



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

## 既有建筑能耗模型自动校验方法研究

姓名：王永龙

学号：1130989

所在院系：机械与能源工程学院

学科门类：土木工程

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

二〇一四年五月



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master of Philosophy

## **Study on Automatic Calibration of Building Energy Models**

Candidate: Yonglong Wang

Student Number: 1130989

School: College of Mechanical Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Heating, Gas Supplying, Ventilation [HVAC&G Engineering](#)  
and Air Conditioning Engineering

Supervisor: Prof. Yiqun Pan

May, 2014

## 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

随着国家对绿色建筑的大力推广,以及大量既有建筑节能改造工程的开展与实施,建筑能耗模型校验模拟也发挥出越来越重要的作用。通过校验的方法获得既有建筑能耗基准模型,进而展开节能量的评估和投资回收期的分析等,相对现场测量或账单分析的方法,校验模拟法适用的场合更为广泛,且不失科学合理性。

然而,校验模拟也有其自身的不足,分析人员不仅需要掌握较高的软件应用技巧,还需要具备实际建筑运行以及建筑设备系统的知识。建筑能耗模型中可调整的输入参数太多,人工校验费时费力,要将模型校验准确,难度很大。

本文提出一套基于简单规则判断和现代寻优算法的建筑能耗模型自动校验方法,旨在通过计算机程序和现代数学寻优算法的应用减少人工校验的工作量,提高校验工作的效率和校验模型的准确度。

首先,本文以办公建筑为例,采用建筑能耗模拟软件 eQUEST 构建上海地区办公建筑的典型模型,并选取与围护结构、室内负荷、空调系统三个方面相关的多个输入参数进行能耗的敏感性分析,作为后文提出自动校验模拟方法时筛选可调整输入参数的基本依据。然后,分析和论述了简单规则判断方法和粒子群寻优算法(PSO)在校验模拟中的作用,研究其有效性和实现方式,提出基于上述两种方法的模型自动校验方法,在此基础上,针对建筑模型自动校验过程的功能需求进行分析,利用 C++ 语言作为开发工具,使用 Visual C++ 开发出针对 DOE-2 为计算核心的建筑能耗模型自动校验程序,将上述方法用计算机程序实现。最后,建立两个建筑能耗模型,利用开发出的模型自动校验程序对其进行校验分析,验证了程序的运行稳定性和校验方法的有效性。

**关键词:** 建筑能耗模型, 自动校验, 规则判断, 粒子群寻优算法

## ABSTRACT

With the population of green buildings and implementation of a large number of building energy-saving retrofitting projects, calibration simulation has been playing more and more important role in energy savings measurement and verification (M&V). After the baseline energy model of existing building has been calibrated, the M&V of energy savings and analysis of payback period can be carried out. Compared with the field measurement or billing analysis method, calibration simulation method is applicable to a wider range of situations, and rationality does not fall.

However, calibration simulation also has its own drawbacks. Only analysts who both master the applying skills of the software and have solid knowledge of the actual building operation and equipment systems can be competent. It is difficult to obtain an accurate model by calibrating manually because the number of parameters which could be adjusted during the calibration procedure is overmuch.

In order to reduce the workload of manual calibration, improve the efficiency during the calibration procedure and the accuracy of the final models, An automatic calibrating method of building energy models is proposed based on rule estimation and advanced mathematical optimization algorithm in this work.

Firstly, a typical office building model in Shanghai is built by eQUEST, and sensitivity analysis of different input parameters which are related to building envelope, indoor loads, and HVAC systems respectively is done, and these results can be the foundation when choosing the adjustable parameters while the automatic calibrating method is proposed. After analyzing the effectiveness of rule estimation and particle swarm optimization (PSO) that could be utilized in calibration simulation and discussing how to coupling them to the computer program, the automatic calibration method is proposed. Then, based on this method, an automatic calibrating program is developed by using C++ as the development language and Visual C++ as the development tool for the building energy models which are built and calculated by DOE-2. Finally, two case studies are given by using the automatic calibrating program to verify the stability of the program and the validity the automatic calibrating method.

**Key Words:** building energy models, automatic calibration, rule estimation, Particle Swarm Optimization(PSO)

## 目录

摘要.....	I
ABSTRACT .....	II
目录.....	III
主要符号表.....	V
第 1 章 绪论 .....	1
1.1 背景 .....	1
1.2 建筑能耗模型校验模拟 .....	3
1.2.1 建筑能耗模拟与校验模拟 .....	3
1.2.2 校验模拟的误差指标和等级划分 .....	4
1.3 国内外研究现状 .....	6
1.3.1 校验步骤与程序 .....	6
1.3.2 校验方法的研究 .....	6
1.4 研究目的、意义和主要研究内容 .....	10
1.4.1 研究目的和意义 .....	10
1.4.2 主要研究内容及研究路线图 .....	11
第 2 章建筑能耗模型输入参数单因子敏感性分析 .....	13
2.1 典型办公建筑模型的建立 .....	13
2.1.1 模型建立 .....	13
2.1.2 典型办公建筑能耗模拟结果与分析 .....	15
2.2 需要调整的输入参数的选择 .....	16
2.3 敏感性分析 .....	16
2.3.1 敏感性评价指标 .....	16
2.3.2 围护结构因子敏感性 .....	17
2.3.3 内部负荷因子敏感性 .....	18
2.3.4 空调系统因子敏感性 .....	19
2.4 本章小结 .....	20
第 3 章基于简单规则判断和现代寻优算法的模型校验方法 .....	21
3.1 简单规则判断及现代寻优算法在校验模拟中的作用 .....	21
3.2 粒子群寻优算法 (PSO) .....	22
3.2.1 算法简介 .....	22
3.2.2 寻优约束 .....	24
3.2.3 寻优目标 .....	26
3.2.4 误差标准的确定 .....	27
3.3 寻优算法和能耗模拟软件的耦合 .....	27

3.4 本章小结 .....	29
第 4 章建筑能耗模型自动校验程序的设计和开发 .....	30
4.1 开发语言和开发环境简介 .....	30
4.2 程序设计和运行流程 .....	31
4.2.1 程序的需求功能分析 .....	31
4.2.2 程序基本构架 .....	32
4.2.3 程序的运行流程 .....	35
4.3 程序开发的重点及处理方法 .....	37
4.3.1 DOE-2 软件计算核心的调用 .....	37
4.3.2 简单规则判断方法在程序中的实现 .....	38
4.3.3 粒子寻优群算法 (PSO) 的嵌入 .....	38
4.4 本章小结 .....	38
第 5 章校验方法的案例验证 .....	39
5.1 典型建筑能耗模型案例验证 .....	39
5.1.1 典型建筑模型概况及实际能耗数据的取得 .....	39
5.1.2 典型建筑模型校验过程及分析 .....	40
5.1.3 典型建筑模型校验结果的不确定性分析 .....	48
5.2 实际建筑能耗模型案例验证 .....	48
5.2.1 实际建筑模型概况 .....	48
5.2.2 实际建筑模型校验过程及分析 .....	51
5.2.3 实际建筑模型校验结果的不确定性分析 .....	58
5.3 本章小结 .....	58
第 6 章总结与展望 .....	59
致谢.....	61
参考文献.....	62
附录 部分程序代码.....	65
个人简历、在校期间发表的学术论文与研究成果.....	71



## 主要符号表

$MBR_{hour}$	逐时平均偏差
$ERR_{month}$	月误差
$ERR_{year}$	年误差
$RSME_{month}$	均方根误差
$CV(RSME_{month})$	均方差变异系数
$P_{A_j}$	单位面积总能耗变化值
$\overline{P_{A_j}}$	平均单位面积总能耗变化值
$Q_{A_j}$	单位面积总能耗变化率
$\overline{Q_{A_j}}$	平均单位面积总能耗变化率
PSO	粒子群寻优算法
pBest	个体极值
gBest	全局极值
X	粒子位置
v	粒子速度
D	粒子维度
N	粒子数目
w	惯性权重系数
$C_1$ 、 $C_2$	学习因子



## 第 1 章 绪论

### 1.1 背景

建筑能耗有两种定义方法：广义建筑能耗是指从建筑材料制造、建筑施工，一直到建筑使用的全过程能耗；而狭义建筑能耗或建筑使用能耗则是指建筑物在运行过程中所消耗的能量，包括照明、采暖、空调、电梯、生活热水、烹调、家用电器及办公设备等的能耗。建筑 50~70 年的生命周期中，建筑材料和建造过程所消耗的能耗一般仅占建筑全寿命周期能源消耗的 20% 左右，大部分能源消耗发生在建筑物运行过程中。国际上通常所谓的建筑能耗指的是狭义建筑能耗，即建筑使用能耗，与工业农业交通运输业的能耗并列。随着我国城市化率的提高、产业结构的调整、人民收入和生活水平的不断改善，建筑能耗逐年增长，建筑能耗占社会总能耗的比例也不断上升。从 1996 年到 2010 年，我国总的建筑能耗从 2.59 亿吨标准煤（tce）增长到 6.77 亿吨标准煤（tce），增加了 1.6 倍。2010 年建筑能耗为 6.77 亿吨标准煤（按 2010 年的全国平均火力发电煤耗换算： $1\text{kWh}=0.318\text{kgce}$ ），占全国总能耗（32.49 亿 tce）的 20.9%<sup>[1]</sup>。这里的建筑能耗也就是既有建筑能耗，即既有建筑的运行能耗。建筑运行能耗与建筑所处气候区域、经济发展水平、生活习惯和行为方式、建筑功能等密切相关，但很大程度上取决于设计与建造。“先天不足”的建筑的能耗远高于严格遵照节能设计标准设计的建筑。而这些“先天不足”的建筑也只能通过节能改造提高其能效，以求达到相关的节能标准的要求。因此可以说，既有建筑节能改造与新建建筑节能设计在建筑节能中是同等重要的。

目前我国的既有建筑面积约为 420 亿  $\text{m}^2$ ，其中大多数是非节能建筑，节能潜力非常大<sup>[2]</sup>。而既有公共建筑的单位能耗远高于居住建筑（约为 7.5—15 倍）。既有公共建筑面积约 45 亿  $\text{m}^2$ ，为城镇建筑面积的 27%，占城乡房屋建筑总面积的 10.7%，但其能耗约占建筑总能耗的 20%。为此我国在 2008 年颁布了《民用建筑节能条例》和《公共机构节能条例》，明确规定了民用建筑和公共建筑节能改造的目标和要求。据《民用建筑节能条例》的定义，既有建筑节能改造，是指对不符合民用建筑节能强制性标准的既有建筑的围护结构、供热系统、采暖制冷系统、照明设备和热水供应设施等实施节能改造的活动。

我国第一部节能改造技术标准《公共建筑节能改造技术规范》<sup>[3]</sup>也于 2009 年 12 月 1 日起实施。该标准规定了公共建筑节能改造的诊断、判定和评估的原则和方法，并分别从外围护结构热工性能改造、采暖通风空调及生活热水供应系

统改造、供配电及照明系统改造、监测与控制系统改造、可再生能源利用几个方面进行了详细的规定。该标准的实施对我国建筑节能改造和建设领域实现节能减排的目标具有重大推动作用。标准规定了三种节能改造效果的评估方法，方法一：对被改造的系统或设备进行测量；方法二：账单分析；方法三：校准模拟方法。该评估方法参照国际上通用的《国际节能效果测量和认证规程》(IPMVP)<sup>[4]</sup>所规定的方法。另两部标准美国暖通工程师学会编写的《ASHRAE Guideline 14-2002——Measurement Of Energy And Demand Savings》<sup>[5]</sup>和美国能源部能效与可再生能源办公室编写的《测量与验证导则》(M&V Guidelines: Measurement and Verification for Federal Energy Projects)<sup>[6]</sup>对评估方法也做了基本相同的规定。而校准模拟方法即为校验模拟 (calibrated simulation)，为 IPMVP 和 ASHRAE-14、FMEP M&V Guideline 中规定的方法 D。

