



许鹏 教授 博士 博导

机械工程学院

Peng Xu Professor, PhD, PE, MBA

College of Mechanical Engineering

# 超高层建筑空调系统调研分析

集中还是分散？

封闭还是开启？



超高层建筑能源调研

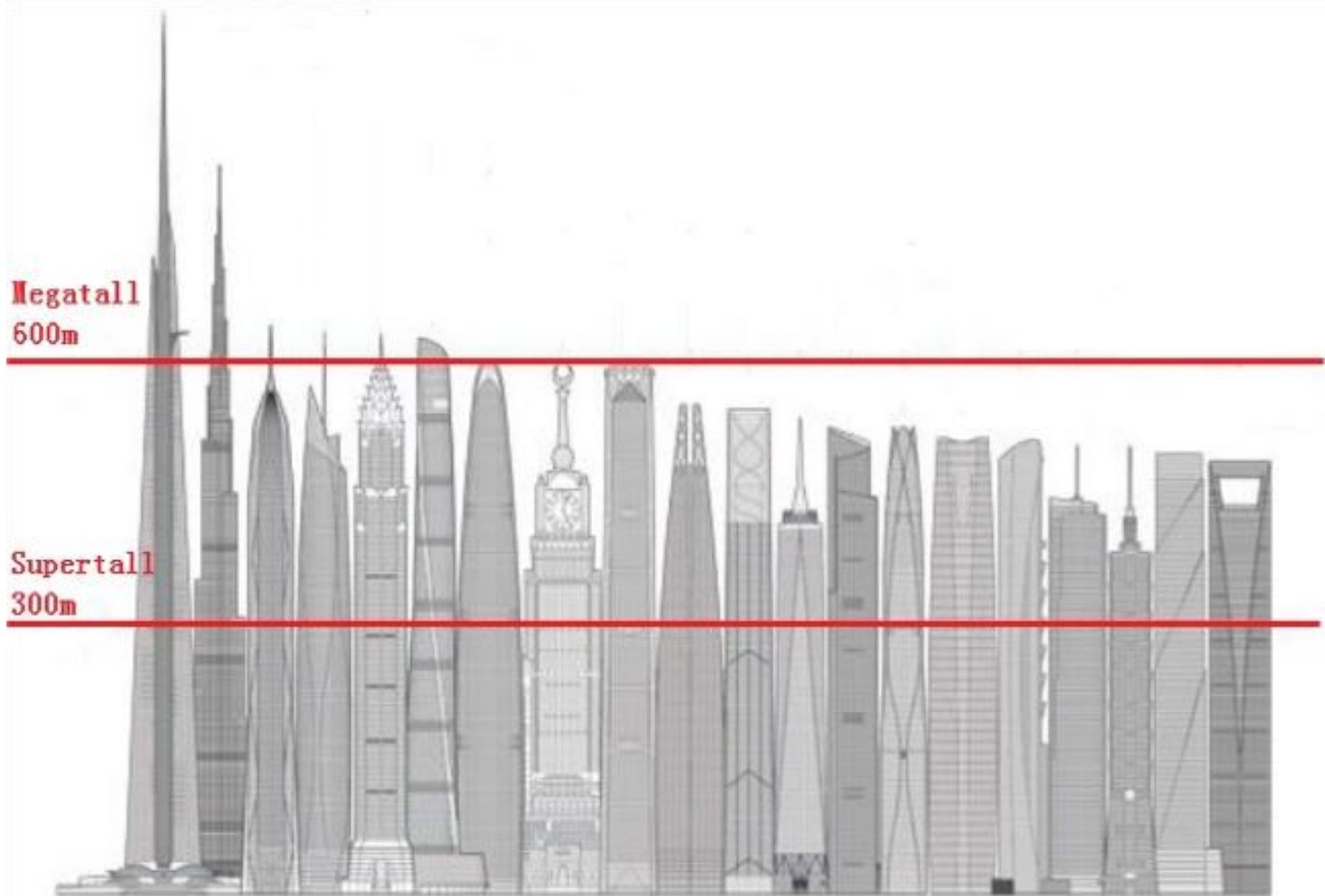


超高层建筑能耗过高问题



超高层建筑自然通风问题

# Mega Tall Buildings



## 上海中心

- ★总高度：632m
- ★主结构高度：580m
- ★建筑面积：57万m<sup>2</sup>
- ★建筑层数：地下5层，地上121层，裙楼5层
- ★建筑用途：1) 一类办公建筑，2) 五星级宾馆酒店，3) 商业中心，4) 休闲娱乐中心，5) 会议中心



## 金茂大厦

- ✦ 高度：420.5 m
- ✦ 建筑面积：27万m<sup>2</sup>
- ✦ 建筑层数：地上92层，地下3层  
，裙楼5层
- ✦ 建筑用途：办公标准层（1-50层），酒店（53层以上），观光层（88层）



## 上海环球金融中心

- ✦ 高度：492m
- ✦ 建筑面积：38万m<sup>2</sup>
- ✦ 建筑层数：地下3层，地上101层
- ✦ 建筑用途：购物中心（地下二层至第三层），会议中心（3-5层），办公层（7-77层），酒店（79-93层），观光层（94-100层）



## 深圳平安金融中心

- ✦ 总高度：660m
- ✦ 主结构高度：597m
- ✦ 建筑面积：46万m<sup>2</sup>
- ✦ 建筑层数：地上118层，地下5层，裙楼11层
- ✦ 建筑用途：办公建筑，交易所，会议中心，观光，酒店





## 武汉绿地中心

- ✦ 高度：606m
- ✦ 建筑面积：30万 $\text{m}^2$
- ✦ 建筑层数：地下6层，地上119层
- ✦ 建筑用途：观光层(10k  $\text{m}^2$ )，公寓住宅 (50k  $\text{m}^2$ )，一类办公建筑 (200k  $\text{m}^2$ )，五星级酒店 (40k  $\text{m}^2$ )





## 周大福天津滨海中心

- ✦ 总高度：530m
- ✦ 主结构高度：443 m
- ✦ 建筑面积：39万m<sup>2</sup>
- ✦ 建筑层数：地上94层，裙楼4层
- ✦ 建筑用途：办公层，公寓住宅，酒店



## 苏州中南中心

- ★总高度：729m
- ★主结构高度：598m
- ★建筑面积：50万m<sup>2</sup>
- ★建筑层数：地上138层，地下5层，裙楼7层
- ★建筑用途：旅游观光，会议中心，酒店，住宅公寓，休闲娱乐中心



# 围护结构得热

## 问题：

目前的超高层建筑大多使用大面积幕墙结构，很多建筑使用双层幕墙，双层幕墙的使用存在以下问题：

- A. 保温问题：一般采用双层low-e玻璃，在外幕墙的内侧做保温，这样就存在结露问题
- B. 遮阳问题：由于高处风载大，外遮阳手段无法使用，
- C. 幕墙之间的消防问题存在隐患，需要有安全的控制系统

## 可能的解决方法：

- 良好的建筑遮阳设计和空气流设计
- 高反射率的 内遮阳，辅助自动遮阳控制

# 围护结构通风

## 问题：

- 由于大面积幕墙结构，超高层建筑的冷负荷较大；
- 以金茂大厦为例，约一半的能源消耗在了制冷中；
- 全封闭结构和窄小空气通道，空气侧免费冷却；
- 建筑核心区长年需要制冷，负荷率低

## 可能的解决方法：

- 利用免费冷却来冷却建筑内核；
- 机械式自然通风，使用带有小通风口，自动控制的可调节窗户；
- 热泵单元或者其他内外混合单元

# 输配与末端能耗

## 问题:

- 在超高层建筑中，空调系统耗能在建筑总耗能中占有很大比例。冷水机组和输配系统耗能偏高；
- 水管管径小且输送距离长，因此系统中的水头损失大；
- 由于冷却塔体型较大，因此冷却塔位置的选择是非常困难的；
- VAV系统的低维护要求，超高层建筑广泛采用VAV系统。当建筑用途发生变化时，VAV系统不够灵活

## 可能的解决方法:

- 优化冷水机组输配系统控制策略；
- 精简冷水机组, 冷却塔和空气处理单元；
- 安装更加灵活的输配系统末端，辐射制冷等；

# 垂直输配问题

## 问题：

- 冷却水，冷冻水和空气输配系统垂直方向上的能耗较大；
- 蒸汽和电力的垂直输送比流体的垂直输送更加高效和节能；
- 现有设计中，大部分情况下水等全部由底层供应；

## 可能的解决方法：

- 空调系统模块化；
- 每一层或者每5-10层有单独的空调系统；
- 每个系统有单独的冷却塔、空气处理单元和输配系统；
- 使用便于垂直输送的小型冷却塔和冷机（磁悬浮离心机）
- 分立式的暖通空调系统优于集中式系统





# 系统复杂控制难度大

## 问题：

- 为了提高LEED评分和其他原因，常常使用多样的能源选择， 增加控制难度；
- 即使在超高层建筑中，BA系统也会弃之不用；
- 由于低价竞标，部分设备不易更换或者更换费用较贵，超高层建筑设备的维护成本较高

## 可能的解决方法：

- 各分区系统相对独立，避免系统过于复杂；
- 利用需求响应技术削减建筑峰值负荷；
- 建筑储能技术节约成本，但是储能设备安装空间受到限制；
- 对于复杂控制系统的自动故障检测与诊断系统；

## 问题：

- 这些建筑中BIM常常被用到，但是施工方有时往往不会按照设计者图纸来施工，导致BIM的信息不够准确。 BIM尚未解决风管水管所占空间的问题；
- 尽管BIM在建筑设计早期可以有效干预，但是在施工时往往不能适应施工时建筑结构的变化；

