An aerial photograph of the Shanghai skyline at sunset. The Oriental Pearl Tower is prominent in the foreground, with the Huangpu River flowing through the city. The sky is a mix of orange, red, and purple hues, reflecting on the water and the city's lights.

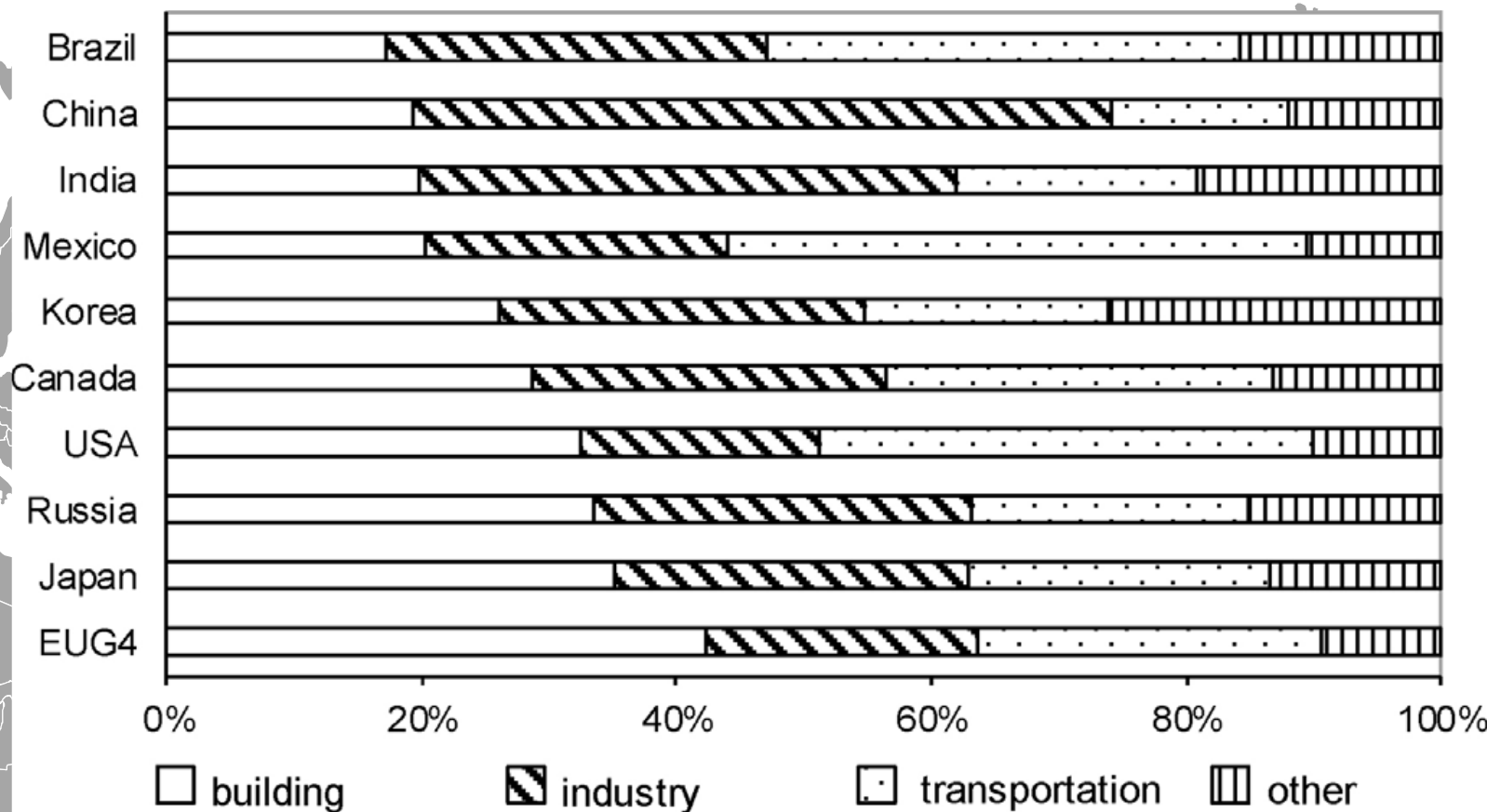
2016同济建筑能源学术日

建筑能耗分项计量数据与应用研讨会

基于分项计量的建筑能耗 模型自动校验

同济大学
机械与能源工程学院
潘毅群 教授 博士 博导
Yiqun Pan Prof. Ph.D.
College of Mechanical Engineering

建筑能耗



39%

20%

[1] Heo Y, Choudhary R, Augenbroe G A. Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty[J]. Energy and Buildings. 2012, 47: 550-560.

[2] Peng C, Yan D, Guo S, et al. Building energy use in China: Ceiling and scenario[J]. Energy and Buildings. 2015, 102: 307-316.

建筑能耗



分析

建筑能耗模拟



能耗模拟的特点



为建筑全生命周期（包括设计、建造、运行、改造）的能耗和环境提供快速可靠的评估



使建筑能耗详细信息的获得性价比更高



方便研究人员分析不同输入参数对建筑能耗的影响

建筑能耗模拟

能耗模拟在建筑全生命周期的作用

能耗分析模型



1、能耗预测:
准确预测不同时间尺度的未来能耗,是实现优化建筑运行管理的先决条件。

2、负荷管理:
准确预测采暖/空调负荷,可为利用建筑热惰性进行蓄冷蓄热、优化设备开机时间提供数据基础,更好应对电力负荷响应。

3、节能量验证:
在实施节能改造措施后,将当前独立变量数值代入模型计算节能量基准能耗,评价节能效果。

4、能耗分析
帮助管理人员进行能耗分项分析,提供决策支持。

5、性能诊断:
通过比对能耗实测值和模型计算值,分析设备系统可能存在的性能衰减或故障,并及时整改。

6、优化控制:
基于模型预测的未来能耗情况,预先调整设备系统控制策略。

建筑能耗模拟



能耗模型

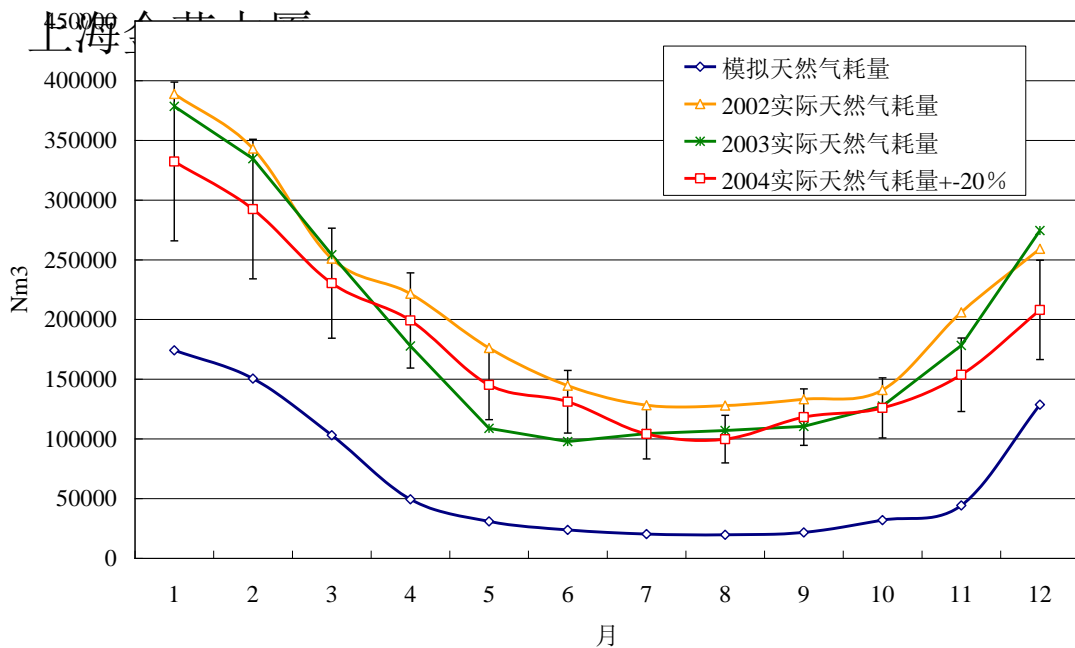
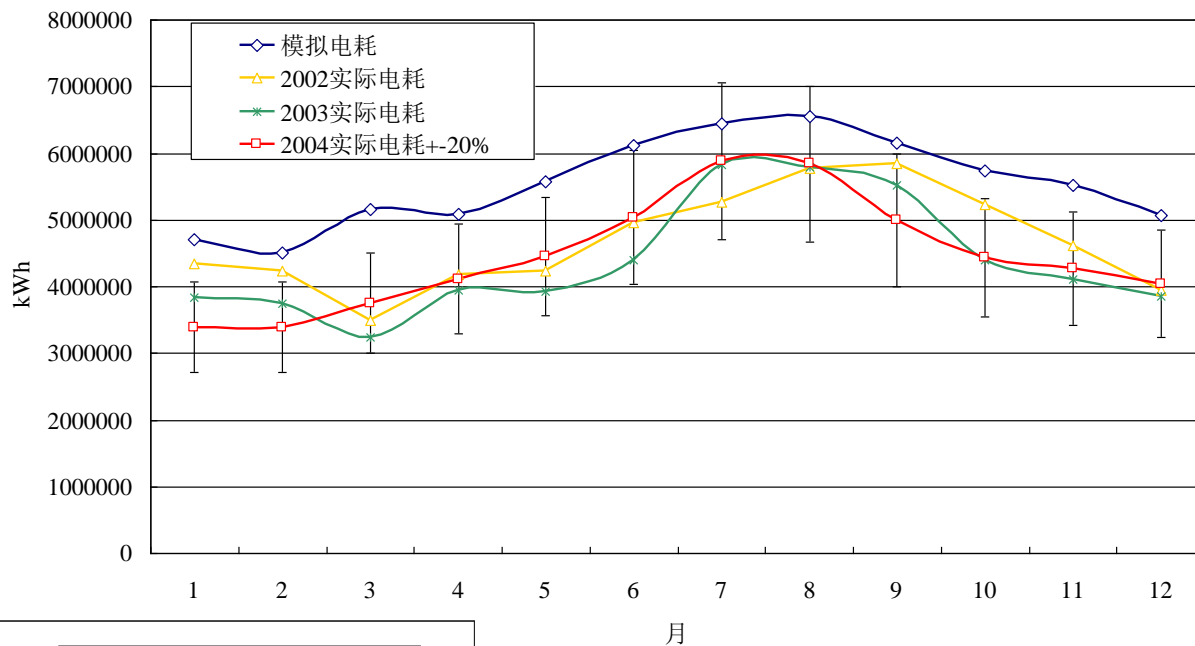