校验模拟是采用逐时能耗模拟软件根据建筑基本信息建立模型，将建筑实际能耗数据和能源账单与模型输出结果进行比对，经过多次调整和修正模型输入参数后，使得模拟结果与实际能耗的误差在相关标准规定的范围之内，则可以确定能耗基准模型。该基准模型就可以被用来模拟计算各种节能方案的节能效果，作为评估的依据。校验模拟可以在出现下列情况时被采用：

- (1) 无法获得整幢建筑改造前或改造后的能耗数据，或获得的数据不可靠；
- (2) 建筑中采取了多项节能措施，且存在显著的相互影响；
- (3) 采用多项节能措施的项目中需要得到每项节能措施的节能效果，用测量法成本过高；
- (4) 被改造系统或设备与建筑内其他部分之间存在较大的相互影响，很难采用测量法进行测量或测量费用很高；
- (5) 被改造的建筑和采取的节能措施可以用成熟的模拟软件进行模拟，并有实际能耗或负荷数据进行比对；
- (6) 预期的节能量不够大，无法采用账单分析法通过账单或表计数据将其区分出来。

可见，**校验模拟是建筑节能改造的重要评估方法**。除此之外，经过校验的能耗基准模型还可以用来分析各用能设备系统（照明、采暖、空调、生活热水、电梯、家用电器和办公设备等）分项能耗，帮助运行管理人员和节能服务公司(ESCO)了解各部分的节能潜力，采取针对性的节能技术。校验模拟还可以用来在实施节能改造前，在基准模型基础上模拟计算各种节能改造方案 (ECM) 的节能效果和投资回收期，是相对准确的分析工具和决策工具。

校验模拟所采用的逐时能耗模拟软件需要模拟人员输入建筑的大量信息，包括天气条件、建筑几何外形、围护结构、内部负荷（人员、照明、设备）等，以

建立基准模型。校验一般采用逐月能耗数据，为获得更为准确的模型，也可以采用逐时数据进行校验。校验过程也就是对模型的各种输入参数进行调整和修正，使模拟结果与实测数据尽量接近。校验模拟的缺点是太过费时、太过依赖于做校验的分析人员的专业知识和经验。分析人员不仅需要掌握较高的模拟技巧，还需要具备实际建筑运行的知识。而且大量的输入变量原则上都可以进行调整，要想把模型校验得真正准确，需要花费大量的时间、精力和经费，因此往往较难做到。如还想将模拟结果与多年的实际能耗数据动态的匹配，则更加困难。这也就大大影响了校验模拟的准确性和可信度，也对校验模拟在建筑节能改造中作为一种必要的评估工具的应用造成了很大的阻碍。如此费事、费力且依赖于模拟分析人员的模型校验是否可以用计算机程序自动进行？

目前，关于建筑能耗校验模拟方法的研究很多，本文将在前人研究的基础上，继续对校验方法展开研究，提出一套基于简单规则判断和现代寻优算法的建筑能耗模型自动校验方法，并用典型建筑能耗模型和实际建筑能耗模型对提出的方法进行案例验证。

## 1.2 建筑能耗模型校验模拟

### 1.2.1 建筑能耗模拟与校验模拟

建筑能耗模拟的发展开始于 20 世纪 60 年代中期，有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。20 世纪 70 年代的全球石油危机之后，建筑能耗模拟愈来愈受到重视，同时随着计算机技术的飞速发展，使得大量复杂的计算成为可能。因此在全世界出现了一些建筑能耗模拟软件，包括美国的 BLAST、DOE-2，欧洲的 ESP-r，日本的 HASP 和中国的 DeST 等。20 世纪 90 年代，一方面建筑能耗模拟软件不断的完善，并出现一些功能更为强大的软件，例如 EnergyPlus，一方面建筑能耗模拟的研究重点逐步从模拟建模（modeling）向应用模拟转移，即将现有的建筑能耗模拟软件应用于实际的工程和项目，改善和提高建筑系统的能效和性能<sup>[7,8]</sup>。

用来模拟建筑能耗的数学模型由三个部分组成：（1）输入变量，包括可控制的变量和无法控制的变量（如天气参数）；（2）系统结构和特性，即对于建筑系统的物理描述（如建筑围护结构的传热特性、空调系统的特性等）；（3）输出变量，系统对于输入变量的反映，通常指能耗。在输入变量与系统结构和特性这两个部分确定之后，输出变量（能耗）就可以得以确定。因应用的对象和研究目的的不同，建筑能耗模拟的建模方法可以分为两大类：正演模拟（forward modeling）

和逆向建模 (inverse modeling) 的方法<sup>[9]</sup>。前者用于新建建筑, 后者用于既有建筑。

正演模拟从建筑系统和部件的物理描述开始, 例如, 建筑几何尺寸、地理位置、围护结构传热特性、设备类型和运行时间表、空调系统类型、建筑运行时间表、冷热源设备等。建筑的峰值和平均能耗就可以用建立的模型进行预测和模拟。

逆向建模 (也称数据驱动模型 data-driven model) 则采用已有的建筑能耗数据来建立模型。建筑能耗数据可以分为两种类型: 介入型 (intrusive) 和非介入型 (non-intrusive)。所谓介入型数据是指在预先设定或计划好的实验工况下的建筑能耗数据; 而非介入型数据则是指在建筑系统正常运行状况下获得的建筑能耗数据。逆向建模方法所建立的模型往往比正演模型简单, 而且对于系统性能的未来预测更为准确。

逆向建模可以分为三种类型: 经验 (黑箱) 法 (Empirical or “Black-Box” Approach)、校验模拟法 (Calibrated Simulation Approach) 和灰箱法 (Gray-Box Approach)。其中灰箱法应用较少。经验 (黑箱) 法建立实测能耗与各项影响因子 (如天气参数、人员密度等) 之间的回归模型, 可以是单纯的统计模型, 也可以基于一些基本建筑能耗公式, 而模型的系数都很少被赋予物理涵义。相对与校验模拟, 经验 (黑箱) 法的模型较为简单, 但其模型无法用于计算建筑分项能耗, 也无法作为节能改造的评估工具。校验模拟法是采用现有的正演建模法的建筑能耗模拟软件建立模型, 然后调整或校验模型的各项输入参数, 使实际建筑能耗与模型的输出结果更好的吻合。用来校验模型的能耗数据可以是逐时的, 也可以是逐月的数据, 前者可以获得较为精确的模型。

### 1.2.2 校验模拟的误差指标和等级划分

相关的标准都对校验模拟的误差指标做了规定, 见表 1.1。可以用月误差  $ERR_{month}$ 、年误差  $ERR_{year}$  和均方差变异系数  $CV(RSME_{month})$  来检验模型的准确性, 这三个值越小, 模型越准确。由表 1.1 可知我国的《公共建筑节能改造技术规范》比较接近 FEMP 的指标规定。

表 1.1 校验模拟可接受的误差指标范围 (%)

指标	公共建筑节能改造技术规范	IPMVP	ASHRAE14	FEMP
$ERR_{month}$	± 15	± 20	± 5	± 15
$ERR_{year}$	没有规定	没有规定	没有规定	± 10

CV(RSME <sub>month</sub> )	10	5	15	10
----------------------------	----	---	----	----

$$ERR_{\text{month}} (\%) = \left[ \frac{(M-S)_{\text{month}}}{M_{\text{month}}} \right] \times 100\% \quad (1-1)$$

$$ERR_{\text{year}} (\%) = \sum_{\text{month}} \left[ \frac{ERR_{\text{month}}}{N_{\text{month}}} \right] \quad (1-2)$$

$$CV(RSME_{\text{month}}) (\%) = \left[ \frac{RMSE_{\text{month}}}{A_{\text{month}}} \right] \times 100\% \quad (1-3)$$

$$RSME_{\text{month}} = \sqrt{\frac{\sum_{\text{month}} (M-S)_{\text{month}}^2}{N_{\text{month}}}} \quad (1-4)$$

$$A_{\text{month}} = \left[ \frac{\sum_{\text{month}} (M_{\text{month}})}{N_{\text{month}}} \right] \quad (1-5)$$

式中：M——实际能耗

S——模拟能耗

N<sub>month</sub>——每年账单月份

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。ASHRAE 的研究报告（2006）<sup>[10]</sup>中对校验模拟的等级进行了划分，如表 1.2。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。

表 1.2 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。

## 1.3 国内外研究现状

随着各类建筑能耗模拟软件在国内外建筑行业的兴起和广泛运用,对建筑能耗模型的校验要求也随之而来,且越来越严格。近年来,国内外学者针对此领域,也做了大量的研究工作。

### 1.3.1 校验步骤与程序

Stein<sup>[11]</sup>、Waltz<sup>[12]</sup>和 ASHRAE-14<sup>[5]</sup>对校验模拟的程序与步骤做了详细的阐述。其中以 ASHRAE-14 最为详尽。具体步骤为:

- (1) 制定校验模拟计划: 确定模拟软件、实测数据(逐月,逐时)、校验标准;
- (2) 收集数据: 围护结构特性参数、几何尺寸、逐月/逐时能耗数据、空调系统及其他铭牌数据、运行时间表、部分空调系统和其他系统的现场测试数据、气象参数等;
- (3) 输入数据,建立模型: 包括几何尺寸、围护结构、内部负荷、空调分区、运行时间表、渗透率等;
- (4) 将模拟结果与实际能耗数据进行比较: 与逐月能耗账单或者逐时数据进行比较,可采用图示和统计两种方法;
- (5) 调整模型使模拟结果与实际能耗数据的误差达到标准要求;
- (6) 建立基准模型和改造后模型;
- (7) 计算节能量;
- (8) 总结及报告。

### 1.3.2 校验方法的研究

Clarke 等<sup>[13]</sup>将目前的校验模拟方法进行了分类:

- (1) 人工的依据经验的校验;
- (2) 图形对比校验;
- (3) 采用测试和分析方法进行校验;
- (4) 数学方法校验。

#### 1.3.2.1 人工的依据经验的校验模拟

目前大部分校验模拟采用人工的依据经验的校验模拟,各个案例之间有细微差别,有些把模拟结果和现场审计数据比对进行校验,有些采用短期的实测数据进行校验,有些采用末端能耗数据进行校验。这种方法相对简单、便于操作,但随机性很大,针对不同的案例,花费的时间、资源相差较大。



最早的校验模拟是 Diamond<sup>[14]</sup>在 20 世纪七十年代对七种商业建筑采用全年逐月能耗数据进行了模型校验，虽然经过校验的模型与实际能耗的误差大于 ASHRAE-14 标准<sup>[5]</sup>，但必须指出的是此研究是于 30 年前在没有任何能耗分项数据的情况下做的。

稍后 TRC<sup>[15]</sup>在美国能源部的支持下，选择了一幢大型办公建筑，对其终端能耗数据进行逐时监测，采用逐时数据对 DOE-2 程序的准确性进行评估，并考虑了传感器的误差。研究得出 DOE-2 能耗模型的预测误差在建筑能耗的测量误差范围内。

之后又有很多学者针对一些实际建筑进行了校验模拟的研究工作。

Norford<sup>[16]</sup>对一个新奥尔良的大型办公建筑采用实测能耗数据进行了模型校验，分析了照明密度、照明和设备时间表、空调系统的运行时间表等对模拟结果的影响。

Lunneberg<sup>[17]</sup>的研究发现对内部得热进行短期监测可获得更加可靠的运行时间表，以提高校验准确性，并以一个建筑面积为 49,000ft<sup>2</sup> 商业建筑为实例做了分析。

