本平安时代（781-1185）后期的《作庭记》在辅助研究中国宋代的造园技术具有重要作用，能够明显的察觉到该书所描述的造园技术与宋代绘画艺术具有潜在的内在联系和共鸣，所以对于宋代写意山水园的研究必然不能缺失《作庭记》所描述的造园技艺。

宋代时期的中国古典园林走向成熟与当时山水画的发展是无法分开的，宋代的园林宫苑山水造景与山水画艺术相互涵泳是不争的事实。诗画艺术所确定的创作品鉴方式对当时园林造景有直接的影响，造园与山水画造境均源于“林泉高致”这一理想，“君子之所以爱抚山水者，其旨安在？丘园养素，所常处也；泉石啸傲，所常乐也；渔樵隐逸，所常适也”，山水绘画与造园、品园的基本思想，宛自天开、功期造化是它们共同的旨归。以《江山秋色图》为触发点，结合古籍文献和其它的宋代绘画来研究已经尚无宋代园林遗存的写意山水园，能够窥视当时造园艺术的技术。

参考文献：

- [1]潘谷西,何建中著.《营造法式》解读.南京:东南大学出版社,2005.11.
- [2]梁思成著..《梁思成全集-第七卷》.北京:中国建筑工业出版社,2001.4
- [3]张十庆著..《作庭记-译注与研究》.天津:天津大学出版社,2004.5
- [4]邓乔彬著.《宋代绘画研究会究》.河南:河南大学出版社2006.10
- [5]周宝珠主编.《宋代东京研究》.河南:河南大学出版社,1992.4
- [6]卢辅圣主编.《界画楼阁-中国山水画通鉴》.上海:上海书画出版社,2006.6
- [7]宋,孟元老.《东京梦华录》.
- [8]周维权著.《中国古典园林史》.北京:清华大学出版社,1998.8
- [9]宋,郭熙.《林泉高致》.
- [10]丘挺著,《宋代山水画造境研究》.山东美术出版社.2006 .7
- [11](日)池田二郎 著 陈吾译.《日本造园设计与鉴赏》.中国科学技术出版社出版.1992.5
- [12]刘托.两宋私家园林的景物特征,建筑史论文集》第十集,清华大学出版社1988年版

注:

山系：几个相邻山脉组成一个山系；

山脉：山脉（英文名称为Mountain）地质学范畴，指呈线状延伸的山地。沿一定方向延伸，包括若干条山岭和山谷组成的山体，因像脉状而称之为山脉；

主脉：相邻构成山脉主体的山岭称为主脉；

支脉：从主脉延伸出去的山岭称为支脉；

川：1- 河流：名山大～，～流不息。2- 平原，平地：平～，米粮～；

岭：山，山脉：山～，分水～，～脊（山脊）；

嶂：形容高险像屏障的山：层峦叠～；

岫：Xiù：1-山洞：“云无心以出岫，鸟倦飞而知还”。岫居。岩岫。2-山：远岫。巫岫；

岩：1-高峻的山崖：～壁，～壑，2-构成地壳的石头：～石，3-险要，险峻：～险，～邑，4-山洞：中空成～，～居穴处；

堑：防御用的壕沟，护城河：～壕。天～；

陇：古同“垄”，土埂；

洞：窟窿，深穴，孔：～穴，山～，～箫，空～，漏～，～府，～天；

谷：水流会聚的地方；

穴：窟窿：孔～。石～。～居。～隙。龙潭虎～；

悬崖峭壁：高耸陡峭的山崖；

峰：高而尖的山头：山～。～巅。～峦。高～。险～；

颠：最高最初的部分：～末（本末）。山～；

峦：高耸陡峭1-小而尖的山：岗～，峰～。2-连着的山：山～起伏；

冈：山脊：山～。～峦；

坡：1- 倾斜的地方：山～，下～。2-倾斜：～道；

壑：坑谷，深沟：沟～。丘～。千沟万～；

阜：土山：高～。如山如～；

丘：小土山：土～。沙～。～陵。～壑；

野筋：像筋的东西：钢～；

麓：山脚下：山～；

壁：陡削的山崖：峭～。～立；

皴：中国画技法之一，涂出物体纹理或阴阳向背：～法。～笔；

蹊径：亦作“蹊迳”。1.指小路。《吕氏春秋·孟冬》：“备边境，完要塞，谨关梁，塞蹊径。”；

岬：1.-两山之间：山～。2- 突入海中的陆地：～角（突入海中陆地的尖端）；

岸：水边的陆地：河～。上～。两～；

滨：水边；近水的地方：海～。湖～；

滩：河海边淤积成的平地或水中的沙洲：～头。～涂。河～。海～。盐～；

汀：水边平地，小洲：～洲。绿～。～线（海岸被海水侵蚀而成的线状痕迹）；

河：水道的通称：～道。～沟。～谷。～流。～滩；

瀑：～布] 水从高山陡直地流下来，远看好像挂着的白布。简称“瀑”，如“飞～流泉”；

泉：从地下流出的水源：～源。～瀑。甘～；

源：水流所从出的地方：河～。泉～；

涧：山间流水的沟：溪～，山～；

矶：突出江边的岩石或小石山：燕子～。采石～；
溪：山间不与外界相通的小河沟；
渊：1-水中的陆地：沙～，～渚。2-大陆及其附属岛屿的总称：七大～；
潭：水深之处：深～。泥～。水～；
池：江边水塘，多指人工挖的：～子，水～；
渠：水道，特指人工开的河道或水沟：～道（亦指途径，门路）。沟～；
沼：池子：池～。～地。～泽；
泷：急流的水；
洼：凹陷的地方：水～儿
洲：深水，潭：～水。～谷。～林；
湖：陆地上聚积的大水：～泊。～泽。～滩。～荡。～光山色；
津：渡水的地方：～渡。关～；
海：靠近大陆，比洋小的水域：～洋。～域；
塘：堤岸，堤防：～坝。～堰。河～。海～；
泽：堤防水积聚的地方：大～。湖～。润～（潮湿）。沼～；
岛：江海或湖泊里四面被水围着的陆地：～屿。半～。海～。～链；
渚：1-水中的小洲，2-水边；
峡：1-两山夹着的水道，2-指两山之间：～谷（狭而深的谷地）；

基于FLOW 3D 水流模拟主要参数的设置：

FLOW 3D :

<http://www.flow3d.com/index.html> 官方网站

1980年，由 Dr. C.W. Hirt 创立的Flow Science于美国新墨西哥州 Alamos 成立，其目标是提供一套计算精确的 CFD (计算流体力学) 软件。

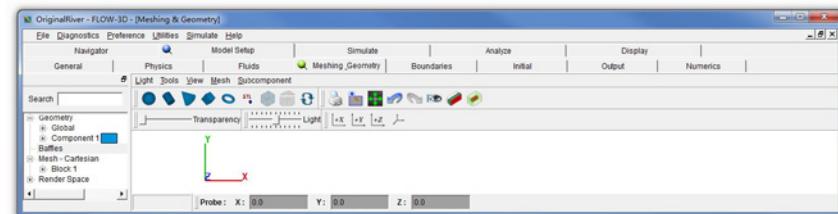
1985年，FLOW-3D 商业版正式释出。其特有的VOF (Volume of Fluid) 计算技术，能够提供极为真实且详尽的自由液面 (Free surface) 流场信息，在产品开发上可作为非常重要且可靠的参考依据。

由于其精确而稳定的特性，20多年来，FLOW-3D 已受到如美国火箭实验室、海军、英国水利署、利物浦大学、通用汽车及 HP…等许多重要研究单位与国际性厂商的肯定。

FLOW-3D的应用范围：

水力工程	环境工程
• 水力发电厂设计	• 海水养殖
• 冲刷效应(桥梁, 桥墩)	• 环境污染/扩散
• 沉降池	• 潮汐/河口效应影响
• 洪水与侵蚀控制	• 轻水池设计 (取水泵)
• 鱼梯设计	• 沉积物处理分析
• 河流生态修复	• 分离器
• 堤坝设计	• 混合釜
• Parshall Flumes 帕歇尔水槽	• 过滤
• 水跃现象	• 沉淀池
• 涵闸工程	• 淤泥池

STL格式几何图形的输入与分析网格设置：

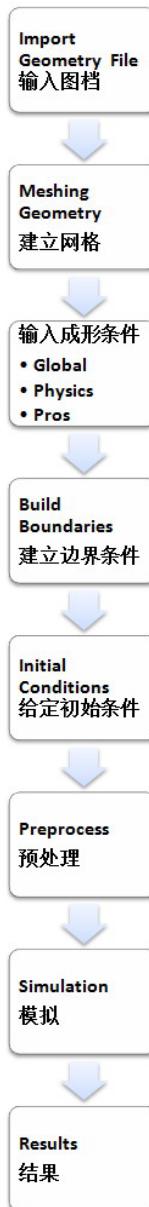


在Model Setup /Meshing Geometry下可以输入stl文件，包括ASCII与Binary格式，能够与其它三维模拟软件下设计的模型相结合。方便设计与模拟的同步进行，而不必在花费时间在模拟几何模型的构建上。这也是为什么选择Phoenics与Flow3D进行模拟重要的一个原因。在Meshing Geometry下同时可以设置Mesh (Cartesian) 。

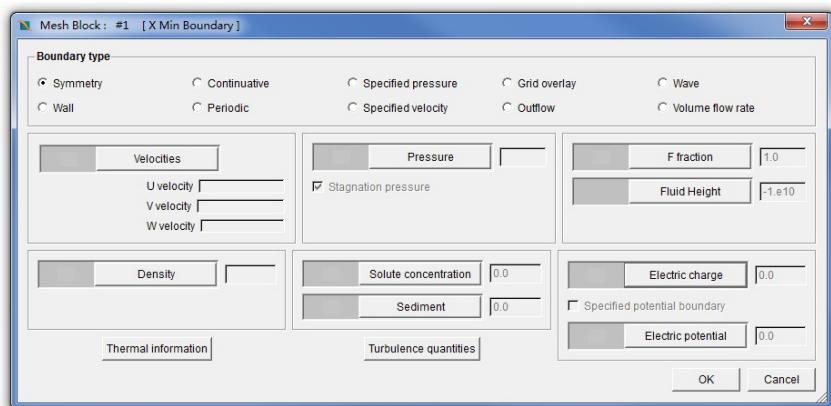


FLOW 3D标准的分析流程：

注：目前市面上尚无讲解FLOW 3D的中文教程，可以结合其自带的帮助文件加以学习。



FLOW-3D的边界条件:



- Symmetry:** 默认情况下，网格的各个边界均定义为Symmetry对称型边界，意味着没有任何属性特征的变化，没有剪切作用；
- Continuative:** 连续边界，代表流体空间上已经到达一稳定状态，流体变量如速度、温度或压力在通过边界时为定值，没有加速度。

在很多模拟中，流体需要在一个或多个计算区域边界流出。在这样的流出边界，什么样的边界条件是适合的，在可压缩流动中，在流出边界、流出速度为超音速时，因为流体扰动不会影响上游流体，指定的边界条件差别不大。

然而在低速不可压缩流中，流出边界的流体扰动，将会影响整个计算区域流体。

最简单和最常用的流出边界条件就是Continuative边界，Continuative Boundary条件由边界所有数量为零的法向导数组成。零法向导数使得流出边界的流体平稳连续。必须强调的是，Continuative Boundary Condition 没有物理基础。在一定程度上，它是数学式的陈述，提供期望的流体行为。尤其在计算区域内，观察到流体通过这样的边界，因为在边界外部流体存在的条件并没有被指定，计算可能会出错。

在FLOW-3D中，一个特别增强的Continuative Boundaries用于改善流体计算。如果流体试图进入计算区域并通过这样的边界，剩下的计算必须这样。

然而Continuative Boundary Condition必然视为可以怀疑的。作为通常的规则，一个物理意义上的边界条件，例如Specified Pressure Condition，在任何时候都有可能作为流出边界条件。当用Continuative Conditon 时，确定该边界远离流体区域，那样对主要流体的负面影响将会减小。

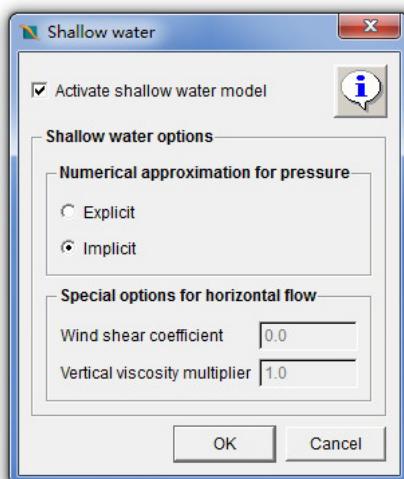
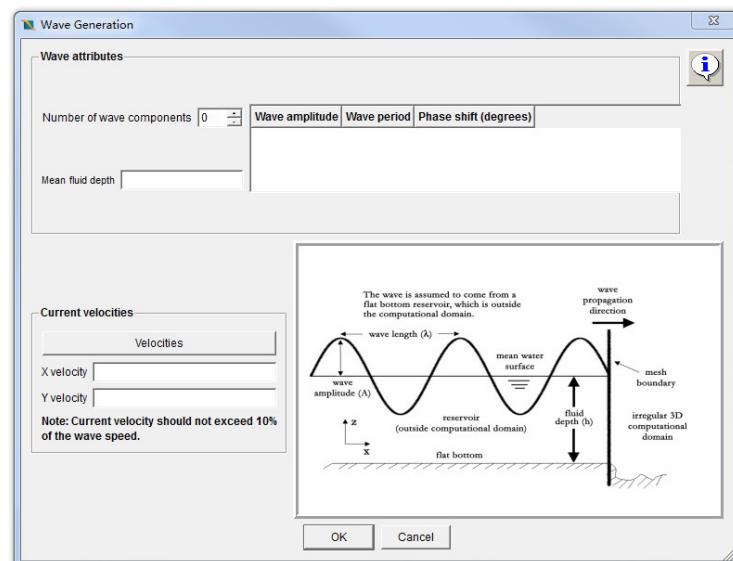
- Specified Pressure:** 边界压力可以用于流体的流入和流出边界，值为固定a Static Pressure或随时间改变的滞点压力，a Stagnation Pressure(为默认条件)。滞点压力边界条件是假定网格分析区域外部近似为一个大的储层流体，因此进入分析网格域的流体从速度为0开始加速流入。

固定压力边界不会使流入与流出的流体承受任何的加速或减速，例如在一个连续不变恒定直径的管道中的流体。

一般来说，滞点压力边界更加符合实际。固定的压力边界则可能导致不正确的计算，而对于指定的边界压力条件，不管选择固定的或者滞点压力边界，对出流都不会有所影响；

- Grid Overlay(GO):** 在重新启动计算的时候，计算网格条件可以发生改变，如果初始条件网格与重启网格具有相同的格式，计算网格条件是可以主观改变的。the Grid Overlay(GO)边界条件就是用于从原有网格条件向新网格条件传输数据的。当选择GO时，不需要设置特别的参数。

- **Wave:** 波可以用于定义左 (XMin)、右 (X Max)、前 (Y Min)、后 (Y Max) 网格边界。它是给定波高、波长、周期、相位差 (以度数为单位) 以及平均流动高度的多样正弦曲线表面波;
- **Wall:**
- **Periodic:**
- **Specified Velocity:** 速度边界、数值可以固定或者时变，并在边界上为均匀分布;
- **Out Flow:** Continuative或者Out flow边界类型常用来设置流出边界条件。对于Continuative连续边界类型，在流出边界法线方向流出参数变化梯度为0; Out Flow是另外一种类型的流出边界，是使用Sommerfeld radiation condition 索末菲辐射条件最小化输出波的反射。Out Flow中有一个选项Allow fluid to enter an outflow boundary，允许流体在Out Flow流出边界进入，它是主要考虑线性波在该边界条件下的变化;
- **Volume Flow Rate(VFR):** 用于指定进入边界的流体体积流速，可以设置流体流入方向 以及进入流体的高度 (高度设定在Z轴方向上);

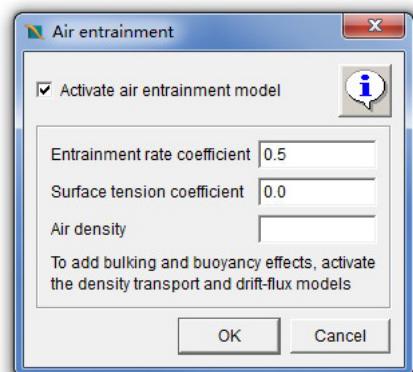


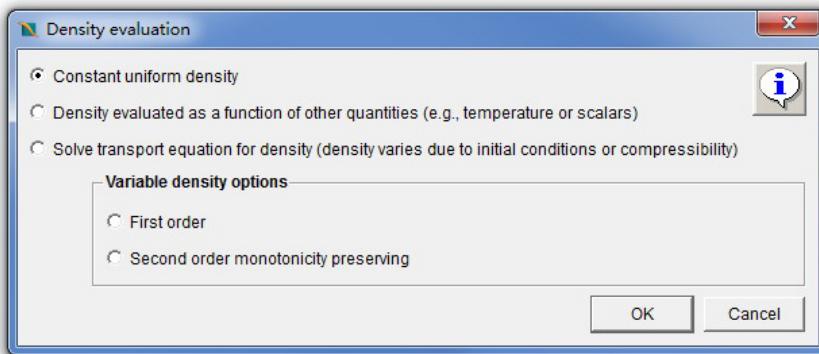
FLOW-3D物理模型(部分说明) :

- **Shallow Water:** 浅水波方程式是使用当河流水平流动远大于垂直流动的一种简化模式。Shallow Water一般应用的范围：海洋、河口流、季节性的洪水甚至汽车挡风玻璃上的雨水。所有流体垂直方向的物理量都会用垂直的平均值近似，忽略垂直方向加速度。Shallow Water可以有效的减少内存的需求，不过在水深垂直变化激烈的流场不适合使用这个模式。



- Air Entrainment Model 主要的生成原因是由于流体在流动的过程中并入一些微小的空气，需要考虑卷气的一些工程问题：
水处理净化过程需要空气来维持水中微生物的活动；
河川需要基本的含气量来维持鱼类的生存；
发电设备中下游的溢洪道，卷气量可以降低穴蚀对溢洪道基座损害的几率；
水跃往往伴随着卷气的生成；
金属铸造的浇口与流道系统；





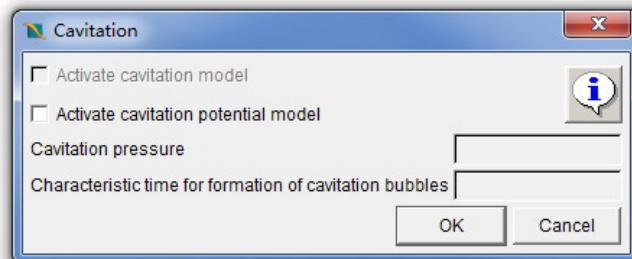
- **Density Evaluation:** 需要启动变密度模式的一般情况:

油在水中的渗漏状况; 温度差造成的湖水密度分层; 卷气造成的密度变化;

Density Evaluation允许在具有自由液面的单一液体下模拟此类问题。

变密度模式除了了解原本单一液体方程式以外，多考虑密度传输方程。Second Order Scheme 可以降低两种不同密度间流体的数值扩散。

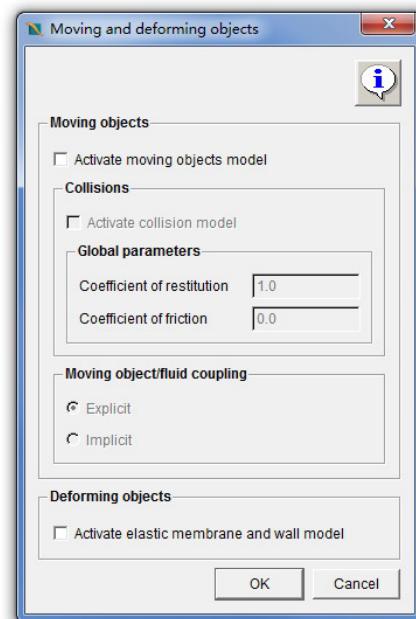
(温度差异导致水体的分层效应，其中靠近底层的水体温度较低，密度较大，表层的水体温度较高，密度较小。)



- **Cavitation:** 穴蚀现象的生成，主要是因为流体流动造成流场中局部的压力低于流体的蒸汽压，此时可能会有气泡产生，破裂、穴蚀将会导致水工结构物的损害，预测穴蚀可能发生的区域是水利工程中很重要的问题之一，穴蚀可能发生在许多水工结构中例如：溢洪道Spillways、净水池Stilling basins (阀门Valves、导管Pipes)；

- **Moving and Deforming Objects:** 允许对象在整个计算区域中移动与旋转（可以在任意方向），可以给定固体移动方向，或是完整的流固耦合运动（移动轨迹由使用者自行定义，流固耦合固体的运动由流场决定）。

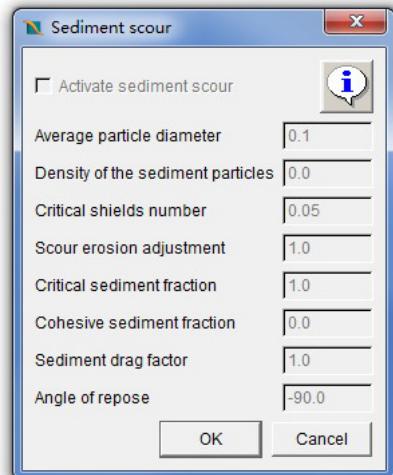
在物力模式列中，点选Moving and deforming objects可以在那里控制物体运动、碰撞和变形的性质，可以在Meshing and geometry 编辑物理的形状和物理性质；



- Sediment Scour:** 模拟沉积物的侵蚀，移动和沉淀。漂移的沉积物会在静止的流域沉淀，变成河川底床的一部分。沉淀后的沉积物可能被侵蚀，然后随着河水流动。

侵蚀模式的假设（流体固体接口变化需借由经验公式，侵蚀的速率可由实验调整）；

悬浮模式的假设（漂移，沉淀与沉积物的再悬浮）；



FLOW 3D辅助河道（局部区域）的分析与设计：

河道的设计是规划师、景观设计师经常涉及的内容，经常采取的计算机设计辅助的方式往往是单纯的AutoCAD等高线模式，AutoCAD模式可以三维显示等高线的变化，但是仅仅限制于辅助制图、分析模拟部分，例如显示分级的高程，水动力的模拟，坡度、坡向等。基本水文数据单纯依靠AutoCAD，必然力不从心。同时，仅依靠手工调整等高线的方式，增加了设计师不少的额外时间，降低了设计的乐趣。

目前，以计算机辅助分析设计的方式处理景观河道设计的问题，尚且无法仅用一种软件包揽，需要几个软件间的配合，基本采用的方式是以土方工程为主的AutoCAD Civil 3D处理基本的地形河道的设计，设计的调整也是在Civil 3D里完成，部分分析例如坡度、流域、方向、坡面，以及最后的土方施工图Civil 3D都能够方便的协助设计师处理完成。同时，将处理完成的曲面导出为DWG格式的文件，在RHINO (Rhinoceros)、SU (Sketch Up)、3DSMax或者MAYA等三维建模软件中导入，在这里使用的是Rhino，结合建筑设计（例如室外剧场、休憩平台、散步道、休闲茶室、咖啡吧设计）深入调整河道地形的设计，同时在不同的深入设计阶段，可以将RHINO、3DMAX文件导出为STL格式文件，导入到FLOW-3D中进行水动力模拟，也可结合ARC Gis，进行不同水位的重分类，确定不同植物的生境区域，坡度，坡向，水文等。

设计之前需要拿到相关的水文资料，防洪评估报告等由相关水利部分专业人员完成的文件。

本次模拟的部分河道河流基本情况：

- 河流水系

模拟河道为河北北戴河新河部分，该河发源于抚宁县栖云寺东北麓，后入北戴河区，全长15公里，其中14公里流经北戴河区甘各庄、蔡各庄，从赤土山大桥如海，流域面积50.7km²。此河属于山溪性河流，春季流量很小，汛期流量较大，年平均径流量740万m³/a。

- 流域洪水

秦皇岛市属温带半湿润季风气候区，自十月至次年五月为极地大陆气团控制，气候干燥，雨雪稀少。六月至九月处于热带海洋气团与极地大陆气团交织地带，气候湿润多雨，为本区域的雨季。七月中旬太平洋副热带高压加强北上，当脊线推至北纬30°以北，本区域易出现暴雨，八月下旬太平洋副热带高压南撤，暴雨基本结束。造成本区域暴雨的水汽来源，主要是来自西南孟加拉湾或南方的东海和黄海，水汽以低层水平输送为主。造成本区域暴雨的天气系统主要有西来槽，切变东蒙低涡，西南涡及台风倒槽等。

秦皇岛市由于所处地理位置及气象条件所致，历史上洪涝灾害频繁，建国后发生较大洪涝灾害共有4次，分别

为1949年、1959年、1962年、1977年。流域内洪水主要由该区域暴雨形成，暴雨会流时间短，洪峰具有峰高、量大、历史短的特点。洪水大多发生在每年的7月下旬至8月上旬。

• 水文气象

秦皇岛属东亚暖温带大陆性季风气候区，该区四季分明，春季干旱多雨，夏季降雨集中，秋季天高气爽，年平均气温在10.1℃，7月份最高平均气温24.7℃，1月份最低平均气温为-6.8℃，极端最低气温-27.2℃，极端最高39.4℃。无霜期183d，结冰期120d，最大冻土深度109cm，年日照时数2697h。多年平均风速3.0m/s，最高风速19m/s。

秦皇岛市降水丰富，多年平均降水量658.0mm（1956年～1993年统计资料，《秦皇岛市水文手册》），降雨年内及年际分配不均，丰枯相差悬殊，年内降雨量的70%集中在汛期，多以暴雨形式出现，暴雨多出现在7、8月份。降雨年际变化也很明显，最大年降雨量为1170mm（1969），最小年降雨量为387.7mm（1982）。

秦皇岛市依山傍海，潮汐是秦皇岛市的一个重要特征。秦皇岛市海区的潮汐类型是在接近无潮点的山海关到北戴河之间为正规日潮汐，即在一个太阳日内出现一次高潮和一次低潮。在北戴河至滦河口之间为不正规日潮。秦皇岛海区以潮力弱，潮差小为其显著特点，据实测，秦皇岛海区历史最高潮1.65m（国家85高程，下同），出现在1972年7月26日，最低潮为-2.279m，出现在1973年12月24日，汛期（6～9）多年平均高潮位1.121m，平均潮差0.74m，最大潮差2.43m。

• 现状河道，已建水利工程及其它工程设施情况

所选项目区域地势平坦，内为林地、耕地，植被多以粮食作物和经济作物，树木有果树、杨树、柳树。

新河区域河道主河槽约6～10m，左岸边坡约为1：1，堤顶与河底高差约为3m，堤顶外侧以林地为主，右岸边坡约为1：0.5，河岸与河底高差约为3m，河岸为自然冲刷河岸，河岸外侧以耕地为主，项目区段内现有两道拦水闸，而且该项目工程范围内有两道地下电缆穿越新河。

• 水利规划

新河区域河段，依据中华人民共和国国家标准《防护标准》（GB 50201—94），河道采用20年一遇标准，50年一遇校核标准，防洪评价标准为20年一遇。计划治理河底宽度不小于30m，两岸河道上口宽度不小于50m，主要采用自然景观河道治理方案，并且河道两岸需各留10m宽的护堤地。

• 设计洪水分析

工程涉及河道桩号		拟建项目段洪水计算成果表				
		项目工程以上流域面积 (km²)	重现期			
			20 年		50 年	
C _p	流量(m³/s)	C _p	流量(m³/s)			
8+670～9+410	13	41.28	182	58.32	257	

• 洪水位分析

拟建项目段河道洪水位推求条件表					
重现期	起推水位 (m)	其推处设计河底高程 (m)	拟规划河底宽度 (m)	拟规划河道边坡	拟规划河道纵坡
20 年	6.81	4.69	30	1 : 3	1/1000
50 年	7.59	4.69	30	1 : 3	1/1000

注：表中数据高程系为国家 85 高程系

拟建桥梁工程跨河道提防工程级别为4级，提防不允许越浪，安全加高值取：0.6m。

• 建设项目防洪安全分析

拟建项目防洪安全分析主要是分析拟建项目对防洪标准是否满足国家标准。

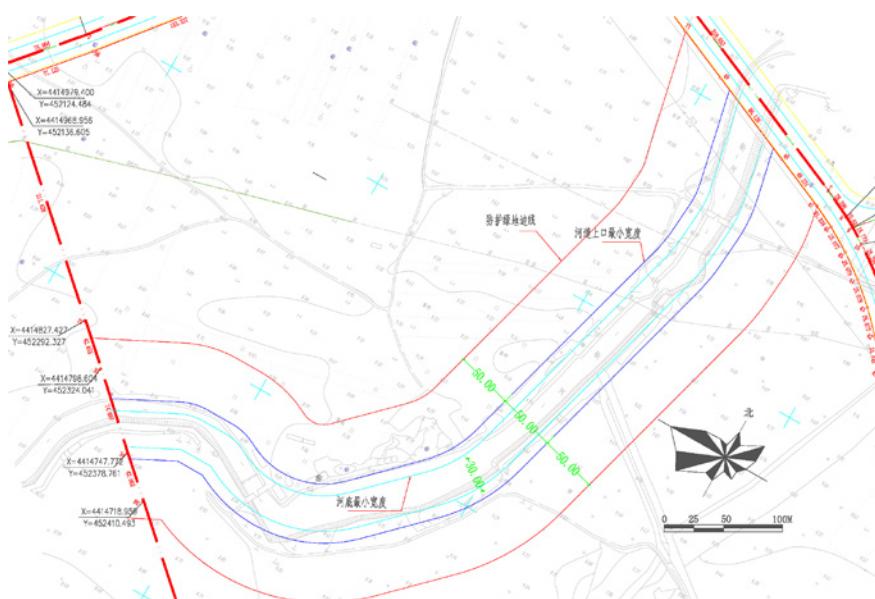
根据拟建项目规模，依据中华人民共和国国家标准《防洪标准》（GB50201—94），最终确定拟建项目防洪标准为20年一遇。

项目区现状地面高程基本保持在8.5m～10.1m左右，20年一遇洪水水位7.937m～8.709m，加上提防设计超高值0.819m之后，项目区段拟规划河道设计堤顶高程应为8.756m～9.528m，部分现状地面高程低于设计堤顶高程，而