实际建筑

建筑能耗模拟

模拟和实测对比

上海金茂大厦

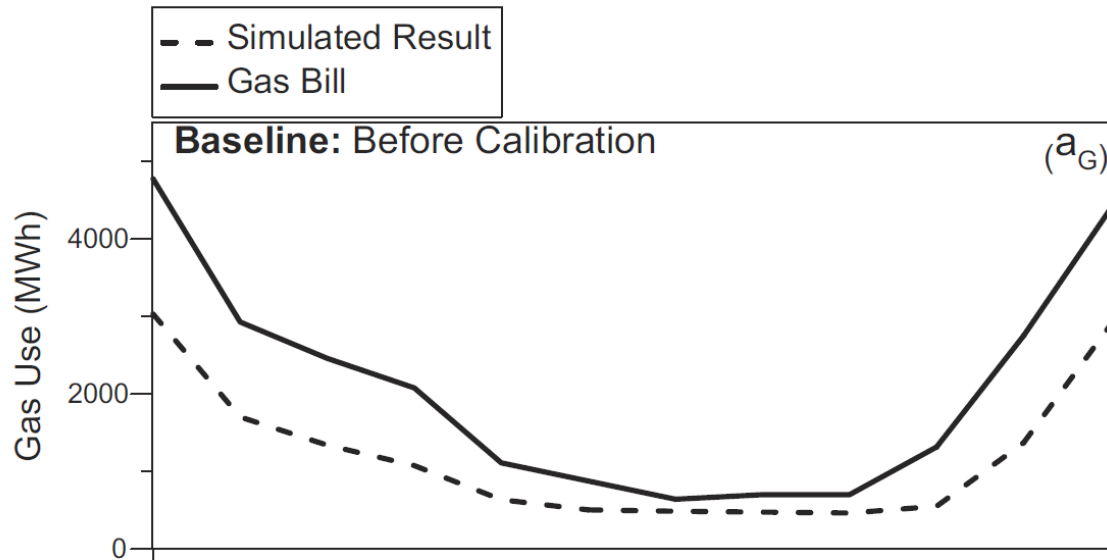
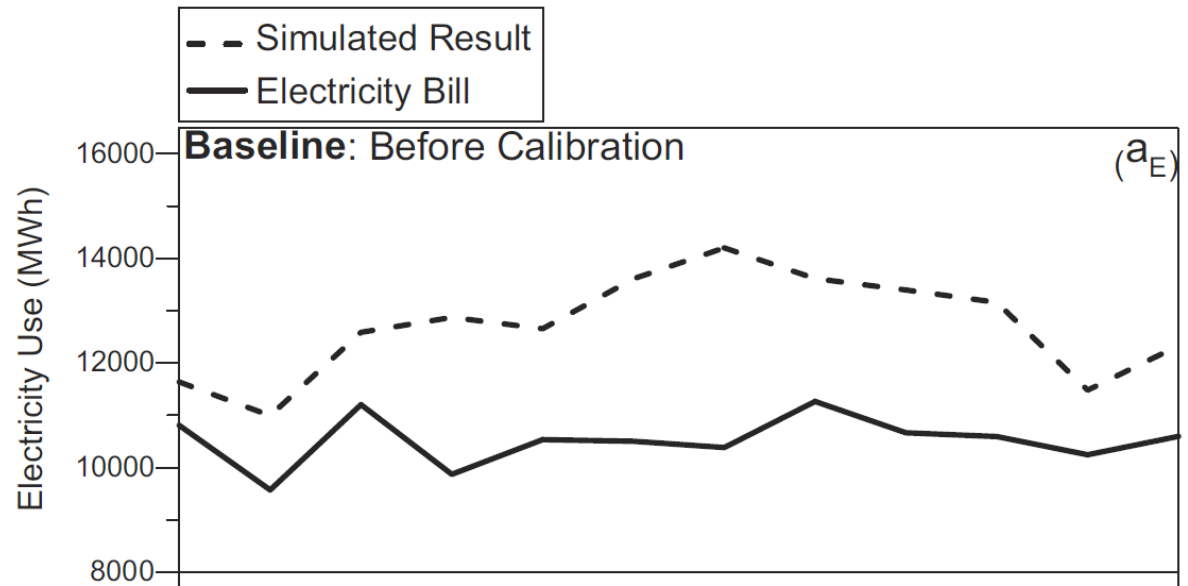


Pan Y, Huang Z, Wu G. Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in Shanghai[J]. Energy and Buildings. 2007, 39(6): 651-657.

建筑能耗模拟

模拟和实测对比

▶ 旧金山某小型
办公建筑

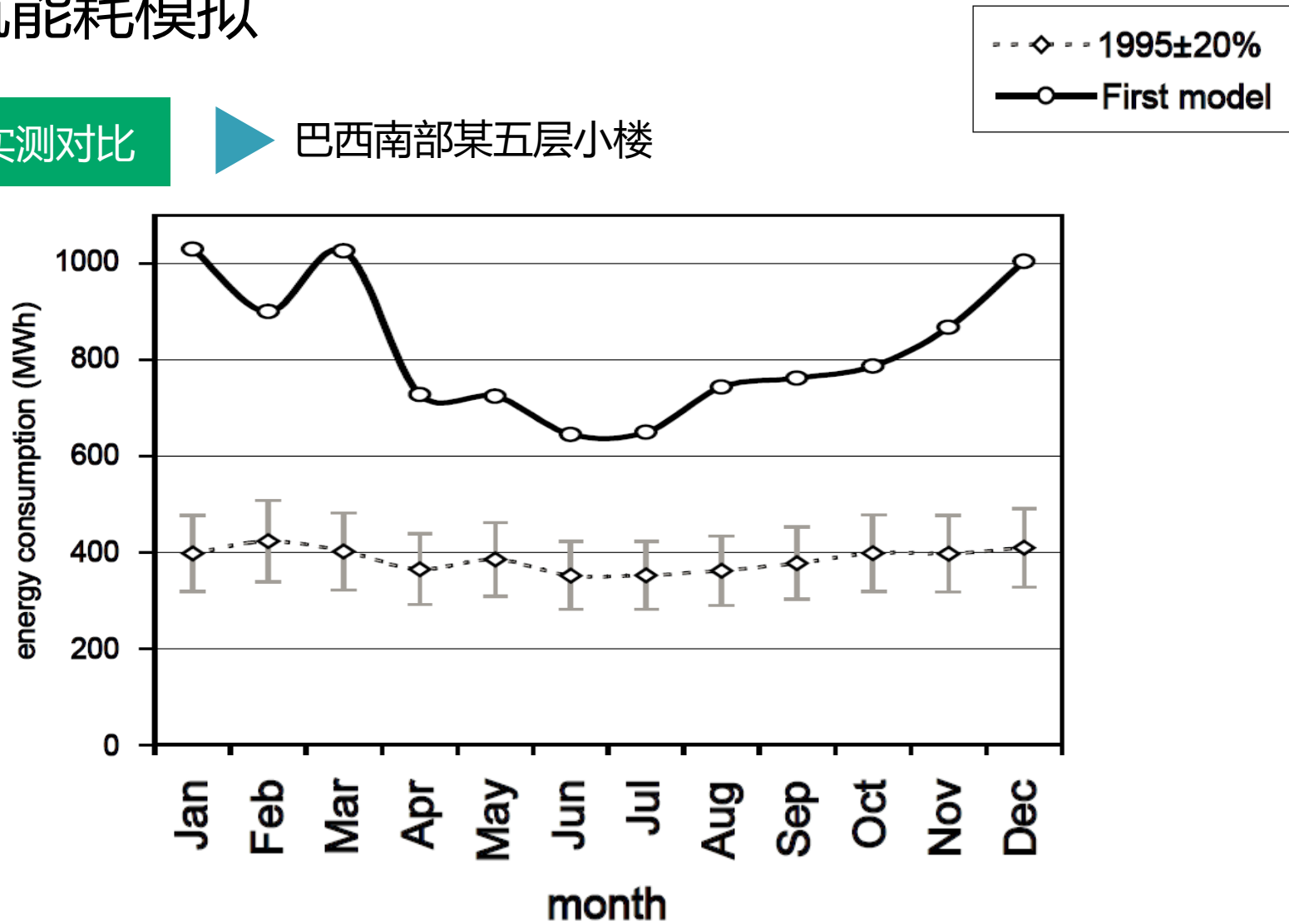


Sun K, Hong T, Taylor-Lange S C, et al. A pattern-based automated approach to building energy model calibration[J]. Applied Energy. 2016, 165: 214-224.