Pedrini<sup>[18]</sup>给出了三个步骤的校验模拟方法：建筑竣工图、初步审计（walk-through audit）、能耗实测，对 12 幢办公楼的 DOE-2 模型进行了校验。研究发现，第一步校验的误差很大（月误差达 20%）；在根据一些关键终端能耗的监测对时间表进行调整之后，可使得误差减小到 5-6%；在做了初步现场审计（walk-through audit）并对如照度、风量、室温等进行点检之后，逐月平均误差可小于 1%。

Yoon<sup>[19]</sup>提出了一种七步骤的校验模拟方法。并应用此方法对一栋 26 层，面积 83,000 m<sup>2</sup> 的商业建筑进行了校验模拟并得到理想的结果。

潘毅群等<sup>[20]</sup>对上海一幢超高层商业建筑采用 DOE-2 建立能耗模型，采用逐月能耗数据对模型进行了校验，经过校验的基准模型被用做分析各种 ECM 的节能效果。

### 1.3.2.2 利用一系列图形对比进行模型校验

各种图表如地毯图、3-D 时间序列图、箱须图、2-D (BWM) 散点图和时间序列图等，能够为分析提供帮助，找到差距形成的关键“点”。此方法一般可以作为人工校验的辅助方法，为分析提供思路。随着可视化技术的发展，此方法得到越来越多的应用。

Waltz<sup>[12]</sup>提出了几种图表分析的方法，并指出为使模拟更为可信，应对特定时段的模拟结果详细分析（如峰值时段，过渡时段，夜间）。还为特定的几种能

耗对比图表提供了校正方法。ASHRAE-14<sup>[5]</sup>对三种图表技术进行了分析讨论，并结合案例对其适用情况进行了说明。

### 1.3.2.3 采用测试及对比分析的校验模拟

为了提高校验的准确度，一些测试与对比分析方法也被采用，包括介入式启停测试法、短期能耗监测法、宏观参数估计法、特征签名分析法。

介入式启停分析法是指在数据有限的情况下，在非工作日如周末采用数据采集装置短期监测建筑的能耗使用，设备分组启停运行，以获得分项终端能耗数据。Soebarto<sup>[21]</sup>采用此方法，配合现场调研、图纸信息和能耗监测对两个建筑进行了校验模拟，结果表明 2-4 个月的逐时模拟能耗数据与监测数据的误差在 6.7%之内。

短期能耗监测法是指利用短期监测的能耗数据校验模型。监测可分两个时段进行，先是保持建筑不同区域的室温一致且稳定不变，然后让建筑自然冷却，分别监测这两个过程的能耗。这种方法最先由 Subbarao<sup>[22]</sup>提出，并用于住宅建筑的校验模拟。后来此方法被 Manke<sup>[23]</sup>推广至商业建筑。

宏观参数估计法与以上两种介入式测试法不同，仅利用非介入式监测数据推算出集总参数（如墙体总传热系数 U 值）。Reddy<sup>[24]</sup>给出了利用监测一栋商业建筑的总能耗来估计一些参数的案例。

特征签名分析法是将各主要输入参数（建筑面积、内区比例、围护结构 U 值、渗透率、内部得热、新风量、室内设定温度、送风量等）按典型值输入建立基准模型；然后这些参数逐个以一个小步长变化，模拟计算能耗随室外温度及各输入参数变化的百分比，并绘制成图表，即得到能耗特征签名。校验过程可分为两步进行，第一步校验模型的天气依赖性，即将模拟能耗的残差随室外温度的变化绘制成图，再与能耗特征签名比较，以确定主要的造成差别的输入参数，进行适当调整。第二步，将某一天的测试数据与模拟能耗进行逐时比较，再依据经验进行参数调整。Liu<sup>[25]</sup>采用此方法对简化的 AHU 模型进行校验，研究表明当建筑进行内外分区的时候，模拟结果较为准确。Liu<sup>[26]</sup>采用此方法对一栋办公建筑进行模型校验。

### 1.3.2.4 利用数学方法的校验模拟

与以上几种经验校验方法不同，本方法更接近于数学优化方法，目标为逐月（或者逐时）模拟与实测能耗的均方差最小，找寻最优输入参数组合。此方法由程序自动确定需要调整的参数和调整量，Carroll 等依据此方法开发了一个商业模拟软件 RESEM<sup>[27]</sup>。Raftery<sup>[28]</sup>利用程序迭代的方法，用实测逐时能耗数据及能耗

分项数据对模型进行校验，得到准确度较高的模型。但总的来说，此方法适用于简化模拟软件如 ASEAM（修正温频法 modified bin method），尚不适用于详细逐时模拟计算软件如 DOE-2、EnergyPlus。

Reddy 在 ASHRAE2006 报告<sup>[10]</sup>中总结各种模型校验方法的基础上，提出了一套校验方法，步骤为：

- （1）数据收集及检验，包括实际能耗数据和建筑信息数据，构建输入参数集；
- （2）对输入参数集中的参数进行盲粗网格搜索；
- （3）再进行精细网格搜索，模拟计算，确定满足误差范围的基准模型；
- （4）将节能改造措施 ECM 应用于基准模型，模拟计算，对 ECM 进行不确定性分析。

该报告运用此方法对两栋假想的办公建筑和一栋实际办公建筑进行了校验模拟，对方法进行了验证。此方法是目前为止最为系统的一套校验方法，为实现模型的自动校验进行了非常有价值的探索。

### 1.3.2.5 敏感性分析（Sensitivity Analysis）方法

敏感性分析是模型输入参数对模拟结果影响力大小的研究，在校验模型的过程中，找出对模拟结果（逐月耗电、耗气）影响较大的输入参数进行修正，可以提高校验模拟的效率。

Lomas<sup>[29]</sup>提出两类敏感性的概念，（1）个体敏感性：描述某一个特定输入参数的对模拟结果的影响大小。（2）总体敏感性：描述所有输入参数变化对模拟结果的影响大小。他们还提出了三种敏感性分析的方法：差分敏感性分析法、蒙地卡罗分析法、随机敏感性分析法。

Corson<sup>[30]</sup>对太平洋西北地区的两栋建筑进行了研究，结果发现建筑围护结构、照明的敏感性较弱，人员、天气、通风、空调系统和机组的敏感性较强。

Huang<sup>[31]</sup>用 DOE-2 建立了美国 20 个地区的 481 个商业建筑典型模型（prototype model），并对其中两类建筑进行了敏感性分析，发现系统运行变化对能耗的影响比围护结构要大。

Lam<sup>[32]</sup>采用 DOE-2 模拟位于香港的一栋 40 层 49000m<sup>2</sup> 的办公建筑，60 项输入参数被分为建筑负荷类、空调系统类和主机设备类三类、10 个等级进行模拟，400 个左右的模拟算例的结果表明：人员、天气、通风、空调系统、机组的参数敏感性要大于建筑围护结构参数的敏感性。

目前大部分的研究表明建筑围护结构的敏感性较人员、天气参数、空调系统和设备的输入参数敏感性弱。

### 1.3.2.6 不确定性分析（Uncertainty Analysis）方法

校验模拟的不确定性由模型误差引起，而模型误差主要由模型建立的不完善引起，其主要原因包括<sup>[4,10]</sup>：

- (1) 建模人员缺乏经验，获取数据不规范；
- (2) 模型中忽略了重要的变量；
- (3) 对“已知”因子赋予了不正确的值；
- (4) 对于缺失的输入参数进行不适当的简化和假设；
- (5) 推断的模拟结果超出了模拟的有效范围；
- (6) 模拟软件本身具有缺陷或软件编码错误。

Bloomfield<sup>[33]</sup>把模型验证方法划分为四类：软件代码检查、测试验证、用其他软件对比验证、经验验证。

Judkoff<sup>[34]</sup>提出 BESTEST 法，用于模型验证和误差的来源的诊断。

Tabary<sup>[35]</sup>提出应将实测数据与模拟结果进行对比，求得不同频率范围内的误差分布，以分析模型的误差。

综上所述，虽然世界各地的研究人员在校验模拟的方法、输入参数敏感性分析和输出结果不确定性分析等方面进行了大量的研究工作，部分学者也已在尝试采用图表分析、测试与对比分析、数学优化等方法进行模型校验，希望通过数学工具和计算机程序减少人工校验的工作量，提高校验模型的准确度。但是目前大部分的实际建筑模型的校验所采用的还是人工的依据经验的方法，较少采用数学分析方法，不但需要花费大量的人力和时间收集数据和校验模型，校验结果也很难获得理想的准确程度，因而，大大阻碍了校验模拟在既有建筑节能改造中的应用，对于建筑节能改造的大规模推进是不利的。

## 1.4 研究目的、意义和主要研究内容

### 1.4.1 研究目的和意义

本文以既有建筑能耗模型的自动校验为研究目标，试图在已有研究的基础上建立一套模型自动校验的方法，研究其中的关键技术，包括既有建筑能耗模型中可调整输入参数的筛选及其合理变化区间的确定、输入参数单因子敏感性分析、简单规则判断方法、现代寻优算法等，建立一套可行的既有建筑能耗模型自动校验方法，应用于实际建筑节能计算案例。

本文的研究意义在于：建立一套可行的既有建筑能耗模型自动校验方法，通过数学方法和计算机程序的应用减少人工校验的工作量，降低劳动强度，提高校

验模型的准确度。将此自动校验方法应用于建筑能耗模型的校验，为工程人员和科研人员提供参考，促进校验模拟在实际的既有建筑节能改造中的应用，为建筑节能改造中节能量的审定提供参考依据。

### 1.4.2 主要研究内容

基于上述分析，本文将针对建筑能耗模型自动校验问题进行深入研究，并以建筑能耗模拟计算软件 DOE-2 为具体分析和研究对象，尝试探索出适用于能耗模型自动校验的方法。

本文的主要内容包括以下几个部分：

第二章：以办公建筑为例，采用建筑能耗模拟软件 eQUEST 构建上海地区办公建筑的典型模型，筛选模型输入参数进行敏感性分析，为后文提出自动校验模拟方法时筛选输入参数做基础。

