



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

基于符号有向图的  
建筑能耗模型校验方法

姓名：杨陶

学号：1432474

所在院系：机械与能源工程学院

学科门类：工学

学科专业：供热、供燃气、通风及空调工程

指导教师：潘毅群 教授

二〇一七年三月



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Master

**A SDG-based approach to  
calibrate building energy models**

Candidate: Tao Yang  
Student Number: 1432474  
School/Department: College of Mechanical Engineering  
Discipline: Engineering  
Major: Heating, Gas Supplying, Ventilation  
and Air Conditioning Engineering  
Supervisor: Prof. Yiqun Pan

March, 2017

基于符号有向图的建筑能耗模型校验方法

杨陶

同济大学

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

# 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日



## 摘要

由于建筑能耗模拟与实际数据间存在信息差,因而其模拟结果和实测值之间常出现误差,且此误差有时甚至超过 100%。误差的存在大大降低了模型的可信度,也损害了其在建筑运行评价中发挥的作用。因此在建模的过程中,需要对模型进行校验,以降低模拟值和实际值之间的误差。然而由于建筑能耗模型输入参数繁多,模型校验一直是一项不确定性很高的工作。迄今为止,还没有达成共识的通用能耗模型方法,人工迭代校验依然是被高频使用的途径。但人工校验必然费时费力,同时因为大量的待调整输入参数存在,模拟人员也很可能因为精力有限而出错。近年来,自动过程的引入已很大程度上减轻了模拟工作负担,但当前阶段,研究人员倾向于从一开始就将迭代校验的工作交给计算机自动完成。而这种自动校验采用的是传统单纯的数学方法,即将建筑能耗物理模型直接抽象成多目标的数学优化问题,脱离了实际物理意义。换句话说,校验后模型很有可能存在模拟结果与测量数据匹配较好但单个物理输入变量还存在相当大差距的问题。

因此,本文提出一种基于符号有向图的建筑能耗模型校验方法,将人工校验的知识和逻辑模块化,为结合人工和自动校验双边优势的途径发展提供一种可能。

首先,本文通过细致研究建筑能耗相关各物理参数之间、参数和能耗之间因果关系的理论基础,建立从围护结构、室内人员等负荷侧到冷热源、输配系统等供应侧的建筑能耗符号有向图,并依据模型校验目的对图中所涉及参数进行分类。随后,建筑能耗模型校验工作分为两个阶段。第一阶段是对建筑运行的时间表进行校验,本文提出“典型日时间表校验法”,利用短期测量数据,对室内照明系统、设备系统、人员在室、空调系统等建立实际逐月时间表;第二阶段是对调整类参数进行校验,本文提出“分步分部参数校验法”,将模拟结果和实测数据进行比较,依据不同部件的误差结果,先基于符号有向图的向前推理机制按图索骥搜索出可能的误差参数集,然后利用由符号有向图向后推理机制事先建立的函数逻辑关系,推荐每个待调整输入参数的调整值。整个调整过程基于一定的规则顺序进行。最后,本文借助计算机虚拟建筑模型和实际建筑数据对文章所提出的建筑能耗模型校验方法进行应用性展示和有效性验证。

**关键词:** 建筑能耗模拟, 模型校验, 符号有向图, 时间表

## ABSTRACT

Due to the information gap between building energy simulation and actual situation, discrepancy always exists between the results of simulation and measurement. Sometimes, the relative error is more than 100%. It is these discrepancies that prevent the broad application of building energy models in building operation evaluation. The calibration of model is therefore vital in the whole modelling process, as it can reduce the error and increase predicting accuracy. However, resulting from a large number of input parameters in building energy model, a high level of uncertainty is embedded in the work of calibration. At present, no generic calibration approach has received the consensus of the whole community.

The initial approach, manual iterative adjustment, is still the one being used at a high frequency. However, manual calibration is strenuous and time-consuming. Meanwhile, since a large number of input parameters need to adjust, it also increases the possibility for people to make mistakes due to the huge workload. Recently, automation procedure is introduced in calibration process. On the one hand, it significantly reduces the manual workload. On the other hand, the convenience of automatic operation makes the researchers tend to leave the iterative adjustment done by computers from the very beginning of calibration. However, this kind of automated calibration is a purely mathematical approach, namely converting the calibration into a multi-objective optimization process, which bears no physical meaning. In other words, the calibrated model obtained though automated calibration probably still has a large error in the some single physical values, despite a good overall agreement with measurement data.

Thus, in this research, A SDG-based calibration approach is proposed. This approach codifies the human experience and logic and incorporate them into the modules of computational calibration. It aims to provide a pathway that can combine the advantages of the manual and automated calibration together.

At first stage, this thesis carefully investigates the relationships among different physical parameters and the correlations between parameters and energy consumption, builds the SDG of building energy model from the load end (envelop, occupancy) to the supply end (cold & heat source , transmission system) and conducts the classification of the parameters in the graph.

At second stage, the thesis conducts the calibration process, which can be divided



into two steps. The first step is to calibrate the various building schedules. A “Typical day schedule calibration method” is proposed to establish monthly schedules of lighting system, equipment system, occupancy and air-conditioning system by using short-term measurement. The second step is to tune the adjustable parameters by a “steps & components flow calibration method” proposed. According to the discrepancies between measured and simulated different energy consumption, this thesis searches for a set of possible deviated input parameters by the forward reasoning mechanism on SDG. Before that, parameter-energy functions are developed by the forward reasoning mechanism to assist the calibration. The whole tuning process proceeds in a specific order.

Finally, applicability and effectiveness of the SDG based calibration method is validated by conducting a case study using the virtual building energy model and real measurement data.

**Key Words:** building energy simulation, model calibration, Signed Directed Graph (SDG), schedule

## 目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
<b>目录.....</b>	<b>IV</b>
主要符号表.....	VI
第 1 章 绪论.....	1
1.1 能源和气候变化.....	1
1.2 建筑能耗模拟.....	4
1.3 建筑能耗模型的校验问题分析.....	10
1.4 建筑能耗模型的校验方法.....	14
1.4 符号有向图.....	28
1.5 本文研究.....	31
1.6 本章小结.....	33
第 2 章 建筑能耗符号有向图的建立.....	34
2.1 建筑照明能耗影响因素分析.....	34
2.2 建筑设备能耗影响因素分析.....	34
2.3 建筑能耗影响因素分析.....	35
2.4 基于校验的建筑能耗影响因素分类.....	45
2.5 建筑能耗的符号有向图.....	47
2.6 本章小结.....	48
第 3 章 建筑能耗模型中时间表的校验.....	49
3.1 时间表在建筑能耗模拟中的作用.....	49
3.2 实际时间表.....	50
3.3 时间表的校验.....	53
3.4 本章小结.....	58
第 4 章 建筑能耗模型中调整类参数的校验.....	59
4.1 调整类参数的符号有向图模型简化.....	59
4.2 调整类参数校验的方法和逻辑.....	60
4.3 基于建筑能耗符号有向图的建筑能耗模型校验的步骤.....	79
4.4 本章小结.....	80
第 5 章 案例验证.....	81
5.1 基于模拟数据的校验方法验证.....	81
5.2 基于实际数据的校验方法验证.....	101
5.3 本章小结.....	105

第 6 章 总结与展望.....	106
6.1 文章总结.....	106
6.2 研究贡献.....	107
6.3 未来展望.....	108
致谢.....	109
参考文献.....	110
附录 A 建筑能耗符号有向图.....	114
附录 B 辅助建筑能耗模型校验的 PYTHON 代码示例.....	115
附录 C 输入参数与分项能耗关系.....	121
附录 D 建筑能耗模型校验所需信息.....	130
附录 E 虚拟典型建筑模型输入参数.....	132
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	134

## 主要符号表

符号	解释
$A$	建筑面积 [ $m^2$ ]
$A_{eqpt}$	设备区域的面积 [ $m^2$ ]
$A_{lt}$	照明区域面积 [ $m^2$ ]
$A_r$	屋顶面积 [ $m^2$ ]
$A_w$	外墙面积 [ $m^2$ ]
$B_{win}$	窗墙比
$CLQ_{eqpt}$	设备散热冷负荷系数
$CLQ_{lt}$	照明散热冷负荷系数
$CLQ_{ps}$	人体显热散热冷负荷系数
$Cl_{win}$	外窗冷负荷系数
COP	Coefficiency of Performance 冷水机组性能系数
$c_p$	空气定压比热 [ $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ ]
$D_p$	人员密度 [ $p/m^2$ ]
$D_{win}$	单位面积外窗日射得热因数 [ $W/m^2$ ]
$E_b$	锅炉能耗 [ $kWh$ ]
$E_{chi}$	冷水机组能耗 [ $kWh$ ]
EER	Energy Efficiency Ratio 冷水机组能效比
$E_{win}$	外窗黑度发射率 [ $W/m^2$ ]
$F_{cf}$	空调供冷风机的送风量 [ $kg/h$ ]
$F_{ctf}$	冷却塔风机的送风量 [ $kg/h$ ]
$F_{hf}$	空调供暖风机的送风量 [ $kg/h$ ]
$g_p$	单个人体散湿量 [ $g/h$ ]
$h_c$	空调系统运行时间 [ $h$ ]

---

$h_h$	空调系统运行时间 [h]
$H_{chwp}$	冷冻水泵扬程 [m]
$H_{cwp}$	冷却水泵扬程 [m]
$h_{eqpt}$	设备运行小时数 [h]
$h_{id}$	室内空气焓值 [kJ/kg]
$h_{lt}$	照明运行小时数 [h]
$h_{od}$	室外空气焓值 [kJ/kg]
$h_r$	屋顶外表面与空气对流换热系数 [ $W/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$ ]
$h_w$	外墙外表面与空气对流换热系数 [ $W/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$ ]
$h_{win}$	外窗对流传热系数 [ $W/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ ]
$I$	太阳辐射强度 [ $W/m^2$ ]
$K_c$	窗户可见光透射率
$L_c$	房间的冷负荷 [W]
$L_{chwp}$	冷冻水流量 [kg/h]
$L_{cwp}$	冷却水流量 [kg/h]
$L_h$	房间的冷负荷 [W]
$L_{hwp}$	热水流量 [kg/h]
$L_{oa}$	新风负荷 [W]
$L_{pl}$	人体散湿形成湿负荷 [kg/s]
$L_{ps}$	人体显热散热形成冷负荷 [W]
$L_{win1}$	外窗逐时传热形成的负荷[W]
$L_{win2}$	透过外窗的日射得热形成的负荷 [W]
$M_{oa}$	新风量 [kg/h]
$n_{eqpt}$	设备使用率 [%]
$n_{lt}$	照明使用率 [%]
$n_p$	人员在室率 [%]
$n_{win}$	窗玻璃吸收太阳辐射热传向室内的分数

---

---

$P_{cf}$	空调供冷风机全压 [Pa]
$P_{ctf}$	冷却塔风机全压 [Pa]
$P_{hf}$	空调供暖风机全压 [Pa]
PLR	Part Load Ratio 冷水机组的负荷率
$q_a$	单位面积玻璃吸收的太阳辐射热 [ $W/m^2$ ]
$q_c$	冷水机组瞬时供冷量 [kW]
$Q_{eqpt}$	设备能耗[kWh]
$q_{eqpt}$	设备功率密度 [ $kW/m^2$ ]
$q_h$	锅炉瞬时供热量 [kW]
$Q_{lt}$	照明能耗 [kWh]
$q_{lt}$	照明功率密度 [ $kW/m^2$ ]
$q_{ps}$	单个人体散热量 [W]
$q_\alpha$	单位面积窗玻璃吸收太阳辐射后传入室内的热量 [ $W/m^2$ ]
$q_\tau$	单位面积透过玻璃窗直接进入室内的太阳辐射热 [ $W/m^2$ ]
$R_b$	锅炉效率
$R_{cf}$	供冷风机效率
$R_{chwp}$	冷冻水泵效率
$R_{cwp}$	冷却水泵效率
$R_{hf}$	供暖风机效率
$R_{hwp}$	热水泵效率
SHGF	Sloar Heat Gain Factor 外窗太阳得热系数
$S_{win}$	外窗综合遮阳系数
$T_{chw}$	冷冻水供水温度 [ $^{\circ}C$ ]
$T_{csa}$	供冷送风温度 [ $^{\circ}C$ ]
$T_{cw}$	冷却水进水温度 [ $^{\circ}C$ ]
$T_{hsa}$	供暖送风温度 [ $^{\circ}C$ ]

---

---

$t_{id}$	室内空气温度 [°C]
$t_{od}$	室外空气温度 [°C]
$t_{ode}$	室外空气综合温度 [°C]
$U_r$	屋顶传热系数 [W/(m <sup>2</sup> ·°C)]
$U_w$	外墙传热系数 [W/(m <sup>2</sup> ·°C)]
$U_{win}$	外窗传热系数 [W/m <sup>2</sup> ·°C]
$V_s$	渗透空气量 [m <sup>3</sup> /h]
$\alpha_r$	屋顶表面太阳辐射吸收率
$\alpha_w$	外墙表面太阳辐射吸收率
$\alpha_{win}$	外窗太阳辐射吸收率
$\Delta R_r$	屋顶表面与天空和周围物体间的长波辐射换热量 [W/m <sup>2</sup> ]
$\Delta R_w$	外墙表面与天空和周围物体间的长波辐射换热量 [W/m <sup>2</sup> ]
$\Delta T_{chw}$	冷冻水供回水温差 [°C]
$\Delta T_{cw}$	冷却水供回水温差 [°C]
$\Delta T_{hw}$	热水供回水温差 [°C]
$\varepsilon_r$	屋顶表面黑度发射率
$\varepsilon_w$	外墙表面黑度发射率
$V_p$	单人所需新风量 [m <sup>3</sup> /p]
$\rho_{od}$	室外空气密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau_{win}$	外窗太阳辐射热透射率
$\varphi$	群集系数

---





## 第1章 绪论

### 1.1 能源和气候变化

#### 1.1.1 世界能源和气候变化

人类活动需要消耗自然资源，同时也需要向外界排放大量的污染物。这些污染物中，有的影响相对短期存在，如氟氯化碳（破坏臭氧层）和二氧化硫（造成酸雨），但有的却会长期产生不良影响，如温室气体。温室气体主要由二氧化碳组成，它伴随着化石能源消耗转化的过程产生，而能源的消耗正是支撑人类生活的基石。过去几十年里，温室气体的排放日益增多，是造成全球气候变暖的主要因素。第一篇提出这个问题并且提供了实验依据证实这一现象的文章由 Callendar<sup>[1]</sup> 发表于 1938 年。他在文章中指出二氧化碳等温室气体的排放造成全球变暖这一观点已成为共识，而人类正是造成这一现象的主因。全球气候变化将造成水与食物的短缺、生态系统的破坏以及海平面的上升。由此可见，由温室气体含量上升导致的气候变化对全球经济造成着重大影响。因此，必须开展减排工作以降低气候变化的影响。图 1-1 显示，二氧化碳的排放一直在上升。

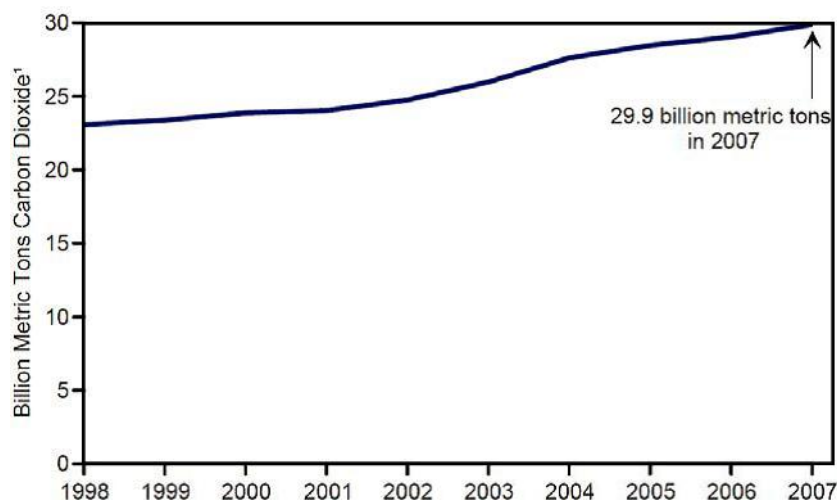


图1-1 全球因能源消耗的二氧化碳排放量逐年变化趋势<sup>[2]</sup>

然而，虽然过去十几年能源利用效率不断攀升，但依然无法阻止这一趋势。世界上一些国家和组织已据此研究出各项改善政策。欧盟于 2014 年 1 月 22 日公布了《2030 年气候与能源政策框架》，旨在促进欧盟低碳经济发展、提高能源系统的竞争力、增强能源供应安全性、减少能源进口依赖以及创造新的就业机会，其内容包括到 2030 年温室气体排放要比 1990 年减少至少 40%，可再生能源将占欧盟能源使用总量至少 27%，能效至少提高 27%<sup>[3]</sup>。中国作为世界上能源消

<sup>[1]</sup>因文献作者的性别难以查证，故在本文中，对作者的人称代词统一用作“他”或“他们”。

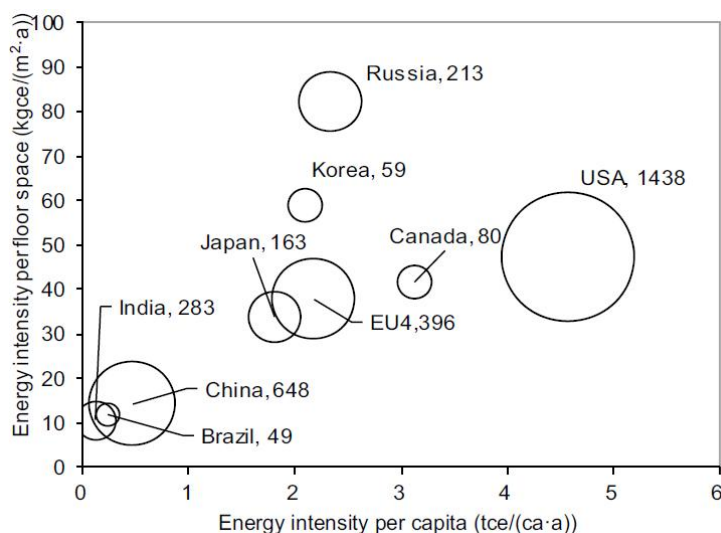
耗和碳排放量最大的国家<sup>[4]</sup>，在全球节能减排的进程中占有举足轻重的地位，亦发布了一系列节能减排政策。2009 年国务院制定了节能减排的量化目标：2020 年中国单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%，作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划，并制订相应的国内统计、监测、考核办法<sup>[5]</sup>。《中美气候变化联合声明》于 2014 年 11 月 12 日发布，提出 2030 年左右中国二氧化碳排放量达到峰值且将努力早日达峰。同时，中国计划在将非化石能源的在一次能源利用中的占比提高至 20%<sup>[6]</sup>。在 2015 年巴黎气候大会上，中国继续重申了关于气候变化的行动承诺<sup>[7]</sup>。此外，国家还发布了一系列节能减排相关政策——《国家应对气候变化规划 2014-2020》<sup>[8]</sup>、《能源发展战略行动计划（2014-2020 年）》<sup>[9]</sup>等，明确规定了碳排放总量控制目标。为保证总体目标的实现，国家应将其逐级分解到了各个行业和各地区。

### 1.1.2 建筑能源

建筑帮助人类进行从“必然王国”向“自由王国”的飞跃，它是人类活动的产物以及人类进行活动的场所。为了保证建筑内部热环境和光环境的舒适性，暖通空调系统、照明系统、电气设备等主要的功能部件做出贡献的同时，也消耗着大量能源。正因如此，建筑在过去的十年里同样对地球环境造成了严重的影响<sup>[10]</sup>。一些研究表明，建筑部门是世界上最大的温室气体排放来源，其能源消耗占全世界的 40%，温室气体排放量的 1/3 与之有关<sup>[11]</sup>。基于建筑行业在能源活动中的特殊地位，政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，以下简称 IPCC）第四次评估报告指出，建筑在温室气体减排方面具有最大潜力，在不需要大量增加投资的基础上，利用已证实可行的节能技术，新建和既有建筑的能源消耗量可减少 30% - 50%<sup>[12]</sup>。因此，节能减排已经成为全世界建筑行业的重要议题，对应于全世界全行业的节能减排趋势和政策，建筑行业也应担负同步的责任贡献。

#### 1、中国建筑能耗特征

中国是世界上最大的能源消耗国，但其单位面积建筑能耗相比世界上的发达国家却要低得多。从图 1-2 中可以看出，2012 年，中国的单位面积方面建筑能耗量只有美国的 1/8、日本和欧盟四国（英国、法国、德国和意大利）的 1/4<sup>[13]</sup>。这种差异主要和各个国家不同的用能模式、生活习惯有关。然而，随着社会经济的发展，中国的建筑能源消耗量势必会快速增加，这也得到了学术界和国家政府的广泛关注。如果建筑能耗增长过快，那么国家环境和经济将受到不利影响。

图1-2 2010年各国的建筑能耗密度<sup>[14]</sup>

过去几十年里，中国建筑能耗一直处于每年 10% 的增长速度<sup>[15]</sup>。2011 年，建筑能耗占全国总能耗的 19.74%<sup>[13]</sup>。而发达国家这一数字是 30%~40%<sup>[16]</sup>。随着人民生活水平的提高，以及城镇化进程的而加快，家庭用能设备和城镇建筑面积在未来会大幅度增加，这将会导致建筑能耗相对全国总能耗占比的增加。

考虑到我国南北地区冬季采暖方式的差别、城乡建筑形式和生活方式的差别，以及居住建筑和公共建筑人员活动及用能设备的差别，我国的建筑用能可分为北方城镇采暖用能、城镇住宅用能（包括北方地区的采暖）、公共建筑用能（不包括北方地区的采暖），以及农村住宅用能四类。2011 年中国建筑能耗分项情况见图 1-3。

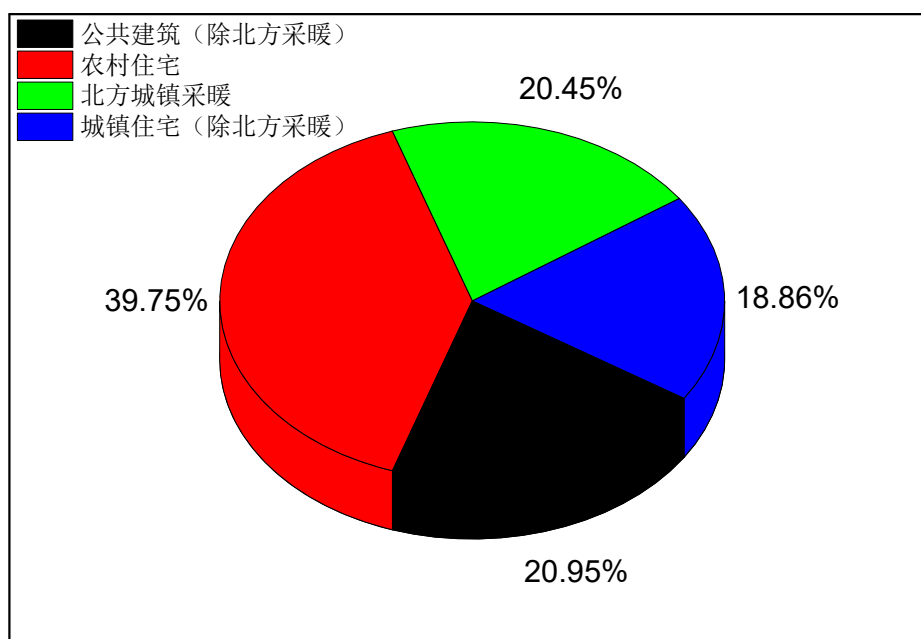


图1-3 2011年中国建筑能耗分布

一栋建筑中，能耗主要可以分为供暖、供冷、炊事、照明等。消耗能源最多的前四终端是集中供暖、区域供冷、水的加热以及照明，它们占据了 70% 的总建筑能耗。

## 2、建筑用能的不足之处

当前中国建筑能耗存在两个明显的问题：

第一个问题是，能源利用率低以及公共建筑存在能源浪费的情况。公共建筑中，大型公共建筑的能源浪费情况尤甚。江亿等<sup>[17]</sup>的研究表明，中国的大型公共建筑的能耗已经达到每年 1000 亿 kWh，占全国总建筑能耗的 20%（2004 年），而这类建筑的总面积为 5 亿 m<sup>2</sup>，只占到全国总建筑面积的 4% 以下。

第二个问题是，中国北方集中供暖占据了国家总建筑用能的大比例。北方地区在冬季需要供暖，而这样的供暖区域占据全国总面积的 70%。北方地区的建筑面积大约为 65 亿 m<sup>2</sup>，建筑能耗占据了全国城镇建筑用能 45%。其中非节能建筑的面积为 41.6 m<sup>2</sup>，占到 76.33%。

因为暂时没有中国全国范围的节能数据，所以拿美国的研究举例说明建筑节能的量化效果。Mills 等人<sup>[18]</sup>经过测算表示，如果美国的既有建筑的运行经过全面改良，那么美国将可以得到 16% 的节能效果。如果这些与建筑围护结构、机械设备和照明系统相关的节能措施应有与商业建筑，那么将可以在 2030 年从建筑节能节约的能源中节省将近 300 亿美元的花销。

因此，建筑节能工作在国家整个的节能减排工作中占据着重要的地位。没有经过周详的节能考虑的建筑、空调系统的退化和故障以及运行策略的变化等，都将导致建筑运行的能源利用效率降低，这也决定了中国的建筑在节能方面拥有巨大的潜力。为了保证建筑对于节能减排的切实贡献，对于新建建筑和既有建筑引入一些适当的节能措施很有必要。

## 1.2 建筑能耗模拟

建筑节能工作主要包括对新建建筑的节能设计以及对既有建筑的节能改造。不同的建筑造型、不同的建筑材料、不同的建筑设备系统可以组合成很多方案，要从众多方案中选出最节能的方案，就必须对每个方案的能耗进行详细的计算比较。而大型建筑非常复杂，建筑与环境、系统以及机房存在动态作用，这就需要建立模型，进行动态的模拟与分析。对于新建建筑，需要对设计建筑和空调系统进行建模，从而实现最优化的设计；对于既有建筑，需要建立基准线，计算节能改造的节能量以及实施预测控制方案。因此利用建筑能耗模拟软件动态计算建筑的采暖和空调能耗，并分析围护结构和采暖空调设备对采暖和空调能耗的影响，是开展建筑节能减排工作的必要工作之一。在这种背景下，建筑能耗模拟技术作

为建筑节能设计中强有力的工具,从业人员需要借此对建筑的能耗结构以及可能的各种节能方案进行预评估。

接下来,从科学模型出发,结合以上关于建筑能耗的介绍,对建筑能耗模拟进行探索剖析。

## 1.2.1 科学模型

### 1、科学模型的本质

Marx. W. Wartofsky 认为现实世界中的物体、事件和过程都可以利用模型进行表征,而 Margaret Morrison 和 Mary S. Morgan 也表示,模型因为可以同时为世界和理论进行表征,所以它可以作为连接世界和理论为桥梁<sup>[19]</sup>。

在当代的科学综述和日常的语言中,“模型”这个词通常有两种含义:一是作为工具,模型是某个客观物体的复制或者例子,比如某个物理部件缩小尺寸后的物体,此时模型是科学研究的工具;另外,作为研究客体,模型是某个系统的相似表征,此时模型是科学研究的对象。我们通常所说的科学模型即为后者,它在研究过程中发挥着极其重要的作用,研究人员常常通过研究模型来间接地研究客观世界。

科学模型是对现实世界或者未来世界中某种实体系统的简化映像。它具有两重属性:一方面,从本质上,科学模型尽量与客观世界中的研究对象保持一致,从而有助于从模型的研究结果中延伸出对于客观实体的知识信息;另一方面,因为研究目的和效率的需要,科学模型需要进行一定的简化,舍弃掉某些东西或者对某一部分做理想化处理,从而导致所建立的模型和实际客体有一定的偏差。科学模型中存在的这种与生俱来的偏差与研究人员对于事实信息的获得及其自身使用的建模方式相关,而这一特点也即是本文研究的原始出发点。

具体来说,科学模型的本质在于以下两个方面:

#### 1) 科学模型是对原型的理想化表征

模型的建立是对客观实体进行模仿,它通过表述、公式、图表等方式对原型的结构、功能、原理等进行表征。通过这样一种方式,模型可以很好地反应研究客体,从而成为间接的研究对象。但是,模型并不是全然地对原型的映射,它在建立过程中会根据研究目的和条件,对进行一定程度的理想化处理。这种理想化的处理包括对于某些信息的删除以缩减或者虚构以扩大。对于建筑能耗模型,它是实际建筑系统运行和能源利用的既像又不像的表征,在降低了研究难度和提高研究效率的同时,也为模型的输出结果增加了不确定性。因此科学模型对于客观世界的表征常常是局部的、抽象的。

#### 2) 科学模型是基于原型的开放性系统

科学模型因为是抽象出的虚构映像,所以它可以体现模拟对象的类和对象间

的关系。模型的构建是研究人员和客观实体间的互动。因为“观察渗透理论”的存在,在构建模型的过程中,研究人员常常会加入一部分自己的先验知识和经验,从而使得对于同一原型,经过不同人的抽离构建,会得到不同的模型,这也就是造成模型误差的原因之一。同时,科学模型的构建也是一个动态的过程,随着研究技术和条件的发展,已经建立的模型也在不断得到完善和补充,从而变得更加趋近与原型。而适用到具体的建筑能耗模型,这样的一个完善模型的过程,即是需要通过不断精进的校验方法来完成的工作。

总的来说,科学的确是真实的,但因其过于复杂,以至于需要通过一定的简化来完成表征和理解。因此,“模型”暗示了其对真实中某些细节的简化和忽略,而当这些细节成为研究目标中的重点时,模型就显得不那么可靠了。所以,我们所理解认识的科学很大程度上是基于模型的科学,我们与真实之间常常隔着一层穿不透的视界,而我们需要努力去做的是,让模型尽可能地回归真实,使其向现实客体趋近。这也是我们对建筑能耗模型进行校验的意义和边界。

## 2、科学模型的特征

科学模型的特征来源于其本质,对于原型理想化的表征延伸出相似性和抽象性的特征,而开放性系统的本质,则衍生出转化型和动态性的特征。

1) 相似性:从模型建立的初衷就可以认识到,模型是具有于原型的相似性。相似也就意味着不是全然的映射,而是同时包含着模仿和简化。这一特征是在进行建筑能耗分析时使用已经被广泛证实的模拟工具的科学依据。

2) 抽象性:模型对于真实客体不是简单的模仿,而是根据一定的规则和逻辑进行提炼和抽象构建,独立于真实世界同时表征着真实世界。在这样一个过程中,常常掺杂着研究人员个人主观的理解,从而使其形成一种理想化的主体构造。建筑能耗模型的抽象性,也即是其偏差的来源之一。

3) 可转换性:对应于真实客体的模型常常不是唯一的,它只是某一层面的表征。通过一定的运算,一种模型可以转换成另外一种形式。模型的可转换性有利于对同一实体通过多种途径开展多方面的研究。这也就是在进行建筑能耗模拟工作时,会有多种模拟工具的选择,而不同的模拟工具对应着不同的建模基础。

4) 动态性:模型会随着科学技术和条件的发展而产生变化,这是为“追求逼近”这一初衷所驱动。建筑能耗模拟的发展也正经历了这样一个过程。从60年代末70年代初由加拿大国家建筑研究院创造性提出<sup>[20]</sup>,到如今随着研究的投入和积累,以及计算机水平的突飞猛进,建筑能耗模拟始终处于一个动态变化的过程,得到了极大的改进。

## 3、科学模型分类

根据Saltelli et al.<sup>[21]</sup>的方法,科学模型可以按以下两种分法进行分类:

诊断和预测：诊断模型用于辨识某些现象的本质或原因。换句话说，它可以用于更好地理解某个系统的运行逻辑。而预测模型用于对已经预设好一系列运行逻辑系统的未来运行进行预测。

法则驱动（Law-driven）和数据驱动（Data-driven）：法则驱动模型（也称前向模型）是应用一系列驱动系统运行的规则（比如重力，热质交换等），为了预测在既定系统参数和状态下的运行情况。数据驱动模型（也称反向模型）用于反向过程，即利用系统运行情况来对系统参数进行预测。因此，数据驱动模型可以用于描述包括少量可调整参数的系统。反过来，数据驱动模型常常有需要的参数过量的问题，即需要的数据量远远超出可以提供的数据量。规则驱动模型的优点在于它可以在没有观察数据的情况下，计算出某个状况下的系统运行情况，而数据驱动模型需要监测数据才可以得到运行情况。

规则驱动模型和数据驱动模型的简单比较如图1-4所示。

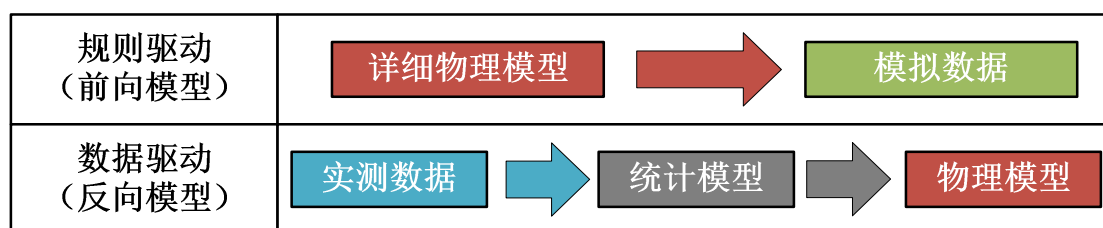


图 1-4 法则驱动模型（正向模型）和数据驱动模型（逆向模型）的对比

## 1.2.2 建筑能耗模拟

建筑能耗模拟的发展开始于20世纪60年代中期，一些学者采用动态模拟方法分析建筑围护结构的传热特性并计算动态负荷。到今天，世界各国都相继开发出一些模拟软件，可以很方便的对建筑物进行全年动态模拟。

建筑能耗模拟常用于建筑的设计阶段，一般分为两种。一是预测性质的规则驱动模型，它可以用来预测复杂系统在预定规则下（如能量守恒，质量守恒，传导性，传热等）的运行状况。相反，数据驱动模型在建筑能耗模拟中，用建筑的监测数据来产生可较准确预测的模型。建筑能耗模拟的反向模型广泛地被分为三类：

### 1) 黑箱模型

黑箱模型一般是简单的数学统计模型（如回归，神经网络等），它将一组影响因子高的输入参数与输出量之间建立起关系。模型的输入变量的系数一般是固定的，以产生可以预测系统运行的计算公式。需要注意的是，这些系数与物理环境中有限的参数无法直接对应。

### 2) 灰箱模型或参数估计

灰箱模型与黑箱模型的区别在于，其使用的某个关键系统参数来自于实际的

物理模型。

### 3) 详细的模型校验

校验模拟方法是建立一个完整的物理模型，然后调整其输入参数，使其与测量数据相匹配。这种方法可以在高质量的输入参数情况下，提供最为详细的建筑运行预测情况。因为它与物理建筑、系统和环境参数明确相关，所以它可以评估这些参数的改变而带来的影响（如节能改造）。

## 1.2.3 建筑能耗模拟工具

全楼宇的能耗模拟软件可以对在外部输入变量影响（如天气，人员，渗透率等）下维持室内环境状态（如室内温湿度）的用能进行详细计算。详细的离散时间不长的热平衡计算是基于建筑和设备的物理特征以及这些动态外部参数（天气，人员，照明）。这种计算一般都是在全年的范围内使用法则驱动建模软件运行。

美国是开展建筑节能研究最早的国家之一，计算机技术的在建筑节能中的应用也最为广泛。当前，在美国与节能标准相关的软件有120多种。其中具代表性的是美国能源部(United States Department of Energy, 简称DOE)和美国劳伦斯伯克利国家实验室(Lawrence Berkeley National Laboratory, 简称LBNL)研发的DOE-2以及基于DOE-2内核的其它软件。接着，美国能源部又组织多个部门共同开发新的建筑能耗模拟软件Energy-Plus。这些应用软件的开发和运用不仅可定性或定量地对建筑能耗进行模拟与评估，从而使建筑节能规范的实施变得相对容易，也促进了规范本身的完善和发展。

同为北美国家的加拿大，在70年代的能源危机后也开始注重建筑节能的研究和计算机技术在建筑节能中的应用。加拿大科委已开发出2个计算机程序：一是FRAME和VISION，生产厂家和设计师可用此程序迅速、精确地计算出各种玻璃窗和窗框的热性能；另一个是HOT2000，可使设计者校验建筑运行能耗。

许多欧洲国家都发展了自己的建筑能耗模拟软件，在实际的运用中发挥了较大的经济和社会效益。西欧国家通过近30年的努力，各国形成了各自的建筑能耗模拟软件，比如英国斯特拉思克莱德大学机械学院(Department of Mechanical Engineering University of Strathclyde)开发了ESP-r，并将其作为建筑节能设计与节能分析的基本工具，写入相关的建筑节能标准或规范中。英国Squareone公司开发的Ecotect是一个全面的技术性能辅助设计软件，它主要应用于方案设计阶段，具有速度快、直观、技术性强等，而且可以和一系列精确分析软件相结合做进一步的分析。Ecotect提供了一种新的分析方法，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。

亚洲国家也逐渐认识到建筑模拟技术的重要性，先后投入大量精力进行研究开发。日本从上世纪70年代开始逐渐完成HASP软件的开发，成为日本队建筑节



能标准的工具。中国的清华大学也从上世纪80年代中期开始对建筑能耗模拟技术展开研究，并于1991年发布了DeST初版。DeST 是以AutoCAD为图形界面的建筑能耗模拟软件。

建筑能耗模拟软件的选择是基于具体的应用场景、时间步长、用户体验以及运行条件。软件选择的第一条件是必须能够解决目标应用中的具体问题。例如，一栋建筑部分时间内光照受其他建筑的遮挡，那么如果需要其遮阳作用，则所选择的软件就必须具备分析遮阳的能力。

#### 1.2.4 建筑能耗模拟过程中存在的问题

目前，建筑能耗模拟在AEC（Architecture, Engineering, Construction）领域没有得到充分利用，其原因由Rocky Mountain Institute(RMI) [22]总结如表1-1（这些原因主要被分为两类，即模拟和校验）。

表 1-1 模型的建立和校验问题[22]

模拟问题	校验问题
标准：缺乏对标准方法的理解和统一使用	标准：对于校验方法缺乏明确的标准-当前的指南只阐述了对逐年整楼能耗模拟可接受的误差范围，没有对输入的不确定性、分项计量校验、分区环境误差等进行解释。
花费：为建立准确的建筑几何和空调系统模型，需要花费时间、知识、专业技术和经费。	花费：逐时分项数据所需的时间和经费经常很高难以达到。
集成：各种 3D 建模软件（如 Autodesk Revit 和 Archi CAD）和建筑能耗模拟软件（如 EnergyPlus, TRNSYS 和 Modelica）的集成度很低。	简化：校验是一项极度特定和不确定性的工作。有成千上万个模型输入参数但只有相对少的可监测的输出参数用于模型校验。
	输入参数：缺乏高质量的用于详细建模的输入参数。
	不确定性：很少关于模型输入参数和预测的研究，因此导致缺乏建筑能耗模拟结果的可信度。
	识别：识别导致模型预测和实际测量之间误差可能的原因。
	自动：缺乏集成工具和自动方法来辅助校验。

大量研究<sup>[23-25]</sup>表明，建筑能耗模拟的预测值和实际测量值之间常常存在误差，此误差有时高达100%。误差的存在大大地影响了模型预测的可信度，减少了在

设计、调试、运行期间建筑能耗模拟工具的使用。为了使建筑能耗模型的使用具有普遍的可信度，需要保证其能够尽可能准确地代表实际建筑情况。这就需要进行校验，而校验的目的就在于减少模型和实际之间的误差。

### 1.3 建筑能耗模型的校验问题分析

建筑能耗模型校验需要将包含成千上万个输入变量的模型调整至与实际建筑信息相近（见图1-5），流程见图1-6。校验是一个极度不确定的问题，因为这个过程包含不唯一解<sup>[26]</sup>。因此，在很多案例中校验的方法不作详细讨论。常用的方法是分析人员根据自己的判断调整一系列输入参数直至模型的误差在允许的范围之内<sup>[27]</sup>。而这样的过程具有很强的随机性和个人性，不利于可靠建筑能耗模拟的发展。

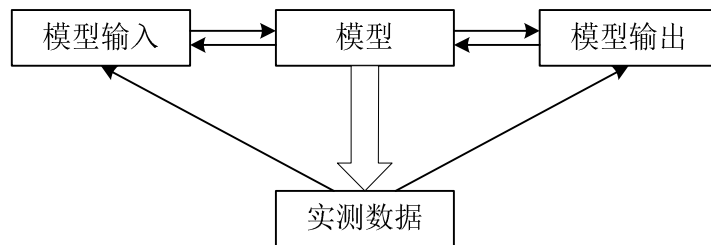


图1-5 建筑能耗模型校验

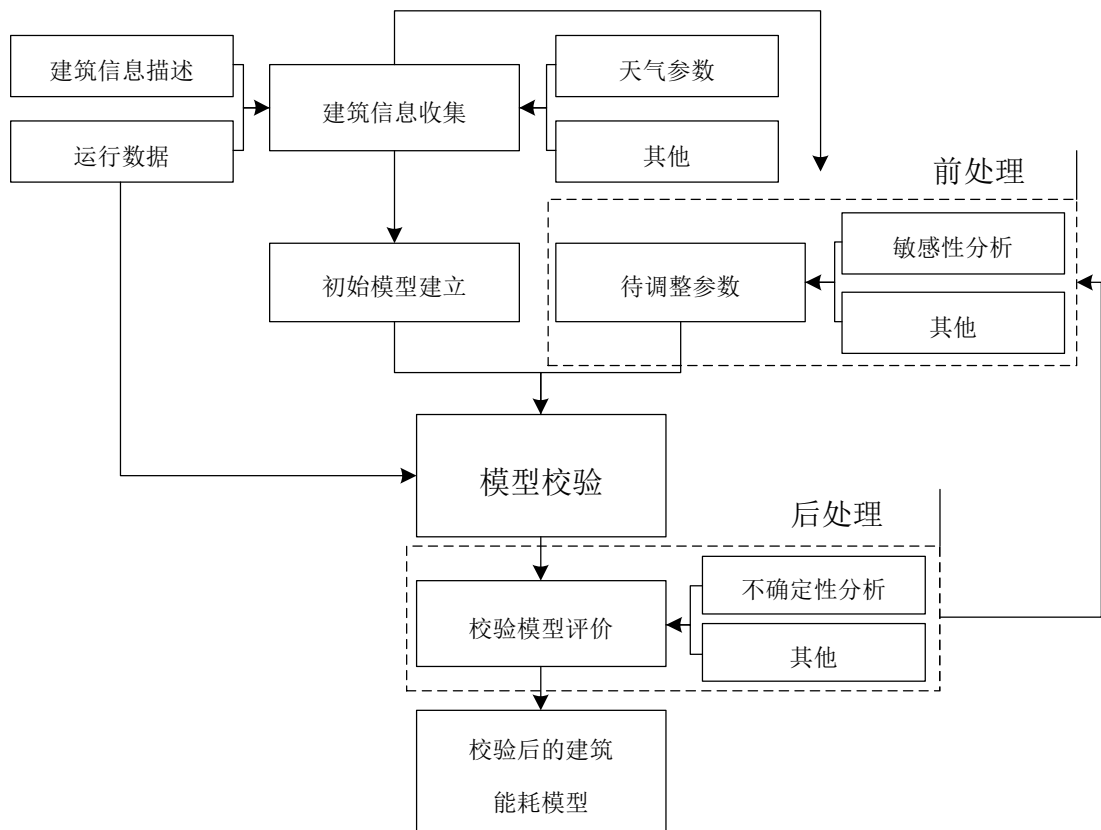


图1-6 建筑能耗模型校验的流程图

### 1.3.1 评价标准

在建筑模拟的早期,简单的百分比计算是评价实测和模拟数据的最主要方法<sup>[28-30]</sup>。但是, Diamond和Hunn<sup>[28]</sup>强调,这种方法经常产生抵消效应,正误差和负误差常常会中和。Bou-Saada和Haberl<sup>[31]</sup>则提出采用标准的统计指数 (statistical indices) 来评价一个模型的准确性。

#### 1、平均误差 (Mean Bias Error, MBE)

平均误差是测量和模拟之间的非线性误差 (如误差之和), 计算式见式 (1-1)。MBE是评价整体误差的指标, 表示各点实测和模拟误差的平均值。但是正负误差之间会有抵消效应。因此在此基础上, 需要进一步的模型误差评价指标。

$$\text{MBE}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} (m_i - s_i)}{\sum_{i=1}^{N_p} (m_i)} \quad (1-1)$$

其中,  $m_i$  和  $s_i$  分别代表  $i$  点的实测和模拟值,  $N_p$  是基于  $p$  时间间隔的测量点的个数 (例如,  $N_{\text{monthly}}=12$ ,  $N_{\text{hourly}}=8760$ )。

#### 2、均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE)

均方根误差 (也称均方差, 标准差) 是评价数据变异性的指标, 见式 (1-2)。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (1-2)$$

其中,  $x_i$  为  $i$  点的数值,  $\mu$  为平均值。

用于表征测量值和模拟值之间的误差, 则上式转化为式 (1-3):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} (m_i - s_i)^2} \quad (1-3)$$

#### 3、均方根变异系数 (Coefficient of Variation of Root Mean Square Error, CV(RMSE))

均方根变异系数可以表征模型与实际的符合程度, 而不存在正负抵消的问题。见式 (1-4)

$$\text{CV(RMSE)} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} (m_i - s_i)^2}}{\bar{m}} \quad (1-4)$$

其中,  $\bar{m}$  是实测值的平均值。

当前对于建筑能耗模拟模型的验证建立在以上统计指数之上, 即MBE和CV(RMSE), 而可接受的误差指标范围见表1-2。

这些指标, 不管是逐月还是逐时, 都是基于标准的统计指数建立的。当前, 一般只要模拟和实测误差在ASHRAE Guideline-14规定的误差范围之内, 则可认