50年一遇校核洪水位低于现状地面高程。考虑到施工时项目区地面整体进行平整垫高，而且项目区内的建筑物均规划在河道护堤地线之外，所以20年一遇及其以下标准洪水对整个项目的安全性影响较小。

另外根据项目区交通要求，需要在河道上新建四座桥梁，由于桥梁的具体形式及结构需要考虑河道整体规划方案，所以目前为进行具体设计，又根据本报告计算的20年一遇最高洪水位，应考虑到桥梁的壅水作用及桥梁设计的安全超高值，确定拟建桥梁的设计梁高底高程不应小于9.50m。并且桥梁中心线与河道应尽量正交，确实难以做到时，交角应在 $70^{\circ} \sim 110^{\circ}$ 之间，同组墩台中心线应与水流方向平行。墩台不应布设在堤身设计断面内，如确实不能避开时，应进行渗流稳定和抗滑稳定计算，采取相应工程保护措施。

新河横穿项目区中央，在项目区的规划中，预留出60多米宽的河道规划用地（不包括堤地）。



现状和最小河底宽度，河道上口宽度，河流缓冲带区域限制

现状河流模拟

根据所提供的场地新河现状资料，构建现状河流河道模型，将带有高程的Dwg格式文件在Rhino中导出为Stl格式，在Flow 3D中的Model Setup---Meshing Geometry中导入：

模型基本参数：

Physics Model: Gravity z-Direction -9.8 m/s²

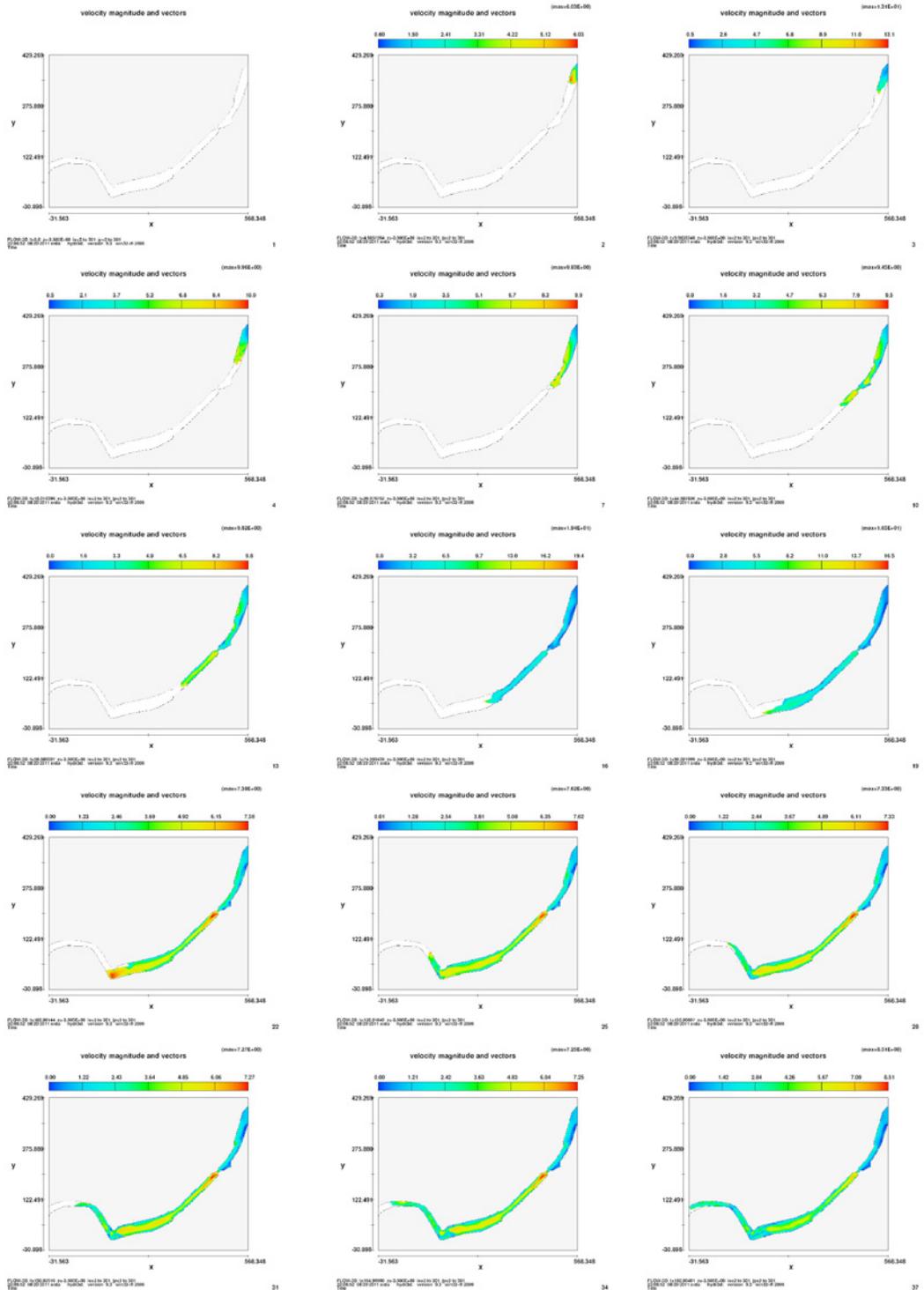
Shallow Water

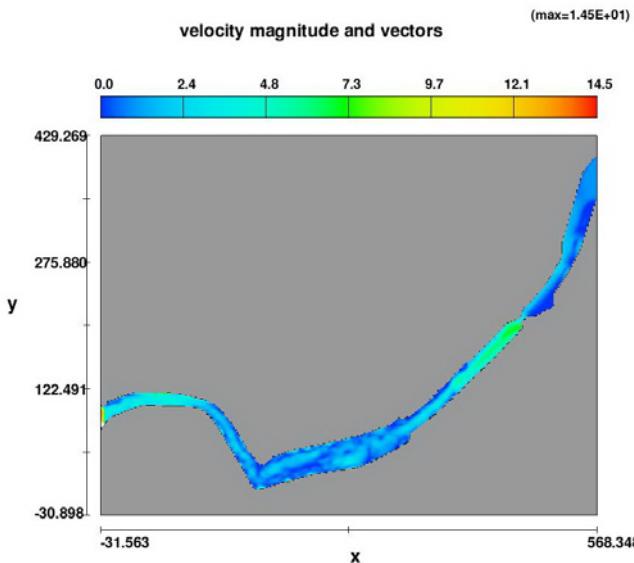
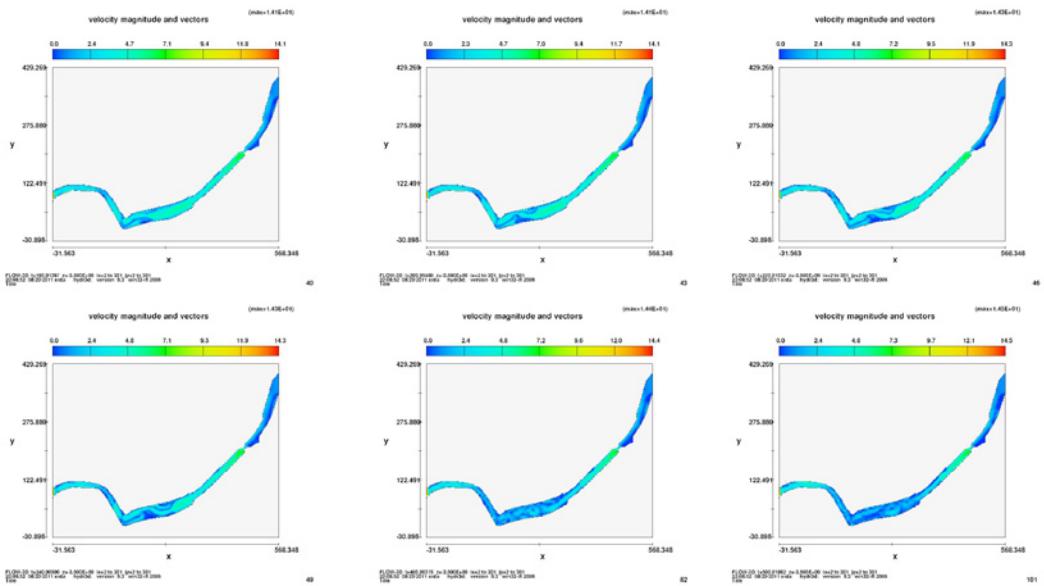
Fluid: Water at 20°C SI

Boundaries: 入流边界 Volume flow rate 182 m³/s(选取20年一遇体积流量)；出流边界 Continuative;

General Finish time 500s Time Interval 5s

Simulation Units SI





$t \approx 500s$ 时入流, 模拟河流速度已经基本稳定(同时也可以观察3D模式下, 表面流速状况)

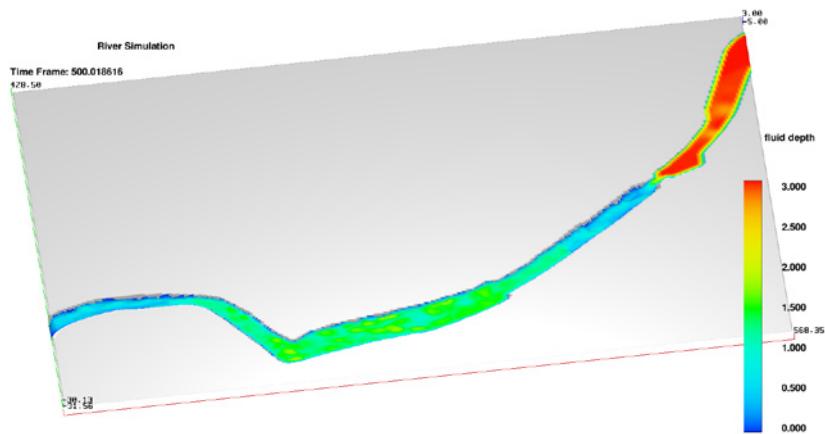
FLOW-3D t=500.01862 z=-3.500E+00 ix=2 to 301 iy=2 to 301
22:08:52 08/20/2011 xrd3 hydr3d: version 9.3 win32-iii 2008
Title

101

模拟结果可以获得多种数据, 根据设计需求选择适宜的数据进行分析, 本次模拟的结果可以选择的数据类型如下: Pressure, Fluid depth, Froude Number, Pressure iteration residual, nf values, fluid surface area, x-velocity, y-velocity, z-velocity, volume fraction, velocity magnitude.

选择模拟结果的流体深度, Fluid Depth:

$t \approx 500s$ 时入流, 模拟河流深度已经基本稳定



模拟结果显示由于隘口的存在, 在隘口上下游水流深度有明显的变化, 上游如果遇到20年一遇洪水, 3m高的岸堤将起不到防洪作用, 下游区域水深基本在1~2m之间, 估计打开隘口, 将不会超过现有岸堤防洪能力, 此次不再进行模拟。但是因为岸堤基本为1: 0.5, 1: 1的常数情况, 河流缓冲带变化单一, 生境丰富性欠缺, 不能够营造多水深深度, 漫滩过渡的自然河流。

基于Civil 3D的河道改造设计

关于Civil 3D:

AutoCAD

Civil 3D®

AutoCAD Civil 3d能够生成一个包含智能动态数据的单一模型, 便于在各个设计阶段更加快速地进行方案或设计的修改; 根据分析和性能测试结果在众多比选方案中选择出最优的方案, 做出更明智的决策; 在方案或设计进行了修改时能更加快速有效地同步生成可视化效果。此外, 这种模型还能在整个项目阶段自动反映任何模板和标注的修改。

提供更多创新型项目解决方案:

AutoCAD® Civil 3d®软件能更快交付质量更优的交通运输、土地开发和环境工程项目。该软件提供的专用工具可支持建筑信息模型 (BIM) 过程, 且有助于缩短设计、分析和实施变更所需的时间, 以便更加充分全面地评估各种假设情形, 并优化项目性能。

Civil 3d软件提供的测量和设计工具能够令冗长耗时的任务实现自动化, 以帮助简化项目工作流程。

测量

Civil 3d全面集成了测量功能, 因此可以在更加统一的环境中开展各项工作, 包括直接导入原始测量数据、最小二乘法平差、编辑勘测数据和自动创建测量数据及曲面。并以交互方式创建和编辑测量数据顶点、识别并编辑交叉特征线以避免潜在问题, 从而生成整个项目中都能使用的点、测量数据和曲面。

曲面和坡度

采用Civil 3d, 可以根据点、折线等传统测量数据构建曲面, 并可借助曲面还原工具充分利用来自航空摄影测绘、激光扫描和数字高程模型的大型数据集, 还能以等高线或三角网的形式来呈现曲面以及创建高程和坡面分

析。同时，也可将曲面作为参考，创建与源数据保持动态关系的智能对象。团队成员可以利用强大的采光和坡度投影工具针对任何类型的坡度投影生成曲面模型。

地块布局

Civil 3d能通过转换现有AutoCAD®软件实体或利用更为灵活的布局工具来生成地块，实现流程自动化。这样一来，如果一个地块发生变更，临近地块便能自动反映变更情况。该软件具备先进的布局工具，包括临街面偏移测量选项，以及按最小缩减深度和宽度进行地块布局的选项。

道路建模

道路建模功能可将水平和垂直几何图形与定制化截面组件相结合，为公路和其他交通运输系统创建参数化定义的动态三维模型。可以利用软件部件库中的部件（包括车道、人行道、沟渠等）或根据设计标准创建自定义的部件以供建模需要。通过视觉互动或更改用于定义道路典型路段的输入参数，可以轻松修改模型。每个组件都具有独特的特点，以便在三维模型中确定各项已知特征。

管道

利用基于规则的工具布局污水和雨水排水系统。通过输入图形或数字数据可以截断或连接现有管网，也可对管网和结构件进行修改，并进行冲突检查。完成管网平面图、剖面图及截面图的最终绘制工作，并与外部分析应用程序共享材料和尺寸等管网信息。

土方量计算

该软件能利用复合体积算法或平均断面积算法，更迅速地计算现有曲面与设计曲面之间的土方量；同时还可生成土方运距图，用以分析挖填平衡距离、调配数量、移动方向，并确定取土坑和弃土场。

基于标准的几何设计

根据基于政府标准或客户定制需求的设计标准，快速设计道路平面图和剖面图的几何图形。一旦违背标准，设计限制功能会提醒用户并提供即时反馈，以便用户进行必要的修改。

专门的道路和高速公路设计工具

专门的交通设计工具可以更高效地设计道路和高速公路。使用这些工具，可以创建动态更新的交互式平面交叉路口模型。由于施工图和标注将始终处于最新状态，因此可以集中精力优化设计。还可以根据常用设计标准更迅速地设计环形交叉，包括交通标识和路面标线等。

工料估算分析

从道路模型中提取材料数量，或为灯柱、景观设计等指定材料类型。自动生成分析报告或利用内置的支付项目清单生成投标合同文件。利用更准确的工料估算工具在设计过程早期做出更合理的项目成本决策。

体验质量更优、协调更佳的制图过程：

AutoCAD Civil 3D以智能化方式将设计与制图结合到一起，帮助提高工作效率，并交付质量更高的设计和施工图纸。Civil 3D基于样式的制图功能还有助于减少错误、提高图纸的一致性。

施工制图

自动生成施工图，如标注完整的截面图、剖面图、坡度断面图等等。最重要的是，用户可利用外部参考和数据快捷键生成多幅图纸。这样一来，在工作的各个流程中便能利用与模型一致的图例生成施工图纸。一旦模型发生变化，便可以更迅速地同步更新所有施工图纸。

平面图分幅

Civil 3D提供了丰富全面的辅助工具，可制作截面、平面和剖面图。与AutoCAD软件的“图纸集管理器”（Sheet Set Manager）全面集成的“平面图分幅向导”（Plans Production）能够按照路线自动设计图纸的布局，并可根据布局生成平面图和剖面图，最终形成一套可随时进行最终标注和打印的图纸。

标注

该软件的标注可由设计对象或外部参考直接衍生而来，且在设计发生变化时能够自动更新。它还能自动响应绘图比例和视图方向的变化，因此，当绘图比例发生变化或在不同视窗中旋转时，所有标签都能即时更新。

报告

AutoCAD Civil 3D软件能更加灵活地实时生成可扩展报告。因为数据直接来源于模型，所以报告可以更为轻松地进行更新，从而在设计发生变更时更加迅速地做出反馈。

制图样式和标准

AutoCAD Civil 3D提供了针对不同国家的CAD样式，以便从多个角度控制图纸显示方式。图纸的颜色、线型、等高线间的等高距以及标签等要素均可通过此类样式加以控制。

数据快捷方式和参考

利用数据快捷方式和外部参考，项目成员可共享曲面、路线和管道等模型数据，并在多种设计任务中使用设计对象的同一图例，此外还可利用数据快捷方式或直接通过外部参考生成标注，使施工图纸绘制过程保持同步。

先进的数据管理

企业若想寻求先进的数据管理模式，新增的Autodesk® Vault技术能够充分满足它们的需要。该技术增强了数据快捷方式的功能，实现了高级变更管理、版本控制、用户权限和存档控制。

设计评审

如今，工程设计流程比以往更加复杂。设计评审常常涉及非CAD用户的团队成员，而这些人员对项目又至关重要。以DWFTM格式发布文件能够以数字化方式将设计评审工作拓展到整个团队。

多学科协作

将Autodesk® Revit® Architecture 软件建筑外壳导入AutoCAD Civil 3D，土木工程师便可直接利用建筑师提供的公用设施接点、屋顶面积、建筑物入口等信息。同样，交通设计工程师也可将剖面、路线和曲面等信息直接传送给结构工程师，以协助后者在Autodesk® Revit® Structure软件中设计桥梁、箱形涵洞和其他交通结构件的布局。

通过分析和可视化优化性能：

AutoCAD Civil 3D软件的集成型分析和可视化工具能够帮助评估假设情形，让您更快实现创新设计。

雨水分析及模拟

利用集成模拟工具设计采集系统、池塘及涵洞并进行水文分析，以便减少开发后的径流量，并编制符合可持续发展要求的雨水数量和质量报告。用户也可评估更多备选设计方案，包括创新绿色最佳管理实践，以创建更环保、美观的设计。编制更准确的施工文件，包括水力坡降线和能源均衡线，以协助设计评估，并确保公共安全。

地理空间分析及地图绘制

AutoCAD Civil 3D包含地理空间分析和地图绘制功能，支持基于工程设计的工作流程。该软件可分析图形对象之间的空间关系、通过叠加两个或两个以上的拓扑结构提取或创建新信息、创建并利用缓冲区在其他要素的指定缓冲距离区内选择要素，还可以使用公开的地理空间信息协助选址，在项目立项阶段更好地了解设计制约因素，并生成稳定可靠的映射显示图来满足可持续设计要求。

点云

在AutoCAD Civil 3D中可使用激光雷达 (LiDAR) 数据创建点云。用户可以导入点云信息，并对其进行可视化；也可根据LAS分类、RGB、高程和密度确定点云数据样式；还能利用数据创建曲面、开展现场测量，并对土木工程设计项目的竣工要素进行数据化。

可持续设计

AutoCAD Civil 3D软件有助于提高土木工程项目的可持续性。可以将再现现场条件和设计制约因素的可靠模型

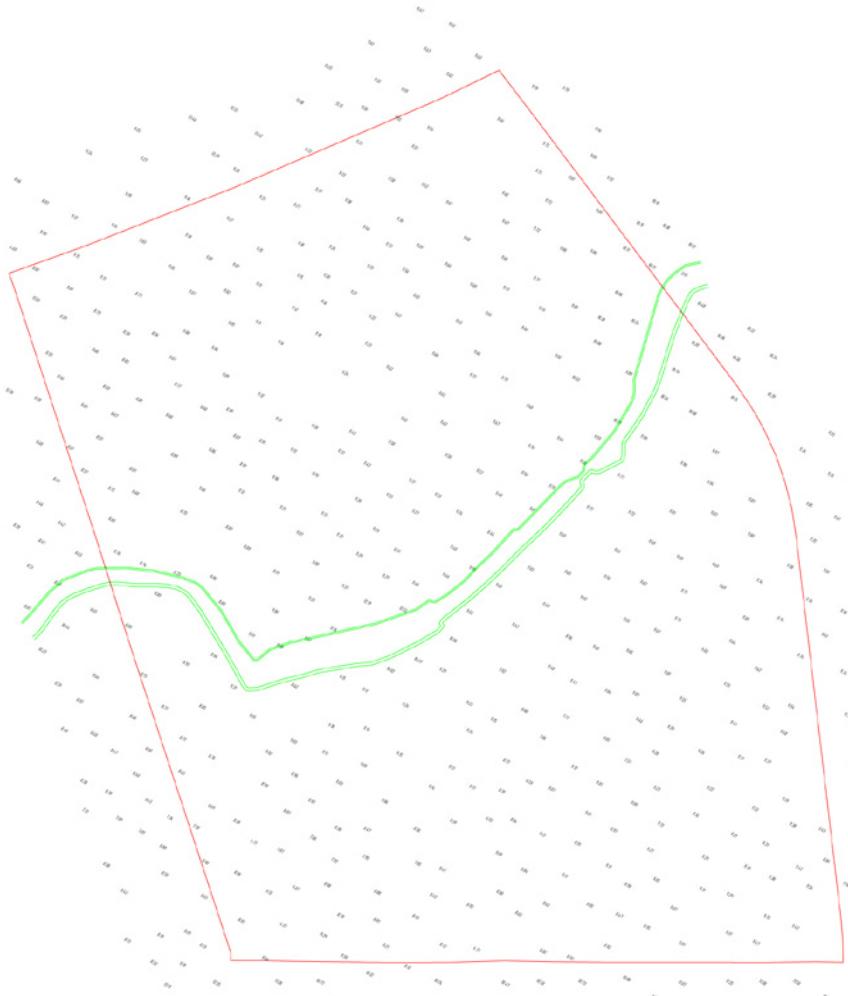
与强大的备选方案评估能力相结合，借此构思更具创新意义的环保设计。AutoCAD Civil 3D包含的工具能够提供关联研究、项目定位、雨水管理方案等方面分析，从诸多方面协助用户达到LEED®等已获公认的可持续发展认证标准。

AutoCAD平台

AutoCAD®平台是全球领先的CAD软件之一，而AutoCAD Civil 3D正是建立在这一平台之上。全世界经过专业培训的AutoCAD用户达数百万之众，因此可以利用这一平台更迅速地共享并完成项目。AutoCAD软件的DWG™文件格式能保存并共享文件。欧特克的DWG技术提供了更加准确可靠的设计数据存储和共享方式。

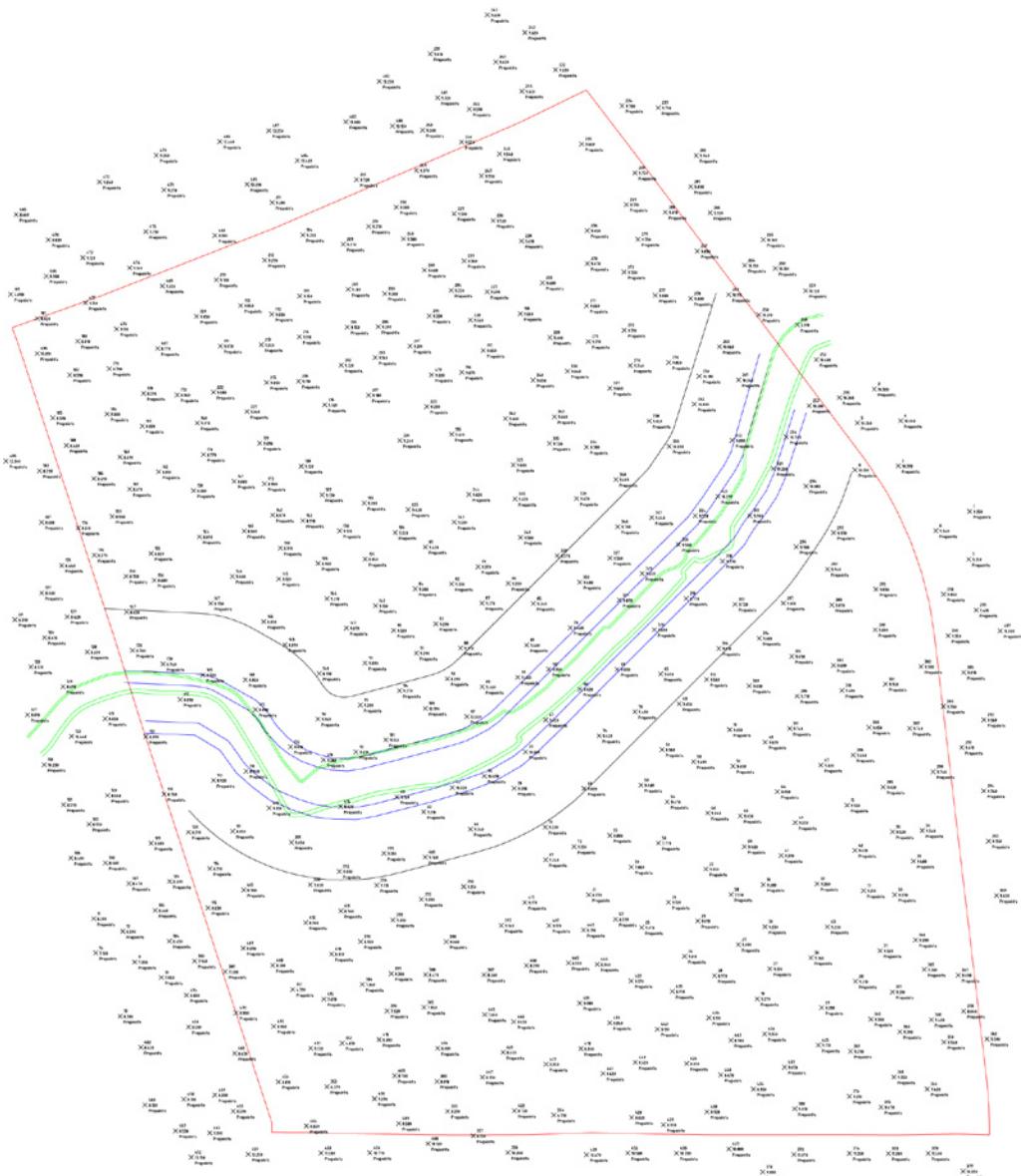
可视化

创建更强大的可视化效果，让利益相关方有机会在项目建成前更准确地预见项目前景。用户可针对多项备选设计方案直接从模型生成可视化效果，从而更好地了解设计对社区和周边环境的影响；同时也可将模型发布到Google Earth™地图服务网站，以便在现实环境中更好地了解项目。使用Autodesk® 3ds Max® Design软件还可以为模型制作照片级真实感的渲染图；在Autodesk® Navisworks®软件中利用Civil 3D模型进行模拟则能帮助项目利益相关方更好地了解项目建成后的外观和性能。

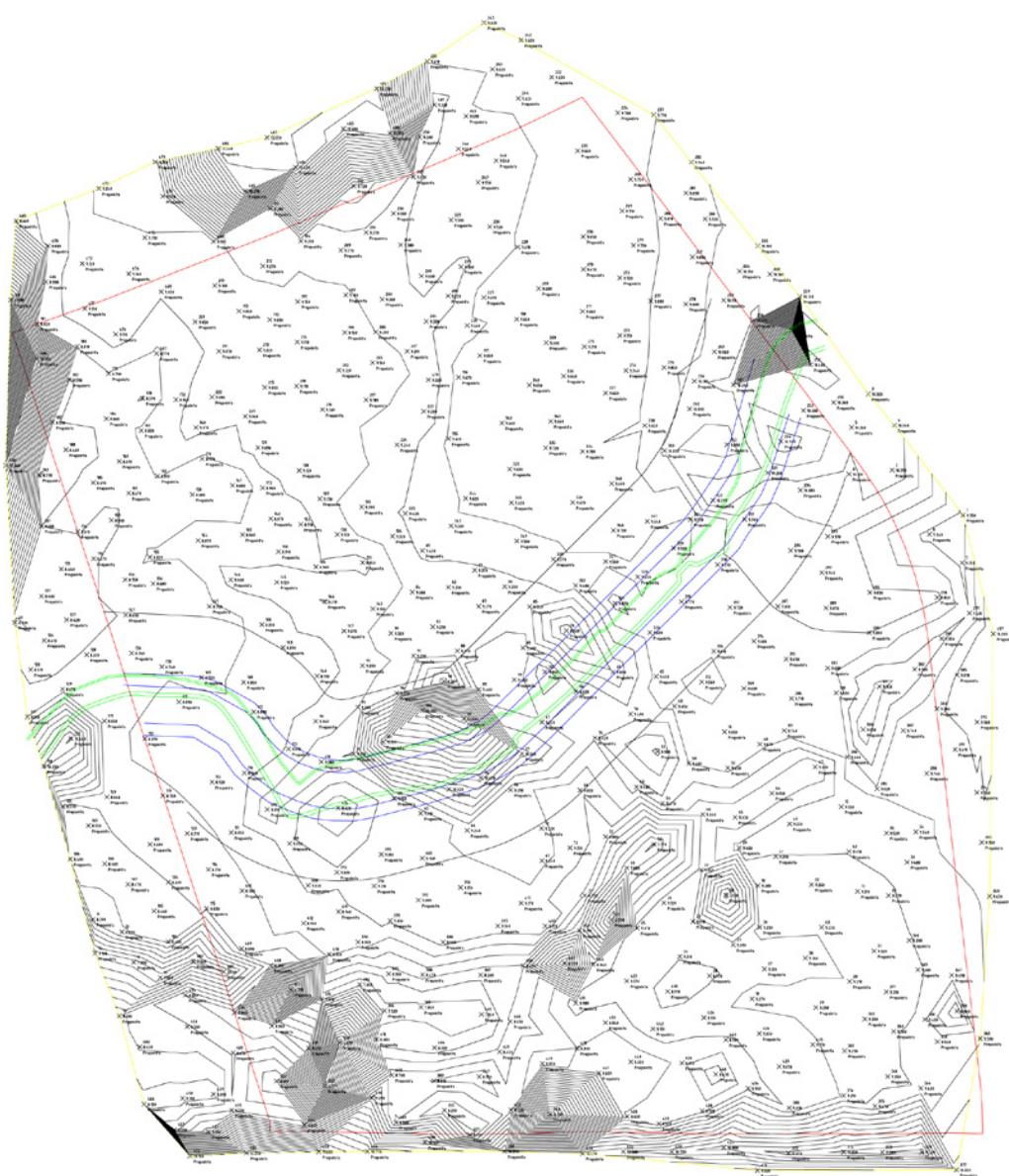


调整河道的设计基本是在Civil 3D中完成，前期的Dwg现状文件一般都需要先整理，清理掉一些不必要的信息，并梳理图层。

现状图中设计师可以获得现状等高线，如果等高线没有的话，可以用高程点在Civil3D中，利用 Auto Civil 3D china standard country extension中转换文本点的方式将dwg图纸上文字标注（高程）的高程点数据转换成Civil点对象。