第三章：首先明确简单规则判断方法和粒子群寻优算法（PSO）在校验模拟中的作用，研究其有效性和实现方式，最后提出基于上述二种方法的模型自动校验方法。

第四章：针对建筑模型自动校验过程的功能需求进行分析，在此基础上，开发程序，将上述方法用计算机程序实现。

第五章：收集相关数据，用第二章中所建的典型模型的自动校验过程以及一个实际建筑模型的自动校验过程验证程序运行稳定性和方法的有效性。

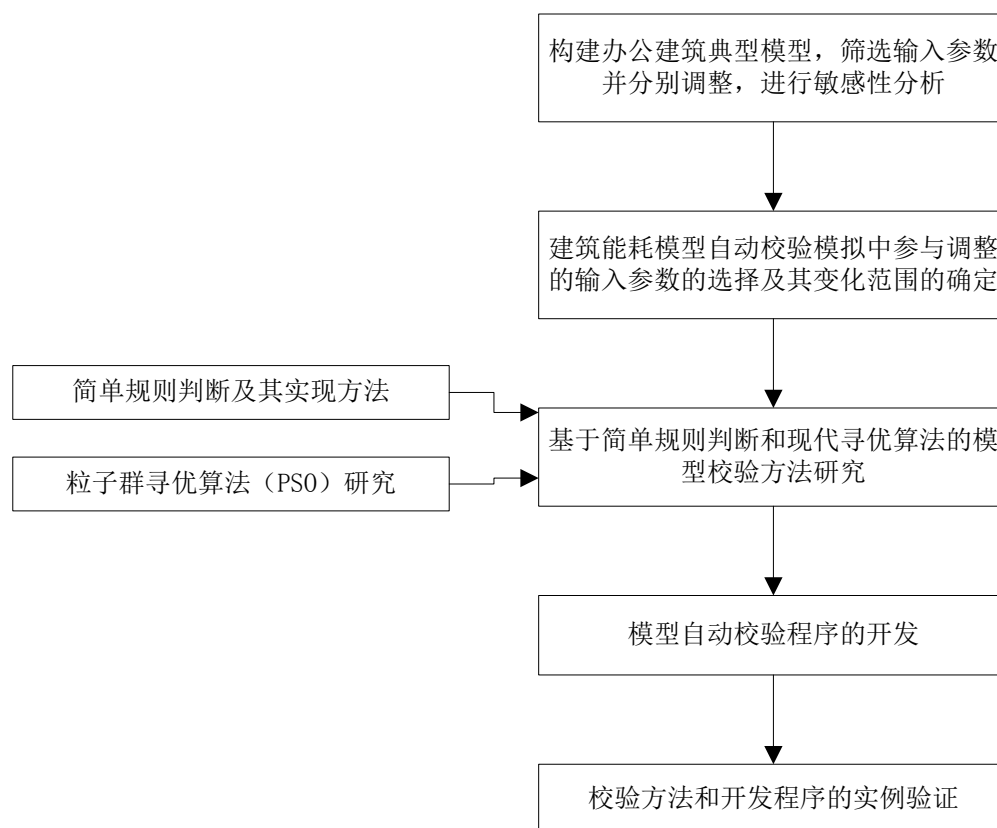


图 1.1 研究路线图

本文的研究路线图如图 1.1 所示。

## 第2章 建筑能耗模型输入参数单因子敏感性分析

由绪论可知,校验模拟是将建筑实际能耗数据和能源账单与模型的计算输出结果进行比对,经过多次调整和修正模型输入参数后,使得模拟结果与实际能耗的误差在相关标准规定的范围之内。对于一个建筑能耗模型来说,输入参数包括天气参数、围护结构、内部负荷、空调系统、运行时间表等等,数目很多,模型复杂时成百上千。在进行校验工作时,不可能对每一个参数都进行调整,实际上也没必要,所以,优先调整那些对能耗的输出结果影响较大的参数,能取得较好的校验效果,提高效率。评估输入参数对计算能耗的影响,就是敏感性分析。敏感性分析方法作为一种分析自变量变化对目标结果的影响程度的方法,十分适合应用于校验模拟的前期工作。该方法在国内外,特别是国外的研究中屡有提及,有些学者还进行了较全面的实例分析,在工程项目中得到应用并且取得了较好的节能指导效果。所以,敏感性分析方法是一种值得提倡并开展深入研究的校验模拟指导方法。

在本章中,将结合前人的研究基础,以办公建筑为例,用建筑能耗模拟软件 eQUEST3-64 构建上海地区办公建筑典型模型,选取多个输入参数进行敏感性分析,为后文提出自动校验模拟方法时筛选输入参数做基础。

### 2.1 典型办公建筑模型的建立

#### 2.1.1 模型建立

结合上海市实际使用较多的情况设定办公建筑模型为25层,层高为4.2米,标准层面积为 $1750\text{m}^2$ ,长宽比为1.43。采用建筑全能耗模拟分析软件 eQUEST3-64 进行建模,模型的围护结构和系统设置参数参照《ASHRAE Standard 90.1-2007》<sup>[36]</sup>和《公共建筑节能设计标准》<sup>[37]</sup>确定,详见表2.1,图2.1为建筑模型3D图。

为了分析数据方便,在符合相关标准和实际情况的条件下,对典型模型做出以下简化:

各层均为标准层,长宽比、层高均相同,分为外区、内区和核心区,内、外区为办公区域,核心区包括楼梯、电梯间及前室、卫生间等,属于服务性空间,不设空调,图2.2为建模时的标准层空调系统热分区示意图。

建筑朝向为正南,四面窗户材质相同,窗墙比均匀分布,忽略门的影响。

建筑使用时间严格按照国家规定的节假日安排并符合公建标准要求。

建筑的能源为电力和燃气，燃气主要用于冬季热水、供暖等，为了简化分析，针对空调系统的能耗重点讨论夏季工况，讨论的能耗只包括用电量，不包括冬季采暖的燃气消耗，但包括供热系统和热水系统的输送电力能耗。

表 2.1 模型输入参数表

围护结构 传热系数	屋顶 $W/(m^2 * K)$	外墙 $W/(m^2 * K)$	外窗 $W/(m^2 * K)$	窗墙比	窗户 SC 值
	0.70	1.00	3.00	0.40	0.50
内部负荷	照明密度 $W/m^2$	设备密度 $W/m^2$	人员密度 $m^2/人$		
	15.0	10.0	6.0		
空调系统	室内设计温度 $^{\circ}C$	新风量 $M^3/(人 * h)$	冷机 COP	风机效率	水泵效率
	24.0	30.0	5.50	0.70	0.70

空调系统设计为办公室常用的变风量空调系统（VAV），冷源为水冷离心式冷水机组，热源为燃气锅炉。

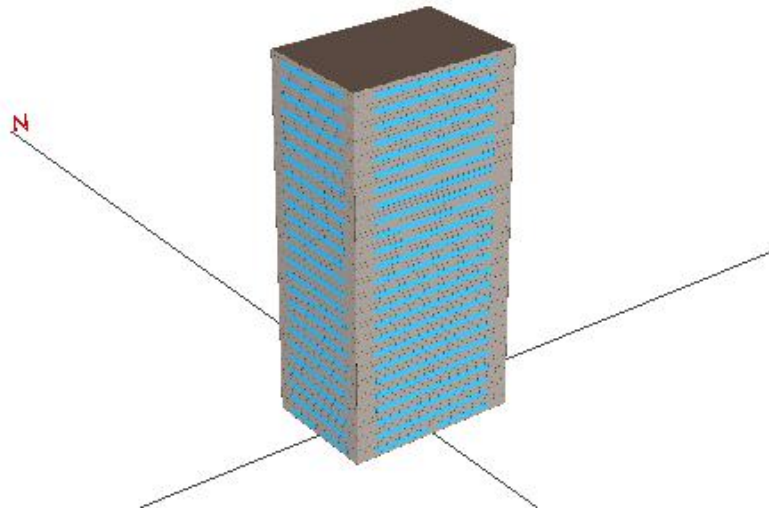


图 2.1 建筑模型 3D 外形



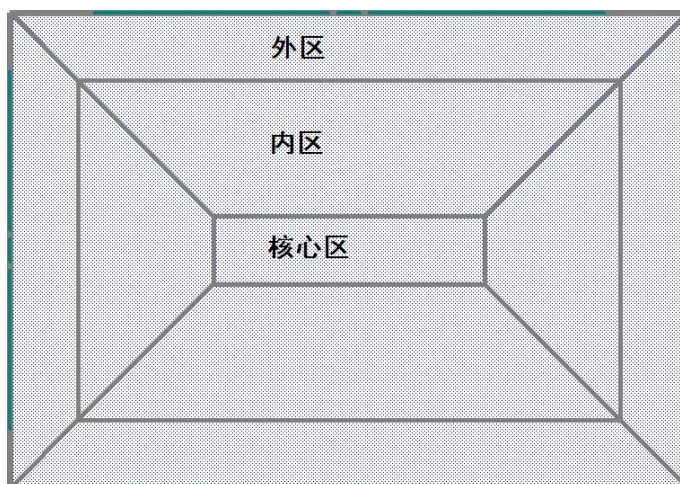


图 2.2 标准层空调系统热分区示意图

### 2.1.2 典型办公建筑能耗模拟结果与分析

根据建筑相关参数的确定和模型简化假设，输入上海地区典型气象参数，采用建筑全能耗模拟分析软件 eQUEST3-64 进行建模并运行计算，得到典型办公建筑的全年能耗如图 2.3 所示。

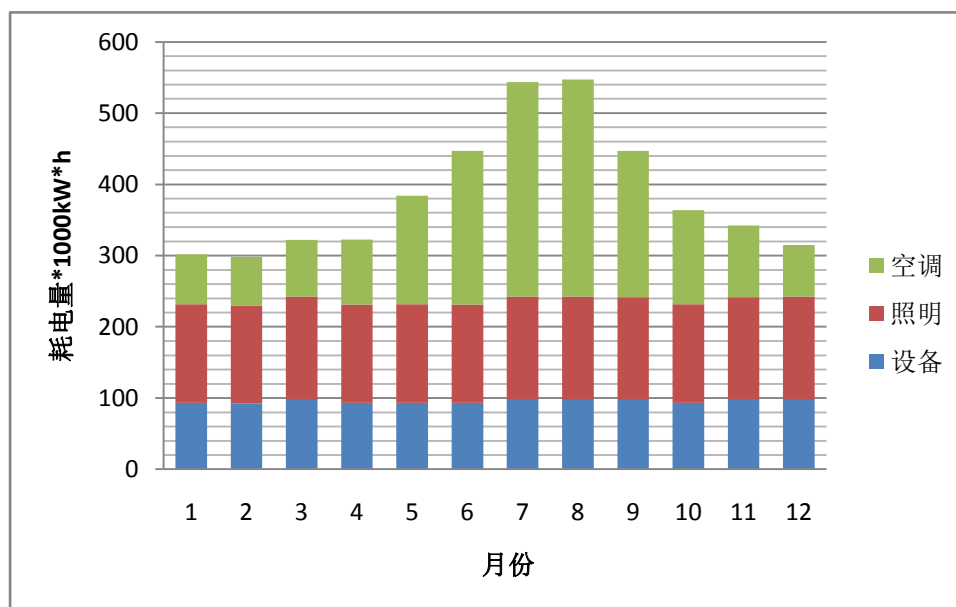


图 2.3 全年各月份分项耗电量

从图 2.3 可以看出空调系统的耗电量随月份变化明显，其中七、八月份最高，夏季典型建筑的空调系统开启，用电量明显增加；而在冬季，本文中的典型建筑用燃气锅炉供热，空调系统只有风机和水泵有一定的耗电量，所以空调系统耗电量明显减少；相反，照明和设备耗电量随月份变化不明显，全年的耗电量比较稳定。由模拟计算结果可知，建筑全年耗电量为 4634655kWh，以整个建筑面积

43750m<sup>2</sup>计算，单位建筑面积年耗电量为 105.94 kWh/(m<sup>2</sup> × y)，其中空调耗电量 41.04 kWh/(m<sup>2</sup> × y)，占 38.7%；照明耗电 38.81 kWh/(m<sup>2</sup> × y)，占 36.6%；室内设备耗电 26.08 kWh/(m<sup>2</sup> × y)，占 24.7%。从以上数据可以得出，典型模型的建模方式和参数设置是比较合理的，能够作为本章后续研究的基础。

## 2.2 需要调整的输入参数的选择

本文对典型办公建筑能耗模型输入参数单因子敏感性的分析研究仅针对确定的空调形式，及现今大型办公建筑中比较常用的 VAV 空调系统形式，研究围护结构、内部负荷、空调系统等参数的设置对整个建筑能耗的敏感性。根据 T. Agami Reddy 和 J. C. Lam 等人<sup>[10,32]</sup>针对典型办公建筑能耗模型校验模拟的研究结论，再结合实际的可操作性及对工程项目的可指导性，围护结构选取屋顶传热系数、外墙传热系数、外窗传热系数、遮阳系数 SC 值和窗墙比 5 个因子；内部负荷选取照明功率密度，设备功率密度、人员密度 3 个因子；空调系统选取室内设计温度、新风量、制冷机组 COP、风机效率、水泵效率 5 个因子。

## 2.3 敏感性分析

### 2.3.1 敏感性评价指标

为明确的显示各个因子对能耗的具体影响程度，本文用平均单位面积能耗变化值及平均单位面积能耗变化率来衡量各个因子对总能耗、空调能耗、照明能耗和设备能耗的敏感性，具体定义如下：

$$\text{单位面积总能耗变化值: } P_{A_j} = \frac{A_j - A_1}{X_j - X_1}$$

平均单位面积总能耗变化值： $\overline{P_{A_j}}$ 及对各项 $P_{A_j}$ 值求和取平均值

$$\text{单位面积总能耗变化率: } Q_{A_j} = \frac{A_j - A_1}{A_1} / (X_j - X_1)$$

平均单位面积总能耗变化率： $\overline{Q_{A_j}}$ 及对各项 $Q_{A_j}$ 值求和取平均值

其中 $X_j$ 表示单因子输入参数的值， $A_j$ 表示取此值时的总能耗。此外，单位面积空调能耗变化值 $P_{B_j}$ 、单位面积照明能耗变化值 $P_{C_j}$ 、单位面积设备能耗变化值 $P_{D_j}$