## 解决方案：

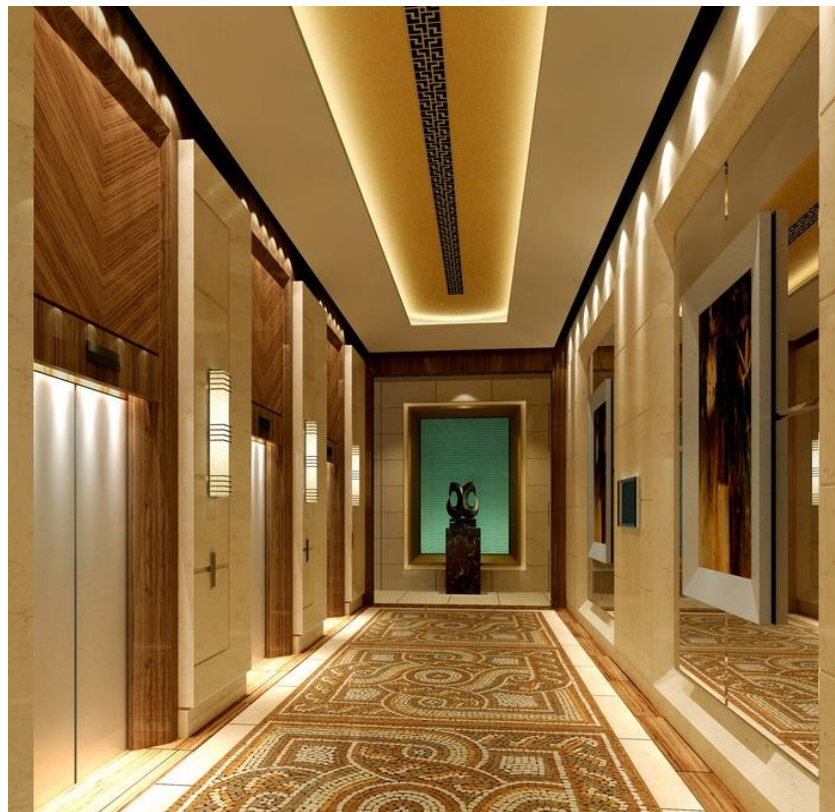
- 建立可以快速发现施工时改变建筑原有结构的BIM方案

## 问题：

- 由于电梯快速移动导致的活塞效应，从而引起的噪音和阻力问题；
- 现有的电梯设计是基于就考率人数的静态计算法，没有加入动态年居住者行为的模拟和预测；

## 解决方案：

- 考虑人员动态变化的优化设计
- 通过集成电梯控制系统优化操作模式



# 安保与数据交换

## 问题：

- 安保系统可以通过接入控制系统和监控系统捕捉到人员占有情况的数据，但是这些数据没有得到充分的利用；
- 商业社会共享平台没有收入实时数据；
- 暖通空调控制系统和其他控制平台没有数据交换

## 解决方案：

- 建立一个可以交换各控制系统或社会数据网络信息的集成信息控制系统

# 高层中庭问题

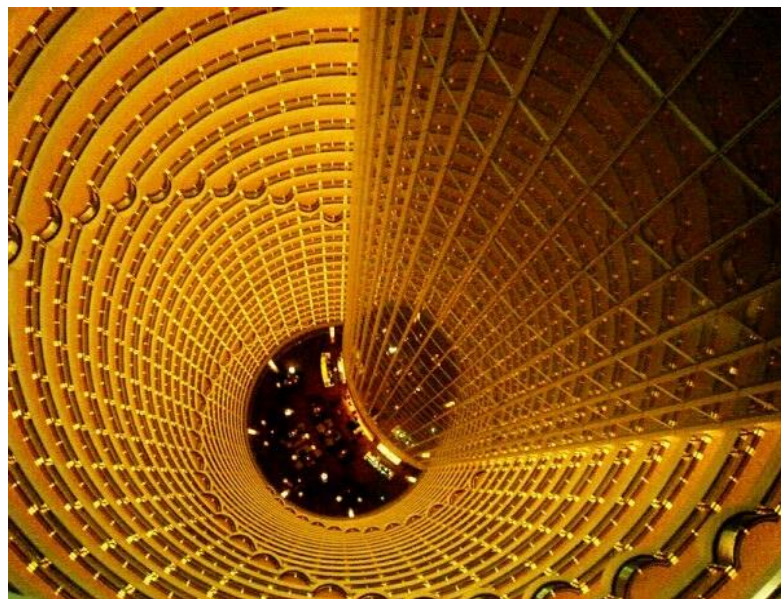
## 问题：

- 一般来说，超高层建筑的顶部有大空间的中庭结构；
- 往往是全黑，很难利用；
- 中庭的空间很难利用，且发生火灾时容易蔓延灾情；



## 解决方案：

- 能源芯
- 建立一个高层建筑内花园
- 建立温度控制, 灯光控制系统, 注意防火防排烟问题





超高层建筑能源调研



超高层建筑能耗过高问题



超高层建筑自然通风问题



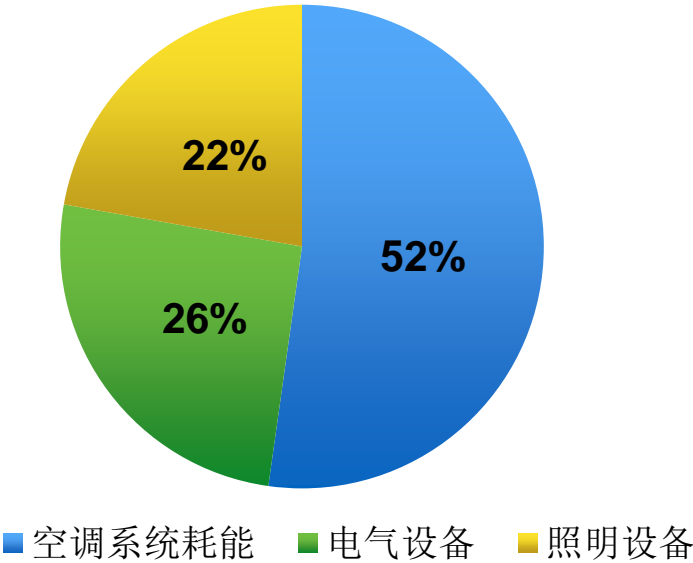
# 金茂大厦能耗分析

## 金茂大厦

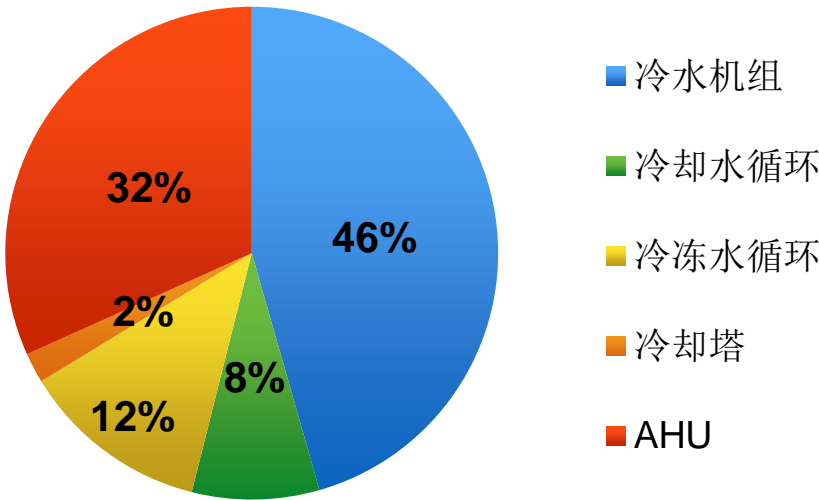
项目	冷水机组	冷却水循环	冷却塔	AHU
电耗（kWh）	6,686,528	1,225,700	289,852	4,655,377