建筑能耗模拟

模拟和实测对比

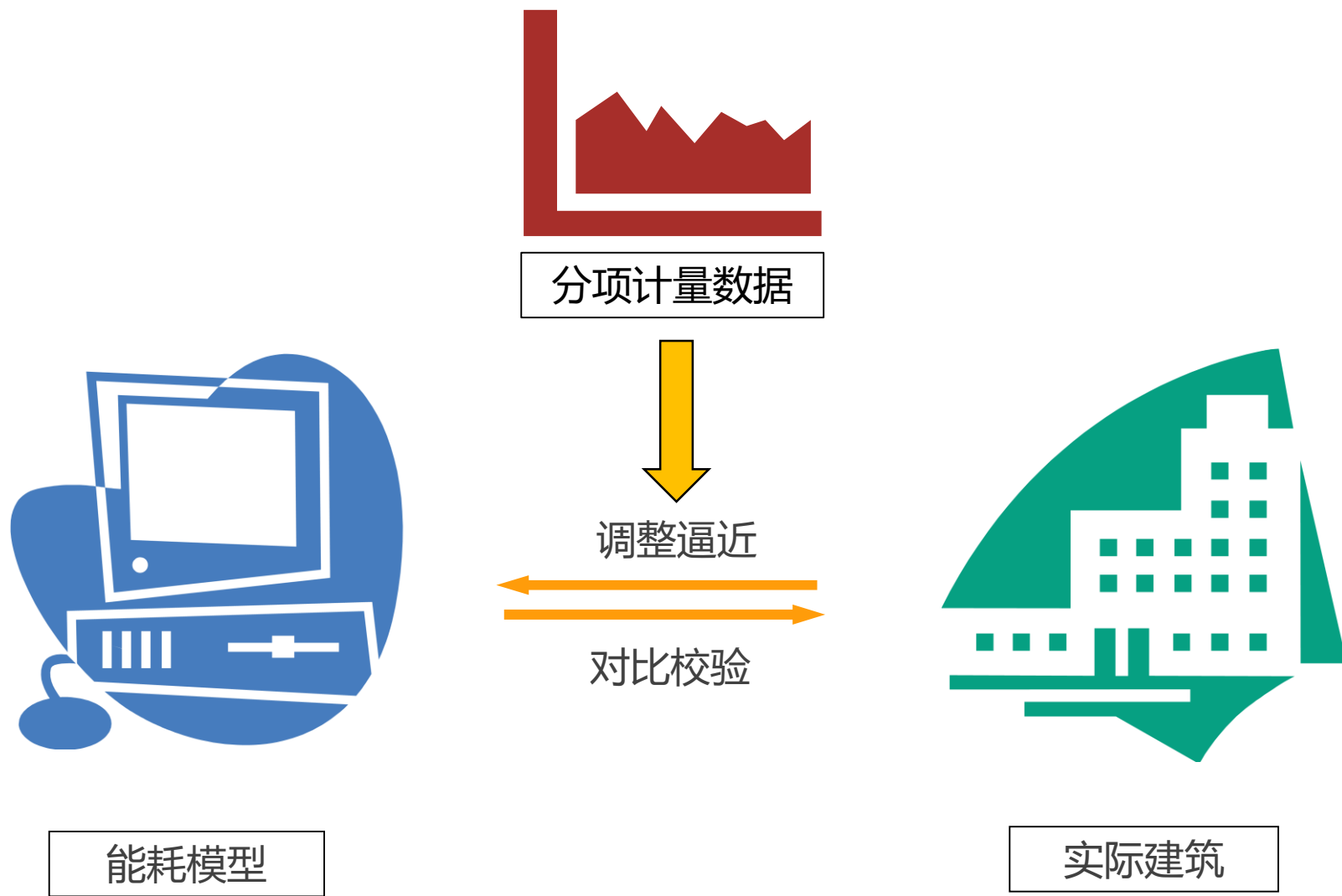
▶ 巴西南部某五层小楼



Pedriani A, Westphal F S, Lamberts R. A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates[J]. Building and Environment. 2002, 37(8-9): 903-912.

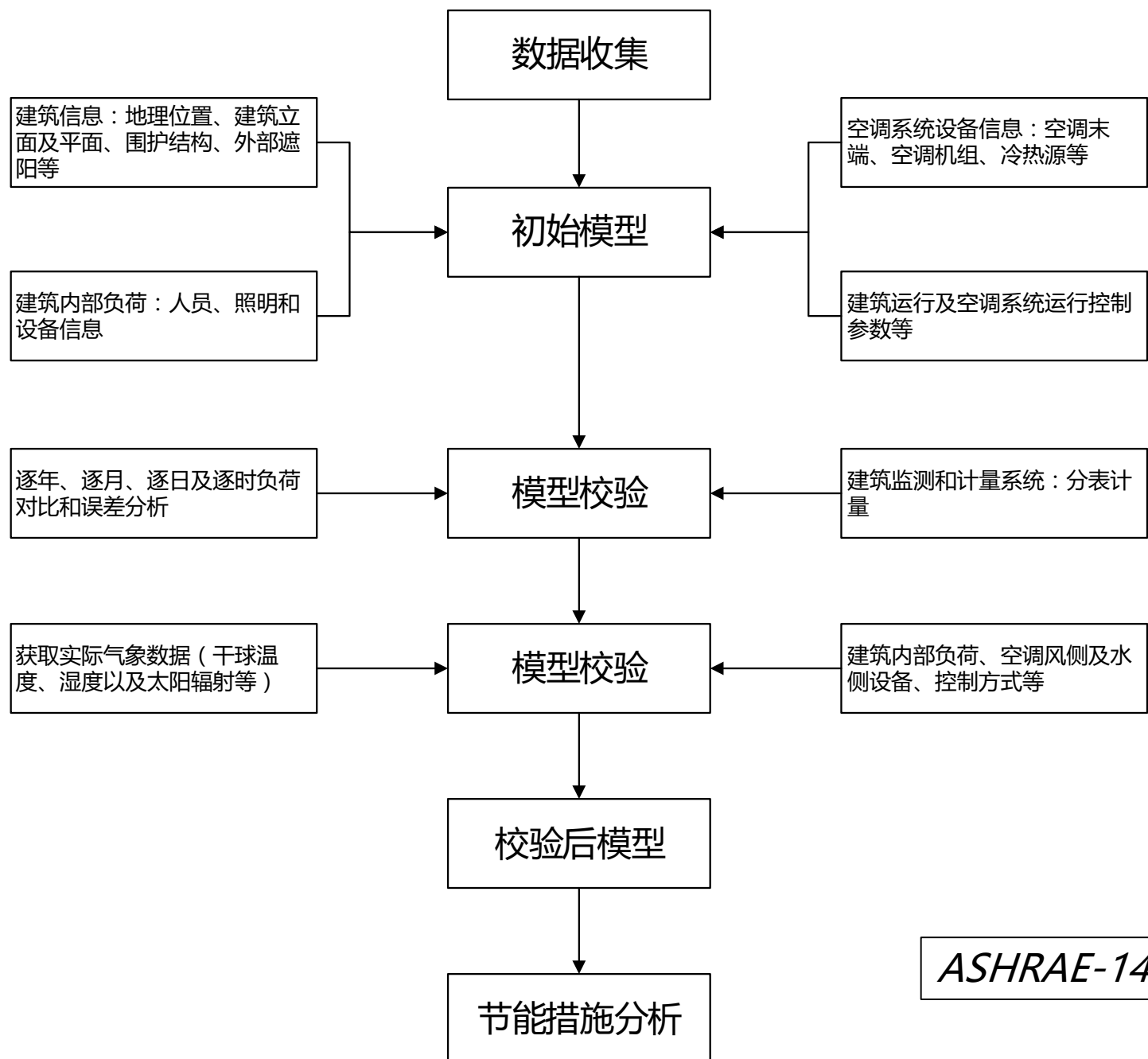
校验模拟

校验模拟(Calibration Simulation)是采用现有的建筑模拟软件搭建模型，然后“调整”或校验各项输入参数以使模拟结果与实测能耗尽量接近的过程。



校验模拟

方法步骤



校验模拟

校验模拟的层级

校验等级	可获得的建筑描述和建筑能耗数据							校验花费时间（不包括模拟运算时间）	
	全年逐月能耗账单	建筑相关图纸	Walk-through初级审计	详细审计	短期监测逐时分项能耗数据	全年逐时（或30分钟）电力数据	长期监测逐时分项能耗数据	数据收集	数据分析
1 级	X	X						30 分钟	1-2 小时
2 级	X	X	X					2-4 小时	2-4 小时
3 级	X	X	X	X				1-2 天	4-8 小时
4 级	X	X	X	X	X			2-3 天	1-2 天
5 级	X	X	X	X	X	X		2-4 天	2-4 天
6 级	X	X	X	X	X	X	X	4-6 月	6-10 天

ASHRAE Research Project 1051-RP, Procedures for Reconciling Computer-Calculated Results with Measured Energy Data, Jan 2006

校验模拟

模型评价标准

可接受的误差指标范围

指标	《公共建筑节能改造技术规范》 (JGJ 176—2009)	美国采暖、制冷与空调工程师学会《节能效果测试方法指导》ASHRAE14	《国际性能测量和验证协议》	《联邦政府节能项目验证和测试指南》
ERR _月	± 15%	± 5%	± 20%	± 15%
ERR _年	----	----	----	± 10%
CV(RMSE _月)	10%	15%	5%	10%

ERR: 误差 (月或年) CV (RMSE): 均方根变异系数

$$ERR_{month}(\%) = \left[\frac{(M - S)_{month}}{M_{month}} \right] \times 100\%$$

$$ERR_{year}(\%) = \sum_{year} \left[\frac{ERR_{month}}{N_{month}} \right]$$

S-模拟能耗
M-实测能耗

$$CV(RSME_{month})(\%) = \left[\frac{RSME_{month}}{A_{month}} \right] \times 100\%$$

$$RSME_{month} = \left\{ \frac{\left[\sum_{month} (M - S)_{month}^2 \right]}{N_{month}} \right\}^{1/2}$$

$$A_{month} = \left[\frac{\sum (M_{month})}{N_{month}} \right]$$

- ASHRAE14还对采用逐时能耗数据进行校验的模型误差也做了规定, 即小时误差 ERR_{hour} 和均方差变异系数 $CV(RMSE_{hour})$ 分别不超过10%和30%。

校验模拟

案例分析

案例一：上海金茂大厦

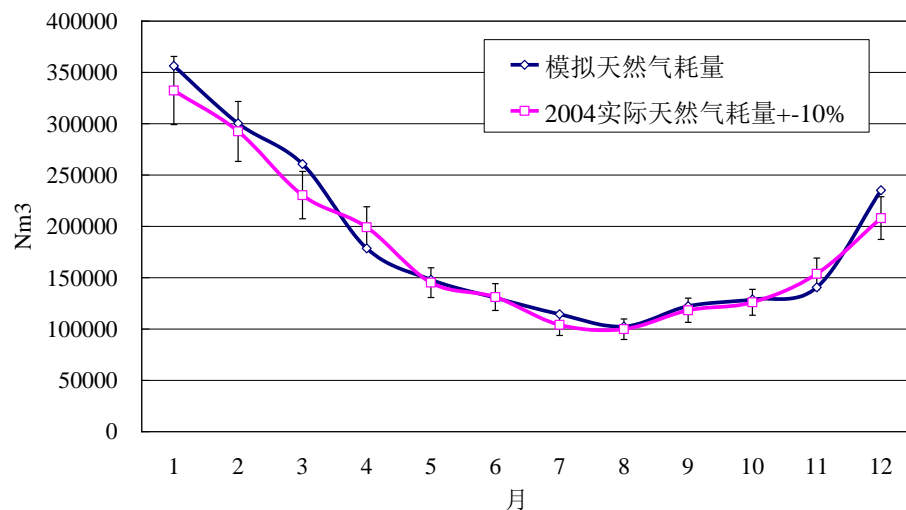
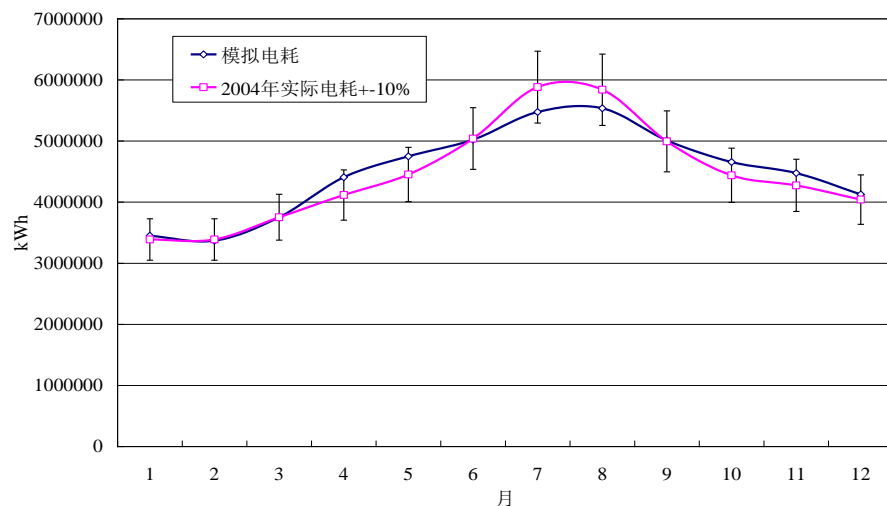
建筑概况