及其平均值 $\overline{P_{Bj}}$ 、 $\overline{P_{Cj}}$ 、 $\overline{P_{Dj}}$ 定义可类推。单位面积空调能耗变化率 $Q_{Bj}$ 、单位面积照明能耗变化值 $Q_{Cj}$ 、单位面积设备能耗变化值 $Q_{Dj}$ 及其平均值 $\overline{Q_{Bj}}$ 、 $\overline{Q_{Cj}}$ 、 $\overline{Q_{Dj}}$ 定义可类推。

### 2.3.2 围护结构因子敏感性

#### (1) 外墙传热系数敏感性

外墙是建筑外围护结构的主体部分之一，其传热系数的大小直接影响建筑室内外环境的传热特性，与空调能耗有着直接的联系。典型模型中外墙传热系数的取值是  $1.0 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K})$ ，将外墙传热系数依次设置为  $0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K})$ 、 $1.0 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K})$ 、 $1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K})$ 、 $2.0 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K})$ 、 $2.5 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K})$ ，其他参数设置保持不变，来研究外墙传热系数对总电耗和空调电耗的敏感性，模拟结果如表 2.2。

表 2.2 外墙传热系数对典型建筑电耗敏感性分析数据

变量	单位	取值 j=1	取值 j=2	取值 j=3	取值 j=4	取值 j=5
外墙传热系数 X	$\text{W}/(\text{m}^2 * \text{K})$	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
A	$\text{kW.h}/(\text{m}^2.\text{y})$	105.65	105.94	106.31	106.70	107.14
B	$\text{kW.h}/(\text{m}^2.\text{y})$	40.76	41.04	41.42	41.81	42.24
$P_A$	$\text{kW.h}/(\text{m}^2.\text{y})$	---	0.58	0.66	0.70	0.74
$\overline{P_A}$	$\text{kW.h}/(\text{m}^2.\text{y})$	0.67				
$P_B$	$\text{kW.h}/(\text{m}^2.\text{y})$	---	0.56	0.66	0.70	0.74
$\overline{P_B}$	$\text{kW.h}/(\text{m}^2.\text{y})$	0.67				
$Q_A$	%	---	0.55	0.62	0.66	0.71
$\overline{Q_A}$	%	0.64				
$Q_B$	%	---	1.37	1.62	1.72	1.82
$\overline{Q_B}$	%	1.63				

从表 2.2 可以看出，随着外墙传热系数的增大，总电耗和空调系统电耗都有所增加。具体数字分析可以看出，平均单位面积总电耗变化值为 0.67，即当外墙传热系数增加  $1 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K})$  时，平均单位面积总电耗增大  $0.67 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K})$ ，平均变化率为 0.64%；平均单位面积空调电耗变化值为 0.67，即当外墙传热系数增

加 $1\text{W}/(\text{m}^2 * \text{K})$ 时, 平均单位面积空调电耗增大  $0.67\text{W}/(\text{m}^2 * \text{K})$ , 平均变化率为 1.63%。外墙传热系数对空调系统和总的电耗的影响较为明显, 这也是为什么在实际工程中, 需要对外墙进行保温措施, 减小其传热系数, 从而达到建筑节能的目标的原因。

(2) 其他围护结构因子敏感性

参照以上单因子敏感性分析方法, 对屋顶传热系数、窗户传热系数、遮阳系数 SC 值和窗墙比分别取不同数值, 建模计算, 数据分析如表 2.3。

表 2.3 其他围护结构因子对典型建筑电耗敏感性分析数据

变量 X	单位	取值 j=1	取值 j=2	取值 j=3	取值 j=4	取值 j=5
屋顶传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2 * \text{K})$	0.30	0.70	1.20	1.70	2.20
窗户传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2 * \text{K})$	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
遮阳系数 SC 值	---	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
窗墙比系数	%	30	40	50	60	70
	单位	屋顶传热系数	窗户传热系数	遮阳系数 SC 值	窗墙比系数	
$\overline{P_A}$	$\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$	0.022	0.24	0.17	0.14	
$\overline{P_B}$	$\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$	0.022	0.24	0.17	0.14	
$\overline{Q_A}$	%	0.02	0.22	0.16	0.14	
$\overline{Q_B}$	%	0.05	0.58	0.45	0.36	

由上述分析数据可知, 在所取的 5 个围护结构因子中, 屋顶传热系数的敏感性最小, 这主要是因为典型模型为高层建筑, 屋顶的面积相对建筑的总表面积很小, 故影响甚微。其他 4 个围护结构因子的变化都会引起空调系统电耗的变化, 从而影响总电耗, 且这四个因子的敏感性基本相当。

此外, 对于窗墙比系数这个输入参数来说, 对于既有建筑模型, 窗墙比是一个确定的值, 在进行既有建筑能耗模型校验模拟一般是不能改变其值的, 此处的分析可以为新建建筑窗墙比的节能设计提供基础依据。

### 2.3.3 内部负荷因子敏感性

内部负荷因子有照明功率密度、设备功率密度和人员密度, 分别将不同的取值输入模型后计算, 可以得出相关耗电量的变化值和变化率, 详见表 2.4。

表 2.4 内部负荷因子对典型建筑电耗敏感性分析数据

变量 X	单位	取值 j=1	取值 j=2	取值 j=3	取值 j=4	取值 j=5
------	----	--------	--------	--------	--------	--------

照明功率密度	W/m <sup>2</sup>	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
设备功率密度	W/m <sup>2</sup>	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
人员密度	m <sup>2</sup> /人	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0
	单位	照明功率密度	设备功率密度	人员密度		
$\bar{P}_A$	kW.h/(m <sup>2</sup> .y)	3.10	3.21	-2.50		
$\bar{P}_B$	kW.h/(m <sup>2</sup> .y)	0.58	0.61	-2.50		
$\bar{P}_C$	kW.h/(m <sup>2</sup> .y)	2.54	0	0		
$\bar{P}_D$	kW.h/(m <sup>2</sup> .y)	0	2.60	0		
$\bar{Q}_A$	%	3.42	3.03	-2.22		
$\bar{Q}_B$	%	1.51	1.49	-5.21		
$\bar{Q}_C$	%	9.67	0	0		
$\bar{Q}_D$	%	0	9.96	0		

注：人员密度一栏各个敏感性评价指标的值均为负数，这是由于能耗模型中，人员密度这一输入参数采用的单位是（m<sup>2</sup>/人），数值越大，表示人员密度越小，能耗就会降低。

由表 2.4 可知，随着照明功率密度、设备功率密度和人员密度的增大，对应的能耗都增大。照明功率密度和设备功率密度除了分别对照明电耗和设备电耗有直接的敏感性之外，还会对空调系统的电耗产生影响，这是因为照明和设备都会在室内散热，影响空调系统的运行。从数据中可以看出，内部负荷因子对空调系统电耗和总电耗都有较为显著的影响。

### 2.3.4 空调系统因子敏感性

空调系统因子有室内设计温度、新风量、制冷机组 COP、风机效率和水泵效率，分别将不同的取值输入模型后计算，可以得出相关耗电量的变化值和变化率，详见表 2.5。

表 2.5 空调系统因子对典型建筑电耗敏感性分析数据

变量 X	单位	取值 j=1	取值 j=2	取值 j=3	取值 j=4	取值 j=5
室内设计温度	℃	23.0	24.0	25.0	26.0	27.0
新风量	m <sup>3</sup> /(h.人)	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0
制冷机组 COP	—	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0

风机效率	%	60	65	70	75	80
水泵效率	%	60	65	70	75	80
	单位	室内设计温度	新风量	制冷机组 COP	风机效率	水泵效率
$\overline{P_A}$	kW.h/(m <sup>2</sup> .y)	-2.07	0.23	-5.99	-0.13	-0.21
$\overline{P_B}$	kW.h/(m <sup>2</sup> .y)	-2.07	0.23	-5.99	-0.13	-0.21
$\overline{Q_A}$	%	-1.90	0.22	-5.23	-0.12	-0.19
$\overline{Q_B}$	%	-4.74	0.60	-12.10	-0.30	-0.48

由表 2.5 可知，空调系统电耗和总电耗会随着新风量的提高而增大，但会随着室内设计温度、制冷机组 COP、风机效率和水泵效率的提高而减小。在所取的 5 个空调系统因子中，制冷机组 COP 的敏感性最为显著，其次是室内设计温度和新风量，风机效率和水泵效率的影响相对较小，敏感性相当，当然，这和模型所设置的空调系统（VAV 系统）有一定关系。

## 2.4 本章小结

(1) 本章中所有数据和分析只是针对此处特定的办公建筑典型模型，定性的来分析各个输入参数对于能耗的敏感性，对于不同的建筑和设备系统形式，计算结果和数据上肯定会有所变化，但是整体的趋势是具有一致导向性的。

(2) 围护结构因子中，屋顶的面积所占典型模型总体表面积很小，故对能耗的敏感性很小。内部负荷因子中，照明功率密度和设备功率密度除了分别对照明能耗和设备能耗有直接的敏感性外，还对空调系统的能耗有一定的影响，而室内人员密度对空调系统能耗的影响更大，这是因为室内人员除通过散热散湿影响空调系统外，还要求系统提供足够的新风量以满足卫生要求。空调系统因子中，**制冷机组 COP 的敏感性最为显著，其次是室内设计温度和新风量的大小，风机效率和水泵效率的影响相对较小，敏感性相当。**

(3) 在建筑能耗模型的校验中，建筑的设计参数、系统运行和能耗记录的相关数据是有限的，要结合现场测试和建筑的实际情况，**优先调整模型中敏感性较大的参数**，提高校验模拟工作的效率。

## 第3章 基于简单规则判断和现代寻优算法的模型校验方法

由前两章的内容分析可知,在实际工程中,目前大部分的实际建筑模型的校验所采用的还是人工的依据经验的方法,较少采用数学分析方法,校验工作的强度和难度都很大。部分学者也在尝试采用图表分析等方法进行模型校验,希望减少人工校验的工作量,提高校验模型的准确度,但主要存在的问题有两个,一个是整个校验过程目前很难做到完全自动化,另一个是自动校验的过程一般需要进行迭代计算,目前大部分方法所需要的计算时间会很长(如穷举法、蒙特·卡罗随机法等),有的甚至无法接受。这两个问题是本文研究内容的重点。本章中,将针对上述问题,在前人研究的基础上继续展开,提出一套基于简单规则判断和现代寻优算法的建筑能耗模型自动校验方法。

在进行模型校验工作时,校验的难易程度以及准确程度取决于建筑信息、实际能耗数据、账单数据的详细和准确程度,尤其是实际能耗和账单数据,决定了应该去调整模型中哪些对应的输入参数以及如何调整。在本文的整个论述中,假定能够得到建筑能耗的实际逐月分项数据记录,主要包括照明系统、室内办公设备(插座)系统、暖通空调系统(包括主机、冷却塔、水泵和风机等),后续的分析和研究工作都基于此假设。

此外,本文所涉及到的建筑能耗模型首先都采用建筑能耗模拟软件 eQUEST 进行建模,后期采用 DOE-2 计算核心进行能耗计算。eQUEST 是一款图形化的建模软件,建模难度相对来说较为容易,但其本身又是一款封闭式的模拟软件,无法很方便的被外部语言程序调用,而能耗模型自动校验过程中,需要反复的改变模型输入参数,计算能耗结果,不断地重复这一过程,也就是需要实现很方便地随时调用能耗软件对模型进行计算这一功能,而 DOE-2 是一个相对开放的模拟计算引擎,能够满足这一条件。实际上,eQUEST 本身的计算核心就是 DOE-2,所以二者的计算结果基本一致。