为模型已经校验准确。而事实上，满足误差范围的模型可能不止一个，从而导致同样的一个建筑实体可能产生多个符合标准的已校验合格的模型。另外，当前的校验标准只依赖于建筑能耗这一输出变量，而没有考虑一些输入变量的不确定性和准确性，建筑室内环境参数（如温度）也未考虑。

表 1-2 建筑能耗模拟模型校验可接受的误差指标范围<sup>[32-35]</sup>

标准和指南	逐月 (%)			逐时 (%)	
	EER	MBE	CV(RMSE)	MBE	CV(RMSE)
ASHRAE Guideline-14 <sup>a</sup>	±15	±5	15	±10	30
IPMVP-2002 <sup>b</sup>	±20	±20	5	±5	20
FEMP <sup>c</sup>	±15	±5	15	±10	30
公共建筑节能改造技术规范 (JGJ 176—2009)	±15	-	15	-	-

<sup>a</sup>ASHRAE: American Society of Heating Refrigerating and Airconditioning Engineer (美国采暖、制冷与空调工程师学会); <sup>b</sup>IPMVP: International Performance Measurement and Verification Protocol (国际性能测量和验证协议); <sup>c</sup>FEMP: Federal Energy Management Program (联邦政府节能项目验证和测试指南)

当前绝大多数的校验工作是依据以上标准和指南的推荐指标进行<sup>[36]</sup>, 同时一些学者对于模型准确度的标准进行了进一步探究。Mahnameh Taheri等人<sup>[37]</sup>利用均方根变异系数和拟合优度组成的权重函数来评价模型的校验成果。Reddy等人<sup>[38]</sup>提出了同时分别考虑不同能源种类的综合指标。它是考虑每一种能源在总能源消耗中的占比而形成的平均误差和均方根变异系数的加权值。另外，除了将能耗作为评价基础，一些研究者<sup>[37, 39-41]</sup>也尝试用室内温度作为代替评价基础。

### 1.3.2 不确定性问题

为了整体性地阐述模型校验的问题，考虑模型的不确定性是很重要的问题，特别是对于复杂系统的不确定性模型。这个重要的问题在目前为止的研究中都经常被忽视，并且在当前的建筑能耗模拟验证标准中也未曾提及。复杂系统的模型很难去验证其准确性，也因此质量和不确定性方面得到大量的关注和讨论。复杂系统的模型有一定的简化和模拟边界。换句话说，“世界被模型所代表的部分仅仅是开放而相互影响系统中的一个任意范围”<sup>[42]</sup>，特别是当模型的建立是为了研究系统内部一些不可测部分的时候。这一理论已在“1.2.1 科学模型”一节中讨论。

建模环境不确定性对于建筑能耗的模拟和预测是很大的挑战。任何目标建筑的输入参数都是一个复杂的集合，包括建筑材料、人员、运行时间表、空调系统、天气等等。这些的存在表明了不确定性的各种不确定来源。虽然很少有人在进行

案例研究的时候将这个问题纳入研究范围,但还是一些研究者对于这个问题进行了专门的探索<sup>[43-46]</sup>。De Wit<sup>[43]</sup>将建筑能耗模拟中各种不确定性的来源进行了分类:

#### 1) 建筑和系统描述的不确定性

这种不确定性来源于需要进行模拟的目标建筑或者系统的设计描述不完整或者不精确,可能是任意需要输入的参数,如建筑的几何结构、材料特性、空调系统、运行时间表等。产生的原因可能是建模人员缺乏经验而获取数据不规范、忽略模型中重要的变量或者对“已知”因子赋予了不正确的值。

#### 2) 建模的不确定性

在“1.2.1科学模型”中已经讲到,建模的过程伴随着简化和假设,这也正是建筑能耗模型的不确定性的来源之一。这些假设可能对于模拟人员来说是显性的(如分区、运行时间表等),也可能是隐形的(如模拟软件的算法等)。

#### 3) 数值计算的不确定性

这种不确定性来自于模型的具体计算过程中的离散计算和模拟。

#### 4) 情景的不确定性

这种不确定性来自于建筑的外部环境,包括室外的天气情况和室内的人员行为。这些参数都是不可能准确表示的。

因此,可以知道,建筑能耗模拟及校验不可能达到完全的准确,而在具体的建模过程中,需要在评估模型预测结果时对这些不同来源的不确定性进行分析,特别是对于输出等效性结果的模型(不同的输入参数可能产生相同的结果)。

本文主要是在建筑和系统描述、运行时间表的假设等不确定性问题上进行研究,而关于具体模拟软件的算法问题、数值计算问题以及天气参数的不准确上不作探讨。

### 1.3.3 模拟校验的影响因素

建筑能耗模型的校验过程是一个复杂的过程,涉及到不同方面的问题和工作,其主要的影响因素如下<sup>[36]</sup>:

#### 1) 标准

前文已述,当前用于判断建筑模型是否校验成功的评价标准主要是权威机构公布的由统计结果生成的标准。但对于如何对一个建筑能耗模型进行校验未有官方认可的标准方法和指南。所以这项工作如今依然由模拟人员的判断和经验决定。

#### 2) 校验花费

建模不是一项轻松的工作,即使对于不需要进行校验的建筑能耗模型也如此。模型校验是一个复杂的过程,比起不需要校验的建模,它需要更多的投入。特别是在没有自动过程的时候,时间和精力花费尤甚。另外,搜集校验需要的分项数据也是一份费时费力的工作。

### 3) 模型的复杂性

基于建立能耗模型的类型和模型的复杂程度,需要的输入参数的数量有所不同。标准的准静态模型比能耗模拟软件产生的瞬时模型要简单很多。建筑能耗模型的简化程度直接关系着输入参数,因为模型越复杂,那么需要的输入参数也就越多。

### 4) 模型输入参数

建筑能耗模拟涉及大量的输入参数。而具体的数量取决于建模的精细程度以及可获得数据(如数据质量问题)。基于统计的测量数据可为模型提供更多的信息(如人员、温度设定等)

### 5) 模型的不确定性

人工校验是确定性的过程。然而不是全部的输入参数都以同样的方式影响着能耗,模拟人员需要通过筛选辨识出影响模拟结果最大的参数,同时需要定义它们的不确定性等级。

### 6) 误差识别

搜寻模拟和测量结果之间误差的原因是在校验过程中必须面临的问题。有经验的模拟人员可以通过自己的模拟经验和学科知识鉴别出误差的可能来源。这些误差可能来自建筑描述中的输入参数的错误,也可能来自默认和假设的错误。

### 7) 自动化

目前为止,没有公认的自动校验方法。基于模拟人员的经验的人工校验过程已经大量出现。有效的自动校验可以极大地减少模拟花费,同时也可以帮助研究人员拓展校验的知识。

### 8) 模拟人员的经验

Reddy<sup>[20]</sup>曾提到过,模拟校验工作极大地取决于模拟人员的个人判断。因为从模拟的第一步开始,模拟人员的个人经验直接影响着校验的结果。即使对于一个系统化和自动化的过程,校验人员仍然需要将个人经验贡献进来,不仅限于建筑能耗模拟领域的基础知识同样需要应用于整个过程。事实上,从时间和避免错误的角度来看,对于模拟过程保持深度觉察很大程度上可以减少校验的投入。

以上八项即是当前研究人员在对建筑能耗进行模拟的过程中的影响因素。其中,标准问题需要大量的调研统计数据,模型的复杂程度根据具体的项目有所差异,而本文的研究将涉及其他6项因素,特别是最后提到的模拟人员经验问题。

## 1.4 建筑能耗模型的校验方法

建筑能耗模型的校验始于1981年Diamond和Hunn<sup>[28]</sup>的研究,他们选取了7栋不同类型的建筑(宾馆、单层办公建筑、多层办公建筑、零售商店、医院、学校、

太阳能建筑)进行能耗模拟,并以全年逐月全楼能耗数据分别进行模型校验。而后十几年的校验工作流程大多类似<sup>[26,47-51]</sup>:1)建立初始模型;2)比对模拟结果和实测数据;3)人工利用经验和偶尔的附加信息调整某些输入参数直到模拟和实测结果匹配。此校验流程至今被广泛采用。

经过三十几年的发展,建筑能耗模型校验领域已有很多更为先进的方法出现。对于建筑能耗模型的校验方法的全面论述主要有三篇文章,它们分别发表于2006年<sup>[20]</sup>、2014年<sup>[36]</sup>和2015年<sup>[52]</sup>。三者对于具体校验方法的分类主要按人工校验和自动校验。笔者认为这样将人工和自动的方法割裂对立开来的分类方式,将可能对校验过程的理解和思考产生一定的局限影响,因为不管是人工还是自动,都仅仅是整个校验过程中具体某个步骤所采用方法的实施媒介。如果某个方法人工来完成更有效,那么就由模拟人员来做,如果某个方法自动完成更有效,那么就由计算机来完成,尽管当前因为计算机水平的限制,还不能实现工作的绝对最优分配。从模型校验的整个发展历程来看,最初校验的工作都是由人工来完成,但是随着研究人员技术的提升,近年来已有学者开始研究将部分工作交给计算机自动完成,不过目前还处于初级阶段,但相信随着越来越多的工作被计算机代替,能耗模型的校验工作对于人来说将会越来越轻松,所投入的时间和精力也将会越来越少。

所以,对于建筑能耗模型校验方法的综述,本文将会在综合以上三篇文章的基础上,以“纪传体”代替以往“编年体”的综述范式,即以模型校验流程(见图1-6)为线索展开,同时也将会补充2015年至今新的研究成果。其中如果已有计算机完成自动校验的研究成果,将会在相应的地方进行阐述。

### 1.4.1 数据获取

Waltz等人<sup>[53]</sup>曾表示,建立准确的建筑能耗模型最重要的因素是对目标实际建筑的物理特征和运行方式有详细而确切的了解。对建筑信息保有查知,一般可通过以下几种方式进行。

根据可获得实际数据的级别(逐年、逐月、逐时)和可以花费在校验上的时间和人力的不同,模拟校验所能够获得的模型的准确度是不同的。Reddy等人<sup>[54]</sup>在ASHRAE报告中对校验模拟的等级进行了划分,如表1-3。一般来说,能够获得的数据的详细程度最多仅能达到3级,用于校验的数据一般也只能有逐月的能耗数据,3级的校验也基本上能够获得较为准确的模型。

#### 1、现场审计

能源审计工作指的是调查建筑或者设备的用能状况,并且分析得出可以从哪些方面进行节能改造。现有三种典型的楼宇能源审计方式(主要产出成果对比见表1-4):

1) Level 1-走查 (walk through)：这种方式一般是对设备和能源系统进行简单的查看，比如记录用能情况、设备的名牌信息等。同时，也包括利用能耗信息分析能源消耗量、能耗分布以及将目标漏洞的能耗与基准线进行对比。

2) Level 2-标准审查 (standard audit)：能源使用和损失需要通过对设备、系统和运行情况等进行更为详细的检查和分析而得到量化。一般可能用现场测量对能耗终端效率的量化和评价。这种调研方式也包括节能改造的经济性分析。

3) Level 3-投资评级 (investment grade)：这种方式包括利用函数公式对能耗模式进行更为详细的能耗评估。能耗模拟软件用于预测一年的能耗情况，并解释天气参数和系统变量。这种方式需要考虑系统的相互作用以防止对于节能量的过度评估。

表 1-3 校验模拟等级划分

校验等级	可用于校验的建筑基本信息和性能数据							校验所需花费时间*	
	能耗账单 (1年)	竣工图	现场巡视	详细审计	短期监测终端能耗数据	电力区间数据 (1年)	长期监测数据	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

\*不包括模型模拟运算的时间。

表 1-4 三种能源审计方式的成果产出

Level 1	Level 2	Level 3
节能改造的近似花费和节能量	能耗分项	精准的分析
确定重要的改造目标	详细的分析	附加的测量
	节能改造的花费和节能量	逐时的能耗模拟
	运行维护的调整	



关于能源审计的步骤, Lyberg<sup>[55]</sup>制作出了详细的手册。他将审计过程定义为一系列的动作, 旨在拆分和量化能耗, 以及分析节能改造措施的应用、花费和价值并提出建议。这项工作可分为: 1) 估计高能耗建筑的节能潜力; 2) 拆分能耗; 3) 提出可能的节能改造方案; 4) 评估提出的方案; 5) 节能改造方案实施后的分析。

CEC<sup>[56]</sup>建议对实地数据的电子列表进行完全复制, 以记录实地的详细信息, 包括建筑数据、人员时间表、照明设备信息和空调设备信息。

关于在审计过程中存在的错误, Ganji等人<sup>[57]</sup>提出缺乏审计分析的持续性和对于节能量的过量估计。这种错误主要来自于专业知识和基础工程经验的缺乏。对于建筑能耗模拟软件的培训也需要加强, 不然可能导致实际案例分析中的不正确输出结果。Shapiro<sup>[58]</sup>提出在商业建筑的审计中, 缺乏清晰的边界和简单审计的限制。他建议节能改进不仅需要着眼于能源效率的提高, 也需要保证设备满足区域负荷的需要。

Waltz<sup>[53]</sup>提供了两种审计的方式: 观察审计和用电负荷审计。观察审计主要是对建筑的实际运行情况进行审查, 因为在实际的运行过程中, 建筑的控制方式很有可能与之前的设计方案文件不一致。他建议对HVAC系统进行“‘late-night’ tour”, 来确定实际的运行时间表。

## 2、短期能耗终端监测

短期能耗终端监测指在短期内(通常为两周)利用特殊的软件和硬件工具系统性地收集和分析数据来评价建筑能耗系统的情况, 包括 HVAC 系统、控制和照明系统等。基于短期监测的诊断能够阐明建筑中的系统是如何运行以及辨别出主要的能耗终端。这就好像对现实楼宇的一个切片, 从切片中来分析实际整体情况。短期测量数据通常用于生成输入参数。

蒂什曼研究公司(Tishman Research Corporation)<sup>[59]</sup>开展过根据测量数据对办公建筑的DOE-2模型进行校验的工作, 这是可查证的最早的利用短期能耗终端监测数据进行校验的案例。他们还同时分析了传感器的误差问题。

Waltz等人<sup>[53]</sup>建议用手持式功率因数表对每一个电器仪表或者设备进行瞬时功耗的测量。他们认为这样的方式有助于高精度的校验, 特别是对于高层多区域的办公建筑。

Kaplan等人<sup>[29]</sup>建议只需要进行典型的短期数据测量而非必需全年的检测数据, 即可以进行较为准确的建筑能耗模型的校验。比如说, 供冷或供暖季的一个月。他们利用短期监测数据生成了典型的时间表, 包括照明时间表、设备时间表、人员设定温度时间表等。由此可见, 测量数据既可以为模拟的输入参数

提供依据，同时也可以对输出结果进行校对。Soebarto<sup>[60]</sup>也用了类似的方法，只用了 2-4 周的测量数据，即校准了比对能源账单的建筑能耗模型。他利用检测数据建立了一系列能耗终端的概况，包括用电量、发热量和室内温度。

### 3、高分辨率数据

高分辨率数据指数据采样的广度和精度出于一个较高的水平，这样的数据量对设备的投入要求较高，但可以获得更为精确的建筑能耗模型。

Clark 等人<sup>[61]</sup>在对被动式太阳能设备进行分析时，利用高质量高分辨率数据和经验事实对能耗模型开展了校验工作。敏感性分析首先被用于量化模型预测的不确定性范围以及相关的参数敏感性。这些信息可用于设计实验从而获得高质量的数据集，以量化模型残差以及识别出其原因。作者同时强调了从实验室向实际大尺度应用外推时要注意的不确定性问题。

Norford 等人<sup>[50]</sup>为了分析建筑的实际运行能耗过高，接近原设计值的两倍，所以需要获得高分辨率的数据。他们采用的方法是安装 100 个传感器，这些传感器每小时记录 200-300 次，从而得到建筑内外环境和空调等能耗的小时平均值。他们分析得出造成能耗超出设计值的原因主要在于租户的电器耗能高于预期（64%）、空调运行时间增长（24%）和空调设备、建筑材料、密闭性等的建模描述偏差（12%）。该文章强调了在决定模型运行情况中人员行为的重要性，以及检测这些行为的测量设备的必要性。

### 4、介入测试

介入测试是利用 3-5 天短时间内的受控制的供冷供暖测试来确定建筑参数的特性。这种测试包括利用一段时间的 co-heating 来对建筑热损失系数进行测定，以及利用一段时间的冷却来对建筑的有效热时间常数进行测定。

Soebarto<sup>[23]</sup>仅仅利用 2-4 周的测量数据对建筑能耗模型进行校验。一系列启停测试用于确定照明和插座的负荷。这些测试中，全部的用电负荷都轮流在短时间内切断，然后又复启。这种启停的循环是在既定的模式下进行的，同时测试人员需要记录当下的用电量，从而可以准确地推算出各种用能终端的负荷，而不用安装专门的分项计量检测设备。这种方法可以帮助模型的校验达到全楼宇用电量 6.7% 的均方根变异系数误差和冷机能耗的 1% 误差。

### 5、减少参数

参数减少和简化主要依赖于复杂输入参数的统计特性。一个通用的方法是进行典型日统计，即建筑能耗的统计基于天而不是小时。这种方式可以产生典

型天（工作日、周末和假期）的定义，这可以用于对建筑能耗进行特征化描述，因此将大量复杂的检测数据压缩成相对较少的时间表输入参数点。

Kaplan等人<sup>[29]</sup>利用逐日方式将非空调负荷模式按照典型性进行分组，并进一步利用分区方式（合并相似的区域）将不同的典型日应用于不同的合并分区中。Hadley等人<sup>[62]</sup>则利用主因子分析和聚类分析的结合来从国家天气服务处（national weather service）识别需要的不同的典型天气参数，而HVAC系统的能耗数据也是根据不同的天气参数进行分组，逐日和逐时负荷也根据每一个典型日建立。Raftery<sup>[63, 64]</sup>等人利用典型分区模式进行区域的划分来降低由建筑中由一个整体的大区域来代表的多区域而造成的的不准确性。

## 6、数据拆分

拆分是指将总的建筑能耗拆分成不同的部分。这么做的原因可以是为了专注于某一特定分项进行分析校验，也可以是识别出需要进行节能改造的领域。Lyberg<sup>[55]</sup>将数据的拆分作为辨识重要耗能领域并专注于此的方式。这可以帮助将分项检测限定在某一范围，以此提高操作的效率。同时也可以帮助对于节能改造机会的辨识。

Akbari<sup>[65]</sup>建立了可以对全楼宇电耗数据中的温度相关项进行拆分的算法。能耗分项的拆分算法是利用逐时全楼检测数据和其与温度的关系得出的统计特征数据来计算空调、照明、风机、水泵和其他的逐时负荷。回归模型根据典型日每小时的测量能耗数据和室外干球温度建立。因为建筑的温度相关性可能根据季节而改变，所以作者建议在两个季节（夏季和冬季）进行回归模型参数的计算。模型的回归常数可以假设可以为天气无关能耗提供依据，而斜率则代表天气相关的数据。因为回归模型不能为温度无关负荷提供拆分的信息，所以需要实现对这一部分的负荷利用模拟和现场调研的数据进行提前评估。

Ji 等人<sup>[66]</sup>对温度无关项的能耗拆分进行了研究。他们利用特定的傅里叶序列模型来对逐时的非空调能耗进行拆分。该模型中利用全年范围内的逐步回归方法，同时利用逐时的测量数据作为训练数据。同一典型日，分项中逐时能耗的最大值作为基础设定点，其他时间的能耗以该设定点的百分比表示，从而得到分项负荷和时间表。

### 1.4.2 误差比对

#### 1、普通时序图

图像方法当前流行用法依然是简单的时间序列图。时序图可以是如图1-7所示的直接模拟结果和测量数据的展示<sup>[67]</sup>，也可以是展示误差范围的盒须图<sup>[68]</sup>（如图1-8）。盒须图可以展示给定时间范围内每个数据点的最大值、最小值、

平均值、中值和百分比值。

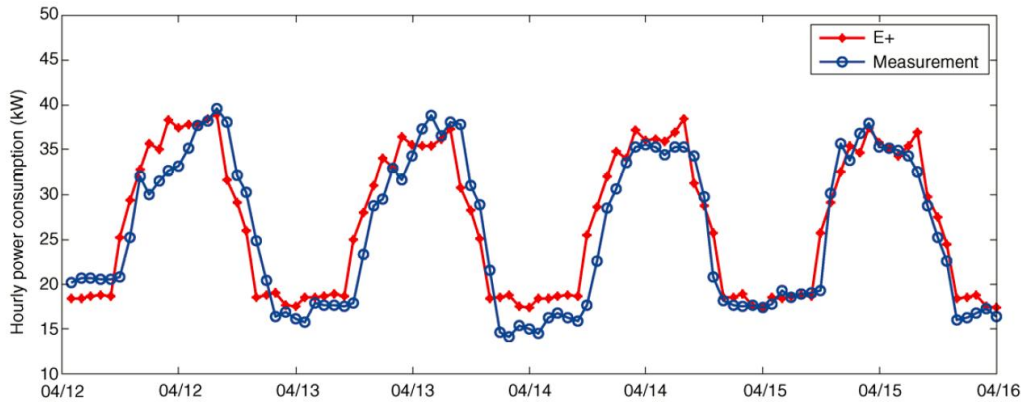


图1-7 误差比对时间序列图<sup>[67]</sup>

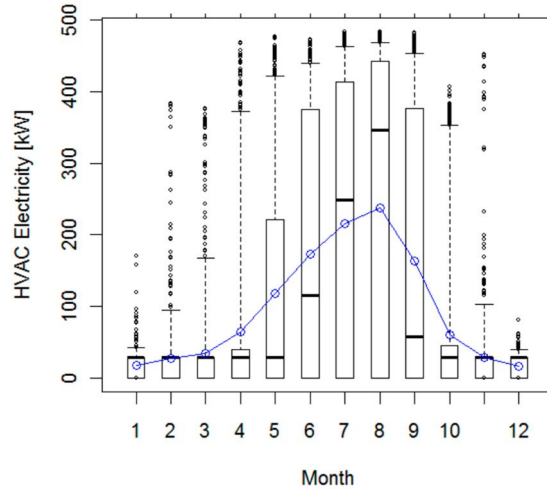
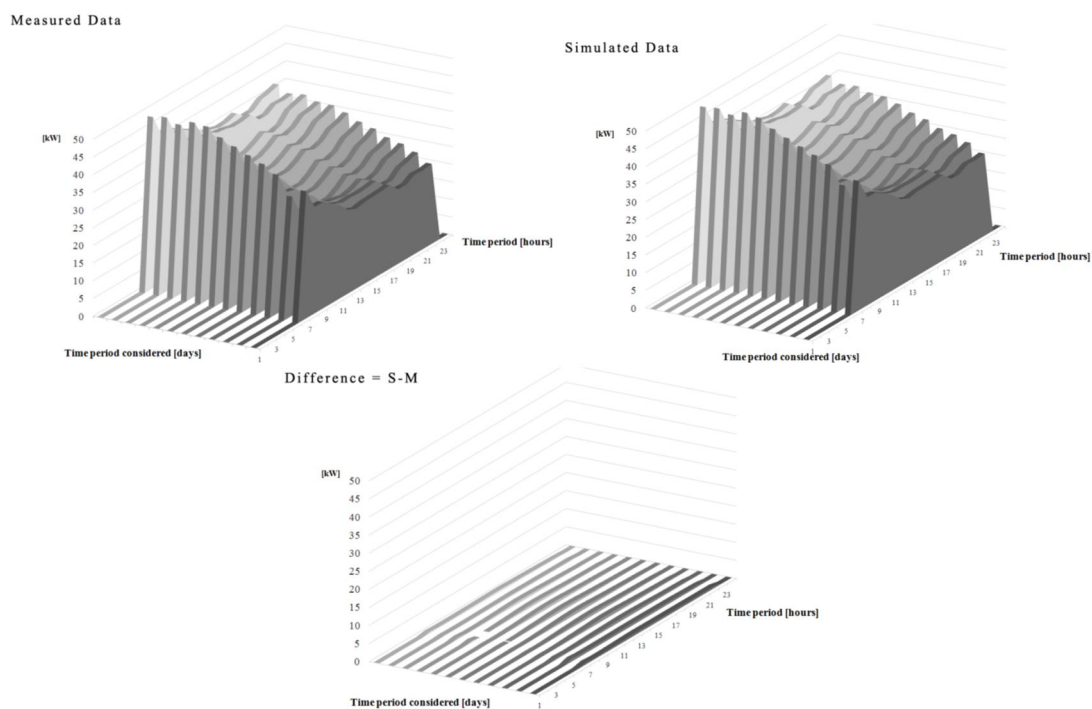


图1-8 HVAC能耗的逐月盒须图<sup>[68]</sup>

随着可获得的测量数据增加以及对这些信息更准确理解的需要，已有一些研究提出了更高级的数据图像化的表达方式。

## 2、3D对比图

3D对比图可用来展示建筑能耗模拟结果与测量数据之间的误差比较。这种3D对比图可以在一张图上展示整个模拟周期的逐时误差，通常用于校验时间相关的参数，如负荷时间表等。在Bronson等人<sup>[30]</sup>的校验过程中，利用3D对比图可以达到1%误差的校验结果。输入参数的误差识别和调整可以在3D对比图上清晰地判断，从而帮助模拟人员进行迭代校验。图1-9所示为不同天逐时的测量数据和模拟数据的对比，以及两者的误差展示。误差的表现方式可以有多种变化，如平均误差或者均方根变异系数。

图1-9 3D对比图<sup>[52]</sup>

### 3、地毯等高线图 (Carpet-contour plot)

结合时间序列的等高线图也可用以展示模拟结果和测量数据的误差。Raftery等人<sup>[68]</sup>利用这种地毯等高线图来将误差形象化的展示出来，从而帮助模拟人员迅速找到主要的误差处，并且分析其来源。图1-10形象地展示了初始模型和校验后模型的误差。

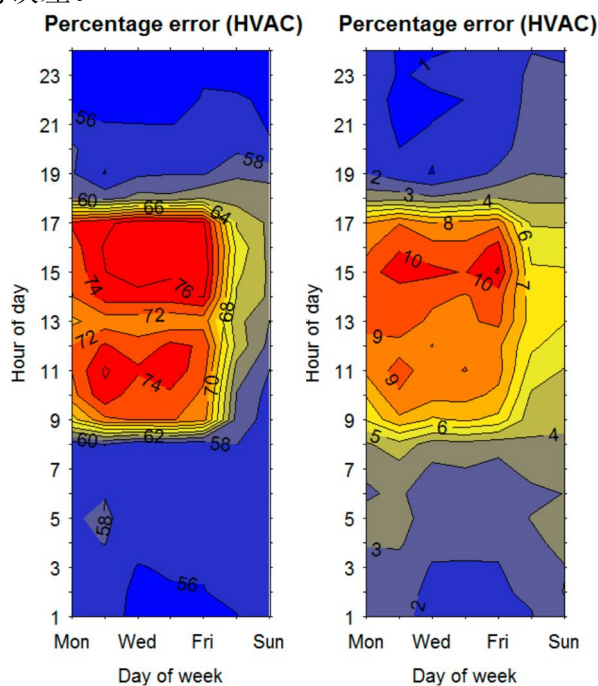


图1-10 2007年测量和模拟的HVAC能耗值一周每天每小时的平均误差等高线图

(左图为初始模型，右图为最终模型)

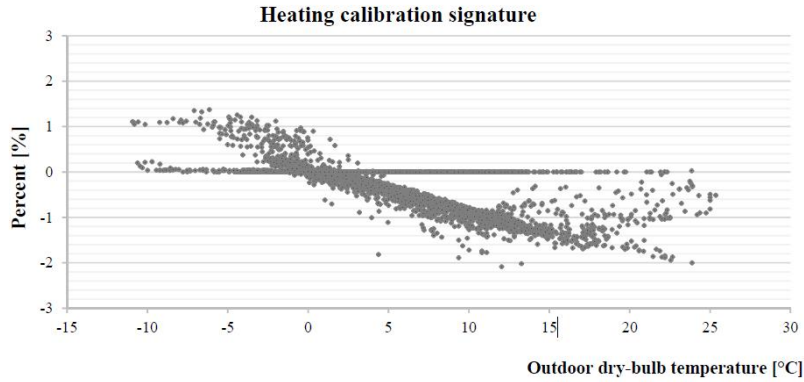


图1-11 校验签名图<sup>[52]</sup>

#### 4、图形化签名

图形化签名可用于形象地表征某个案例中模拟和测量能耗之间误差。Liu等人<sup>[69]</sup>将图形化签名分为两类：

##### 1) 校验签名

校验签名是误差值相对测量值的百分比关于室外干球温度的散点图，计算如式（1-5）~式（1-6）。

$$Residual = S - M \quad (1-5)$$

$$Clibration\ signature = \frac{-Residual}{M_{maximum}} \times 100\% \quad (1-6)$$

对于一个完美校验的模型，它的校验签名图是一根平行的直线。图1-11即为校验签名图的示例。

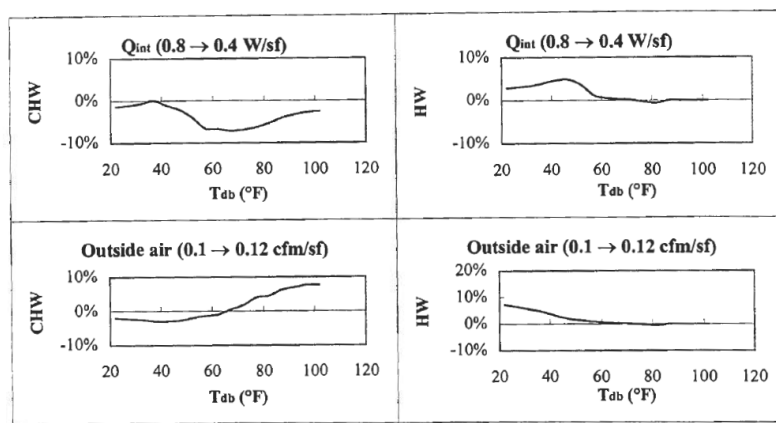
##### 2) 特征签名

特征签名是改变某个输入变量之后的能耗变化值相对测量值的百分比关于室外干球温度的散点图，计算如式（1-7）所示。

$$Clibration\ signature = \frac{Change\ in\ energy\ consumption}{M_{maximum}} \times 100\% \quad (1-7)$$

建筑能耗模型每一个输入参数的变化都对供暖能耗和供冷能耗有着不同的影响，这种影响在途中用曲线表示出来。图1-12 展示了部分输入变量的特征签名。如室内发热量 $Q_{int}$ ，它的减少将会使供冷能耗降低而供暖能耗增加。图形化签名可以帮助模拟人员直观地了解每个参数对于结果的影响，从而对于不科学的图在模型中相应地方进行修改。Liu等人<sup>[70]</sup>利用校验签名和特征签名实现了供冷和供暖能耗的快速人工校验。

图像能够使模拟和实测数据的误差更加清晰明了地显现出来，因此可作为专业人员的有力辅助工具来确定应该对哪些参数进行调整。

图1-12 建筑能耗模型输入参数的图形化签名<sup>[71]</sup>

### 1.4.3 待调整参数的选择和调幅确定

待调整参数的选择和调幅确定是整个校验过程中最核心的部分。怎样根据模型的模拟结果和实际的测量结果之间的误差来针对相应的输入参数进行调整，是从建筑能耗模拟建立一开始就面临的问题。因为只有保证模型准确性之后，才能有信心进行接下来基于模型的工作，如能耗的预测等。

#### 1、迭代调整

当前最常用的参数调整方式是人工迭代调整，即模拟人员凭借个人自身经验，根据模拟和实测结果的误差进行判断，然后调整某一输入参数，再运行模型，如果误差依然在规范推荐的范围之外，则重复以上过程，直到最后两者误差在允许范围之内。这种人工反复试验（trial and error）的好处在于可以综合专业人士的知识和经验，但在这个过程中他们需要耗费大量的时间和精力，而由于人的精力有限，所以很可能出现判断错误从而导致模型不准确。所以对于整个项目来说，这是一件花费很大的事情。

近年来，已经有人开始研究将这样一个迭代调整的过程用计算机策略自动实现。自动迭代一般利用数学统计方法，产生最优化方程交给程序，从而降低实测和模拟的数据误差。最常用的数学统计方法是将目标函数作为误差最小化的目标。研究人员利用粒子群等优化算法进行自动迭代校验，可以很大程度上帮助校验人员节省时间。

当前，目标函数的设定方法主要有以下三类：

##### 1) 单独普通函数

单独普通函数与指南所推荐的评价标准函数一致，即平均误差函数和均方根变异系数（具体公式见“1.3.1 评价标准”）。这一类的函数是目前使用最广的目标函数。

##### 2) 加权函数

Farhang Tahmasebi等人<sup>[40]</sup>为了进一步保证模型的准确性，在传统的目标函

数CV(RMSE)的基础上加入拟合优度（用 $R^2$ 表示），他们将两者相加并各自赋予其权重，从而作为校验的目标函数。与大多数不同的是，他们以室内温度为基础进行误差评价而非能耗。拟合优度可以评估模拟结果的预测的准确程度。 $R^2=1$ 代表拟合曲线可以很好地匹配到实测值。因此，建筑能耗模型校验的目标是使 $R^2$ 最大化和CV(RMSE)最小化。 $R^2$ 可由式（1-8）表示。

$$R^2 = \left( \frac{n \sum m_i s_i - \sum m_i \sum s_i}{\sqrt{(n \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2) \cdot (n \sum s_i^2 - (\sum s_i)^2)}} \right) \quad (1-8)$$

其中， $m_i$ 是实测空气温度， $s_i$ 是模拟的室内空气温度， $n$ 是时间步长的总数。

综合CV(RMSE)和 $R^2$ 的加权函数见（1-9）。

$$f_i = 0.5 \cdot CV(RMSD)_i + 0.5 \cdot (1 - R^2) \cdot \frac{CV(RMSD)_{ini}}{(1 - R_{ini}^2)} \quad (1-9)$$

CV(RMSE)<sub>init</sub>和 $R_{init}^2$ 表示初始模型的均方根变异系数和拟合优度值。

### 3) 罚函数

罚函数方法是将校验问题转化为一种无约束的多目标问题。最优化的目标是减小实测和模拟能耗之间的平方差，同时保证调整目标输入参数在合理的范围之内。这个过程需要平衡待调整参数值和它们相应的推荐初始值之间的差距。目标函数可写为式（1-10）。

$$\Delta_{m,n}(b) = \sum_{i=1}^m w_i^\delta \delta_i^2 + \sum_{k=1}^n w_k^b (b_i - \bar{b}_i)^2 \quad (1-10)$$

其中， $\delta$ 是能源 $i$ 在 $m$ 时间尺度（如果能源账单是一年的，则 $m=12$ ）的实测和模拟能耗值的误差； $w_i^\delta$ 是与能源种类（电耗或者气耗）相关的权值，随着季节而有所不同； $w_k^b$ 是与待调整参数值和其推荐值之差的罚值相关的权重。

建立罚函数是对另一种严格定义目标函数方式的简化。这种严格定义方式是将罚函数中的第一项直接作为目标函数，而第二项作为约束条件。解决一个有约束条件的问题比解决一个没有约束的问题更难。这样的罚函数是由Carroll and Hitchcock<sup>[26]</sup>提出的，他们即是在他们的研究中用此种方法来找寻待调整参数的最优值。后两种方式所设定的满足范围未得到其他研究人员或者机构的验证。

这种基础的迭代调整校验方法从人工发展到自动，是一次重大的进步，可以很大程度上帮助校验人员节省时间。但这样的校验方式属于解决一个单目标或者多目标的优化问题，这更像是一个数学问题而非物理问题。也就是说，多个输入参数的多自由度现状导致校验模拟的结果可以在数学上实测结果匹配的很好，但实际上的物理模型却并不理想。



## 2、敏感性分析

敏感性分析 (Sensitivity Analysis, 简称SA) 在建筑能耗模拟的校验过程中常被用于识别对分项能耗影响最大的参数。同时, 因为在数学优化中, 越少的输入参数可以带来更好的优化效率, 所以很多作者也建议进行模型校验的第一步是减少待调整参数的数量, 这也就牵涉到敏感性分析去辨识他们。推荐的参与校验的待调整参数的数量是25个或者更少<sup>[20]</sup>。敏感性分析可以基于一些典型建筑, 也可以基于有限的实际建筑测试。

### 1) 敏感性指标

在敏感性分析中, 研究人员需要通过个人专业知识和经验为目标模型参数设置默认值和上下两个极限值。他们利用敏感性指标 (Sensitivity Index, 简称为SI) 来评估每个输入参数对于建筑能耗的影响大小。敏感性指标在输入参数两个界限值下计算对应的输出结果差值, 以百分号%表示。每个输入参数只计算一次。计算如式 (1-11) 所示。

$$SI = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max}} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中,

$E_{\max}$ ——能耗上限;

$E_{\min}$ ——能耗下限。

敏感性指标变化幅度很大, 表明相应的输入参数具有很大的影响度。

### 2) 微分敏感性分析

另外一种用于敏感性分析的简单方法是微分敏感性分析 (Differential Sensitivity Analysis, 简称DSA)。这种方法用于评估输入参数对于输出单数的影响率 (Influence Coefficient, 简称IC)。这种方法的公式是无量纲式, 如式 (1-12)。

$$IC = \frac{\frac{\Delta OP}{OP_{bc}}}{\frac{\Delta IP}{IP_{bc}}} \quad (1-12)$$

式中,

OP——输出参数的值;

IP——输入参数的值;

下角标bc表示对应于基准模型的值。

### 3) 敏感性分析辅助方法

有些学者尝试纳入其他筛选方法辅助进行敏感性分析。如莫里斯方法 (Morris Method)<sup>[43]</sup>、傅里叶幅度灵敏度检验法 (Fourier amplitude sensitivity test,

简称FAST)<sup>[72]</sup>和蒙特卡洛方法(Monte Carlo method)<sup>[73]</sup>等。这些方法无外乎在以上基本敏感性分析方法基础上,改变某些数学统计方法,从而可能更精确地分析输入参数对于输出结果的影响。以蒙特卡洛方法为例,Farhang Tahmasebi等人<sup>[40]</sup>首先通过人工筛选出23个备选参数和相应的变化范围,然后用拉丁超方程(Latin Hypercube,简称LH)选出690个参数集合点,并将690个算例带入模拟软件中进行模拟,接着将模拟结果生成分布图,利用MC-based SA进行分析,解多元线性回归模型,并用标准回归系数(Standard Regression Coefficient,简称SRC)作为评价敏感性的标准,最后将输入参数按照SRC值排序展示参数敏感性高低。

### 3、基于校验依据记录分析(Evidence-based development)

人工校验的过程常常依赖于实际的研究人员对每一个独立的输入参数进行调整以实现校验的方案。然后,这些调整更改一般都不进行跟踪或记录,也极少获得报告。这可能会导致校验过程极度依赖与模拟人员的专业知识、过往经验、统计技能、工程判断和大量的试错。为了改善校验过程的可靠性的有效性,需要记录每次做出参数调整决定历史以及决定做出的依据。这样的记录可以帮助未来的模拟人员回顾整个的校验过程和校验的依据。另外,输入参数的改变应该仅仅依靠可得到的依据和清晰的优先调整的定义。已有一些研究将这种系统的基于校验依据记录分析的方法作为他们校验过程的核心<sup>[64]</sup>。

### 4、贝叶斯校验(Bayesian calibration)

在建筑能耗模型校验的过程中,需要利用复杂的数学模型考虑系统的预测分析和不确定性分析。贝叶斯校验方法是在给定观测数据情况下计算位置参数的后验分布,因此它可以在校验过程中自然地结合这些不确定性,包括已经调整完成参数仍保有的不确定性。这些不确定性可以利用概率敏感性分析而通过模型进行传递。贝叶斯校验方法也可以校正模型任何的不正确,而这些不正确项常常由实测数据和模拟结果之间的误差表示出来,即使对于已经调整好的参数值。另外,贝叶斯方法也可以从变化的湿度和可靠度结合不同来源的信息<sup>[74]</sup>。

传统上来讲,贝叶斯方法适用于其他领域的模型预测,如化学或者地理,而不是建筑的物理建模。但近年来一些研究<sup>[75]</sup>已经开始将它应用于建筑能耗模拟领域。

基于贝叶斯方法,建筑能耗模型未知参数值集合的建立是为了寻求模拟结果和实测数据的匹配。三种不同的不确定性来源分别为能耗模型中参数的不确定性、模拟结果和实际建筑运行的误差以及观测误差。基于自身的判断和经验,模拟人员常常为每一个待调整未知参数建立先验概率密度。

用以表示实际观测值 $y(x)$ 的公式如式(1-13):

$$y(x) = \eta(x, \theta) + \delta(x) + \varepsilon(x) \quad (1-13)$$

式中,

$y(x)$ ——能耗模型的模拟结果；

$x$ ——已知参数；

$\theta$ ——未知参数；

$\varepsilon(x)$ ——观测误差；

$\delta$ 测误差——模型误差。

基于多元正态矢量的高斯过程用于表示 $\eta(x, \theta)$ 和 $\delta(x)$ 。能耗模型的输出结果表示为正态分布。马尔科夫链蒙特卡洛算法常常用于计算待调整参数的先验概率密度方程，从而解此多元分布。最后评估每一个待调整参数的后验分布方程。

## 5、模式识别方法（Pattern-based approach）

模式识别是指对表征事物或现象的各种形式的(数值的、文字的和逻辑关系的)信息进行处理和分析，以对事物或现象进行描述、辨认、分类和解释的过程，是信息科学和人工智能的重要组成部分<sup>[76]</sup>。模式识别方法是基于利用模拟结果和实测数据之间的误差建立不同的误差模式，通过实现的实验研究，将不同的误差模式与待调整参数联系起来，而后在校验的过程中，只需要识别出确切的误差模式则可以判断需要调整的参数。此种方法首先 Sun 等人<sup>[77]</sup>提出，他们仅仅利用建筑逐月能耗清单，天气参数和待调整的模型。他们建立的误差模式分为全局误差和局部误差，见图 1-13。同时，他们将这一过程实现了自动识别，实例论证建筑能耗模型的校验结果可以达到 MBE 4.7% 和 CV(RMSE) 14.1% 。

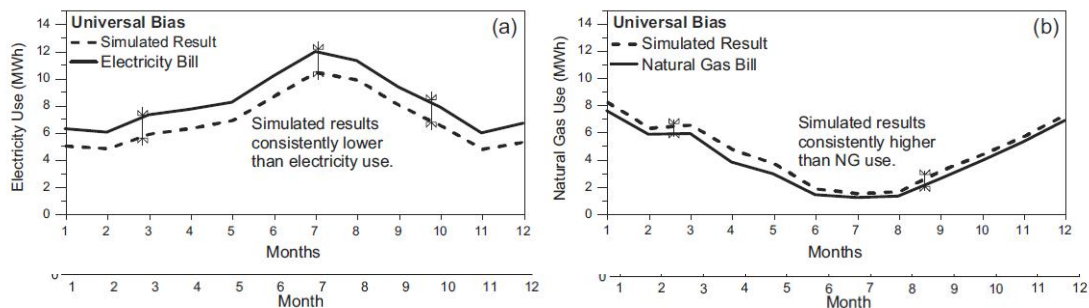


图 1-13 误差模式<sup>[77]</sup>

### 1.3.4 校验方法总结

建筑能耗模型校验的文献中，至今没有一种方法是被普遍采用的方法。正是校验方法的缺失导致这一工作的成功极大地取决于模拟人员个人的判断。同时，模型的校验经常与各种与建筑模拟和系统构成的不确定性相关。

总的来说，人工的迭代校验至今依然是使用最频繁的方法，其原因可能在于这一方法相对其他方法来说更容易实施，如果使用最优化方法就需要一个可用的批处理电脑程序来完成。其次，人工迭代校验必然费时费力，同时因为大量的待调整输入参数，人工很可能因为精力有限而出错。所以，自动过程的引入将可以

很大程度上减轻研究人员的工作负担。

但是，当前自动校验还主要采用的是传统单纯的数学方法，即将建筑能耗物理模型直接抽象成多目标的数学优化问题，而脱离了实际物理意义。换句话说，模型的校验很有可能导致模拟结果和测量数据匹配较好而单个物理输入变量还存在一定的差距。这时的模型输出结果只能满足已用测量数据时间段内的输出结果准确度，但很难保证对于未来能耗输出的结果，特别是针对节能改造的情形。所以，在进行迭代计算之前，需要利用专业人士的学术知识和工程经验来判断缩小待调整参数的范围，同时尽可能给出待调整参数的调整方向，甚至具体的调整数字。

目前，着眼于这一问题的研究只有美国劳伦斯伯克利国家实验室 Kaiyu Sun 等人<sup>[77]</sup>，如之前所介绍，他们引入模式识别的方法，将误差模式分类，并利用实现的实验将误差模式和可能的调整参数相匹配。这一方法是一个进步，它让建筑能耗模型校验的参数选择有了依据，而不再是全局的调整。但模式识别方法属于产生式规则，它是利用事先的模拟得到不同的结果误差模式和相应的可能输入参数。它重视相关性而忽略因果性，有时候存在很强相关性的两件事却不见得是因果关系。另外，它的模式库难以保证完备性，并且维护起来也相对麻烦，如果需要修改，则需要再遍历一遍，进行冗余检测和矛盾消除等操作。这样如“题海战术”的方法，只能解决有限的问题。

因此，本文的研究目标就是在这些前人的悉心研究基础上更进一步，尝试创造另一种基于因果关系判断待调整输入参数的更为完备的建筑能耗模型校验方案。而符号有向图刚好可以胜任这一工作。

## 1.4 符号有向图

针对的建筑能耗模型的校验问题，因为建筑能耗模型的输出结果和输入参数之间有极强的物理逻辑联系，所以选择用符号有向图（Signed Directed Graph，简称 SDG）的方法来建立关于建筑能耗模型的影响逻辑。