- 30万m²;
- 88 层, 3-50 办公, 53-87 酒店, 3 层地下
- 办公区VAV; 酒店FCU
- 模拟软件: Visual DOE4.0

调整参数

- 天气参数 (2004年实测数据替代TMY)
- 室内负荷与时间表
- 空调系统参数
- 渗透率

检验结果



案例一：上海金茂大厦

节能措施 ECMs

- 变频二次冷冻水泵
- 冬季及过度季免费供冷
- 照明负荷密度减低至 9.31W/m^2

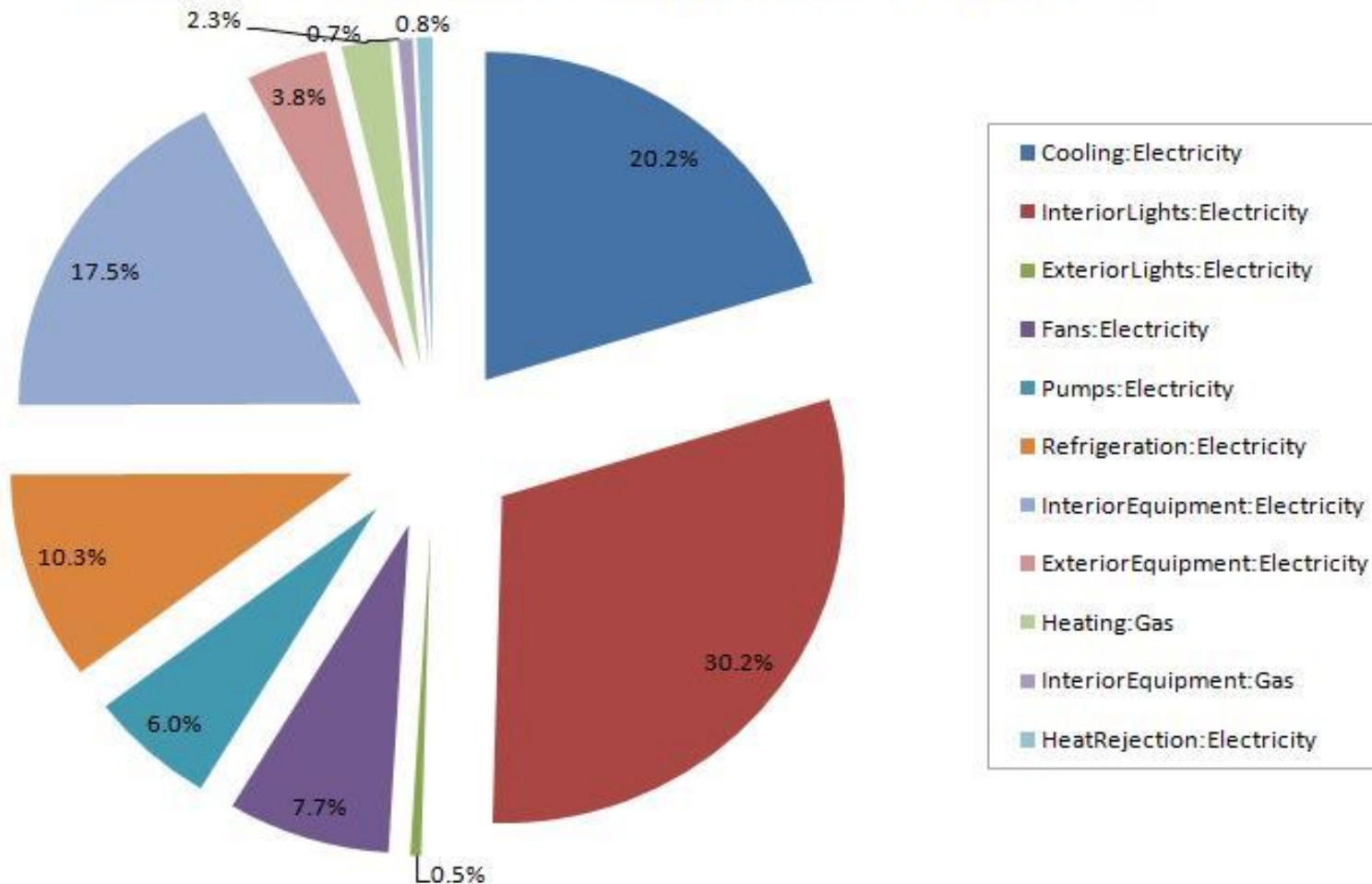
	电耗量 (kWh/m^2)			气耗量 (Nm^3/m^2)			一次能源(mJ/m^2)		
	能耗	节能量	节能百分比	能耗	节能量	节能百分比	能耗	节能量	节能百分比
基准能耗	180			7.39			1955		
节能措施 1	172	8	4.4	7.39	0	0	1879	76	3.9
节能措施 2	180	0	0	7.39	0	0	1955	0	0
节能措施 3	177	3	1.7	7.43	-0.04	-0.5	1927	28	1.4

案例二：商场典型能耗模型

现场调研与模型构建

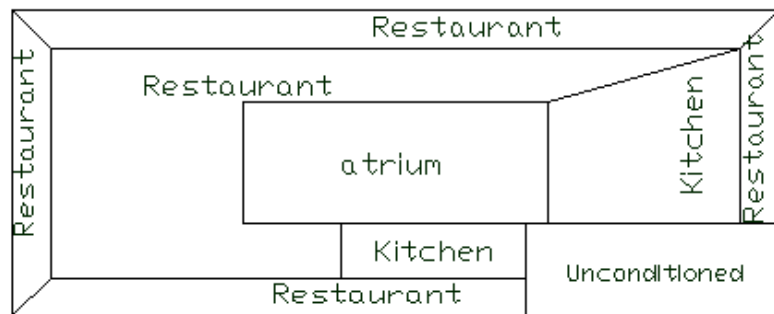
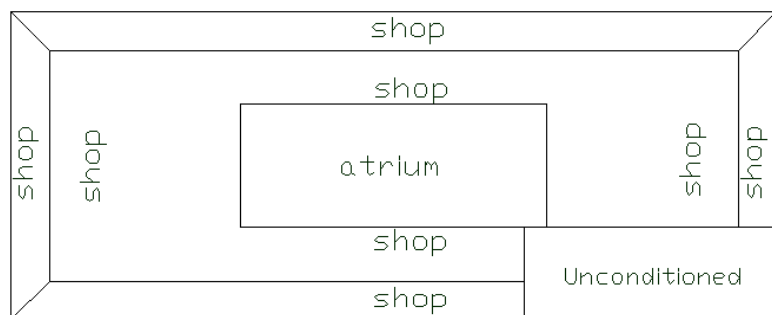
典
楼
建
室
室
建
中
空
空
冷

Shanghai Shopping Mall Energy End Use Breakdown

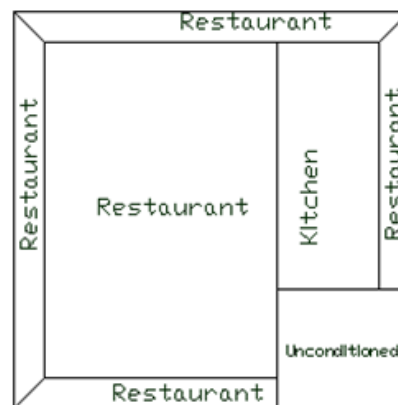
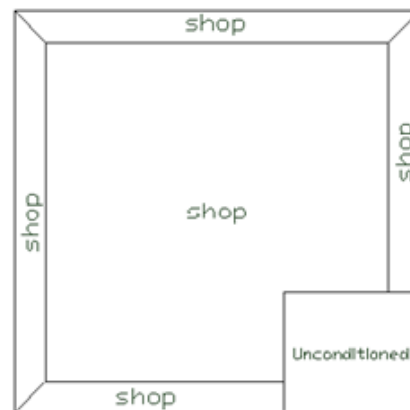


案例二：商场典型能耗模型

现场调研与模型构建



标准层和顶层 (类型1)