项目	照明设备	冷冻水循环	电气设备	汇总
电耗(kWh)	6,241,100	1,816,780	7,184,033	28,099,370

金茂大厦原有系统耗电分析



金茂大厦原有系统空调系统耗电分析



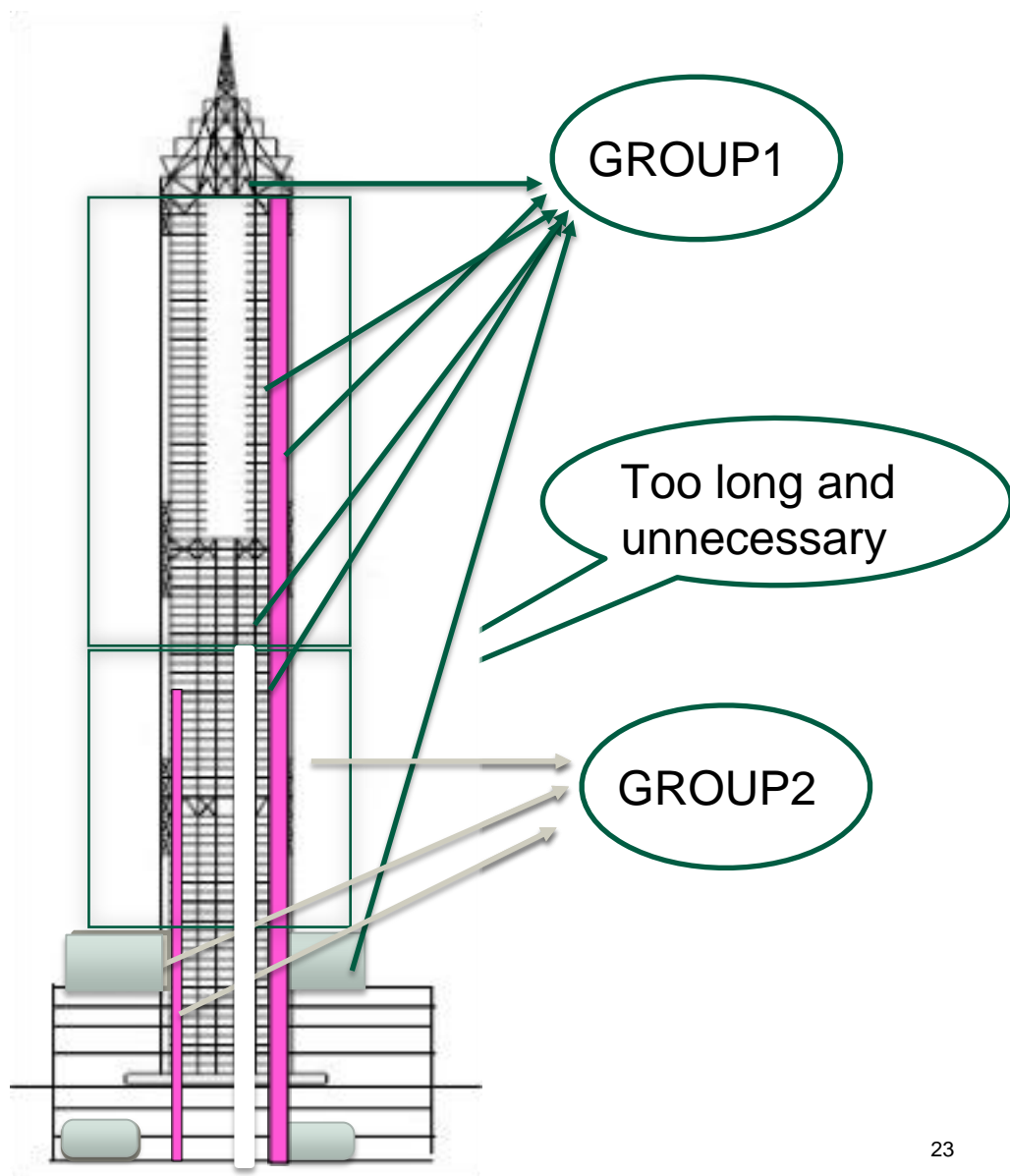
# 输配能耗有潜力降低，但不是主要问题

## 原始系统问题分析：

- 从数据中可以看出，冷冻水和冷却水循环耗能约占整个暖通空调系统耗能的百分之二十；
- 冷水机组耗能约占整个暖通空调系统耗能的百分之五十；
- 输配系统能耗偏高，但是尚可接受；

## 解决方案：

- 原系统在输配方面的能耗较大，主要原因水系统过于复杂，水路管线输配长，如果我们合理分配冷热源的位置，优化管路的设计，就可以有效避免这样的问题。对原方案的改动如下：办公低区的空调系统整体不做改变，将第二组冷水机组移动至第51层的设备层中，将冷却塔移动至金茂大厦楼顶。



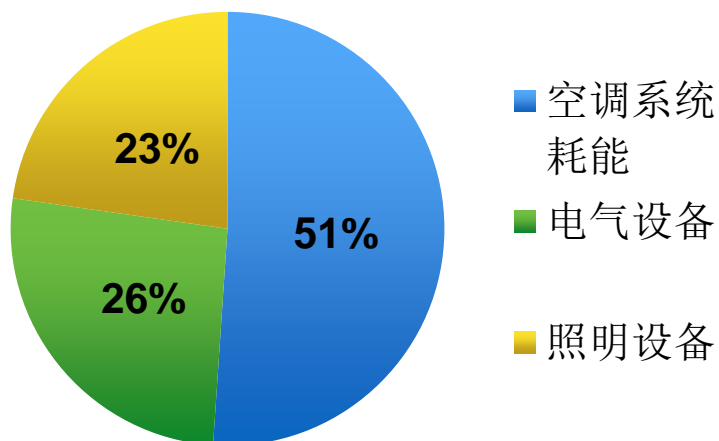
- 如左图所示，原始系统包括了两组工作组分别负责金茂大厦低区和高区的供冷。
- 显然第一组的水输配系统管道过长且没有必要，大量能量消耗在了输配过程中；
- 将第一组的冷水机组移动至51层设备层，冷却塔移动至金茂大厦顶层；
- 经过这样改造之后，管路变短，输配能耗下降。

改变冷却塔位置之后，能耗降低

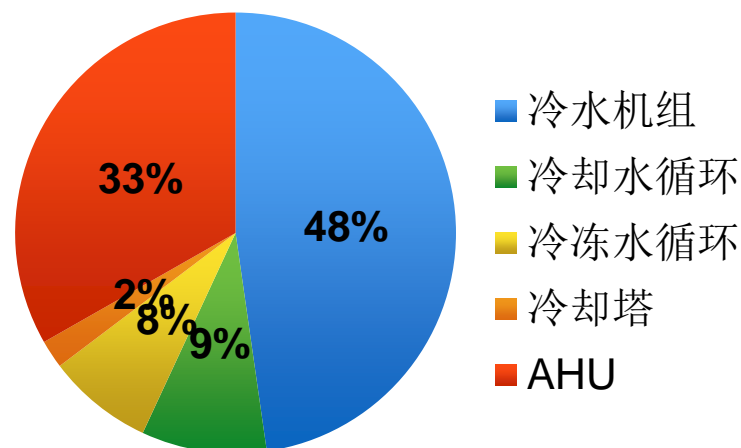
项目	冷水机组	冷却水循环	冷却塔	AHU
电耗(kWh)	6,686,528	1,285,784	289,852	4,655,377

项目	照明设备	冷冻水循环	电气设备	汇总
电耗(kWh)	6,241,100	1,089,766	7,184,033	27,432,440

金茂大厦第一种改造方案耗电分析



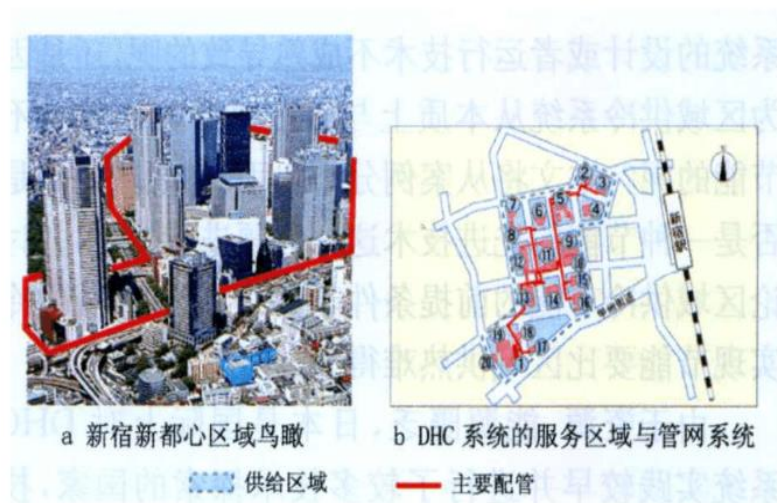
第一种解决方案暖通空调系统电耗分析



结论：根据模拟结果，每年我们可以节约**666,930kWh**；将冷水机组和冷却塔位置做了小小的改动。

大幅度降低超高层能耗，必须改变集中供冷的方式

# 超高层建筑能源系统与区域能源供应系统的比较



- 左上图为日本新宿新都心区域的集中能源供应系统示意图，服务面积约为43.5万平方米，用于商业写字楼、会议中心酒店等；
- 目前超高层建筑的空调面积约为20-50多万平方米，其供冷面积与区域供冷面积相近，面积用途相似；
- 从一定意义上说，超高层建筑的能源系统就是一个垂直摆放的区域能源系统；
- 实践证明，区域能源系统中的集中供冷系统面临如下问题：a 一次能效仅为0.84，折合电力能效仅为2.21；b 管路损失大，维护费用贵；
- 集中式超高层供冷系统与区域集中供冷系统类似，也有上述问题。



# 区域供冷，鲜有成功案例

不同于集中供热，集中供冷很难实现高效运行。分散式系统比集中式系统更加节能，原因有如下几个方面：

- 集中供冷由于供回水温差较小，造成大流量，由于集中系统输配管网复杂，输配管路长，因此相比小型系统，集中式型系统的输配能耗非常巨大。
- 在负荷特性方面，大型建筑的供冷负荷间歇性变化。因此，现有设计的实际运行过程中，往往出现大机组带小负荷的情况，而冷水机组在部分负荷状态下工作时的效率较低。
- 集中超高层建筑供冷系统与区域集中式供冷系统类似，右图显示的是日本集中供冷供热系统能效统计数据，COP平均值仅为0.67，折算成电能效仅为2.0，
- 由此可见，超高层集中式建筑能源系统设计不合理。