符号有向图是一种由节点和节点之间有方向的支路构成的网络拓扑图，它将系统内部变量间复杂的因果关系用图的形式直观地表示出来，为研究危险和故障的传播、及时发现故障源提供了模型依据，故其一直被用于系统的故障诊断中<sup>[78]</sup>。这也是将其作为模型校验方法的原因，因为模型输出结果的误差是有输入参数的误差所导致，所以完全可以将模型的输入参数的误差看成一种故障，从而迁移此种故障诊断的方法帮助进行建筑能耗模型的校验。

SDG 能够有效地表达复杂系统的各个变量之间的相互关系，同时又具有灵活的推理方式和有效的推理算法。它具有包容大规模潜在信息的能力，推理方式

灵活。

### 1.4.1 定义

SDG 图由若干个节点和若干条支路(即有向边)组成, 节点表示变量, 支路表示变量之间的关系 (示意图见图 1-14)。若一个变量的偏差会直接引起另一个变量的偏差, 则在两个变量对应的节点之间用支路连接起来, 由起始节点(原因变量)指向终止节点(结果变量)。用“+”和“-”分别表示正作用(增强)和反作用(减弱)。每个节点对应的变量取正常值记为“0”, 偏大记为“+”, 偏小记为“-”。所有节点的符号组成了系统的状态表示, 称为样本。

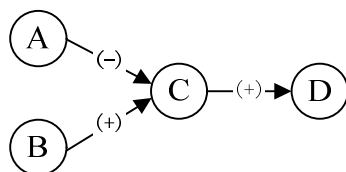


图 1-14 符号有向图示意图

#### 1、有向支路

有向支路表示节点间的正负影响关系, 代表故障的传播路径, 有向支路的属性值通常有两种表述为“+”和“-”。如果支路的初始节点增大或减少导致终止节点同步增大或减少, 称支路影响为增量影响, 或正影响, 通常用带箭头的实线表示如果初始节点与终止节点变化方向相反, 则支路影响称为减量影响, 或负影响, 用带箭头的虚线表示。

#### 2、节点

节点既可以是系统中的可测物理变量, 如温度、压力、流量、液位等、操作变量如阀门、开关等、相关仪表如控制器、变送器等, 也可以是某种故障事件如阀门堵塞、电机故障、电源中断等。上游节点称为初始节点, 下游节点称为终止节点。

##### 1) 节点的阈值

阈值是经合理选择并反复试验调整后用来判断各节点是否偏离正常状态的上限或下限的界限值。阈值的上、下限应当依据故障发生前兆和传播规律经反复试验调整后确定。阈值的选择直接关系到故障诊断分辨率的高低。如果选择范围过宽会导致诊断的灵敏度下降过窄又会导致灵敏度过高而频繁报警或预报过早。

##### 2) 节点的状态

三级模型的节点在某时刻的状态值一般由符号“+”、“0”和“-”。

节点状态值是节点实际值与阈值相比较后得到的离散值。

##### 3) 瞬时样本

SDG 模型中,所有节点在某一时刻状态值得集合称作为一个瞬时样本,见表 1-5。

表 1-5 SDG 模型的瞬时样本举例

A	B	C	D
0	+	-	-

对于一个瞬时样本,在 SDG 中可以搜索到已经发生偏离的节点及支路传播路径。这种路径由方向一致且已经产生影响的若干支路形成的通路构成,又称为故障传播路径(fault propagation pathway)或相容通路(consisten path)。相容通路是能够传播故障信息的通路。消去和相容通路无关的节点和支路后,余下的残图称为该样本的原因-后果图(CEG, Cause and Effect Graph)。

SDG 模型看似简单,它却能够表达复杂的因果关系,并且具有包容大规模潜在信息的能力。

以上图为例,三级模型下,所有节点可能的不同状态组合为  $3^4=81$  个,加上支路状态组合数  $2^4=16$ , 总共  $P_{\max}=3^N 2^M=1296$  个。

### 1.4.2 建模方法

SDG 的建模方法主要可分为以下三类:

1、基于数学模型的方法: 其主要包括基于微分方程数学模型(当 SDG 模型的支路表示变量的增量影响,则 SDG 表达了常微分方程的稳态定性图模型)、基于代数方程数学模型(将影响方程的变量名直接作为 SDG 模型节点名,节点间的有向支路是影响方程在图模型上的映射,取每一个影响方程的右端自变量原因点向左端因变量后果点作有向支路,当自变量的符号为“+”时是实线箭头所构成的有向支路,当自变量的符号为“-”时是虚线箭头所构成的有向支路)和基于微分代数方程数学模型。

2、基于流程图的方法: 按照工艺流程进行,需要先将系统分解成多个设备级单元,对每一个设备单元进行 SDG 建模,然后组合成系统的 SDG 模型。

3、基于经验知识的方法: 此方法主要根据过程操作数据和操作人员的经验建立模型,很大程度上依赖于操作人员的认知水平。没有解析的数学方程,不能根据数学模型的推导图建立模型,不能根据物理模型的拓扑图建立模型,在线测量数据较少,趋势分析辅助建模最多只能用于局部。因此,建立模型主要是经验模型的关系图。

关于建筑能耗模型校验的 SDG 建模方式则属于第三类,即利用自身对于建筑内部能耗之间关系的专业知识和经验,建立各种输入参数和能耗输出结果之间

的关系拓扑图。

## 1.5 本文研究

### 1.5.1 研究目的和意义

模拟人员在针对建筑能耗进行建模时,常常因为对实际情况无法获得详尽信息的描述,导致所建立的能耗模型与实际情况有所偏差。这种偏差的存在,将大大降低模型的可信度,也影响其在建筑性能评价中所发挥的作用。为了保证建筑能耗模拟具有普遍的可信度,就需要通过校验过程,使其能够较为准确地非标实际建筑。

然后,因为建筑能耗模拟中涉及大量的参数,从而使校验成为一项不确定性很高的工作。当前已有世界公认的建筑能耗模型校验的评价标准,但迄今为止依然没有达成共识的通用方法,最初的人工迭代校验依然是最常用的途径。人工校验的优点在于其可以利用模拟人员本身的知识 and 经验,而缺点则为费时费力,并且因为涉及到大量的参数调整,很容易使模拟人员因精力有限而出现错误。因而,最近几年人们开始尝试引入自动校验的手段,通过计算机对于数据处理的高效特点,帮助模拟人员对建筑能耗模型进行校验,从而很大程度上减轻模拟的负担。但当前建筑能耗模型的自动校验仍处于初级阶段,现行的方法是剔除物理逻辑而把迭代校验当作纯粹的数学方法进行处理,即将建筑能耗物理模型直接抽象成多目标的数学优化问题。这时的模型输出结果只能满足已用测量数据时间段内的输出结果准确度,但很难保证输入参数的准确性。因此,在自动基础上依然需要专业人士的学术知识和工程经验的参与,即使使用迭代自动校验也需要通过一定的物理逻辑来判断缩小待调整参数的范围。而这一方法的创造最好便于实现自动化。

因此,本文的研究目标就是在前人的悉心研究基础上尝试更进一步,创造一种基于符号有向图建筑能耗模型校验方法。它为结合人工和自动校验双边优势的途径发展提供一种可能,是利用因果关系判断待调整输入参数的更为完备的建筑能耗模型校验方案。

### 1.5.2 研究问题和内容

本文提出的基于符号有向图的建筑能耗模型校验的方法,采用符号有向图的形式绘出建筑物理体内各参数与能耗之间的因果关系图。然后依据 SDG 图对模型模拟结果和实际测量结果的误差按图索骥找寻可能的待调整参数集,并依据输入参数和模型能耗之间的定量关系进行调整。多次迭代后,得到符合校验误差标准的建筑能耗模型。方法的具体内容如下:

- 1、建立建筑能耗符号有向图。细致研究建筑物理内部各参数之间、参数和

能耗之间的影响关系，以此为理论基础建立建筑能耗符号有向图。接着将符号有向图涉及的参数进行分类，并结合模拟软件的局限性对原符号有向图进行简化，其中时间表类参数和调整类参数即为本文的研究重点对象。简化后的符号有向图即成为进行能耗模型校验的基础。

2、时间表的校验。照明系统、设备系统等的运行时间表是 24 维矩阵，其与其他参数的类型不相同，故需要先对其进行调整。当前的建筑能耗模拟常采用的是使用默认典型时间表，但因为各建筑的实际运行情况不尽相同，所以这一方法必将造成大的误差。本文提出“典型日时间表校验法”，即以最大逐时能耗推算功率密度，其他时刻的能耗值与最大逐时能耗值的比例作为当前时刻的负荷率，从而推算得到真实的运行时间表。

3、调整类参数的校验。本文提出“分步分部参数校验法”，将模拟结果和实测数据进行比较，依据不同部件的误差结果，先基于符号有向图的向前推理机制按图索骥搜索出可能的误差参数集，然后利用由符号有向图向后推理机制事先建立的函数逻辑关系，推荐每个待调整输入参数的调整值。整个调整过程基于一定的规则顺序进行。

### 1.5.3 文章结构

本文的结构主要分为以下几个部分：

第一章：绪论。系统阐述文章的研究背景和意义，按照校验流程对建筑能耗模型校验的方法进行文献综述。该章从上层的宏观背景和底层的模型法则阐述建筑能耗模型校验的位置和切入点，同时按照工作流程综述性地梳理现今的校验方法。这些工作可以为今后模拟人员的实际工作提供参考，也可为研究人员的学术探索提供线索。

第二章：校验用建筑能耗符号有向图的建立。梳理建筑内部各参数之间、参数和能耗之间的影响关系，以此为理论基础建立校验用建筑能耗符号有向图。同时也针对建筑能耗模型校验对所涉及参数进行分类。

第三章：建筑能耗模型时间表的校验。以最大逐时能耗推算功率密度，而其他时刻的能耗值与最大逐时能耗值的比例作为当前时刻的负荷率，从而得到真实的运行时间表。同时，对比分析典型时间表和真实时间表对建筑能耗的影响。

第四章：建筑能耗模型调整类参数的校验。具体阐明基于符号有向图校验方法，包括怎样确定待调整参数集和其相应的调整幅值。

第五章：实例验证。分别在一个实验模型和一个实际建筑模型中验证方法的有效性。

第六章：总结与展望。对本文内容进行总结，分析创新点和不足之处，同时针对可以改进的地方提出今后的工作重点。



## 1.6 本章小结

本章首先介绍了本文的宏观研究背景和意义, 然后从建筑能耗模拟的科学技术哲学角度阐释了科学模型的构建和边界, 接着叙述建筑能耗模型校验相关问题, 特别校验方法进行了详细综述, 随后介绍了本文所使用的符号有向图方法。最后, 提出了本文研究的问题和内容, 以及文章的框架。

## 第 2 章 建筑能耗符号有向图的建立

建筑能耗四大项可分为照明能耗、设备能耗、暖通空调能耗和动力能耗。其中动力能耗在本文中不进行分析。接下来，将分别从照明能耗、设备能耗、暖通空调能耗对建筑能耗影响因素进行分析。

### 2.1 建筑照明能耗影响因素分析

建筑照明能耗可由 (2-1) 表示：

$$Q_{li} = n_{li} \times q_{li} \times A_{li} \times h_{li} \quad (2-1)$$

(1) 单位面积照明功率：与实际照明灯具的功率有关，可以通过改变灯具功率实现节能的目的。

(2) 运行小时数：一方面与建筑的使用模式有关，比如上下班时间或者用户的节能习惯；另一方面也与自然采光相关。一般在建筑的外区有很好的采光效果，同时也受外窗的透光率和遮阳形式的影响。

照明能耗的主要影响因素为：照明功率密度、照明运行小时数、照明使用率、照明面积、玻璃类型、遮阳系数和窗墙比。照明能耗与影响因素的关系图如图 2-1，影响关系式可由式 (2-2) 表示。

$$Q_{li} = f(n_{li}, q_{li}, A, h_{li}, B_{win}, A_w, K_c, S_{win}) \quad (2-2)$$

### 2.2 建筑设备能耗影响因素分析

室内设备能耗同样可用类似式 (2-3) 表示：

$$Q_{eqpt} = n_{eqpt} \times q_{eqpt} \times A_{eqpt} \times h_{eqpt} \quad (2-3)$$

(1) 单位面积设备功率：与设备数量和功率有关。同时，设备的数量又与人员数量有关。

(2) 运行小时数：与照明类似，与建筑的使用模式有关，比如上下班时间或者用户的节能习惯。

室内设备通常包括打印机、电脑、饮水机等，在进行建筑能耗模拟过程中，可以把它们统一对待，用平均单位面积功率密度。设备能耗的主要影响因素为：设备功率密度、设备运行小时数、设备使用率、设备面积。设备能耗与影响因素的关系图如图 2-2，影响关系式可由式 (2-4) 表示。

$$Q_{eqpt} = f(n_{eqpt}, q_{eqpt}, A, h_{eqpt}) \quad (2-4)$$

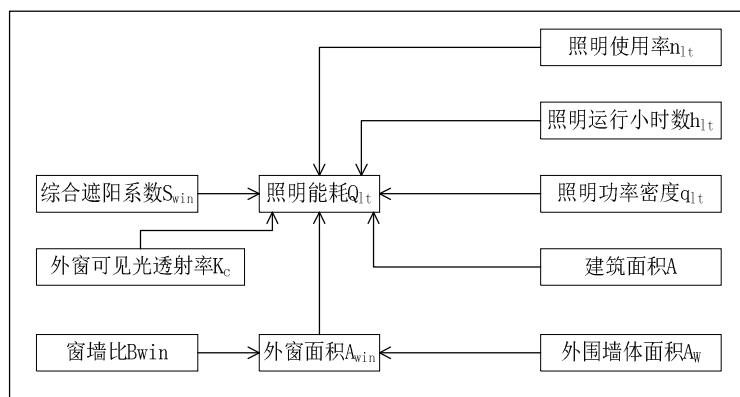


图 2-1 照明能耗影响关系

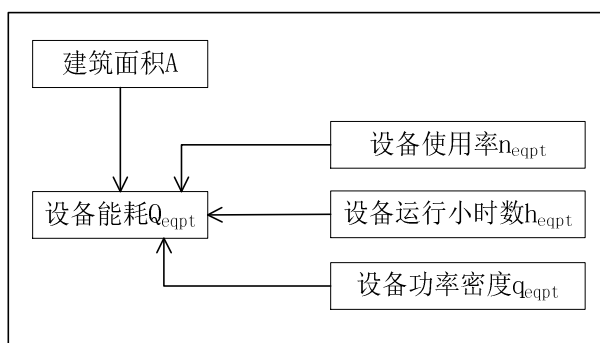


图 2-2 设备能耗影响关系

## 2.3 建筑能耗影响因素分析

空调系统能耗是建筑能耗最重要的组成部分，相对照明设备，其涉及更多的影响因素，包括三大部分：冷水机组能耗、水系统能耗（冷冻水泵、冷却水泵能和冷却塔）和风系统能耗（风机盘管风机和空调箱风机）。

空调系统的本质是通过自身的运行来消除室内的负荷从而保持房间既定的环境指标，工作示意图见图 2-3。空调系统运行的流程是利用能源完成负荷的“搬运”工作，其工作效率由以上提到的空调部件共同决定。

因此，空调系统能耗影响因素，可分为空调负荷和空调系统效率两部分。空调负荷通过改变相关参数改变空调系统所承担的负荷进而影响空调系统能耗；空调系统效率则由设备性能、形式、控制等相关。

以下将根据这种分类方式对空调负荷和空调系统效率两部分进行分别分析。

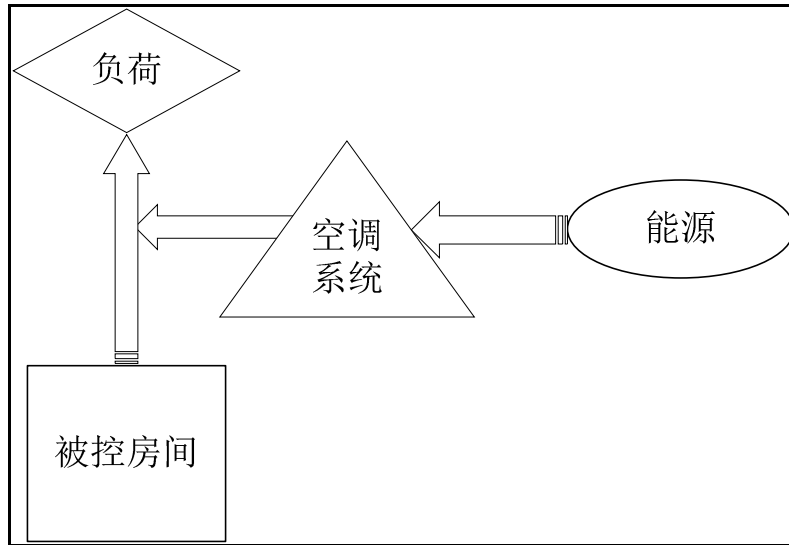


图 2-3 空调系统工作原理图

### 2.3.1 空调负荷

空调系统负荷  $L$  主要由外围护结构传热负荷  $L_e$ （外墙传热负荷  $L_w$ 、屋顶传热负荷  $L_r$ 、外窗传热负荷  $L_{win}$ ）、人员负荷  $L_p$ 、照明散热负荷  $L_{lt}$ 、办公设备散热负荷  $L_{eqpt}$  和新风负荷  $L_{oa}$  组成。

#### 1、外扰负荷

##### 1) 外围护结构传热负荷 $L_e$

通过建筑外围护结构外表面进入室内的热量来源分为两部分：一部分来自户外空气以对流方式传给围护结构外表面的热量；另一部分则为围护结构外表面接受的太阳直射、散射和反射以及地面的辐射传热的热量。

外围护结构得热量如式（2-5）所示。

$$Q = A[h(t_{od} - t_{id}) + \alpha I - \varepsilon \Delta R] \quad (2-5)$$

因为建筑围护结构热惰性等原因，其得热量并不完全等于室内空气的空调负荷。在负荷计算时，需要通过  $Z$  传递函数等方法将得热量转化为负荷。

外围护结构负荷按照建筑部件分由三部分组成：外墙传热负荷  $L_w$ 、屋顶传热负荷  $L_r$ 、外窗传热负荷  $L_{win}$ 。其公式可大致表示为式（2-6）。

$$L_e = L_w + L_r + L_{win} \quad (2-6)$$

外墙传热负荷表达式为式（2-7）。

$$L_w = A_w U_w (t_{ode} - t_{id}) \quad (2-7)$$

屋顶传热负荷表达式为式（2-8）。

$$L_r = A_r U_r (t_{ode} - t_{id}) \quad (2-8)$$

外窗传热负荷:

外窗的传热负荷除了和外墙和屋顶类似的传热途径外,因其具有透光性,故通过其传递进入室内的热量还有太阳辐射透射得热。透过窗户玻璃进入室内的日射的热量可分为两部分,即透过玻璃窗直接进入室内的太阳辐射热和窗玻璃吸收太阳辐射后传入室内的热量。外窗传热负荷表达式为式 (2-9-a)~式 (2-9-f)。

$$L_{win} = L_{win1} + L_{win2} \quad (2-9-a)$$

$$L_{win1} = A_{win} U_{win} (t_{ode} - t_{id}) \quad (2-9-b)$$

$$L_{win2} = A_{win} S_{win} D_{win} C_{Lwin} \quad (2-9-c)$$

$$D_j = q_r + q_\alpha \quad (2-9-d)$$

$$q_\alpha = n_{win} q_a \quad (2-9-e)$$

$$q_r = \tau_{win} I_{win} \quad (2-9-f)$$

对上述公式和各相关因素进行整理,外围护结构负荷  $L_e$ (外墙传热负荷  $L_w$ 、屋顶传热负荷  $L_r$ 、外窗传热负荷  $L_{win}$ ) 与影响因素的函数关系为式 (2-10)~式 (2-12)。

$$L_w = f(A_w, U_w, t_{ode}, t_{id}) \quad (2-10)$$

$$L_r = f(A_r, U_r, t_{ode}, t_{id}) \quad (2-11)$$

$$L_{win} = f(A_{win}, U_{win}, t_{ode}, t_{id}, S_{win}, n_{win}, q_a, I, \tau_{win}) \quad (2-12)$$

值得一提的是,在计算外窗得热量时,常常用到太阳得热系数 (Solar Heat Gain Coefficient, 简称为 SHGC),它是通过外窗成为室内得热量的太阳辐射热与投射到外窗上的太阳辐射热的比值,用以简化外窗负荷的计算。太阳得热系数与遮阳系数的关系 (标准玻璃) 一般为  $SHGC=0.87*SC$ 。

外墙、屋顶和窗户负荷分别与对应影响因素的关系图如图 2-4~图 2-6。

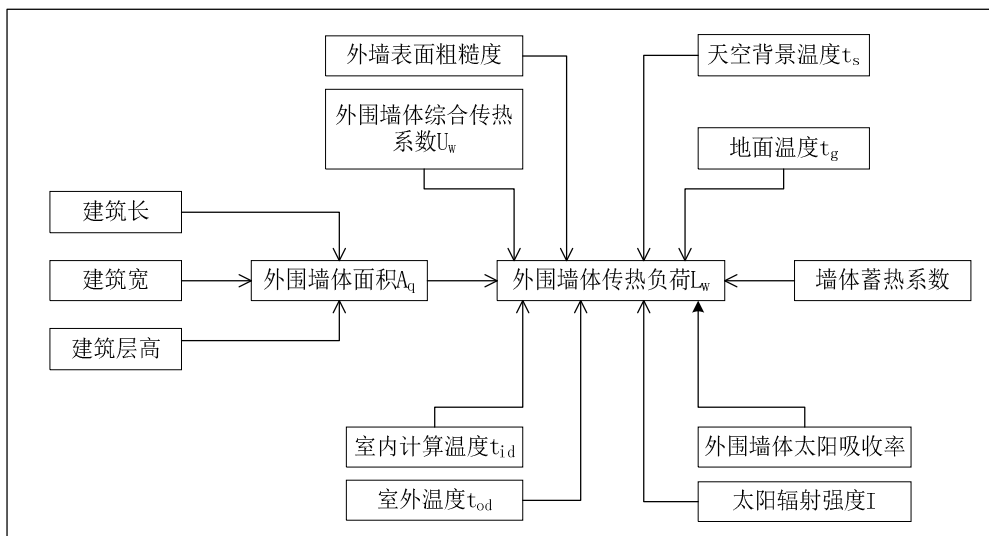


图2-4 外墙负荷影响关系

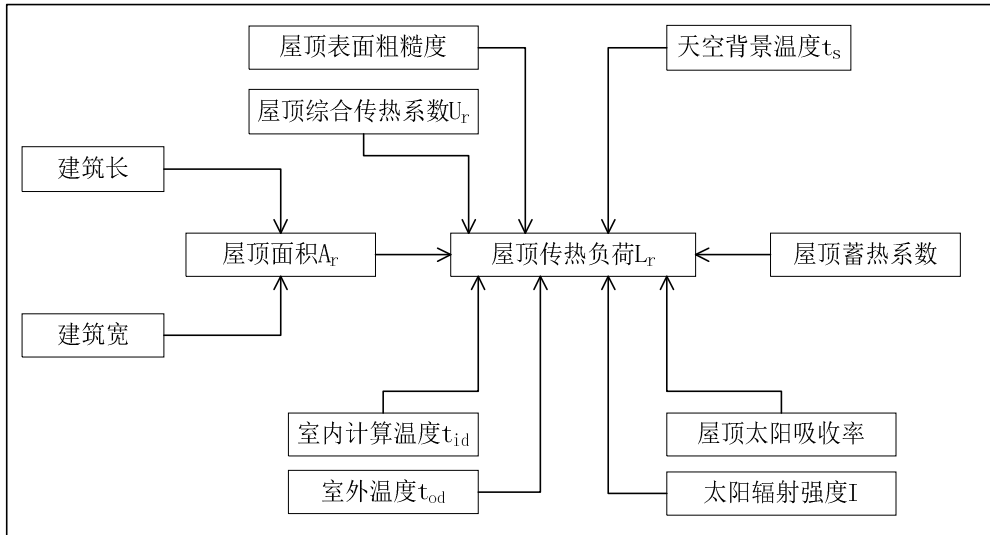
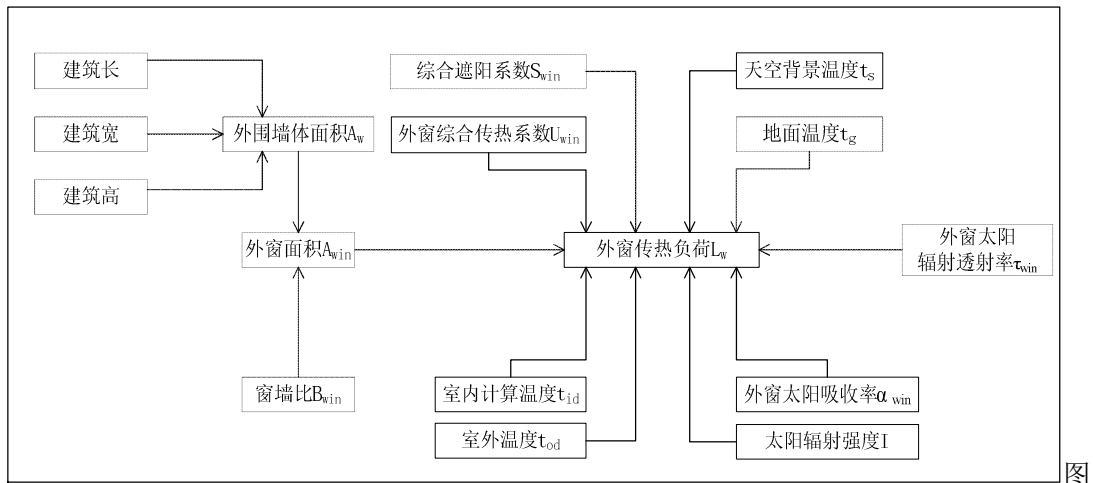


图2-5 屋顶负荷影响关系



2-6 外窗负荷影响关系

## 2) 渗透负荷

渗透负荷是指与室内温度有温差的室外空气通过门窗缝隙渗入而产生的负荷。由于缝隙宽度不一、风向、风速和频率不一，因此渗透负荷很难准确计算。《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019-2015)<sup>[79]</sup>推荐，对于多层和高层民用建筑，可按式(2-13)计算门窗缝隙渗入冷空气的耗能量：

$$L_s = 0.278V_s \rho_{od} c_p (t_{od} - t_{id}) \quad (2-13)$$

空调房间内一般保持正压，所以在这种情况下，不计算门窗缝隙渗透的负荷，对于房间密闭性好的地区，更是可以忽略不计。

整理可得渗透负荷影响关系为式 2-14。

$$L_s = f(V_s, \rho_{od}, t_{od}, t_{id}) \quad (2-14)$$

负荷影响关系图如图 2-7。

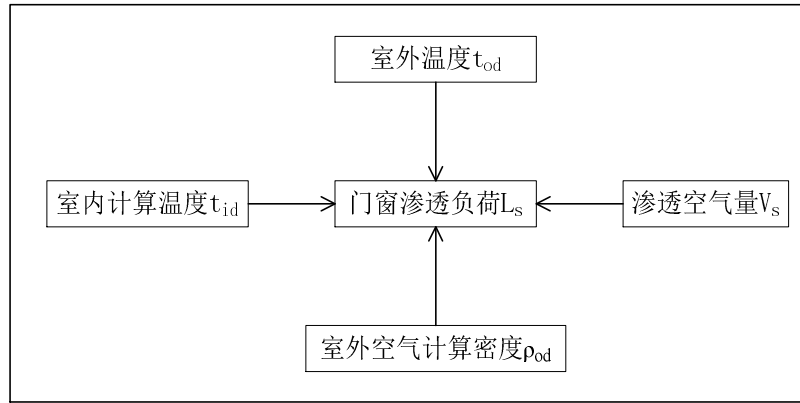


图2-7 渗透负荷影响关系

### 3) 新风负荷

空调系统中引入室外新鲜空气(简称新风)是保障良好室内空气品质的关键。在夏季室外空气焓值和气温高于室内空气焓值和气温时,空调系统为处理新风势必消耗冷量。而空气室外气温比室内气温低且含湿量也低时,空调系统为加热、加湿新风势必消耗能量。

新风负荷的计算如式(2-15)~式(2-16):

$$L_{oa} = M_{oa}(h_{od} - h_{id}) \quad (2-15)$$

$$L_{oa} = M_{oa}c_p(t_{id} - t_{od}) \quad (2-16)$$

夏季因为需要考虑湿负荷的影响,所以新风负荷的计算用室内外空气焓值,而冬季则仅用空气温度即可。

据调查,空调系统中处理新风的能耗要占到总能耗的 25%-30%<sup>[80]</sup>。所以,在满足空气品质的前提下,应尽量选择较小的新风。

确定新风量的原则需要满足以下三个要求:

- a) 不小于按卫生标准规定的人员所需最小新风量;
- b) 补充室内燃烧所耗的空气和局部排风量;
- c) 保证房间正压。

在全空气系统中,通常取上述计算得出新风量的最大值作为新风量设计的最小值。

整理可得新风负荷影响关系为式(2-17):

$$L_{oa} = f(\rho_{od}, t_{od}, t_{id}, A, D_p, v_p) \quad (2-17)$$

负荷影响关系图如图 2-8。

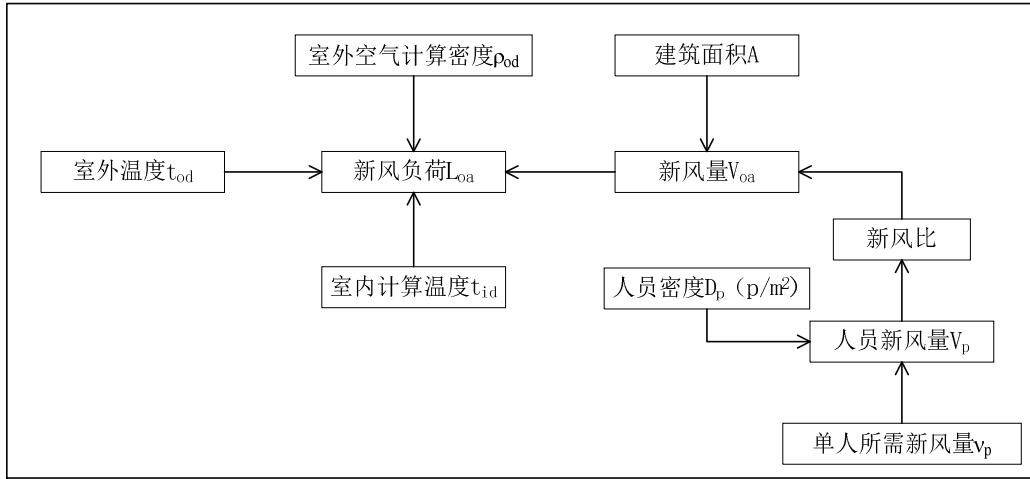


图2-8 新风负荷影响关系图

## 2、内扰负荷

室内负荷主要指设备、照明和人体三部分。

### 1) 照明负荷

照明散热对流和辐射形式形成负荷。逐时冷负荷的计算如式 (2-18)：

$$L_{lt} = A_{lt} q_{lt} n_{lt} C_{LQ_{lt}} \quad (2-18)$$

对上述公式和各相关因素进行整理，照明负荷与影响因素的函数关系为式 (2-19)：

$$L_t = f(A_t, q_t, n_t) \quad (2-19)$$

### 2) 设备负荷

与照明类似，设备散热同样对流和辐射形式形成负荷。逐时冷负荷的计算如式 (2-20)：

$$L_{eqpt} = A_{eqpt} q_{eqpt} n_{eqpt} C_{LQ_{eqpt}} \quad (2-20)$$

对上述公式和各相关因素进行整理，设备负荷与影响因素的函数关系为式 (2-21)：

$$L_{eqpt} = f(A_{eqpt}, q_{eqpt}, n_{eqpt}) \quad (2-21)$$

### 3) 人员负荷

人体的散热与年龄、性别、衣着和劳动强度及周围环境等因素相关。人体的散热直接形成冷负荷，而散湿则形成湿负荷。

人体显热散热引起的冷负荷计算式如式 (2-22)：

$$L_{ps} = q_{ps} A D_p n_p \phi C_{LQ_{ps}} \quad (2-22)$$

人体散湿量所引起的湿负荷计算式如式 (2-23)：

$$L_{pl} = 0.278 A D_p n_p \phi g_p \times 10^{-6} \quad (2-23)$$



对上述公式和各相关因素进行整理，人体负荷与影响因素的函数关系为式 (2-24)：

$$L_p = f(q_{ps}, A, D_p, n_p, \varphi, g_p) \quad (2-24)$$

室内负荷影响关系图如图 2-9~图 11。

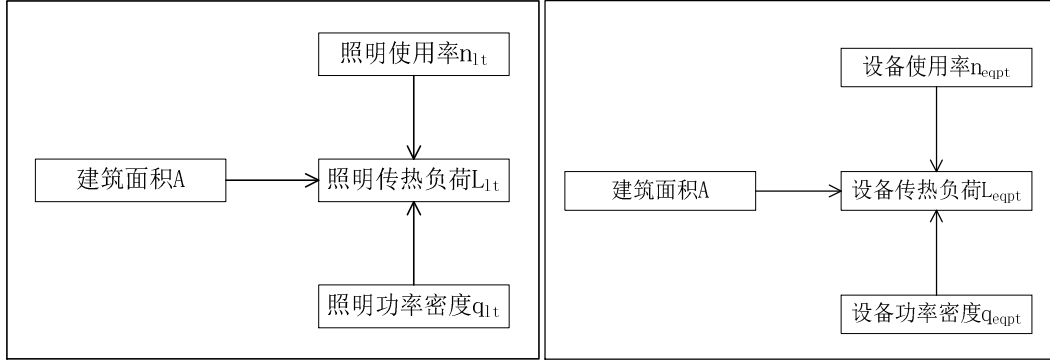


图2-9 照明散热负荷影响关系图

图2-10 设备散热负荷影响关系图

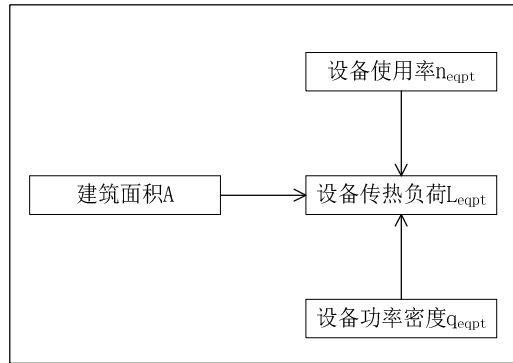


图2-10 设备散热负荷影响关系图

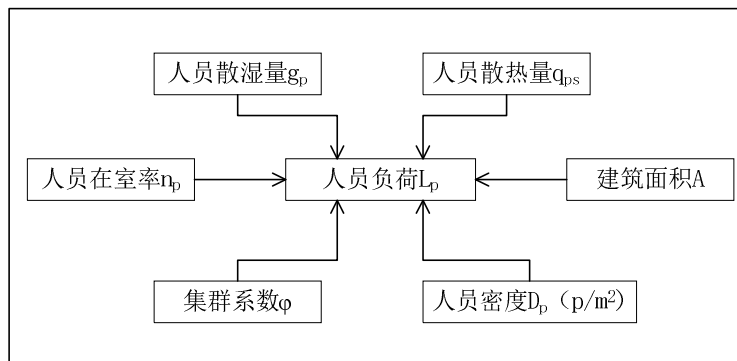


图2-11 人员负荷影响关系图

整理可得空调系统负荷 L 影响关系为式 (2-25)：

$$L_w = f(A, A_w, A_r, A_{win}, U_w, U_r, U_{win}, S_{win}, n_{win}, q_a, I, \tau_{win}, V_s, V_{oa}, \rho_{od}, t_{od}, t_{id}, q_{lt}, q_{eqpt}, q_{ps}, g_p, n_{lt}, n_{eqpt}, n_p, D_p, \varphi) \quad (2-25)$$

### 2.3.2 空调系统效率

空调系统用能设备主要有冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔风机和空调末端风机。这五大部件利用能源进行负荷“搬运”工作，共同决定空调系统的总效率。

#### 1、冷水机组

冷水机组能耗可由式（2-26）表示：

$$E_{chi} = q_c \times h_c / EER \quad (2-26)$$

冷水机组瞬时供冷量  $q_c$ ，主要与空调系统负荷有关。通过热回收技术或者室外焓值较低时加大新风量等可以有效降低冷水机组的瞬时供冷量。冷水机组的能效比 EER，主要与冷水机组的性能系数、冷水机组的负荷率、冷冻水供水温度、冷却水进水温度和是否变频等有关，其中负荷率又与冷水机组选型与实际供冷量的匹配度和冷水机组台数的配置方案有关；空调系统运行时间  $h_c$ ，在供冷季时间和每日开关机时间固定时，与是否能够利用自然冷源减少开机时间有关。

整理可得冷水机组能耗  $E_{chi}$  影响关系为式（2-27）：

$$E_{chi} = f(L_c, COP, PLR, T_{chw}, T_{cw}, h) \quad (2-27)$$

关系图见图 2-12。

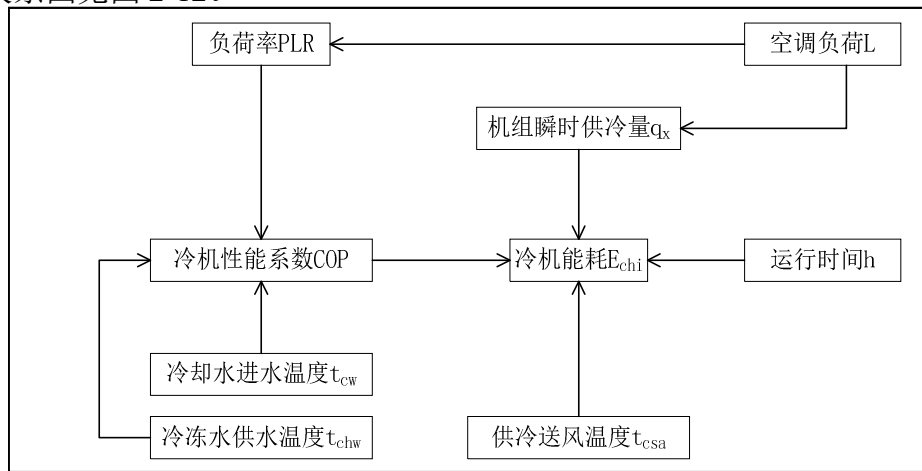


图2-12 冷水机组影响关系图

#### 2、冷冻水端

##### 1) 冷冻水泵

冷冻水泵能耗可以近似地由式（2-28）描述：

$$E_{chwp} = \frac{H_{chwp} \times L_{chwp}}{R_{chwp}} \times h \quad (2-28)$$

整理可得冷冻水泵能耗  $E_{chwp}$  影响关系为式（2-29）：

$$E_{chi} = f(H_{chw}, L_{chw}, R_{chw}, h, \Delta T_{chw}, T_{csa}) \quad (2-29)$$

关系图见图 2-13。

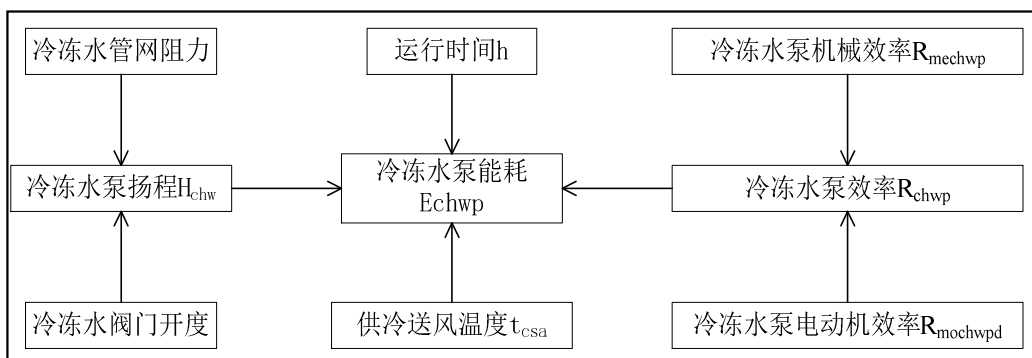


图2-13 冷冻泵能耗影响关系图

### 2) 空调末端风机

空调末端风机能耗可以近似地由式（2-30）描述：

$$E_{cf} = \frac{P_{cf} \times F_{cf}}{R_{cf}} \times h \quad (2-30)$$

整理可得空调末端风机能耗  $E_{cf}$  影响关系为式（2-31）：

$$E_{chi} = f(P_{cf}, F_{cf}, R_{cf}, h) \quad (式 2-31)$$

关系图见图 2-14。

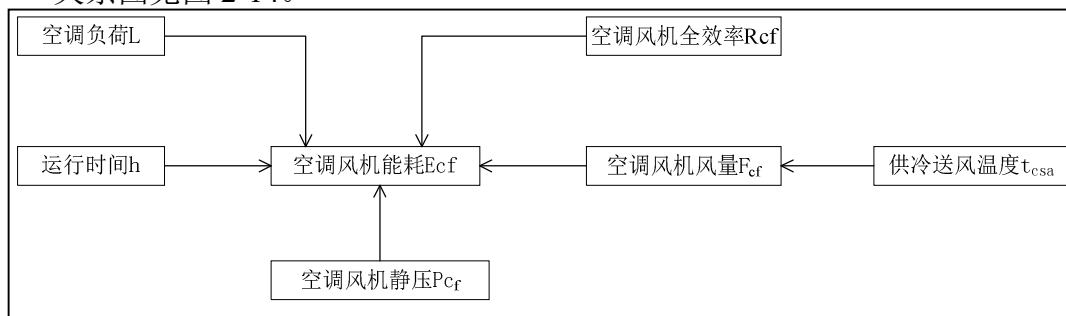


图2-14 空调风机能耗影响关系图

### 3、冷却水端

#### 1) 冷却水泵

冷却水泵能耗可以近似地由式（2-32）描述：

$$E_{cwp} = \frac{H_{cwp} \times L_{cwp}}{R_{cwp}} \times h \quad (式 2-32)$$

整理可得冷却水泵能耗  $E_{cwp}$  影响关系为式（2-33）：

$$E_{chi} = f(H_{cwp}, L_{cwp}, R_{cwp}, h, \Delta T_{cw}) \quad (2-33)$$

关系图见图 2-16。

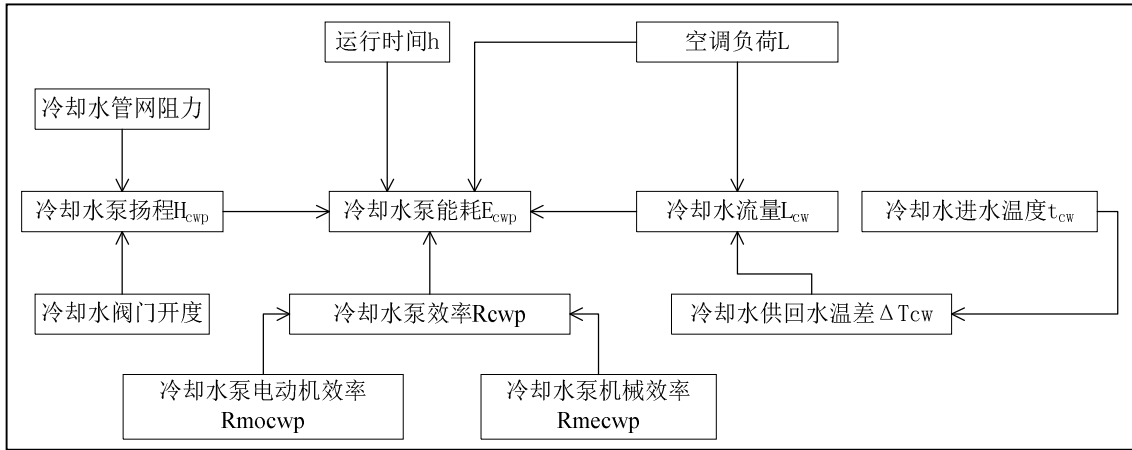


图 2-15 冷却泵能耗影响关系图

## 2) 冷却塔风机

冷却塔风机能耗可以近似地由式 (2-34) 描述:

$$E_{ctf} = \frac{P_{ctf} \times F_{ctf}}{R_{ctf}} \times h \quad (2-34)$$

整理可得冷却塔风机能耗  $E_{ctf}$  影响关系为式 (2-35):

$$E_{chi} = f(P_{ctf}, F_{ctf}, R_{ctf}, h, \Delta T_{cw}, T_{chw}, T_{cw}) \quad (2-35)$$

关系图如图 2-16。

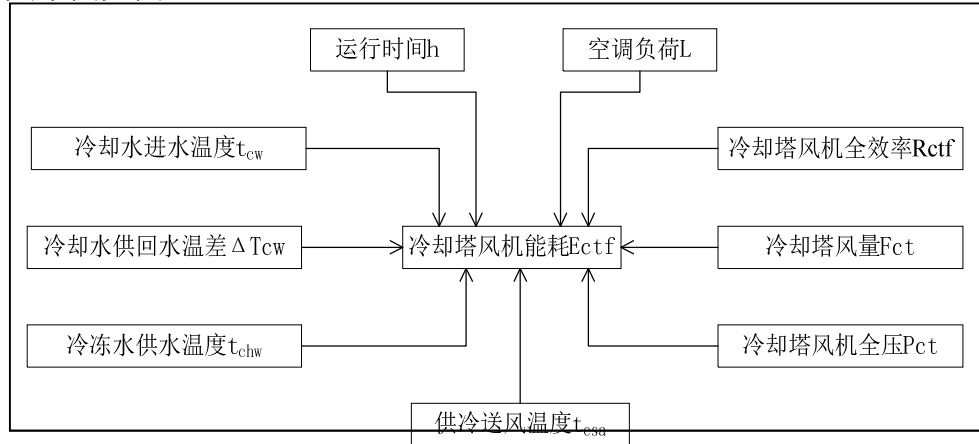


图2-16 冷却塔能耗影响关系图

对上述公式和各相关因素进行整理, 空调系统供冷能耗  $E_{chi}$  与影响因素的函数关系为式 (2-36):

$$E_{chi} = f(L_c, COP, PLR, h, H_{chwp}, H_{cwp}, P_{cf}, P_{ctf}, F_{cf}, F_{ctf}, L_{cwp}, L_{chwp}, R_{chwp}, R_{cf}, R_{cwp}, R_{ctf}, T_{csa}, T_{chw}, T_{cw}, \Delta T_{chw}, \Delta T_{cw}) \quad (2-36)$$