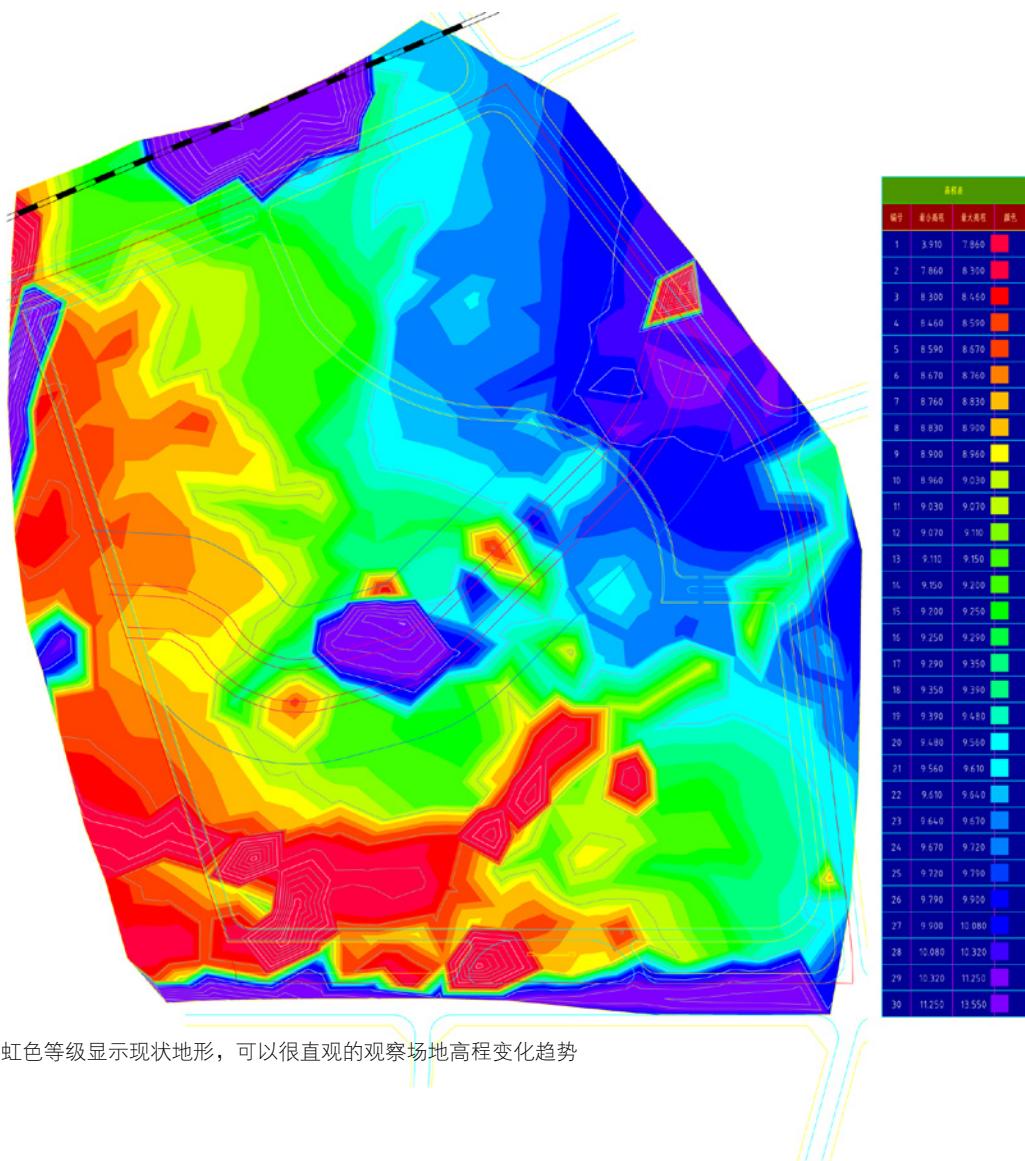


转换后的高程点，同时把一些限制参考线也叠加了进去，可以看到现状河流，水利规划的下口30m，上口50m以及两侧各50m河流缓冲带的关系。在Civil中曲面工具里用转换的高程点生成等高线。注意：在此次模拟中为了便于新河道等高线的设计并没有将河道岸堤断面线加入到生成的面当中，只是以原始岸堤线辅助参考。



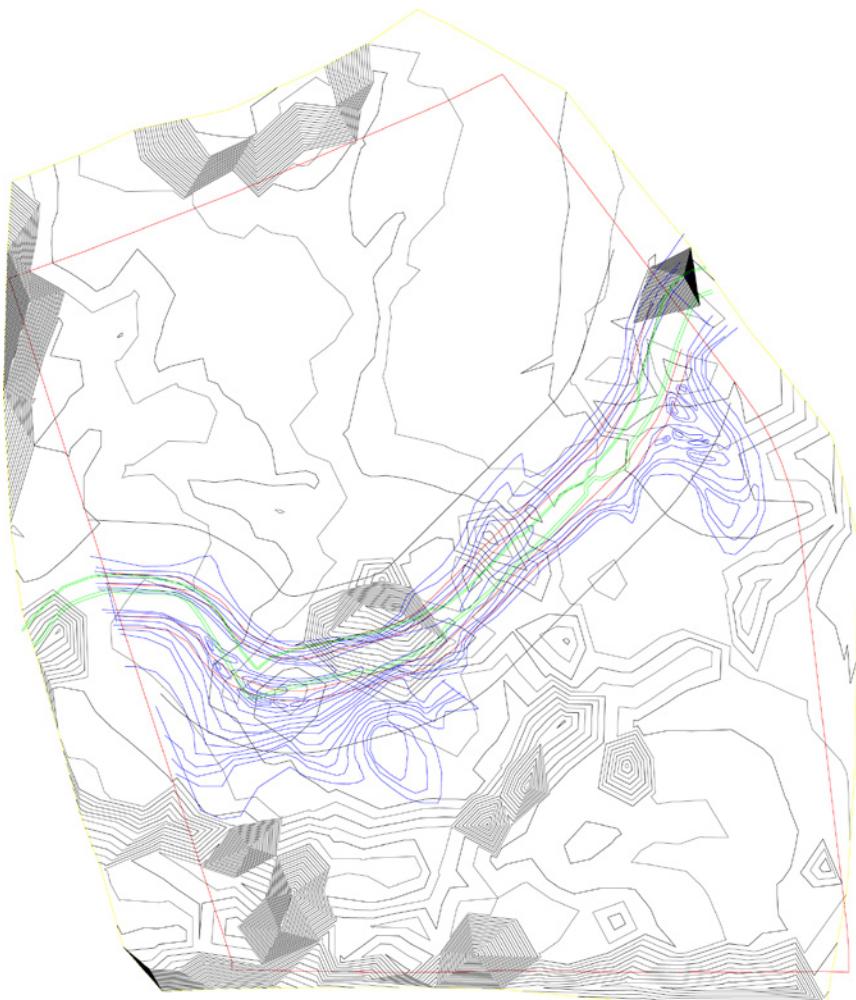
生成的现状等高线

等高线的生成受到原始高程点数量的限制，精度有所变化。但是能够基本读出大体地形特点，涉及区域大部分地形平坦，右侧标高显示基本在10.2m左右，左侧标高在8.8m左右，河流由右向左流动，有1.4m左右的纵向高差。根据未来河流建筑布局以及水利规划的条件，调整河流缓冲带以满足各方面的要求，并丰富河道未来生物栖息地的生境。利用Civil处理等高线，不需要向以往处理等高线那样，要逐一梳理，往往一条等高线的闭合、衔接、走向关系耗掉设计师太多时间。针对河道，将主要设计意图和主要等高线绘制出，并给出高程即可。



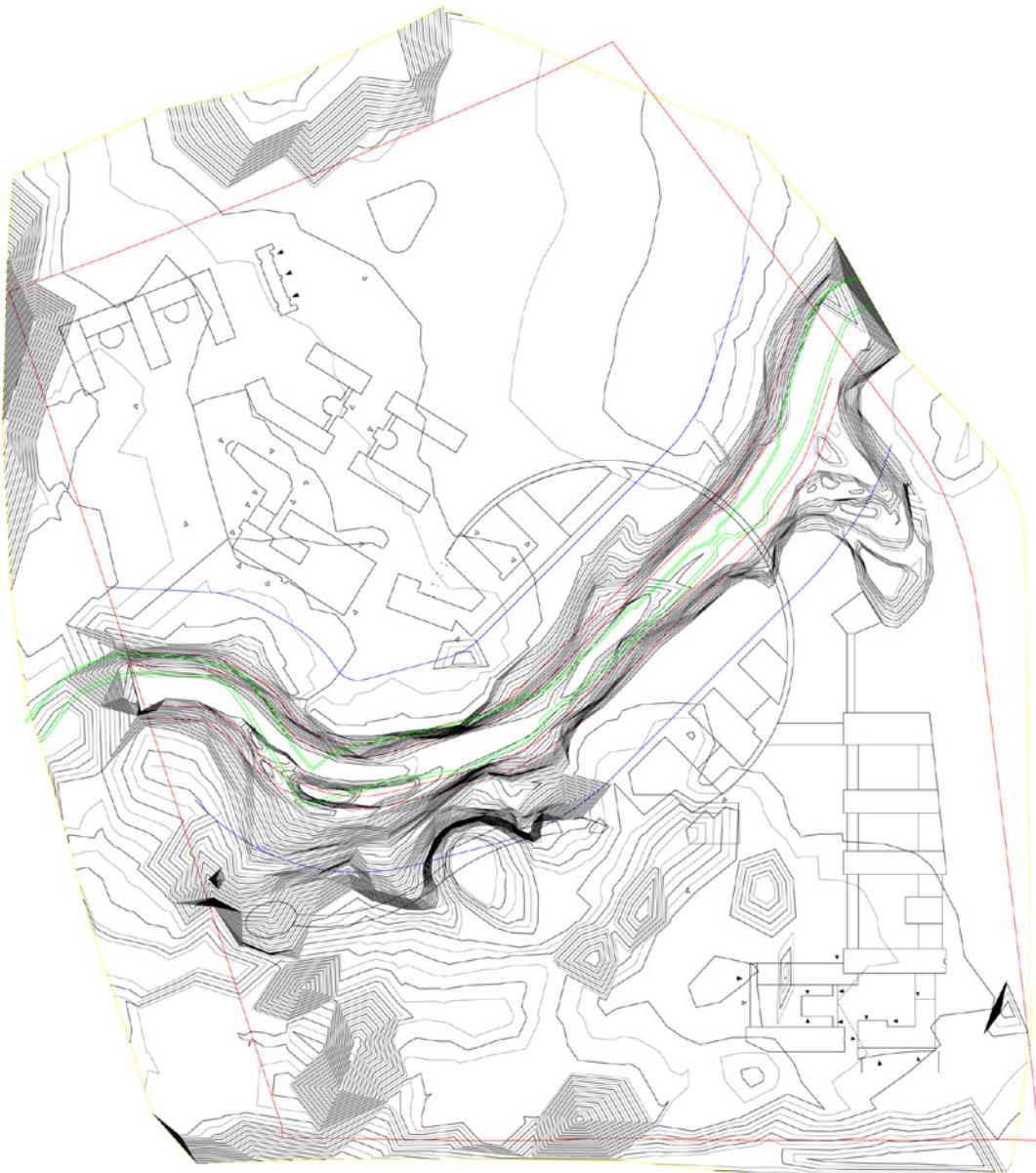
项目区现状地面高程基本保持在8.5m~10.1m左右，20年一遇洪水水位7.937m~8.709m，加上提防设计超高值0.819m之后，项目区段拟规划河道设计堤顶高程应为8.756m~9.528m。根据本报告计算的20年一遇最高洪水位，考虑到桥梁的壅水作用及桥梁设计的安全超高值，确定拟建桥梁的设计梁高底高程不应小于9.50m。

20年一遇标准水位，河底高程在4.69m ~ 6.34m变化，最高水深为2.410m，如果以最高堤顶计算，到河底高差约为 $9.528 - 6.34 = 3.188$ m。设计河底标高取5.5m，上口等高线标高取9.5m，进行初步河道调整设计。基本设计河底标高等高线维持在30m变化，为了丰富河道缓冲带的自然形态，上口等高线标高变化的宽度增加，防止河道渠化，增加缓冲带的生境丰富性，同时基本维持在水利规定的50m范围之内，个别区域结合周边的规划进行适当调整，使其与河道设计浑然一体。

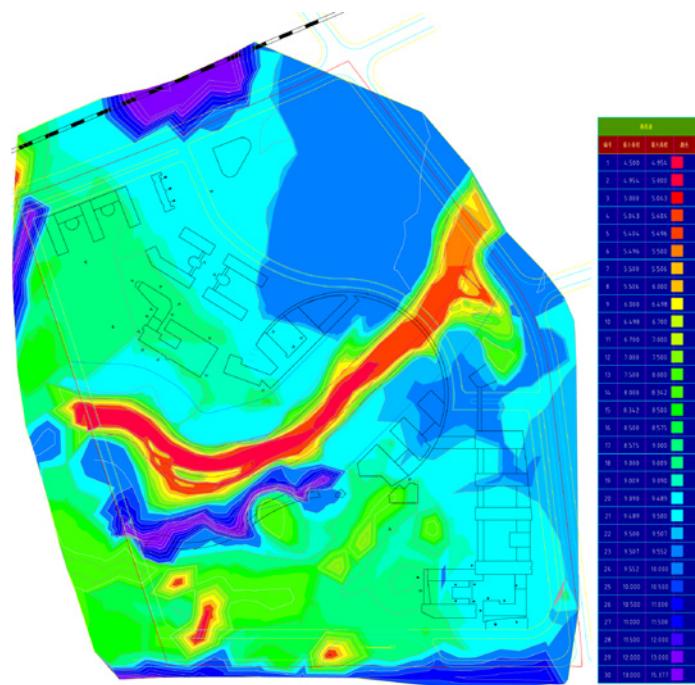


蓝色线为初步设计的河道等高线，可以看到其与河道底口、上口、缓冲带，以及现状河流直接的关系。设计师的精力只要关心等高线的高程值和基本的形态，收束点都可以暂时的不用去处理。在这个阶段，并不代表最后等高线的确定，设计之后的各种分析，例如坡度、地表径流，以及在RHINO三维模型处理中，会根据建筑、景观同时进行调整。

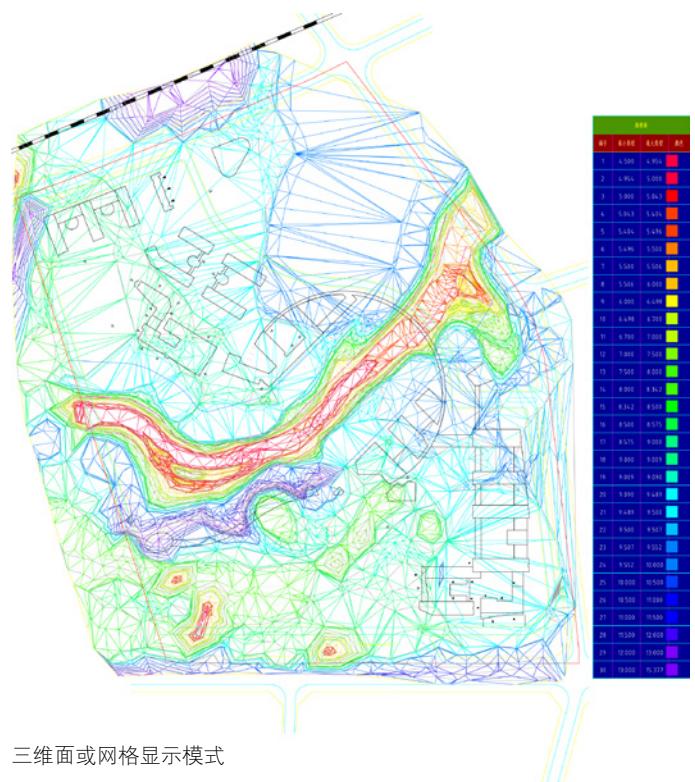
将河道等高线和原始地形等高线进行调整，将重叠的原始等高线沿最外设计等高线裁除。



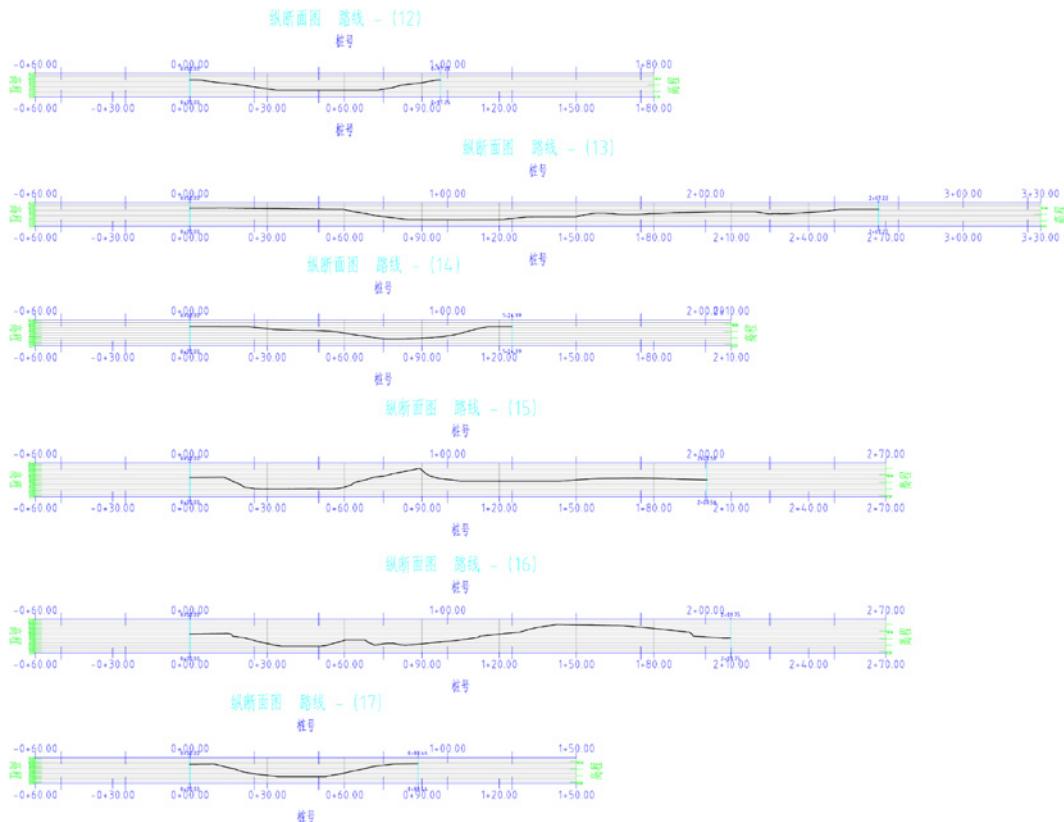
生成曲面之后，断开的等高线自动闭合，当然可以观察到河道两侧闭合方式的错误，但是现在再进行调整就方便的多，本例暂不进行调整，因为后期设计对等高线设计是有影响的，整合的过程是不断反复与修正，最后达到所有条件容许范围的过程。接下来当然可以在Civil中方便的模拟曲面即设计等高线的流域、坡度、高程等分析，初步判读是否存在有较大的设计失误，并进行修正。



竖向高程二维实体或者图案填充实体显示模式



三维面或网格显示模式

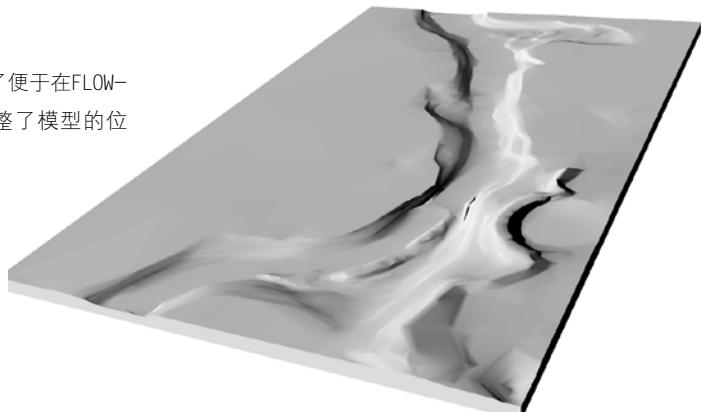


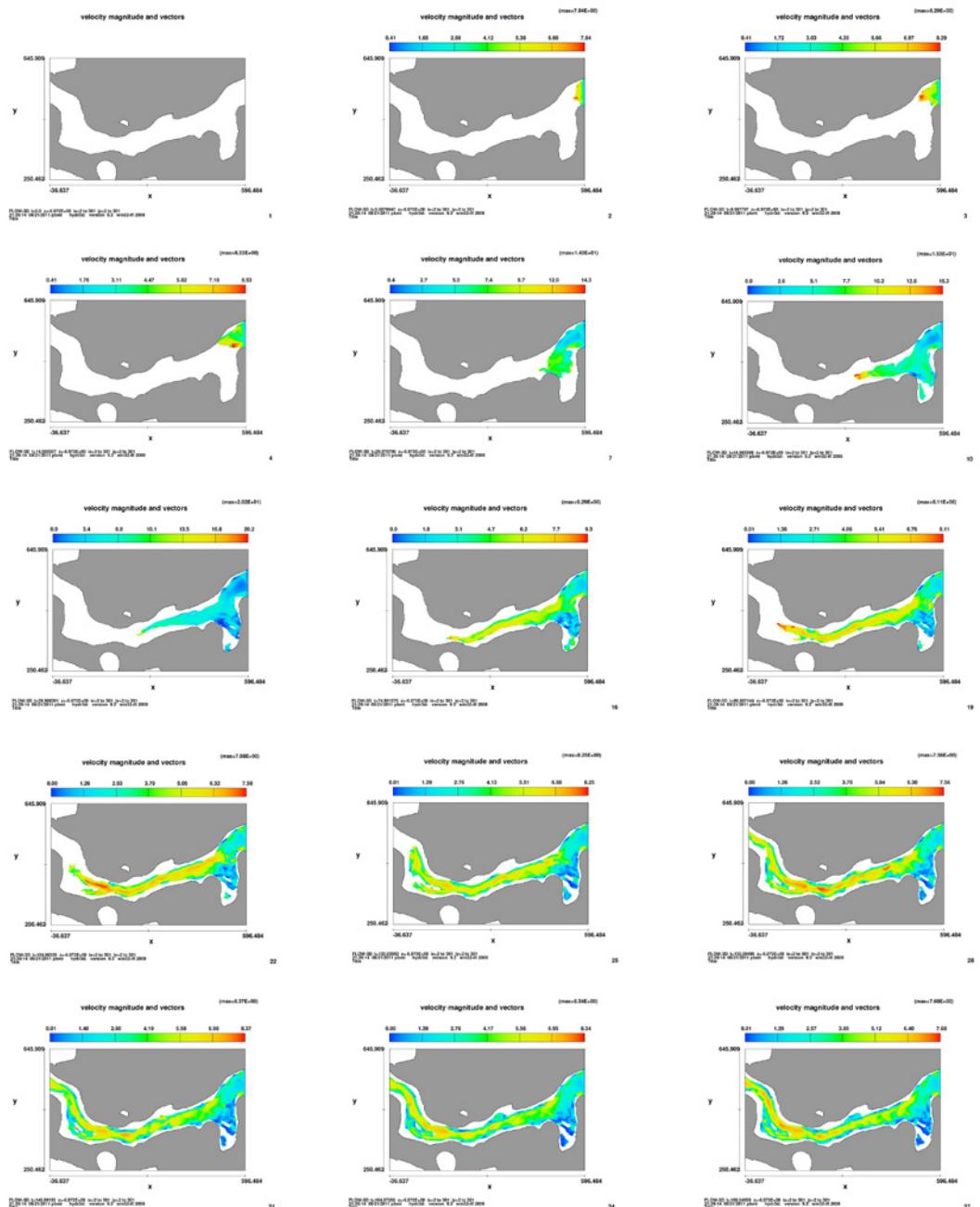
利用Civil也可以很方便的初步观察河道的截断面情况，能够看出自然式河道的设计，高程变化，其坡度基本比较平缓，并且不同位置坡度均有变化，适宜营造较大的不同水深的丰富生物栖息场所。但是局部有些坡度较大，这些在最后都是需要调整的。

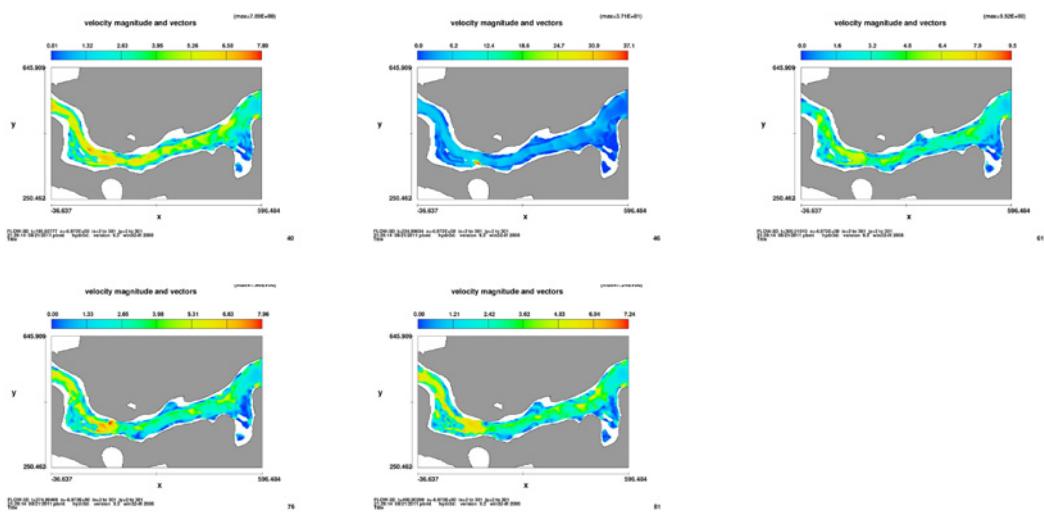
在Civil中初步处理完河道等高线以后，导出为Dwg格式的文件，在RHINO中利用Rhino Terrain插件可以快速生成三维的地形，然后就可以进行建筑、景观等人工构筑的设计，并根据建筑、景观（例如道路、剧场等）设计的内容实时调整等高线，在Rhino中调整等高线是很方便的。

在设计完成，河道的等高线（地形）与建筑、景观融合之后，将生成的河道地形再次导出为STL格式的文件，导入到FLOW-3D中水动力模拟。

在RHINO中处理的地形文件，为了便于在FLOW-3D中进行水动力模拟，有意识的调整了模型的位置，并将边界处理为矩形。





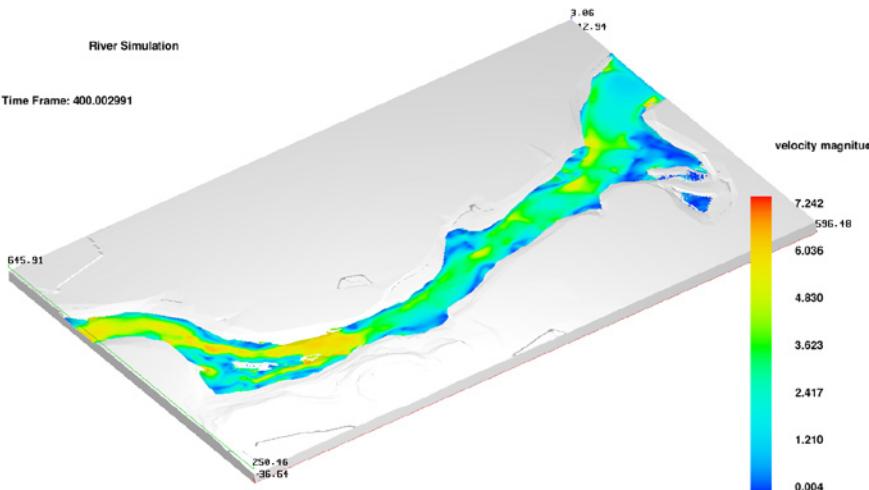


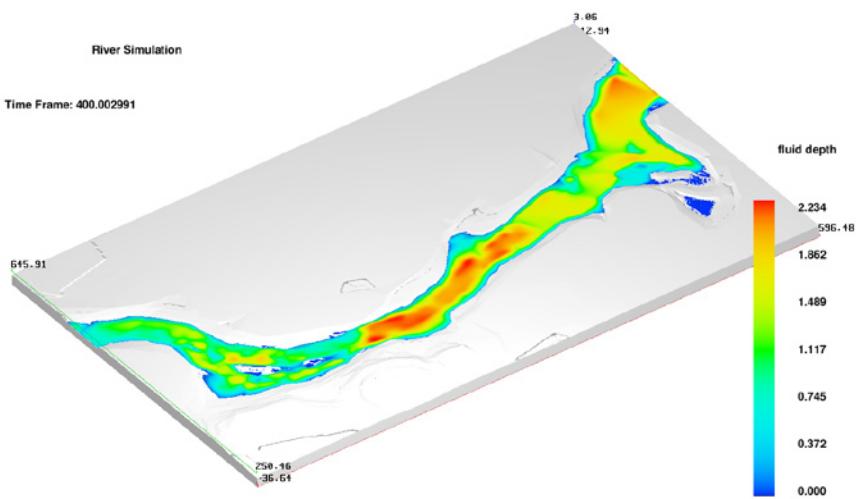
20年一遇洪水模拟

入流边界Volume flow rate $182 \text{ m}^3/\text{s}$ (选取20年一遇体积流量)