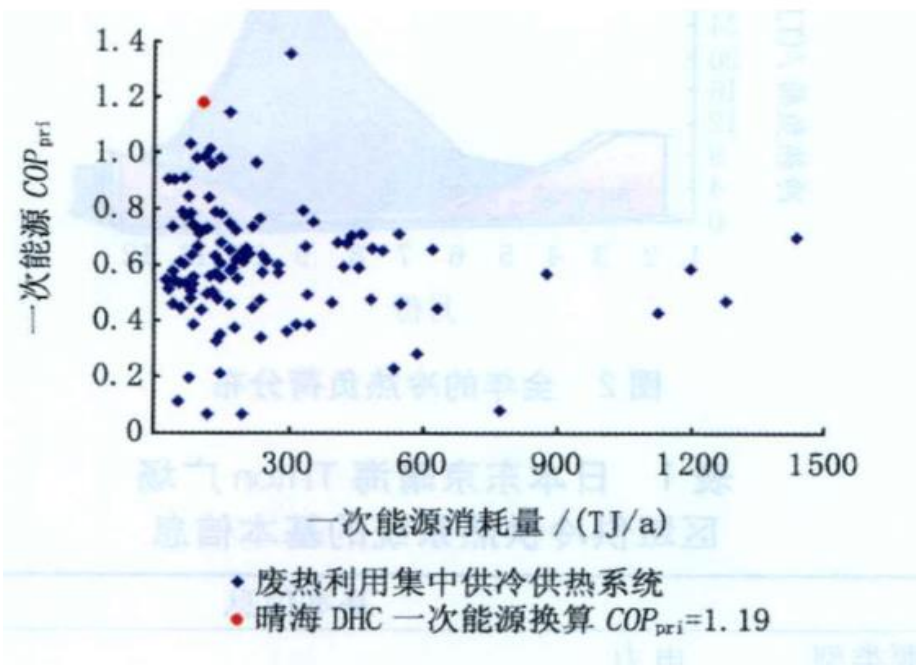
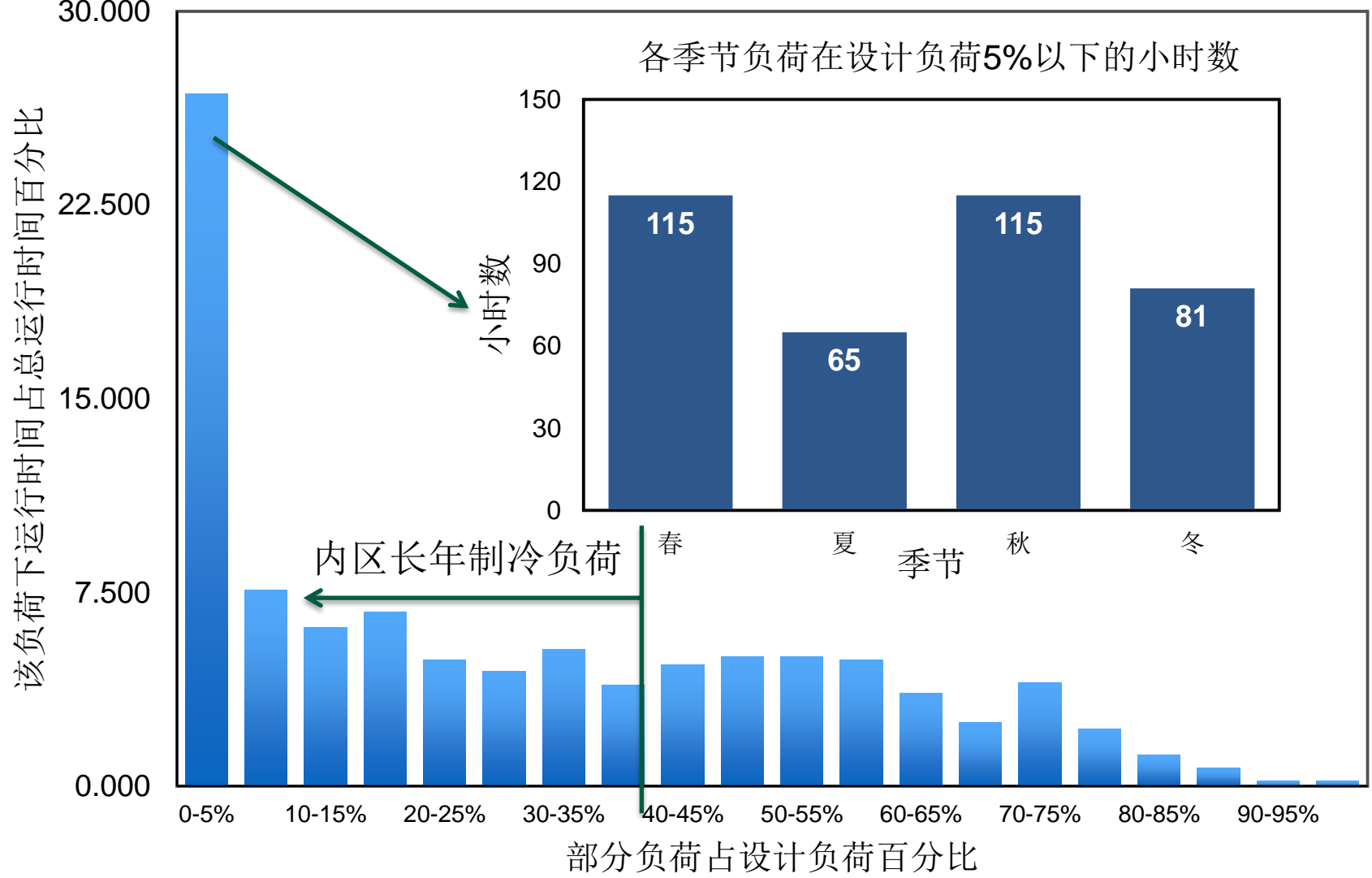


图3 日本2002年全国DHC系统一次能源能效统计值(平均值为0.67<sup>[1]</sup>)

# 内区常年负荷是高能耗一个原因

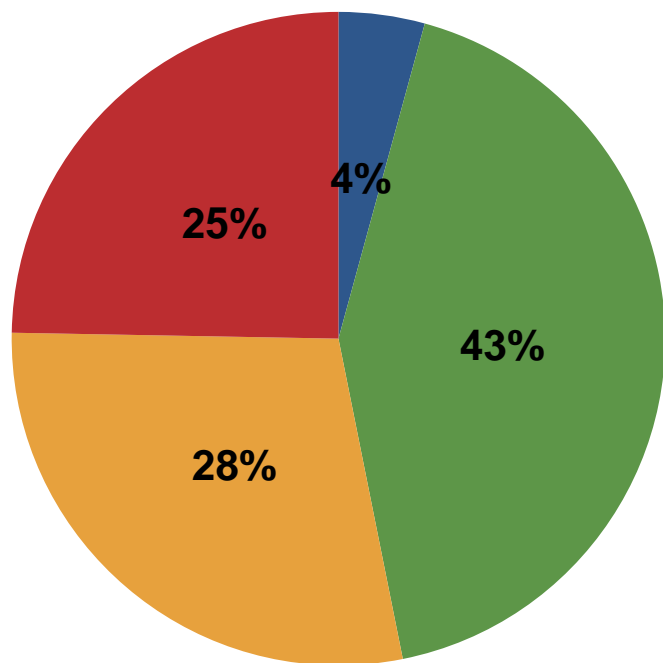
金茂大厦原有系统空调机组负荷运行情况



# 与多联机的比较

项目	室内机	室外机	电气设备	照明设备
能耗(kWh)	1,075,488	10,754,876	7,184,033	6,241,100

VRV系统电耗分析

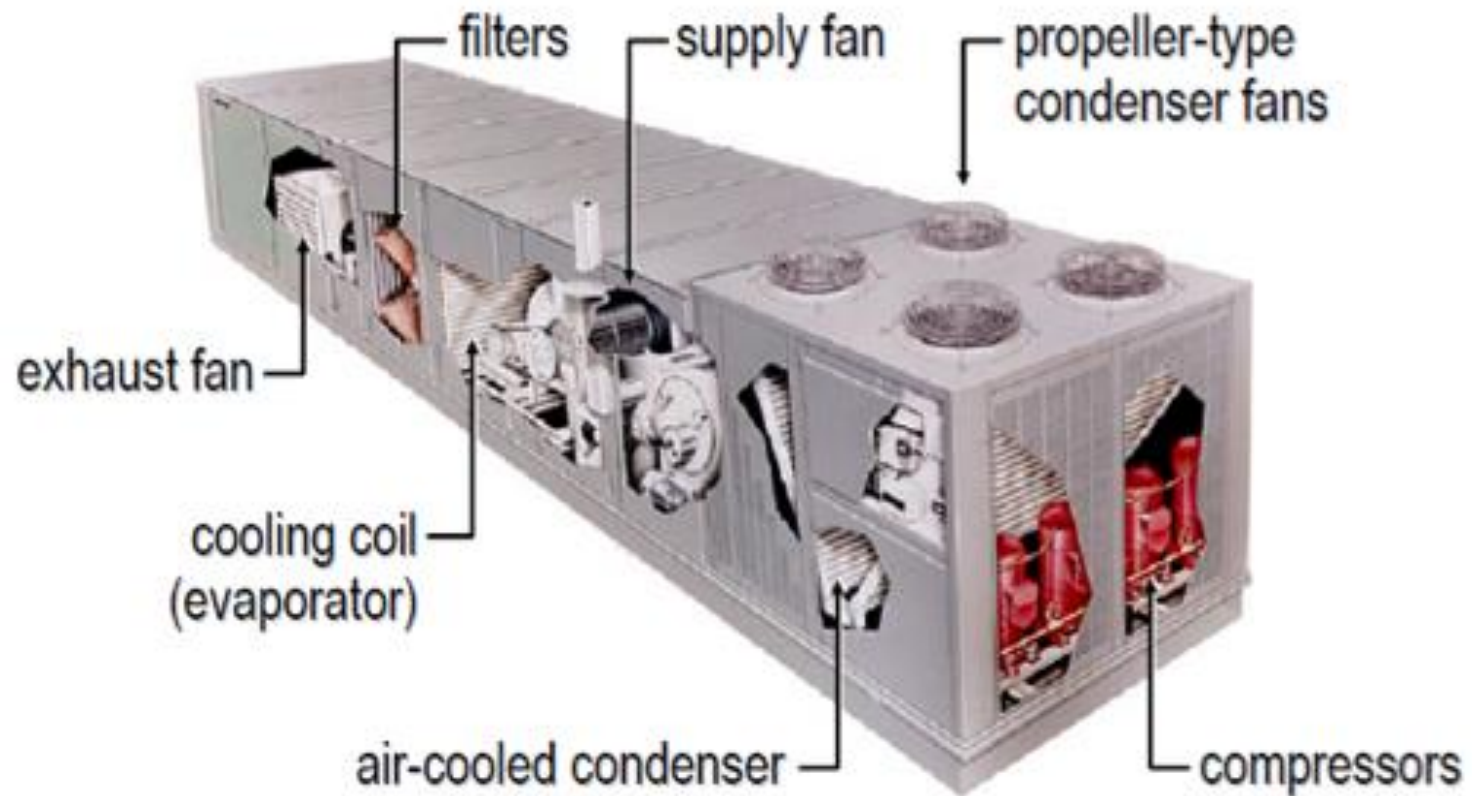


■ 室内机      ■ 室外机  
■ 电气设备      ■ 照明设备

- 多联机VRV空调系统耗电量比原系统耗电量显著减少。
- 多联式VRV室外机在搭载小负荷时的COP要大于低负荷率下的冷水机组，且同时使用性能要高于集中式空调机组。
- 多联机VRV系统的分散控制，同时使用系数要优于集中式系统。