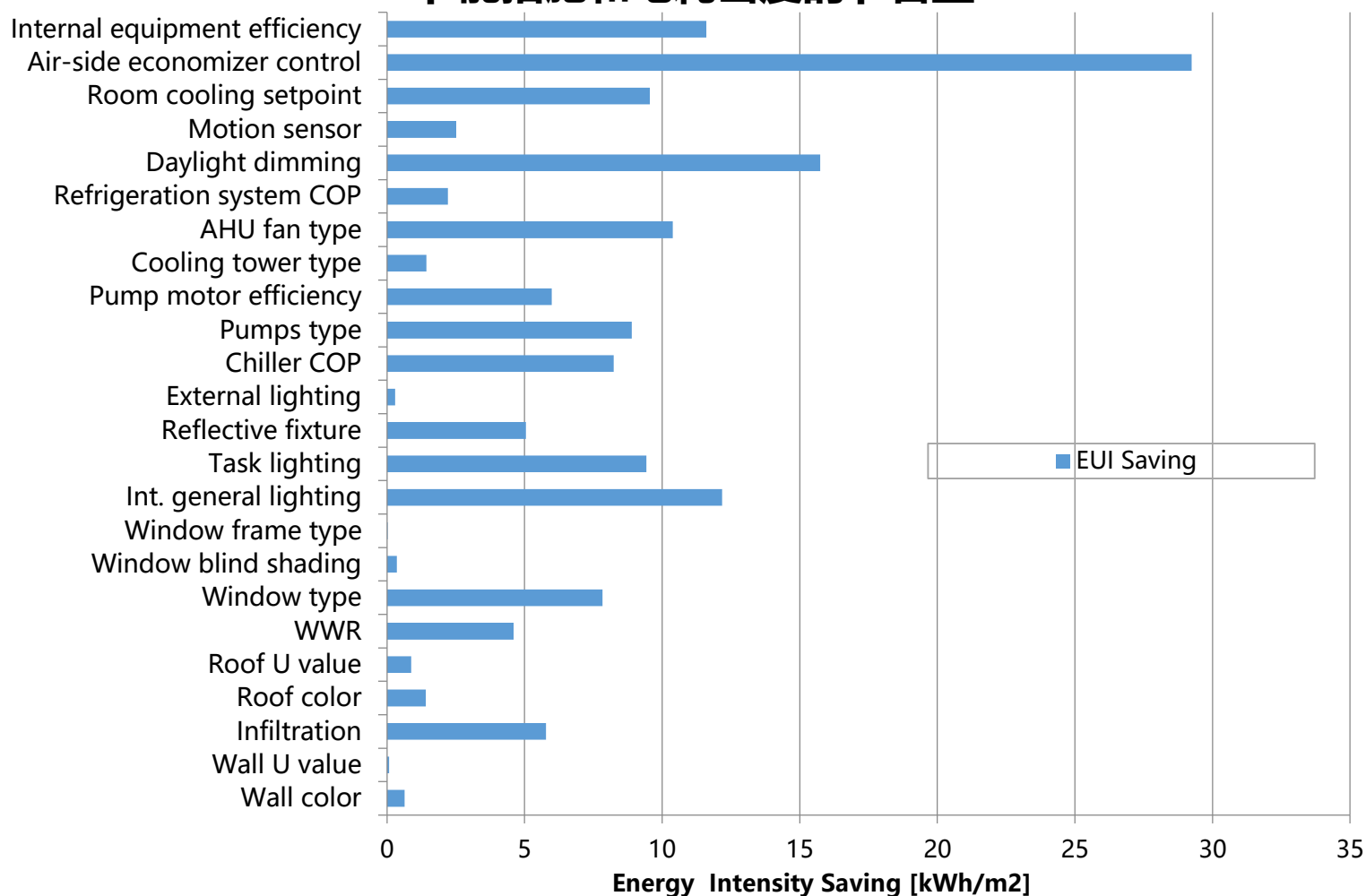


标准层和顶层 (类型4)

案例二：商场典型能耗模型

节能量评估

节能措施和电耗密度的节省量



校验模拟

人工校验

依赖于模拟者的反复多次调整

- 1、专业经验及走访调研
- 2、图形校验
- 3、启停测试
- 4、短期能耗监测
- 5、宏观参数估计法

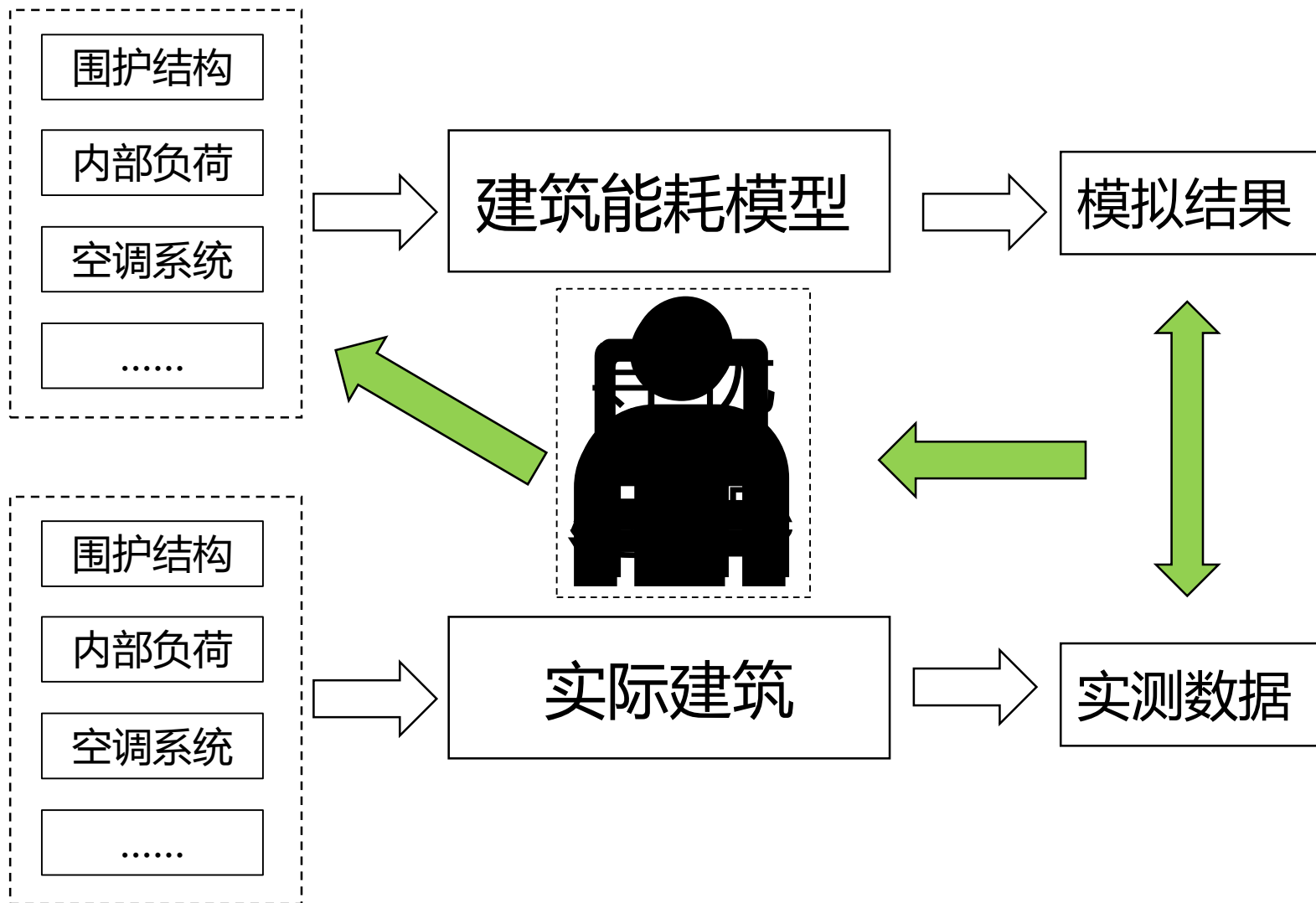
优点

- 1、过程明晰易懂
- 2、易于融入研究人员的专业知识和经验

缺点

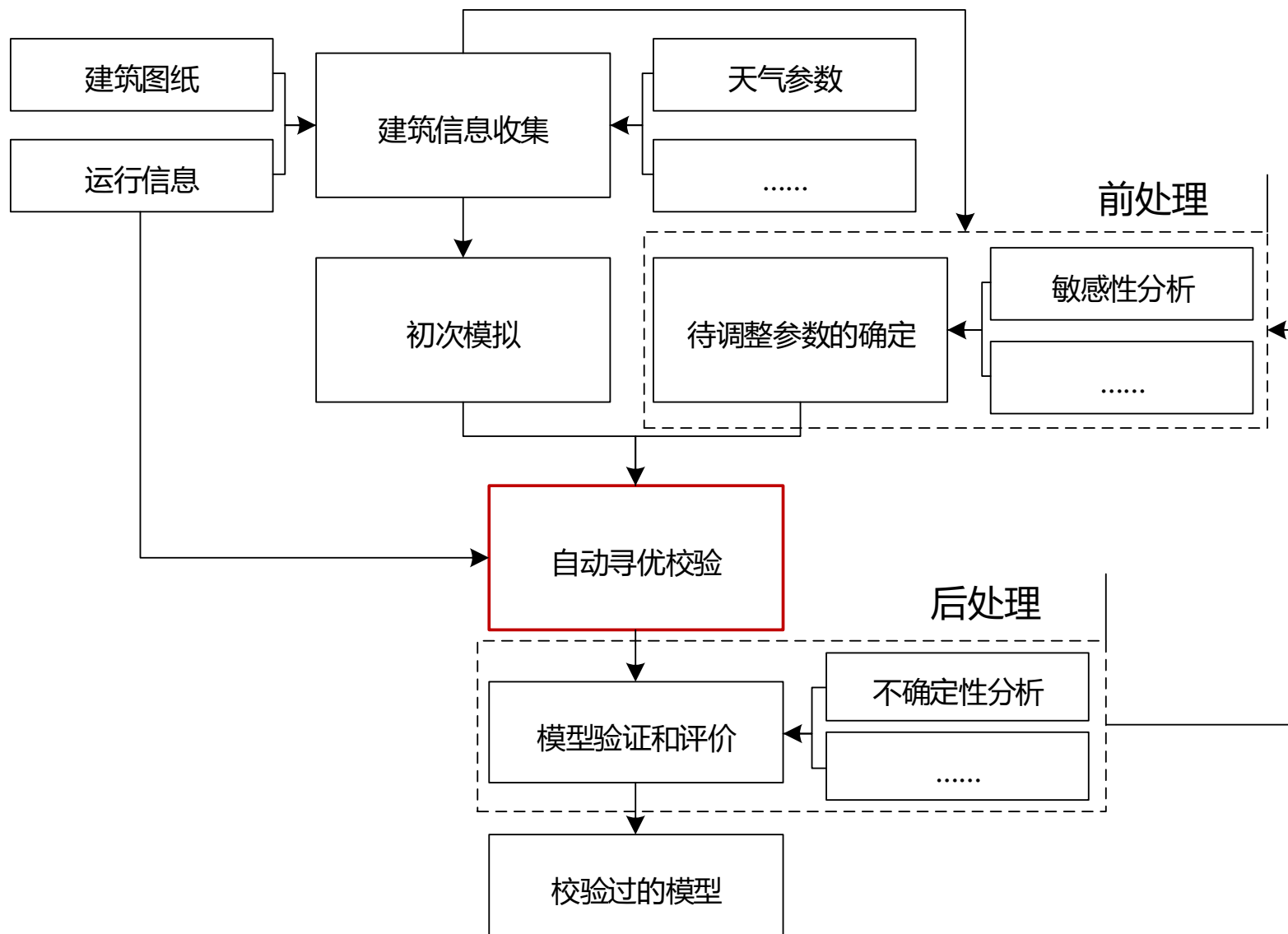
- 1、调整参数多，太过费时
- 2、太过依赖于分析人员的专业知识和经验
- 3、将模拟结果与多年的实际能耗数据动态的匹配十分困难

校验模拟



自动校验

- 加入计算机自动程序以辅助模型校验的完成



用以评价建筑能耗模型输入参数对能耗的影响程度，是筛选确定待调整的重要途径。

- 为保证自动寻优的准确性，参与调整的参数最好不超过25个。

敏感性分析指标

- 单位面积总能耗变化值： $P_{A_j} = \frac{A_j - A_1}{X_j - X_1}$
- 平均单位面积总能耗变化值： $\overline{P_{A_j}}$ （对各项 P_{A_j} 值求和取平均值）
- 单位面积总能耗变化率： $Q_{A_j} = \frac{\frac{A_j - A_1}{A_1}}{(X_j - X_1)}$
- 平均单位面积总能耗变化率： $\overline{Q_{A_j}}$ （对各项 Q_{A_j} 值求和取平均值）