与空调供冷类似, 空调供暖能耗由锅炉能耗、热水泵能耗和空调供暖末端风机能耗组成, 可分别由式 (2-37) ~ 式 (2-39) 表示

锅炉能耗:

$$E_b = q_h \times h_h / R_b \quad (2-37)$$

热水泵能耗:

$$E_{hwp} = \frac{H_{hwp} \times L_{hwp}}{R_{hwp}} \times h_h \quad (2-38)$$

空调供暖风机能耗:

$$E_{hf} = \frac{P_{hf} \times F_{hf}}{R_{hf}} \times h_h \quad (2-39)$$

对上述公式和各相关因素进行整理, 空调系统供冷能耗  $E_{chi}$  与影响因素的函数关系为式 (2-40):

$$E_b = f(L_h, L_{hwp}, R_b, R_{mohwp}, R_{melhwp}, \Delta T_{hw}, T_{hsa}, R_{hf}, P_{hf}, F_{hf}, h_h) \quad (2-40)$$

## 2.4 基于校验的建筑能耗影响因素分类

建筑能耗由大量参数决定和影响, 总结以上分析, 所有的影响因素列于表 2-1。

表中所列举的参数是建筑能耗影响简练框架结构所包含的因子, 由此可知, 在建筑能耗模拟中, 常常需要面对着的是几十甚至几百的参数输入控制, 由此引发的校验工作是一项不确定性很高的事情。而如果对这样一个模型的参数全部进行校正, 那么可想而知是一项十分浩大的工程。大量的输入参数不能够完全被可获得的确定数据所决定, 可能导致参数输入的混淆和误差。

因此, 在进行校验之前, 对涉及的输入参数先进行梳理, 将它们分成模型校验的梯度顺序。

表 2-1 建筑能耗符号有向图参数

类别	编号	输入参数	类别	编号	输入参数
天气参数	1	室外空气温度	渗透	40	渗透空气量
	2	室外空气密度		新风	41
	3	室外空气焓值	42		单人所需新风量
	4	空气定压比热	人员	43	单个人体散热量
5	总太阳辐射强度	44		人员在室率	
照明	6	照明密度	45	群集系数	
	7	照明使用率	46	单个人体散湿量	
	8	照明区域的面积	冷机	47	冷水机组性能系数

	9	运行小时数		48	空调系统运行时间
<b>设备</b>	10	设备密度		49	冷水机组的负荷率
	11	设备使用率		50	冷冻水供水温度
	12	设备区域的面积		51	冷却水进水温度
<b>外窗</b>	13	运行小时数	<b>冷冻 水泵</b>	52	冷冻水泵扬程
	14	窗墙比		53	冷冻水流量
	15	窗户可见光透射率		54	冷冻泵效率
	16	外窗综合遮阳系数		55	冷冻水供回水温差
	17	外窗太阳辐射吸收率	<b>空调 风机</b>	56	供冷送风温度
	18	外窗对流传热系数		57	供冷风机全压
	19	外窗传热系数		58	供冷风机的送风量
	20	外窗黑度发射率		59	供冷室内空气温度
	21	外窗太阳得热系数	<b>冷却 水泵</b>	60	冷却水泵扬程
	22	外窗太阳辐射热透射率		61	冷却水流量
23	单位面积玻璃吸收的太阳辐射热		62	冷却水泵效率	
24	窗玻璃吸收太阳辐射热传向室内的分数		63	冷却水供回水温差	
25	单位面积窗玻璃吸收太阳辐射后传入室内的热量	<b>冷却 塔</b>	64	冷却塔风机全压	
26	单位面积透过玻璃窗直接进入室内的太阳辐射热		65	冷却塔风机的送风量	
27	单位面积外窗日射得热因数	<b>锅炉</b>	66	锅炉效率	
<b>外墙</b>	28		外墙面积	67	供暖运行时间
	29	外墙外表面与空气对流换热系数	<b>热水 泵</b>	68	供暖热水泵扬程
	30	外墙表面太阳辐射吸收率		69	供暖热水流量
	31	外墙表面黑度发射率	70	供暖热水泵效率	
	32	外墙表面长波辐射换热量	71	供暖热水供回水温差	
<b>屋顶</b>	33	外墙传热系数	<b>供暖 风机</b>	72	供暖送风温度
	34	屋顶面积		73	供冷风机全压
	35	屋顶外表面与空气对流换热系数	74	供冷风机的送风量	
	36	屋顶表面太阳辐射吸收率	75	供暖室内空气温度	
	37	屋顶表面黑度发射率			
	38	屋顶表面与天空和周围物体间的长波辐射换热量			
	39	屋顶传热系数			

首先,输入参数可以分为两类:可校验参数和不可校验参数。不可校验数据是指根据模拟人员所选择的模拟软件的不同,相应某些参数不便于在模型中输入,这部分参数要么通过公式化为其他可输入的参数,要么省略留给模拟软件默认计算。本文选择能耗模拟工具 eQuest 开展研究,则这一分类基于此软件。

可校验参数可进一步分为可获得参数和不可获得参数。可获得参数对应于实际情况中模拟人员可获得的准确数据,如建筑的物理尺寸、窗户的类型、设备的

台数、天气参数等。获得的途径可以通过获取建筑图纸，也可以是走访调研，或者与运行维护人员交谈。不可获得参数包括围护结构的热工特性、风机水泵的效率等等，它们不能够通过观测直接得到，那么就需要进一步分析。

不可获得参数再细分为时间表参数和调整类参数。时间表参数是具有随机性且具有 24 维，不适用于专家库系统中的符号有向图的校验，所以用规则判断的方法先将其调整。剩下的参数则是调整类参数，利用本文所建立的符号有向图校验部分完成校验。

调整类参数可通过敏感性分析再分为强影响参数和弱影响参数。强影响类参数对相应的能耗具有更大的影响力，在需要的情况下可以基于敏感性分析可对符号有向图模型进行简化，提高校验的效率。

具体的分类见图 2-17。需要注意的是，本文仅提出此分类方法，而其中所涉及的具体参数可能根据不同的模拟案例有所不同。

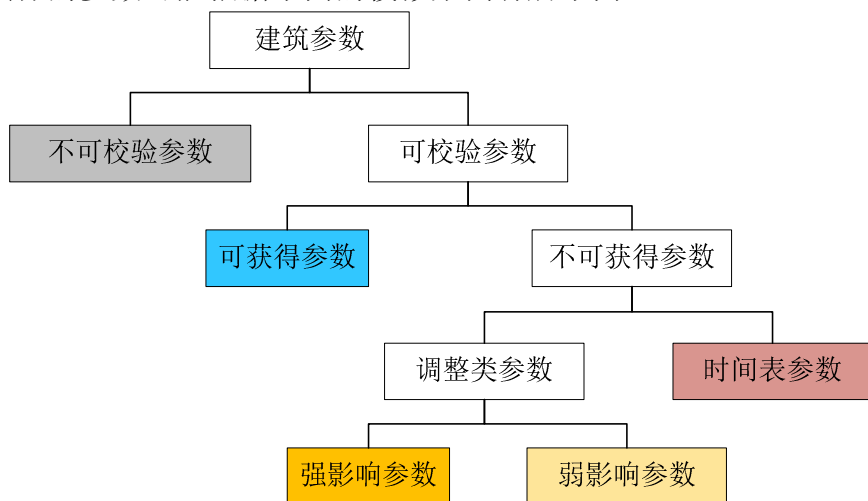


图 2-17 输入参数的分类

## 2.5 建筑能耗的符号有向图

按照第一章介绍的方法，根据第二章中所分析的建筑能耗中的影响关系，建立建筑能耗的符号有向图，见附录 A。建筑能耗符号有向图包括 86 个节点，每个节点的分类按照 2.2 的分类方法涂色，所有节点中，有 14 个不可校验参数、18 个可获得参数、9 个时间表参数和 45 个调整类参数。根据具体建筑能耗模型校验需要，进一步的分类和简化将在第四章中阐述。

建筑能耗的符号有向图中，箭头表示影响关系，箭头上的正负号表示影响方向，即正号表示正影响，负号表示负影响，问号表示视情况而定。两者之间的影响方向是假定其他参数不变的情况下而确定。

## 2.6 本章小结

本章通过细致研究建筑能耗相关各物理参数之间、参数和能耗之间因果关系的理论基础，建立从围护结构、室内人员等负荷侧到冷热源、输配系统等供应侧的建筑能耗符号有向图，并依据模型校验目的对图中所涉及参数进行分类，为进一步的能耗模型校验打好基础。



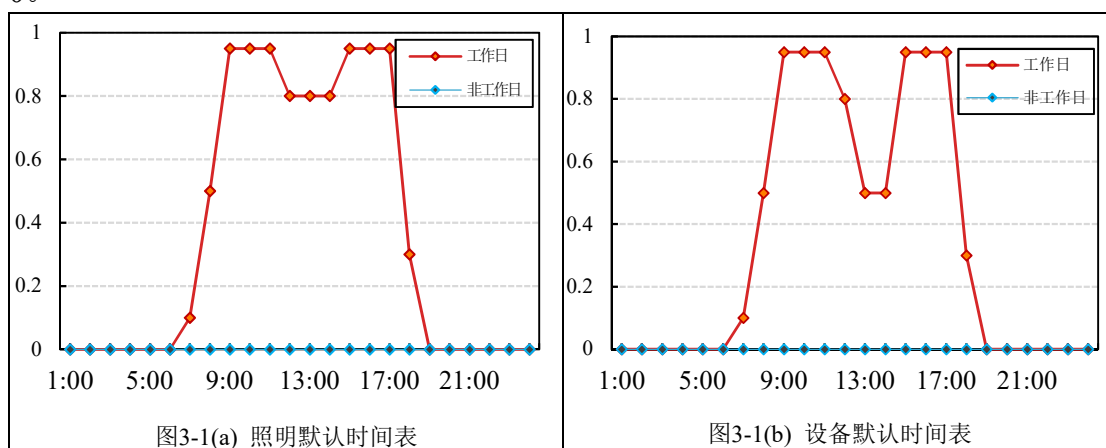
## 第3章 建筑能耗模型中时间表的校验

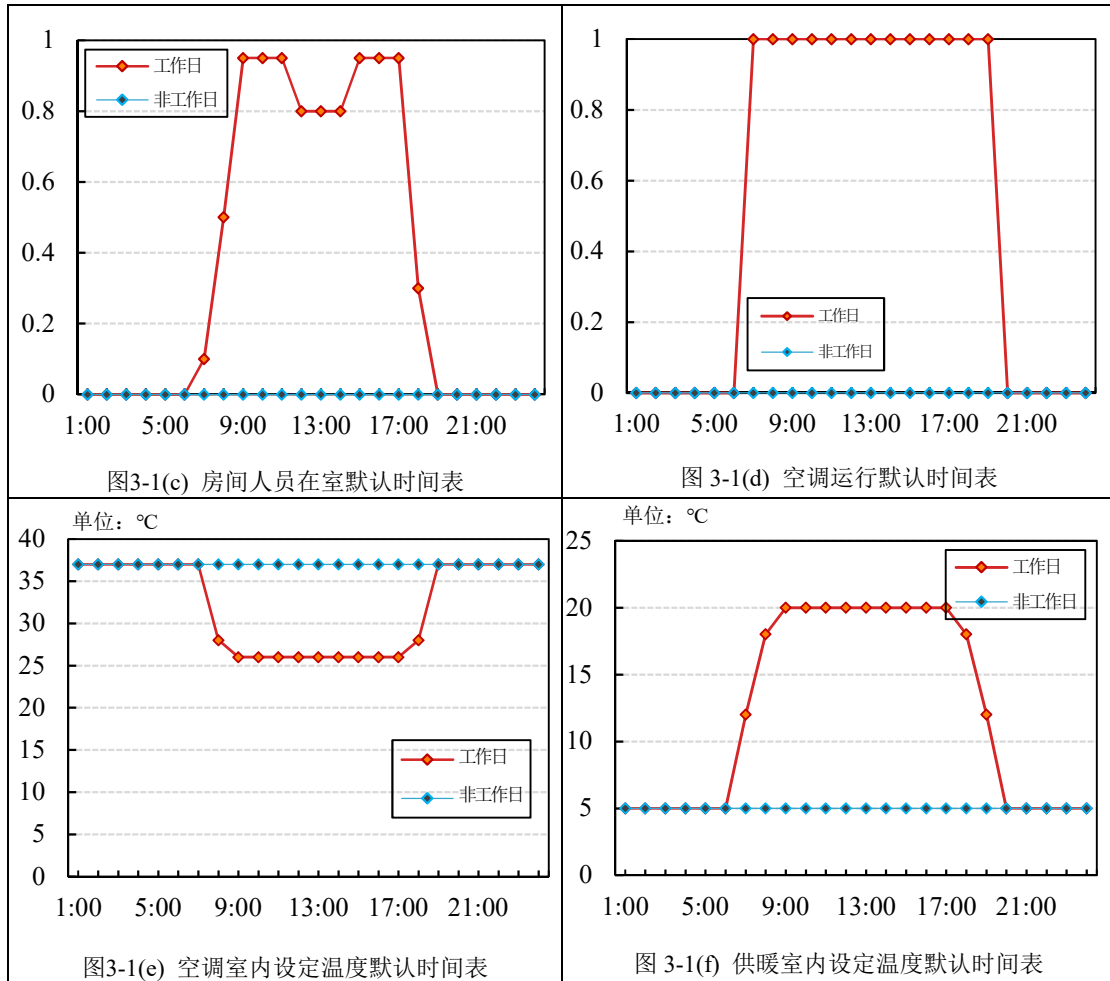
### 3.1 时间表在建筑能耗模拟中的作用

建筑中的运行时间表一般包括照明系统时间表、设备系统时间表、人员在室时间表和空调运行时间表。已有很多研究表明，建筑中的运行时间表在能耗模拟中占有重要的地位，对能源消耗量有很大的影响<sup>[81,82]</sup>。同时，时间表因为是一组随机性很大的参数，很难进行校正，所以在通常情况下，建筑能耗模拟中，时间表一般采用默认时间表代替。默认时间表如图3-1所示。为了更清楚地展示，时间表以连接时刻对应点值的连续线段表示，而不是24小时连续的点。默认时间表的建立是结合上海市办公建筑使用较多情况所得到的。

以上时间表可分为两类，一类是百分比，包括照明系统、室内设备、人员在室和空调运行，百分比表示当下时刻的负荷与满负荷的比值，其中空调运行是比较特殊的时间表，只有启停的状态，也即是说，每一时间步长上，它的值只有0或1；另一类是温度，空调供暖或者供冷时室内的设定温度变化情况。

以照明时间表为例（见图3-1(a)），分析一天的时间表情况。从凌晨0点到早晨6点，照明的负荷率都为0，这是因为这个时间段办公人员在家休息，所以办公室的照明系统是完全关闭的。从7点开始，照明负荷率开始变化。大多数工作是从9点开始，7点已有部分人提前到办公室。因为还未到正式办公时间，所以这个时候的在室人员还不多，所以相应的照明负荷率只有0.1左右，到8点逐渐上升至0.5左右，最后到9点达到0.95。上午的工作时间是9点到12点，所以12点时，负荷率降为0.8，接着在15点回到0.95并持续三个小时。接着因为下班时间普遍为17点，所以17点之后照明负荷率陡然下降，最后在19点重新变为0。19点到24点因为办公室没有人工作，所以跟0点到6点一样，这个时间段的负荷率一直维持在0。





## 3.2 实际时间表

### 3.2.1 实际时间表简介

如 3.1 所说，目前建筑能耗模拟所用的时间表为公认的默认时间表。为了研究默认时间表和实际时间表之间的差别，对上海某办公建筑进行调研，选取其 17-23 层这一分区的 2016 年 10 月的照明能耗数据，分析实际照明时间表的情况。

只取一个分区，有助于减少测量的工作量，同时数据覆盖的广度已经足以展示实际情况。取 10 月这个月份的原因在于，这一月可以同时覆盖三种时间表类型，即工作日、周末和节假日，其中工作日 18 天，周末 6 天，节假日为国庆长假 7 天。

统计出的 10 月份的照明系统能耗数据见图 3-2，其中红色代表工作日，蓝色代表周末，绿色代表节假日。10 月份照明总能耗为 65223.94kWh，其中逐时能耗最大值为 183.91kWh，发生在 10 月 31 日 17 点，当天为工作日。逐时最小值为 29.89kWh，发生在 10 月 3 日凌晨 3 点，当天为法定节假日国庆长假的第三天。

选出 744 个时刻中的最高能耗值作为最大照明负荷，每个时刻的能耗值与其的比值则为该时刻的负荷率，连接成线则组成 10 月 31 天的实际照明时间表，见图 3-3。

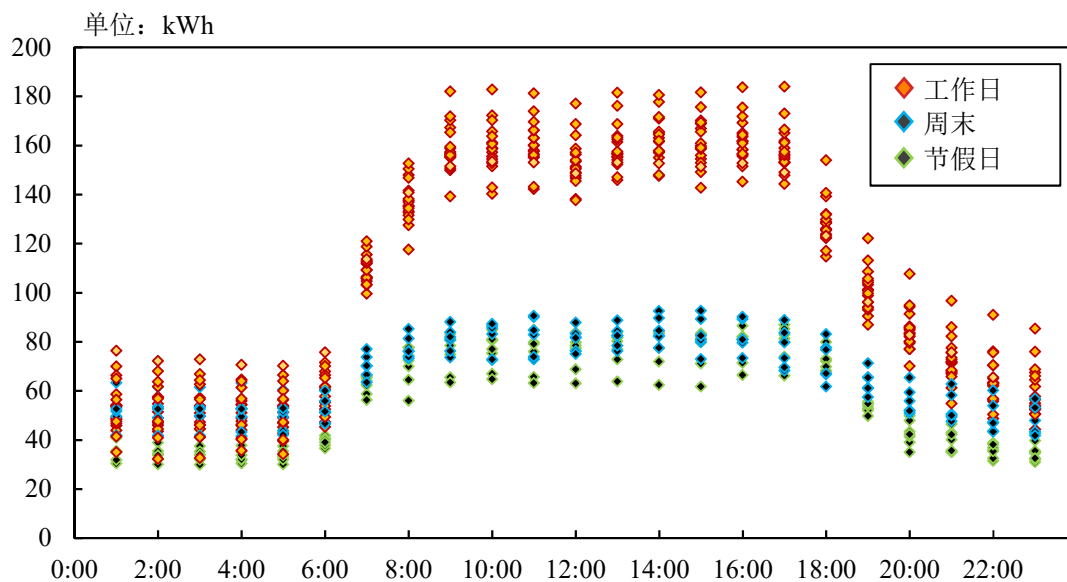


图 3-2 2016 年 10 月照明系统能耗数据

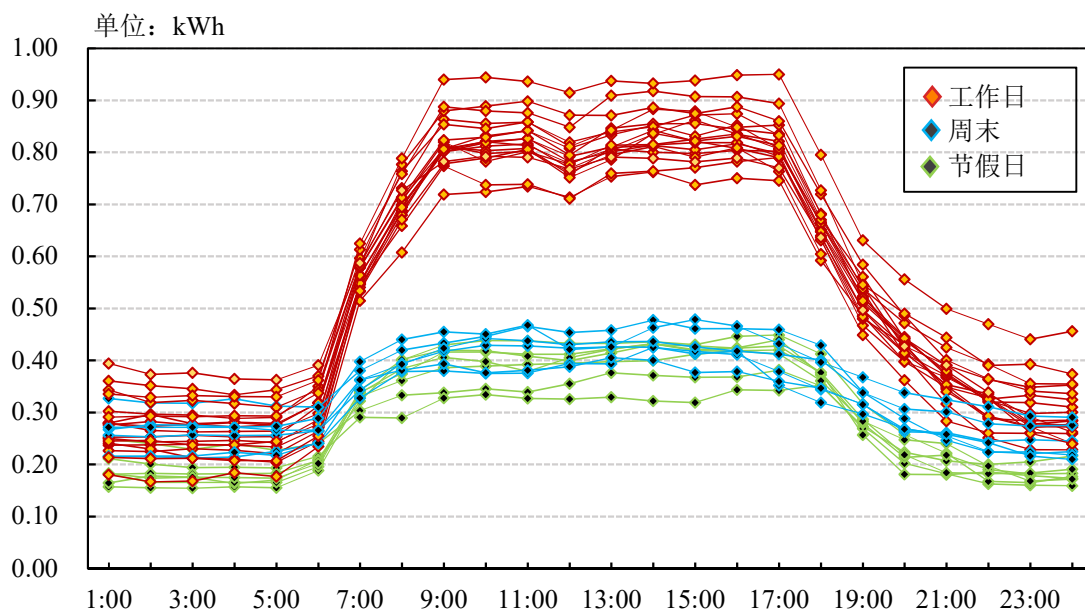


图 3-3 2016 年 10 月逐日的照明时间表

### 3.2.2 实际时间表和默认时间表的比较

为了比较实际时间表和默认时间表的差异，从图 3-3 中选取工作日、周末及节假日的时间表和 3.1 中所展示的默认时间表进行对比，并共同呈现在图 3-4 中。其中节点标记菱形的时间表为实际时间表，节点标记圆形的时间表为默认时间表。

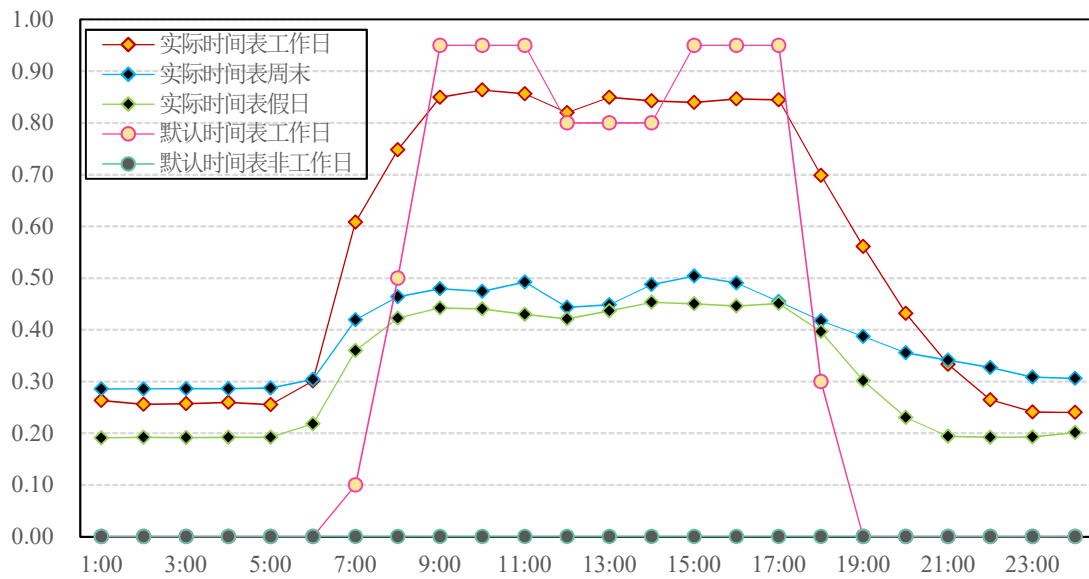


图 3-4 实际时间表和默认时间表的对比

从图 3-4 中两个时间表的比较可以直观地看到两者有一定的相似性：

1) 两种时间表的工作日都呈双峰形状，且都在 12 点负荷率降低。因为此时进入午休时间。

2) 两者的正常工作时间一致，即早上九点上班，下午 5 点下班。

同时，这两种时间表之间也存在差别：

1) 实际时间表的类型有三种，分别为工作日、周末和假日。而默认时间表只有两种类型，即工作日和非工作日。虽然默认时间表相对简单，但是可以看到，实际上周末和假日的时间表有所差别，假日的时刻负荷率普遍比周末的时候低。

2) 默认时间表在非工作日默认为负荷率恒定为 0，而实际时间表并非如此。在实际中，即使非工作日也有一部分人在上班，所以负荷率大于零却会随着时间有所变化。

3) 实际的工作时间与默认时间表中有所不同。实际中的办公存在一定的加班情况，而默认时间表中未考虑。

为了进一步从量上来分析两种时间表的差别，利用建筑能耗模拟工具 eQuest 建立一栋虚拟建筑，并且将实际时间表和默认时间表分别带入，观察分析两者的模拟结果。

这栋虚拟建筑为 12 层、层高为 4 米的办公建筑，其标准层为 1600m<sup>2</sup>。根据调研结果和《公共建筑节能设计标准》<sup>[83]</sup>确定其围护结构、系统设置等各项参数，具体设置见附录 E。建筑能耗模型的节假日都按照 2016 年的国家法定节假日设置。考虑到调休制度，每假日的设置之前，先将在周末的工作日调整至周内再计

算。

该办公建筑在不同的照明时间表下的全年能耗值见图 3-5，选择具有代表性的照明能耗、空调能耗、供暖能耗进行比较。在默认时间表下，全年的照明能耗为 470.3MWh，而实际时间表下为 857.5MWh，两者相差 387.2MWh，占实际值的 45.13%。由于照明系统运行时，一部分光能会转化成热能，所以照明所产生的热量也会随之发生变化。因为热量的变化对空调负荷和供暖负荷有着不同方向的影响，所以此时相对默认时间表下，实际时间表下的照明能耗相对升高，导致空调能耗增加（从 572.9MWh 增加至 593.5MWh，增幅为 3.60%），供暖能耗降低（从 2539.50 MBtu 降至 2497.70MBtu，降幅为 1.65%）。由此可见，不同的时间表对建筑能耗产生着影响，特别是对于直接相关的能耗值，影响尤胜。

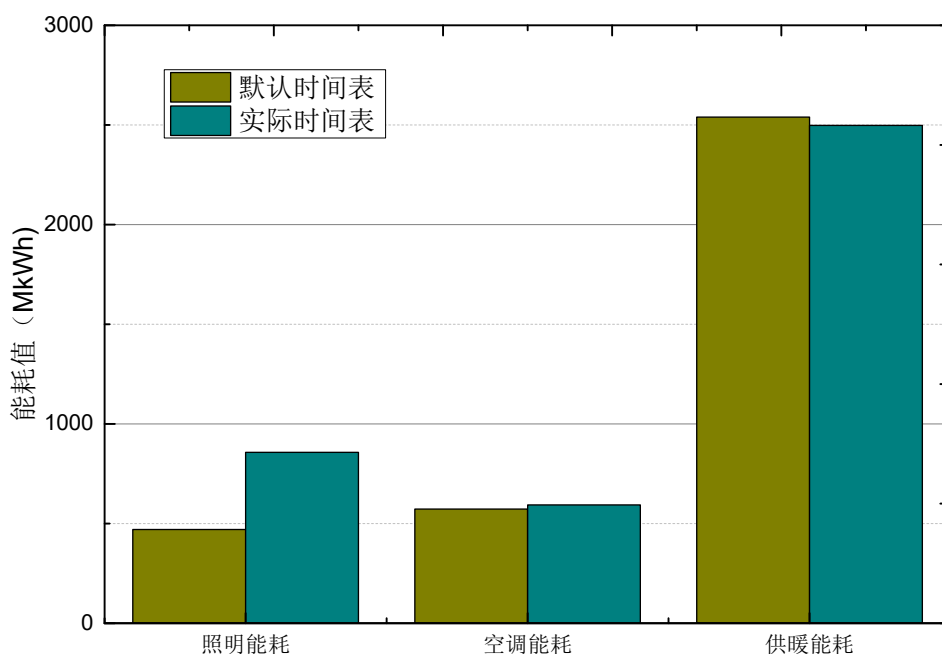


图 3-5 照明系统默认时间表和实际时间表下的建筑能耗比较

从以上分析可知，不同的时间表将产生不同的建筑能耗，使用默认时间表将很大程度上使模拟能耗偏离实际建筑能耗，从而削弱建筑能耗模型的可信度。因此，在进行建筑能耗模拟时，对时间表的校验很有必要。

### 3.3 时间表的校验

以上分析已经说明时间表在建筑能耗模拟中的重要地位以及需要对时间表进行校验的必要性，因此接下来本文阐述对于建筑时间表的校验方法。有研究表明<sup>[84]</sup>，利用敏感性分析或者最优化算法很难对建筑运行时间表进行校验，其原因在于时间表所包含的可能的变量太多变化太随机。如果没有进行正确的限定，那

么算法将仅仅只能开展以数学统计上的校验为目标的时间表校验，而时间表是否得到正确调整不得而知。这将很有可能造成逐月的数据校验的错误。

另外，对于没有逐时计量数据的建筑，很难进行具体精细的时间表生成。所以本文提出基于短期测量数据的“典型日时间表校验法”。

### 3.3.1 照明和设备系统时间表的校验

照明系统和设备系统的时间表是介于 0~1 闭区间的值，由 24 小时每一时刻的负荷率组成。因设备时间表和照明时间表的校验方法一致，所以以照明为例进行校验方法的阐述：

1、数据获得。在一年十二月中选择同时覆盖三种日类型的月份进行一月的照明能耗逐时检测，三种日类型的类型包括工作日、周末和假期。推荐选择节假日较多的月份。

2、数据分类。将检测得到的建筑照明能耗数据按工作日、周末和假期进行分类。如图 3-2。

3、计算照明密度。选择一月最高峰值时能耗为最大照明负荷，并以此折算出照明密度，见式 (3-1)。需要注意的是，此照明密度即为确定的校验值，在之后的各步校验中不再更改。

$$q_{lt} = \frac{Q_{lr\max} / 1h}{A} / \alpha_{lr\max} \quad (3-1)$$

式中，

$q_{lt}$ ——建筑照明负荷，单位为 kW/m<sup>2</sup>；

$Q_{lr\max}$ ——照明最高峰值时能耗，单位为 kWh；

$A$ ——建筑面积，单位为 m<sup>2</sup>；

$\alpha_{lr\max}$ ——照明负荷系数，一般取 0.95。

4、计算时刻负荷率。时刻负荷率由每一时刻的建筑照明能耗和峰值能耗计算得到，见式 (3-2)。所得图像如图 3-3。

$$n_{lthd} = \frac{Q_{lthd}}{Q_{lt\max} / \alpha_{lt\max}} \quad (3-2)$$

式中，

$n_{lthd}$ ——第 d 天第 h 小时的时刻负荷率；

$Q_{lthd}$ ——第 d 天第 h 小时的照明能耗，单位为 kWh。

5、基础典型日时间表生成。分别在工作日、周末和节假日三种日类型的所有照明时间表中，每一时刻取平均值，得到三种基础典型日时间表，由式 (3-3) 计算，时间表示例图见图 3-6。

$$n_{lthi} = \frac{\sum_{di} n_{lthdi}}{D_{di}} \quad (3-3)$$

式中,

$n_{lthi}$ ——日类型  $i$  的第  $h$  小时的时刻负荷率;

$n_{lthdi}$ ——日类型  $i$  的第  $d$  天第  $h$  小时的典型日时刻负荷率;

$D_{di}$ ——日类型  $i$  的天数。

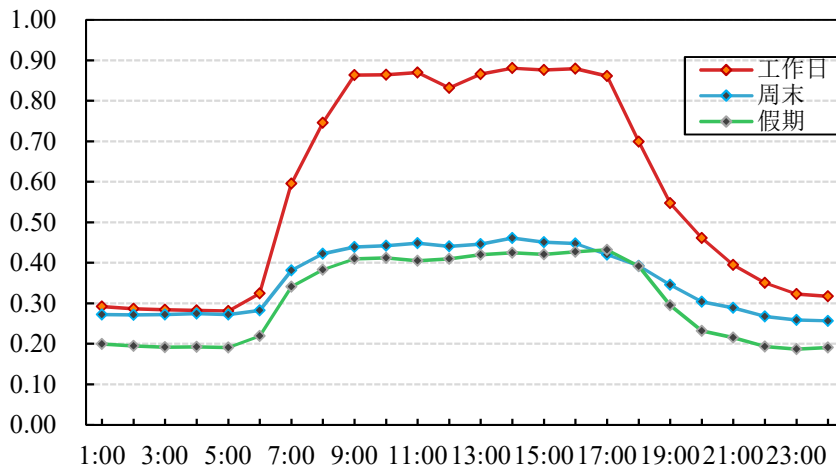


图 3-6 三种基础典型日的照明时间表

6、逐月时间表生成。根据第三步中计算的照明负荷以及月照明能耗，以等比例放大和缩小的方式，得到逐月时间表，见式 (3-4) ~ 式 (3-5)。此逐月时间表即为实际时间表。

$$n_{lthim} = n_{lthi} \times \delta_{ltm} \quad (3-4)$$

$$\delta_{ltm} = \frac{Q_{ltm}}{\sum_i \sum_h n_{lthi}} \quad (3-5)$$

式中,

$\delta_{ltm}$ ——逐月照明时间表缩放系数;

$Q_{ltm}$ ——照明月能耗，单位为 kWh。

### 3.3.2 人员在室时间表的校验

因为人是建筑及其室内环境存在的前提，所以在实际的建筑中，人员在室的数量将影响室内照明、设备、空调负荷等，与建筑能耗息息相关。人员在室率的时间表同样在建筑能耗模拟中占有重要地位。室内人员在室情况可以通过人员检测设备（如红外线仪）得到，也可以通过二氧化碳聚集情况、室内温度变化、光线变化等周围检测来间接获得<sup>[85]</sup>。同时，Bertagnolio<sup>[86]</sup>研究表明，相比于室内负荷，建筑室内人员数量与电耗具有更强的相关性。Yang-Seon Kim<sup>[84]</sup>等人也于近期研究发现，室内人员数量与室内设备的使用情况也存在一定关系。因此，基于

在人员在室方面已有相对完整的研究成功以及本课题研究过程中实验条件的限制，所以本文借用 Yang-Seon Kim 的方法计算室内人员数量，并以此生成实际人员在室率的时间表。

1、计算逐月典型日时刻室内设备能耗值。利用已生成的逐月设备时间表，结合照明密度和建筑面积，计算一年中每月典型日下的逐时室内设备能耗值。计算式如式 (3-6)。

$$Q_{eqpthi} = n_{eqpthi} \times q_{eqpt} \times A \times 1h \quad (3-6)$$

式中，

$Q_{eqpthi}$ ——典型日  $i$  下时刻  $h$  室内设备能耗值，单位为 kWh；

$n_{eqpthi}$ ——典型日  $i$  下时刻  $h$  室内设备负荷率；

$q_{eqpthi}$ ——建筑设备功率密度，单位为  $W/m^2$ 。

2、计算时刻人员在室数。利用 Yang-Seon Kim 室内人员与设备的相关关系公式，由时刻室内设备的能耗值得到时刻人员在室数。计算式如式 (3-7)。

$$p = \beta_1 Q_{eqpt} + \beta_0 \quad (3-7)$$

式中，

$p$ ——人员在室数；

$\beta_1$ 、 $\beta_2$ ——计算常数，其中  $\beta_1$  取 5， $\beta_2$  取 -113。

$Q_{eqpt}$ ——室内设备能耗。

3、计算时刻人员在室率。选取时刻人员在室数的最大值作为基准，时刻人员在室率由每一时刻的人员在室数和时刻人员在室数的最大值计算得到。计算式如式 (3-8)。

$$n_{phi} = \frac{p_{hi}}{p_{max}} \quad (3-8)$$

式中，

$n_{phi}$ ——典型日  $i$  下第  $h$  小时的时刻人员在室率；

$p_{hi}$ ——典型日  $i$  下第  $h$  小时的时刻人员在室数；

$p_{max}$ ——最大时刻人员在室数，此时可与最大时刻室内设备能耗的时间一致。

4、逐月典型日时间表生成。将第三步中某典型日下的人员在室率合并，即为该典型日的时间表。

### 3.3.3 空调运行时间表的校验

这里所说的空调运行时间表同时包括供冷和供暖。空调运行时间表可分为三个部分：空调启停时间表、室内供冷设定温度时间表以及室内供暖设定温度时间表。



### 1、空调启停时间表

空调启停时间表是最简单的时间表形式，其每时刻的值只有0或1，开启即为1，关闭即为0。上海市办公建筑的空调启停运行一般都按照《公共建筑节能设计标准》设定，即工作日系统开启的时间为7:00~18:00，非工作日为全天停止。进行空调启停时间表的生成，可以利用冷机的运行状况。

1) 数据获得。在检测照明和设备能耗的当月，同时进行风机盘管逐时能耗的监测。

2) 计算时刻启停值。当某时刻的风机盘管能耗值为0时，则此时刻的时间表为0，反之为1。

$$\begin{cases} n_{achi} = 0, & Q_{fcuhi} = 0 \\ n_{achi} = 1, & Q_{fcuhi} > 0 \end{cases} \quad (3-9)$$

式中，

$n_{achi}$ ——典型日*i*下时刻*h*的空调启停值；

$Q_{fcu}$ ——典型日*i*下时刻*h*的风机盘管能耗，单位为kWh。

3) 生成时间表。三种典型日下，某一时刻最多的状态则为该典型日下该时刻的时间表值。

### 2、室内供冷供暖设定温度时间表

设定温度时间表可以通过对不同季节的室内设定温度进行检测，然后按照以上照明时间表的生成方法获得。另外，考虑到设定温度检测的复杂性，也可按照《公共建筑节能设计标准》所规定的室内温度设定值在模型中输入，具体见表3-1。

表3-1 室内设定温度(°C)

时刻	供冷		供暖	
	工作日	非工作日	工作日	非工作日
<b>1:00</b>	37	37	5	5
<b>2:00</b>	37	37	5	5
<b>3:00</b>	37	37	5	5
<b>4:00</b>	37	37	5	5
<b>5:00</b>	37	37	5	5
<b>6:00</b>	37	37	5	5
<b>7:00</b>	37	37	12	5

<b>8:00</b>	28	37	18	5
<b>9:00</b>	26	37	20	5
<b>10:00</b>	26	37	20	5
<b>11:00</b>	26	37	20	5
<b>12:00</b>	26	37	20	5
<b>13:00</b>	26	37	20	5
<b>14:00</b>	26	37	20	5
<b>15:00</b>	26	37	20	5
<b>16:00</b>	26	37	20	5
<b>17:00</b>	26	37	20	5
<b>18:00</b>	28	37	18	5
<b>19:00</b>	37	37	12	5
<b>20:00</b>	37	37	5	5
<b>21:00</b>	37	37	5	5
<b>22:00</b>	37	37	5	5
<b>23:00</b>	37	37	5	5
<b>24:00</b>	37	37	5	5

### 3.4 本章小结

本章探讨了时间表在建筑能耗模拟中的作用和影响,通过实际时间表和默认典型时间表的比较,分析利用实际时间表进行模拟的必要性。同时,也提出时间表的校验方法——“典型日时间表校验法”。

## 第4章 建筑能耗模型中调整类参数的校验

### 4.1 调整类参数的符号有向图模型简化

#### 4.1.1 简化的意义

在实际应用中，模型的质量非常重要，低水平的模型会给出实际过程完全不可能出现的结论，甚至是完全错误的结论。这种模型不能投入应用。

评价符号有向图的方法主要有两方面：一是完备性，即是在符号有向图中能够搜寻到全部相关且正确的解，这也是它优于模式识别等产生式规则一部分原因；另一方面是高分辨率，即在符号有向图模型中搜索给出尽量少的准确解。

但是，在实际应用中，这两者难以兼顾。因为符号有向图是一种定性模型容易出现多义性结论，所以，当注意了模型的完备性，往往会降低模型的分辨率；而注意了模型的分辨率，有可能降低了模型的完备性。解决此问题不能仅靠修改或简化模型，还必须借助于定量信息、增加约束条件、采用特殊的推理机制等方法，其中增加定量信息的作用尤甚。理想情况是，当模型中所有的节点都是可观测的、所有因果关系都是单调变化函数，并且模型必须是完全正确的，则可以达到比较高的完备性和分辨率。

因为第二章所建立的建筑能耗符号有向图是采用知识经验法建立的模型，所以容易出现错误和遗漏，必须进行反复修改和简化。同时简化的目的也在于提高校验的效率。

#### 4.1.2 简化的原则

本文在这一章对建筑能耗符号有向图进行简化，核心是为了便于对调整类参数进行校验，提高搜索质量。故主要的原则如下。

##### 1、可获得参数的简化

建筑的长宽高、窗墙比等建筑几何信息已经在图纸中详细确定，在建造的过程中也不太会更改，所以它们没有必要再进行校验。室外温度、湿度、空气密度等室外参数为模拟目标年所采集的实时监测数据，不需要修改。不过由于气象监测站的位置差异，目标建筑室外条件与气象站数据确实有一定的差别，但由于涉及 8760 小时的天气参数，数据量太过庞杂，本文暂时也没有能力去修改，故将此参数简化。

##### 2、已完成校验参数的简化

在第三章中，已经对建筑能耗中所涉及的时间表以及有关的照明负荷、设备

负荷等进行校验，完成之后，不必再对其进行调整，故在这一步中将其简化。

### 3、模拟软件中难以设置的参数的简化

本文建立建筑能耗模型的工具是 eQuest，不同的能耗模拟工具都有其自身的局限性。根据 eQuest 的特性，本文将冷冻水阀门开度、冷却水阀门开度、冷却水泵电动机效率、冷冻水泵电动机效等进行简化。

### 4、不可测量参数的简化

简化之后的用于调整类参数校验的建筑能耗符号有向图见图 4-1。

## 4.2 调整类参数校验的方法和逻辑

对于调整类参数的校验主要有两个关键性步骤，这也是整个建筑能耗模型校验过程中最重要的两步，即待调整参数的确定和调整幅度的建议。之所以称之为建议，是因为通过在第一章中对科学模型的分析，由于建筑能耗模型多输入的关系，在缺少中间参数测量数据的前提下，很难做到百分百确定的调整方案，所以只能通过一定的建议去辅助模拟人员进行调整。当然，如果可以获得更多的中间数据，将可以很大程度上缩小调整建议的范围。

本文提出的对于调整类参数的校验方法，主要是基于建筑能耗符号有向图。推理逻辑也即是由符号有向图的推理机制产生。

符号有向图的推理机制一般分两种，即反向推理机制和正向推理机制。

### 1、反向推理机制

反向推理是在已知的样本中进行，从当前所关注的后果节点向可能的所有原因节点反向探索可能的影响通路。从选定的后果节点向前搜索完备的且独立的相容影响通路，从而得到可能的原因节点集。本文提出的基于符号有向图的建筑能耗模型中调整类参数的校验中调整参数的确定，则是属于此项推理机制。

### 2、正向推理机制

正向推理的前提是模型的所有节点的状态未知。在模型节点状态未知的情况下多采用此推理方法。在模型中，从选定的原因节点向后果节点搜索。每一个原因节点都要对所有的后果节点做一次全面搜索，并且在搜索中对通路经过的节点作相容标记（预估）。最后应当对所有搜索到的可能的且独立的相容通路进行合理性分析。本文在后文幅度调整建议中即用到此推理路径，建立输入参数与输出参数的关系，作为幅度调整建议的依据。

因此，调整类参数的校验是利用符号有向图生成待调整参数集合，然后根据事先分析的输入参数和各空调部件的关系提供对于集合中参数的调整建议。

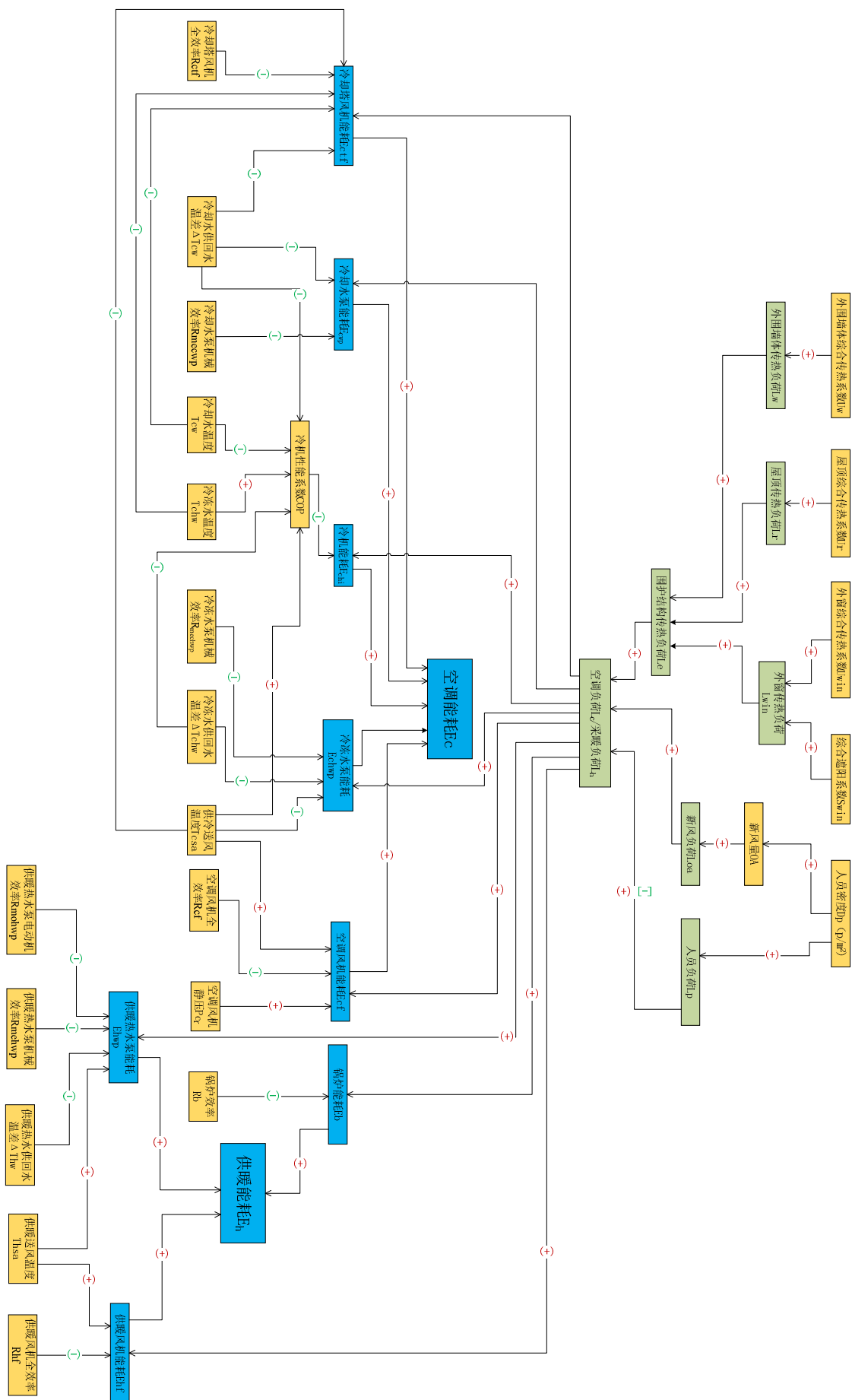


图 4-1 调整类参数校验用的建筑能耗符号有向图

### 4.2.1 待调整参数的确定

待调整参数的确定基于建立的调整类参数校验用的简化建筑能耗符号有向图，这个过程属于符号有向图的向前推理机制。确定待调整参数的推理需要在保持完备性的前提下，不重复的穷举模型的可能影响通路。准确和高效的搜索方式在推理机制中至关重要。对于大系统的模型，可采用深度优先或广度优先搜索算法进行遍历。本文所涉及的符号有向图在简化之后相对简单，所以用简单的穷举搜索算法即可。