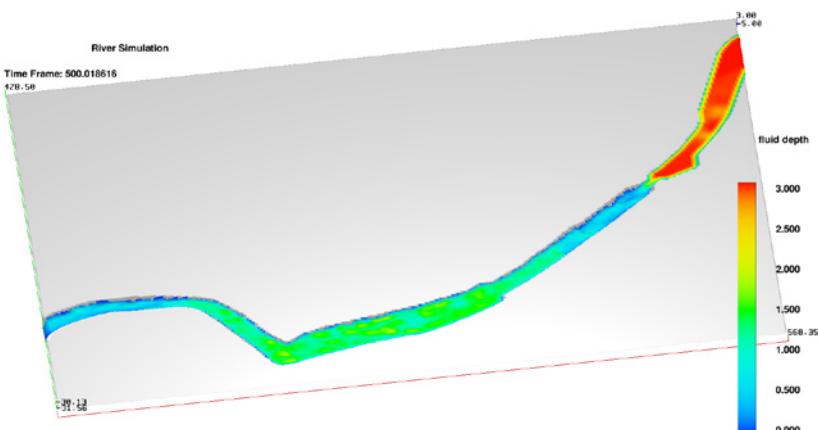
$t \approx 400\text{s}$ 时入流，河流流速已经基本稳定，可以观察到较高流速位于岸堤较窄的位置，人工湿地位置流速相对缓慢。

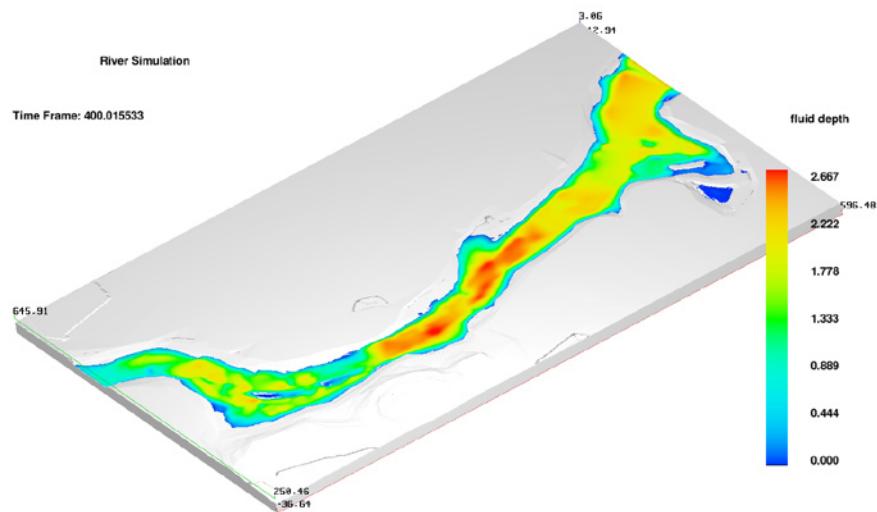
将设计前后的水动力模拟的流速加以比较，设计后因为河道的拓宽，以及河流缓冲带的缓和过渡，最高流速有着明显的 $14.506 - 7.242 = 7.254\text{m/s}$ 的变化。同时流速的变化也比设计前丰富，多样的流速也是为生物营造丰富生境的策略手段。





$t \approx 400$ s时入流, 流体深度已经基本稳定条件下, 水深分布情况, 最高水深为2.234m, 基本分布在入流处和河道收缩的位置上游。



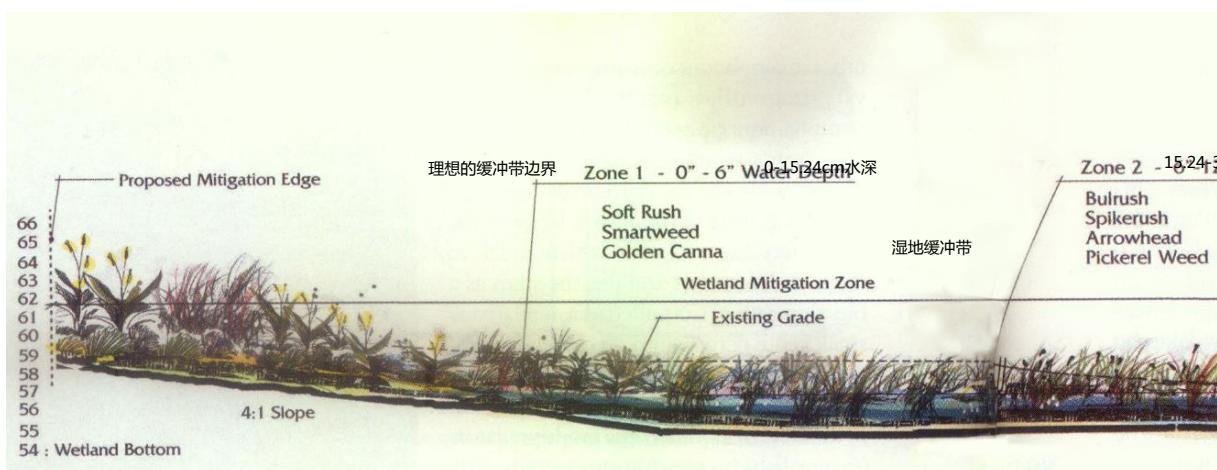


50年一遇洪水较20年所有增加，最高水深变化值： $2.667 - 2.234 = 0.433\text{m}$ ，

与水利规划中所计算的20年一遇洪水水深变化范围在： $2.12\text{m} \sim 2.41\text{m}$ 之间基本一致，和50年一遇 $2.9 \sim 2.914$ 变化有约 $2.914 - 2.667 = 0.247\text{m}$ 的变化。变化的差异由于设计河道重点处理的河流缓冲带的变化，趋向于自然的设计，改变渠道规整的方式所承载的水容量有所增加。

基于ARCGIS的水环境分析：

在处理水环境时最为关注的一个方面是现状和规划后的水系，究竟不同水深分布情况发生了什么样的变化。不同水深的变化关系到不同水生植物的适宜生境，因此对于恢复河流，湿地功能具有重要作用。

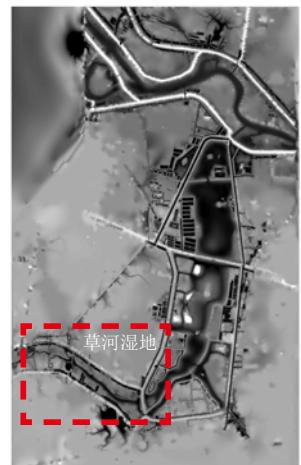


(生物工程组设计了一个连通到湿地系统用于暴雨管理的池塘，能够有效地保持池塘水体的质量和食性动物的生存。Goldsmith认为“我们确信可持续的池塘设计有助于食性动物的生存，例如鱼类、蜻蜓等，这些至少15cm左右的水深生境，高质量的水质，保证有足够的溶解氧进入水中，维持水中生物的需求。同时，15cm的水深生境的营建，可以有效地控制植物的生长，使其自我管理，同时维持明水面区域的存在，而不被过渡的水生植物占据。”)

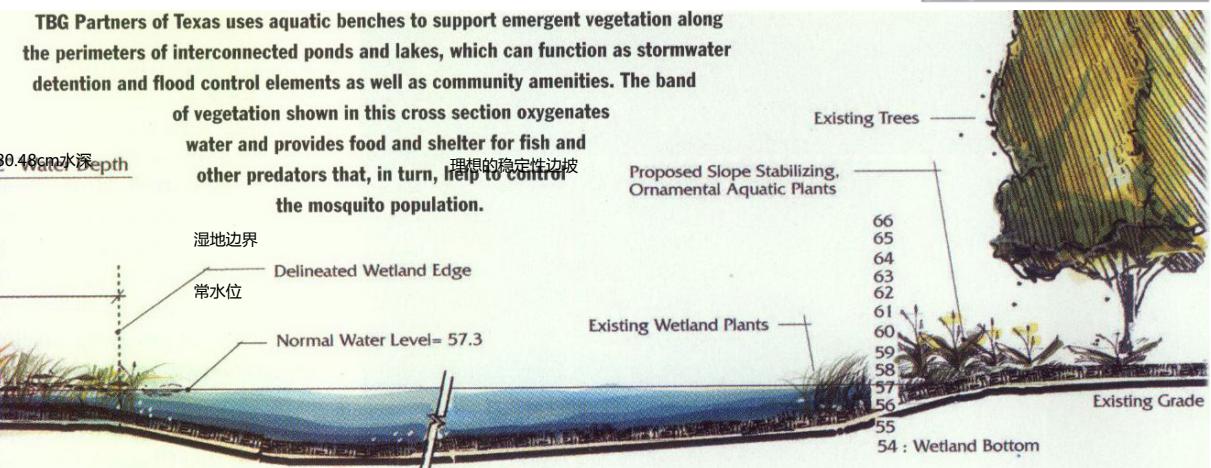
通过构建缓坡式河床，植物被限制于潜水域池塘的周围。水生植物在维持水质方面起到重要作用，在天气较热的时候，溶解氧水平会下降，但是缓冲带区域的水生植物会释放氧气到水中、植物根系区域。植物同时也会过滤各种流入湿地的养分和沉淀物，防止池塘富营养化，维持其PH的平衡，并且提供生物栖息的场所，例如蜻蜓。有时，植物会吸收金属或者其它的污染物防止进入水中。

在休斯顿城郊，TBG事务所设计了位于泛洪区的一块区域，在这片区域中设计了相互连通的池塘和人工湖，能够缓解暴洪雨，控制洪水。控制一定水深，适于水生植物生长的缓坡河床，改善了传统中河渠的方式，并且防止静水发生。

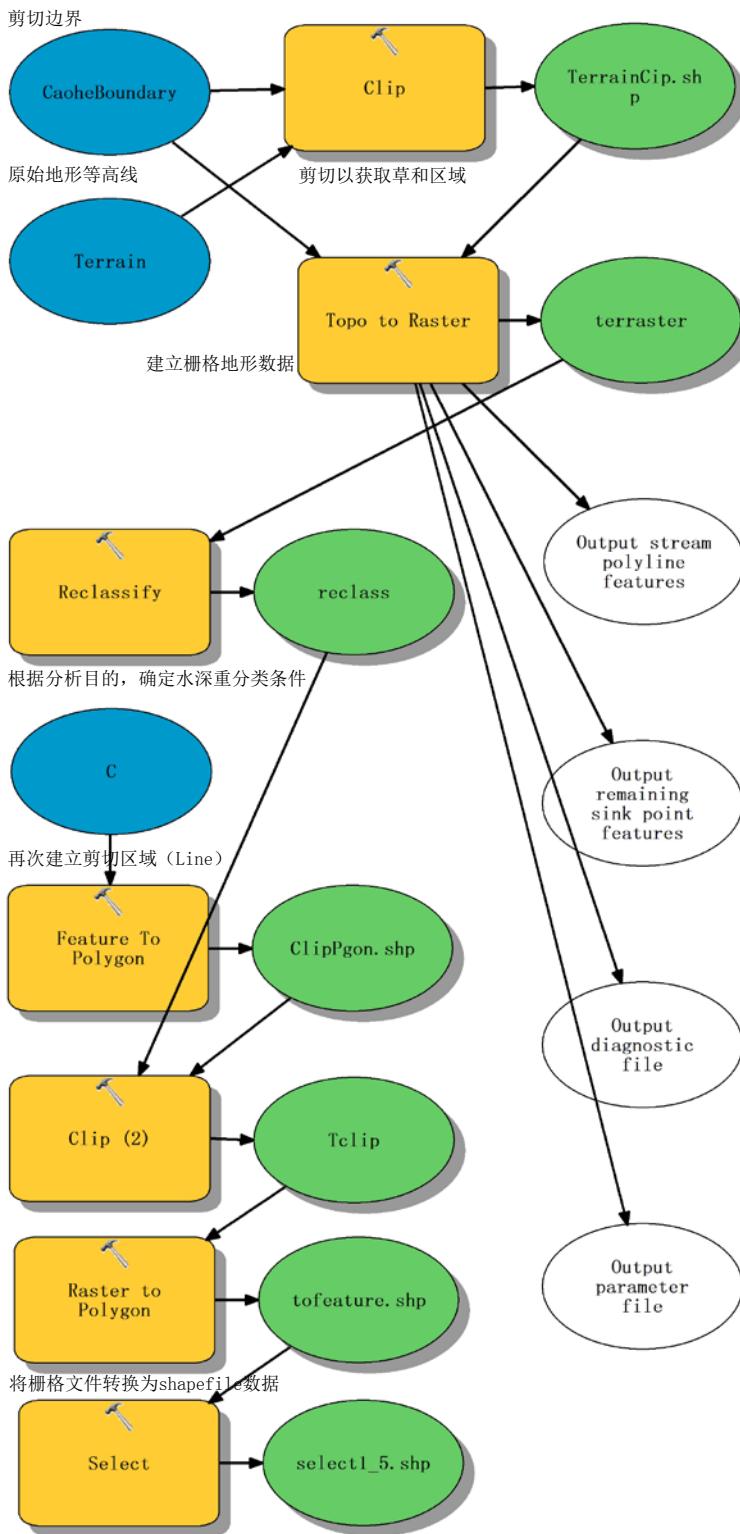
暴洪雨缓解池设计的几何形式对蚊虫的控制也很重要，传统典型的矩形池塘，因其缺少水流的入口和出口，很容易产生死水，必然会导致蚊虫滋生。然而设计师设计了符合水力学的河床形态，帮助新水的进入，例如椭圆形的形式，自然滑动的水岸线等，防止死水产生，限制蚊虫滋生。<LANDSCAPE ARCHITECTURE>

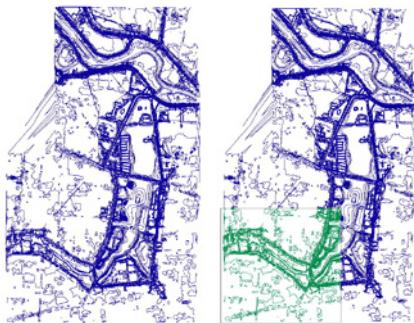


如果希望能够提炼出不同水深生境的区域，对于使用AUTOCAD处理的文件，可以将需要区间的等高线提取出来，例如相对水位在0m到水下0.5m的区域，但是并不能保证现有的文件等高线间隔为半米一根，即使符合这个条件，或者重新绘制了一根，如果碰到河流、湿地水深变化较复杂的区域，区分研究水深领域的位置也不是件很容易的事情，同时如果分析不只一个水深区域，而是多个（例如水深30cm，水深30cm到50cm，水深50cm到100cm的水深分布情况），并要求计算各自区域的面积以及规划前后各水深区域的范围变化情况，使用ArcGIS处理则要方便的多。这里使用地理信息部分颍州西湖南部草河湿地部分加以说明。

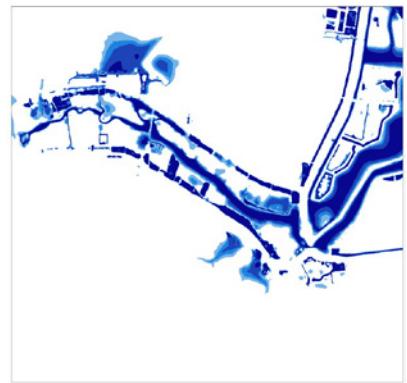


引自<LANDSCAPE ARCHITECTURE (US)>

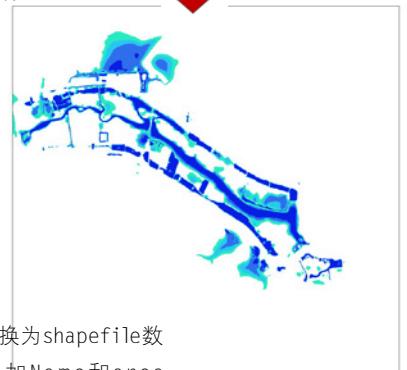




根据分析目的, 确定水深重分类条件



再次剪切



将栅格文件转换为shapefile数据, 在属性表中增加Name和area字段, 面积统计标签处右键使用Calculate Geometry计算不同水深区域水平投影面积。(开始使用Merge合并同水深的区域面)

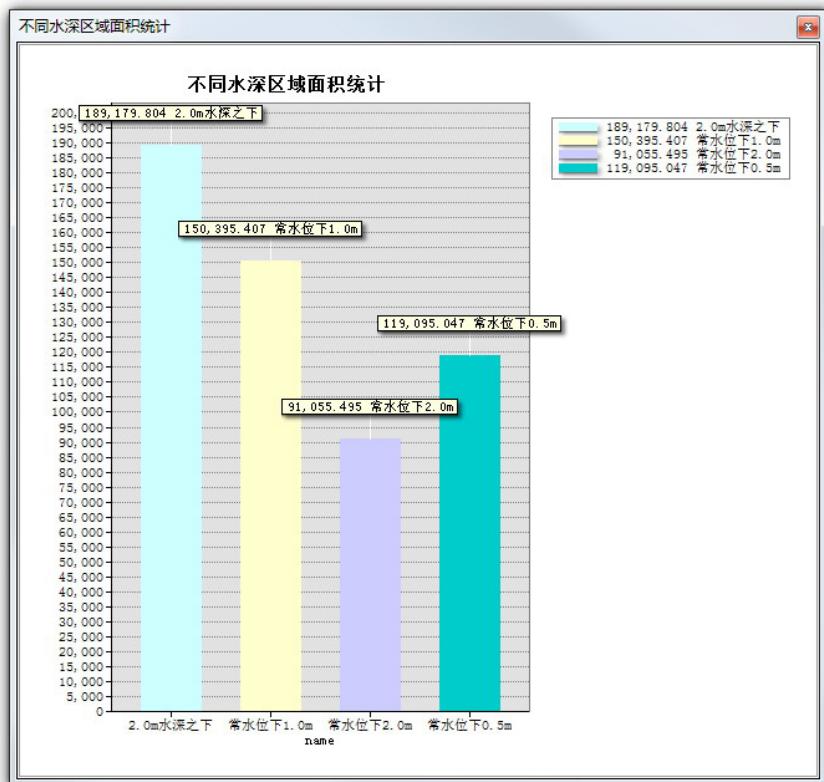


Table

FID	Shape *	ID	GRIDCODE	name	area
0	Polygon	1		2.0m水深之下	189179.803586
2	Polygon	6		常水位下2.0m	91055.49467
1	Polygon	2		常水位下1.0m	150395.406812
3	Polygon	16		常水位下0.5m	119095.047464

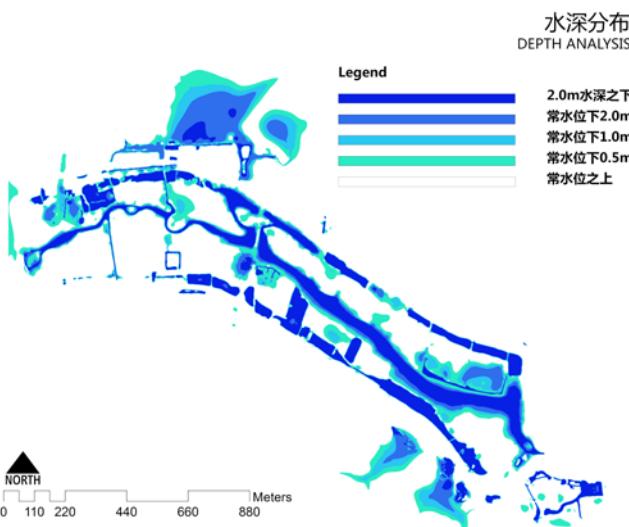
(0 out of 4 Selected)

建立栅格地形数据



可以使用属性表中Table Option/Create Graph来创建统计图表，更加直观的观察不同水深生境区域面积情况。

注：ARCGIS的学习可以参考《地理信息系统与规划设计》



对于使用ARCGIS来处理景观分析的问题可以具体参考地理信息部分内容。使用ARCGIS来处理分析类问题，能够简化使用传统方式带来的繁琐操作过程，从而能够根据规划过程中的不断调整来时刻分析不同水深变化的情况，尤其对于水深50cm左右的控制在湿地规划中较为重要，该区域是水生生物普遍适宜生长的区域，而对于明水面水深的控制，增加深度来控制水生植物的生长。基于ARCGIS分析的水深分布情况与前述流动河流分析不同，在这里

假定水位基本保持在一个水平面上，即整个区域的水平面是同一个标高，这与具有高差并流动的水是不同的。不同水深的分析设计，调整多样的水深变化情况，能够增加生物栖息地的多样性，并且对于北方水生动物（鱼类）越冬的深度和区域会给出明确的范围，来检测设计的河床是否满足要求。

第四部分

日照+光环境

日照

“太阳是所有生命的源泉。我们对世界的感官，我们的温暖，我们的能源，以及我们生活的节奏，全都来自她的恩赐。她的脚步挪移，告知我们时间和空间的存在，以及我们在宇宙中的位置……因此，确保建筑采集到阳光，这直接关系到我们生活的品质。”

拉尔夫·L·诺莱斯

引自：Ralph L.Knowles,Sun Rhythm Form ,1981

房屋所处的地理位置和周边环境，对房屋的采暖、制冷和照明，有着至关重要的影响。中国古代风水中所寻找的“山环水抱必有气”的“藏风聚气”之地，就是以创造背山面水，避风向阳，作为最佳居住环境，建立人与自然的协调关系，以获得大自然的恩宠与庇护，确保人身体健康，满足人的心理需求。因此对于建筑的选址，定位、方向、布局的研究是设计者一开始就关注的内容之一。

太阳朝起晚落，恒久不变。因此，对于阳光采集的设计，可以做到相当精确的程度，并且消除将来在临近区域修建房屋，会阻碍其采集阳光的可能性。在《城市居住区规划设计规范GB 50180—93》中规定了住宅间距，日照标准：

建筑气候区划	I. II. III. IV气候区		IV气候区		V, VI气候区	住宅日照标准
	大城市	中小城市	大城市	中小城市		
日照标准日		大寒日			冬至日	
日照时数(h)	≥2		≥3		≥1	
有效日照时间带(h)		8~16			9~15	
计算起点			底层窗台面			

住宅正面间距，应按日照标准确定的不同方位的日间距系数控制，也可采用不同方位间距折减系数。

方位	不同方位间距折减系数				
	0 °~15 °	15 °~30 °	30 °~45 °	45 °~60 °	>60 °
折减系数	1.0L	0.9L	0.8L	0.9L	0.95L
注：1-表中方位为正南向（0 °）偏东，偏西的方位角：					
2-L为当地正南向住宅的标准日间距(m)：					

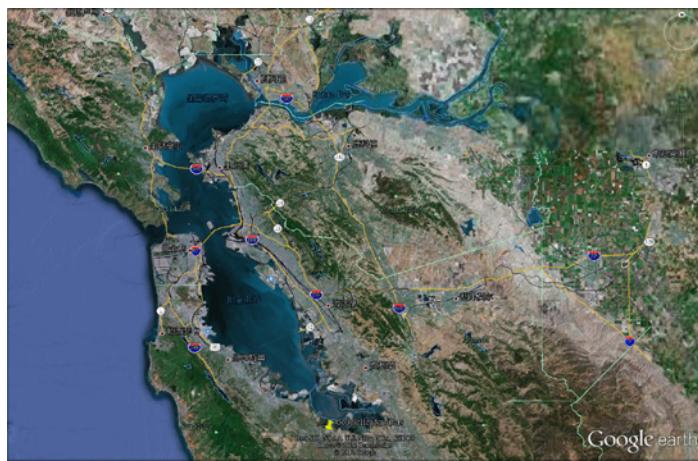
宅侧面间距，应符合下列规定：

1-条式住宅，多层之间不宜小于6m；高层与各种层数住宅之间不宜小于13m；

2-高层塔式住宅、多层和中高层点式住宅与侧面有窗的各种层数住宅之间应考虑视线干扰因素，适当加大间距；

引自：《城市居住区规划设计规范GB 50180—93》

除了《城市居住区规划设计规范GB 50180—93》中规定的采光时长，各地区一般也会有自己的采光标准。天穹中，可以让有用的阳光照射到屋里来的部分，被称为太阳窗。太阳窗下沿的位置由冬至（12月21日）时日光照射的轨迹决定。太阳窗两边窗沿的位置常常由上午9点和下午3点的日光照射的轨迹决定。在这个范围内，可以采集到太阳辐射的80%以上，窗户的设计正是以这两个时间点位参考进行设计，以获得充足的阳光，当然，如果在早上9点之前，下午3点之后，阳光仍旧很充足，就应当调整窗户的位置，对这时的阳光也加以利用。



案例选择：选择位于美国加利福尼亚山景城Google总部作为分析研究的对象，卫星影像可以在GoogleEarth中获得。



(山景城 (Mountain View)，或译芒廷维尤，是一个位于美国加州圣克拉拉县的城市，也是硅谷的主要组成部分。总部位于这里的全球财富1000强公司包括Google公司总部、赛门铁克、和Intuit公司。另外Mozilla基金会/Mozilla公司、微软的MSN、Hotmail、Xbox、MSNTV部门、SGI和美国国家航空航天局埃姆斯研究中心等许多著名机构都位于该市。山景城还是美国第一座完全覆盖免费无线网络的城市。

2010年美国人口普查显示，芒廷维尤共有74066人，人口密度为每平方英里6034.8人。其中白人占56%、亚裔美国人占26%、非裔美国人占2.2%、美国原住民占0.5%、太平洋岛国裔占0.5%、其他种族占9.8%。) 引自<维基百科>



- **获得气象数据：**具体获得方法和处理过程可以参考本书‘气候数据分析’相关章节。

• • •	ZIP
Montague-Siskiyou County AP 725955 (TMY3)	ZIP
Monterey NAF 724915 (TMY3)	ZIP
Mountain View-Moffett Field NAS 745090 (TMY3)	ZIP
Napa County AP 724955 (TMY3)	ZIP
Needles AP 723805 (TMY3)	ZIP
• • •	ZIP

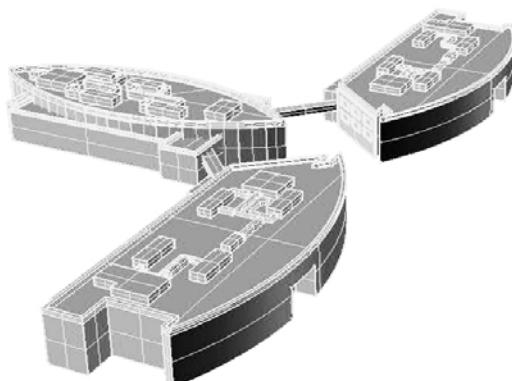
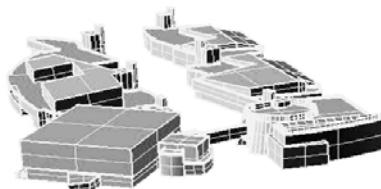
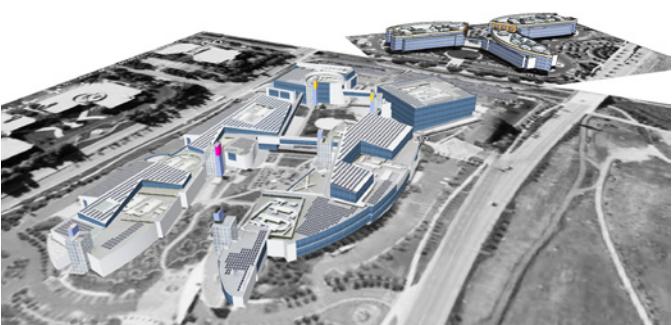
http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm?region=4_north_and_central_america_wmo_region_4/country=1_usa/cname=USA

• **几何模型的建立：**在没有具体建筑图纸资料的前提下，模型的建立参考了GoogleEarth中的三维建筑（3D Building）。其SketchUp模型可以从3D warehouse三维模型库中下载获得。下载的模型一般由于模型质量、精度、深度等与分析所需要的要求有所差异，不适宜用作分析使用。对于实际设计的项目来讲，设计的模型也需要根据分析对模型的要求来处理，通常分析模型不需要考虑太多的细节，或者根据分析的深入，适当增加模型的细节。例如区域的日照分析，建筑一般只需体块即可，但是对于建筑内部一个房间的分析，则需要更多关于该房间的模型细节，例如遮阳设施等。

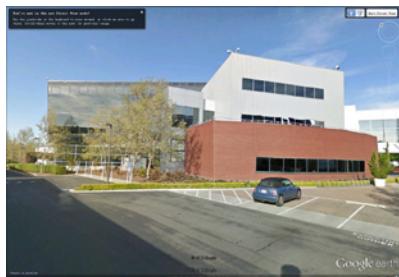
从3D Warehouse中下载的SketchUp模型

模型的调整可以继续在SketchUp中完成，也可以根据自己的习惯选择适合的三维模型构建软件。这里使用Rhinoceros来对原有模型进行调整，关于GH(Rhinoceros) +GH(Grasshopper)联合构建模型的内容可以参考本书〈模型构建〉部分。

对用于分析的模型，例如在Ecotect,Phoenics做日照、风环境等分析，模型一般为封闭体的形式，而且模型中废面、废线要尽量避免，以使模型干净。

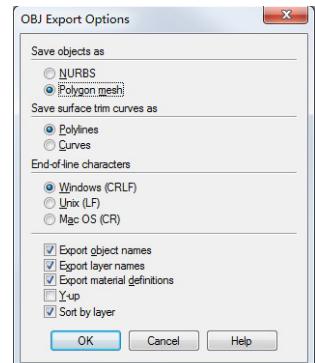
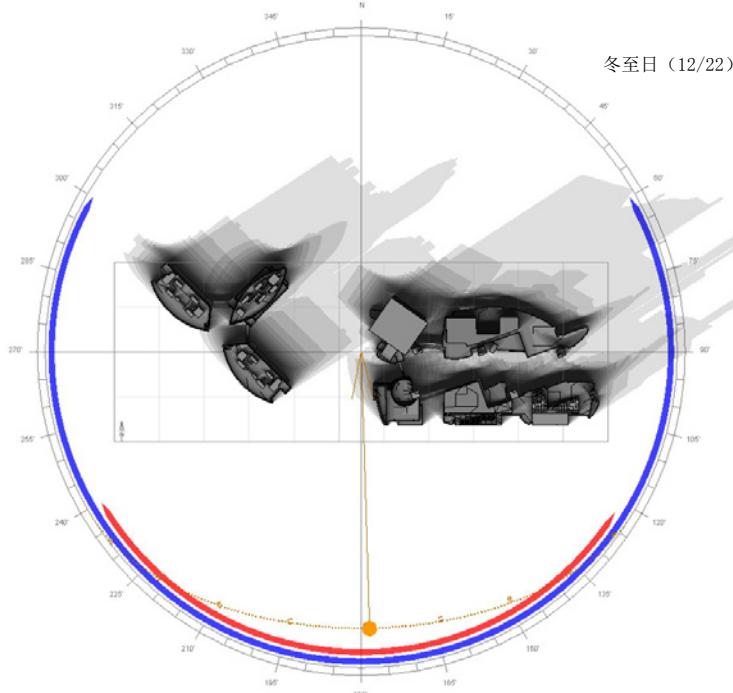