### 3.1 简单规则判断及现代寻优算法在校验模拟中的应用

简单规则判断就是通过简明的规律,判断问题产生的原因和解决方法等。由此演变出的规则推断、规则库和专家系统等理论知识和方法,都属于人工智能方法的范畴,已经广泛地应用于各个领域和行业。

一方面,模型校验实际就是建立在计算数据和实际数据的比较分析的基础上,不断地调整模型输入参数使二者间的误差逐渐减小到一定范围内。当进行人工的

手动校验时，总是首先寻找能从数据上直接反映出来的差距，然后人为的去调整模型中对应的输入参数。例如，对于照明能耗，在运行时间表确定的情况下，能耗的大小只与模型中设置的单位面积照明密度值直接相关，所以，比较照明能耗的计算值和实际值，然后去调整模型中对应的单位面积照明密度值，就能减小误差。这样一些简单的规律，可以做成简单的规则判断，添加到自动校验的程序中，提高校验效率。

然而，能从数据的简单比较上得到的规律是有限的，一方面是能取得的实际能耗数据记录是有限的，另一方面是由于在模型中，能耗和输入参数之间、多个分项能耗之间以及多个输入参数之间的关系通常都不是简单的一一对应，而是存在复杂多变的耦合关系。所以，在简单的规则判断之外，还需要利用其他有效的方法继续进行模型的校验工作。

由绪论中提及的校验模拟简介可知，模型校验的过程就是通过不断调整模型的输入参数而使模型的计算输出结果与实际能耗数据之间的误差不断减小的过程，因此，模型的校验过程可以看作一个标准的寻优过程。此过程有着自己特定的约束条件，即输入参数的调整范围应在合理的区间范围内，寻优目标则就是计算结果与实际数据的误差值。在寻优过程中充分利用现代寻优算法强大的搜索能力，在满足初始约束条件下，寻找到满足误差范围的一组解，作为寻优的结果，由于优化目标就是计算结果与实际数据的误差值，此时模型即得到校验。

近几十年来，现代寻优算法的发展十分迅速，包括遗传算法、模拟退火算法、蚂蚁算法、粒子群算法等。它们都是模拟某些自然现象或过程，为解决实际寻优问题提供了新的方法和思路。它们并不追求问题的最优解，因为得到最优解往往需要巨大的计算量和计算时间。它们在计算时间和精度之间进行折中，用可以接受的计算量得到相对满意的、符合实际应用要求的解。

本文采用的现代寻优算法为粒子群寻优算法（Particle Swarm Optimization），它是进化算法的一种，从随机解出发，通过迭代寻找最优解，比遗传算法更为简单，没有遗传算法的“交叉”和“变异”操作，易于后期程序的开发，同时精度高、收敛快，能较好的避免陷入局部最优，因此，比较适用于建筑能耗模型的校验寻优过程。

## 3.2 粒子群寻优算法（PSO）

### 3.2.1 算法简介

PSO 算法模拟鸟群的捕食行为。设想这样一个场景：一群鸟在随机搜索食物，



在这个区域里只有一块食物，所有的鸟都不知道食物在那里，但是他们知道当前的位置距离食物还有多远。那么找到食物的最优策略是什么呢？最简单有效的就是搜寻目前距离食物最近的鸟的周围区域。PSO 算法就是从这种模型中得到启示并用于解决优化问题。算法中，每个优化问题的解都是搜索空间中的一只鸟，我们称之为“粒子”，所有的粒子都有一个由被优化的函数决定的适应值，每个粒子还有一个速度决定他们飞翔的方向和距离，然后粒子们就追随当前的最优粒子在解空间中搜索。

PSO 初始化为一群随机粒子(随机解)，然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中，粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己。第一个就是粒子本身所找到的最优解，这个解叫做个体极值，用  $pBest$  表示；另一个极值是整个种群目前找到的最优解，这个极值是全局极值，用  $gBest$  表示，另外也可以不用整个种群而只是用其中一部分作为粒子的邻居，那么在所有邻居中的极值就是局部极值。

粒子  $i$  的信息可以用当  $D$  维向量来表示，设当前位置为  $X_i^t(x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{iD}^t)$ ，当前速度为  $v_i^t(v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{iD}^t)$ ，在找到这两个最优值后，粒子根据如下的公式来更新自己的速度和新的位置，对于第  $d$  维坐标和速度来说：

$$v_{id}^{t+1} = w * v_{id}^t + C_1 * Rand_1^t * (pBest_{id}^t - X_{id}^t) + C_2 * Rand_2^t * (gBest_d^t - X_{id}^t) \quad (3-1)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (3-2)$$

$v_{id}^{t+1}$  是粒子  $i$  在第  $t$  次迭代中第  $d$  维的速度，其他每一维的位置和速度定义都一样， $d=1, 2, \dots, D$ ， $i=1, 2, \dots, N$ ， $N$  是粒子的数目，对于大部分的问题 10 个粒子已经足够可以求得好的结果，对于较为复杂的寻优问题，粒子数一般取 20 - 40 个。 $w$  为惯性权重值，用来控制上一时刻的速度对当前速度的影响，取较小的值时偏重于发挥粒子群算法的局部搜索能力，取较大值时偏重于发挥粒子群算法的全局搜索能力，通常取  $w=1.0$ 。 $C_1$  和  $C_2$  是学习因子， $C_1$  用来调节向个体极值 ( $pBest$ ) 方向搜索的步长， $C_2$  用来调节向全局极值 ( $gBest$ ) 方向搜索的步长。 $C_1$ 、 $C_2$  过小会使粒子学习功能减弱，寻优效率降低；过大会使粒子有可能直接跳过最优区域，合适的  $C_1$ 、 $C_2$  可以保证收敛速度并不易于陷入局部最优，通常取  $C_1 = C_2 = 2.0$ 。 $Rand_1^t$ 、 $Rand_2^t$  是属于  $[0, 1]$  的一个随机数。

标准的粒子群算法 (PSO) 流程图可见图 3.1。

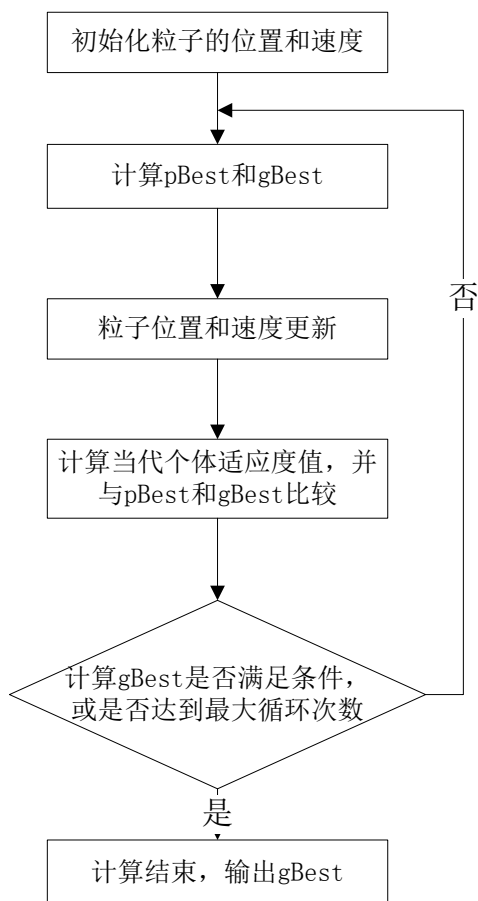


图 3.1 标准粒子群算法（PSO）流程图

### 3.2.2 寻优约束

由上一节的内容可知，模型校验的寻优问题是有一定的约束条件的，建筑模型是面向实际应用的，其输入参数不能随意的设置和调整，即在模型寻优校验过程中，输入参数的调整必须在一个合理的范围内，如果不加上这个约束条件，一方面寻优解空间太大，收敛速度降低，另一方面，最后寻到的解超出合理范围，无法解释，校验后的模型也是错误的。

所以，在进行模型的寻优校验之前，确定约束条件十分重要，即确定可调整的输入参数及其变化的上下限是十分重要的。

除了能耗软件本身一些特定的参数或者无法更改设置的参数外（如软件版本、计算时的时间步长、传热传质的计算方法等），建筑能耗模型的输入参数大致可以分为以下两类：

- (1) 运行时间表（Schedule）性质类的参数变量。如供冷供热室内设计温度时间表、照明运行时间表等、风机启停时间表等，这些参数通常是由一组有序的数据组成，通常应结合建筑运行的实际情况手动调整，自动校验的难度很大。因此，本文的校验方法不考虑时间表（Schedule）类型

的输入变量，模型校验方法的提出和举例验证也是建立在模型在前期校验工作中运行时间表已确定的基础上。

- (2) 建筑系统和设备系统的相关参数变量。如建筑围护结构的传热系数、冷机 COP 值等，这些参数理论上是可以进行自动调整的，但也不是每一个参数都能够并且需要自动调整。如窗墙比系数，在建模准确的情况下，实际建筑的窗墙比系数是一个固定值，不太可能变化，所以也不应该调整，更不用参加自动校验，那些能够通过已有实际数据直接或间接确定的参数也不应该随意调整。结合国内外学者的研究结论，以及第二章中所做的办公建筑典型模型输入参数对能耗的敏感性分析，并联合建筑设计相关标准和实际建筑及设备系统的情况，本文选择的可参与自动校验的输入参数及其变化范围和变化步长默认值见表 3.1。

表 3.1 可参与自动校验的模型输入参数及其变化范围和变化步长默认值

参数	单位	变化下限	变化步长	变化上限
外墙 U 值	W/(m <sup>2</sup> * K)	0.3	0.1	1.5
窗户 U 值	W/(m <sup>2</sup> * K)	1.5	0.5	6.5
窗户 SC 值	---	0.3	0.05	0.7
照明功率密度	W/m <sup>2</sup>	5.0	2.0	25.0
设备功率密度	W/m <sup>2</sup>	5.0	2.0	30.0
人员密度	m <sup>2</sup> /P	5.0	1.0	20.0
水泵效率	---	0.5	0.05	0.95
冷机 COP 值	---	3.0	0.5	6.0
锅炉效率	---	0.5	0.05	0.95
风机效率	---	0.5	0.05	0.95
人员新风量	m <sup>3</sup> /(P * h)	20.0	3.0	40.0
供热室内温度	℃	16.0	1.0	24.0
供冷室内温度	℃	20.0	1.0	28.0

表 3.1 只是确定了后期自动校验程序开发中输入参数变化上下限和变化步长的默认值，在进行具体的模型校验工作时，可以根据实际情况需要加大或减小变化范围。尽量减少需要调整的参数、尽量缩小参数的变化范围，校验的效果也会更准确，更符合建筑的实际情况。变化步长也可以根据实际需求进行适当调整，较大的步长可以提高收敛速度、减少迭代时间，但精度可能不够；较小的步长可

以提高寻优的精度和模型校正的准确性，但收敛速度会减慢，计算时间也会相应增加。

### 3.2.3 寻优目标

寻优目标是寻优算法的目标函数，指引着寻优的变化方向，也是寻优迭代的终止条件。在本文中，寻优目标是建筑能耗计算软件的计算值与实际能耗数据之间的误差。软件的计算输出能耗包括：照明系统能耗、设备（插座）系统能耗、暖通空调系统，包括主机、冷却塔、水泵和风机等，并且每一项输出都包括逐时、逐天、逐月的数据。但考虑到实际建筑的情况，如此详细的数据很难得到，本章开篇我们就假定了能够获得的实际能耗数据是逐月的分项数据，所以本文中采用逐月数据来校验模型。

$$ERR_{\text{month}} (\%) = \left[ \frac{(M-S)_{\text{month}}}{M_{\text{month}}} \right] \times 100\% \quad (1-1)$$

$$CV(RSME_{\text{month}}) (\%) = \left[ \frac{RMSE_{\text{month}}}{A_{\text{month}}} \right] \times 100\% \quad (1-3)$$

$$RSME_{\text{month}} = \sqrt{\frac{\sum_{\text{month}} (M-S)_{\text{month}}^2}{N_{\text{month}}}} \quad (1-4)$$

$$A_{\text{month}} = \left[ \frac{\sum_{\text{month}} (M_{\text{month}})}{N_{\text{month}}} \right] \quad (1-5)$$