待调整参数集的搜索方法如下：

- 1、搜集数据。利用能源检测系统得到目标模拟建筑的实际逐月分项能耗值。

- 2、计算每个后果节点的方向。比较冷机、水泵、锅炉等空调部件的逐月模拟能耗和实际能耗，根据模拟数据相对测量数据的偏差正负得到每个后果节点的方向。需要注意的是，模拟本身一定存在误差，因此本文设定，进入搜索的分项能耗的前提是其逐月误差 5% 以上。5% 这一数字是根据第一章所提到的规范制定。

- 3、搜索对应于单个分项能耗的待调整参数集。根据单个后果节点的方向以及与之相关的路径通路符号搜索可能的待调整参数集。

- 4、生成总待调整参数集。将每个分项能耗的待调整参数合并，如果某一输入参数在不同的参数集中的偏差方向相反，或者影响目标部件以外的能耗，则舍弃这一输入参数。

以冷机能耗为例说明调整类参数校验中待调整参数集的搜索。图 4-2 即为与冷机能耗相关的局部建筑能耗符号有向图。假设冷机的能耗增大，则根据符号路径，可能是空调效率侧的额定 COP 设置偏低，因为根据第二章分析，冷机能耗与 COP 呈正相关。也有可能是冷冻水温度过低，因为冷冻水温度降低将导致冷机的蒸发温度降低，而冷机的 COP 又与其蒸发温度呈正相关，蒸发温度降低导致 COP 随之降低，因而冷机的能耗升高。再者，也可能是外墙传热系数、综合遮阳系数等负荷侧参数设置偏高。在实际情况下，冷机的负荷率对其 COP 有一定的影响，而在能耗模拟中，冷机的 COP 曲线处于自动状态，可以使冷机的 COP 一直处于最优值。因此，此时很有可能负荷侧某参数偏高。每一条影响路径都有其内在的物理逻辑，完整的可能输入参数偏差见表 4-1。

当完整的待调整参数集以及调整次序确定之后，就可以对目标输入参数进行调整。

以上基于建筑能耗符号有向图的可能调整参数的搜索，可通过计算机程序自动实现。本文在研究过程中利用 Python 语言进行编程，部分代码见附录 B。

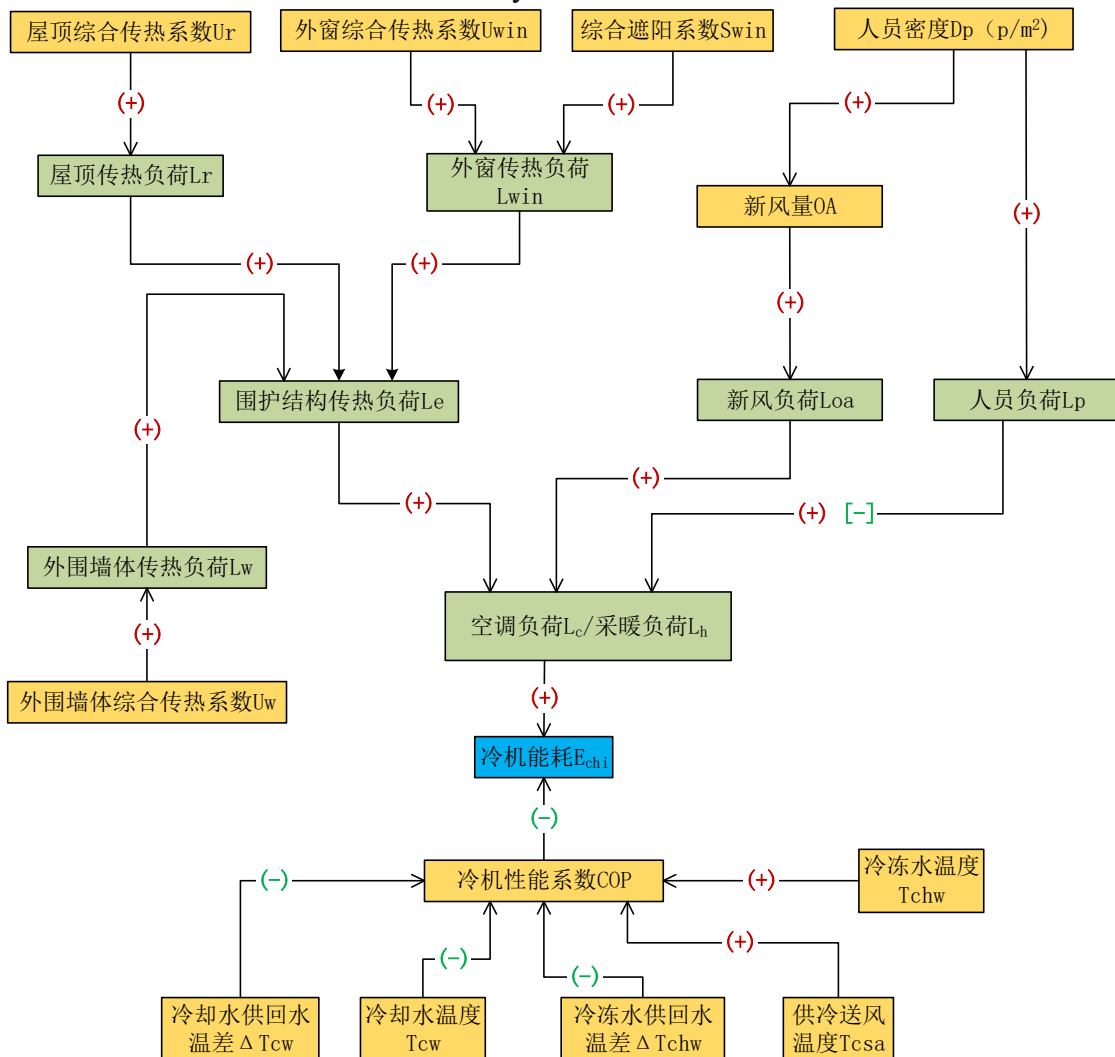


图 4-2 与冷机能耗相关的局部建筑能耗符号有向图

表 4-1 造成冷机能耗偏高可能的输入参数集

输入参数	冷机能耗 $E_{chi+}$
墙体综合传热系数 $U_w$	+
屋顶综合传热系数 $U_r$	+
外窗综合传热系数 $U_{win}$	+
综合遮阳系数 $S_{win}$	+
外窗面积 $A_{win}$	+
人员新风量 $OA_p$	+
人员密度 $D_p$ ( $p/m^2$ )	+

冷却水供回水温差 $DT_{cw}$	+
冷机性能系数 COP	-
冷却水温度 $T_{cw}$	+
冷冻水温度 $T_{chw}$	-
冷冻水供回水温差 $DT_{chw}$	+
供冷送风温度 $T_{csa}$	-

#### 4.2.2 调整幅度的建议

调整幅度的建议是基于实现建立的输入参数和输出参数之间的关系公式而建立。关系公式的建立是利用 4.2.1 中所提到的符号有向图的正向推理机制所得。以建筑外墙传热系数为例，说明符号有向图的正向推理机制，其影响路径见图 4-3。

从图 4-3 可以看到，外墙传热系数首先对建筑的空调负荷产生影响，进而通过对负荷的改变影响整个空调系统。包括外墙传热系数在内的所有负荷侧的输入参数都对整个建筑能耗产生全局影响。具体的影响方向可见图 4-3，本文将在下文对每一项输入参数进行详细分析。

在分析的过程中，同时计算单个输入参数对不同的分项能耗的敏感性，此可作为参数调整优先次序的依据。选取微分敏感性分析式进行计算，如式（4-1）。

$$IC = \frac{\frac{\Delta E_i}{E_{ib}}}{\frac{\Delta IP_j}{IP_{jb}}} \quad (4-1)$$

式中，

IC——敏感性因子；

$\Delta E_i$ ——分项 i 的能耗变化值，单位为 kWh；

$E_{ib}$ ——分项 i 的基准能耗，单位为 kWh；

$\Delta IP_j$ ——输入参数 j 的变化值；

$IP_{jb}$ ——输入参数 j 的基准值。



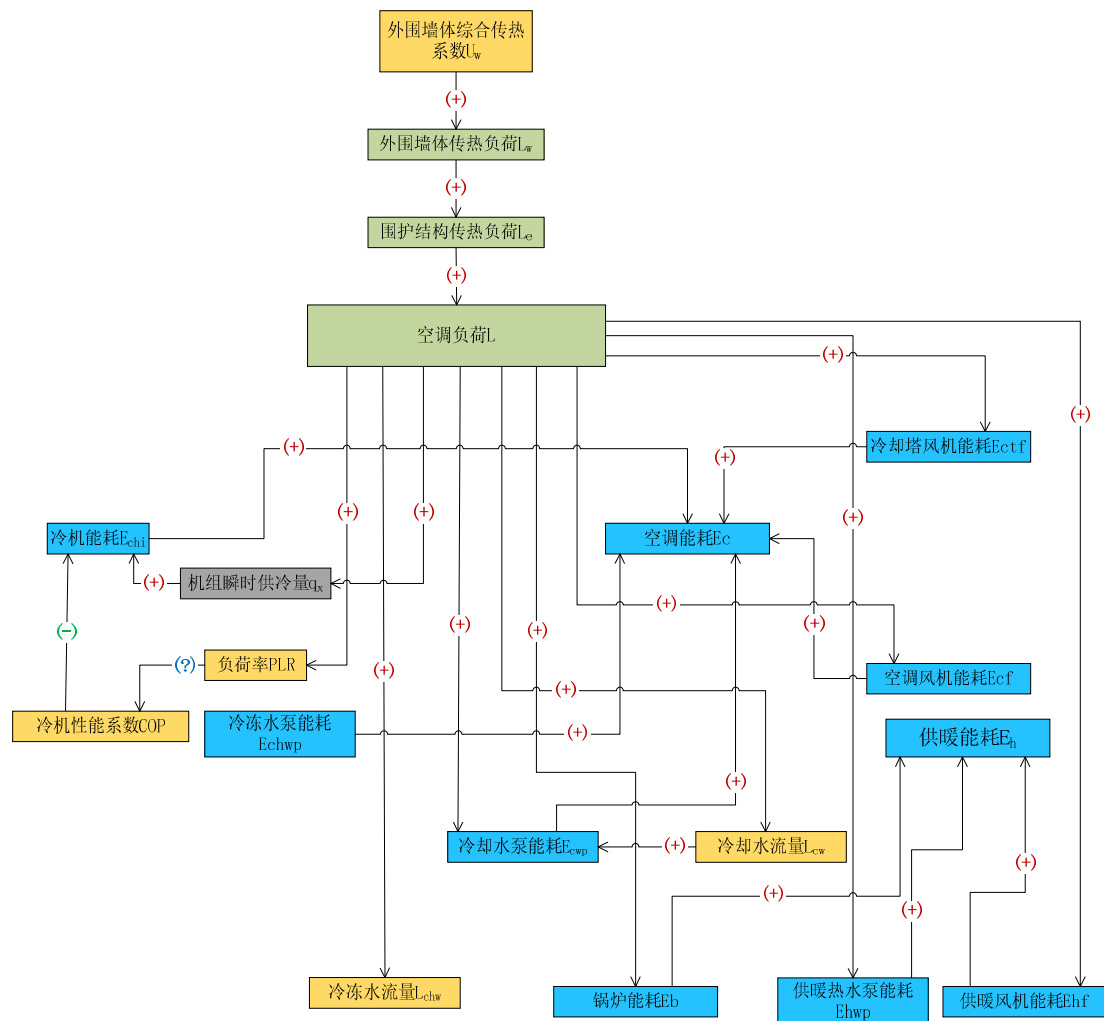


图 4-3 外墙传热系数的正向推理符号有向图

## 1、围护结构传热系数

围护结构作为建筑内部与外界的分界面，是保证建筑室内环境独立的必要条件，也是建筑室内外环境进行热质交换的必经之路，是空调负荷的重要组成部分。

围护结构包括外墙、屋顶及外窗的综合传热系数都是通过影响冷热负荷进一步影响空调系统设备的能耗的。

在典型模型中，分别取不同的外墙综合传热系数值进行计算，其他参数保持不变，以研究不同的外墙传热系数对各空调系统部件的影响。同时也分别单独控制屋顶和外窗的传热系数取不同的值，表 4-2 为空调系统设备在不同外墙、屋顶及外窗综合传热系数下的能耗值。

表 4-2 空调系统设备在不同外墙、屋顶、外窗综合传热系数下的能耗值

空调部件能耗	外墙综合传热系数 $U_w$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))				
	0.89	0.71	0.80	0.98	1.07

冷机 (kWh/m <sup>2</sup> )	19.47	19.43	19.44	19.49	19.51
冷却塔 (kWh/m <sup>2</sup> )	3.61	3.60	3.60	3.62	3.62
冷风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	1.36	1.35	1.35	1.36	1.37
冷冻泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	2.31	2.29	2.30	2.32	2.32
热风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	2.01	1.99	2.00	2.01	2.02
热水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	1.48	1.47	1.48	1.48	1.49
锅炉 (MJ/m <sup>2</sup> )	141.16	140.42	140.78	141.58	141.98
冷却水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	3.10	3.08	3.09	3.11	3.12
空调部件能耗	屋顶综合传热系数 $U_r$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))				
	0.64	0.70	0.58	0.77	0.51
冷却塔 (kWh/m <sup>2</sup> )	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61
冷风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	1.36	1.36	1.36	1.36	1.35
冷冻泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	2.31	2.31	2.31	2.31	2.30
热风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	2.01	2.01	2.00	2.01	2.00
热水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48
锅炉(MJ/m <sup>2</sup> )	141.16	1.34	1.34	1.34	1.33
冷水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	3.10	3.10	3.10	3.11	3.09
空调部件能耗	外窗综合传热系数 $U_{win}$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))				
	2.16	2.38	2.67	2.95	3.18
冷风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
冷冻泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
热风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	2.00	2.00	2.01	2.01	2.01
热水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48
锅炉(MJ/m <sup>2</sup> )	140.44	140.75	141.16	141.63	142.01
冷水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10

进一步, 可计算外墙、屋顶及外窗综合传热系数对空调设备能耗敏感因子,

如表 4-3 所示。因为外墙传热与室内负荷直接相关，所以它的改变将通过影响负荷的媒介影响所有的空调系统部件能耗。不管是冬季还是夏季，外墙传热系数增大将是室内外的热量传递增多，不管是冬季室内向室外传热还是夏季室外向室内传热。从敏感性分析表中可知，外墙传热系数的改变对末端风机的影响最大，其敏感性因子为 0.04。关于冷热源侧，相比于冷机，锅炉受外墙传热系数的影响更大。主要的原因是，相对于夏季冷负荷，冬季的热负荷由于室外温度和室内设定温度差值较大，故对围护结构传热系数变动更加敏感。这一点在屋顶和外窗角度也都有相同的结论。

可以发现虽然屋顶综合传热系数与外墙综合传热系数对个设备能耗影响相同，但是敏感因子全都有所下降。其重要原因是该建筑屋顶表面积小于墙体表面积，这种情况在高大建筑的更加明显。所以此处对冷机敏感因子计算值为 0 并不代表完全没有影响，而是影响较小可以忽略。

而外窗综合传热系数对各个设备的影响几乎可以与外墙等效，主要原因是窗户是围护结构的薄弱环节，其传热系数通常情况下远大于外墙和屋顶的传热系数，故对整个建筑能耗的影响敏感因子也不可忽略。

利用表 4-2 中不同的传热系数下的各空调系统部件的能耗，拟合出外墙、屋顶及外窗传热系数与冷机、冷却塔、锅炉等不同空调部件能耗的关系式（见表 4-4），以此为基础作为对调整类参数进行调整的建议依据。具体的拟合曲线图见附录 C（下同）。

表 4-3 外墙、屋顶及外窗综合传热系数对空调设备能耗敏感性

输入参数	冷机	冷却塔	冷冻泵	冷风机	热风机	热水泵	锅炉	冷水泵
墙体综合传热系数	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
输入参数	冷机	冷却塔	冷冻泵	冷风机	热风机	热水泵	锅炉	冷水泵
屋顶综合传热系数 $U_r$	0.000	0.002	0.013	0.016	0.016	0.010	0.020	0.013
输入参数	冷机	冷却塔	冷冻泵	冷风机	热风机	热水泵	锅炉	冷水泵
外窗综合传热系数 $U_{win}$	0.020	0.014	0.007	0.008	0.008	0.005	0.029	0.007

表 4-4 空调系统各设备随墙体、屋顶及外窗综合传热系数的变化公式

空调部件能耗	外墙综合传热系数 $U_w$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))
冷机 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{chi} = 0.2349U_w + 19.258$
冷却塔 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{ctf} = 0.069U_w + 3.5497$
冷风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{cf} = 0.0655U_w + 1.2988$
冷冻泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{chwp} = 0.0884U_w + 2.2298$
热风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{hf} = 0.0964U_w + 1.9191$
热水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{hwp} = 0.0437U_w + 1.4406$
锅炉(MJ/m <sup>2</sup> )	$E_b = 4.3904U_w + 137.28$
冷却水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{cwp} = 0.1187U_w + 2.9948$
空调部件能耗	屋顶综合传热系数 $U_r$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))
冷却塔 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{ctf} = 0.0101U_r + 3.6049$
冷风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{cf} = 0.0336U_r + 1.3357$
冷冻泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{chwp} = 0.0462U_r + 2.279$
热风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{hf} = 0.0499U_r + 1.9731$
热水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{hwp} = 0.0437U_r + 1.4406$
锅炉(MJ/m <sup>2</sup> )	$E_b = 4.4417U_r + 138.34$
冷却水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{cwp} = 0.0618U_r + 3.0611$
空调部件能耗	外窗综合传热系数 $U_{win}$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))
冷风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{cf} = 0.0042U_{win} + 1.3461$
冷冻泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{chwp} = 0.0058U_{win} + 2.2931$
热风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{hf} = 0.0061U_{win} + 1.9887$
热水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{hwp} = 0.0028U_{win} + 1.4722$
锅炉(MJ/m <sup>2</sup> )	$E_b = 1.5378U_{win} + 137.1$
冷却水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{cwp} = 0.0078U_{win} + 3.0799$

## 2、遮阳系数

采用相同的控制变量法控制综合遮阳系数  $S_{win}$ ，其对建筑各设备的能耗影响如表 4-5。

表 4-5 空调系统设备在不同综合遮阳系数下的能耗值

空调部件能耗	综合遮阳系数 $S_{win}$				
	0.94	0.66	0.75	0.85	1
冷机 (kWh/m <sup>2</sup> )	19.47	17.77	18.31	18.91	19.76
冷却塔 (kWh/m <sup>2</sup> )	3.61	3.27	3.38	3.50	3.67
冷风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	1.36	1.20	1.25	1.30	1.39
冷冻泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	2.31	2.09	2.16	2.24	2.34
冷水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	3.10	2.81	2.90	3.01	3.15

进一步，可计算综合遮阳系数对空调设备能耗敏感因子，如表 4-6 所示。可以看出，综合遮阳系数对空调设备影响巨大。主要原因是夏季由于太阳辐射进入窗户产生的冷负荷量很大。其中对冷风机影响最大，高达 0.389。

表 4-6 综合遮阳系数对空调设备能耗敏感性

输入参数	冷机	冷却塔	冷冻泵	冷风机	冷水泵
综合遮阳系数 $S_{win}$	0.281	0.300	0.137	0.389	0.293

利用表 4-5 中不同综合遮阳系数下的各空调系统部件的能耗，拟合出其与冷机、冷却塔、冷冻泵等不同空调部件能耗的关系式（见表 4-4），以此为基础作为对调整类参数进行调整的建议依据。

表 4-7 空调系统各设备随综合遮阳系数的变化公式

空调部件能耗	综合遮阳系数 $S_{win}$
冷机 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{chi} = 5.9272S_{win} + 13.864$
冷却塔 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{ctf} = 1.1821S_{win} + 2.4926$
冷风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{cf} = 0.5615S_{win} + 0.8281$
冷冻泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{chwp} = 0.7425S_{win} + 1.6048$
冷却水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{cwp} = 0.9974S_{win} + 2.1554$

### 3、新风量及人员密度

采用相同的控制变量法控制新风量  $G_{oa}$  以及人员密度  $D_p$ ，其对建筑各设备的能耗影响如表 4-8。

表 4-8 空调系统设备在不同新风量及人员密度下的能耗值

空调部件能耗	新风量 $G_{oa}(m^3/h)$				
	72000.00	79200.00	64800.00	86400.00	57600.00
冷机 (kWh/m <sup>2</sup> )	19.47	19.62	19.31	19.78	19.15
冷却塔 (kWh/m <sup>2</sup> )	3.61	3.64	3.58	3.68	3.55
冷风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	1.36	1.37	1.35	1.38	1.34
冷冻泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	2.31	2.34	2.28	2.36	2.26
热风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	2.01	2.02	1.99	2.03	1.98
热水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	1.48	1.51	1.45	1.54	1.42
锅炉(MJ/m <sup>2</sup> )	141.16	150.60	131.72	160.05	122.06
冷水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	3.10	3.14	3.07	3.17	3.03
空调部件能耗	人员密度 $D_p (m^2/p)$				
	4	3.2	3.6	4.4	4.8
冷机 (kWh/m <sup>2</sup> )	19.47	21.46	20.28	18.75	17.98
冷却塔 (kWh/m <sup>2</sup> )	3.61	3.95	3.75	3.49	3.35
冷风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	1.36	1.42	1.38	1.33	1.31
冷冻泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	2.31	2.50	2.39	2.24	2.15
热风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	2.01	2.10	2.04	1.97	1.94
热水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	1.48	1.66	1.56	1.41	1.34
锅炉(MJ/m <sup>2</sup> )	141.16	164.41	152.29	130.35	119.41
冷水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	3.10	3.36	3.21	3.00	2.89

进一步，可计算新风量和员密度对空调设备能耗敏感因子，如表 4-9 所示。可以看出，新风量对空调系统各设备能耗的影响较大，其中对锅炉的影响最大，敏感因子高达 0.671，主要原因依然是冬季室外温度和设定温度差值较大，故对热负荷的影响要高于冷负荷，进一步影响其他设备能耗，另外新风量对各设备能

耗的影响要大于围护结构传热系数的改变，主要原因是，新风量引起的质交换对负荷的影响要远远大于传热对负荷的影响。

而人员密度与新风量相比对空调系统设备能耗的敏感性更高主要是其不但影响了新风量（新风量随着人员数的增加而增加）同时人员散热还会对负荷进一步影响。

表 4-9 新风量及人员密度对空调设备能耗敏感性

输入参数	冷机	冷却塔	冷冻泵	冷风机	热风机	热水泵	锅炉	冷水泵
新风量 $G_{oa}$	0.081	0.088	0.115	0.070	0.070	0.190	0.671	0.115
输入参数	冷机	冷却塔	冷冻泵	冷风机	热风机	热水泵	锅炉	冷水泵
人员密度 $D_p$ ( $m^2/p$ )	0.425	0.394	0.358	0.198	0.197	0.518	0.799	0.358

利用表 4-7 中不同新风量及人员密度下的各空调系统部件的能耗，拟合出新风量及人员密度与冷机、冷却塔、锅炉等不同空调部件能耗的关系式（见表 4-10），以此为基础作为对调整类参数进行调整的建议依据。

表 4-10 空调系统各设备随新风量及人员密度的变化公式

空调部件能耗	新风量 $G_{oa}(m^3/h)$
冷机 ( $kWh/m^2$ )	$E_{chi} = 0.7141G_{oa} + 343502$
冷却塔 ( $kWh/m^2$ )	$E_{ctf} = 0.1443G_{oa} + 63223$
冷风机 ( $kWh/m^2$ )	$E_{cf} = 0.0432G_{oa} + 24230$
冷冻泵 ( $kWh/m^2$ )	$E_{chwp} = 0.1202G_{oa} + 39231$
热风机 ( $kWh/m^2$ )	$E_{hf} = 0.0638G_{oa} + 35794$
热水泵 ( $kWh/m^2$ )	$E_{hwp} = 0.1277G_{oa} + 22997$
锅炉 ( $MJ/m^2$ )	$E_b = 0.4074G_{oa} + 8417.8$
冷却水泵 ( $kWh/m^2$ )	$E_{cwp} = 0.1615G_{oa} + 52692$
空调部件能耗	人员密度 $D_p (m^2/p)$
冷机 ( $kWh/m^2$ )	$E_{chi} = -3705.2D_p + 535436$
冷却塔 ( $kWh/m^2$ )	$E_{ctf} = -637.41D_p + 97115$
冷风机 ( $kWh/m^2$ )	$E_{cf} = -118.24D_p + 31223$

冷冻泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{chwp} = -368.92D_p + 60361$
热风机 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{hf} = -174.57D_p + 46122$
热水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{hwp} = -339.53D_p + 43214$
锅炉(MJ/m <sup>2</sup> )	$E_b = -462.28D_p + 45634$
冷却水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{cwp} = -495.52D_p + 81073$

#### 4、冷却水供回水温差、冷冻水供回水温差及供暖热水供回水温差

采用相同的控制变量法控制冷却水供回水温差、冷冻水供回水温差及供暖热水供回水温差，各变量对建筑各设备的能耗影响如表 4-11。

表 4-11 空调系统设备在不同供回水温差下的能耗值

空调部件能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	冷却水供回水温差 DT <sub>cw</sub> (°C)				
		5.56	4.44	5.00	6.67
冷机	19.47	19.38	19.42	19.47	19.33
冷却塔	3.61	3.78	3.69	3.60	3.89
空调部件能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	冷冻水供回水温差 DT <sub>chw</sub> (°C)				
		5.56	4.44	5.00	6.11
冷机	19.47	19.56	19.51	19.43	19.41
冷冻泵	2.31	2.89	2.57	2.10	1.95
空调部件能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	供暖热水供回水温差 DT <sub>hw</sub> (°C)				
		11.11	8.89	10.00	12.22
热水泵	1.48	1.85	1.64	1.35	1.25

进一步，可计算冷却水供回水温差、冷冻水供回水温差及供暖热水供回水温差对空调设备能耗敏感因子，如表 4-9 所示。冷却水供回水温差对冷却的敏感因子较高为 0.12，原因是冷却塔风机需要增大风速来进一步增大冷却水供回水温差。而由于冷却水供回水温度的改变，冷机的效率也会稍有不同，从而也会有轻微改变。

冷冻水供回水温度的改变，也同样对冷机能耗有所影响，但敏感因子不高，只有 0.02。



随着供暖热水供回水温差的增大，相同的热量只需要更小的水流量，故供暖热水供回水温差对于热水泵敏感系数高达1，同样的其对锅炉的影响也是由于影响了其效率从而影响其能耗。

表 4-12 不同供回水温差对空调设备能耗敏感性

输入参数	冷机	冷却塔
冷却水供回水温差 $DT_{cw}$	0.01	0.12
输入参数	冷机	冷却塔
冷冻水供回水温差 $DT_{chw}$	0.02	-0.02
输入参数	热水泵	锅炉
供暖热水供回水温差 $DT_{hw}$	1.01	0.05

利用表 4-11 中不同冷却水供回水温差、冷冻水供回水温差及供暖热水供回水温差下的各空调系统部件的能耗，拟合出与冷机、冷却塔等不同空调部件能耗的关系式（见表 4-13），以此为基础作为对调整类参数进行调整的建议依据。

表 4-13 空调系统各设备随冷却水供回水温差、冷冻水供回水温差及供暖热水供回水温差的变化公式

	冷却水供回水温差 $DT_{cw}$ (°C)
冷机 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{chi} = -0.0183DT_{cw}^2 + 0.2486DT_{cw} + 18.642$
冷却塔 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{ctf} = 0.048DT_{cw}^2 - 0.6138DT_{cw} + 5.5536$
	冷冻水供回水温差 $DT_{chw}$ (°C)
冷机 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{chi} = -0.0679DT_{chw} + 19.851$
冷冻泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{chwp} = -0.4221DT_{chw} + 4.7058$
	供暖热水供回水温差 $DT_{hw}$ (°C)
热水泵 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{hwp} = 0.0028DT_{hw} + 1.4722$

## 5、冷却水回水温度及冷冻水出水温度

采用相同的控制变量法控制冷却水回水温度及冷冻水出水温度，各变量对建筑各设备的能耗影响如表 4-14。

表 4-14 空调系统设备在不同冷却水回水温度及冷冻水出水温度下的能耗值

空调部件能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	冷却水回水温度 $T_{cw}$ (°C)				
		29.44	20.00	24.72	34.17
冷机	19.47	19.38	19.42	19.47	19.47
冷却塔	3.61	3.78	3.69	3.60	3.60
空调部件能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	冷冻水出水温度 $T_{chw}$ (°C)				
		7.22	2.22	4.72	9.72
冷机	19.47	20.92	20.11	19.02	18.78
冷却塔	3.61	3.64	3.62	3.60	3.60

进一步,可计算冷却水回水温度及冷冻水出水温度对空调设备能耗敏感因子,如表 4-15 所示。随着冷却水回水温度的升高,冷却塔风机只需要运行较短的时间变可以满足,故负荷有所下降,而冷却水回水温度的升高降低了冷机的效率,故冷机能耗稍有增加。由于冷机的效率会随着冷冻水出水温度的上升显著下降,故冷冻水出水温度对冷机的敏感因子为 0.28。由于冷机冷却侧的变化,冷冻侧的进出水温也稍有变化进而对冷却塔稍有影响,但敏感因子只有 0.03。

表 4-15 冷却水回水温度及冷冻水出水温度对空调设备能耗敏感性

输入参数	冷机	冷却塔
冷却水回水温度 $T_{cw}$	0.01	0.12
输入参数	冷机	冷却塔
冷冻水出水温度 $T_{chw}$	0.28	0.03

利用表 4-14 中不同冷却水回水温度及冷冻水出水温度下的各空调系统部件的能耗,拟合出与冷机即冷却塔能耗的关系式(见表 4-16),以此为基础作为对调整类参数进行调整的建议依据。

表 4-16 空调系统各设备随冷却水回水温度及冷冻水出水温度的变化公式

冷却水回水温度 $T_{cw}$ (°C)	
冷机 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{chi} = -0.0004T_{cw}^2 + 0.0288T_{cw} + 18.964$
冷却塔 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{ctf} = 0.0008T_{cw}^2 - 0.0575T_{cw} + 4.6077$
冷冻水出水温度 $T_{chw}$ (°C)	
冷机 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{chi} = 0.0153T_{chw}^2 - 0.4352T_{chw} + 21.815$
冷却塔 (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{ctf} = 0.0003T_{chw}^2 - 0.0075T_{chw} + 3.6519$

## 6、供冷送风温度及供暖送风温度

采用相同的控制变量法控制供冷送风温度及供暖送风温度，各变量对建筑各设备的能耗影响如表 4-17。

表 4-17 空调系统设备在不同供冷送风温度及供暖送风温度下的能耗值

空调部件能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	供冷送风温度 $T_{csa}$ (°C)				
		15.56	11.11	12.22	18.89
冷机	19.47	22.21	21.59	16.85	14.32
冷却塔	3.61	4.24	4.10	3.00	2.48
冷风机	1.36	1.05	1.05	1.90	2.81
冷冻泵	2.31	2.89	2.75	1.85	1.51
冷却水泵	3.10	3.88	3.69	2.45	2.03
空调部件能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	供暖送风温度 $T_{hsa}$ (°C)				
		35.00	24.44	29.72	40.28
热水泵	1.48	0.88	1.19	1.79	2.09

进一步，可计算供冷送风温度及供暖送风温度对空调设备能耗敏感因子，如表 4-18 所示。可以看出供冷送风温度对空调设备能耗敏感因子均较高。原因是随着供冷送风温度的升高，冷风机需要更大的风量才能满足室内负荷的需求，故能耗显著增加。此时冷冻水出水温度必然会升高，故冷机能耗下降，冷冻水供回水温差增加，冷冻水流量减小，故冷冻泵能耗降低。同样的，冷机冷冻侧的温度变化引起冷冻侧的温度变化进一步影响冷却塔的能耗。

表 4-18 供冷送风温度及供暖送风温度对空调设备能耗敏感性

输入参数	冷机	冷却塔	冷冻泵	冷风机
供冷送风温度 $T_{csa}$	1.27	1.56	1.97	3.59
输入参数	热水泵			
供暖送风温度 $T_{hsa}$	2.03			

利用表 4-17 中不同供冷送风温度及供暖送风温度下的各空调系统部件的能耗，拟合出他们与冷机及冷却塔能耗的关系式（见表 4-19），以此为基础作为对调整类参数进行调整的建议依据。

表 4-19 空调系统各设备随供冷送风温度及供暖送风温度的变化公式

(kWh/m <sup>2</sup> )	供冷送风温度 $T_{csa}$
冷机	$E_{chi} = -0.7705T_{csa} + 31.044$
冷却塔	$E_{ctf} = -0.1732T_{csa} + 6.2177$
冷风机	$E_{cf} = 0.0218T_{csa}^2 - 0.533T_{csa} + 4.3117$
冷冻泵	$E_{chwp} = -0.1374T_{csa} + 4.4297$
冷却水泵	$E_{cwp} = -0.1859T_{csa} + 5.9646$
(kWh/m <sup>2</sup> )	供暖送风温度 $T_{hsa}$
热水泵	$E_{hwp} = 0.0572T_{hsa} - 0.514$

## 7、效率类参数

效率类参数包括冷却塔风机全效率  $R_{ctf}$  (EIR)、冷却水泵机械效率  $R_{mecwp}$ 、冷冻水泵机械效率  $R_{mehwp}$  空调风机全效率  $R_{acf}$ (EIR)、冷机性能系数 COP(EIR) 及锅炉效率  $R_b$  (FIR) 供暖热水泵机械效率  $R_{mehwp}$

采用相同的控制变量法控制各个设备的性能参数，各性能参数对建筑各设备的能耗影响如表 4-20。

表 4-20 空调系统设备在各设备不同性能参数下的能耗值

空调部件能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	冷却塔风机全效率 $R_{ctf}$ (EIR)				
	0.0226	0.01808	0.0203	0.0249	0.02712
冷却塔	3.61	2.87	3.24	3.99	4.31
空调部件能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	冷却水泵机械效率 $R_{mecwp}$				
	0.77	0.62	0.69	0.85	0.92
冷却水泵	3.10	3.85	3.46	2.81	2.60
空调部件能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	冷冻水泵机械效率 $R_{mechwp}$				
	0.77	0.62	0.69	0.85	0.92
冷冻泵	2.31	2.87	2.58	2.09	1.96
空调部件能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	空调风机全效率 $R_{acf}$ (EIR)				
	0.33	0.26	0.3	0.36	0.4
冷风机	1.36	1.70	1.48	1.25	1.14
热风机	2.01	2.51	2.19	1.85	1.68
空调部件能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	冷机性能系数 COP (EIR)				
	0.167	0.1336	0.1503	0.1837	0.2004
冷机	19.47	15.61	17.48	21.45	23.32
空调部件能耗 (MJ/m <sup>2</sup> )	锅炉效率 $R_b$ (FIR)				
	1.25	1	1.125	1.375	1.5
锅炉	141.16	112.93	127.05	155.28	169.39
空调部件能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	供暖热水泵机械效率 $R_{mehwp}$				
	0.77	0.62	0.69	0.85	0.92
热水泵	1.48	1.84	1.65	1.34	1.26

进一步,可计算各个设备性能参数对空调设备能耗敏感因子,如表 4-22 所示。可以看出,各设备性能参数只会影响该设备的能耗,并且敏感因子都接近 1。

表 4-22 各设备不同性能参数对空调设备能耗敏感性

输入参数	冷却塔	
冷却塔风机全效率 $R_{ctf}$ (EIR)	1.01	
输入参数	冷水泵	
冷却水泵机械效率 $R_{mecwp}$	1.03	
输入参数	冷冻泵	
冷冻水泵机械效率 $R_{mechwp}$	1.01	
输入参数	冷风机	热风机
空调风机全效率 $R_{acf}$ (EIR)	0.95	0.94
输入参数	冷机	
冷机性能系数 COP (EIR)	1.00	
输入参数	锅炉	
锅炉效率 $R_b$ (FIR)	1.00	
输入参数	热水泵	
供暖热水泵机械效率 $R_{mehwp}$	1.01	

利用表 4-20 中不同设备性能参数下的能耗，拟合出他们与各自能耗的关系式（见表 4-22），以此为基础作为对调整类参数进行调整的建议依据。

表 4-22 空调系统各设备随各设备不同性能参数的变化公式

空调部件能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	冷却塔风机全效率 $R_{ctf}$ (EIR)
冷却塔	$E_{ctf} = 159.76R_{ctf} - 0.0059$
	冷却水泵机械效率 $R_{mecwp}$
冷却水泵	$E_{cwp} = -4.1604R_{mecwp} + 6.3668$
	冷冻水泵机械效率 $R_{mechwp}$
冷冻泵	$E_{chwp} = -3.0383R_{mechwp} + 4.6992$
	空调风机全效率 $R_{acf}$ (EIR)
冷风机	$E_{cf} = -3.9817R_{acf} + 2.6992$

热风机	$E_{hf} = -5.8814 R_{acf} + 3.9873$
	冷机性能系数 COP (EIR)
冷机	$E_{chi} = 116.02COP + 0.0908$
	锅炉效率 $R_b$ (FIR)
锅炉 (MJ/m <sup>2</sup> )	$E_b = 112.93R_b$
	供暖热水泵机械效率 $R_{mehwp}$
热水泵	$E_{hwp} = -1.9397R_{mehwp} + 3.0065$

### 4.3 基于建筑能耗符号有向图的建筑能耗模型校验的步骤

结合以上向前和向后推理的分析,本文提出基于建筑能耗符号有向图的建筑能耗模型校验的步骤:

#### 1、建立初始模型

尽可能搜集目标建筑相关的信息,包括天气参数、建筑几何参数、围护结构物性参数、空调系统信息等,具体见附录 D。

#### 2、对时间表参数进行校验

按照第 3 章所提出的“典型日时间表校验法”,利用短期测量逐时数据,推算照明、设备、人员、空调系统的实际时间表。

#### 3、误差较大分项的单独校验

优先针对个别能耗误差在 30%以上分项进行校验,对应调整输入参数集选定的前提是其不对误差在 30%以下的其他分项能耗产生影响,调整目标是使其处于 30%误差以下。

具体调整方法为“比例调整法”,即根据模拟值反函数结果离实际值距离反函数结果的百分比,调整当前误差输入参数。具体计算如式(4-2)。

$$x_2 = x_1 \times \left(1 + \frac{f^{-1}(y_0) - f^{-1}(y_1)}{f^{-1}(y_1)}\right) \times \theta \times \phi \quad (4-2)$$

式中,

$x_2$ ——调整参数值;

$x_1$ ——当前参数值;

$f^{-1}()$ —— $f(x)$ 的反函数,  $f(x)$ 即为 4.2 中拟合的能耗关系式;

$y_0$ ——目标模型或者实测建筑的输出值;

$y_1$ ——当前模型的输出值;

$\theta$ ——分担系数，需要同时调整影响同一输出值的输入参数时用以决定分担比例；

$\phi$ ——步长控制系数，用以在调整过程中控制调整的步长。

#### 4、对误差 15%以上分项的集中校验

经过针对个别较高能耗误差分项的校验之后，对误差在 15%以上的分项集中进行校验。

#### 5、空调负荷侧参数的校验

空调负荷侧任意参数的调整，都将对总负荷产生影响，根据多数分项误差确定负荷侧参数的调整方向。因为负荷侧的参数较多，故按照 4.2.2 中对各参数的敏感性分析结果制定优先级进行调整。

#### 6、局部微调

若依然由误差值在 15%以上，或者对某些部件的误差不太满意，可在这一步再对其进行微调。

以上 3~6 步是针对调整类参数进行校验的“分步分部校验法”，即按照一定的逻辑步骤、依据各空调部件的模拟误差进行校验，每一步校验的参数选择和幅值调整都是基于符号有向图所建立的信息库得到，并且通过 Python 程序（部分代码示例见附录 B）辅助进行。

## 4.4 本章小结

对调整类参数的校验有两个关键性问题，一是确定调整对象，二是推算调整的幅度。本章针对建筑能耗模型中的调整类参数提出校验方法利用符号有向图搜索可能的待调整参数集，通过“分步分部参数校验法”对调整类参数进行校验。最后，呈现了“基于符号有向图的建筑能耗模型校验方法”的完整流程。



## 第5章 案例验证

以上章节的研究即为本文所提出的基于符号有向图的建筑能耗模型的校验方法，为了验证其有效性，本章分别对基于模拟数据和基于实际数据的建筑能耗模型开展校验，同时也以此作为具体应用的展示。

### 5.1 基于模拟数据的校验方法验证

因为对于实际建筑，很难获取真实准确的输入参数信息，所以先通过虚拟的典型建筑模型进行实验。本文借用“双盲实验”的理念，由课题组另一位同学将已建好的基础模型中的输入参数随机修改，这一模型即设为目标模型，而之前的基础模型则为初始模型。需要做的就是利用前文提出的方法对初始模型中的输入参数进行调整，直到其输出能耗结果和目标模型的能耗结果在允许的误差范围之内。随后再将调整后模型的输入参数与目标模型的输入参数进行比较，分析方法的有效性。

#### 5.1.1 实验模型概况

##### 1、初始模型概况

本文进行实验所建立的模型为第三章中所提到的上海市办公建筑典型模型，故其基本概况与第三章中一致，不在此赘述。

##### 2、目标模型概况

目标模型对应于实际情况中的“真实建筑”，它是能耗模型建立的基础，也是校验的目的。因为对于真实的建筑，一些输入参数信息很难得到准确的值，因此当输出的能耗数据在允许的误差范围之内时，无法得知输入参数是否得到准确的校验。所以通过控制目标模型的参数来评价本文所提出的校验方法的可靠性。

控制输入参数选择见表 5-1。本文在实验的过程中，由一位同学独自随机调整，并运行模型得到分项能耗结果，以此作为校验的目标依据。这一数据对应于实际建筑中的分项能耗监测数据。得到目标模型能耗数据之后，则由另一位同学依照此数据对原始模型进行校验，使其输出能耗与目标模型在允许的误差范围之内。

表 5-1 控制输入参数

参数类目	参数项
空调负荷参数	墙体综合传热系数 $U_w$

	屋顶综合传热系数 $U_r$
	外窗综合传热系数 $U_{win}$
	综合遮阳系数 $S_{win}$
	外窗面积 $A_{win}$
	人员新风量 $OA_p$
	人员密度 $D_p$ ( $p/m^2$ )
供冷参数	冷却塔风机全效率 $R_{ctf}$ (EIR)
	冷却水供回水温差 $DT_{cw}$
	冷却水泵机械效率 $R_{mecwp}$
	冷机性能系数 COP (EIR)
	冷却水温度 $T_{cw}$
	冷冻水温度 $T_{chw}$
	冷冻水泵机械效率 $R_{mechwp}$
	冷冻水供回水温差 $DT_{chw}$
	供冷送风温度 $T_{csa}$
	空调风机全效率 $R_{cf}$ (EIR)
供暖参数	锅炉效率 $R_b$ (FIR)
	供暖热水泵机械效率 $R_{mehwp}$
	供暖热水供回水温差 $DT_{hw}$
	供暖送风温度 $T_{hsa}$
非空调负荷	照明功率密度 $q_{lt}$
	室内设备功率密度 $q_{eqpt}$
时间表	照明时间表
	设备时间表
	人员在室率时间表
	空调系统时间表