在Google街景Street View上可以获得实际的360°影像，结合模型能够更好的理解建筑以及环境情况。



• 在Ecotect中分析日照：在RH中导出模型为OBJ格式文件在Ecotect中导入

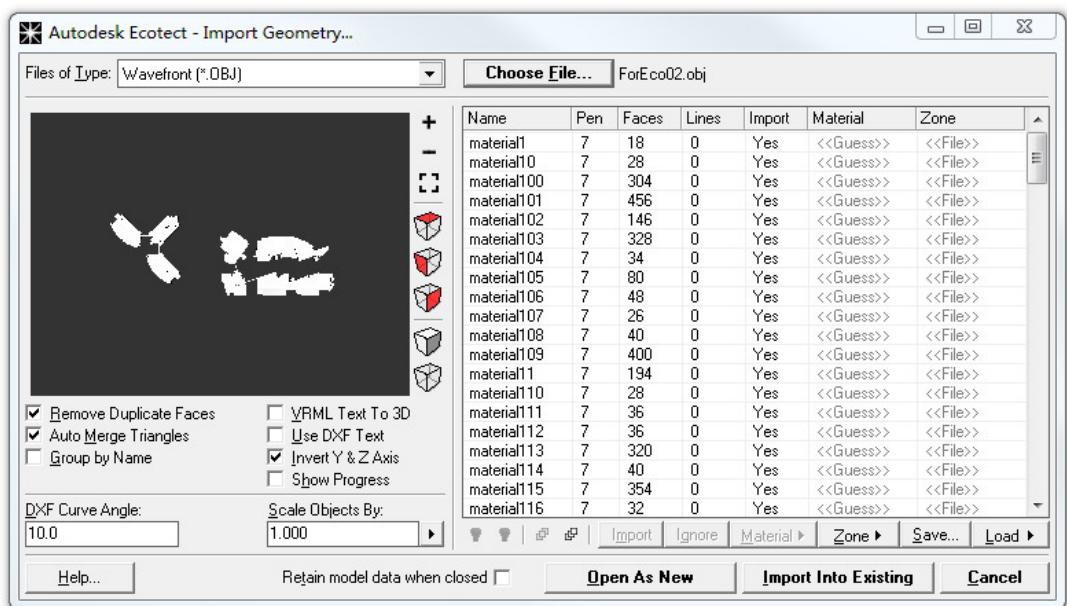
RH导出OBJ选项，不同软件在接口的时候由于坐标系统的差异，需要选择Y-up来调整坐标轴方向，OBJ格式文件支持输出材质。

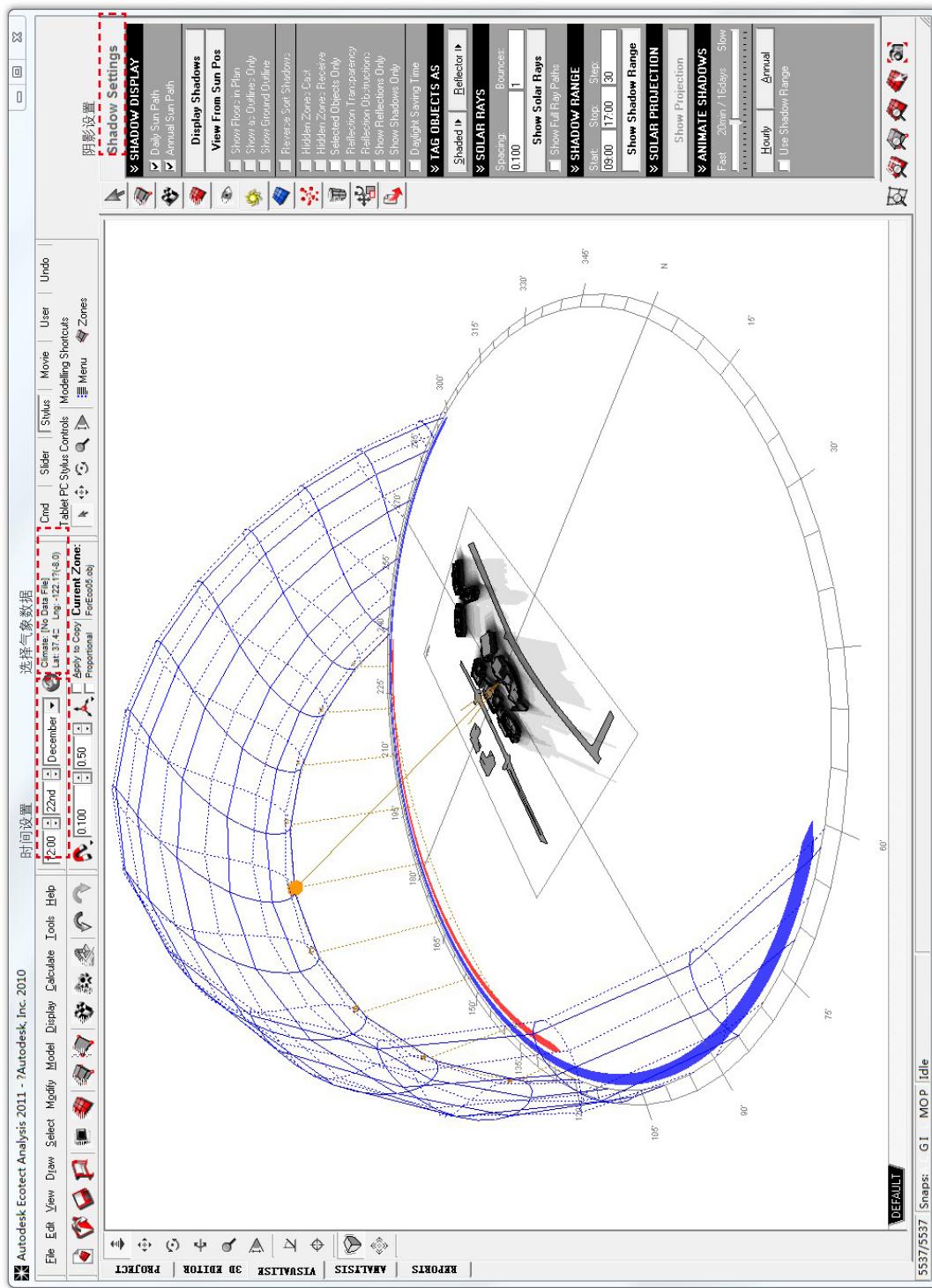


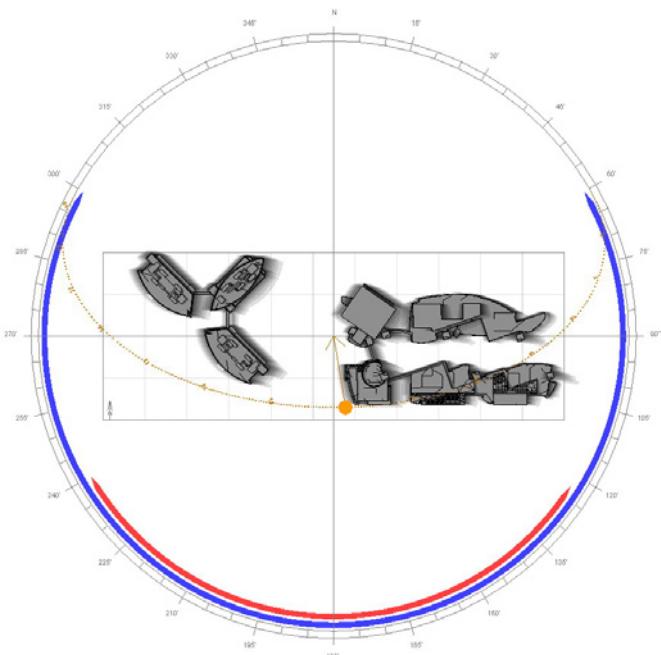
冬至日（12/22）分析，记录了9:00-17:00之间的阴影变化情况，可观察到南部分的建筑未对北部建筑造成明显的阴影遮挡问题，基本停留在刚好的位置上。

对于建筑之间景观部分，在冬季时间考虑到阴影的问题，应尽量在靠北部楼群南侧布置公共空间，以尽量减少冬季阴影部分的影响。

Ecotect中导入选项也可以调整坐标系统，根据分析的不同内容确定是否需要合并三角面（过多的三角面会使程序运行缓慢）。







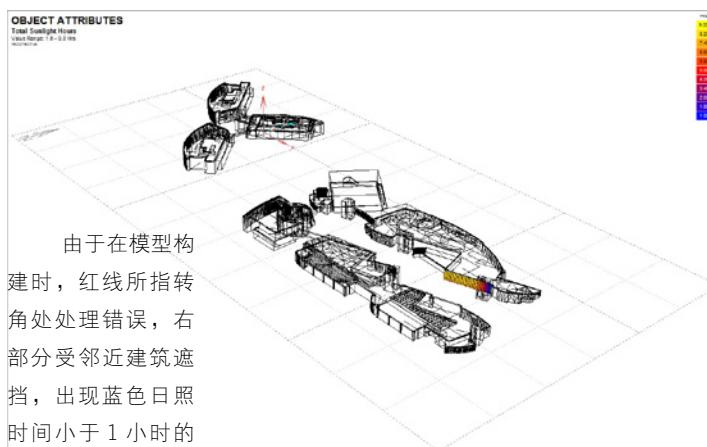
夏至日（06/22）分析，记录了am9: 00-pm17: 00之间的阴影变化情况，仅在楼群的北部区域形成较小的阴影。可能需要考虑夏季遮阳设施的使用。

GoogleEarth影像

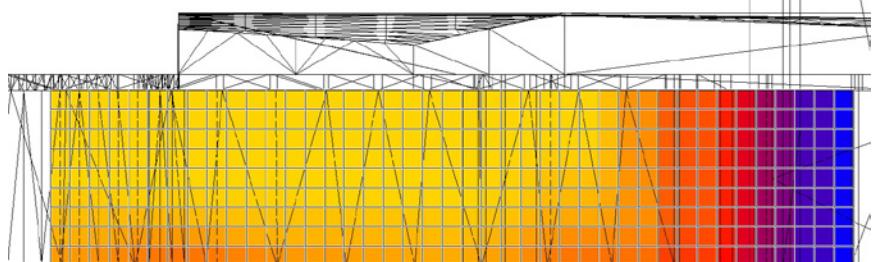
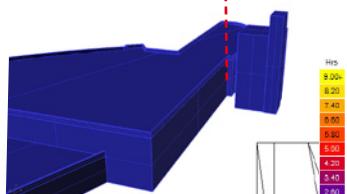


仅从阴影设置中获得相关日期、时间范围的阴影区域可以初步观察阴影变化情况，尤其典型日(冬至日、夏至日)的阴影变化来判断

建筑间阴影的互相影响和建筑外公共区域受建筑阴影影响的情况。为了进一步确定感兴趣区域，例如建筑某一面墙体日照情况，可以使用Ecotect/Calculate/Solar Access Analysis/Shading,Overshadowing and Sunlight Hours投影，遮挡和日照时间求得具体日照情况。



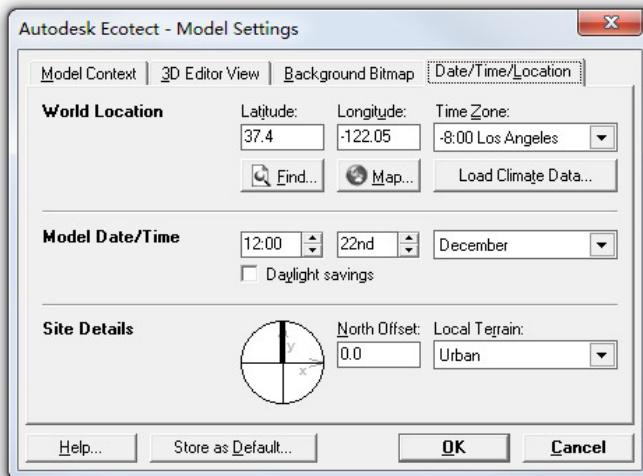
由于在模型构建时，红线所指转角处处理错误，右部分受邻近建筑遮挡，出现蓝色日照时间小于1小时的区域，如果不考虑该处错误，该建筑立面底部能够获得至少约6个小时的日照时间，上部则会获得更多的日照时间，即基本不会受到南部建筑对该处建筑的影响。



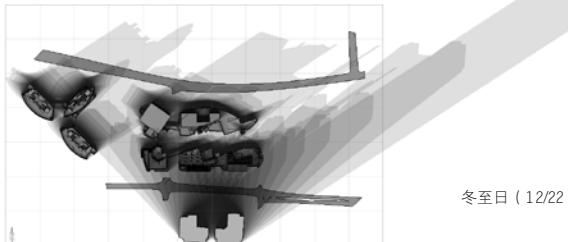
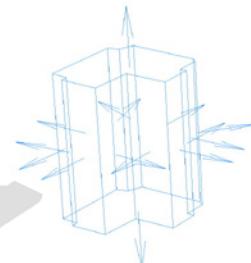
关于模型的方位和法线：

一般在设计的时候都会以正北为上的方式进行设计，因此模型在导入到Ecotect中可以不用修改方向，但是如果建筑北向与实际地理北向有偏角，需要在Model Settings中进行修正。

几何体的法线方向一般要求指向几何体外才能够获得正确的计算结果，因此在进行各项分析模拟前，需要检查和修正不正确的法线方向。



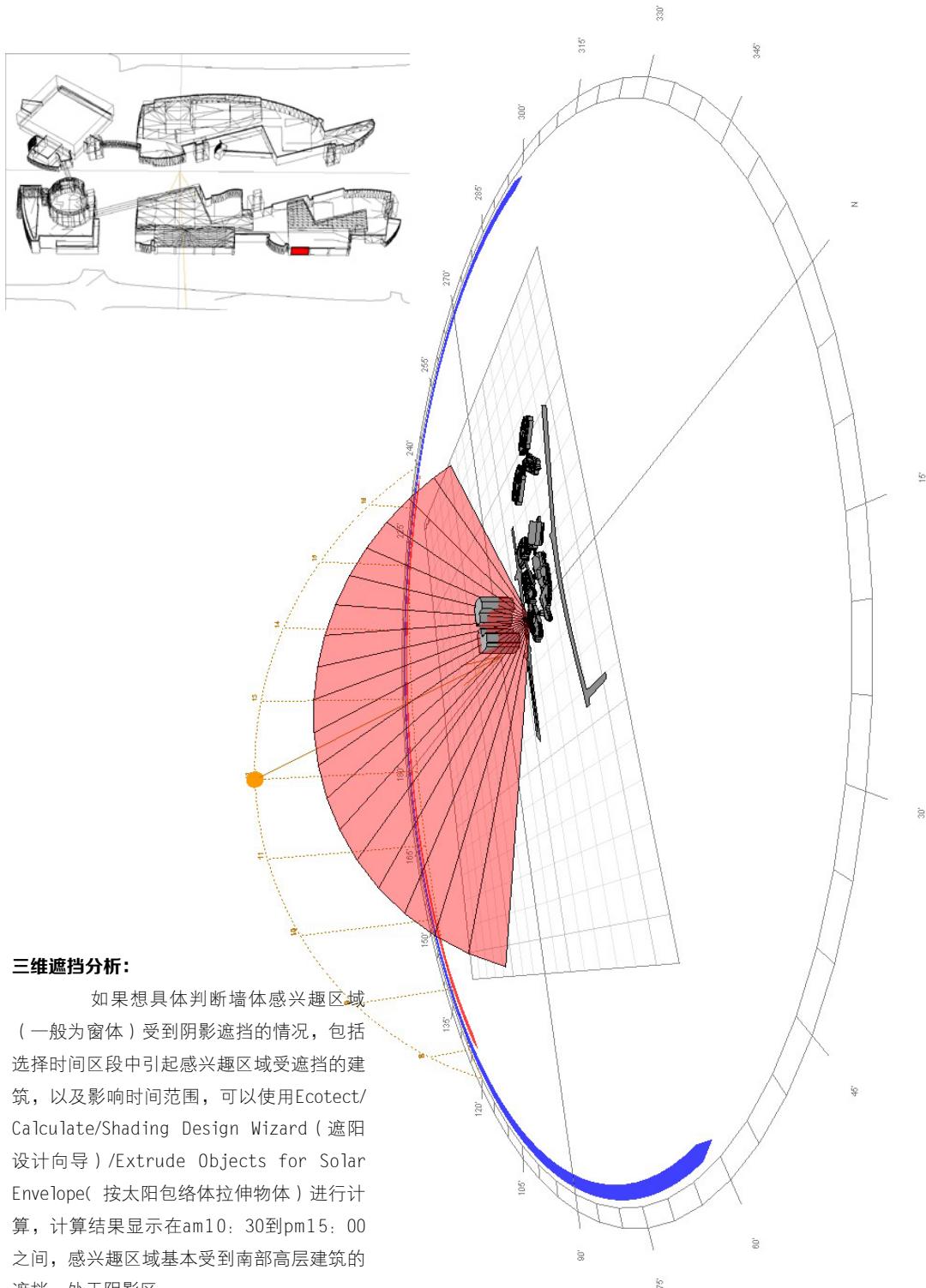
使用Display/Surface Normals查看法线方向，使用Modify/Surface Functions/Unitify Normals of Coincident Surfaces统一共面的法线方向。另外在RH中结合Python语言可以批处理法线的方向，具体内容可以参考〈模型构建〉相关章节。



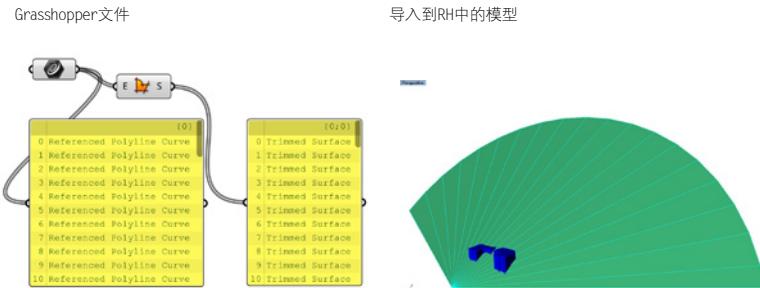
在Google总部的南部（隔一条道路）增加了两个（一组）90m的高层建筑，进一步分析高层的建设对Google总部的影响。



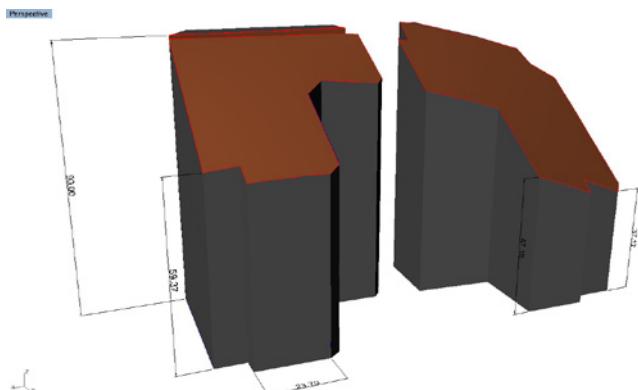
为了便于观察高层建筑的阴影变化情况，可以仅全部选中高层建筑，在Shadow Display中勾选Selected Objects Only选项即可。



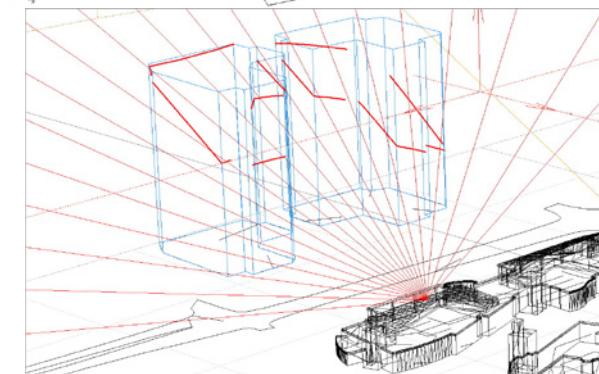
对于在Ecotect中分析的模型可以以DXF的方式导入到RH中进一步的进行模型构建，RH导入的DXF模型文件是线的方式（以Ecotect中的每个面生成一个闭合的线），因此需要根据导入的闭合线建立面，使用GH协助批处理完成。



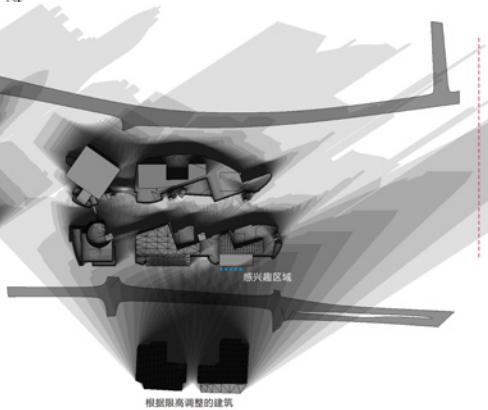
在RH中减去对Google总部感兴趣区域产生遮挡的区域，获得的建筑高度



在RH中根据Ecotect分析获得的对影响Google总部感兴趣区域的部分扇形面进行裁切获得建筑高度。一般根据获得最大阳光照射或者在地块紧凑无法获得全天日照的条件下，根据各国、各地区的日照标准获得最低日照时间，使用Ecotect等分析软件计算建筑高度，避免手工计算的繁琐。

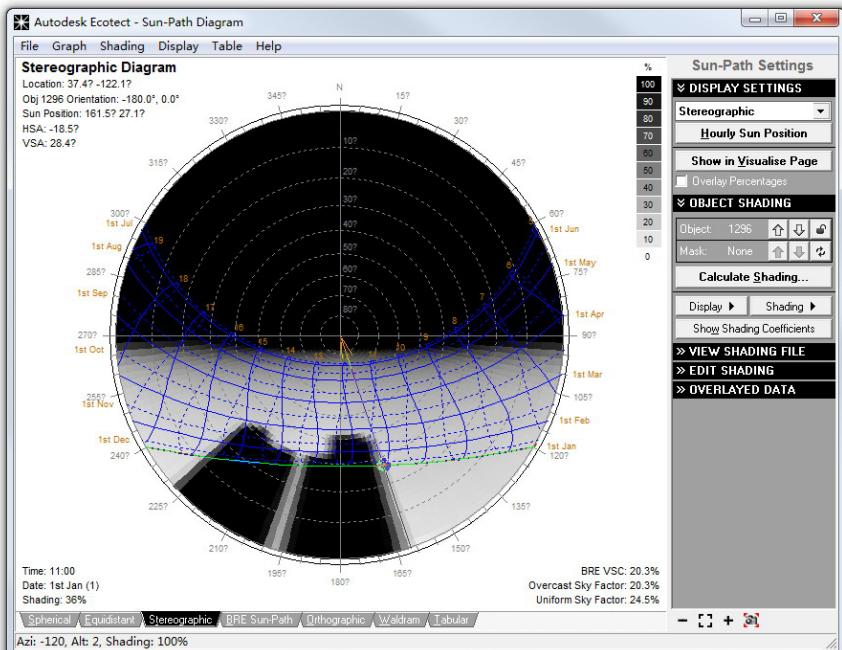


当然可以在Ecotect中直接获得南部建筑限高，使其全年都不能对其北部的Google总部感兴趣区域有遮挡。具体操作为：使用改变坐标原点工具在感兴趣区域下端从新设置坐标原点—选中高层建筑全部构建—使用Calculate/Shading and Shadows/Project Transform Origin/Follow Hourly Sun-Path命令进行计算。



在RH中调整完模型后输出OBJ格式

文件再在Ecotect中加载进行各项分析，比较。



除了从扇面与建筑相交处的辐射直线外，读出当日感兴趣区域受南部高层建筑遮挡的时间段数据外，可以使用太阳轨迹图进行计算全年时期的遮挡情况，并能够读出冬至日感兴趣区域的被遮挡情况：Calculate/Sun Path Diagram/Shading/Calculate Shading(计算遮挡)，图中黑色区域为完全被遮挡，灰色区域为部分被遮挡。可以

通过调整太阳的位置，在左侧上下边角文字注释处读出此时的太阳方位，时间，以及遮挡比例等信息。

太阳辐射

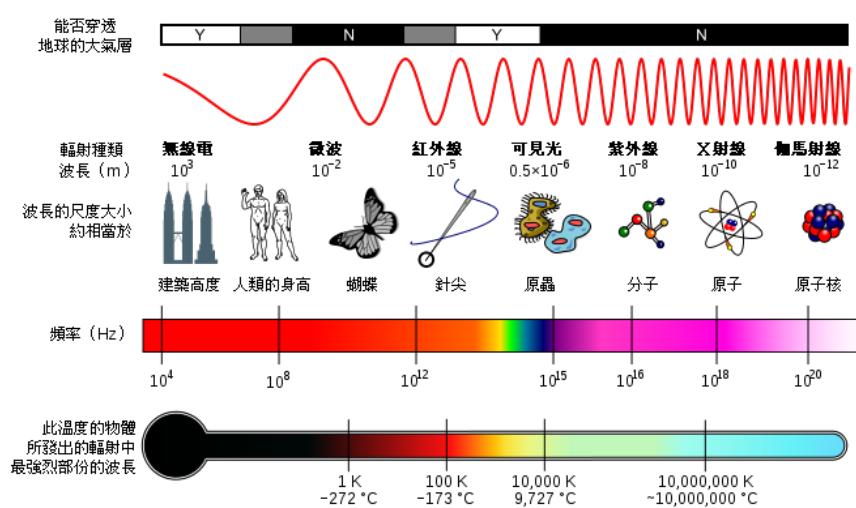
辐射的基本知识

1-辐射及特性：

辐射：物体以电磁波或粒子流形式向周围传递或交换能量的方式。

辐射能：物体以辐射的方式传递交换的能量。

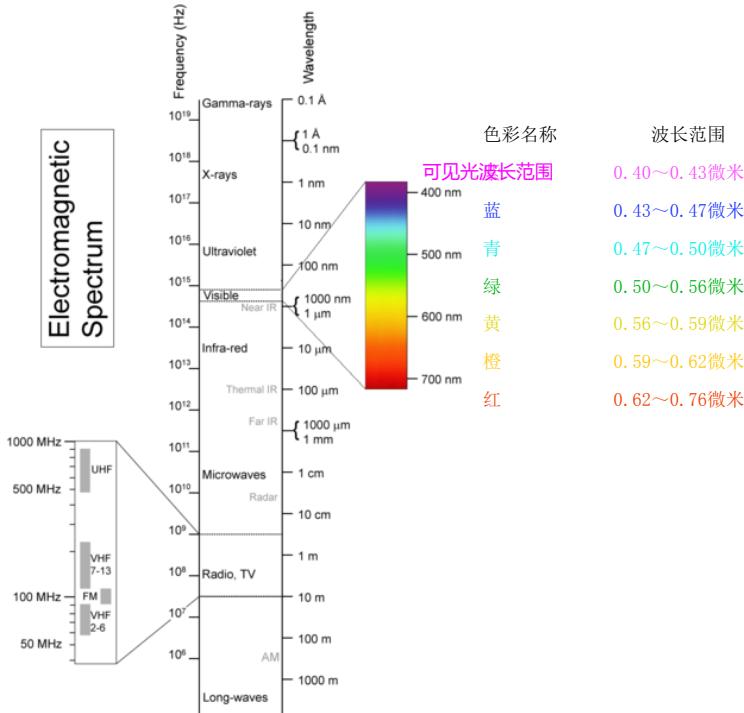
电磁波谱：在电磁学里，电磁波谱包括电磁辐射所有可能的频率。一个物体的电磁波谱专指的是这物体所发射或吸收的电磁辐射（又称电磁波）的特征频率分布。



2-辐射的度量和单位：

辐射通量 Radiant Flux：单位时间通过任意面积上的辐射能量。辐射通量的单位是瓦特(W)，量纲为功/时间，SI单
位表达为焦耳/秒。

辐射通量密度：单位面积上的辐射通量。辐射通量密度又被称为辐射强度、辐射能力或放射能力。 单位： $J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ 或 $W \cdot m^{-2}$ 。



不同电磁波的具体波长范围

名称	波长范围
紫外线	100埃~0.4微米
可见光	0.4微米~0.76微米
近红外	0.76微米~3.0微米
中红外	3.0微米~6.0微米
远红外	6.0微米~15微米
超远红外	15微米~1000微米
毫米波	1~10毫米
厘米波	1~10厘米
分米波	10厘米~1米

3-光通量+光通量密度+照度

光通量：表征辐射通量而产生光感觉的量。与辐射功率不同，光通量体现的是人眼感受到的功率。对大量具有正常视力的观察者所做的实验表明，在较明亮环境中人的视觉对波长为555.0nm左右的绿色光最敏感，这种人眼对各波长光谱敏感程度不同的性质可以由视见函数V(λ)表示。光通量就是用来表示辐射功率经过人眼的视见函数影响后的光谱辐射功率大小的物理量。国际单位制中规定，光通量的符号是Φ，单位为流明 (lm)。

光通量密度：单位面积上的光通量。单位：流明/米² ($lm \cdot m^{-2}$)

照度 illuminance：是每单位面积所接收到的光通量。SI制单位是勒克斯 (lx=lux)，1(勒克斯)=1(流明/平方米)。平常所说的桌面够不够亮，就是指照度。居家的一般照度建议在100~300勒克斯之间。

4-太阳辐射

太阳辐射强度(太阳辐射通量密度)：单位时间内投射到单位面积上的太阳辐射能量。单位： $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ；

太阳常数：当地球位于日地平均距离时(约为 $1.496 \times 10^8 \text{ km}$)，在地球大气上界投射到垂直于太阳光线平面上的太阳辐射强度。变化范围： $1325 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \sim 1457 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 我国采用的太阳常数值为 $1382 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ；

太阳光量常数：大气上界，太阳辐射产生的平均光照强度。范围： $1.35 \times 10^5 \sim 1.4 \times 10^5 \text{ lx}$ ；