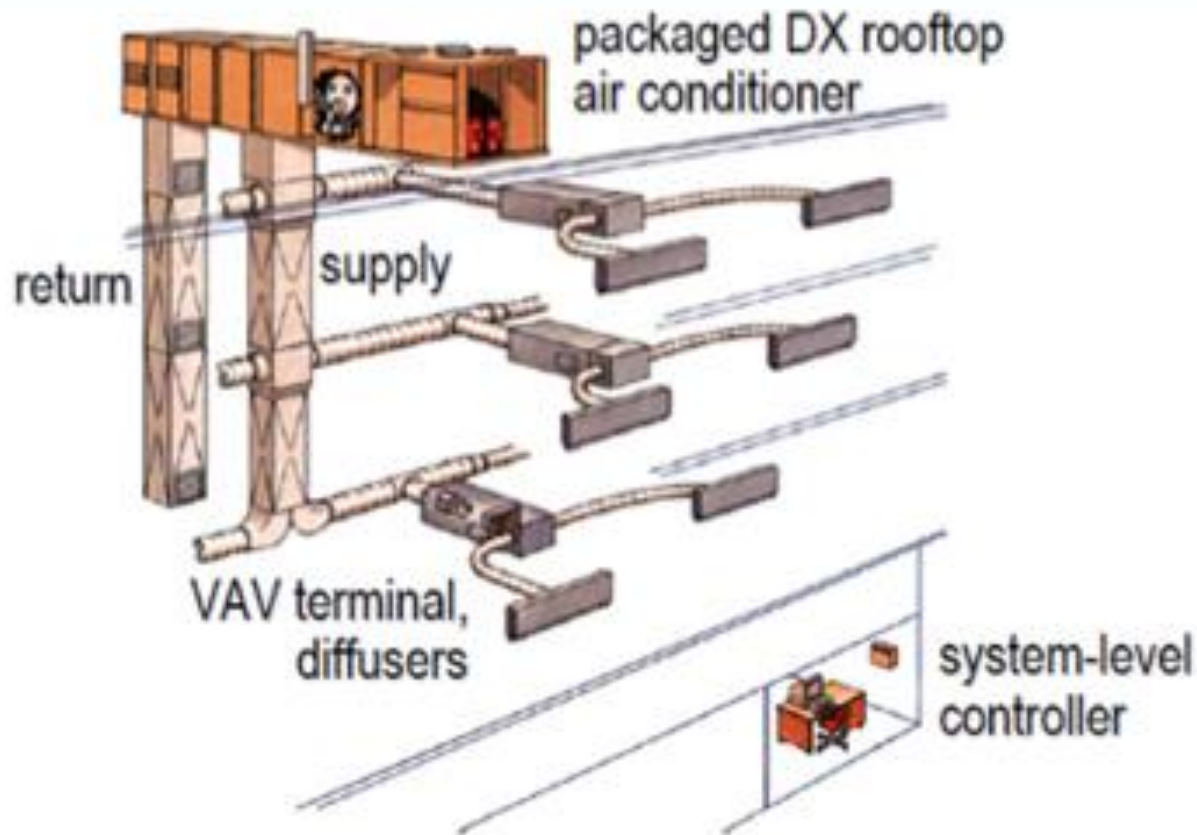
# 与直膨式VAV一体机的比较

## Packaged DX Air Conditioner



# 与直膨式VAV一体机的比较

## multiple zones, variable volume DX VAV System

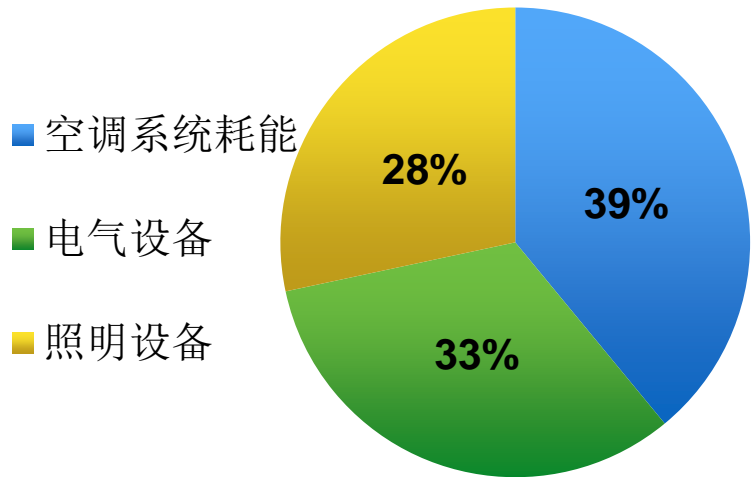


# 与直膨式VAV一体机的比较

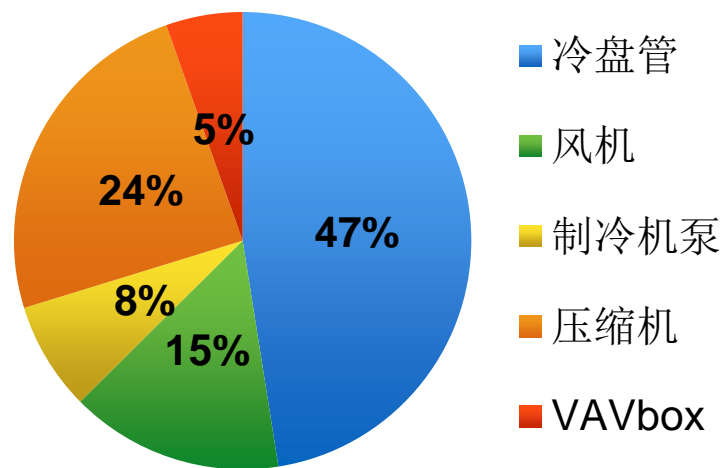
项目	冷盘管	风机	制冷机泵	VAV末端
电耗(kWh)	4,080,389	1,295,111	659,022	465,537