---

## 5.1.2 实验模型的校验过程

### 1、初始模型的建立

按照第三章中所示建筑信息（见附录 E）进行建模，建筑外形图见图 5-1。

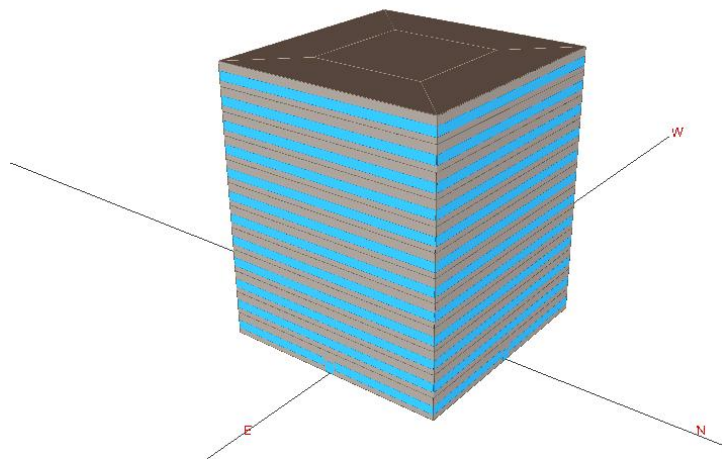


图 5-1 实验典型模型 3-D 外视图

将初始模型的输出月能耗结果与目标模型对比，见图 5-2-图 5-6。

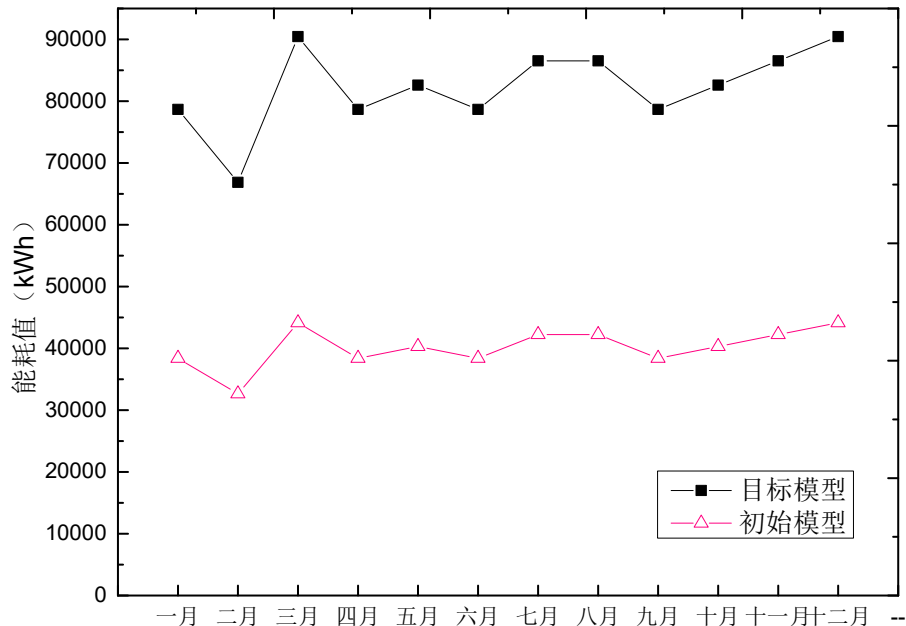


图 5-2 初始模型和目标模型的逐月照明电耗对比

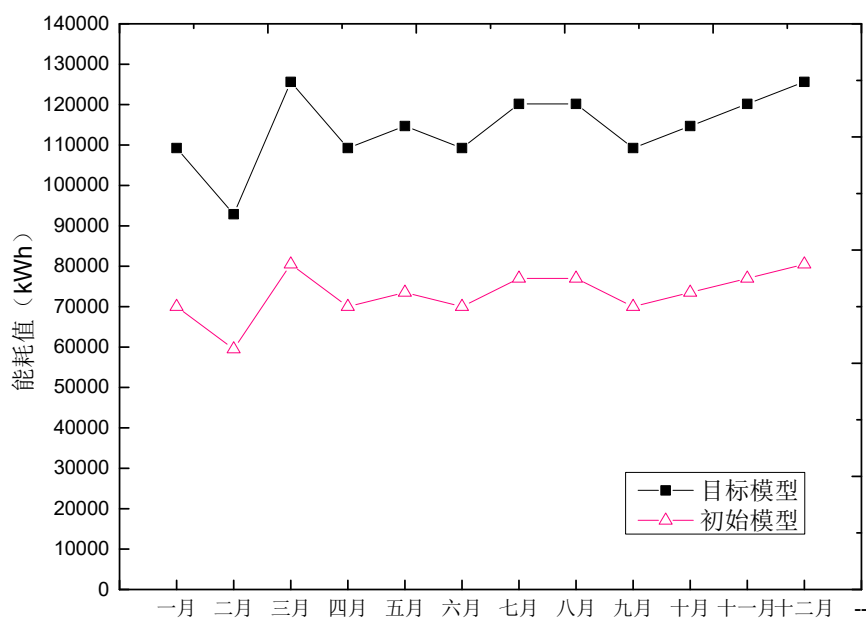


图 5-3 初始模型和目标模型的逐月设备电耗对比

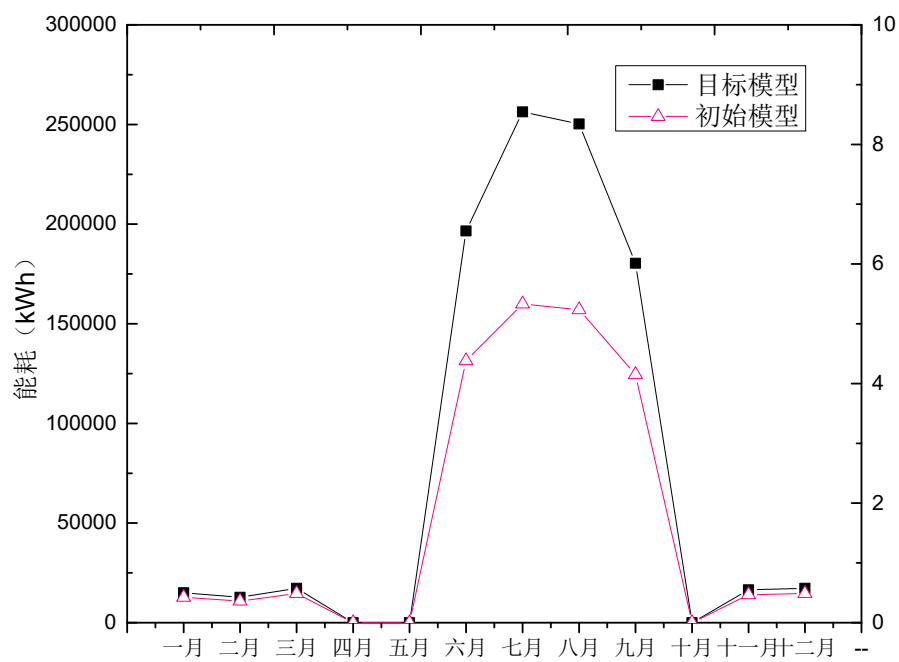


图 5-4 初始模型和目标模型的逐月空调电耗对比

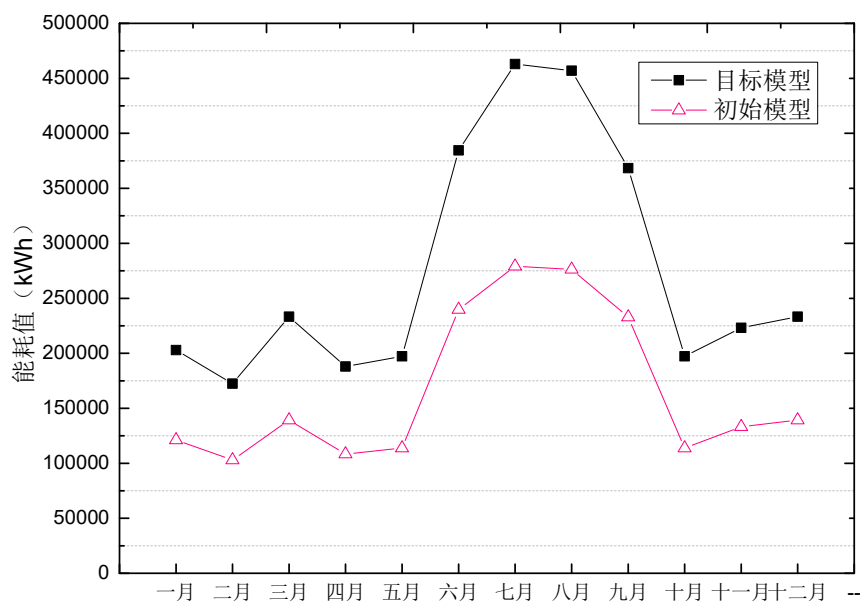


图 5-5 初始模型和目标模型的逐月总电耗对比

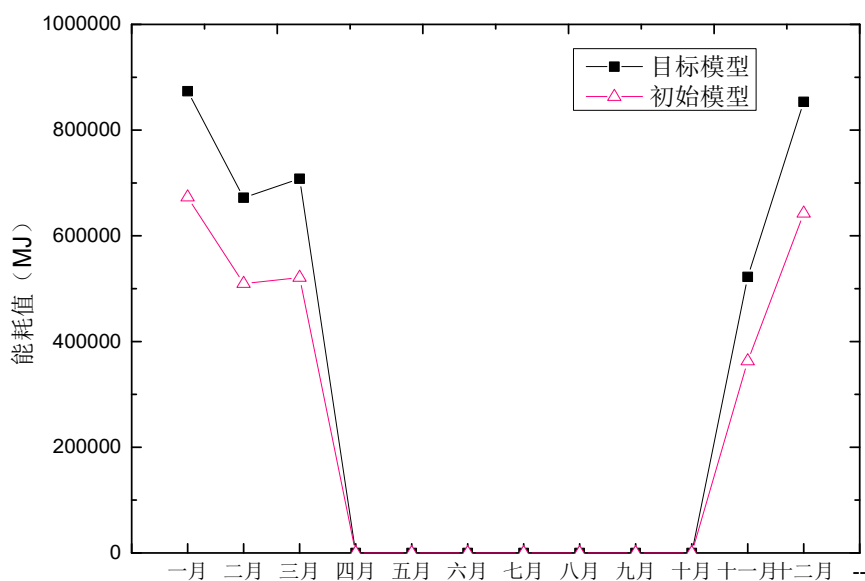


图 5-6 初始模型和目标模型的逐月总气耗对比

4月、5月、10月的空调电耗为零，因为这三个月为过渡季，默认不开启空调系统，如需调节室内空气环境，可通过开窗解决。从以上图中可直观地看出初始模型和目标模型之间存在很大的误差，且其值普遍低于目标模型。具体的分项误差见表 5-2。

表 5-2 初始模型和目标模型的分项误差

误差分析	MBE	CV(RMSE)
总电耗	-39.76%	42.15%
总气耗	-25.35%	25.50%
照明	-51.20%	51.35%
设备	-35.92%	36.03%
冷机	6.46%	6.34%
冷却塔	-83.01%	84.64%
冷冻泵	45.61%	45.66%
冷却泵	-4.87%	4.88%
供冷风机盘管	-13.02%	13.04%
供热风机盘管	-13.02%	13.10%
热水泵	-17.59%	17.69%
锅炉	-25.68%	25.50%

从表 5-2 中可知，初始模型的总电耗均方根变异系数为 42.15%，总气耗为 25.50%，高出推荐的 15%误差。在空调系统中，冷却塔的误差最高，其均方根变异系数达到 84%，其次是冷冻泵，均方根变异系数为 45.66%。接下来，利用分项误差表，基于前文提出的校验方法对初始模型进行校验。

## 2、模型的校验

模型的校验总共分为五步，接下来首先从时间表的校验开始。

### 1) 第一步 时间表的校验

如第三章中所述，建筑能耗模型中的时间表包括照明系统时间表、设备系统时间表、人员在室时间表和空调运行时间表。以下以照明时间表为例，利用时间表校验方法对初始模型中的照明系统进行校验。

1) 数据获得。输出目标模型 10 月份的逐时照明能耗值。

2) 数据分类。将 10 月 31 天的照明能耗数据按照工作日、周末、节假日分开。

3) 计算照明密度。所有的逐时能耗数据中，最大值为 357.54kWh，通过折算，照明密度为 19.6W/m<sup>2</sup>。

4) 计算负荷率。将逐时能耗值与最大能耗值/0.95 相比, 即得到该时刻的照明负荷率。如 10 月 4 日早上八点, 其照明能耗为 112.91kWh, 则此时的照明负荷率为 0.3。

5) 典型日时间表生成。分别在工作日、周末和节假日三种日类型的所有照明时间表中, 每一时刻取平均值, 得到三种基础典型日时间表。图 5-6 即为校验时间表和初始时间表的对比。

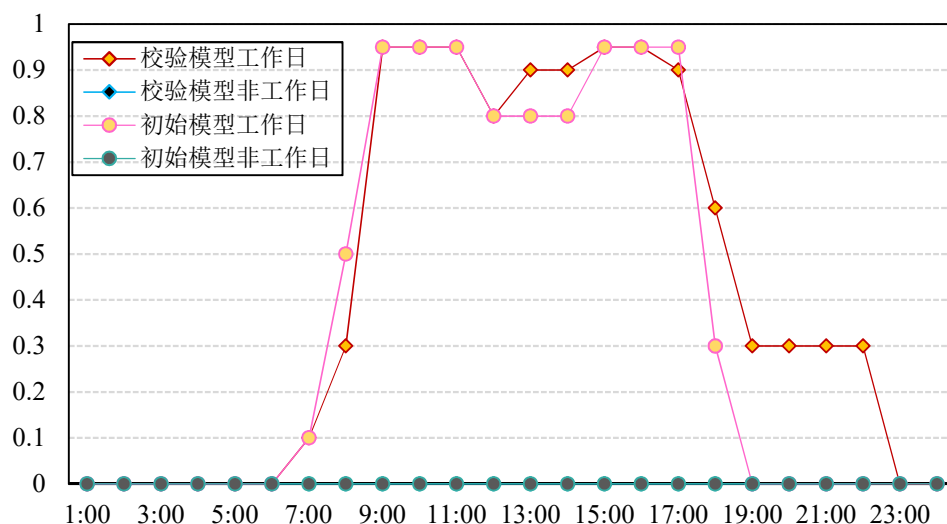


图 5-7 初始模型和校验模型的照明时间表比较

从图 5-7 中可以看到, 校验模型相对初始模型, 照明时间延长, 对应于实际建筑中可能出现的现象。校验后的照明密度和照明时间表带入模型中计算后, 校验模型和目标模型的照明逐时误差见图 5-8, 均方根变异系数误差为 1.11%。

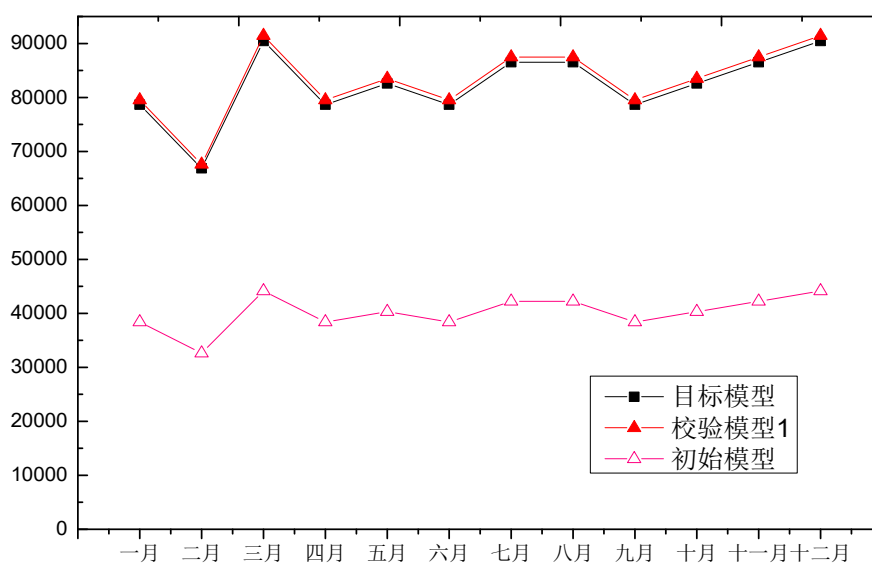


图 5-8 照明时间表和照明密度调整后校验模型和目标模型的逐月能耗比较

其他时间表的校验与照明类似。校验时间表带入初始模型后的能耗值见图 5-9-图 5-11。

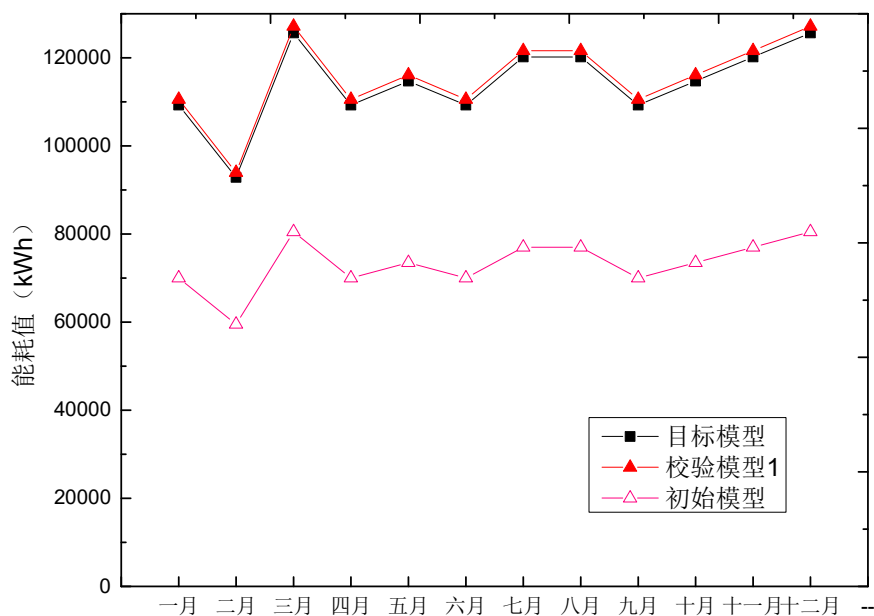


图 5-9 时间表校验后校验模型和目标模型的逐月设备能耗比较

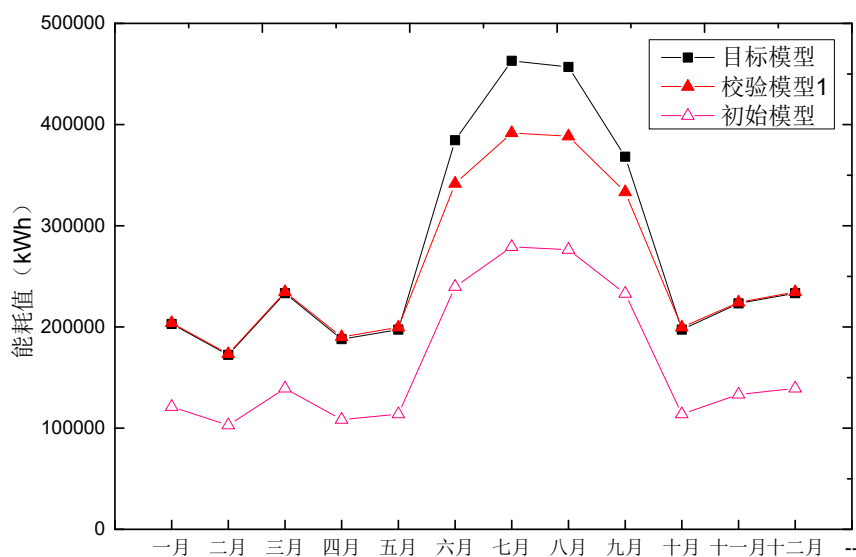


图 5-10 时间表校验后校验模型和目标模型的逐月总电耗比较



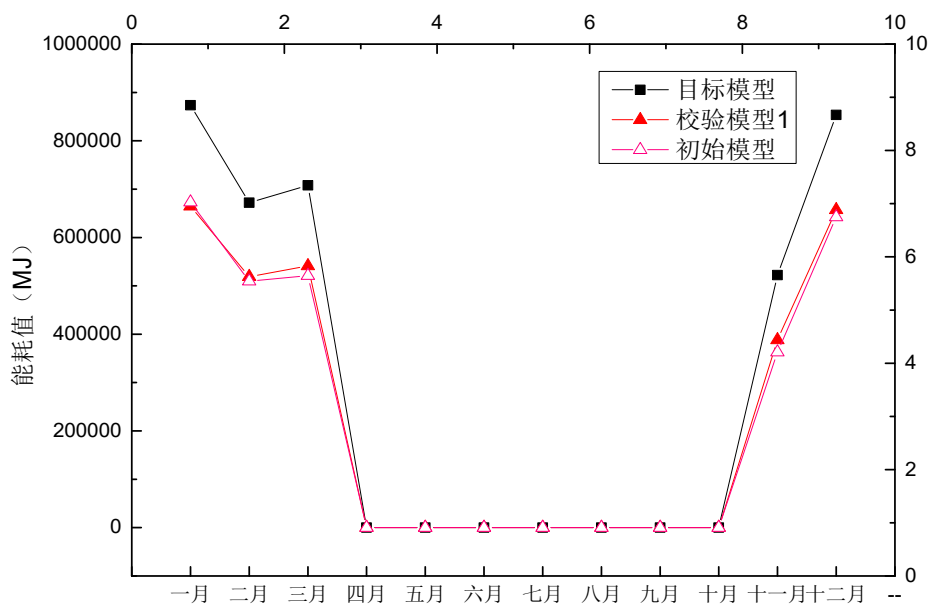


图 5-11 时间表校验后校验模型和目标模型的逐月总气耗比较

时间表调整后的误差分析见表 5-3。从表 5-3 中可知，能耗误差降低，特别是总电耗，均方根变异系数从原来的 42.15%变为 11.83%，已经达到允许的误差范围之内。特别是与时间表直接相关的照明系统和设备系统，其均方根变异系数分别为 1.11%和 1.20%。但是，其他分项仍然存在一定的误差，比如冷却塔和冷冻泵，误差在 50%以上。从这里可以看出分项能耗分析的必要性，当总能耗误差达到允许范围之时，仍有可能部分部件的能耗误差很好，即相应的参数设置依然存在问题。

表 5-3 校验模型 1 的分项误差分析

误差分析	MBE	CV(RMSE)
总电耗	-6.19%	11.83%
总气耗	-23.66%	23.96%
照明	1.11%	1.11%
设备	1.20%	1.20%
冷机	24.39%	24.03%
冷却塔	-80.36%	82.08%
冷冻泵	56.81%	56.87%
冷却泵	2.44%	2.45%

供冷风机盘管	-4.24%	4.24%
供热风机盘管	-4.23%	4.26%
热水泵	-12.48%	12.56%
锅炉	-23.77%	23.96%

时间表调整后,将进一步根据建筑能耗符号有向图对调整类参数进行针对性调整。以下四步为完整的调整类参数校验逻辑规则应用。

## 2) 第二步 误差较大分项的单独校验

从表 5-3 中可以看到,误差较大的分项为冷却塔和冷冻泵的能耗,均方根变异系数分别为 82.08%和 56.87%。故需要先针对这两项进行调整。

根据建筑能耗符号有向图的搜索,可能的误差输入参数集见表 5-4。需要注意的是,这一步为局部调整,所以暂时不对负荷侧的参数进行调整。

冷却塔能耗偏低的原因在于其 EIR 偏小,冷却水供回水温差偏大,冷却水温度偏大,冷冻水温度偏大,供冷送风温度偏大。冷冻泵能耗增加,可能的原因是冷冻泵效率偏低,冷冻水供回水温差偏低。排除同时作用于其他能耗的因子,在这一步的校验中,需要增加冷却塔效率 EIR,增加冷冻泵效率以及增加冷冻水供回水温差。待调整参数集由灰色背景在表格中表示。

表 5-4 冷却塔和冷却水泵的可能误差输入参数集

	冷却塔能耗 $E_{ctf}$	冷冻水泵能耗 $E_{chwp}$
	-	+
冷却塔风机全效率 $R_{ctf}$ (EIR)	+	
冷却水供回水温差 $DT_{cw}$	-	
冷却水温度 $T_{cw}$	-	
冷冻水温度 $T_{chw}$	-	
冷冻水泵机械效率 $R_{mechwp}$		-
冷冻水供回水温差 $DT_{chw}$		-
供冷送风温度 $T_{csa}$	-	-

寻出待调整参数集后，利用 4.2.2 中的方法，得到冷却塔效率为 0.1，冷冻水供回水温差为  $6.44^{\circ}\text{C}$ ，冷冻水泵效率为 0.86，调整至校验模型 1 中，得到校验模型 2，并运行输出模拟结果，见图 12-图 13。

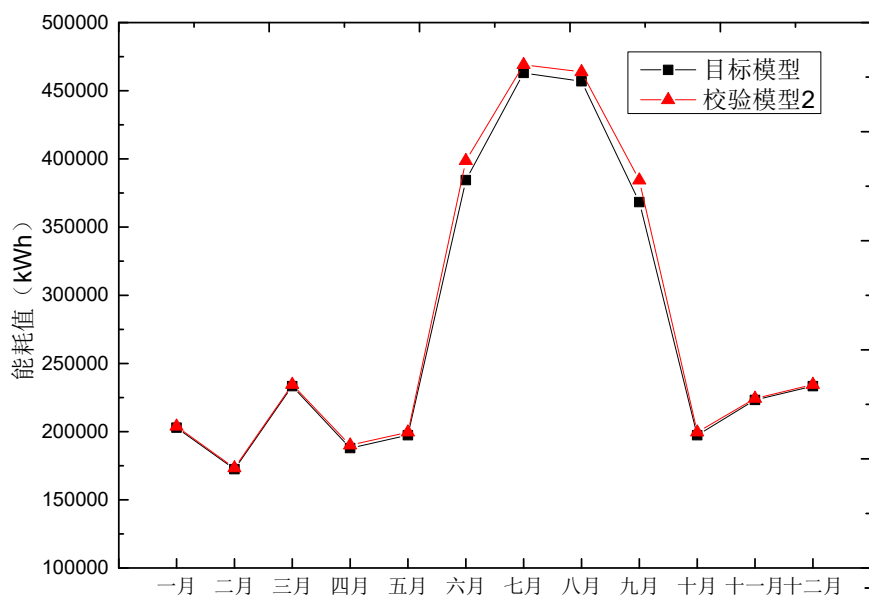


图 5-12 目标模型和校验模型 2 的耗电总值对比

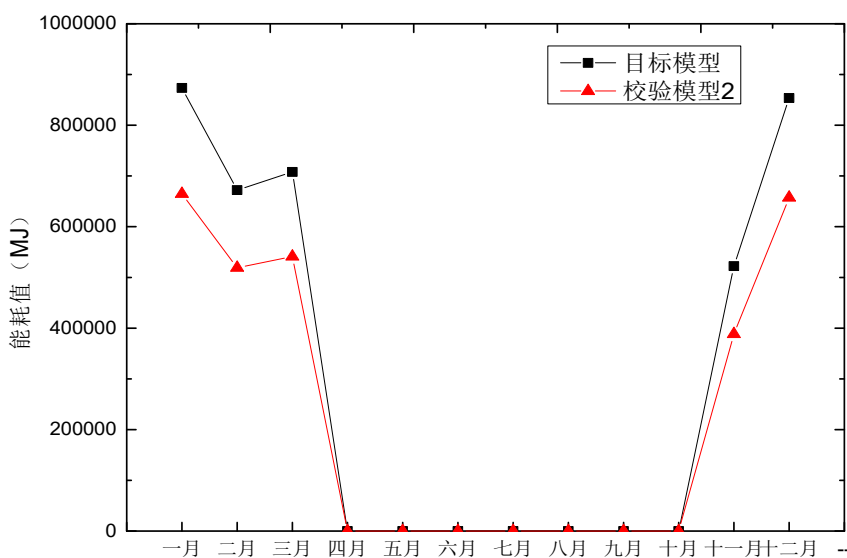


图 5-13 目标模型和校验模型 2 的耗气总值对比

从图 5-12 中已经可以清晰地看出，经过对大误差分项的校验调整，耗电总量的逐月误差已经变得相当小。具体的分项误差见表 5-5。

表 5-5 校验模型 2 的分项误差分析

误差分析	MBE	CV(RMSE)
总电耗	1.66%	2.48%
总气耗	-23.66%	23.96%
照明	1.11%	1.11%
设备	1.20%	1.20%
冷机	23.97%	23.62%
冷却塔	-13.46%	14.76%
冷冻泵	25.35%	25.38%
冷却泵	2.21%	2.21%
供冷风机盘管	-4.24%	4.24%
供热风机盘管	-4.23%	4.26%
热水泵	-12.48%	12.56%
锅炉	-23.77%	23.96%

对比表 5-4 和表 5-5，冷却塔和冷冻泵的分项能耗误差已经得到很大程度上降低，冷却塔能耗的从 82.08%降至 14.76%。

### 3) 第三步 对误差 15%的分项集中校验

经过针对个别较高能耗误差分项的校验之后，对误差在 15%以上的分项集中进行校验。同样根据建筑能耗符号有向图的搜索，可能的误差输入参数集见表 5-6。进入待调整参数集的参数着灰色。

寻出待调整参数集后，依然利用 4.2.2 中的方法，冷冻水供回水温差为 7.11℃，冷机性能系数（EIR）为 0.13，锅炉效率（EIR）为 1.52。调整至校验模型 2 中，得到校验模型 3，并运行输出模拟结果，见图 14-图 15。

表 5-6 冷机能耗、冷却水泵能耗和锅炉能耗的可能误差输入参数集

	冷机能耗 $E_{chi}$	冷冻水泵能耗 $E_{chwp}$	锅炉能耗 $E_b$
冷却水供回水温差 $DT_{cw}$	+		
冷机性能系数 COP (EIR)	+		
冷却水温度 $T_{cw}$	+		
冷冻水温度 $T_{chw}$	-		
冷冻水泵机械效率 $R_{mechwp}$		-	
冷冻水供回水温差 $DT_{chw}$		-	
供冷送风温度 $T_{csa}$	-	-	
锅炉效率 $R_b$ (EIR)			-

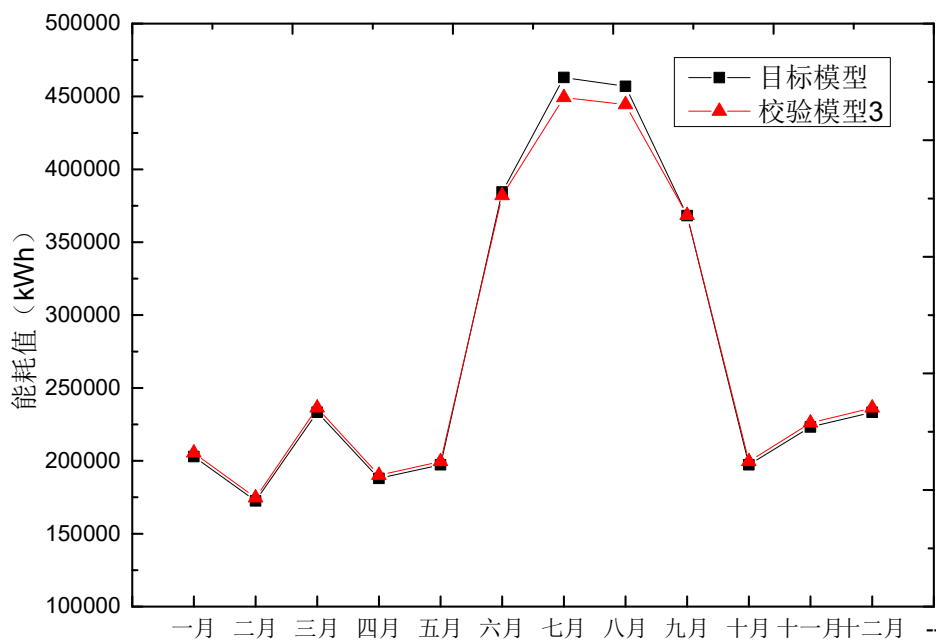


图 5-14 目标模型和校验模型 3 的耗电总值对比

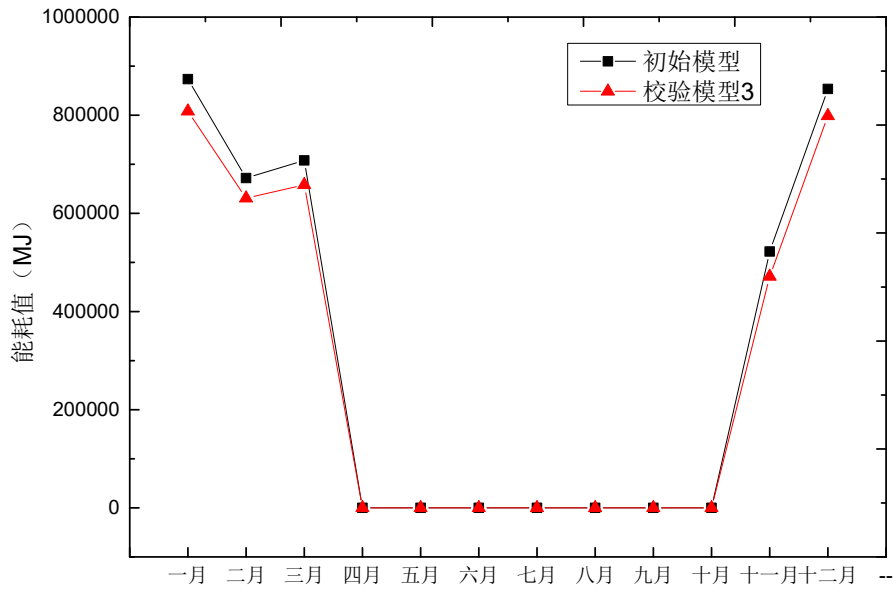


图 5-15 目标模型和校验模型 3 的耗气总值对比

经过三步调整，模型的准确性已经得到提升，对比图 5-13 和图 5-15，可以直观地看到气耗误差已经降低。具体的分项误差见表 5-7。

表 5-7 校验模型 3 的分项误差分析

误差分析	MBE	CV(RMSE)
总电耗	-0.25%	2.10%
总气耗	-7.21%	7.29%
照明	1.11%	1.11%
设备	1.20%	1.20%
冷机	11.15%	10.87%
冷却塔	-14.93%	16.21%
冷冻泵	-6.73%	6.74%
冷却泵	-15.45%	15.47%
供冷风机盘管	-4.24%	4.24%
供热风机盘管	-4.23%	4.26%
热水泵	11.37%	11.44%
锅炉	-7.35%	7.29%

从表 5-7 中可以看到，总气耗均方根变异系数误差已从 23.96% 降至 7.29%，冷机能耗误差也从 23.62% 变为 10.87%。

#### 4) 第四步 负荷侧参数的校验

经过前三步的调整，各分项的能耗误差已经在一个相对低且相近的范围内。此时进入第四步，对负荷侧的参数进行调整，负荷侧的每一项参数都将对整个负荷产生影响，所有影响所有的空调系统部件。负荷侧参数对应于分项误差的误差见表 5-8。

从表 5-7 中可知，大多数的部件误差为负，则以负向差来分析负荷侧参数的误差情况。负荷侧的调整，从敏感性较大的参数开始。根据第四章的分析，影响负荷较大的是外墙传热系数和室内人员密度，将其调整至  $1.25\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  和  $7.43\text{m}^2/\text{P}$ ，带入校验模型 3 中，得到校验模型 4，运行输出模拟结果，见图 5-16~图 5-17。

表 5-8 负荷侧误差输入参数集

输入参数	冷机能耗 $E_{\text{chi}^+}$	冷却塔风机能耗 $E_{\text{ctf}}$	冷冻水泵能耗 $E_{\text{chwp}}$	空调风机能耗 $E_{\text{cf}}$	供暖风机能耗 $E_{\text{hf}}$	供暖热水泵能耗 $E_{\text{hwp}^+}$	锅炉能耗 $E_{\text{b}^-}$	冷却水泵能耗 $E_{\text{cwp}}$
墙体综合传热系数 $U_w$	+	-	-	-	-	+	-	-
屋顶综合传热系数 $U_r$	+	-	-	-	-	+	-	-
外窗综合传热系数 $U_{\text{win}}$	+	-	-	-	-	+	-	-
综合遮阳系数 $S_{\text{win}}$	+	-	-	-	-	+	-	-
外窗面积 $A_{\text{win}}$	+	-	-	-	-	+	-	-
人员密度 $D_p$ ( $\text{ft}^2/\text{p}$ )	-	+	+	+	+	-	+	+

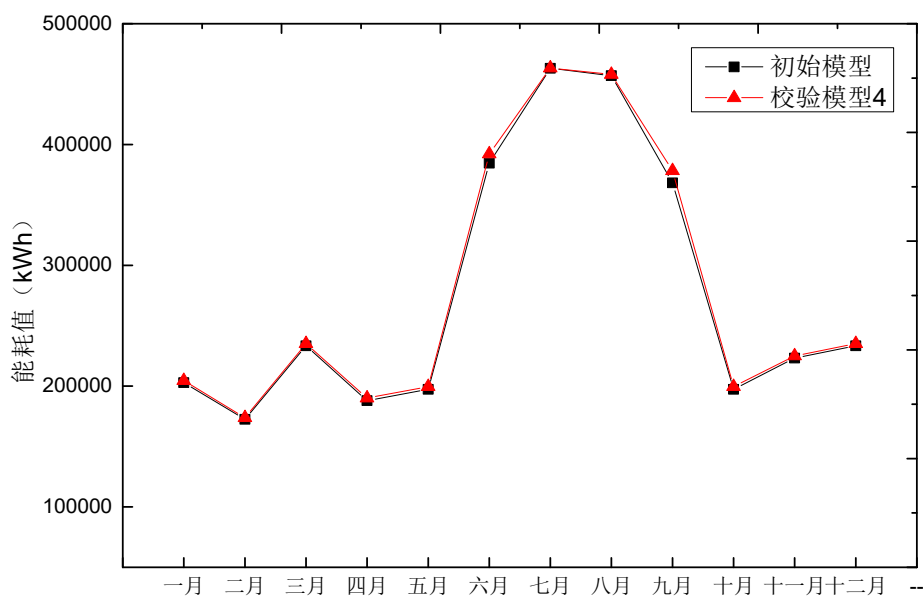


图 5-16 目标模型和校验模型 4 的耗电总值对比

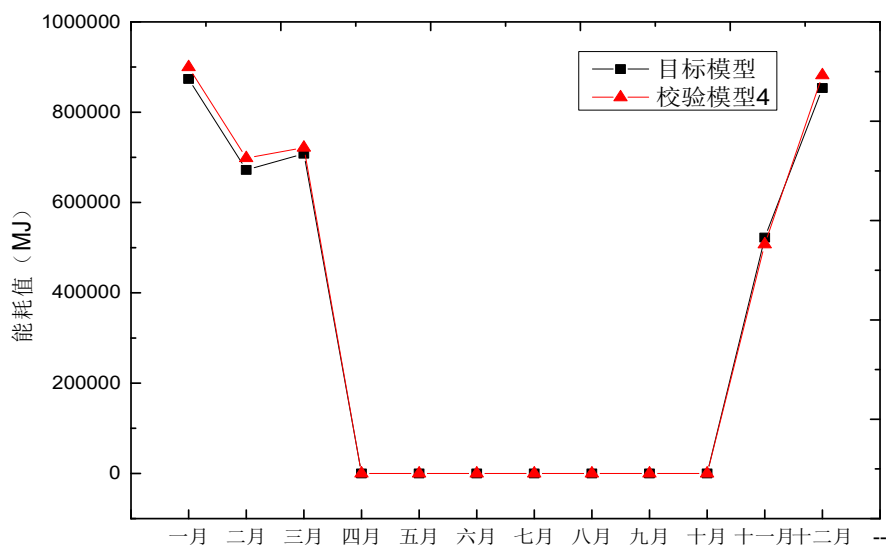


图 5-17 目标模型和校验模型 4 的耗气总值对比

从图 5-16 和图 5-17 中看到，经过第四步负荷侧的调整，校验模型 4 的能耗总量逐月误差已经很低，总耗电量和总耗气量的均方根变异系数误差分别为 1.44% 和 3.15%。具体的分项误差见表 5-9。



表 5-9 校验模型 4 的分项误差分析

误差分析	MBE	CV(RMSE)
总电耗	1.03%	1.44%
总气耗	2.21%	3.15%
照明	1.11%	1.11%
设备	1.20%	1.20%
冷机	15.06%	14.79%
冷却塔	-11.80%	12.93%
冷冻泵	15.91%	15.93%
冷却泵	5.08%	5.08%
供冷风机盘管	-0.97%	0.98%
供热风机盘管	-0.97%	0.98%
热水泵	-7.48%	7.52%
锅炉	1.88%	3.15%

### 5) 第五步 局部微调

最后一步是对部分依然在 15% 以上的误差部分进行微调, 如表 5-9 所示, 对冷冻泵相关参数进行调整, 调整方法依然是基于符号有向图的方法, 不在此赘述。冷冻水供回水温差调整至 7.22°C, 调整后的逐月总能耗见图 5-18~图 5-19, 分项误差见表 5-10。

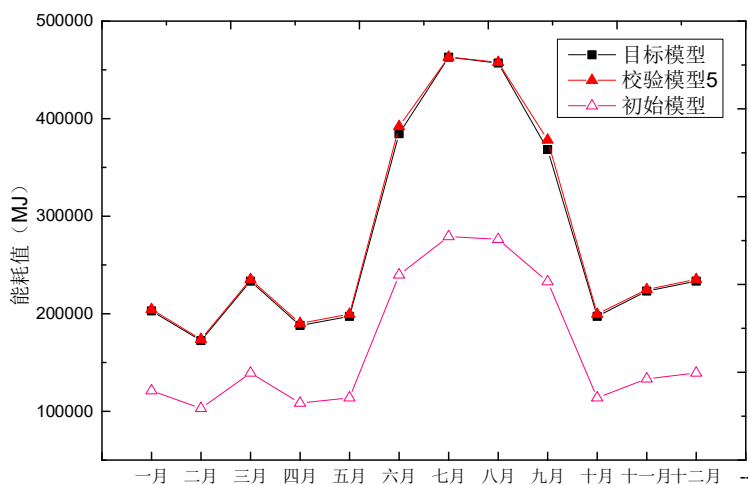


图 5-18 目标模型和校验模型 5 的耗电总值对比

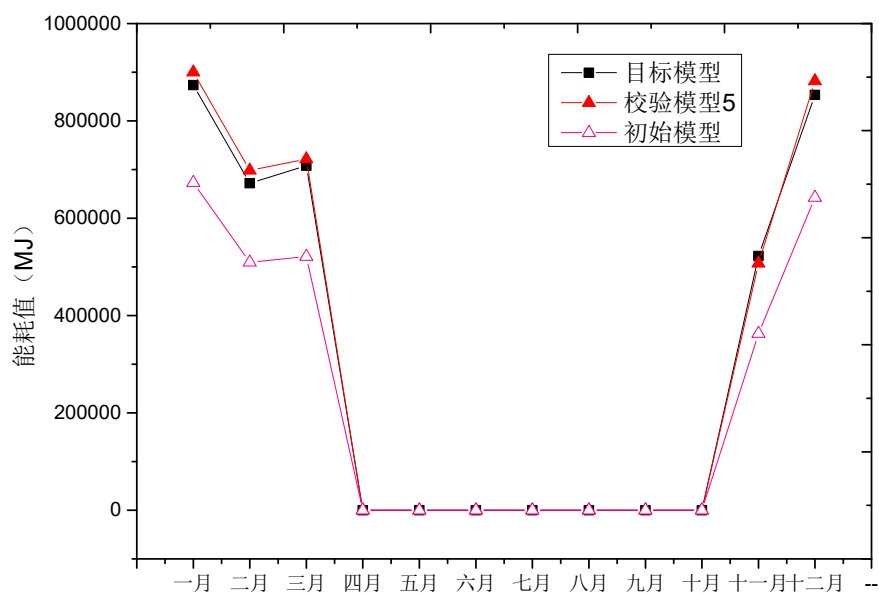


图 5-19 目标模型和校验模型 5 的耗气总值对比

表 5-10 校验模型 5 的分项误差分析

误差分析	MBE	CV(RMSE)
总电耗	1.01%	1.42%
总气耗	2.21%	3.15%
照明	1.11%	1.11%
设备	1.20%	1.20%
冷机	15.04%	14.77%
冷却塔	-11.82%	12.94%
冷冻泵	14.13%	14.15%
冷却泵	5.06%	5.07%
供冷风机盘管	-0.97%	0.98%
供热风机盘管	-0.97%	0.98%
热水泵	-7.48%	7.52%
锅炉	1.88%	3.15%

### 5.1.3 实验模型的结果分析

#### 1、能耗结果分析

最终的校验结果见 5.18~图 5-19 和表 5-10。从直观上看，显然校验模型的能耗值已经非常接近目标能耗值。从数据上看，所有的分项均方根变异系数误差在 15%以下，电耗总量和气耗总量的误差分别为 1.42%和 3.15%。初始模型和校正完全模型的误差见表 5-11。经过校验后的模型在输出能耗方面拥有很好的表现。

表 5-11 校验模型和初始模型的误差比较

CV(RMSE)	初始模型	校验模型
总电耗	42.15%	1.42%
总气耗	25.50%	3.15%
照明	51.35%	1.11%
设备	36.03%	1.20%
冷机	6.34%	14.77%
冷却塔	84.64%	12.94%
冷冻泵	45.66%	14.15%
冷却泵	4.88%	5.07%
供冷风机盘管	13.04%	0.98%
供热风机盘管	13.10%	0.98%
热水泵	17.69%	7.52%
锅炉	25.50%	3.15%

#### 2、输入参数调整分析

模型校验前后的参数值、参数误差及参数识别情况见表 5-12。参数识别为基于符号有向图根据分项误差搜索出可能误差参数集，表格中背景标红的即为正确识别项，本次校验中参数识别正确率为 76.92%，未识别出的主要原因在于对与正常值无异参数的识别错误。比较校验后参数与目标参数的值，最大的输入参数误差为外墙综合传热系数，误差为 31.25%，最小为设备功率密度，误差为 1.20%，所有参数误差的平均值为 9.87%。

表 5-12 模型校验前后的参数值、参数误差及参数识别情况

	目标 参数	初始 模型	校验 模型	识别 参数	参数 误差
墙体综合传热系数 $U_w$ ( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ )	1.82	0.89	1.25	-	31.32%
屋顶综合传热系数 $U_r$ ( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ )	0.84	0.64			
外窗综合传热系数 $U_{win}$ ( $W/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$ )	2.67	2.67			
综合遮阳系数 $S_{win}$	0.78	0.94			
人员新风量 $OA_p$ ( $m^3/(h \cdot P)$ )	72000	72000			
人员密度 $D_p$ ( $m^2/P$ )	7.25	8.0	7.43	+	2.48%
冷却塔风机全效率 $R_{ctf}$ (EIR)	0.1	0.0226	0.1	-	
冷却水供回水温差 $\Delta T_{cw}$	2.78	5.55		+	
冷却水泵机械效率 $R_{mecwp}$	0.67	0.77			
冷机性能系数 COP (EIR)	0.127	0.167	0.13	+	2.36%
冷却水温度 $T_{cw}$	21.11	29.44		+	
冷冻水温度 $T_{chw}$	4.44	7.22		+	
冷冻水泵机械效率 $R_{mechwp}$	0.77	0.77	0.86	-	11.69%
冷冻水供回水温差 $\Delta T_{chw}$	7.78	5.56	7.22	-	7.20%
供冷送风温度 $T_{csa}$	18.33	15.56		+	
空调风机全效率 $R_{cf}$ (EIR)	0.43	0.33			
锅炉效率 $R_b$ (FIR)	1.25	1.25	1.52	-	21.60%
供暖热水泵机械效率 $R_{mehwp}$	0.77	0.77			
供暖热水供回水温差 $\Delta T_{hw}$	13.89	11.11			
供暖送风温度 $T_{hsa}$	40	35			
照明密度 $q_{lt}$ ( $W/m^2$ )	19.38	11.00	19.59	-	1.08%
设备密度 $q_{eqpt}$ ( $W/m^2$ )	26.91	20.00	27.23	-	1.19%