太阳高度角：太阳光线与地表水平面之间的夹角($0^\circ \leq h \leq 90^\circ$)；

太阳方位角：太阳光线在水平面上的投影和当地子午线的夹角；

昼长的变化规律：相同纬度，昼长冬短夏长，春秋介于二者之间；夏季昼长随纬度升高而加长，冬季昼长随纬度升高而缩短，春、秋分则不随纬度升高而变；

可照时数(昼长)：不受任何遮蔽时每天从日出到日落的总时数。单位：小时、分；

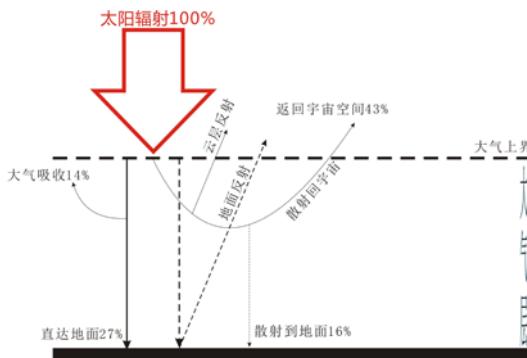
实照时数：地面上用日照计实际测量的日照时数；

日照百分率 = 实照时数 / 可照时数 × 100%；

光照时间 = 可照时数 + 曙暮光时间；

曙暮光：在日出前和日落后，太阳光线在地平线以下 $0^\circ \sim 6^\circ$ 时，光通过大气散射到地表产生一定的光照强度，这种光称为曙光和暮光。一般曙暮光随纬度升高而加长；夏季尤为显著；

大气对太阳辐射的减弱：



减弱方式：

1-吸收作用：主要的吸收成分氧、臭氧、水汽和 CO_2 。

各成分的吸收波段

气体成分	强吸收波段	弱吸收波段
氧	<200nm的紫外光	690~760nm的可见光
臭氧	200~320nm的紫外光	600nm的可见光
水汽	930~1500nm的红外光 (三个强吸收带)	600~700nm的可见光 (三个弱吸收带)

2-散射作用：当太阳辐射通过大气时，遇到大气中的各种质点，太阳辐射能的一部分散向四面八方，称为散射。

3-反射作用：参与反射作用的物质——大气中较大的尘粒和云滴、云层。云的反射能力随云状、云量和云厚而不同。云量愈多，云层愈厚，反射愈强。云层平均反射率为50%~55%。

减弱因素：

1-大气质量：太阳光通过大气路径的长度与大气铅直厚度之比。 大气质量 m 随太阳高度的增高而减小，当太阳高度低时， m 值的增大特别迅速。

h (度)	90	60	30	10	5	3	1	0
m	1	1.15	2.0	5.6	10.4	15.4	27.0	35.4

2-大气透明系数(P)：透过一个大气质量($m = 1$)后的太阳辐射强度 (S_1)与透过前的太阳辐射强度(S_0)之比，影响因子——海拔、水汽、微尘、云雾。地表垂直于太阳光线平面上的太阳辐射强度随大气透明系数增大而增大，随大气光学质量增加而减小。

到达地面的太阳辐射强度：

到达地面的太阳总辐射由太阳直接辐射强度和天空辐射强度(散射辐射强度)组成。

太阳直接辐射强度：单位时间内以平行光形式投射到地表单位水平面积上的太阳辐射能。

影响因子——大气透明系数(P)、大气量(m)和太阳高度角(h)影响，此外，纬度、海拔、坡度坡向和云量有间接或直接的影响。

天空散射辐射强度(D)：阳光被大气散射后，单位时间内以散射光形式到达地表单位水平面积上的太阳辐射能。

影响因子——主要受太阳高度角(h)、大气透明度(P)和大气量(m)影响，此外，纬度、海拔、云量有直接和间接的影响。

太阳总辐射强度：到达地面的太阳总辐射强度是太阳直接辐射强度和天空辐射强度的总和。

影响因子——

- 太阳高度角(h)：太阳总辐射与太阳高度呈正相关关系。
- 大气透明度(P)：大气透明度差，到达地面的太阳直接辐射减少，故太阳总辐射减少。
- 大气质量(m)：大气质量 m 愈大，到达地面的太阳总辐射愈少。
- 纬度：纬度愈高，太阳总辐射愈少。
- 海拔：海拔愈高，地面接受的太阳总辐射愈强。
- 坡度坡向：北半球北回归线($23.5^\circ N$)以北地区，纬度愈高，愈是表现出南坡向阳、北坡背阴，冬季比夏季显著。
- 云：一般云愈厚、愈多，太阳直接辐射愈弱，散射辐射的比例增大。

地面反射的太阳辐射：

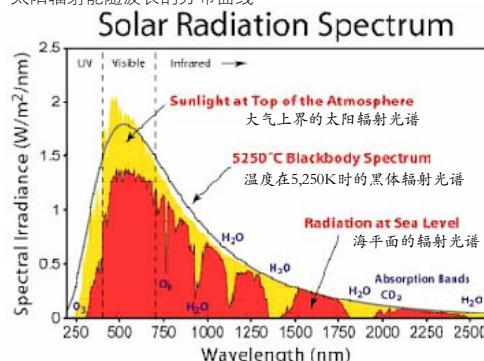
地面反射率：地面反射的太阳总辐射 R 与投射到地面的太阳总辐射 Q 的百分比。

不同性质下垫面的反射率

种类	反射率 (%)	种类	反射率 (%)
干的新雪	80~95	棉花	20~22
一般雪面	60~70	甜菜	18~25
污秽雪面	40~50	马铃薯	19~27
干黑土	14	水稻田	17~22
湿黑土	8	牧草田	15~25
新耕地	17	针叶林	10~15
冬小麦	16~23	阔叶林	15~20

- 深色土壤小于浅色土壤
- 潮湿土壤小于干燥土壤
- 新雪表面大于陈雪表面

太阳辐射能随波长的分布曲线



几个重要波段

名称	波段(nm)	占总能量的比例(%)	效 应	作 用
可见光	400—760	50	光效应	植物光合作用
红外区	>760	43	热效应	加热地球、大气和生物
紫外区	<400	7	化学效应	杀菌消毒、促进种子萌发

波谱随太阳高度角 h 的变化：

太阳高度角降低，直接辐射光谱中，波长较长的部分逐渐增加，波长较短的部分逐渐减少。

不同太阳高度时太阳直接辐射光谱中各部分的相对强度(总辐射量=100%)

辐射波谱 (nm)	太阳高度角 (度)						
	0.5	5	10	20	30	50	90
紫外线 (295~400)	0	0.4	1.0	2.0	2.7	3.2	4.7
可见光 (400~760)	31.2	38.6	41.0	42.7	43.7	43.9	45.3
其中:							
紫光 (400~440)	0	0.6	0.8	2.6	3.8	4.5	5.4
蓝光 (440~495)	0	2.1	4.6	7.1	7.8	8.2	9.0
绿光 (495~565)	1.7	2.7	5.9	8.3	8.8	9.2	9.2
黄光 (565~595)	4.1	8.0	10.0	10.2	9.8	9.7	10.1
红光 (595~760)	25.4	25.2	19.7	14.5	13.5	12.2	11.5
红外线 (>760)	68.8	61.0	58.0	55.3	53.5	52.9	50.0

h (度)	<400	400~600	>600
3	5.9	53.3	40.8
15	14.6	58.2	27.2
30	20.4	56.1	23.5
45	23.2	54.8	22.0
60	24.6	54.2	21.2
90	25.8	53.5	20.7

太阳散射辐射波谱随太阳高度角h的变化:

散射辐射光谱随太阳高度角、大气透明系数和云量而变化。干洁空气中, h降低, 散射辐射中波长较短的部分逐渐减少, 波长较长部分逐渐增多, 而波长在400nm~600nm的可见光几乎不随h而变化。当天空中有较多粗粒或全天有云时, 散射辐射光谱中的长波部分能量增加, 其最大辐射能力波长也向长波方向移动。

5-地面辐射差额

地面辐射: 地面昼夜不停的向外放射辐射能, 称为地面辐射(Ee)。 波长范围--3,000nm ~ 80,000nm, 最大放射能力波长约为10,000nm。日变化--白天>夜间。

大气辐射: 大气向外的辐射。

大气逆辐射(Ea): 大气辐射中传向地面的辐射。波长范围--7,000nm ~ 120,000nm, 最大放射能力波长约为15,000nm。

地面有效辐射(E0): 地面辐射与被地面吸收的大气逆辐射之差, 亦称净红外辐射。

影响因子--地面温度、空气温度、空气湿度、云况、风力、海拔、地面状况和植被等。

地面辐射差额(B): 在单位时间内, 单位面积地面所吸收的辐射与放出的辐射之差, 称为地面辐射差额(B).也称地面净辐射。

太阳辐射与植物

景观设计师规划场地中最重要的一项就是植物规划, 根据植物对不同光照强度的生态适应, 例如植物的喜阳, 喜阴, 中性特点进行植物的布置。

传统分析中会根据场地分析中阴影变化, 场地方位, 考虑植物的生态习性确定栽植位置, 这个位置的确定虽然参考了阴影变化的情况, 但是仍旧不能够再进一步精确确定位置选择的精度, 目前可以结合Ecotect的Photosynthetically Active Radiation(光合有效辐射)功能, 分析场地中可以用于光合作用的太阳辐射分布情况, 找出适合喜阴, 喜阳型植物的适宜栽植区域。

光合有效辐射photosynthetically active radiation;PAR : 太阳辐射光谱中可被绿色植物的质体色素吸收、转化并用于合成有机物质的一定波段的辐射能。

绿色植物进行光合作用过程中, 吸收的太阳辐射中使叶绿素分子呈激发状态的那部分光谱能量。波长约为400~700纳米, 以符号Qp代表,单位为瓦/米²。光合有效辐射是植物生命活动、有机物质合成和产量形成的能力来源。

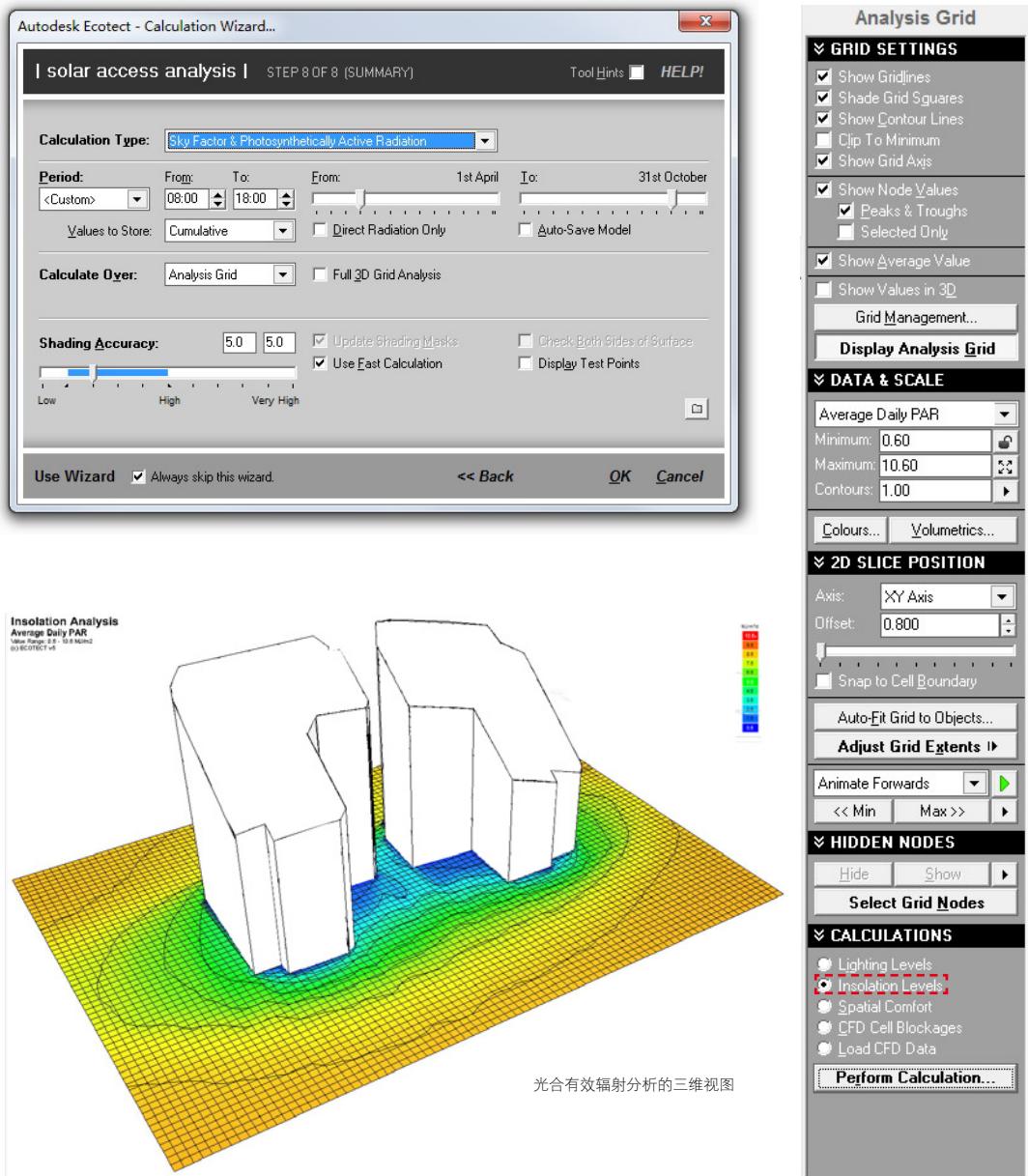
太阳直接辐射中的光合有效辐射系数, 即直接辐射中的光合有效辐射与太阳直接辐射之比, 随太阳高度角的增大和大气混浊度的减小而增高。其比值随时间的变化在晴天快, 一般早晚低, 正午前后高而稳定, 夏季高, 冬季低。晴朗的冬季, 当太阳高度从10° 增加到45° 时, 光合有效辐射系数由0.35增加到0.45; 夏季则由0.47增加到0.48。散射辐射中的光合有效辐射系数基本上不随太阳高度角改变, 但在晴阴不同的天气类型下, 却存在一定变化, 并比直接辐射中的光合有效辐射系数偏大, 介于0.50~0.60之间。

光合有效辐射可用仪器直接测定。为取得太阳直接辐射和散射辐射与光合有效辐射之间的比例系数，可将日射仪或天空辐射表和光合有效辐射仪进行同步观测，计算出日、月、季和年的系数及其相互关系。苏联X.莫尔达乌等人研究了太阳直接辐射(S)和漫射辐射(D)与光合有效辐射(Q_p)的定量关系，列出了计算式并指出在中高纬度4~9月中旬太阳高度不低于20°时，该式对光合有效辐射日总量或月总量的计算误差不超过5%。其计算式为：

$$Q_p = 0.43S + 0.57D$$

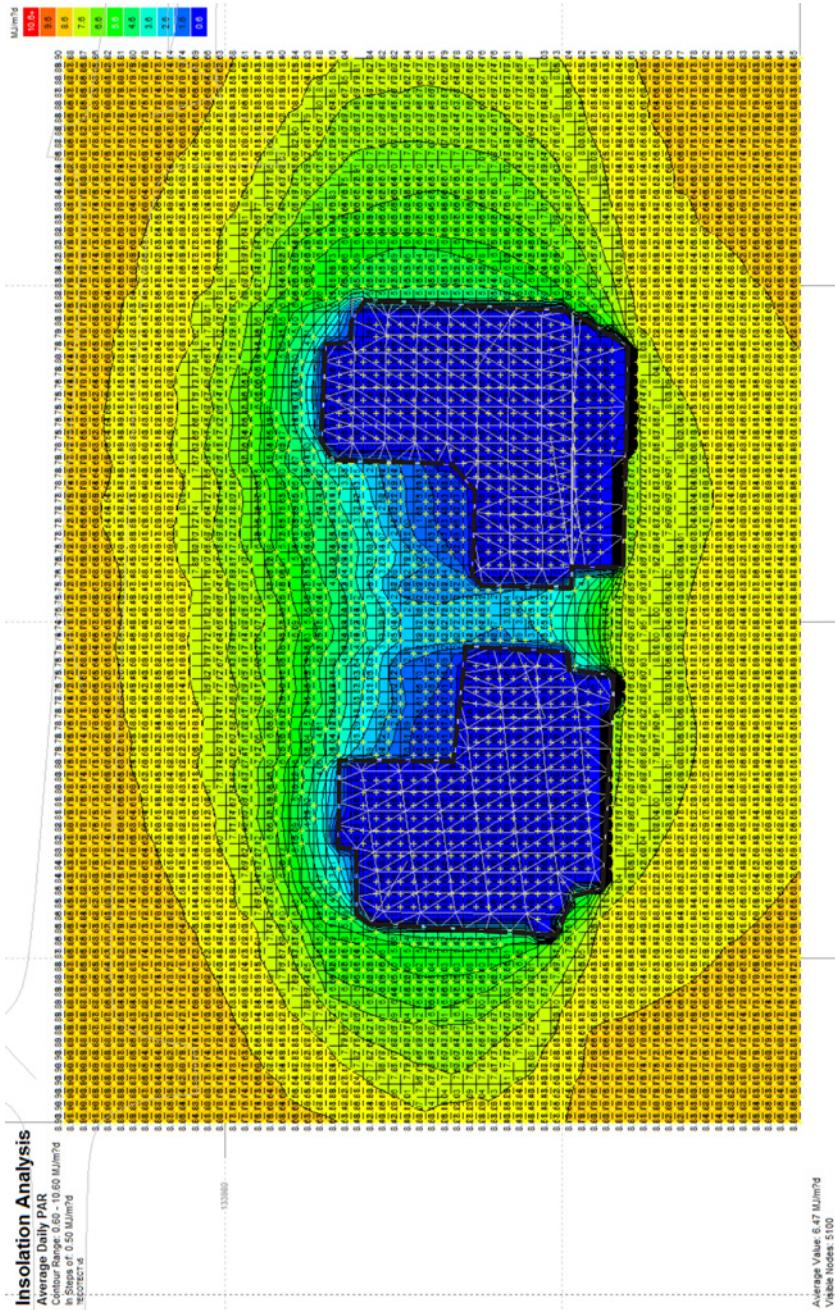
对绿色植物生长发育有作用的辐射波长范围较光合有效辐射波长范围为宽，大致在300~800纳米范围内，这一部分辐射称为生理辐射，它除对光合作用起作用外，也对其他一些生理活动有影响。引自：百度百科

选择Calculations中的Insolation Levels执行Perform Calculation，在Solar access analysis中选择Sky Factor&Photosynthetically Active Radiation，设置时间段为一般植物生长的时间段4月1日~10月31日之间，执行计算。



光合有效辐射分析的三维视图

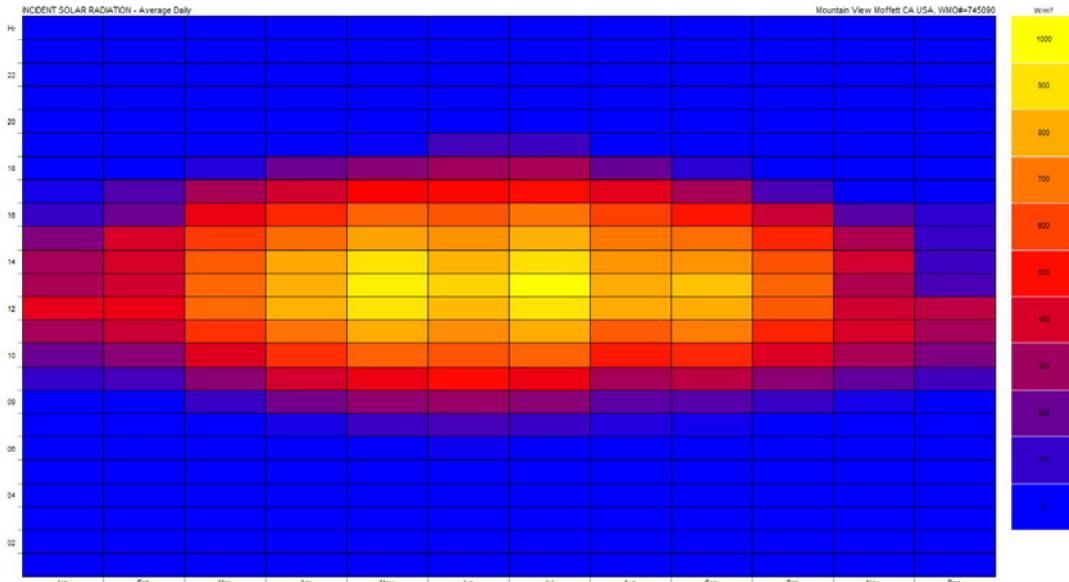
分析后获得光合有效辐射，一般太阳辐射能小于 $3\text{MJ/m}^2\text{d}$ 的区域需要种植喜阴植物；太阳辐射介于 $3\sim 6\text{MJ/m}^2\text{d}$ 的区域适合种植中性植物；高于 $6\text{MJ/m}^2\text{d}$ 的区域适合种植喜阳之物。图中 $0.0\text{MJ/m}^2\text{d}$ 的区域基本是楼宇区域，在没有楼宇产生阴影的区域基本为喜阳植物适宜区域。在实际植物栽植设计中一般都是乔灌草搭配设计，因此乔木层下也会降低光合有效辐射。对于分析的楼宇，北部区域楼间的光合有效辐射很低，然后逐渐增加，可以在Data & Scale下设置显示区间及间隔，并勾选Grid Section中的Clip To Minimum去除最小值下的范围，获得喜阴、中性、喜阳植物的区间，或者参考本书<模型构建>协同设计方法部分，使用GH获得数据分级。



太阳辐射与围护结构

太阳辐射可以穿过建筑的围护结构进入到室内，一般认为当围护结构每小时的太阳辐射Solar Radiation低于 250W/m^2 时，没有必要对窗户遮阳，当高于 600W/m^2 时，对非窗体的墙体维护结构遮阳也是必要的，或者增加隔热材料。

对于感兴趣区域的太阳辐射分析使用Ecotect/Analysis/Solar Exposure工具，选择Calculation/Average Daily日平均/Solar Data to Displays/Incident入射进行计算，可以圈出大于 600W/m^2 的区域，说明对于感兴趣区域（屋顶）的遮阳或者使用隔热材料减小室内辐射能得增加是有必要的。



Google总部的屋顶具有较高的反射光，可以推测使用了太阳能板，在收集太阳能的同时也能够对屋顶具有遮阳的作用。



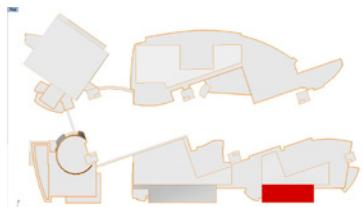
用于太阳辐射分析的感兴趣区域

太阳辐射与光电能

目前光电设备的造价可以满足给独立住宅供电或者在能力需求高峰时使用，以及在远离电网的村落中广泛的应用光电能。

要想最大限度的获取太阳辐射，必须使集电器与太阳辐射方向垂直。但是对于建筑一体式集电器则需要考虑朝向及倾角，倾角一般为一年中建筑需求能量最大时获取最大辐射的角度。为了更加定量的比较建筑不同位置放置集电器所收集太阳能的多少以确定安置位置，可以使用Ecotect来计算同一规格的太阳能光电板（集电器）的发电量。

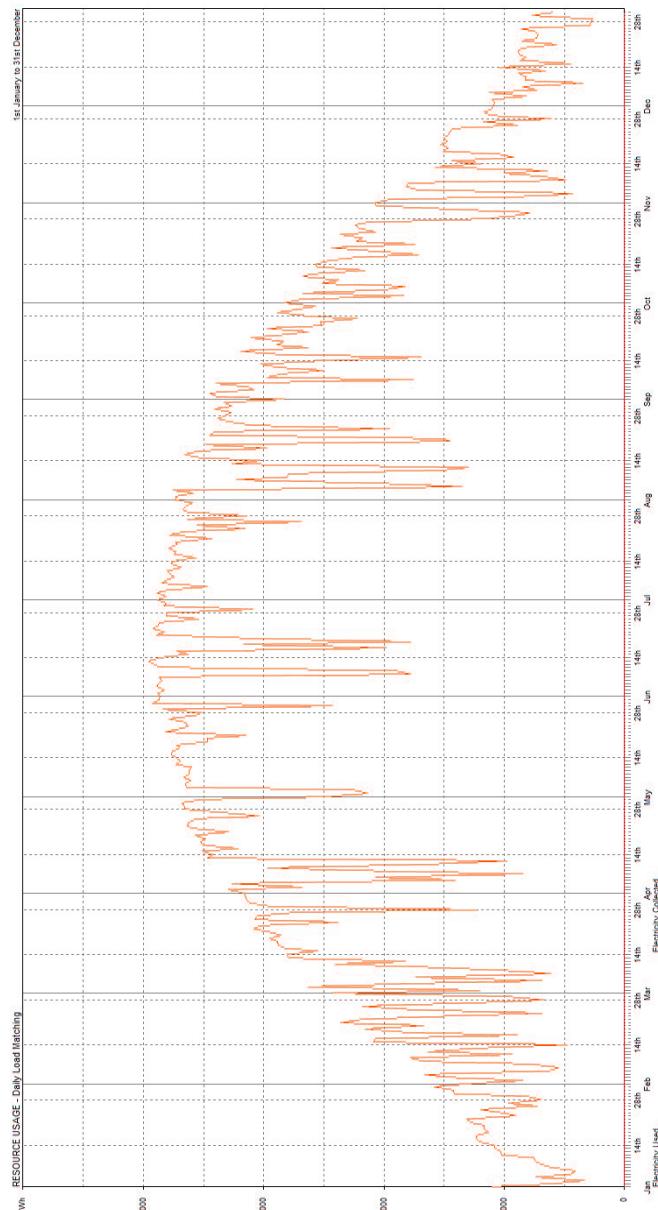
选择感兴趣区域，设置材料为SolarCollector,选择Calculate/Inter-Zonal Adjacencies区域间相邻计算，然后在Analysis/Resource Consumption资源消耗选项卡下，执行Calculate计算。

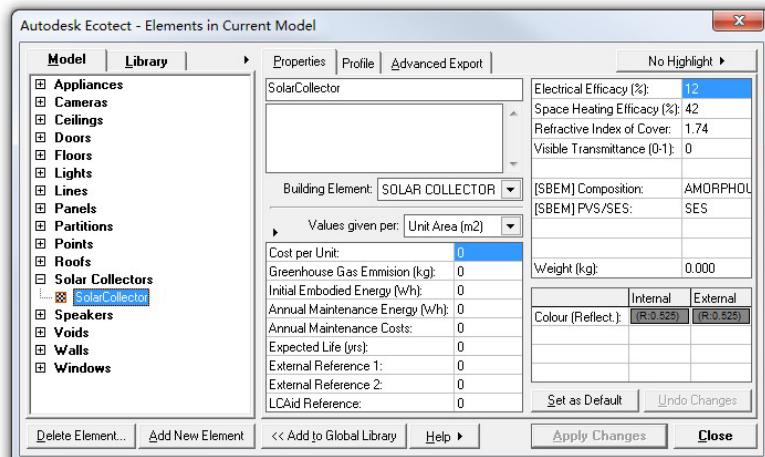


用于光电能分析的兴趣区域A

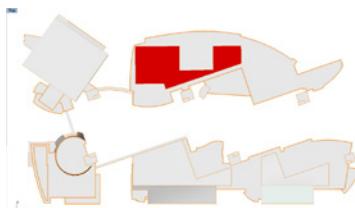
A具体数据

RESOURCE USAGE - Daily Load Matching			
Model: D:\04-DISSERTATION\Phase06\EcoSunlight03.eco			
Collectors 3.521 m ² [1 Object(s)]			
MONTH	(Wh)	(¥)	(Wh)
Jan	0	0	295430 19.2
Feb	0	0	397777 25.86
Mar	0	0	719990 46.8
Apr	0	0	904513 58.79
May	0	0	1078365 70.09
Jun	0	0	1050183 68.26
Jul	0	0	1131231 73.53
Aug	0	0	916754 59.59
Sep	0	0	842720 54.78
Oct	0	0	662379 43.05
Nov	0	0	383324 24.92
Dec	0	0	238799 15.52





太阳能光电板材料参数设置，目前一般Electrical Efficacy光电转换效率为6%~14%之间。

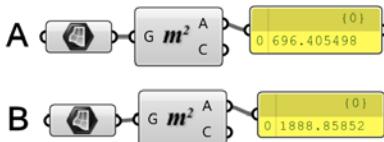


用于光电能分析的兴趣区域B

RESOURCE USAGE - Daily Load Matching
Model: D:\04-DISSERTATION\Phase06\EcoSunlight03.eco
Collector 111.103 m² [2 Object(s)]

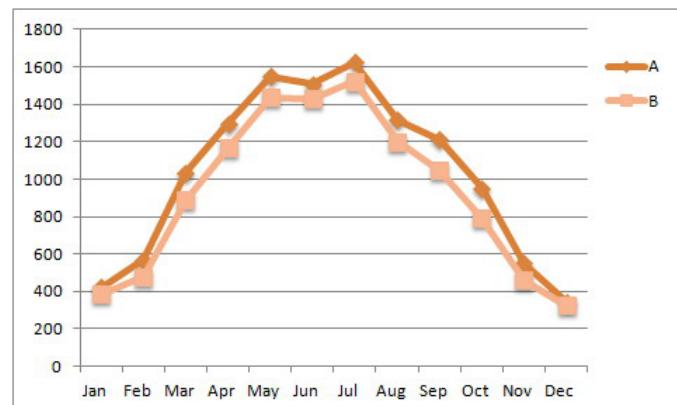
MONTH	ELECTRICITY USE (Wh)	SOLAR COLLECTION	
		(Wh)	(¥)
Jan	0	0	730631 47.49
Feb	0	0	903898 58.75
Mar	0	0	1674469 108.84
Apr	0	0	2201098 143.07
May	0	0	2715681 176.52
Jun	0	0	2702280 175.65
Jul	0	0	2879039 187.14
Aug	0	0	2269941 147.55
Sep	0	0	1976646 128.48
Oct	0	0	1491072 96.92
Nov	0	0	870173 56.56
Dec	0	0	613397 39.87