其中 X_j 表示单因子输入参数的值， A_j 表示取此值时的能耗。

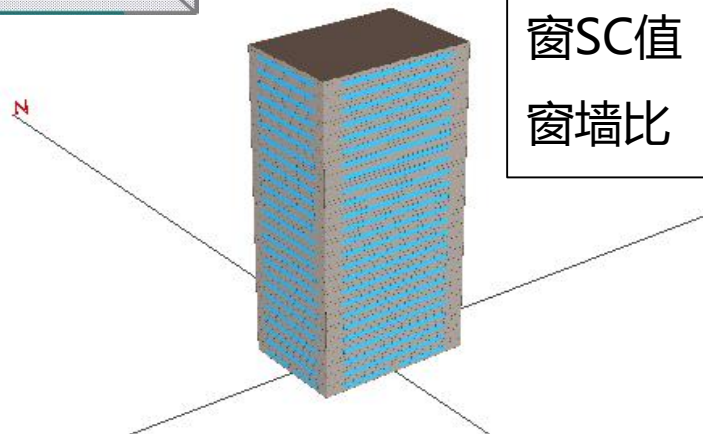
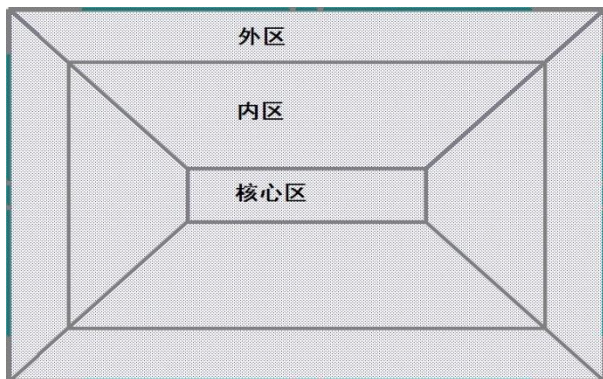
自动校验

敏感性分析

典型办公建筑模型输入参数敏感性分析

建筑信息

25层，层高4.2m
标准层面积1750平米，长宽比1.43（50m × 35m），总建筑面积43750平米
VAV系统，水冷离心机组+燃气锅炉，eQUEST建模



输入参数选择

围护结构

外墙U值
 $W/(m^2 \cdot K)$
屋顶U值
 $W/(m^2 \cdot K)$
窗户U值
 $W/(m^2 \cdot K)$
窗SC值
窗墙比

室内负荷

照明功率
密度
 W/m^2
设备功率
密度
 W/m^2
人员密度
 m^2/P

空调系统

室内设计
温度
 $^{\circ}C$
新风量
 $m^3/(P \cdot h)$
制冷COP
水泵效率
风机效率

外墙

外墙U值 $X/[W/(m^2 \cdot K)]$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$
	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
$A/[kWh/(m^2 \cdot yr)]$	105.65	105.94	106.31	106.7	107.14
$B/[kWh/(m^2 \cdot yr)]$	40.76	41.04	41.42	41.81	42.24
$P_A/[kWh/(m^2 \cdot yr)]$	---	0.58	0.66	0.7	0.74
$\overline{P_A}/[kWh/(m^2 \cdot yr)]$	0.67				
$P_B/[kWh/(m^2 \cdot yr)]$	---	0.56	0.66	0.7	0.74
$\overline{P_B}/[kWh/(m^2 \cdot yr)]$	0.67				
$Q_A/\%$	---	0.55	0.62	0.66	0.71
$\overline{Q_A}/\%$	0.64				
$Q_B/\%$	---	1.37	1.62	1.72	1.82
$\overline{Q_B}/\%$	1.63				

其他围护结构

输入变量	$\overline{Q_A}/\%$	$\overline{Q_B}/\%$
屋顶U值	0.02	0.05
窗户U值	0.22	0.58
遮阳系数	0.16	0.45
窗墙比	0.14	0.36

空调系统

输入变量	$\overline{Q_A}/\%$	$\overline{Q_B}/\%$
供冷设定温度	-1.9	-4.74
新风量	0.22	0.6
冷机效率	-5.23	-12.1
风机效率	-0.12	-0.3
水泵效率	-0.19	-0.48

室内负荷

输入变量	照明密度	设备密度	人员密度
$\overline{Q_A}/\%$	3.42	3.03	-2.22
$\overline{Q_B}/\%$	1.51	1.49	-5.21
$\overline{Q_C}/\%$	9.67	0	0
$\overline{Q_D}/\%$	0	9.96	0

自动校验

数学寻优

简单规则判断

特点和作用

简单规则判断就是通过简明的规律，判断问题产生的原因和解决方法等；
应用于自动校验的前期，提高效率。

实现方式

实际数据和计算数据的比较→简单规则判断→校验提示→调整对应输入参数（照明、设备功率密度）

粒子群寻优算法

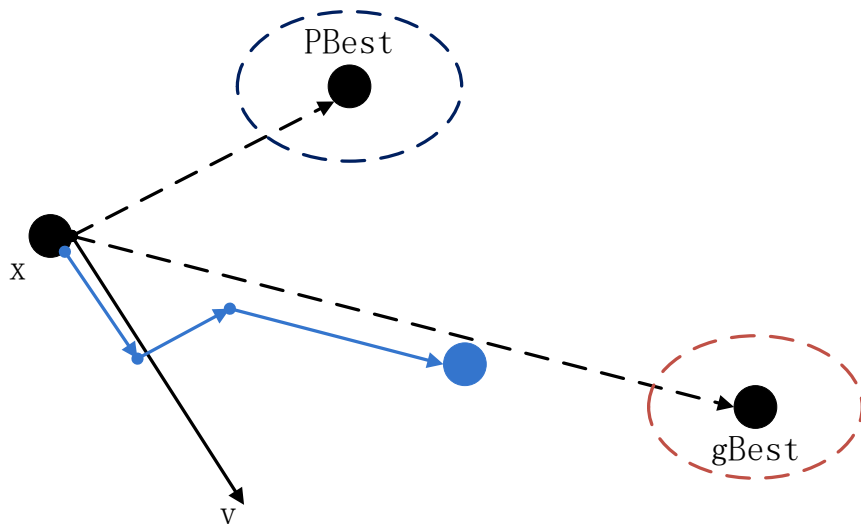
特点和作用

模型的自动校验过程可以看做一个寻优过程；
迭代寻优，不断调整模型输入参数，利用现代寻优算法强大的搜索能力。

实现方式

寻优约束：可调整输入参数的变化范围和步长；
寻优目标：误差标准；
耦合方法：每一个参数代表粒子在一个维度上的坐标值，即
参数数目=粒子维度数。

粒子群寻优算法

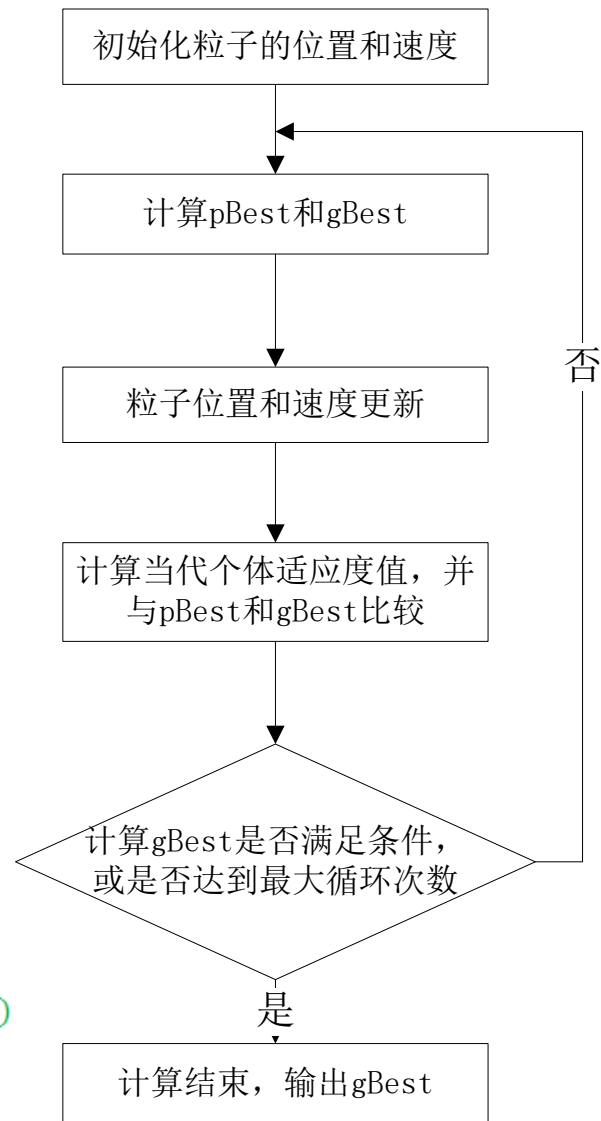


$X_i^t(x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{iD}^t)$: 当前位置; $v_i^t(v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{iD}^t)$: 当前速度

$pBest$: 个体极值 ; $gBest$: 全局极值; w 惯性系数; C_1 、 C_2 学习因子

$$v_{id}^{t+1} = w * v_{id}^t + C_1 * Rand_1^t * (pBest_{id}^t - X_{id}^t) + C_2 * Rand_2^t * (gBest_d^t - X_{id}^t)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1}$$





粒子群寻优算法

寻优约束条件

参数	外墙U 值	窗户U 值	窗户SC 值	照明功 率密度	设备功 率密度	人员密 度	水泵效 率	冷机 COP值	锅炉效 率	风机效 率	人员新 风量	供热室 内温度	供冷室 内温度
单位			---				---	---	---	---		℃	℃
变化下 限	0.3	1.5	0.3	5	5	5	0.5	3	0.5	0.5	20	16	20
变化步 长	0.1	0.5	0.05	2	2	1	0.05	0.5	0.05	0.05	3	1	1
变化上 限	1.5	6.5	0.7	25	30	20	0.95	6	0.95	0.95	40	24	28