综合来看，本文提出的基于符号有向图的建筑能耗模型的校验方法具有较好

的表现，特别是在输出能耗方面的误差较低。输入参数的误差原因主要在于其数量过多，存在很大的不确定性，这是因为缺少一些中间变量真实测量数据的限制。随着楼宇技术的发展和能源监测系统的完善，建筑数据的分辨率将会更高，此时利用本文建立的建筑能耗符号有向图将可以进一步提高建筑能耗模型的准确性。

另外，因为实验在计算机虚拟模型中进行，规避了实际建筑中的一些不确定性，如时间表中更多的随机性、测量传感器的误差等。对实际建筑的能耗模型进行校验的不确定性将一定程度上增加，特别是对于输入参数而言。因此，接下来开展基于实际数据的校验方法验证。

## 5.2 基于实际数据的校验方法验证

为了进一步在实际建筑中验证校验方法，本文选取上海市一栋办公大楼作为实例，用 eQUEST 进行模拟分析。

### 5.2.1 实际建筑能耗模型的概况

该办公大楼位于上海市长宁区，总建筑面积为 73680m<sup>2</sup>，建筑高度约为 132m，共 30 层。根据建筑图纸，其中冷热源系统，采用冷源为 2 台制冷量为 2813kW 和 1 台制冷量为 1758kW 的离心式电制冷冷水机组，热源为 2 台制热量为 2300kW 的燃气热水锅炉。建筑办公室内采用全空气变风量空调系统，空调水系统采用四管制闭式循环系统，提供全年 7-13℃ 的冷冻水和 60-48℃ 的热水。室内设计参数见表 5-14，标准层见图 5-20。

表 5.14 建筑室内设计参数

房间 名称	室内参				人员 密度 m <sup>2</sup> /P	照明 负荷 W/m <sub>2</sub>	设备 负荷 W/m <sup>2</sup>
	夏季		冬季				
	温度℃	相对湿度%	温度℃	相对湿度%			
办公室	24	≤55	20	≥45	10	20	65

所获得的建筑图纸及设计说明中未提及建筑围护结构物性参数等数据，因此这些缺失数据按照典型建筑参数设置。

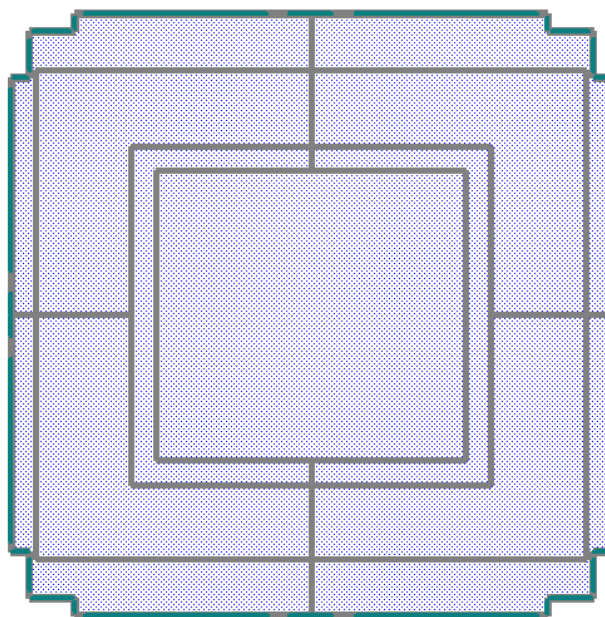


图5.20 某办公建筑标准层

### 5.2.2 实际建筑能耗模型的校验过程

基于以上办公建筑信息，利用 eQUEST 建立建筑能耗模型，外形 3-D 图见图 5-21。

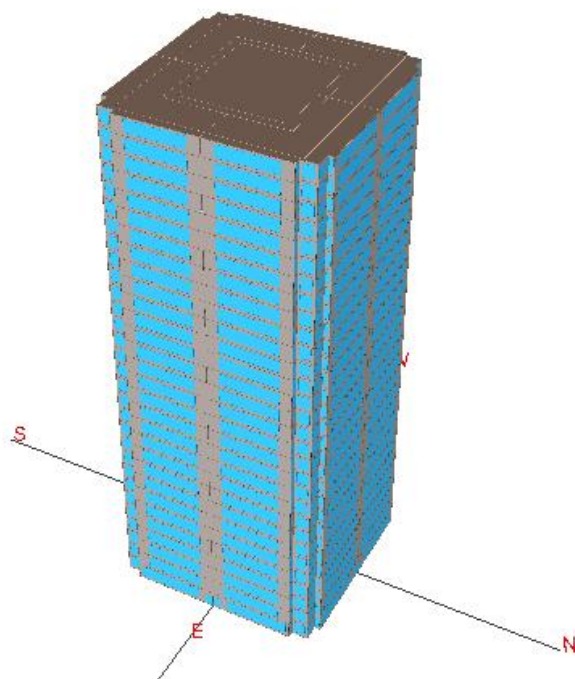


图5-21 上海市某办公大楼的3-D外形模型

模型运行后与实际数据比较，见图 5-22~图 5.23。

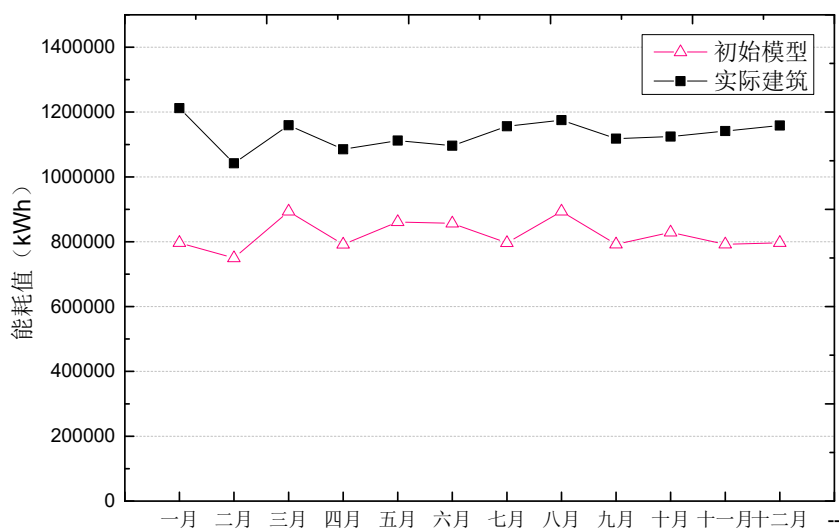


图5-22 实际办公建筑照明和设备综合能耗的模拟数据和实际数据对比

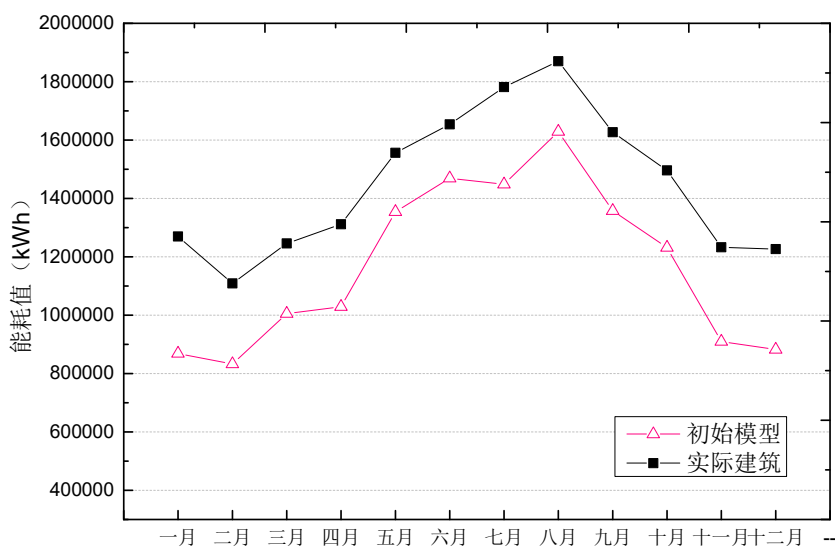


图5-23 实际办公建筑总电耗的模拟数据和实际数据对比

因为实例建筑的检测系统限制，该办公大楼的室内照明系统和设备系统的数据合并记录，所以在接下来的校验中也将其合并校验。另外，该楼宇无法对气耗进行记录，因为本文对此建筑模型的校验不涉及锅炉的气耗校验。

从图 5-22 中看到，初始模拟模型的照明设备能耗与实际数据相差较大，数据上均方根变异系数误差为 27.83%，超出误差允许范围。从图 5-23 可知，建筑总电耗模拟数据误差相对前者较小，同时从图上看，该误差为全年误差，数据上

均方根变异系数误差为 19.77%。

对该建筑模型按照前文出的基于符号有向图的建筑能耗模型校验方法对该初始模型进行校验,利用典型日方法校验模型时间表和利用分步分部法校验调整类参数。具体方法应用已在前一节的典型模型验证中展示,故不在此赘述。不同点在于,对实际建筑的校验需要在第一步中用实际天气参数替换初始建模时所用的典型气象参数。

校验后的校验模型和实际建筑的数据比较见图 5-24 和图 5-25。

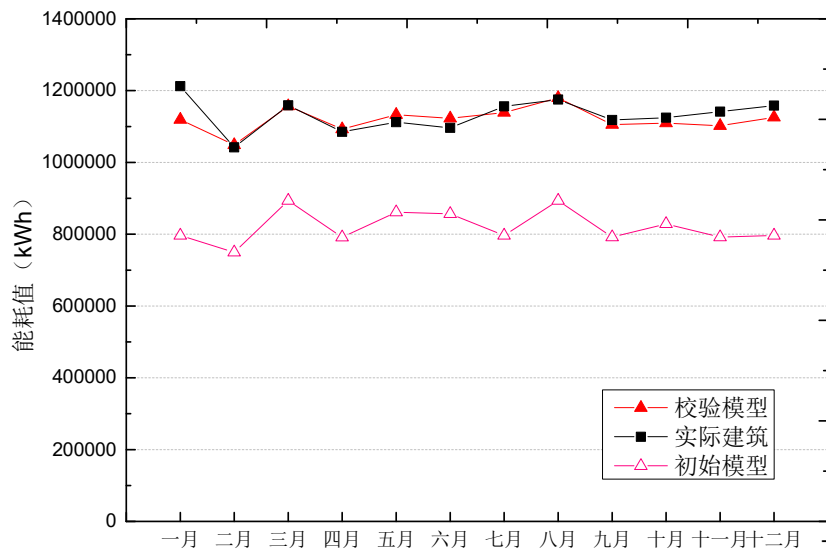


图5-24 校验模型和实际建筑照明设备能耗对比

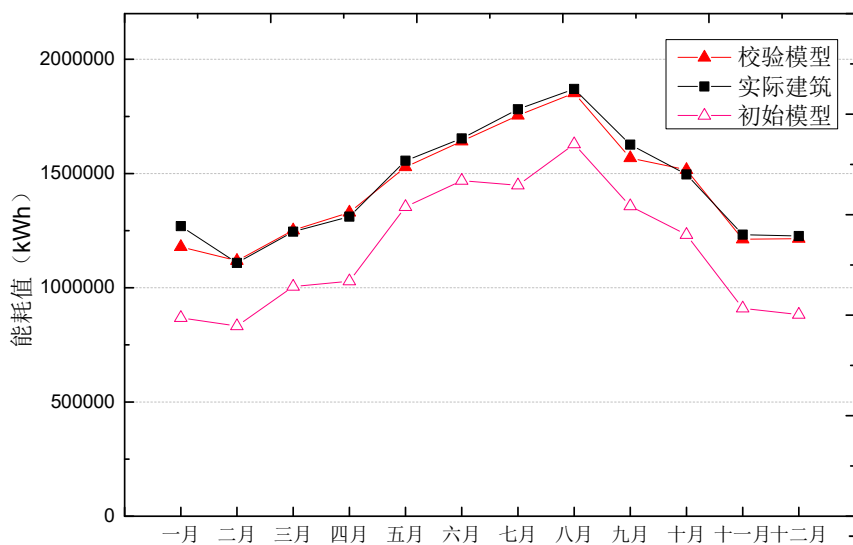


图5-25 校验模型和实际建筑总电耗对比



从图 2.22 和图 2.23 中可以看到，照明设备的误差已经降到很低，均方根变异系数误差为 2.93%，总电耗误差为 2.63%。

### 5.2.3 实际建筑能耗模型的结果分析

对于实际建筑的能耗模型校验，本文所提出的基于符号有向图的建筑能耗模型校验方法依然具有很好的适用性。相较于计算机虚拟模型，实际建筑的校验结果不能保证那么高的准确性，这是因为在实际建筑中存在更多的不确定性，如时间表更加随机等。提高实际检测数据的分辨率，将可以有效减少这些不确定性。不过，检测数据的分辨率提高到一定程度之后，数据驱动模型的优势和准确度将更加明显，而此时物理模型的地位和作用将需要重新思考和平衡。

## 5.3 本章小结

本章借助两个案例——计算机虚拟实验建筑模型和实际建筑数据对本文所提出的建筑能耗模型校验方法进行应用性展示和有效性验证。

## 第 6 章 总结与展望

### 6.1 文章总结

节能减排已经成为建筑行业的重要议题,适应于全世界全行业的趋势和政策,建筑行业也应具有同步的责任贡献。建筑节能工作主要包括对新建建筑的节能设计以及对既有建筑的节能改造。由于涉及问题的种类和细节较复杂,所以需要建立相应的能耗模型,进行动态的模拟与分析。

科学模型是基于想象和抽象而对现实世界或未来世界某种实体系统的一种简化了的映像,因此模型的本质常常表现为二重性:一方面,它从本质上极力与现实的实体系统的结构、功能、联系保持一致,因而从模型出发常常可以引申出与原型一致的结论;另一方面,它舍去了某些东西,对实体系统的结构、功能、联系等加以简化,因而在一定程度上与现实原型之间存在某些偏差。科学模型中存在的这种与生俱来的偏差与研究人员对于事实信息的获得及其自身使用的建模方式相关,而这一特点也造就了本文研究的原始出发点,即建筑能耗模型和实际之间常存在误差,且此误差有时甚至超过 100%。误差的存在大大降低了模型的可信度,也因此损害了其在建筑运行评价中发挥的作用。所以在建模的过程中,需要对模型进行校验,其目的就在于减少模型和实际之间的误差。

不过,由于建筑能耗模拟涉及繁多的输入参数,导致校验一直是一项不确定性很高的工作。迄今为止,建筑能耗模型的校验没有达成共识的通用方法,最初的人工迭代校验至今依然是被高频使用的途径。但人工校验必然费时费力,同时因为大量的待调整输入参数存在,模拟人员也很可能因为精力有限而出错。近年来,自动过程的引入已很大程度上减轻了模拟工作负担,但当前阶段,研究人员倾向于从一开始就将迭代校验的工作交给计算机自动完成。而这种自动校验采用的是传统单纯的数学方法,即将建筑能耗物理模型直接抽象成多目标的数学优化问题,脱离了实际物理意义。换句话说,校验后模型很有可能存在模拟结果与测量数据匹配较好但单个物理输入变量还存在相当大差距的问题。

因此,本文提出一种基于符号有向图的建筑能耗模型校验方法,将人工校验的知识和逻辑模块化,为结合人工和自动校验双边优势的途径发展提供一种可能。

首先,本文通过细致研究建筑能耗相关各物理参数之间、参数和能耗之间因果关系的理论基础,建立从围护结构、室内人员等负荷侧到冷热源、输配系统等供应侧的建筑能耗符号有向图,并依据模型校验目的对图中所涉及参数进行分类——不可校验参数、可获得参数、时间表参数和调整类参数。其中时间表参数和调整类参数即为本文进行校验的目标。

随后，建筑能耗模型校验工作分为两个阶段。

第一阶段是利用本文对提出“典型日时间表校验法”，建筑运行的时间表进行校验。建筑中的运行时间表一般包括照明系统时间表、设备系统时间表、人员在室时间表和空调运行时间表，它们在能耗模拟中占有重要的地位，对能源消耗量有很大的影响。“典型日时间表校验法”具体方法是对室内照明系统、设备系统、人员在室、空调系统等进行短期监测，建立包括工作日、周末和节假日这三种类别的基本典型日时间表，以及室内照明和设备的功率密度。空调系统运行的时间表固定，而照明、设备、人员的时间表再根据各项逐月的实际能耗值，对基本典型日时间表进行等比例缩放，以获得逐月的时间表。

第二阶段是利用本文提出“分步分部参数校验法”对调整类参数进行校验。对调整类参数的校验有两个关键性问题，一是确定调整对象，二是推算调整的幅度。前者通过比较模拟结果和实测数据，依据不同部件的误差结果，基于符号有向图的向前推理机制按图索骥搜索出可能的误差参数集，并遵循“独立影响原则”，确定待调整参数集。而调整幅度的推算建议则是利用符号有向图向后推理机制，事先建立参数和部件能耗的函数逻辑关系，然后依照“从局部到全局再到局部”的参数调整逻辑，利用已有的函数逻辑关系，分步骤地基于不同的部件对涉及待调整进行调整。

文章的最后，本文借助计算机虚拟建筑模型和实际建筑数据对本文所提出的建筑能耗模型校验方法进行应用性展示和有效性验证。其中计算机虚拟建筑模型的校验是借用“双盲实验”原理，两个人共同完成。由自建模型的可知性，可以方便地对校验准确性进行评价。

## 6.2 研究贡献

1981年由 Stephen C. Diamond 和 Bruce D. Hunn 两位美国洛斯阿拉莫斯国家实验室学者首次提出建筑能耗模型校验问题，至今已有三十多年。这些年里，建筑能耗模型校验从一开始鲜少人关注，到后来得到越来越多的研究，方兴未艾。这样的发展一定程度上乘势于建筑行业和计算机领域的蓬勃繁荣。建筑能耗校验相关的误差规范已见诸于各项规范和指南，但因其涉及参数的繁多所造成的高不确定性，使得至今未有一个公认的校验方法。不过好在一直都有学者参与对此的研究，也相信会有更加完备的方法出现。

本文的出发点在于寻求对接人工校验和自动校验两者优势的桥梁，在建筑能耗模型校验领域所做出的贡献主要为：

- 1、综述建筑能耗校验模拟。从上层的宏观背景和底层的模型法则阐述建筑能耗模型校验的位置和切入点，同时按照工作流程综述性地梳理现今的校验方法。

这些工作可以为今后模拟人员的实际工作提供参考,也可为研究人员的学术探索提供线索。

2、制作建筑能耗符号有向图。建筑能耗符号有向图是基于实际的建筑内部能耗有关参数的因果联系,可以帮助建立对建筑能耗研究的全局认识,这也是进行建筑能耗模型校验最根本的依据。

3、提出建筑能耗模型校验方法。本文提出的校验方法基于建筑能耗符号有向图,通过输入参数的分类筛选,采用“典型日时间表校验法”对模型的时间表参数进行调整和采用“分步分部校验法”对模型的调整类参数进行校验。

以上建筑能耗模型校验方法基于建筑能耗知识建立,并且可借助于计算机编程实现完全的自动化(本文已完成知识模块化的 Python 辅助程序),这就是本文所提供的“桥梁”。

### 6.3 未来展望

由于课题研究时间和本人的能力水平有限,本文对建筑能耗模型的校验问题没有做到尽善尽美,有些地方还需要进一步完善,有些想法也还需要时间去探索。以下是本文的不足之处以及接下来可能继续研究的展望:

1、自动化。本文未实现完整的自动校验,只是在基于符号有向图进行可能误差参数的搜索和调整方案建议方面利用 Python 编程完成。而本文已经将传统人工校验中的经验知识进行了信息模块化处理,以后的工作可以基于此将此校验方法实现完全的自动化。

2、云平台。现阶段的校验工作只凭借个人完成,但再完备的专业知识如果缺少一定的实际经验也不会校验出特别准确的模型。另外,个人的校验路径具有很高的借鉴价值,如果不进行记录将会造成资源的浪费。因此,接下来可以借助搭建基于本文方法的开放云平台,搜集每一个使用云平台开展校验工作的模拟人员授权的校验信息,为更精准的校验方案版本迭代提供经验数据。

3、更高的数据分辨率。当前校验模型的不确定性很大程度上来自于数据的分辨率过低。建筑监测数据相当于现实世界的一个个切片,利用这些切片再基于一定的基础专业知识,可以建立对应于实际情况的模型。但如果切片数量不够或者清晰度低,则会降低所建模型于实际情况的趋同性。因此,在将来的工作中,有必要建立更加完善的建筑数据监测系统,为模型建立的准确性提供更强有力的依据。

## 致谢

来到同济大学已有两年半时间，至今依然记得获知被录取时的那份激动和欣喜。而现在，这一段旅程又即将走完，心中满是感慨和感恩。

首先，我要特别感谢我的导师潘毅群教授，谢谢接纳我进入课题组学习，这是我这两年半珍贵经历的开端。潘老师在学术上有着广阔不拘的视野和扎实不苟的功底，在论文开题和研究过程中不断对我悉心指导、同我耐心讨论，这才使得我的毕业论文顺利完成。感谢潘老师给我的机会和自由、尊重和包容，这些是我期待但又不敢强求的，但潘老师总是无私地给予我。每当我有问题向她请教和讨论时，她总是不吝用她真诚的微笑化解我内心的局促，令我如沐春风。潘老师是一个克己自律的人，高效工作、踏实休息，感谢她让我看到自我秩序的美妙和可能。同样特别感谢课题组的黄治钟老师，黄老师严谨求真的学术态度和广博深刻的知识储备，令我钦佩和向往。感谢黄老师在我论文完成过程中的关注和信任，他常常对于问题一针见血的意见让人醍醐灌顶，对于知识深入浅出的解释使人豁然开朗。很珍惜满怀欣喜后被打击、打击后又治愈的日子。黄老师是一个心怀好奇的人，对新事物充满学习热情和敏锐感知，感谢他让我意识到我需要精进的方向。感恩两位老师在我身上倾注的精力和时间，感谢他们的影响，让我有机会看到灿烂前程，成为更好的自己。

感谢许鹏老师给予的鼓励和帮助。许老师有一种可以激发人想象的力量，总能提出颇具挑战却又让人饶有兴致欲罢不能地去思考探索的问题。很幸运可以受到他的指导和影响。

感谢与我共同进步的同门师兄姐妹们。感谢朱明亚师姐和王秋润师兄，每次在例会上关于我论文内容的讨论时常积极给予有用的建议，也在我有问题请教时十分热心地解答。感谢林美顺师姐，在我们一起做碳排放项目时的理解和帮助。感谢杨一昆，与我共同写论文时的付出。同时还要感谢热心的李玉明师姐、伶俐的郁丛师姐、温厚的孙勇师兄、勤快的刘海静、机智的徐蕾、聪慧的王尉同、清婉的潘媛、不拘一格的吕岩，同你们在一个课题组让我感受到真挚和有趣，令我觉得不虚此行。

感谢与我同时进入潘门的丹琳和冰月。因为同步，所以有更多的理解和关注。丹琳总是像大姐姐一样照顾我，也时而如小妹妹般纯真可爱，惹人开心。冰月经常在学习上跟我讨论，也在学习外邀请我参加有意思的活动，令人愉悦。

感谢王慧龙与我共同奋斗，感谢鲁星时常的照顾，感谢侯瑾的真诚热情。感谢室友黄建在生活上的关照。感谢袁晗一如既往的关心和帮助。

在论文完成过程中，还要感谢龚晨在我编程学习中的帮助，感谢李为林师姐和冯帆对我论文数据上的支持。

感谢我的父母，教会我爱与自由。你们总是无私地给予我最多的关怀和支持，你们是我永远可以随时回去的港湾，是我身上的印记，是我来时的路，也是我前行的动力。

最后，也要感谢自己。感谢自己一直以来的体谅和坚持。

希望这不是我学术热情和成果的终篇。希望是未完待续。

杨陶

2017年3月于同济大学

## 参考文献

- [1] Callendar GS. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1938;64:223-40.
- [2] Fichman BT. Annual Energy Review 2009. USDOE Energy Information Administration (EIA), Washington, DC (United States). Office of Energy Markets and End Use; 2010.
- [3] Union E. 2030 Energy Strategy. 2014.
- [4] Zhang N, Wang B, Liu Z. Carbon emissions dynamics, efficiency gains, and technological innovation in China's industrial sectors. *Energy*. 2016;99:10-9.
- [5] Zhou N, Fridley D, Khanna NZ, Ke J, McNeil M, Levine M. China's energy and emissions outlook to 2050: Perspectives from bottom-up energy end-use model. *Energy Policy*. 2013;53:51-62.
- [6] Governments USaC. U.S.–China Joint Announcement on Climate Change. 2014.
- [7] Change UNFCoC. 2015 United Nations Climate Change Conference. 2015.
- [8] NDRC. National Climate Change Plan (2014–2020 years). 2014.
- [9] Council GOotS. Energy Development Strategy Action Plan (2014-2020). 2014.
- [10] Zuo J, Zhao Z-Y. Green building research—current status and future agenda: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;30:271-81.
- [11] Xing Y, Hewitt N, Griffiths P. Zero carbon buildings refurbishment—A Hierarchical pathway. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2011;15:3229-36.
- [12] Barker T, Bashmakov I, Alharthi A, Amann M, Cifuentes L, Drexhage J, et al. Mitigation from a cross-sectoral perspective. *Climate change*. 2007:619-90.
- [13] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2013. 北京 2013.
- [14] Peng C, Yan D, Guo S, Hu S, Jiang Y. Building energy use in China: Ceiling and scenario. *Energy and Buildings*. 2015;102:307-16.
- [15] Cai W, Wu Y, Zhong Y, Ren H. China building energy consumption: situation, challenges and corresponding measures. *Energy policy*. 2009;37:2054-9.
- [16] Book BED. US Department of Energy, 2011. 2010.
- [17] 江亿, 杨秀. 我国建筑能耗状况及建筑节能工作中的问题. *中华建设*. 2006:12-8.
- [18] Mills E, Friedman H, Powell T, Bourassa N, Claridge D, Haasl T, et al. The cost-effectiveness of commercial-buildings commissioning. LBNL-56637. 2004.
- [19] 巩慧. 科学模型的结构主义解读: 天津大学; 2009.
- [20] Reddy TA. Literature Review on Calibration of Building Energy Simulation Programs: Uses, Problems, Procedures, Uncertainty, and Tools. *ASHRAE transactions*. 2006;112.
- [21] Saltelli A, Ratto M, Andres T, Campolongo F, Cariboni J, Gatelli D, et al. Global sensitivity analysis: the primer: John Wiley & Sons; 2008.
- [22] Tupper K, Franconi E, Chan C, Fluhrer C, Jenkins M, Hodgin S. Pre-Read for BEM innovation summit. Retrieved from Rocky Mountain Institute website: <[http://www.rmiorg/Content/Files/Summit\\_PreRead\\_Apr-19-2011\(2\).pdf](http://www.rmiorg/Content/Files/Summit_PreRead_Apr-19-2011(2).pdf)>. 2011.
- [23] Scofield JH. Do LEED-certified buildings save energy? Not really.... *Energy and Buildings*. 2009;41:1386-90.
- [24] Turner C, Frankel M. Energy performance of LEED for new construction buildings. *New*

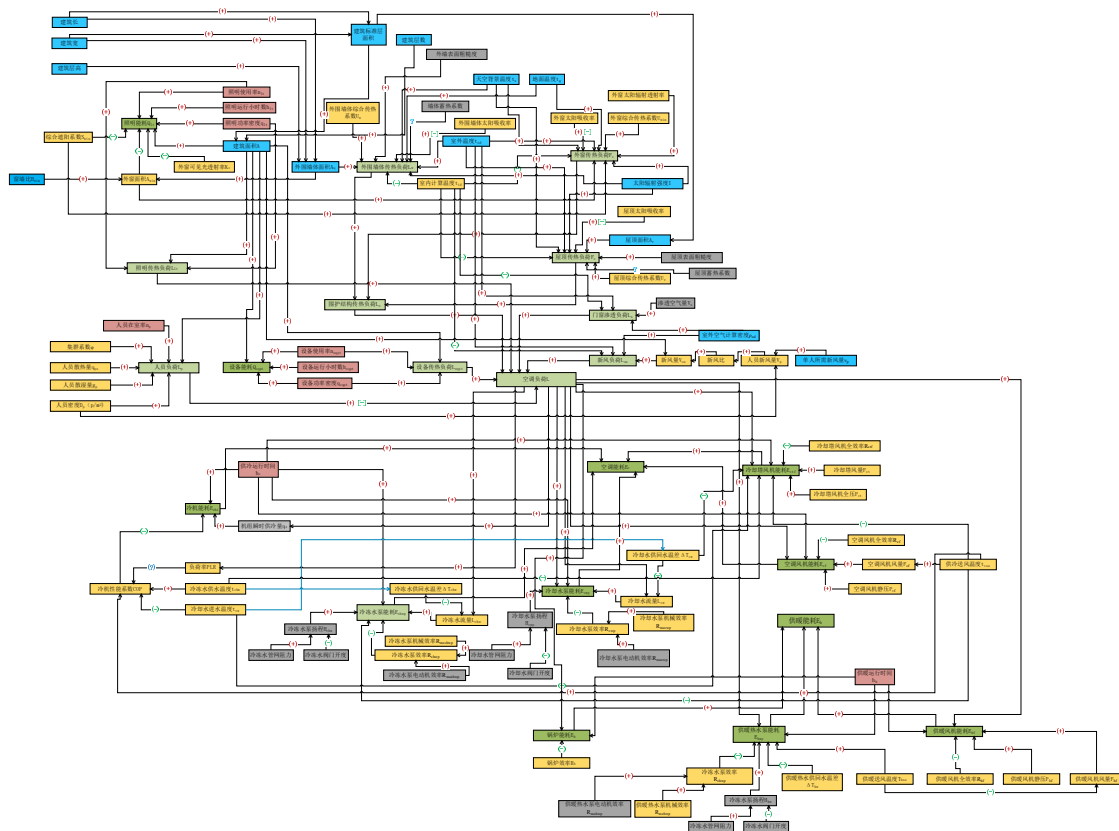
- Buildings Institute. 2008;4:1-42.
- [25] Karlsson F, Rohdin P, Persson M-L. Measured and predicted energy demand of a low energy building: important aspects when using building energy simulation. *Building services engineering research and technology*. 2007;28:223-35.
- [26] Carroll W, Hitchcock R. Tuning simulated building descriptions to match actual utility data: methods and implementation. *ASHRAE Transactions-American Society of Heating Refrigerating Airconditioning Engin.* 1993;99:928-34.
- [27] Troncoso R. A hybrid monitoring-modeling procedure for analyzing the performance of large central chilling plants. *Proceedings of Building Simulation1997*. p. 421-8.
- [28] Diamond S, Hunn B. Comparison of DOE-2 computer program simulations to metered data for seven commercial buildings. Los Alamos Scientific Lab., NM (USA); 1981.
- [29] Kaplan M, Jones B, Jansen J. DOE-2.1 C model calibration with monitored end-use data. *Proceedings from the ACEEE 1990 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*. 1990;10:10.115-10.25.
- [30] Bronson D, Hinchey S, Haberl J, O'Neal D. Procedure for calibrating the DOE-2 simulation program to non-weather-dependent measured loads. *ASHRAE Winter Meeting, Anaheim, CA, USA, 01/25-29/921992*. p. 636-52.
- [31] Bou-Saada TE, Haberl JS. An improved procedure for developing calibrated hourly simulation models. 1995.
- [32] Guideline A. Guideline 14-2002, Measurement of Energy and Demand Savings. American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia. 2002.
- [33] Energy D. International Performance Measurement & Verification Protocol. Handbook of financing energy projects. 2001:249.
- [34] DOE U. M&V Guidelines: Measurement and Verification for Federal Energy Project. Version. 2008;3:4.22.
- [35] 《公共建筑节能改造技术规范》. JGJ176—2009. 2009.
- [36] Coakley D, Raftery P, Keane M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2014;37:123-41.
- [37] Taheri M, Tahmasebi F, Mahdavi A. A case study of optimization-aided thermal building performance simulation calibration. *Optimization*. 2012;4.
- [38] Reddy TA, Maor I, Panjapornpon C. Calibrating detailed building energy simulation programs with measured data—Part I: General methodology (RP-1051). *Hvac&R Research*. 2007;13:221-41.
- [39] Farhang T, Ardeshir M. Monitoring-based optimization-assisted calibration of the thermal performance model of an office building. *International Conference on Architecture and Urban Design*; 2012.
- [40] Tahmasebi F, Mahdavi A. Optimizationbased simulation model calibration using sensitivity analysis. *Simulace Budov a Techniky Prostedri, O Sikula, J Hirs (ed)*. 2012.
- [41] Tahmasebi F, Zach R, Schuß M, Mahdavi A. Simulation model calibration: an optimization-based approach. *BauSIM 2012*. 2012;1.
- [42] Rosen R. *Life itself: a comprehensive inquiry into the nature, origin, and fabrication of life*: Columbia University Press; 1991.
- [43] De Wit S, Augenbroe G. Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications. *Energy and Buildings*. 2002;34:951-8.

- [44] Macdonald IA. Quantifying the effects of uncertainty in building simulation: University of Strathclyde Glasgow, Scotland; 2002.
- [45] Macdonald I, Strachan P. Practical application of uncertainty analysis. *Energy and Buildings*. 2001;33:219-27.
- [46] Macdonald I, Clarke J, Strachan P. Assessing uncertainty in building simulation. *Proc Building Simulation*1999.
- [47] Heidell J, Taylor Z. Comparison of empirically measured end-use metered data with DOE 2. 1 simulation. Pacific Northwest Lab., Richland, WA (USA); 1985.
- [48] Carabott M. Building simulation reconciliation using empirical data. *Proceedings of Building Simulation*1989. p. 23-4.
- [49] Kaplan M, McFerran J, Jansen J, Pratt R. Reconciliation of a DOE2. 1C model with monitored end-use data for a small office building. *ASHRAE transactions*. 1990;96:981-93.
- [50] Norford L, Socolow R, Hsieh ES, Spadaro G. Two-to-one discrepancy between measured and predicted performance of a 'low-energy' office building: insights from a reconciliation based on the DOE-2 model. *Energy and Buildings*. 1994;21:121-31.
- [51] Zmeureanu R, Pasqualetto L, Bilas F. Comparison of cost and energy savings in an existing large building as predicted by three simulation programs. *Fourth International Conference Proceedings Madison, USA*1995. p. 14-6.
- [52] Fabrizio E, Monetti V. Methodologies and advancements in the calibration of building energy models. *Energies*. 2015;8:2548-74.
- [53] Waltz JP. Practical experience in achieving high levels of accuracy in energy simulations of existing buildings. *Strategic planning for energy and the environment*. 1995;15.
- [54] Reddy TA, Maor I, Jian S, Panjapornporn C. Procedures for reconciling computer-calculated results with measured energy data. *ASHRAE Research Project*. 2006.
- [55] Lyberg MD. Source book for energy auditors. Volume 2. 1987.
- [56] CEC. Guide to preparing feasibility studies of energy efficiency projects. California, USA: California Energy Commission (CEC); 2000.
- [57] AR G, B. G. Investment Grade Energy Audit. *Proceedings of the 25th world energy engineering congress*. Atlanta,GA2002. p. 1-5.
- [58] Shapiro I. Energy audits: in large commercial office buildings. *Ashrae Journal*. 2009;51.
- [59] TRC. DOE-2:comparison with measured data:design and operational energy studies in new high-rise office building. NewYork,USA1984.
- [60] Soebarto VI. Calibration of hourly energy simulations using hourly monitored data and monthly utility records for two case study buildings. *Proceedings of Building Simulation*1997. p. 411-9.
- [61] Clarke J, Strachan P, Pernot C. An approach to the calibration of building energy simulation models. *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS*. 1993;99:917-.
- [62] Hadley DL. Daily variations in HVAC system electrical energy consumption in response to different weather conditions. *Energy and Buildings*. 1993;19:235-47.
- [63] Raftery P, Keane M, Costa A. Calibrating whole building energy models: Detailed case study using hourly measured data. *Energy and Buildings*. 2011;43:3666-79.
- [64] Raftery P, Keane M, O'Donnell J. Calibrating whole building energy models: An evidence-



- based methodology. *Energy and Buildings*. 2011;43:2356-64.
- [65] Akbari H. Validation of an algorithm to disaggregate whole-building hourly electrical load into end uses. *Energy*. 1995;20:1291-301.
- [66] Ji Y, Xu P. A bottom-up and procedural calibration method for building energy simulation models based on hourly electricity submetering data. *Energy*. 2015;93:2337-50.
- [67] O'Neill Z, Eisenhower B. Leveraging the analysis of parametric uncertainty for building energy model calibration. *Building simulation: Springer Berlin Heidelberg*; 2013. p. 365-77.
- [68] Raftery P, Keane M. Visualizing patterns in building performance data. 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney2011.
- [69] Liu M, Claridge D, Bensouda N, Heinemeier K, Lee S, Wei G. High performance commercial building systems: Manual of procedures for calibrating simulations of building systems. California Energy Commission. 2003.
- [70] Liu G, Liu M. A rapid calibration procedure and case study for simplified simulation models of commonly used HVAC systems. *Building and Environment*. 2011;46:409-20.
- [71] Wei G, Liu M, Claridge D. Signatures of heating and cooling energy consumption for typical AHUs. 1998.
- [72] Cukier R, Levine H, Shuler K. Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems. *Journal of computational physics*. 1978;26:1-42.
- [73] Eisenhower B, O'Neill Z, Narayanan S, Fonoberov VA, Mezić I. A methodology for meta-model based optimization in building energy models. *Energy and Buildings*. 2012;47:292-301.
- [74] Booth A, Choudhary R, Spiegelhalter D. A hierarchical Bayesian framework for calibrating micro-level models with macro-level data. *Journal of Building Performance Simulation*. 2013;6:293-318.
- [75] Heo Y, Choudhary R, Augenbroe G. Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty. *Energy and Buildings*. 2012;47:550-60.
- [76] 史海成, 王春艳, 张媛媛. 浅谈模式识别. *今日科苑*. 2007:169-.
- [77] Sun K, Hong T, Taylor-Lange SC, Piette MA. A pattern-based automated approach to building energy model calibration. *Applied Energy*. 2016;165:214-24.
- [78] 杨帆, 萧德云. SDG 建模及其应用的进展. *控制理论与应用*. 2005;22:767-74.
- [79] 《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019-2015). 2015.
- [80] 赵荣义, 范存养, 薛殿华, 钱以明. 空气调节(第4版): 中国建筑工业出版社; 2009.
- [81] Li C, Hong T, Yan D. An insight into actual energy use and its drivers in high-performance buildings. *Applied Energy*. 2014;131:394-410.
- [82] Pedrini A, Westphal FS, Lamberts R. A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates. *Building and Environment*. 2002;37:903-12.
- [83] 《公共建筑节能设计标准 GB50189-2015》. 2015.
- [84] Kim Y-S, Heidarinejad M, Dahlhausen M, Srebric J. Building energy model calibration with schedules derived from electricity use data. *Applied Energy*. 2017;190:997-1007.
- [85] Yang Z, Li N, Becerik-Gerber B, Orosz M. A non-intrusive occupancy monitoring system for demand driven HVAC operations. *Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World*2012. p. 828-37.
- [86] Bertagnolio S. Evidence-based model calibration for efficient building energy services: Université de Liège, Liège, Belgium; 2012.