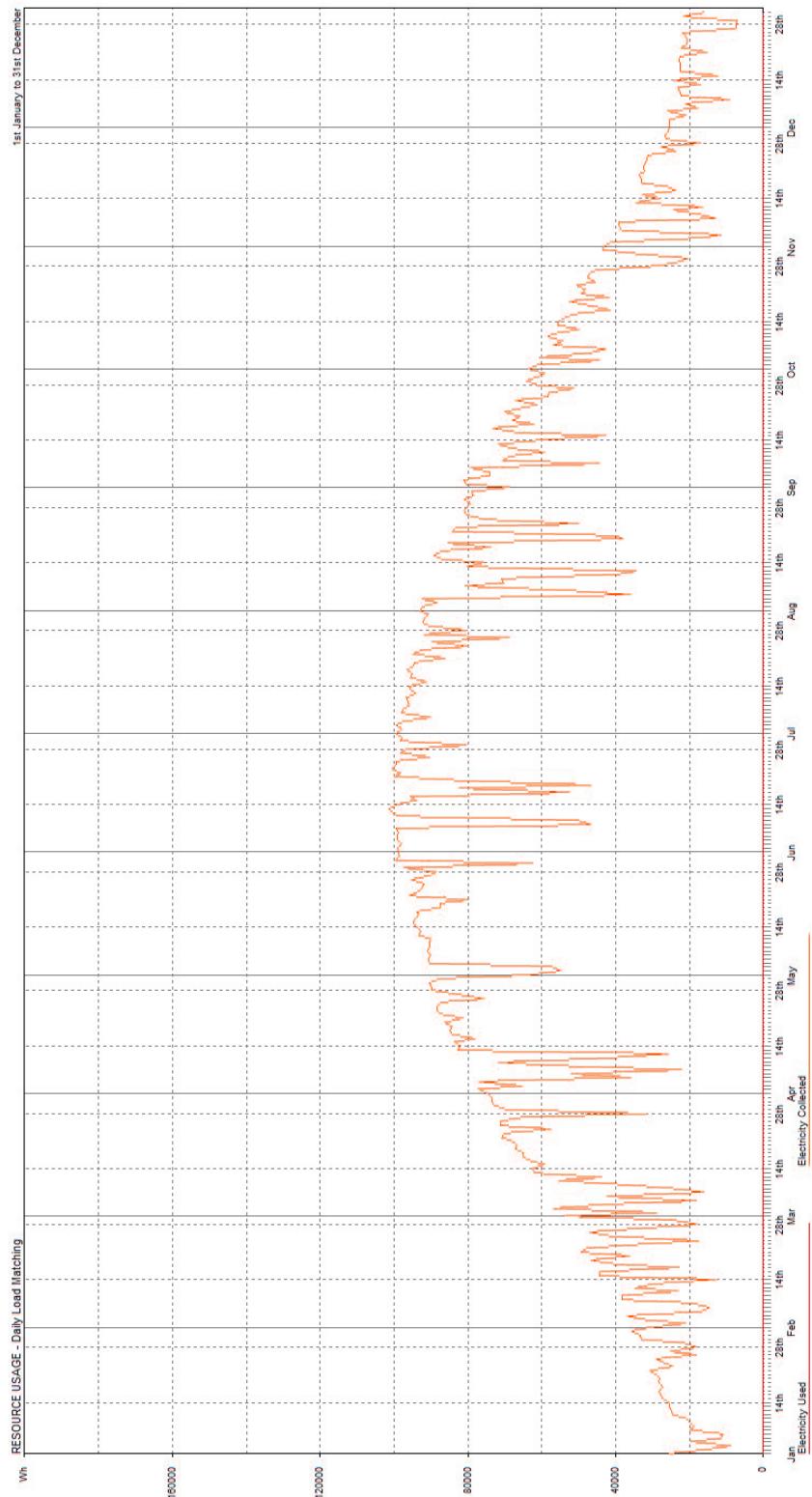
B具体数据



为了比较A, B太阳能光电板的收集情况，需要计算单位面积的光电转换能，可以在RH中使用GH计算感兴趣区域面积。在Excel中进行统计分析：

分析结果显示A区域要比B区域光电转换能高，即向南区域高于向北区域。





光环境

人们把光定义为我们眼睛可以感觉到的那部分电磁波频谱，与颜色、建筑共同建立起影响人们生理和心理的环境。在听觉、视觉、嗅觉、触觉的认知世界里，80%的信息来自于视觉。因此，创建舒适的光环境，提高视觉效能，会对人的精神状态和心理感受产生积极影响。例如生产、工作和学习的场所需要很好的光环境以轻松辨识工作内容，休息、娱乐等场所可能更需要舒适、优雅的光环境气氛。

但是，在满足人们生理、心理需求的同时，需要关注建筑节能，尽量以良好的自然采光设计降低照明能耗。自然采光是指通过建筑围护结构上的各种孔洞将直射、散射的自然光引入室内为使用者提供照明的过程。具有光效高、显色性好和节能人工光源的自然光，在减少能耗的同时，可以减少由于人工照明引起的空调能耗，对于商业和教育科研建筑，良好的自然光环境设计大约可以减少30%~40%的能耗。

更为重要的是自然光是万物生长的源泉，太阳光系全光谱辐射，可以使人的机体内长生维生素等多种营养物质，人们在自然光下活动，在心理、生理上感到舒适愉悦，有助于身心健康。同时自然光能够消除居室内的霉气，抑制微生物的生长，改善室内居住环境。

1-基本光度单位 (部分内容与太阳辐射部分重叠，可以综合参考)

- **光通量Luminous Flux:** 光通量是指人眼所能感受到的辐射能量，它等于单位时间内某一波段辐射能量和该波段的相对视见率的乘积。由于人眼对不同波长光的相对视见率不同，所以不同波长的辐射功率相等时，其光通量并不相等。光通量常用 Φ 表示，单位为流明lm；
- **发光强度Luminous Intensity:** 发光强度简称光强，通常用I来表示，单位是candela(坎德拉)，简写为cd (国际单位制的7个基本单位之一)。1 cd是指单色光源 (频率 540×10^{12} Hz，波长555nm) 的光在给定方向上 (该方向上的辐射强度为 $1/683\text{W}/\text{sr}$) 的单位立体角内发出的发光强度。它表明了发光体在空间发射的汇聚能力，可以说，发光强度就是描述了光源到底有多亮。发光强度针对点光源而言，或者发光体的大小与照射距离相比较小的场合；
- **照度Illuminance:** 从同一方向看，在给定方向上任何表面的每单位投影面积上的光照强度，常用符号E。它表示被照面上的光通量密度，单位是lx或lux (勒克斯)，在英制单位中，为fc (英尺烛光)， $1\text{fc}=0.76\text{lx}$ 。
- **亮度Luminance:** 亮度是指发光体 (反光体) 表面发光 (反光) 强弱的物理量。人眼从一个方向观察光源，在这个方向上的光强与人眼所“见到”的光源面积之比，定义为该光源单位的亮度，即单位投影面积上的发光强度。亮度单位是cd/m² (坎德拉/平方米) 或者sb (熙提)， $1\text{sb}=104\text{cd}/\text{m}^2$ ；有时亮度单位也写成nit， $1\text{nit}=1\text{cd}/\text{m}^2$ ；
- **发光效能Luminous Efficacy:** 建筑光学中，常用光通量表示某一光源发出的光能多少。例如，一只100w的普通白炽灯发出11791m的光通量，40w的白色荧光灯发出24001m的光通量。因此建筑上又引出一个新的概念——发光效能Luminous Efficacy。发光效能可以理解为每瓦功率产生可见光的总量，单位是lm/W。发光效能越高，就意味着可以用更少的能源产生同样多的光通量。例如，节能 (即紧凑型) 荧光灯的发光效能就明显高于白炽灯，从而就更加省电。一只35W的节能灯发出的光线总量，相当于一只100W白炽灯发出的光线总量；
- **发光效率Luminous Efficiency:** 发光效率是一个与发光效能有关的概念，指光源发出的可见光占总发出辐射的比值。例如，100W白炽灯的放光效率为2.6%，就是说100W白炽灯发出的辐射中，只有2.6%是可见光。理论上，理想的绿色单色光源 (波长555nm) 具有最高的发光效能，即6831mW，发光效率是100%，即改光源发出的所有辐射都为可见光；

引自《Autodesk Ecotect Analysis 2011绿色建筑分析应用》

Lighting Level 照度级(lux)	Criteria Reference 标准参考
50	Cat Park / Store Room 公园与储藏室
100	Corridor / Stairs 走廊/楼梯间
200	Lift / Waiting Areas 电梯/等候室
400	Office Desk / Working Shop 办公室/工作间
600	Drafting / Inspection / Sales 书写/检查/销售
900	Instrument / Product Display 仪器使用/商品展示
1200	Sorting / Grading / Jeweller 排序/分级/珠宝
	Cite Ecotect

环境	照度(单位:lux)
烈日	100,000
阴天	8,000
绘图	600
阅读	500
夜间棒球场	400
办公室/教室	300
路灯	5
满月	0.2
星光	0.0003

日常的代表性照度

引自：维基百科Wikipedia

Illuminance	Example
10^4 lux	Total starlight, overcast sky 星空/阴天
0.002 lux	Moonless clear night sky with airglow 没有月光带有气辉的明亮夜晚
0.01 lux	Quarter moon 弦月
0.27 lux	Full moon on a clear night 满月的明净夜晚
1 lux	Full moon overhead at tropical latitudes 满月的热带天空
3.4 lux	Dark limit of civil twilight under a clear sky 民用曙暮光
50 lux	Family living room 家庭活动室
80 lux	Hallway/toilet 过厅/盥洗室
100 lux	Very dark overcast day 阴天
320 - 500 lux	Office lighting 办公室
400 lux	Sunrise or sunset on a clear day 明净天空的日出，日落
1,000 lux	Overcast day; typical TV studio lighting 阴天；典型的电视演播室
10,000 - 25,000 lux	Full daylight (not direct sun) 白昼（无太阳直射）
32,000 - 130,000 lux	Direct sunlight 直射阳光

Cite Wikipedia

国际单位制光度单位

引自：维基百科Wikipedia

国际单位制光度单位

物理量	符号	国际单位制	单位符号	注释
光能 (Luminous energy)	Q_v	流明·秒	lm·s	单位有时被称作“talbots”。
光通量 (Luminous flux)	Φ_v	流明 ($lm = cd \cdot sr$)	lm	单位时间内由光源 ($/$ 被照物) 所发出 ($/$ 吸收) 的光能。
发光强度 (Luminous intensity)	I_v	坎德拉 ($cd = lm/sr$)	cd	发光强度是一光源所发出的在给定方向上单位立体角内的光通量。
亮度 (Luminance)	L_v	尼特 ($nit = cd/m^2$)	nit	亮度是一光源单位在给定方向上单位面积单位立体角内所发出的光通量。
照度 (Illuminance)	E_v	勒克斯 ($lx = lm/m^2$)	lx	照度是每单位面积所接受可见光的光通量，用于入射表面的光。
光发射度 (Luminous emittance)	M_v	勒克斯 ($lx = lm/m^2$)	lx	光发射度是每单位面积所发出可见光的光通量，用于出射表面的光。
曝光量 (luminous exposure)	H_v	勒克斯·秒	lx·s	也称作 photometric exposure
光视效能 (Luminous efficacy)	η	流明每瓦特	lm/W	光通量与辐射通量的比值，最大为 683.002。
发光效率 (luminous efficiency)	V	纯数量	无单位	也称作光视效率、发光系数(luminous coefficient)

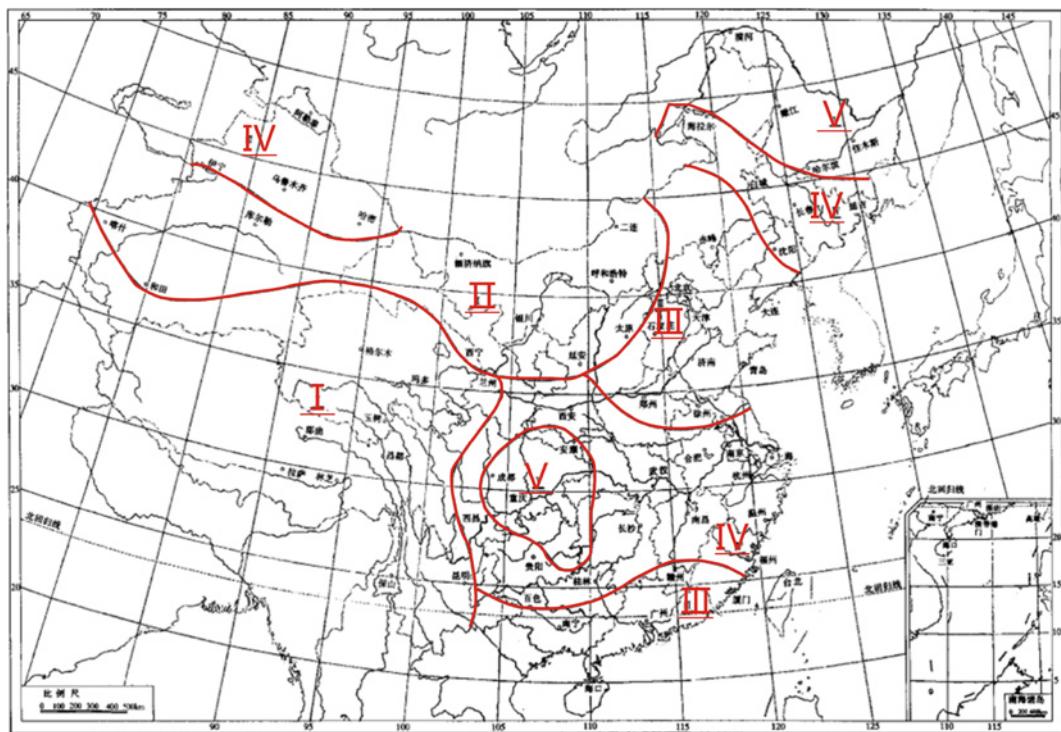
2-《建筑采光设计标准》

• 采光系数 Daylight Factor：在室内给定平面上的一点，由直接或间接地接收来自假定和已知天空亮度分布的天空漫射光而产生的照度与同一时刻该天空半球在室外无遮挡水平面上产生的天空漫射光照度之比。

采光等级	视觉作业分类		侧面采光		顶部采光	
	作业精确度	识别对象的最小尺寸d (mm)	采光系数最低值 C_{min} (%)	室内天然光临界照度	采光系数平均值 C_{av} (%)	室内天然光临界照度 (lx)
I	特别精细	$d \leq 0.15$	5	250	7	350
II	很精细	$0.15 < d \leq 0.3$	3	150	4.5	225
III	精细	$0.3 < d \leq 1.0$	2	100	3	150
IV	一般	$1.0 < d \leq 5.0$	1	50	1.5	75
V	粗糙	$d > 5.0$	0.5	25	0.7	35

注：表中所列采光系数标准值适用于我国III类光气候区。采光系数标准值是根据室外临界照度为5000lx制定的。亮度对比小的II、III级视觉作业，其采光等级可提高一级采用。

• 光气候 daylight climate: 由太阳直射光、天空漫射光和地面反射光形成的天然光平均状况。



注：按年平均总照度（klx） I、 $E_{\text{q}} \geq 28$ II、 $26 \leq E_{\text{q}} < 28$ III、 $24 \leq E_{\text{q}} < 26$ IV、 $22 \leq E_{\text{q}} < 24$ V、 $E_{\text{q}} < 22$

本图上中国国界线系按照中国地图出版社1989年出版的《中华人民共和国地图》绘制。

所在地区的采光系数标准值应乘以相应地区的光气候系数K。

光气候系数K 光气候区	I	II	III	IV	V
k值	0.85	0.90	1.00	1.10	1.20
室外天然光临界照度值E ₁ (1x)	6000	5500	5000	4500	4000

对于 I 、 II 采光等级的侧面采光和矩形天窗采光的建筑，当开窗面积受到限制时，其采光系数值可降低到 III 级，所减少的天然光照度应用人工照明补充，但由天然采光和人工照明所形成的总照度不宜超过原等级规定的照度标准值的1.5倍。

在采光设计中应选择采光性能好的窗作为建筑采光外窗，其透光折减系数Tr应大于0.45。建筑采光外窗采光性能的检测可按现行国家标准《建筑外窗采光性能分级及 其检测方法》执行。

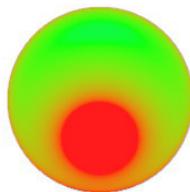
引自《建筑采光设计标准》GB/T 50033--2001

• 各类建筑的采光系数可以在标准中查到

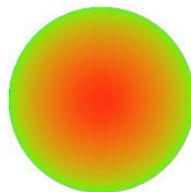
3-天空模型

太阳直射光和天空散射光组成了日出所看到的天空，二者的不同组合决定了天空的具体情况。为了便于计算，通常将某一点所能看到的天空简化为以观察点为圆心的一个半球，称为天球。因此，任何一种特定的天空状况都可以通过天球上的亮度分布来定义，天球中的亮度通常是其方向的二维函数。天球亮度分布可以使用天空扫

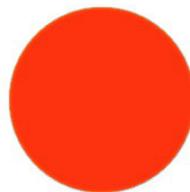
描仪进行实测，也可以根据天空模型计算获的。天空扫描仪是一种测量天空中不同方向上亮度的光学仪器，而天空模型则是根据日期，时间，地理位置，大气质量和太阳辐射数据计算天球亮度分布的一种数学模型。



CIE Sunny Distribution



CIE Overcast Sky Distribution



CIE Uniform Sky Distribution

• CIE(国际标准照明委员会) 均匀天空模型 (CIE Intermediate/Uniform Sky)

最简单的天空模型是亮度不变的均匀天空模型，即天球中各处的亮度完全一样。这种现象出现的频率并不高，通常对应于某些多雾的天气。均匀模型主要用于手工简化计算，现在已很少使用。

• CIE全阴天模型 (CIE Overcast Sky)

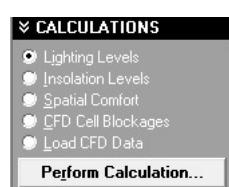
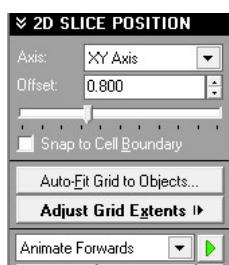
全阴天是指天空完全被云覆盖，同时太阳不可见的情况，此时天空中的光线均为天空散射光。全阴天中的天空亮度分布相对来说较为简单，第一个非均匀天空模型就是Moon和Spencer于1942年提出的全阴天模型，随后于1955年成为CIE的标准全阴天模型。CIE全阴天模型是采光系数计算的参照模型，这种天空模型的最突出特点是，地平线附近的亮度是天顶亮度的1/3，同时其是旋转对称的，也就是与方向无关。

• CIE晴天模型 (CIE Clear/Sunny Sky)

晴天指的是天空中无云或者云量很少的情况，此时天空中的光线由太阳直射光和天空散射光两部分组成。Kittler于1967年提出了晴天模型，这一模型后于1973年成为CIE标准晴天模型。晴天模型中的天空亮度变化较为复杂，其与太阳的位置和角度有着密切的关系。

4-临界照度分析

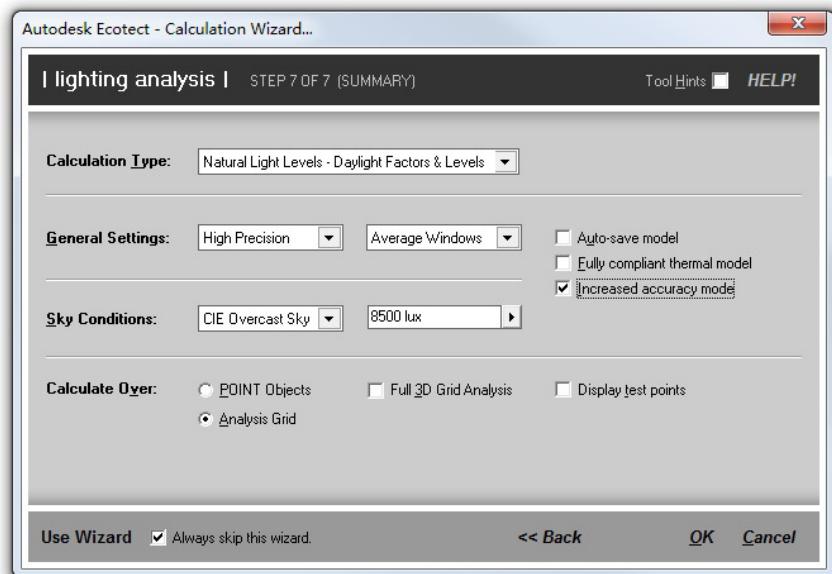
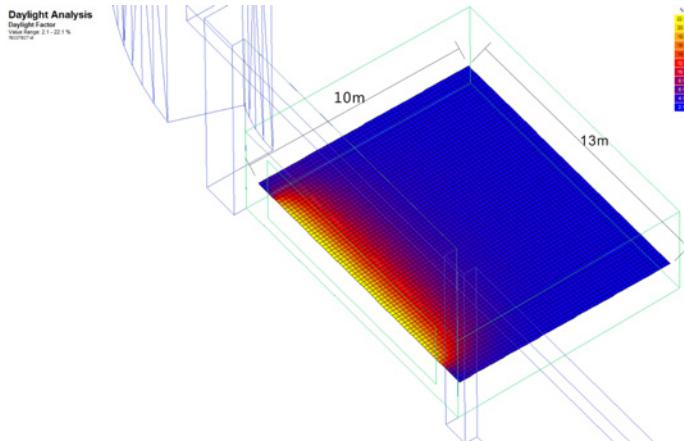
在《建筑采光设计标准》中规定了各类建筑采光的最低采光系数和室内天然光临界照度，通过Ecotect的照度分析可以获得建筑的该类指标，用于比较标准中要求的指标，同时可以用于方案比较，以获得达到采光得以改进的方案修正策略。



计算时需要选择Calculations中的Lighting Levels选项，并设置网格，根据《建筑采光设计标准》规定民用建筑参考平面（假定工作面）取距地面0.8m处。在2D Slice Position中设置Offset0.8m。



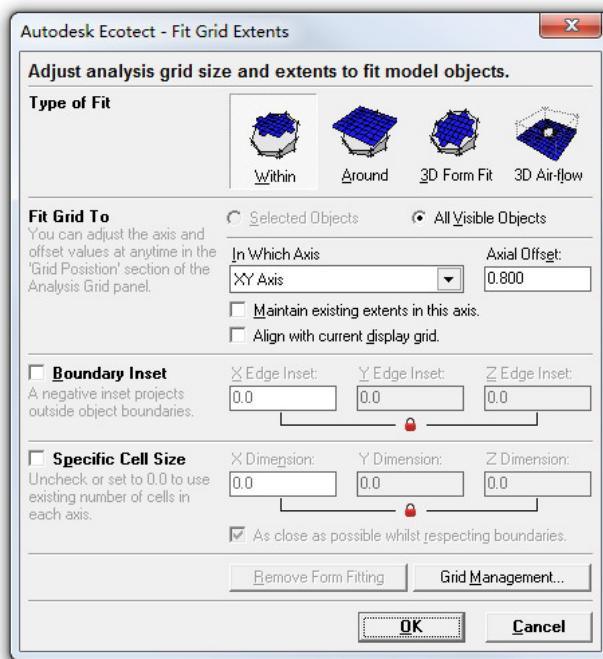
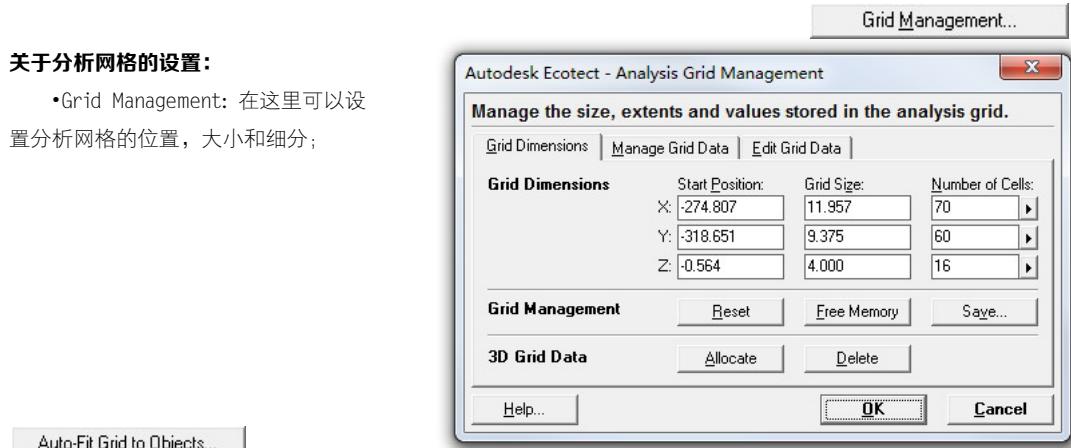
在Google总部模拟中，于南侧虚拟建立一个 $10m \times 13m$ 的房间，南侧开窗 $10m \times 3m$ ，距地 $0.8m$ ，只针对该虚拟房间进行照度，采光系数分析。



执行Perform Calculation，在Lighting Analysis中选择Natural Light-Daylight Factors & Levels项。对于Sky Condition中选择CIE Overcast Sky全阴天模型。图中8500lux的临界照度值需要根据《建筑采光设计标准》室外天然光临界照度值修改确定。一般需勾选增强模式Increased accuracy mode复选框，从而考虑窗户的透明度和折射系数，同时使用室外障碍物的真实表面反射系数。

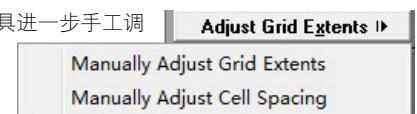
关于分析网格的设置：

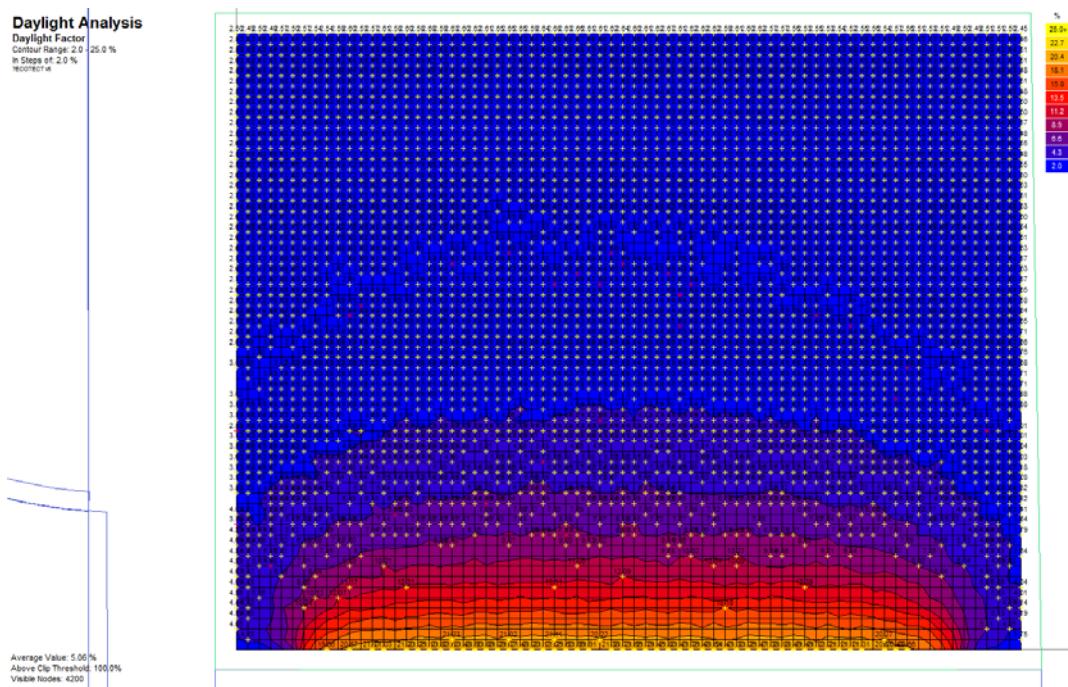
- Grid Management: 在这里可以设置分析网格的位置，大小和细分；



- AutoFit Grid Objects: 一般情况都是先使用该工具快速获得分析网格的形式，再根据分析目的进行调整；

- Adjust Grid Extents: 初步设置完分析网格后，可以使用该工具进一步手工调整，以达到分析需要；





GRID SETTINGS

- Show Gridlines
- Shade Grid Squares
- Show Contour Lines
- Clip To Minimum
- Show Grid Axis

- Show Node Values
 - Peaks & Troughs
 - Selected Only
- Show Average Value
- Show Values in 3D

[Grid Management...](#)

[Display Analysis Grid](#)

DATA & SCALE

Daylight Factor	<input type="button" value="▼"/>
Minimum: 2.00	<input type="button" value="▼"/>
Maximum: 22.10	<input type="button" value="▼"/>
Contours: 2.00	<input type="button" value="▼"/>

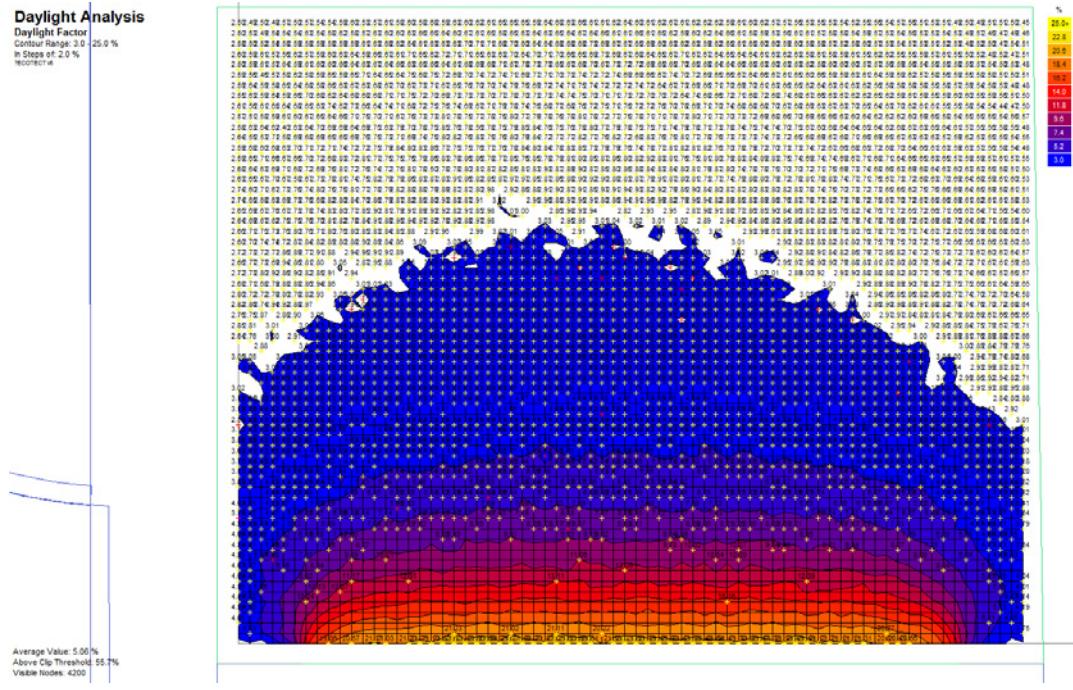
[Colours...](#) [Volumetrics...](#)

引自：《建筑采光设计标准》GB/T 50033—2001

采光等级		房间名称	侧面采光	
			采光系数 最低值C _{min} (%)	室内天然光 临界照度
II		设计室 绘图室	3	150
III		办公室 视屏工作室 会议室	2	100
IV		复印室 档案室	1	50
V		走道 楼梯间 卫生间	0.5	25

为了便于根据《建筑采光设计标准》中的指标进行比对，这里选择采光等级Ⅲ，采光系数最低值2%，勾选Clip To Minimum并将Minimum的值设置为2，可以观察到对于该房间，所有区域满足采光系数为2%的最低值要求。

分析网格数据可以调入到RH插件GH中，为方案设计提供最直接的互动，协同，具体方法可以参看<模型构建>部分。



GRID SETTINGS

- Show Gridlines
- Shade Grid Squares
- Show Contour Lines
- Clip To Minimum
- Show Grid Axis

- Show Node Values
 - Peaks & Troughs
 - Selected Only
- Show Average Value
- Show Values in 3D

Grid Management...