式中：M——实际能耗

S——模拟能耗

$N_{\text{month}}$  ——每年账单月份

由式（1-1）可知，对于每个月的数据，月误差有正有负，如果直接采用月平均误差作为寻优目标，加和后正负误差相互抵消，可能出现总体误差很小但实际每个月的误差很大的情况，这对于模型校验的准确性是很不利的，为了克服这个弊端，本论文直接采用实际数据和计算数据之间的均方差变异系数  $CV(RSME_{\text{month}})$  作为寻优目标，均方差变异系数为标准差与平均数的比值，反映数据的离散性，是变量分散性的一个度量，如式（1-3）。

根据以上定义的分析，确定寻优时目标函数的形式为：

$$f_{\text{obj}} = K_1 * CV (RMSE_{\text{total -elec}}) + K_2 * CV (RMSE_{\text{total -hvac}}) + K_3 *$$

$$CV (RMSE_{\text{light}}) + K_4 * CV (RMSE_{\text{equipment}}) + K_5 * CV (RMSE_{\text{total -gas}}) \quad (3-3)$$

其中  $CV (RMSE_{\text{total -elec}})$  表示逐月总耗电量的均方差变异系数， $CV (RMSE_{\text{total -hvac}})$  表示逐月空调系统耗电量的均方差变异系数， $CV (RMSE_{\text{light}})$  表示逐月照明系统耗电量的均方差变异系数，

$CV(RMSE_{\text{equipment}})$  表示逐月设备系统耗电量的均方差变异系数,  $CV(RMSE_{\text{total-gas}})$  表示逐月总耗气量的均方差变异系数,  $K_1、K_2、K_3、K_4、K_5$  为对应各项在目标函数中的权重系数,  $K_1、K_2、K_3、K_4、K_5 \in [0, 1]$  且  $K_1+K_2+K_3+K_4+K_5=1$ 。

权重系数的大小是用来确定寻优校验时的侧重点, 侧重于哪一项, 这一项的权重系数应设置为较大的值。例如进行照明能耗的校验时, 假如分析人员只考虑照明能耗计算值与实际值之间的误差, 可以将  $K_3$  设置为 1, 其他项全部设置为 0。此外, 式 (3-3) 的等式右边由五项组成, 并不表示必须有这五项的实际能耗数据才能进行寻优校验, 如最后一项表示逐月总耗气量, 当建筑设备系统没有燃气消耗时, 可以将此项的系数, 即  $K_5$  设置为 0, 寻优校验仍可以顺利进行。

### 3.2.4 误差标准的确定

由绪论中提到的校验模拟的误差指标的知识可知, 模型校验的误差标准可以用平均偏差 (MBE) 和均方差变异系数  $CV(RMSE)$  来判定。MBE 为某个时段内模拟能耗与实际能耗的误差, 可以是月误差 ( $EER_{\text{month}}$ )、年误差 ( $EER_{\text{year}}$ ) 或逐时平均偏差 ( $MBR_{\text{hour}}$ )。上节中也指出直接采用平均偏差可能会出现逐月误差正负抵消的弊端, 因此寻优校验的目标函数采用均方差变异系数  $CV(RMSE)$  来定。误差的大小应依据相关标准去确定, 确定这个具体的数值是为了给寻优校验时算法迭代一个终止条件。具体相关标准及取值可以参见表 1.1。本文在后期开发模型自动校验程序时, 默认采用 ASHRAE14 标准, 即默认均方差变异系数小于 15%, 也就是在进行 PSO 算法迭代寻优校验时, 目标函数 (即式 3-3) 达到 0.15 以下时, 寻优迭代终止。

与输入参数变化区间的上下限一样, 这个误差标准值也只是个默认值, 在后期建筑模型自动校验程序的开发设计中, 分析人员可以根据实际情况减小这个误差标准值, 如按照《公共建筑节能改造技术规范》设置误差标准为小于 10%。减小误差标准值可以迭代寻找到更准确的校验模型, 但计算次数会增多, 计算时间也会更长。

## 3.3 寻优算法和能耗模拟软件的耦合

在采用粒子群寻优算法 (PSO) 进行建筑模型自动校验时, 要进行大量的循环迭代计算才有可能在给定的输入参数变化区间内找到满足误差条件的解, 而寻

优算法每次迭代都需要与建筑能耗模拟计算软件进行数据交换。

每一次循环迭代的过程包括：寻优算法根据上一次的误差结果生成新的参数值数据组合（迭代初次为根据参数区间随机生成）；新的输入参数值数据组合写入模型输入文件，进而构建新的建筑能耗模型；能耗软件模拟计算和计算能耗结果的输出和读取；能耗的计算结果和实际数据的误差比较；新的误差结果反馈到寻优算法中。

本文提出的基于现代寻优算法的建筑能耗模型自动校验方法就是需要将上述循环迭代的过程利用计算机程序做到自动化。寻优算法和建筑能耗计算软件本身是两个独立的个体，如何有效地将二者耦合在一起并实现自动校验过程中所需要的功能，是本文研究的一个重点。

以下将基于 PSO 寻优算法和建筑能耗模拟软件 DOE-2，详细地论述耦合方法和需求功能的实现。

DOE-2 是由美国能源部开发的建筑能耗模拟计算分析软件，在过去几十年的发展和应用中，它的实用范围和模拟计算结果的准确性已在全球范围内得到广泛的认可，基于 DOE-2 为计算核心的图形化建模仿真软件 eQUEST，由于其建模操作的方便性，也广泛地应用于建筑行业的实际工程中。

一方面，DOE-2 可以看作一个开放的计算引擎，能够相对方便地被外部程序调用并运行计算，它的模型输入文件（inp 文件）和能耗计算结果文件（sim 文件）都是文本格式的文件，而且都有一定的语法规则和描述规律，可以利用计算机语言程序对需要的参数和数据进行读取记录或修改替换。另一方面，对于基于粒子群寻优算法（PSO）的模型自动校验方法来说，每一个参与调整的输入参数对应着粒子的一个维度，如同时参与寻优的输入参数有 5 个，那么粒子的维度就是 5，而设置的每一个参数变化范围的上下限及变化步长就分别对应着粒子每一维度上的解空间和每一维度迭代寻优的步长。以上两点是寻优校验过程实现自动化的必要条件。

耦合方式是采用开发外部程序实现的，PSO 算法寻优过程和模拟软件 DOE-2 计算过程相对独立，但二者的输入输出数据有相互交换和影响。原理示意图可以参见图 3.2，具体程序的开发将在第四章中详细介绍。

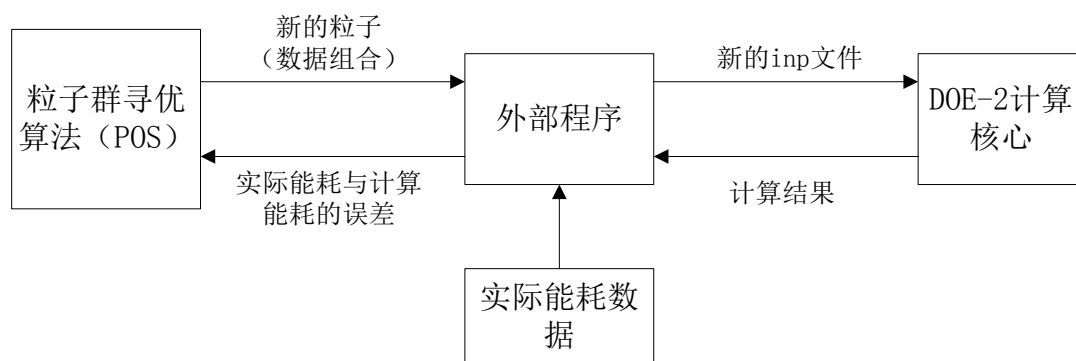


图 3.2 耦合原理示意图

当采用算法寻优校验模型时：

- (1) PSO 算法随机生成一个粒子群，每一个粒子对应着一个参数值数据组合。
- (2) 外部程序依据算法提供的当前粒子，将数据组合按照一定规律有序的替换到原来的模型输入文本文件中（inp 文件），生成新的模型输入文件。
- (3) 外部程序调用 DOE-2 计算核心读取新的模型输入文件，进行能耗模拟计算，读取能耗计算结果。
- (4) 外部程序根据事先已录入的实际能耗数据和读取的能耗计算结果，计算出当前误差并反馈到 PSO 算法中，算法根据当前误差生成新的粒子群。如此反复，直到误差满足终止条件或迭代达到设定的最大次数。

### 3.4 本章小结

本章首先论述了简单规则判断及现代寻优算法在校验模拟中的作用，进而引出了基于简单规则判断和现代寻优算法的模型自动校验方法，然后详细地介绍了粒子群寻优算法（PSO）的基本原理、主要特点和算法的标准流程，并针对建筑能耗校验模拟这一具体问题，确定了寻优算法的一系列基本要素，包括算法的寻优约束、寻优目标以及迭代计算时误差标准的确定。最后，介绍了寻优算法和能耗模拟软件之间的耦合关系和方法，指出这是基于此寻优算法的模型自动校验方法实现的关键，并为后面展开程序的开发和研究工作提供了基础。

## 第 4 章 建筑能耗模型自动校验程序的设计与开发

基于以上几章的研究，本章将以 DOE-2 为建筑能耗模拟软件计算核心，着重介绍基于简单规则判断和粒子群寻优算法（PSO）的建筑能耗模型自动校验程序的开发，包括开发语言和开发程序的简单介绍，程序设计和运行流程，开发过程中的重点难点及其处理方法。为了后续论述的方便，命名此次开发的程序为模型自动校验程序。

### 4.1 开发语言和开发环境简介

模型自动校验程序是使用 Visual C++ 语言进行编写的，开发环境是 Microsoft Visual Studio。

Microsoft Visual C++，（简称 Visual C++、MSVC、VC++或 VC）是微软公司的 C++ 开发工具，具有集成开发环境（IDE），可提供编辑 C 语言，C++ 以及 C++/CLI 等编程语言。VC++ 集成了便利的除错工具，特别是集成了微软视窗程序设计（Windows API）、三维动画 DirectX API，Microsoft .NET 框架。目前最新的版本是 Microsoft Visual C++ 2013。

Microsoft Visual C++ 是 Microsoft 公司推出的开发 Win32 环境程序，面向对象的可视化集成编程系统。它不但具有程序框架自动生成、灵活方便的类管理、代码编写和界面设计集成交互操作、可开发多种程序等优点，而且通过简单的设置就可使其生成的程序框架支持数据库接口、3D 控制界面。

Visual C++ 以拥有“语法高亮”，自动编译功能（IntelliSense）以及高级除错功能而著称。比如，它允许用户进行远程调试，单步执行等。还有允许用户在调试期间重新编译被修改的代码，而不必重新启动正在调试的程序。其编译及建置系统以预编译头文件、最小重建功能及累加链接著称。这些特征明显缩短程序编辑、编译及链接的时间花费，在大型软件计划上尤其显著。