## 附录 A 建筑能耗符号有向图



(高清图可下载自：<http://pan.baidu.com/s/1pLQ68Jp>)

## 附录 B 辅助建筑能耗模型校验的 Python 代码示例

### B.1 SDG 待校验参数搜索

```
#SDG to search the HVAC-side possible adjustable inputs

import queue

dict = {"Rctf","Ectf"):"-","Tcsa","Ectf"):"-","Tchw","Ectf"):"-","Tcw","Ectf"):"-
",("RTcw","Ectf"):"-", #冷却塔风机能耗
      ("RTcw","Ecwp"):"-","Rmecwp","Ecwp"):"-", #冷却水泵能耗
      ("RTcw","COP"):"-","Tcw","COP"):"-","Tchw","COP"):"+",
      ("RTchw","COP"):"-","Tcsa","COP"):"+","COP","Echi"):"-",
                                                    #冷机能耗
      ("Rmechwp","Echwp"):"-","RTchw","Echw"):"-","Tcsa","Echw"):"-",
                                                    #冷冻水泵能耗
      ("Tcsa","Ecf"):"+","Rf","Ecf"):"-","Pcf","Ecf"):"+",
                                                    #空调风机能耗
      ("Rb","Eb"):"-",
                                                    #锅炉能耗
      ("Rmehwp","Ehwp"):"-","RThw","Ehwp"):"-","Thsa","Ehwp"):"+",
                                                    #供暖热水泵能耗
      ("Thsa","Ehf"):"+","Rf","Ehf"):"-"}
                                                    #供暖风机能耗

hash = {"Rctf":"","Fct":"","RTcw":"","Rmecwp":"","Tcw":"","Tchw":"","
"Rmechwp":"","RTchw":"","Rf":"","Pcf":"","Ectf"):"-","Ecwp":"","Echi":"","
"Echwp":"","Ecf":""," #Cooling
      "Rb":"","Rmehwp":"","RThw":"","Thsa":"","Eb":"","Ehwp":"","Ehf":""}
                                                    #Heating

q = queue.Queue()
q.empty()

dest1 = "Ectf"
q.put(dest1)
```

```

while not q.empty():
    head = q.get()
    now_tag = hash[head]
    if now_tag == "":
        now_tag = "+"
    for k,v in dict.items():
        if v == "o":
            continue
        s = k[0]
        t = k[1]
        if t == head:
            if v == now_tag:
                hash[s] = "+"
                dict[k] = "o"
                q.put(s)
            else:
                hash[s] = "-"
                dict[k] = "o"
                q.put(s)

for k,v in hash.items():
    if k.find('E') == 0:
        continue
    print(k, ":", v)

```

## B.2 时间表的校验

```

import xlrd
import xlwt

# 打开文件
workbook = xlrd.open_workbook(r'X:\XX\Schedule.xlsx')
print('文件读取成功')
S = input("请输入建筑总面积: ")

```

```
#找最大值
sheet1 = workbook.sheet_by_index(0) #从位置获取 sheet
max1 = []
for i in range(31):
    col1 = sheet1.col_values(i+1) #获取第 i+1 列数据
    max0 = max(col1[2:24]) #获取这一列最大值
    max1.append(max0) #放入 max1 中
max2 = max(max1) #获得全部数中的最大值
D = (float(max2)*1000/0.95)/float(S)
print ('功率密度为:', round(D, 2), 'W/m2') #输出功率密度

#平均逐时能耗
hdavetime0 = []
wdavetime0 = []
weavetime0 = []
for i in range(24):
    #节假日
    time = sheet1.row_values(i+2) #读取一行
    hdtime = time[1:8] #选取节假日
    hdavetime = sum(hdtime)/len(hdtime) #算该时刻平均
    hdavetime0.append(hdavetime)
    #工作日
    wdtime = time[8:15] + time[17:22] + time[24:29] + time[31:32]
    wdavetime = sum(wdtime)/len(wdtime)
    wdavetime0.append(wdavetime)
    #周末
    wetime = time[15:17] + time[22:24] + time[29:31]
    weavetime = sum(wetime)/len(wetime)
    weavetime0.append(weavetime)

#基本典型日时间表
hdsch0 = []
wdsch0 = []
```

```
wesch0 = []
lteumax = max2/0.95 #照明最大负荷
for i in range(len(hdavetime0)):
    #节假日
    hdsch = hdavetime0[i] / lteumax
    hdsch0.append(round(hdsch, 2))
    #工作日
    wdsch = wdavetime0[i] / lteumax
    wdsch0.append(round(wdsch, 2))
    #周末
    wesch = weavetime0[i] / lteumax
    wesch0.append(round(wesch, 2))

#每月照明逐月时间表
#节假日典型日能耗
hdeu0 = 0
for i in range(24):
    hdeu0 += hdsch0[i] * lteumax

#工作日典型日能耗
wdeu0 = 0
for i in range(24):
    wdeu0 += wdsch0[i] * lteumax

#周末典型日能耗
weeu0 = 0
for i in range(24):
    weeu0 += wesch0[i] * lteumax

#获取实测能耗
sheet2 = workbook.sheet_by_index(1)#从位置获取 sheet2
lteu = sheet2.col_values(1) #读取逐月能耗

#获取典型日种类对应的天数
```

```
sheet3 = workbook.sheet_by_index(2)#从位置获取 sheet3

#字体样式
def set_style(name, height, bold):
    style = xlwt.XFStyle()    #初始化样式

    font = xlwt.Font()      #为样式创建字体
    font.name = name
    font.bold = bold
    font.color_index = 2
    font.height = height

    style.font = font
    return style

#创建 excel 文件
workbook = xlwt.Workbook(encoding='utf-8')    #文本编码格式为 utf-8

#时间表
for i in range(12):
    days = sheet3.row_values(i+1) #读日子
    eu0 = hdeu0*days[3] + wdeu0*days[1] + weeu0*days[2] #月基础能耗
    eu = lteu[i+1] #月能耗
    n = eu/eu0 #时间表调整系数
    hdsch = []
    wdsch = []
    wesch = []
    for j in range(24):
        #节假日
        hdscha = hdsch0[j] * n
        hdsch.append(round(hdscha,2))
        #工作日
        wdscha = wdsch0[j] * n
        wdsch.append(round(wdscha,2))
```

```
#周末
wescha = wesch0[j] * n
wesch.append(round(wescha,2))

#写入 Excel

#创建 sheet
sheetname = str(i+1)
data_sheet = workbook.add_sheet(sheetname + '月', cell_overwrite_ok=True)
#纵坐标
p = ['节假日','工作日','周末']
for a in range(3):
    q = p[a]
    data_sheet.write(a+1, 0, q, set_style('宋体', 220, True))
#横坐标
timeline = ['1:00','2:00','3:00','4:00','5:00','6:00','7:00','8:00','9:00','10:00','11:00',
'12:00','13:00','14:00','15:00','16:00','17:00','18:00','19:00','20:00','21:00','22:00','2
3:00','24:00']
for b in range(24):
    timelinec = timeline[b]
    data_sheet.write(0, b+1, timelinec, set_style('Times New Roman', 220, True))
#写入三个时间表
for h in range(24):
    k = hdsch[h]
    data_sheet.write(1, h+1, k)
    l = wdsch[h]
    data_sheet.write(2, h+1, l)
    m = wesch[h]
    data_sheet.write(3, h+1, m)

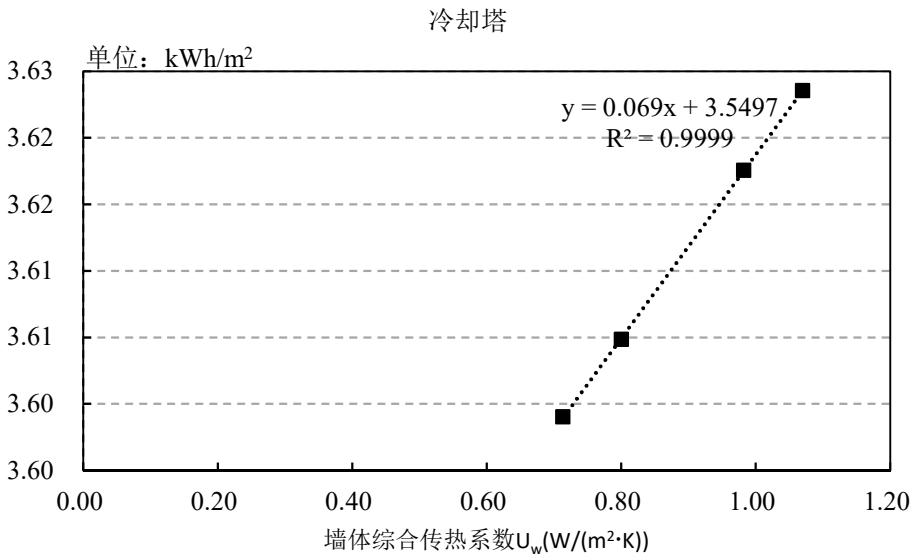
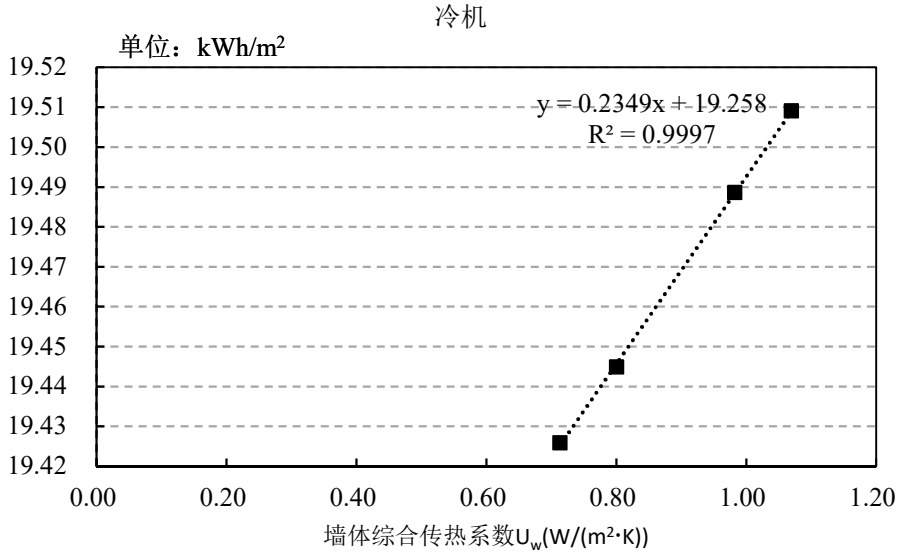
#保存文件
workbook.save('X:\XX\Schedule_tune.xls')
print (u'创建 Schedule_tune.xlsx 文件成功')
```

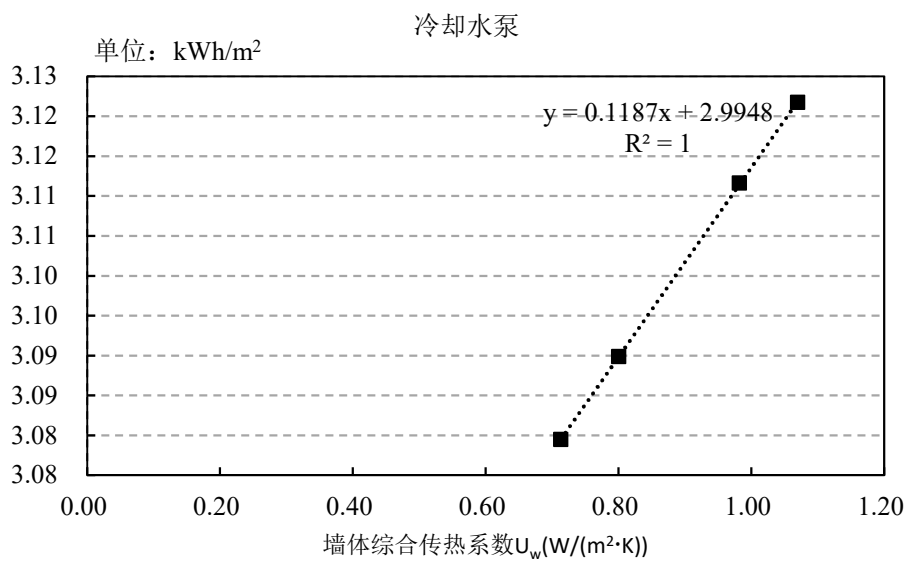
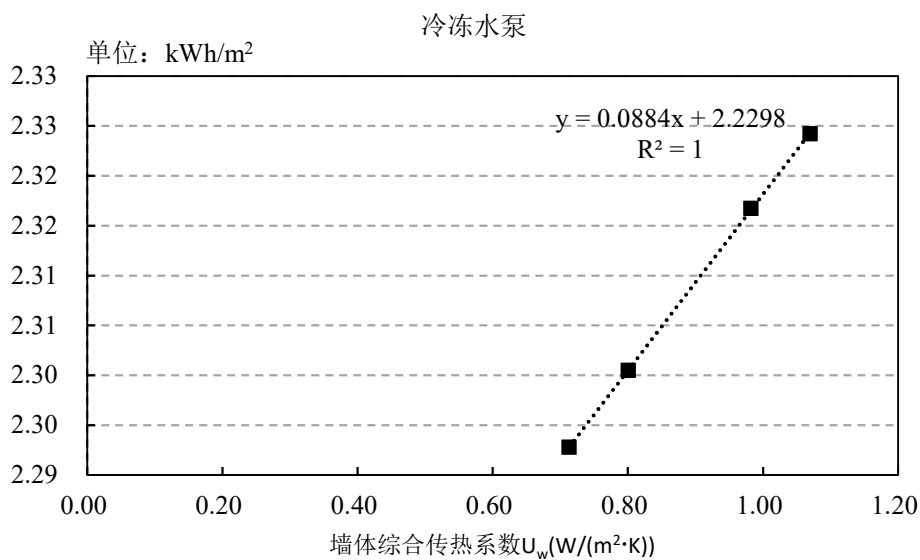
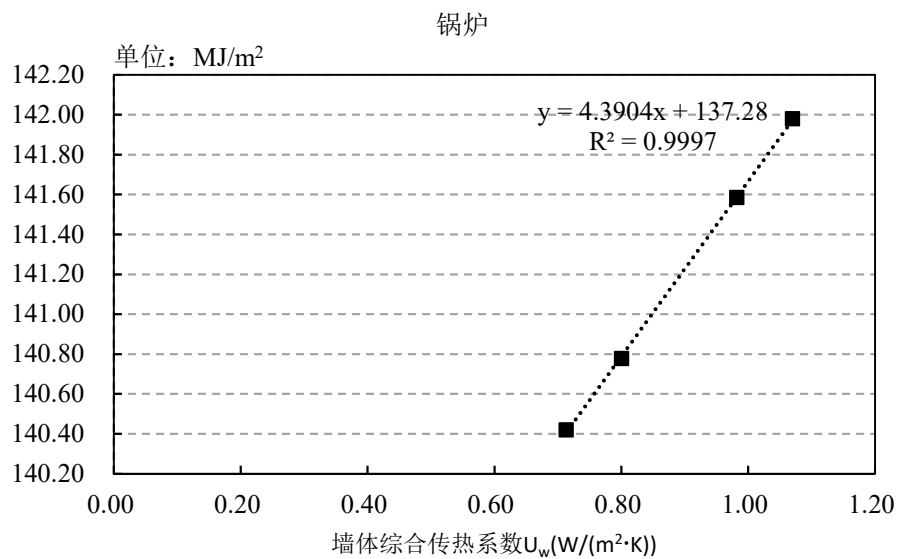


## 附录 C 输入参数与分项能耗关系

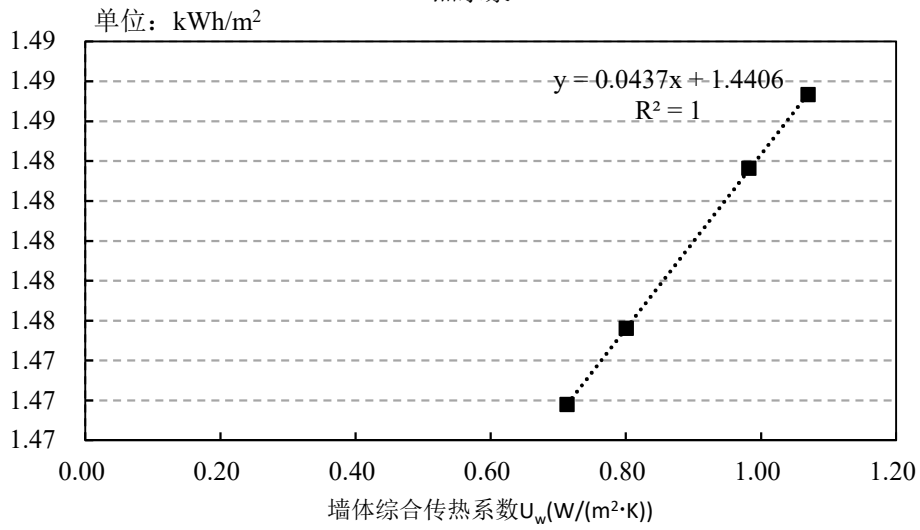
因篇幅有限，本文在此选择几个典型因子进行展示：

### C.1 外墙综合传热系数 $U_w$

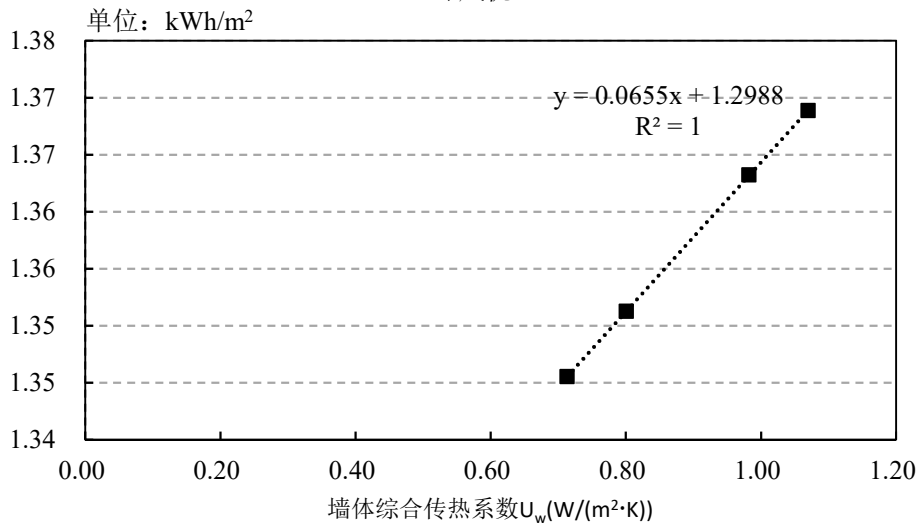




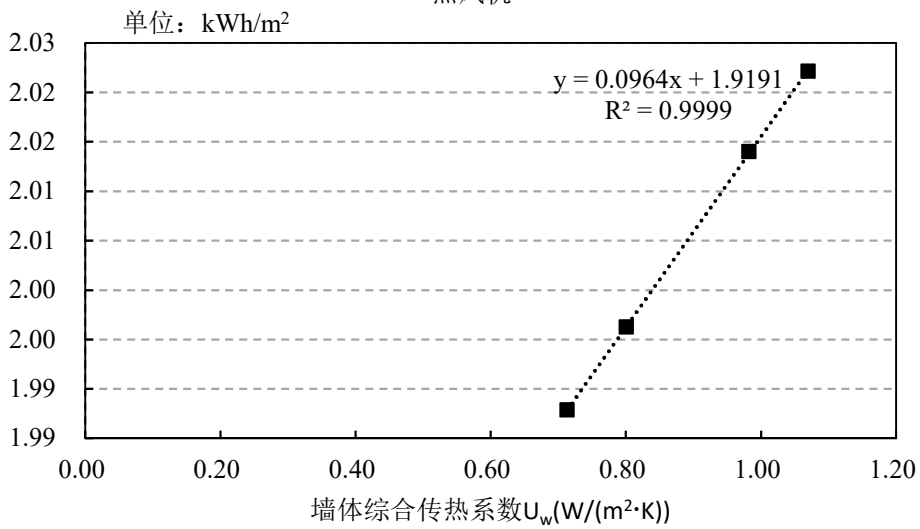
热水泵



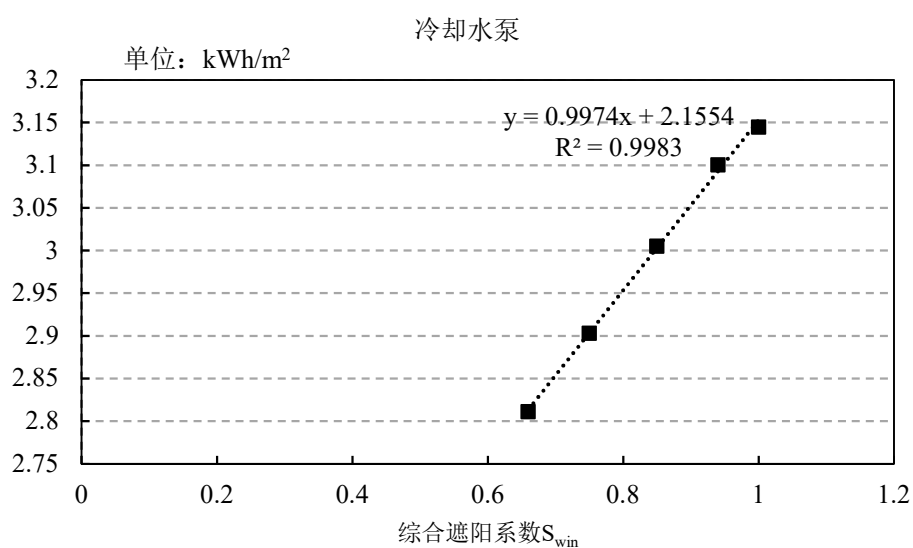
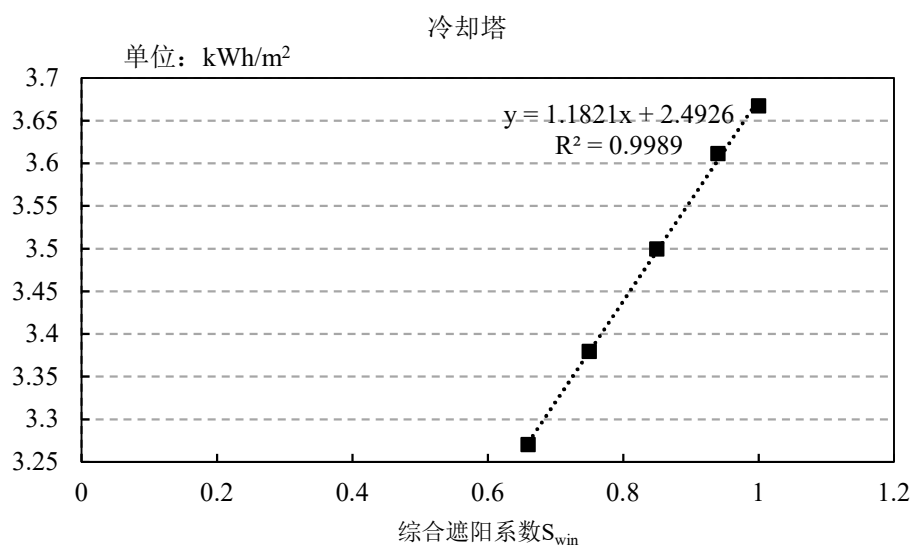
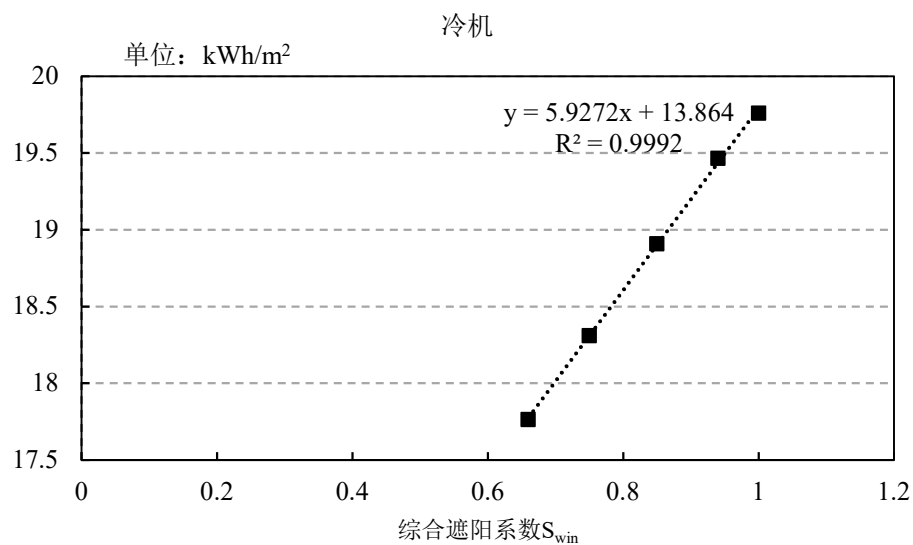
冷风机



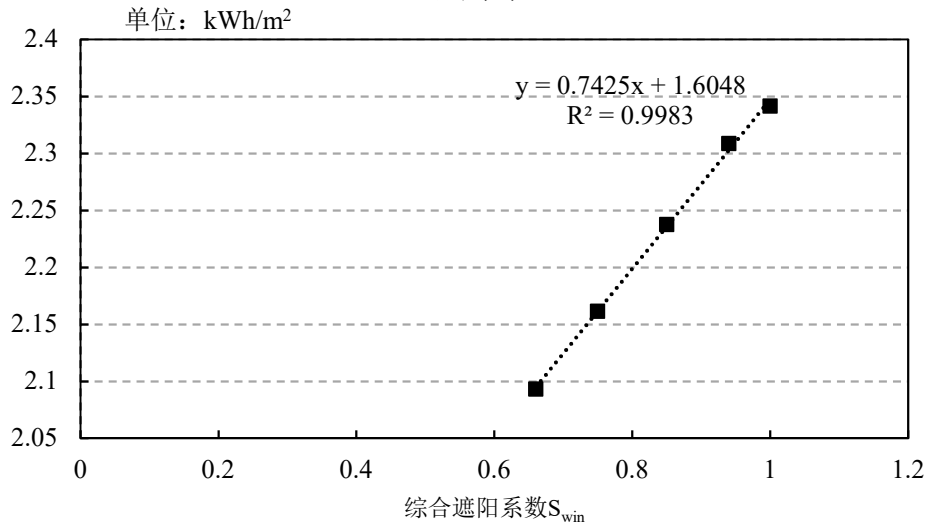
热风机



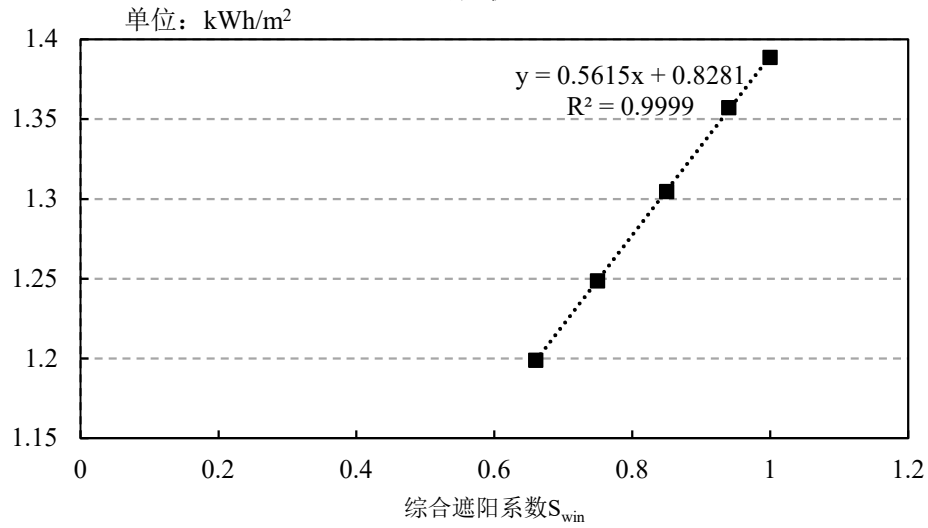
## C.2 综合遮阳系数 $S_{win}$



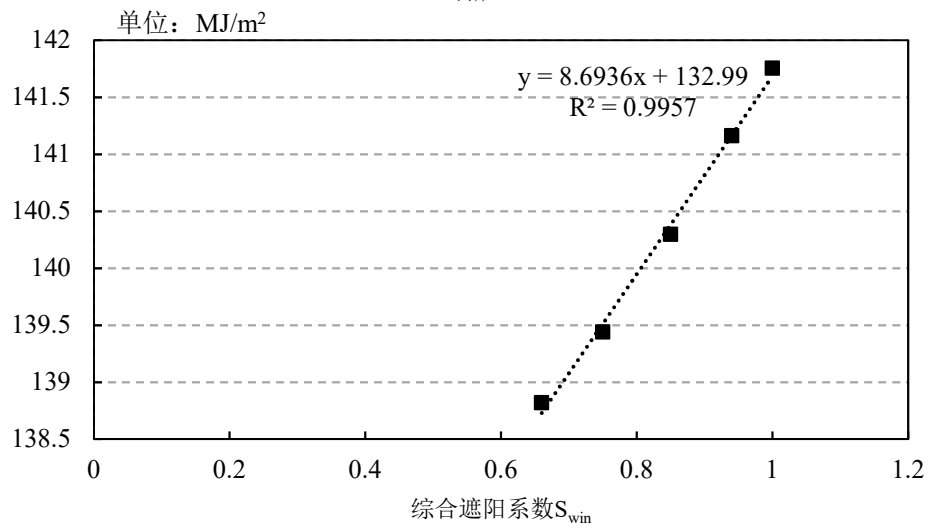
冷冻水泵

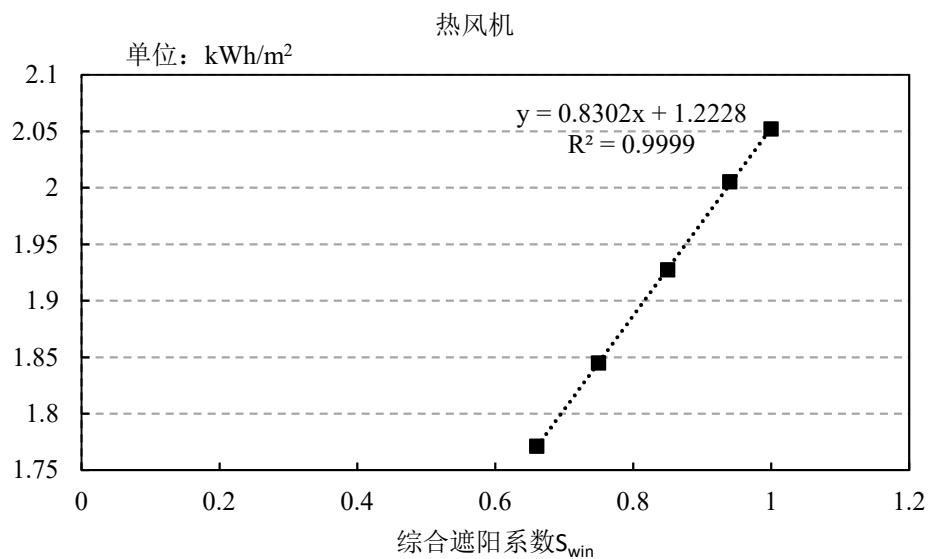


冷风机

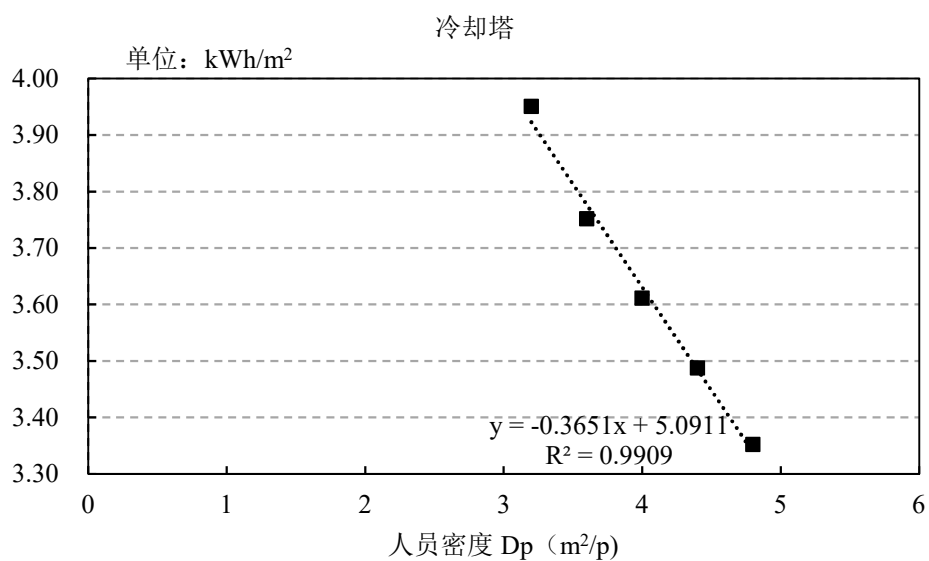
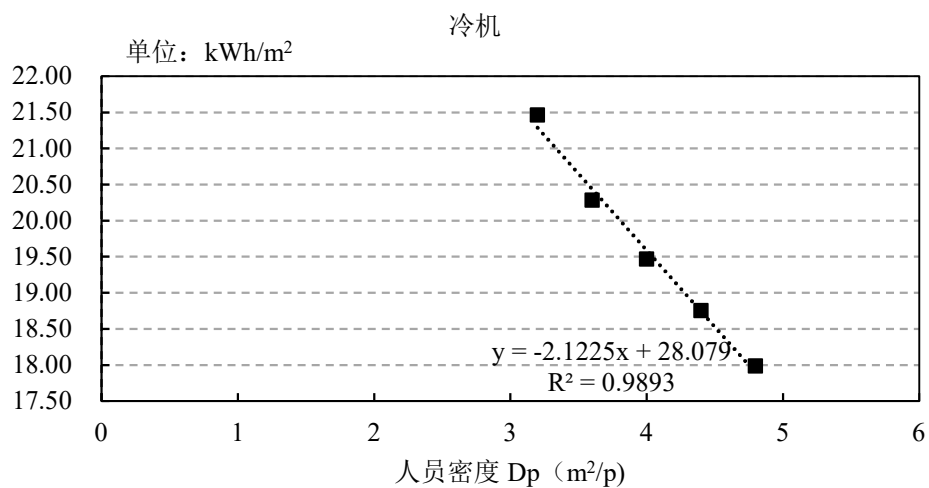


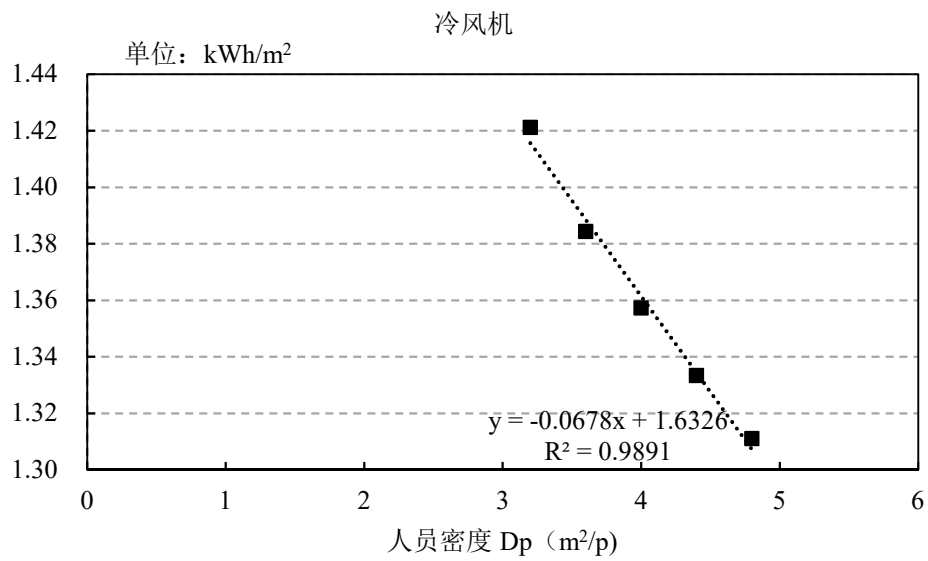
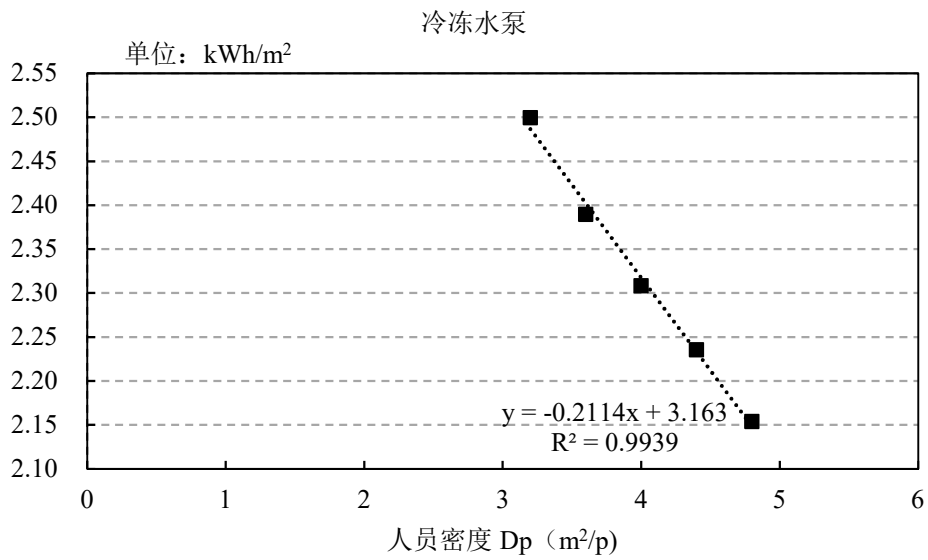
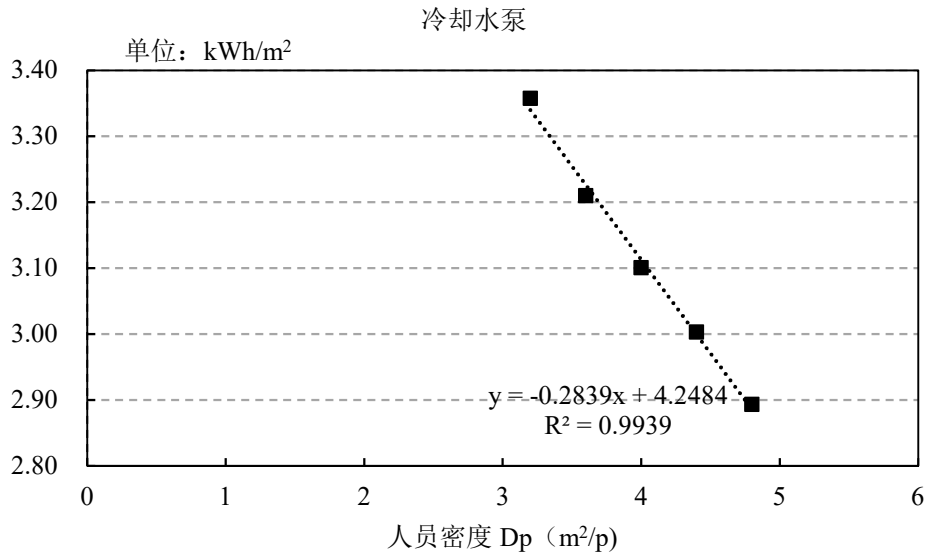
锅炉

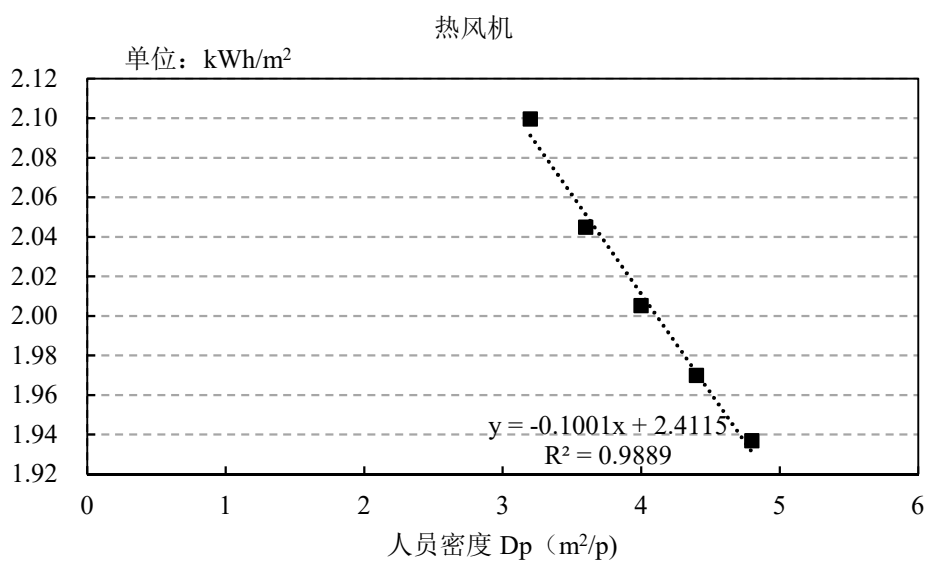
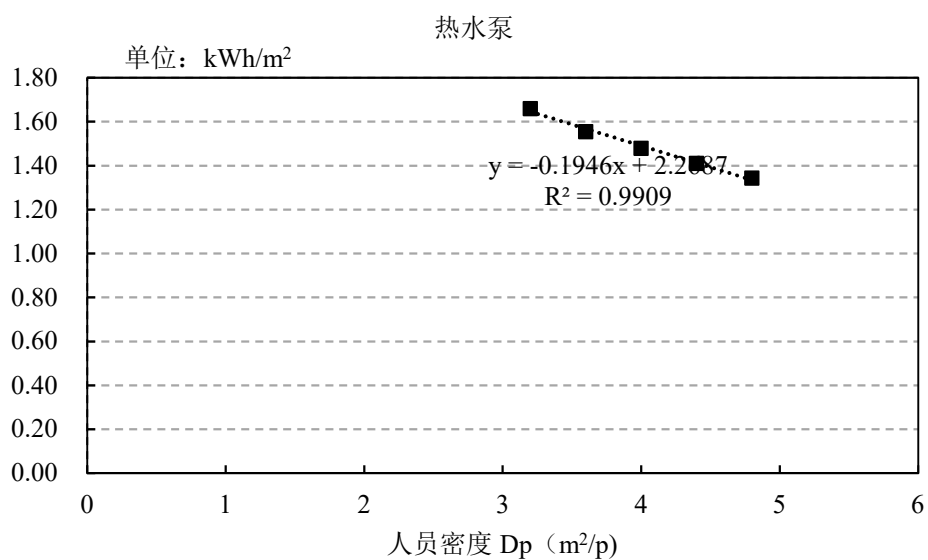
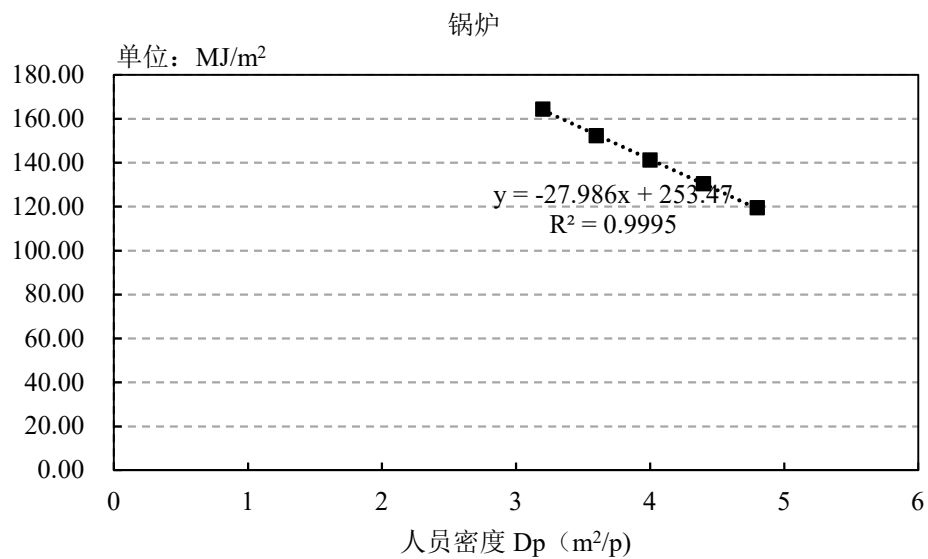




### C.3 人员密度 $D_p$ (m<sup>2</sup>/p)

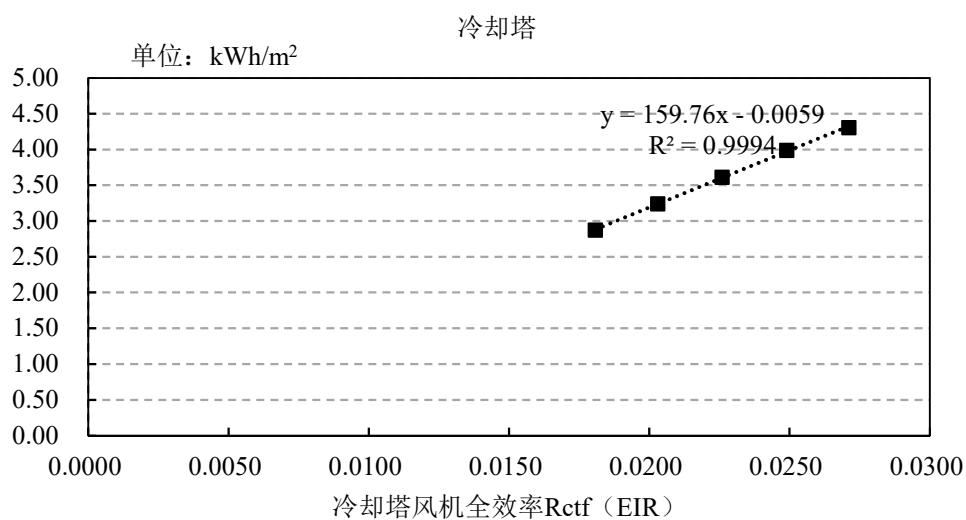




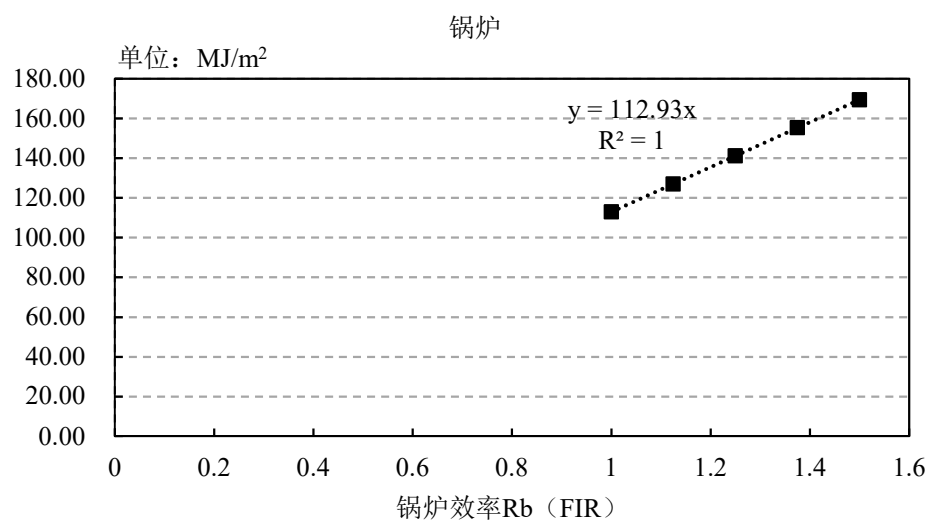




D.4 冷却塔风机全效率 Rctf (EIR)



D.5 锅炉效率 Rb (FIR)



## 附录 D 建筑能耗模型校验所需信息

分类	细节		获取途径	
气象参数	当年数据		官方数据	
能耗（电耗、气耗）	空调能耗		能源计量表	
	照明能耗			
	设备能耗			
	总能耗			
时间表	照明系统		建筑图纸 物业管理 实测调研	
	设备系统			
	人员在室情况			
	空调启停状态			
	室内温度控制			
空调系统参数	实际分区		建筑图纸 物业管理 实测调研	
	末端形式			
	室内设计温度	供热		
		供冷		
	新风量			
	冷热源	制冷机组		台数
				制冷量
				COP
		冷却塔		台数
				效率
锅炉			台数	
	制热量			
	效率			

	输配系统	冷却水	供回水温度
		冷冻水	供回水温度
		水泵	台数
			效率
		风机	台数
			效率
围护结构	外墙		传热系数
	屋顶		
	外窗	传热系数	
		遮阳系数	
		可见光传导率	
	天窗	传热系数	
		遮阳系数	
		可见光传导率	
门	传热系数		
内部负荷	照明密度		
	设备密度		
	人员密度		

## 附录 E 虚拟典型建筑模型输入参数

建筑概述		
地区	上海	
可用能源类型	电力和天然气	
建筑类型	高层办公建筑	
建筑形态及构造		
建筑总面积[m <sup>2</sup> ]	19200	
层高[m]	4	
层数	12	
体形系数	0.28	
建筑尺寸[m]	40×40（中间是 20x20）	
建筑朝向	南	
分区	外围为私人办公室，内区为一般办公室	
围护结构		
外墙	传热系数[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	0.89
	角度	铅直
屋顶	传热系数[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	0.64
	角度	水平
地板	传热系数[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	2.709
	角度	水平
天花板	传热系数[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	2.92
	角度	水平
内墙	传热系数[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	2.28
	角度	铅直
窗户	窗墙比	0.4

	传热系数[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	2.67	
	太阳得热系数 SHGC	0.82	
	可见光透射率 VT	0.81	
	表面发射率 OE	0.84	
	遮阳系数 SC	0.94	
<b>空调系统</b>			
室内设计参数	设定温度	有人	夏季 26°C/冬季 20°C
		无人	夏季 40°C/冬季 10°C
	相对湿度	夏季 50%/冬季 50%	
	送风温度	夏季 16°C/冬季 35°C	
空调末端	风机盘管加新风系统	新风量	72000m <sup>3</sup> /h
冷热源	冷水机组	COP	6
		冷冻水供水温度	7°C
	锅炉	效率	80%
		供水温度	60°C
水泵类型	效率	0.77	
<b>室内负荷</b>			
照明	平均照明密度 [W/m <sup>2</sup> ]	11	
设备	平均功率密度 [W/m <sup>2</sup> ]	20	
人员	人员密度[m <sup>2</sup> /P]	8	
	新风量[m <sup>3</sup> /h·P]	30	
	显热负荷[W/P]	73.3	
	潜热负荷[W/P]	60.5	

## 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历:

杨陶, 男, 1991 年 4 月生。

2013 年 7 月毕业于中南大学, 建筑环境与设备工程专业, 获工学学士学位。

2014 年 9 月进入同济大学, 攻读工学硕士学位。

### 已发表论文:

- [1] **Tao Yang**, Yiqun Pan, Jiachen Mao, Jiachen Mao, Yonglong Wang, Zhizhong Huang. An automated optimization method for calibrating building energy simulation models with measured data: Orientation and a case study. *Applied Energy*, 2016, 179:1220–1231.
- [2] Yiqun Pan, **Tao Yang**. A review of condensation control in radiant cooling system. *IAQVEC2016 - 9th International Conference on Indoor Air Quality Ventilation & Energy Conservation In Buildings*, Songdo, Incheon, Republic of Korea, October 23-26, 2016.
- [3] Xing Lu, Peng Xu, Huilong Wang, **Tao Yang**, Jin Hou. Cooling potential and applications prospects of passive radiative cooling in buildings: The current state-of-the-art [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65:1079-1097.

### 待发表论文:

- [1] **Tao Yang**, Yiqun Pan, Yikun Yang, Meishun Lin, Bingyue Qin, Peng Xu, Zhizhong Huang. CO<sub>2</sub> emissions in China's building sector through 2050: a scenario analysis based on a bottom-up model. *Energy*. (已接收)