目标函数

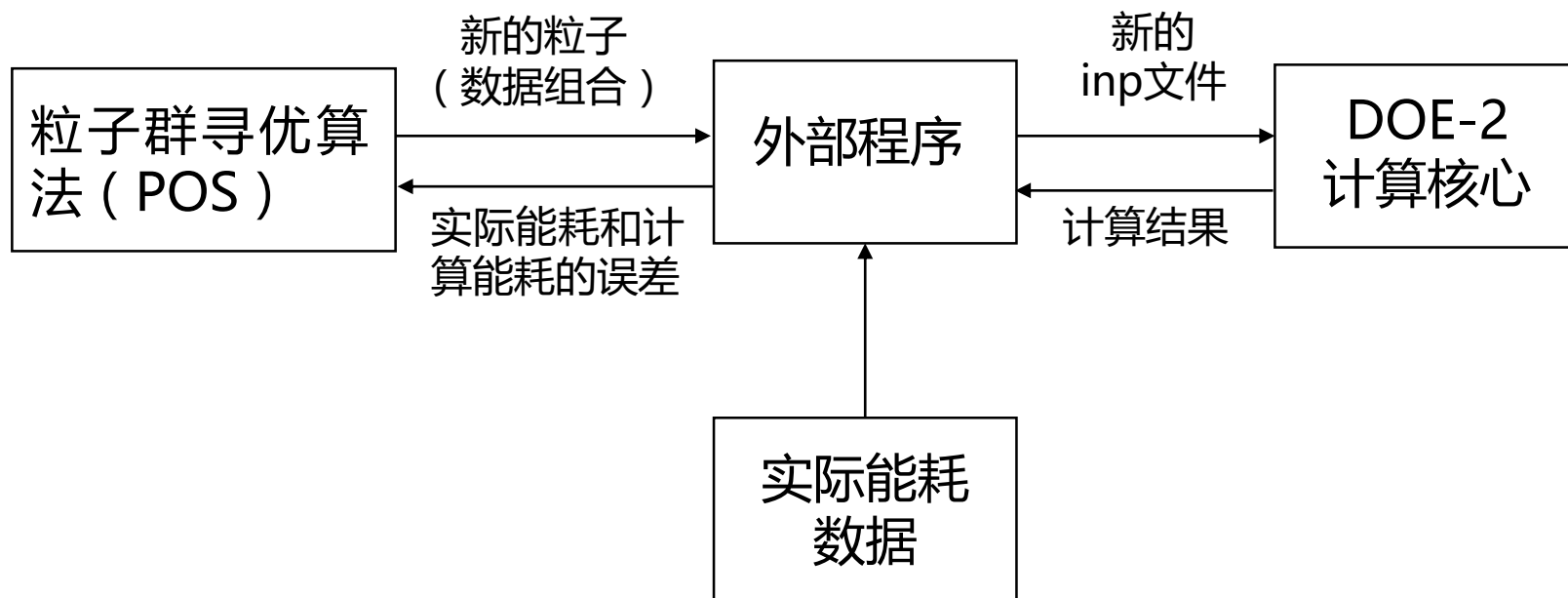
f_{obj}
 $= K_1 * CV \left(RMSE_{total-elec} \right) + K_2 * CV \left(RMSE_{total-hvac} \right) + K_3 * CV \left(RMSE_{light} \right) + K_4$
 $* CV \left(RMSE_{equipment} \right) + K_5 * CV \left(RMSE_{total-gas} \right)$

自动校验

数学寻优

粒子群寻优算法

寻优算法和能耗模拟软件的耦合



自动校验

交互界面

OpenExe

参数调整

是否调整

☐ 全选

☐ 外墙U值 $W/(m^2 \cdot K)$

☐ 窗户U值 $W/(m^2 \cdot K)$

☐ 窗户SC值

☐ 照明功率密度 W/m^2

☐ 设备功率密度 W/m^2

☐ 人员密度 m^2/P

☐ 水泵效率

☐ 冷机COP值

☐ 锅炉效率

☐ 风机效率

☐ 人员新风量 $m^3/(P \cdot h)$

☐ 室内温度热 $^{\circ}C$

☐ 室内温度冷 $^{\circ}C$

自动调整

☐ 全选

最小值

步长

最大值

☐ 全选

☐ 最小值

☐ 步长

☐ 最大值

手动调整

☐ 全选

☐ 最小值

☐ 步长

☐ 最大值

☐ 全选

☐ 最小值

☐ 步长

☐ 最大值

误差控制选项

$$K_1 * Er_{total-elec} + K_2 * Er_{total-hvac} + K_3 * Er_{light} + K_4 * Er_{equipment} + K_5 * Er_{total-gas} \leq LM$$
$$K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 = 1$$

K1

K2

K3

K4

K5

LM

实时误差值

运行状态

给出校验提示

计算当前误差

PSO状态

当前PSO迭代次数

PSO迭代总次数

当前PSO粒子数

PSO总粒子数

控制台选项

随机查找

单次执行

查看当前结果

PSO算法设置

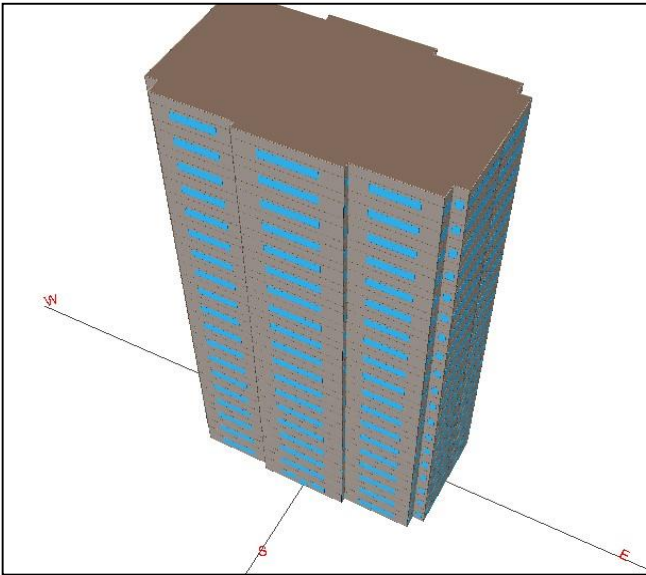
开始PSO寻优

停止

上海市虹桥经济开发区商业中心某办公楼

建筑信息

共19层，层高4.8m，总高度91.2m；
标准层面积1094平米，总建筑面积20780平米；
VAV系统，风冷热泵提供，夏季提供10度冷水供冷、冬季提供38度热水取暖



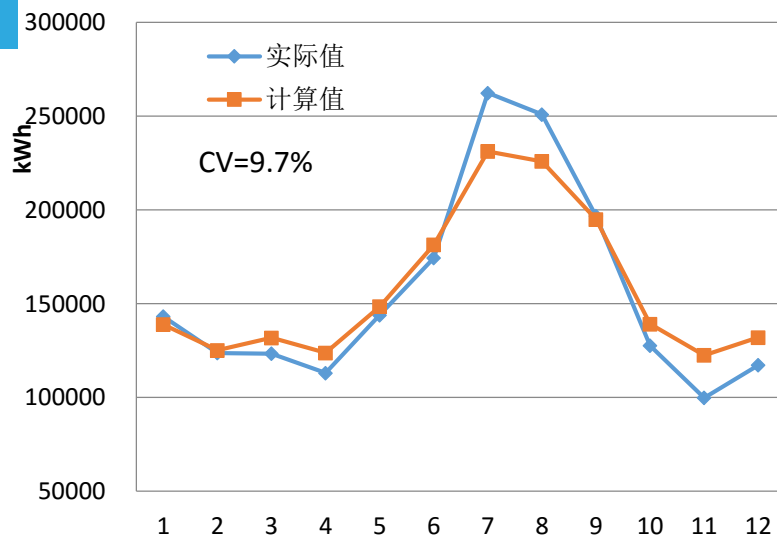
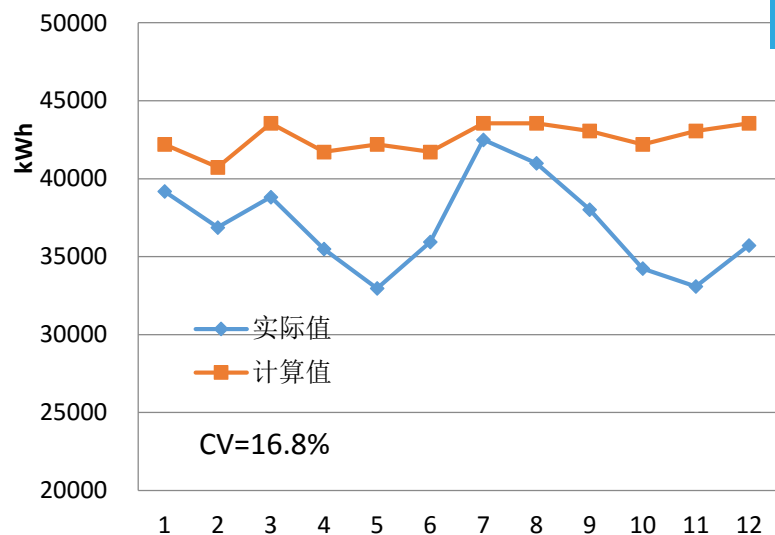
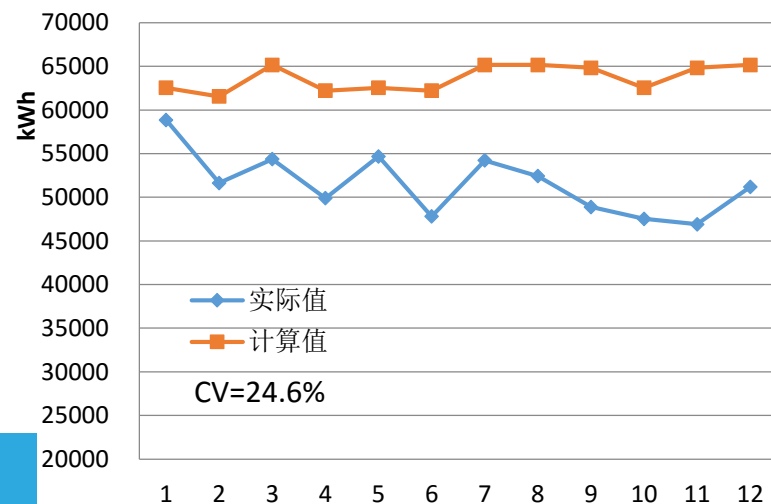
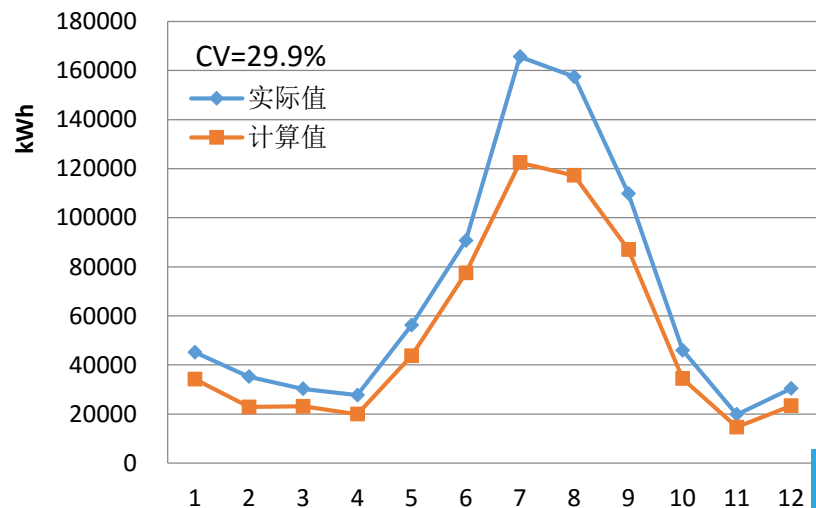
围护结构 传热系数	外墙	外窗	窗户SC值	窗墙比			
				东	南	西	北
	1.00	3.00	0.50	0.47	0.29	0.37	0.29
内部负荷	照明密度	设备密度	人员密度				
	15.0	10.0	6.0				
空调系统	室内设计 温度℃	新风量	冷机COP	风机效率		水泵效率	
	供冷26.0 供热20.0	30.0	3.40	0.63		0.70	