项目	照明设备	压缩机	电气设备	汇总
电耗(kWh)	6,241,100	2,090,243	7,184,033	22,015,435

金茂大厦第二种改造方案耗电分析



一体式VAV系统空调系统耗电分析

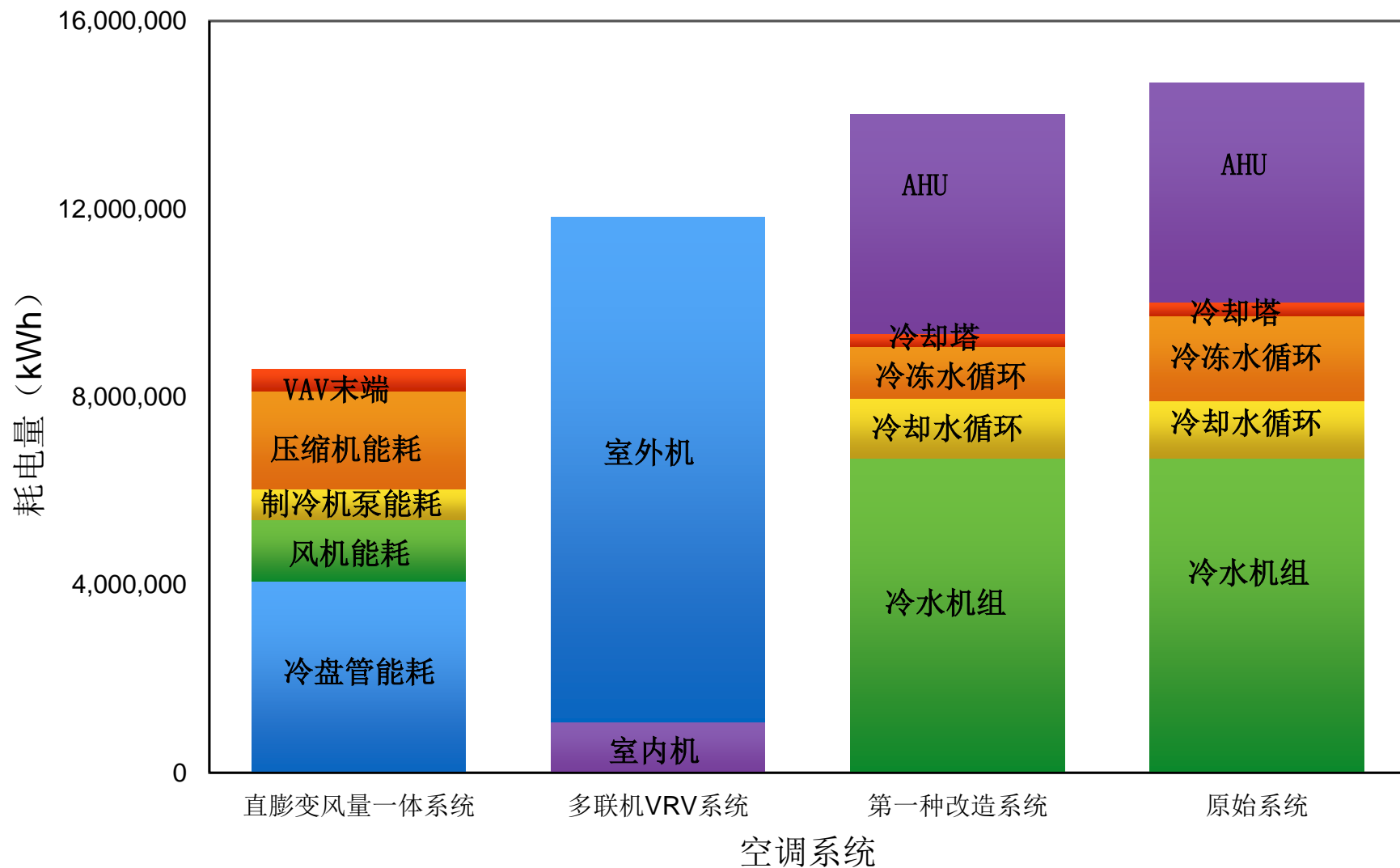


结论：1 屋顶式VAV系统由于节约了水输配系统能耗，所以整个系统能耗显著下降，约为原有系统的78%；  
2 假设每一层均为一个直膨式屋顶空调箱，几乎没有垂直方向的输配能耗