Display Analysis Grid

DATA & SCALE

Daylight Factor

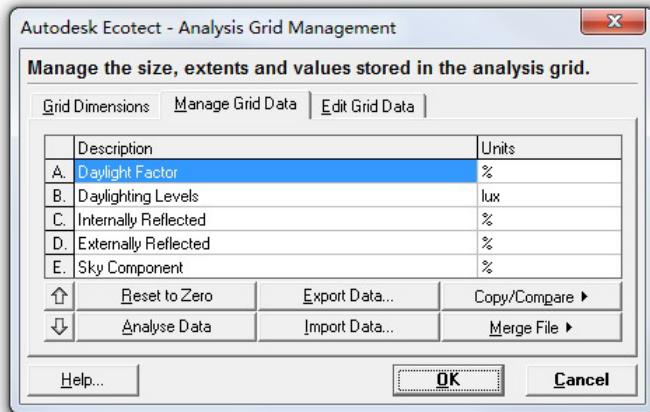
Minimum:	3.00
Maximum:	22.10
Contours:	2.00

Colours... **Volumetrics...**

采光等级	房间名称	采光系数 最低值C _{min} (%)	室内天然光 临界照度
II	设计室 绘图室	3	150
III	办公室 视屏工作室 会议室	2	100
IV	复印室 档案室	1	50
V	走道 楼梯间 卫生间	0.5	25

如果将采光系数标准提高到3%，为设计室、绘图室采光需要，则房间内侧数据被裁切掉，即被裁切掉的房间部分为不满足最低采光系数3%要求的部分，有必要增加人工照明弥补照度的不足。

对于计算完后的分析网格数据，一定要在Grid Management/Manage Grid Data中导出数据Export Data，防止再次分析数据丢失以及以后通过加载使用。除了计算获得Daylight Factor采光系数，还可以获得Daylighting Levels自然采光照度，Internally Reflected内部反射，Externally Reflected外部反射，以及Sky Component天空组分等分析数据。



导出后的.txt文本文件数据：

```
// ECOTECT ANALYSIS GRID DATA
// DATA, Daylight Factor
// UNITS, %
// COLS, 70
// ROWS, 60
2.43153, 2.85141, 2.04787, 3.71981, 5.43026, 7.71898, 14.4424, 17.4994, 19.058, 19.9259, 20.5745, 20.9941,
21.1675, 21.0252, 20.4379, 21.1989, 21.2518, 21.105, 21.8152, 21.1016, 21.4792, 21.904, 21.8922, 21.2911,
21.7701, 21.4756, 21.2016, 21.1155, 21.2458, 21.5995, 21.9921, 21.9149, 20.893, 21.3803, 21.7279, 21.6622,
21.7894, 21.4571, 21.8007, 21.4272, 21.7603, 21.4754, 21.6358, 21.4279, 21.2953, 21.2579, 21.4742, 21.3794,
21.1811, 21.4911, 21.4878, 21.121, 21.2068, 21.1052, 21.1076, 21.312, 20.9555, 20.8052, 20.4318, 20.6612, 19.578,
18.8011, 17.0293, 13.9879, 8.69139, 5.71772, 3.92791, 3.5411, 2.39638, 2.83837,
```

... ...

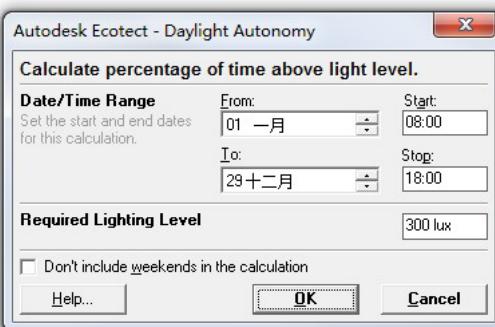
5-全自然采光百分比

Daylight Autonomy, DA全自然采光百分比被定义为全年工作时间中单独依靠自然采光就能达到最小照度要求的时间百分比。对于最小照度参考《建筑采光设计标准》确定。与广泛使用的采光系数相比，全自然采光时间百分比充分考虑了建筑的朝向，使用时间及全年中的各种实际天气情况的影响，是一个全面且系统评价全年有效自然采光的综合指标。

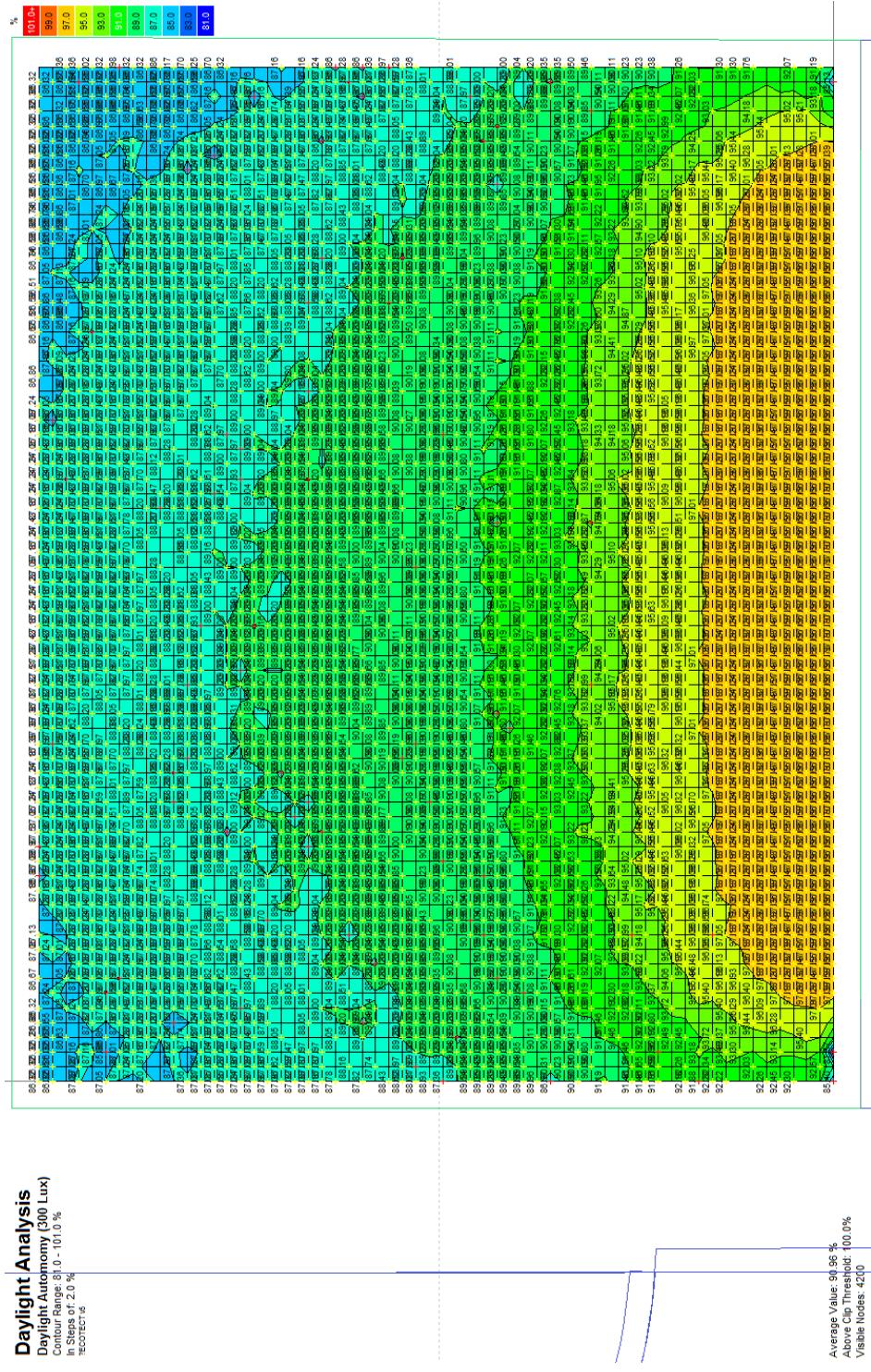
全年自然采光百分比可以用于分析建筑开窗大小，位置的设计评估，并根据分析结果和设计目的进行有效的调整。

全年自然采光百分比是基于采光系数的计算结果使用Calculate/Advanced Daylighting/Daylight Autonomy工具进行计算。

根据分析目的设置选项



全自然采光百分比分析结果，左下角列出了平均值为90.96%，即一年当中在08: 00到18: 00之间，临界照度为300lux时，90.96%的时间只需要使用自然采光。



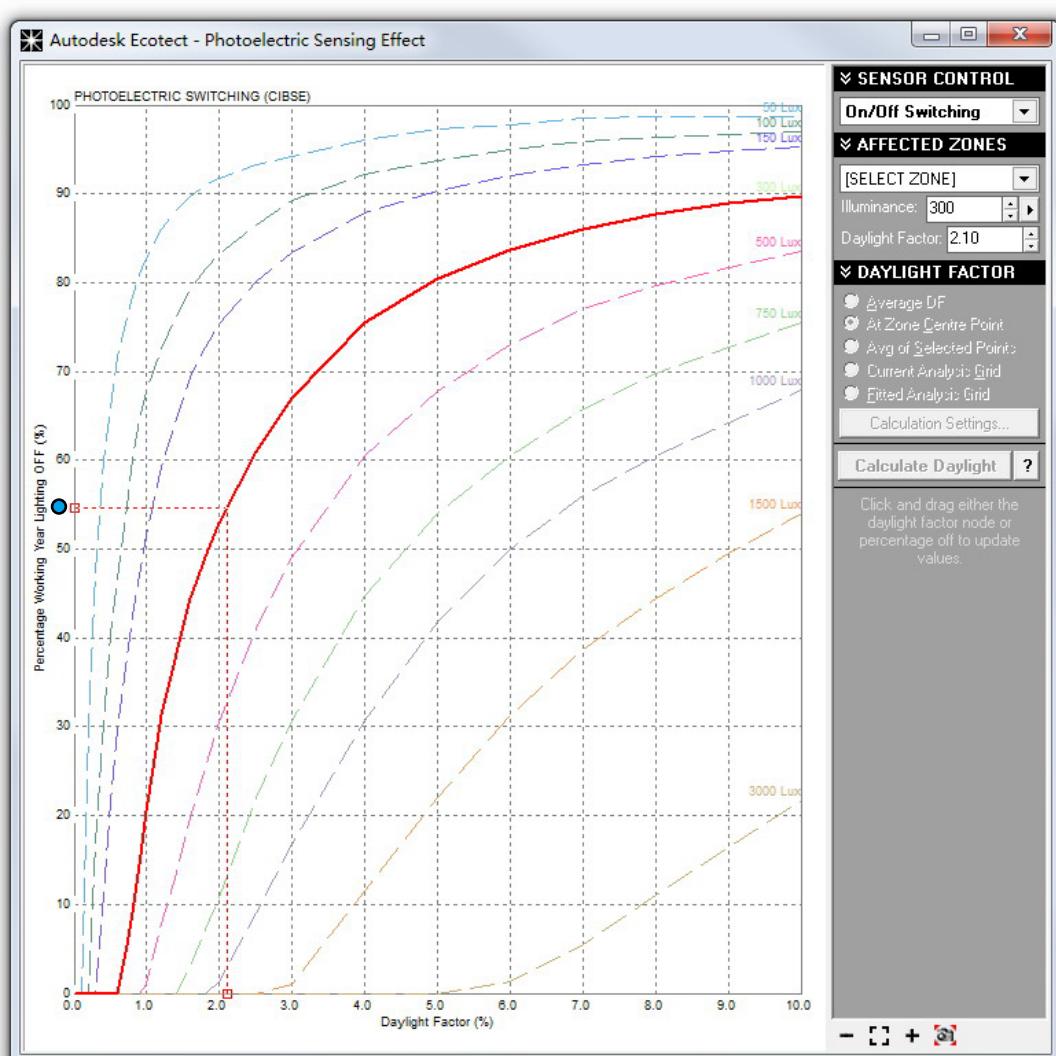
6-光控照明节能分析

光控照明分析使用照明装置关闭的时间占自然采光时间的比率来评估节能效果。其中光控照明是指光电感应器随时测量房间内自然采光的照度，并将这一照度与控制程序事先设定的最低照度进行对比，如不满足则启动人工照明设备。

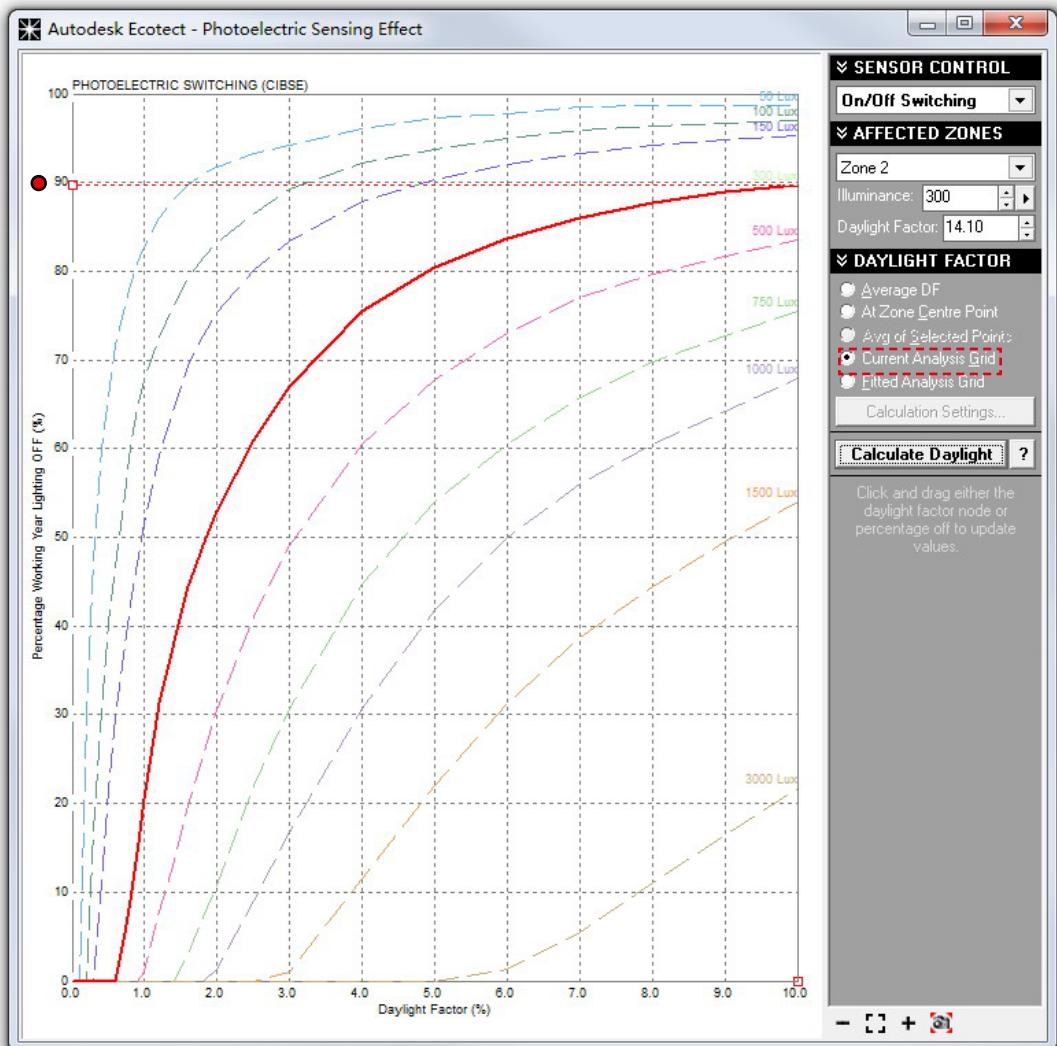
On/Off Switching On/Off Switching开关式：照度低于设定值则启动人工照明设备；
Dimming Switch 滴变式：可以根据自然采光照度调整人工照明强弱，以弥补自然采光的不足；
Zone 2

光控照明较为适合考虑自然采光和人工照明的建筑使用，例如办公室、学校等人员长期保持同一视觉工作状态并很少活动的场所。

如果已经计算了采光系数，可以选择Current Analysis Grid项，避免重新计算带来的时间成本，再点击Calc-

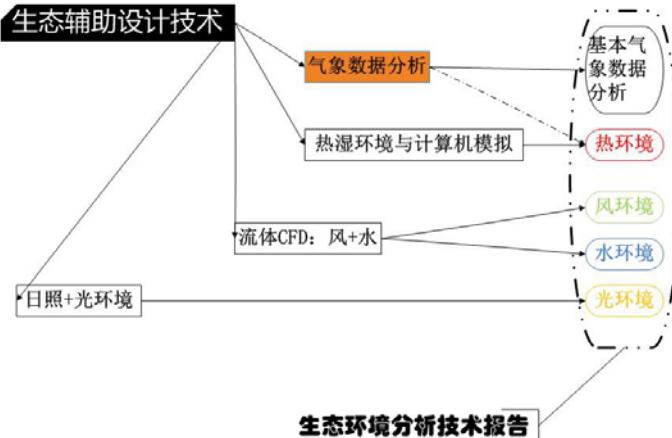


-ulate Daylight即可。分析后的红色300lux最低照度线未发生改变，但是采光系数红虚线发生了改变，所指示的光控照明百分比指示在约90%的位置上，即选择开关式，最低照度为300lux，采光系数为2.1%时，有约90%左右的自然采光时间可以关闭人工照明设备。



第五部分

生态环境分析技术报告



生态辅助设计技术部分基本上是从基础的气象数据分析，到热、风、水、光环境几个方面出发进行讲述的，这个架构本身就形成了对于场地前期分析、过程分析以及设计后分析比较的一般生态分析内容，构成生态环境分析技术报告，用于指导设计以及评判是否符合《绿色建筑评价标准》或者LEED环境设计先导的标准。

生态环境分析技术报告应该成为设计文本中的必要部分，以指导和支撑设计内容。在传统设计过程中，因为受制于计算机的计算速度以及应用程序的开发，对于较复杂的分析由一般设计师无法完成，只能交与专业人员处理，在跟进设计以及与设计的互动性上形成了障碍。至今，基于计算机的应用分析程序，可以将繁复的计算交付于计算机完成，具体的计算方法和过程在内核中进行处理，使非专业性的设计师可以初步处理具有专业性特征的热、风、水以及光环境的分析，将设计与生态技术的应用有效地联合互动起来。

因此，在障碍得以移除后，现在新的设计方式和团队合作的模式应有所改进，在基本的传统场地理解分析上，应加入对于现状环境的生态环境分析技术报告，在设计完成后加入规划设计后的生态环境分析技术报告，在设计过程中根据设计的内容可以不断地进行相关的生态技术分析，以协助、协调设计的发展，达到有效根据环境气候特点，环境现状条件的完成可持续性建筑设计的目的，增加使用的舒适性与能源的节约性。

生态辅助设计技术部分除了本书中所涉及的内容外，还应包括声环境分析、温室气体排放分析、资源消耗分析、造价分析等内容，以有效控制建筑设计对自然环境的影响，获得建筑与自然环境之间的平衡。

基本气象数据分析

- 在《柯本气候分类法》中确定气候带，初步确定气候特点；
- 在《中国建筑气候区划图》中确定分区，明确设计要求；
- 在《中国热环境分析专用气候数据集》中获得设计区域或者邻近区域的气象数据，初步认识设计区域气象特征；
- 在美国能源网站获得设计区域或者临近区域EPW格式的逐时气象数据，在Ecotect的Weather Tool中加载获得的逐时、逐周、逐月气象变化图表；
- 使用Weather Tool工具计算建筑最佳朝向；
- 使用Weather Tool工具计算太阳辐射变化情况；
- 使用Weather Tool工具的焓湿图分析主动式设计策略；
- 使用Weather Tool工具的焓湿图分析被动式设计策略，获得适宜设计区域的被动式策略组合方式；

热环境

- 使用DesignBuilder(EnergyPlus) -<简称DB>分析建筑外维护结构与材料选择对建筑热舒适性的影响，从而指导建筑结构与材料选择；
- 使用DB分析建筑不同布局条件下，各室内空间热舒适性的变化情况，指导建筑布局，以获得自然通风条件最多时间下的良好热舒适性，以节约能源消耗；
- 使用DB进行暖通空调设计，计算供热，制冷负荷；
- 使用DB对照明控制系统进行模拟并计算照明节能量；
- 可以使用Ecotect进行上述DB所进行的热环境模拟；

风环境

- 使用Phoenics-Flair<简称PF>模块计算室外风环境，包括冬季风及夏季风，获得设计场地的风变化情况，例如风速、风压分布情况；
- 使用PF分析不同建筑组群及单体建筑布局和形体对设计场地的风环境影响，获得良好通风，避免冬季风影响以及利于引导夏季风，对于建筑单元形成前后风压差，利于室内风的流
- 使用PF分析建筑外风环境，获得建筑对象表面的风速、风压分布情况，为建筑设计提供依据；
- 使用PF计算室内风环境，包括舒适度计算、空气龄计算、湿度计算、风速、风压等为设计提供依据，以便进一步调整建筑整体布局、室内布局、开窗方式和进风口出风口位置、风量等；

水环境

- 使用Flow 3D 模拟河流，以获得流速，水深变化情况，指导河流设计满足洪水位变化要求，以及控制侵蚀；
- 使用Flow 3D模拟河流，以流速，水深变化情况来评估水生生物的生存条件，和水生生物多样性，指导河流生态修复；
- 使用Flow 3D模拟环境污染和扩散情况，以便有效控制环境恶化；
- 使用Flow 3D可以模拟景观水景设计，例如水流跌落距离；
- 可以使用ANSYS Fluent进行上述流体模拟；
- 使用Civil 3D进行土方量的计算，并平衡土方；
- 使用Civil 3D进行雨水分析及模拟，以便减少开发后的径流量，编制符合可持续发展要求的雨水管理报告；
- 使用ARCGis分析水平面高程基本相同条件下的水环境水深变化情况，指导湿地生境规划；

注：Flow 3D模拟的内容，也可以在ANSYS Fluent中进行模拟。

光环境

- 查找《城市居住区规划设计规范GB 50180-93》和《建筑采光设计标准》获得相关参数；
- 使用Ecotect进行日照分析，获得夏至日、冬至日或者大寒日的日照变化情况，指导建筑布局；
- 使用Ecotect遮挡分析，获得感兴趣区域具体的日照变化情况，用于设计指导和绿色建筑评估；

- 使用Ecotect进行三维遮挡分析，指导建筑布局和限高；
- 使用Ecotect计算光合有效辐射，指导植物规划；
- 使用Ecotect计算围护结构太阳辐射量，以判断是否外墙遮阳或使用隔热材料；
- 使用Ecotect计算光电能转换，确定固定式太阳能光电板的朝向；
- 使用Ecotect计算采光系数和照度，用于室内光环境设计的指导，并作为光环境标准的评估；
- 使用Ecotect计算全自然采光百分比和光控照明节能分析人工照明设备关闭的百分比以指导设计；

上述例举了生态环境分析技术报告的主要内容，根据实际项目的性质，报告内容会有所增减。

参考文献：

- 1.[英]Cecil Balmond著.Informal异规.李寒松译.北京：中国建筑工业出版社，2008.
- 2.Luisa Brotas.ESP-r,London Metropolitan University.
- 3.中国人民共和国建设部主编.民用建筑设计节能设计标准(采暖居住建筑部分) JGJ 26—95.
- 4.中国人民共和国建设部主编.采暖通风与空气调节设计规范 GB 50019—2003.
- 5.中国建筑科学研究院，重庆大学主编.夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准 JGJ 134—2001.
- 6.<http://www.iesve.com/> IES 官方网站.
- 7.中国人民共和国建设部主编.城市居住区规划设计规范 GB 50180—93.
- 8.Landscape Architecture(us).
- 9.王云才编著.景观生态规划原理.北京：中国建筑工业出版社，2007.
- 10.DOE-2 Engineers Manual.
- 11.Flow 3D Help.
- 12.Design Builder Help.
- 13.任耀 秦军等编著.AutoCAD Civil 3D 2008实战教程.北京：人民交通出版社，2008.
- 14.云鹏 编著.建筑光环境模拟.北京：中国建筑工业出版社，2010.
- 15.汤国安 杨昕编著.ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程.北京：科学出版社,2006.
- 16.朱红钧，林元华，谢龙汉编著.FLUENT流体分析及仿真实用教程.北京：人民邮电出版社，2010.
- 17.[日]村上周三 著.CFD与建筑环境设计.朱清宇等译.北京：中国建筑工业出版社，2007.
- 18.美国Autodesk公司主编；柏慕中国编著.Autodesk Ecotect Analysis绿色建筑分析应用.北京:电子工业出版社，2012.1.
- 19.LEED 2009 For New Construction and Major Renovations.
- 20.杨柳著.建筑气候学.北京：中国建筑工业出版社，2010.
- 21.刘念雄，秦佑国编著.建筑热环境.北京：清华大学出版社，2005.
- 22.郑洁，黄炜，赵声萍等编著.绿色建筑热湿环境及保障技术.北京：化学工业出版社，2007.7.
23. Norbert Lechner 著.建筑师技术设计指南-采暖 . 降温 . 照明.张利，周玉鹏 汤羽扬，李德英，余知衡译.北京：中国建筑工业出版社，2004.
- 24.中国气象局气象信息中心气象资料室，清华大学建筑技术科学系 著.中国建筑热环境分析专业气象数据集.北京：中国建筑工业出版社，2005.
- 25.Improving Indoor Environmental Quality and Energy Performance of California K-12 School California Energy Commission June16,2004
- 26.(Phoenics Polis) PHOENICS On-line Information system.
- 27.李进良，李承曦，胡仁喜等编著.精通FLUENT6.3流场分析.北京，化学工业出版社，2009.9.
- 28.FLUENT 6.3Tutorial Guide.Fluent Inc.2006.
- 29.FLUENT 6.3 Geetting Started Guide.Fluent Inc.2006.
- 30.王福军编著.计算流体动力学分析—CFD软件原理与应用.北京：清华大学出版社，2004.9.
- 31.于勇主编. FLUENT入门与进阶教程.北京：北京理工大学出版社,2008.9.
- 32.云鹏编著.ECOTECT 建筑环境设计教程.北京：中国建筑工业出版社，2007.
- 33.朱红钧，林元华，谢龙汉编著.Fluent12 流体分析及工程仿真.北京：清华大学出版社.2011.
- 34.中国人民共和国建设部主编.建筑采光设计标准 GB 50033—2001.
- 35.中国人民共和国建设部主编.绿色建筑评价标准 GB/T50378—2006.

- 36.<http://baike.baidu.com/> 百度百科
- 37.http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page Wikipedia 维基百科
- 38.<http://www.cfluid.com/bbs/index.php> 流体中文网
- 39.<http://www.ashrae.org/> 美国采暖，制冷与空调工程师学会
- 40.<http://www.designbuilder.co.uk/> Design Builder官方网站
- 41. <http://www.ansys.com/> ANSYS官方网站
- 42.<http://www.energy.gov/> 美国能源部网站
- 43.ANASYS Volume of Fluid Model(Advanced Multiphase Modeling Course) .Fluent Inc.2007.

后记

过去，即使现在对分析类软件往往存在一种误读，就是误认为设计过程中想作什么分析，分析软件就会给出结果，例如风分析等。而实际上需要在解算之前给出各项条件，例如光影分析需要输入包含地理位置的气象数据才可以正确进行分析，对于风分析需要风速、温度、大气压以及选择适合的计算模型例如LVEL、KEMODL等。因此各项分析工作不是一种想当然的获得，而是对该领域学科基本知识的了解过程，例如上述的流体分析、风环境分析以及热环境分析、光环境分析相应的学科知识，在对其学科基本知识有了认知之后，才可以正确的设置各项分析条件。

计算机辅助设计不是只是对软件本身的操作，而是关联学科知识的学习，因此计算机辅助设计这套书不是操作命令的描述，是要将分析所要涉及的学科与计算机辅助设计结合起来，从而能够借助计算机辅助设计融合各相关学科领域，在学科间构建联系，这正是本书在写作过程中所关注的，有利于使用者借助本书查询相关内容来协助设计的发展。

阅读本书可以從自己需要感兴趣的章节开始，没有必要从头依次阅读，例如在设计的过程中需要处理水环境包括如何构建地形，如何获得不同水位的图示，如何计算常水位到水深0.5区域的投影面积，如何获得水流流速和水深，如何控制20年、50年一遇洪水的安全区域等等只需要查询第三部分流体CFD即可，其它同理。