自动校验

案例分析

上海市虹桥经济开发区商业中心某办公楼

初次模拟



空调

照明

设备

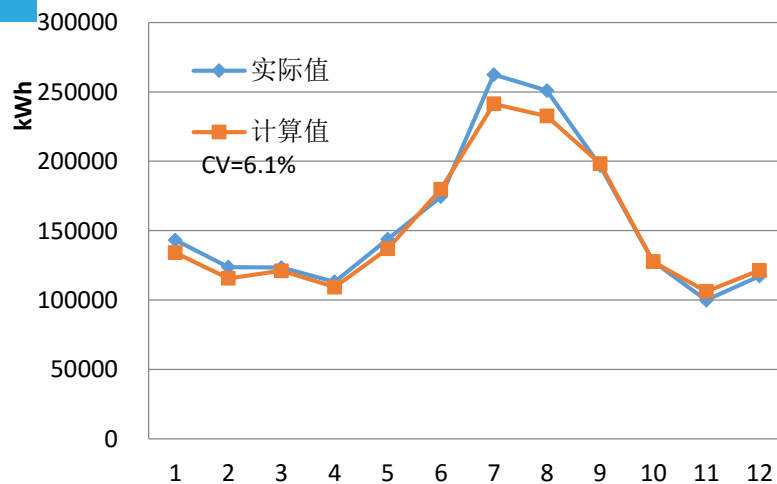
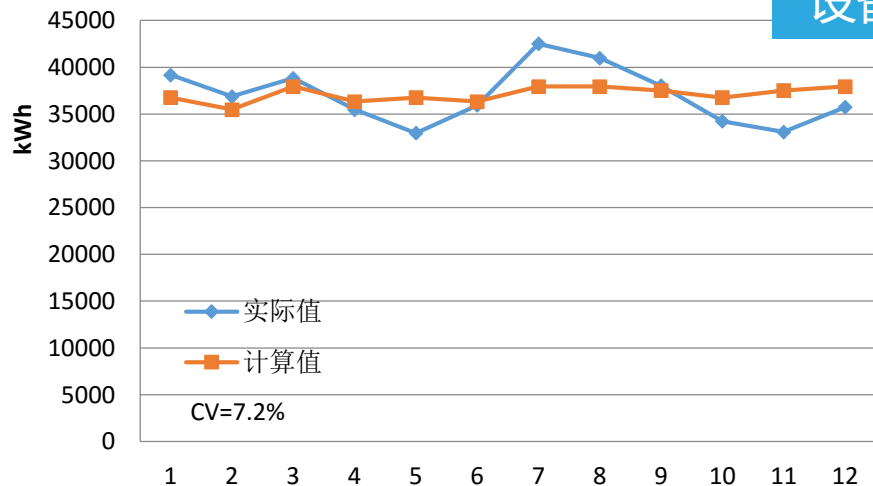
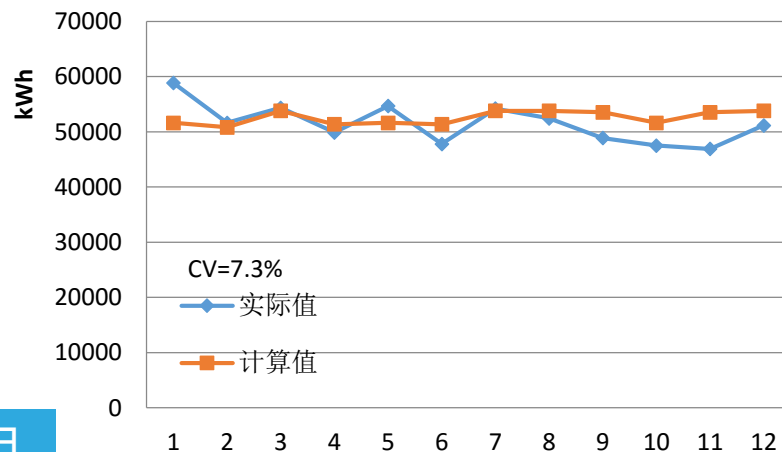
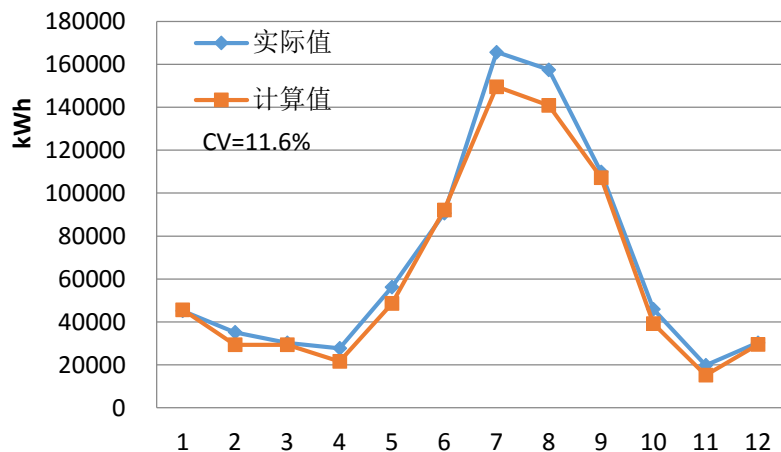
总耗

自动校验

案例分析

上海市虹桥经济开发区商业中心某办公楼

校验后



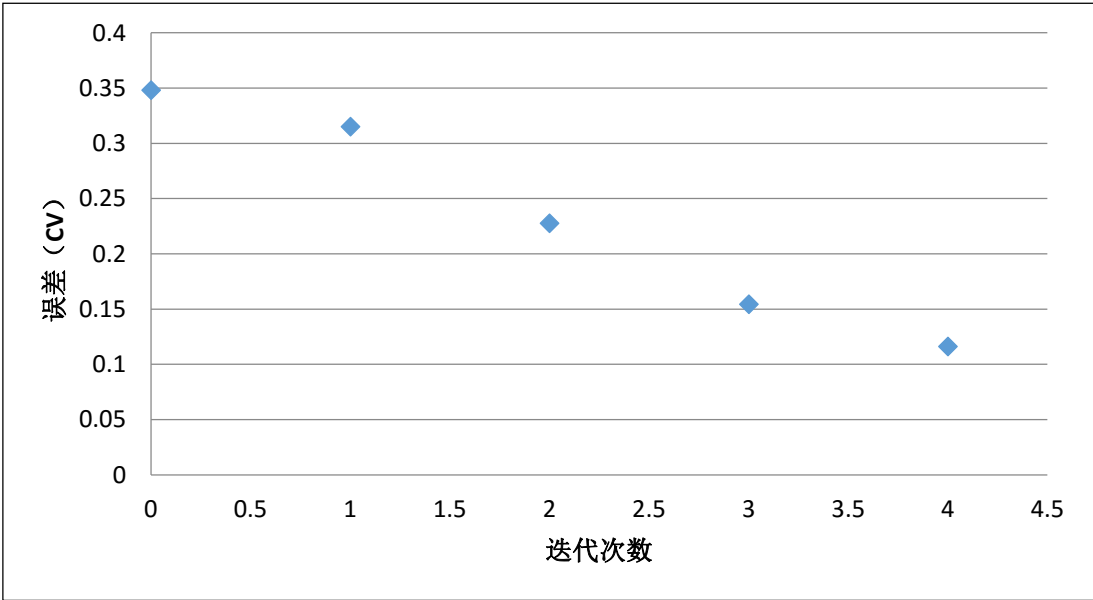


校验前后模型的输入参数值变化

参数	单位	校验前	校验后
外墙U值	$W/(m^2 * K)$	1.0	1.35
窗户U值	$W/(m^2 * K)$	3.0	4.8
窗户SC值	——	0.5	0.67
照明功率密度	W/m^2	15.0	12.2
设备功率密度	W/m^2	10.0	8.7
人员密度	m^2/P	6.0	9.3
水泵效率	——	0.70	0.90
热泵制冷效率	——	3.40	3.0
热泵制热效率	——	3.40	3.0
风机效率	——	0.63	0.82
人员新风量	$m^3/(P*h)$	30.0	40.0
供热室内温度	℃	20.0	23.2
供冷室内温度	℃	26.0	26.0

校验前后各能耗分项误差值变化

误差值 (CV)	空调耗电	照明耗电	设备耗电	总耗电	平均值
初始模型	29.9%	24.6%	16.8%	9.7%	20.2%
照明、设备 调整后	34.8%	7.3%	7.2%	15.6%	16.2%
寻优校验后	11.6%	7.3%	7.2%	6.1%	8.0%



寻优迭代时误差收敛情况：

迭代**4次**
用时约**1h**

总结

1

校验过程在建筑能耗模拟中十分必要，没有经过校验的计算机模拟是无法对建筑能耗进行准确预测的，也就无法在该计算机模型上进行进一步的研究工作。而人工校验费时费力，自动校验可以极大地帮助模拟人员提高校验的效率。

2

建筑运行数据是建筑能耗模型校验的依据和检验的标准，而分项计量数据将有助于提高校验的准确度。

后续研究

1

现阶段的敏感性分析针对的模型输入参数比较有限，未来将对更加全面的输入参数对各个能耗分项的个体、整体敏感性进行研究，构建建筑能耗影响因素的最小变量集。

2

在规则判断上更进一步，针对建筑能耗模型进行能耗数据分析，开发基于专家系统的校验方法，作为自动校验的参考库，提高校验的效率，发挥这一人工智能技术在校验模拟领域的应用。

3

在寻优方法上，不局限于粒子群寻优，分析多种现代数学方法，将多种寻优算法集成到自动校验的程序或软件中，比较各个方法的有效性，以得到最好的校验结果。

谢谢!