# 集中与分散系统的能耗比较

金茂大厦不同暖通空调系统模拟结果比较分析





超高层建筑能源调研

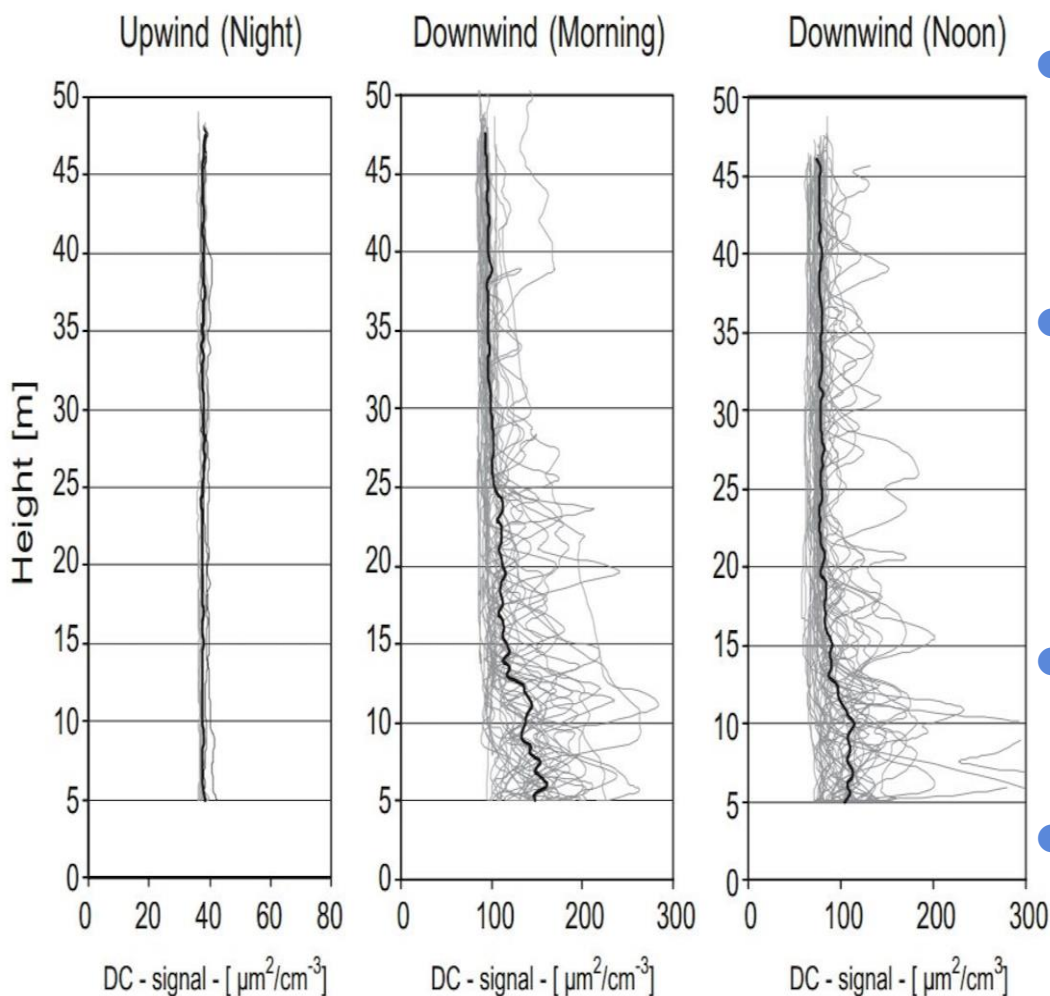


超高层建筑能耗过高问题



超高层建筑自然通风问题

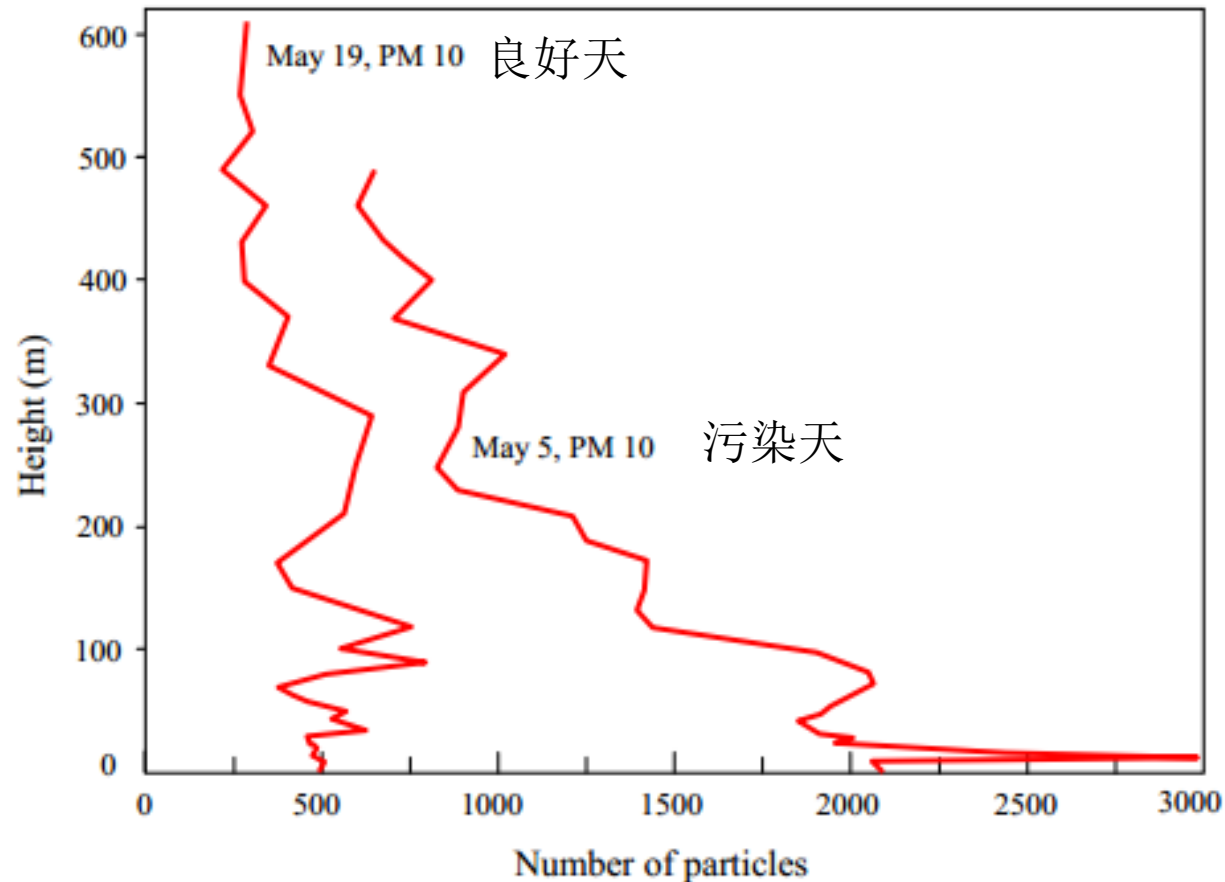
# 超高层建筑室外大气状况（美国）



## 美国DC数据

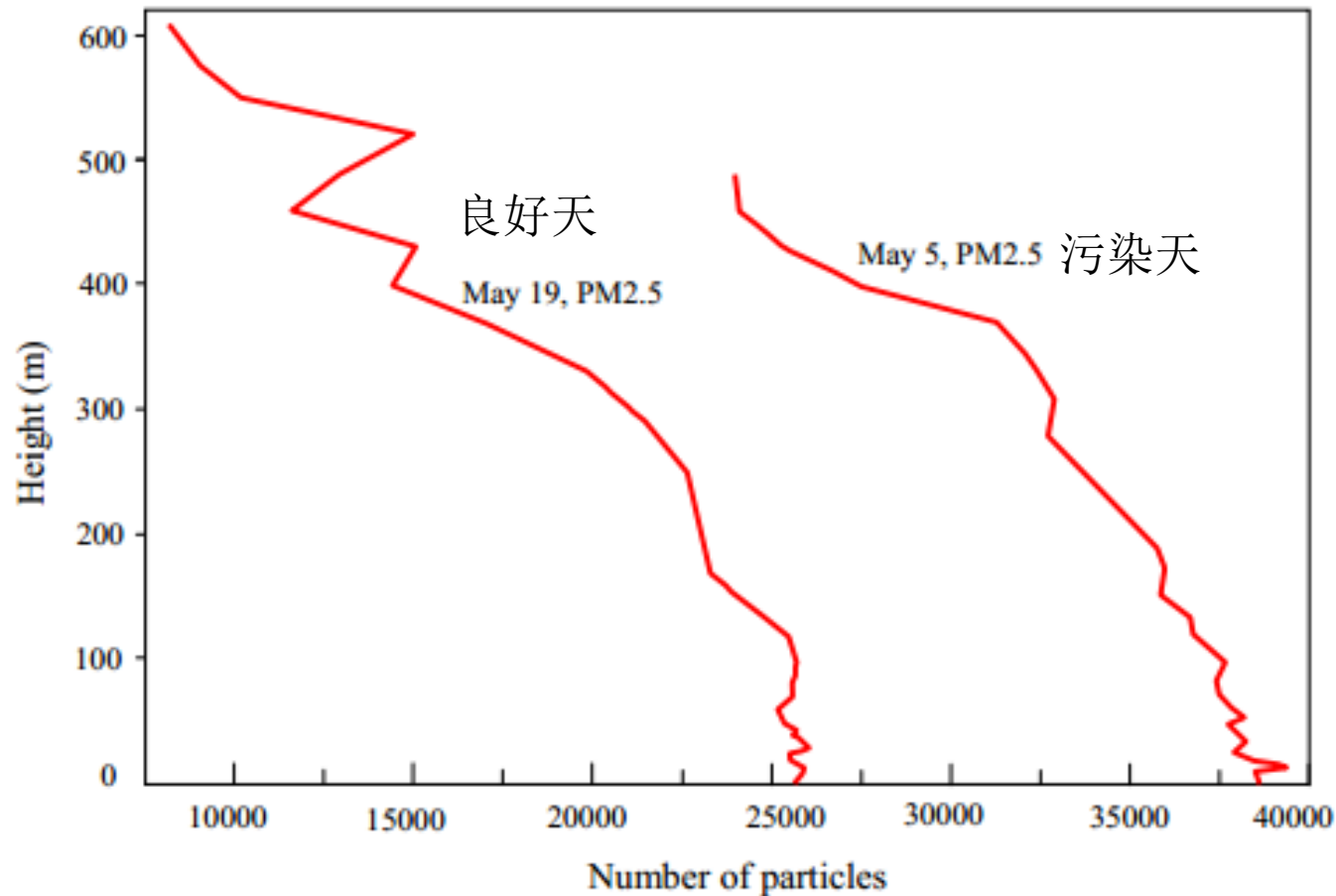
- 左图所示的是在三种不同风作用下的大气污染物浓度随高度变化的情况；
- 由图中可得出结论，大部分时间内，大气污染物浓度随高度的增加而减少，当高度达到50m以上的时，大气污染程度非常低；
- 在10km以下的大气层，大气温度随高度的变化而减少；
- 超高层建筑在高层时，其周围的大气环境是温度低而污染小的空气，因此非常适合用于引进新风；

# 超高层建筑室外大气状况（北京）



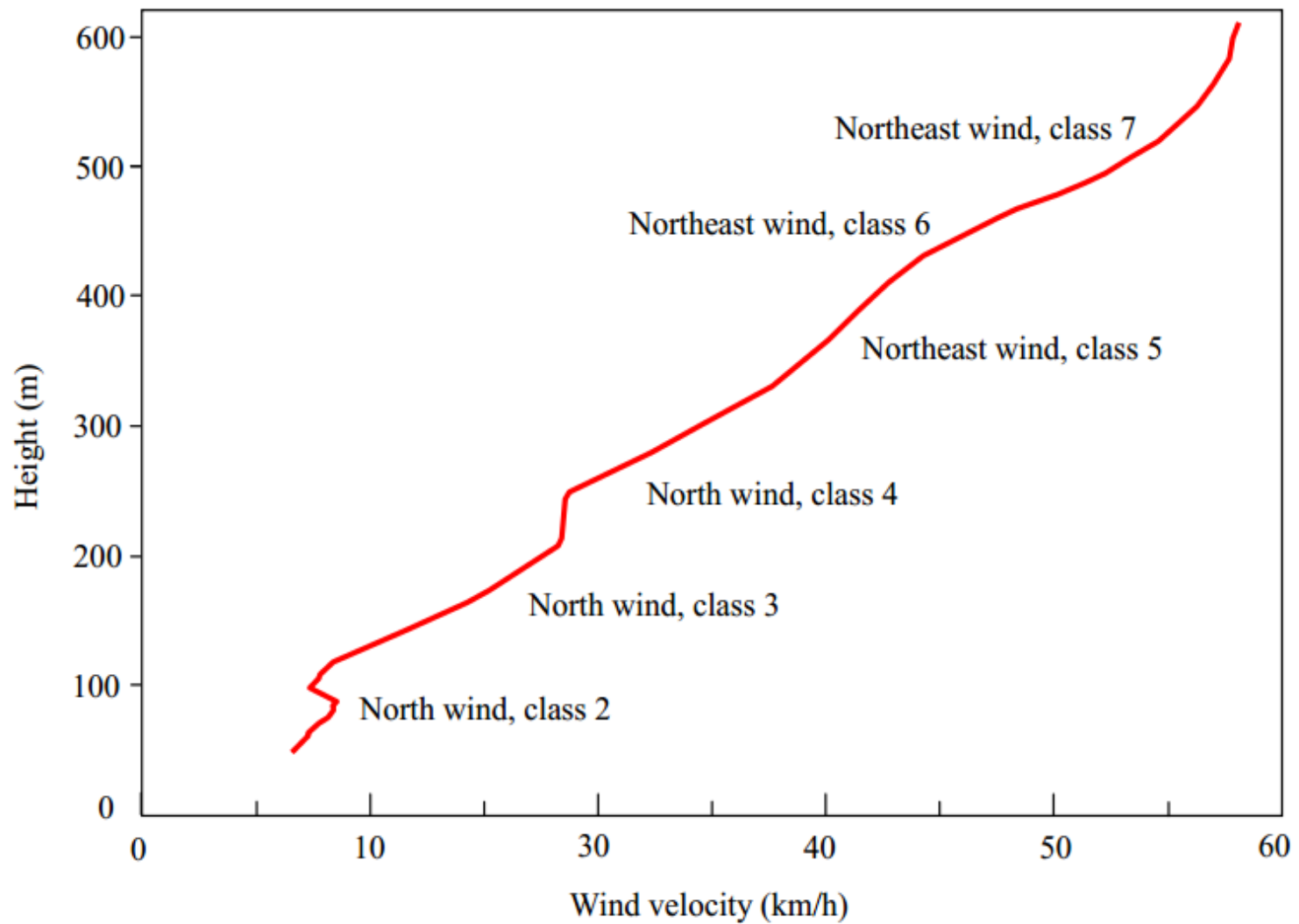
(b) The PM 10 measured on the hot-air balloon on May 5 and May 19, 2013  
Fig. 10. Vertical concentration distribution of the PM2.5 and PM10.

# 超高层建筑室外大气状况（北京）



(a) The PM 2.5 measured on the hot-air balloon on May 5 and May 19, 2013

# 超高层建筑室外风力（北京）



超高层建筑不应该采用全封闭结构，具备自然通风条件



# 高层建筑自然通风案例

## 上海中信广场：

- ✦ 建筑面积：10万m<sup>2</sup> 标准层1800m<sup>2</sup>
- ✦ 建筑规模：地下3层 地上47层，裙楼2层
- ✦ 建筑用途：办公层，公寓住宅，酒店
- ✦ 建筑特征：首次在各层建筑通过窗户侧竖向斜面构成自然通风进风口以实现可能条件下的交叉流自然通风



# 高层建筑自然通风案例

## 自然通风和空调方式:

- 办公区采用空调机组+VAV末端，每层分2-4区。AHU内外区分别设置
- 裙房商业用房全部采用变制冷剂流量的多联机系统；
- 从窗侧进行风和排风的自然通风气流组织，开口面积为4.35平方米每层；
- 2012年6月，日建设计和同济大学做了效果测试，在打开所有自然通风口的状态下，不同风环境作用下，换气次数可达1-5.2次每小时。

# 高层建筑自然通风案例

## 上海太平金融大厦：

- 建筑面积：110599 m<sup>2</sup> 建筑高度216m
- 建筑地点：上海市浦东区陆家嘴金融贸易区
- 建筑规模： 地下3层 地上38层
- 建筑用途： 办公，商业，会议，金融服务



# 高层建筑自然通风案例

## 高层建筑自然通风措施：

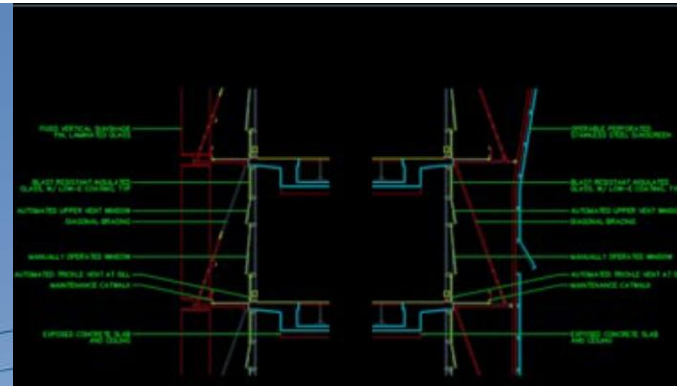
- 建筑的各层幕墙结构的凹凸产生了交织错位的变化，对组织自然进风创造了条件
- 每一个窗框单元带有可控的自然通风器诱引室外新风，通过电梯井道、室内排风形成通风换气；

太平金融大厦各区域空调方式与系统特点

空调区域	空调方式	新风/排风
公共区域	风机盘管+新风	新风各层独立引入、排风各层独立排出
办公区（办公室/交易厅）	外区VRV、内区VAV； 内外区独立控制	外区新风各层独立引入，排风独立排出； 内区新风由设备层引入，通过新风井送达， 排风由排风井送至设备层排出；
会所	风机盘管+新风	新风各层独立引入、排风各层独立排出
商业区、中厅	风机盘管+新风	新风各层独立引入、排风各层独立排出

# 高层建筑自然通风案例

## 美国旧金山联邦政府大楼的机械控制自然通风系统





# 总结 超高层建筑通常做法

- 长距离大流量的水空气运输系统
- 昂贵的运行成本
- 水管风管所需大量空间
- 水泵风机的高能耗
- 高水压 高风压

幕墙结构: 全封闭式

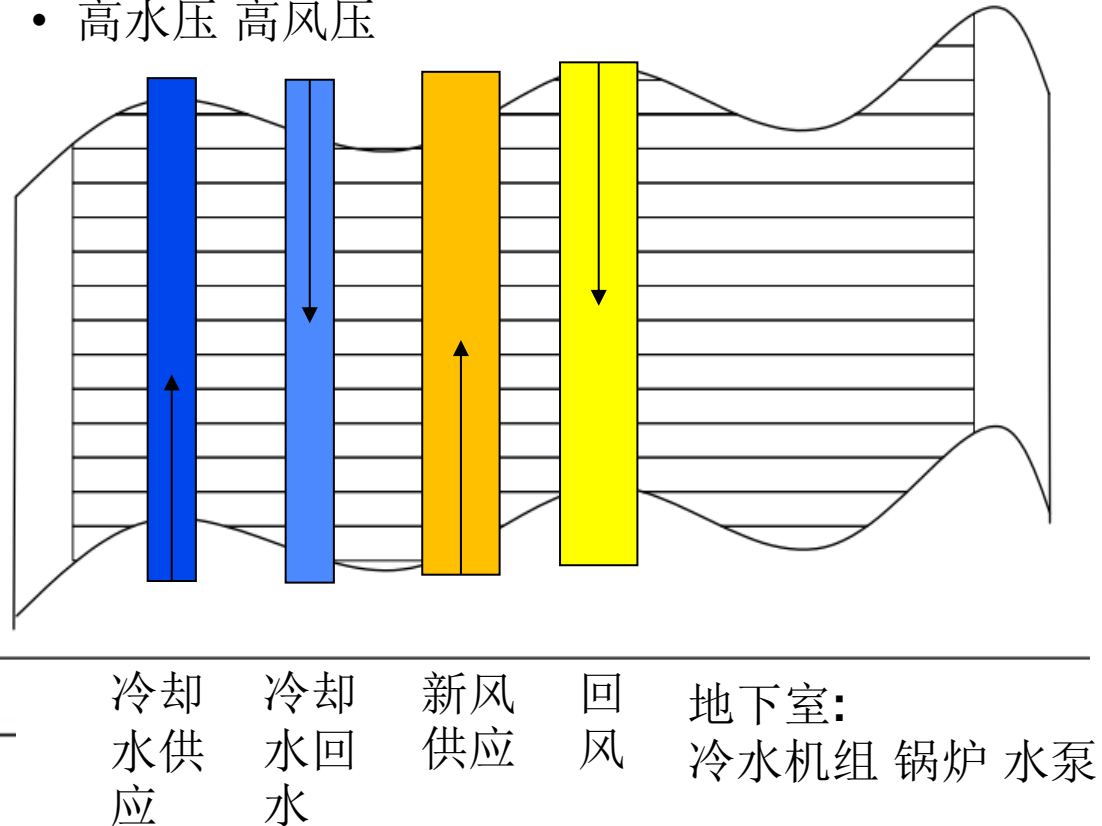
中庭: 热分层, 中空

换热器  
+  
二次水泵

电梯: 活塞风, 噪音

冷却塔

机房: 冷水机组 锅炉 水泵



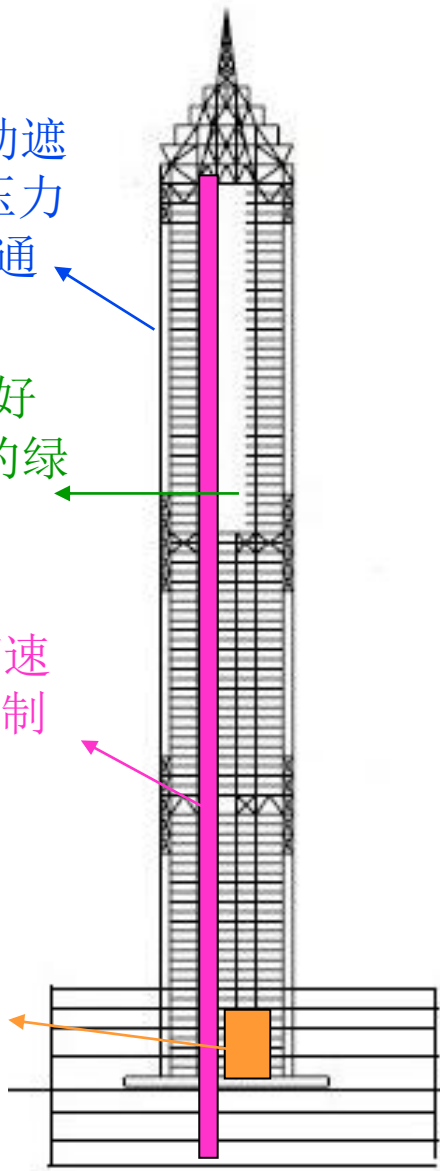
# 总结 超高层建筑改进做法

幕墙结构: 自动遮阳控制系统, 压力控制下的自然通风

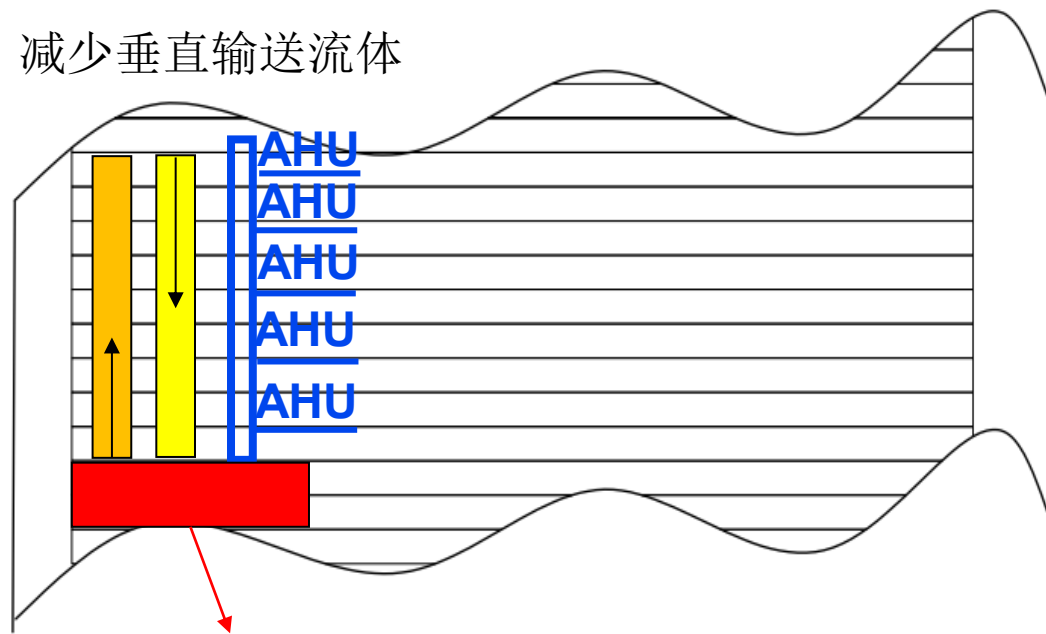
中庭: 带有良好温湿度控制的绿色空间

电梯: 低噪高速运行, 优化控制和操作

安保系统和  
BIMs



- 分散式暖通空调系统(每1-10层)
- 内区和外区独立系统, 不同的冷源
- 适用于运行部分负荷的冷机配置
- 每层引入新风
- 具有良好声学控制的空气处理单元
- 减少垂直输送流体



设备间: 轻重量冷水机组, 平面闭路冷却塔, 蒸汽换热器



# 总结

- 超高层空调系统最好只是多层空调系统的简单叠加（建筑师语）
- 超高层建筑不宜采用集中系统。集中系统大部分时间处在部分负荷和极小负荷的工况下，效率不高；
- 分散系统可以根据负荷特性，分区控制，分区处理。内区外区采用不同的冷源。一体式直膨VAV系统，VRV，以及其他分散式系统都值得考虑研究；
- 超高层建筑应该更好地利用自然通风条件，实现免费制冷，提升空气品质，脱离雾霾。不应该采用全封闭结构；
- 自然通风需要解决风压、哨叫、空调采暖季渗漏问题。可考虑自动机械控制型自然通风；
- 需要建筑师配合。

**Thank you !**