Visual Studio 是微软公司推出的开发环境，Visual Studio 可以用来创建 Windows 平台下的 Windows 应用程序和网络应用程序，也可以用来创建网络服务、智能设备应用程序和 Office 插件，Visual Studio 是目前最流行的 Windows 平台应用程序开发环境。本文程序以 Microsoft Visual Studio 6.0 作为集成开发环境，使用其中的 Visual C++ 6.0 进行程序设计。Visual C++ 6.0 集成了 MFC 6.0，于 1998 年发行，发行至今一直被广泛地用于大大小小的项目开发，因此，这方面的可借鉴的资源十分丰富，这也正是本次选择 Visual C++ 6.0 的原因。



## 4.2 程序设计和运行流程

本章内容的研究目的是以 DOE-2 为建筑能耗模拟软件计算核心，开发一个基于简单规则判断和粒子群寻优算法（PSO）的模型自动校验方法的程序，用来对采用 DOE-2 建模的建筑能耗模型进行自动校验，并在后文中用典型建筑能耗模型和实际建筑能耗模型进行案例验证，旨在说明此方法的适用性和准确性。

### 4.2.1 程序的需求功能分析

程序的需求功能分析是指在程序设计之初或程序设计过程中，通过对具体问题的分析和研究，明确程序开发的目的是程序初步设计和不断深入完善的依据。简而言之，需求功能分析就是明确此程序应该实现哪些必要的功能。

模型自动校验程序的开发设计目的是完成建筑能耗模型自动校验的过程，结合前几章的分析和研究，图 4.1 使用模块化的方法详细展示出此程序各个功能模块之间的关系，表 4.1 详细列出了图 4.1 中对应各个模块的功能需求。

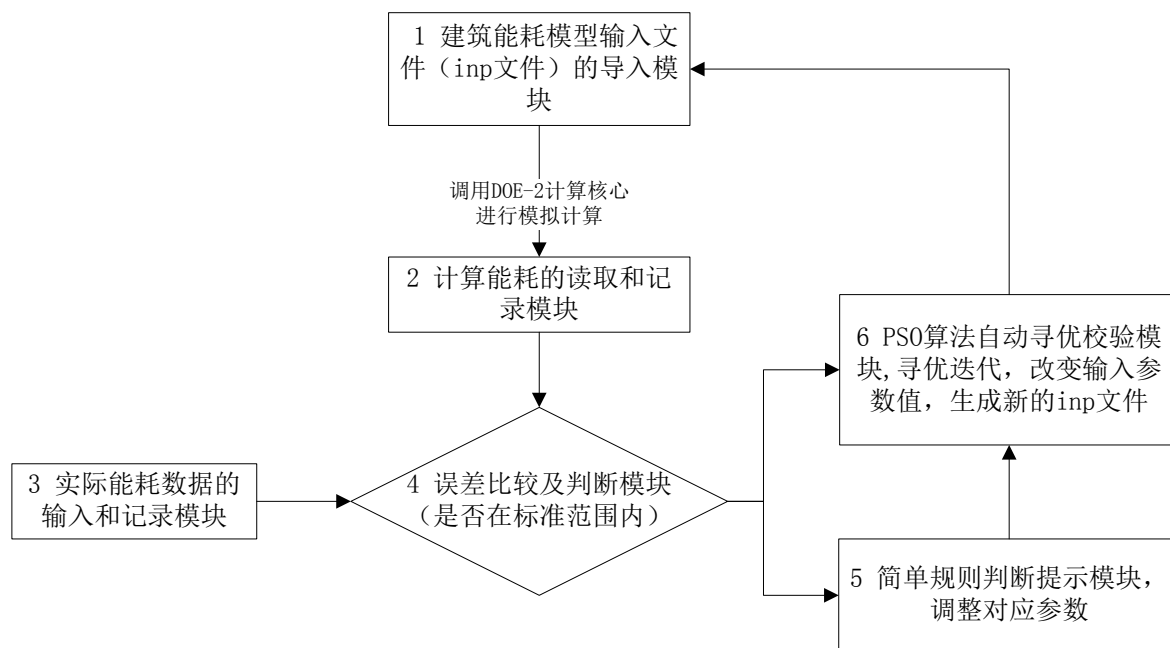


图 4.1 模型自动校验程序中各个功能模块及关系示意图

表 4.1 模型自动校验程序的各个模块的功能需求

序号	功能需求
1	存储当前能耗模型的输入文件 (inp 文件)，程序能根据需要随时调用 DOE-2 计算核心对当前模型进行能耗模拟计算。

2	从能耗模拟软件每一次的计算结果文件（sim 文件）中读取和记录所需要的计算能耗结果。
3	分析人员将实际能耗数据输入到指定的文件中并保存。
4	程序根据当前模型的计算结果和分析人员输入的实际数据，计算出当前模型的校验误差并与设定的误差标准值进行比较。
5	程序根据当前模型的计算结果和分析人员输入的实际数据，依据简单规则进行判断，对当前模型的校验给出提示，用于调整对应的输入参数。
6	根据当前模型的校验误差，PSO 算法寻优迭代，产生新的粒子（即输入参数），并按照一定的输入规则写入当前模型输入文件，生成新的 inp 文件。

### 4.2.2 程序基本构架

模型自动校验程序的基本构架大致可分为三个部分：

1 后台支持文件。此部分是保证程序在整个模型校验过程中顺利运行的基础，它保存着包括 DOE-2 计算引擎核心（名为 doe2.exe 的应用程序软件，包含在官方下载的 DOE-2 文件夹中）及其运行计算时所需要的全部支持文件（如气象天气文件等）、能耗模型的输入文件等。

2 界面及人机交互部分。程序的主界面如图 4.2 所示：



图 4.2 模型自动校验程序主界面

主界面主要包括五个部分：

(1) 主界面最左端列出了可参与调整的参数及其对应的单位，文本框中

显示对应参数在当前模型中的设定值。

- (2) 主界面中部第二列到第四列文本框用于在采用粒子群算法 (PSO) 进行自动寻优校验时, 设置对应可调整参数变化范围的上、下限和变化步长值; 第五列文本框用于分析人员手动调整某一个或多个输入参数时直接赋值。
- (3) 位于主界面右上角部分的误差控制选项栏, 用于显示误差公式和当前能耗模型的实时误差值; 文本框中可显示和修改各个能耗分项对应的权重系数 ( $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$ ), 默认值为 $K_1=K_2=K_3=K_4=K_5=0.2$ , 分析人员可根据模型校验的实际情况需要修改这些权重值, 修改后点击下方“计算当前误差”按钮, 实时误差值会对应地更新和显示出来; 采用自动寻优方法进行模型校验时, 用于终止迭代的误差标准值也显示本栏中, 默认值为 0.15 (误差标准 15%), 分析人员也可以根据需求重新设定。
- (4) 位于主界面左下角部分的控制台选项栏: “单次执行”按钮用于分析人员手动调整某一个或单个参数时触发计算; “开始 PSO 寻优”用于采用寻优算法自动校验时触发计算。点击“查看当前结果”按钮可显示出最近一次能耗软件的计算结果, 界面如图 4.3; 点击“PSO 算法设置按钮”可进入算法相关参数的设置界面, 如图 4.4, 进入此界面后, 分析人员可根据需要设定或修改 PSO 算法相关参数值以及最大迭代次数等。

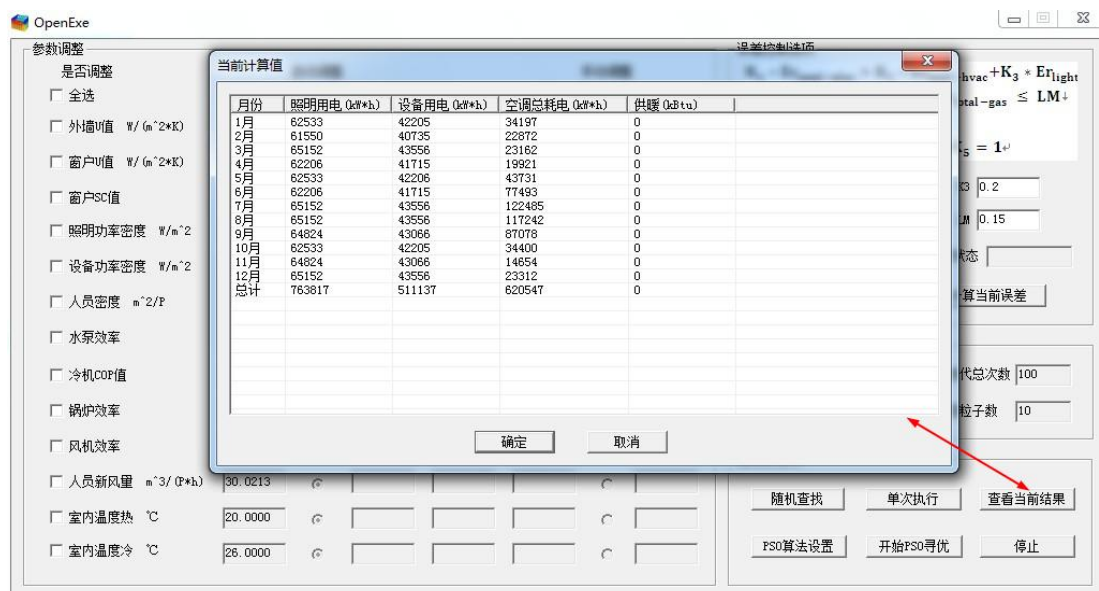


图 4.3 查看当前结果界面

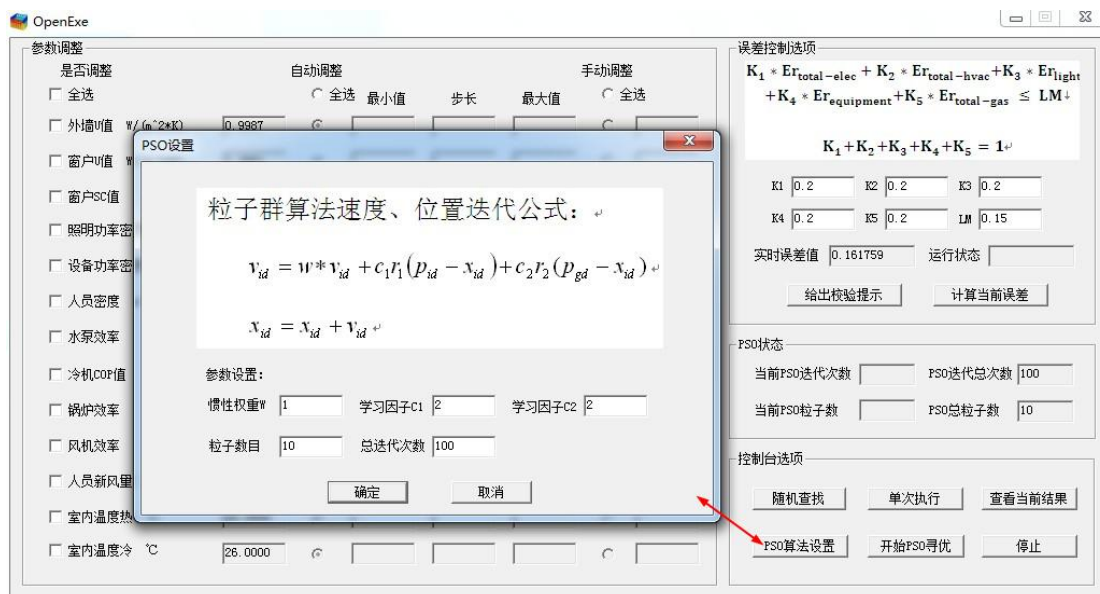


图 4.4 PSO 算法相关参数设置界面

(5) 主界面左边中部的 PSO 状态栏：在采用优化算法进行模型自动校验时，本栏用于显示算法设定的粒子数目和最大迭代次数，以及运行状态下当前的粒子数目和当前迭代次数。

此外，依据简单规则判断方法，“给出校验提示”按钮可给出当前模型数据下的校验提示，尤其是校验初期对照明能耗分项和设备能耗分项的校验提示，界面如图 4.5。

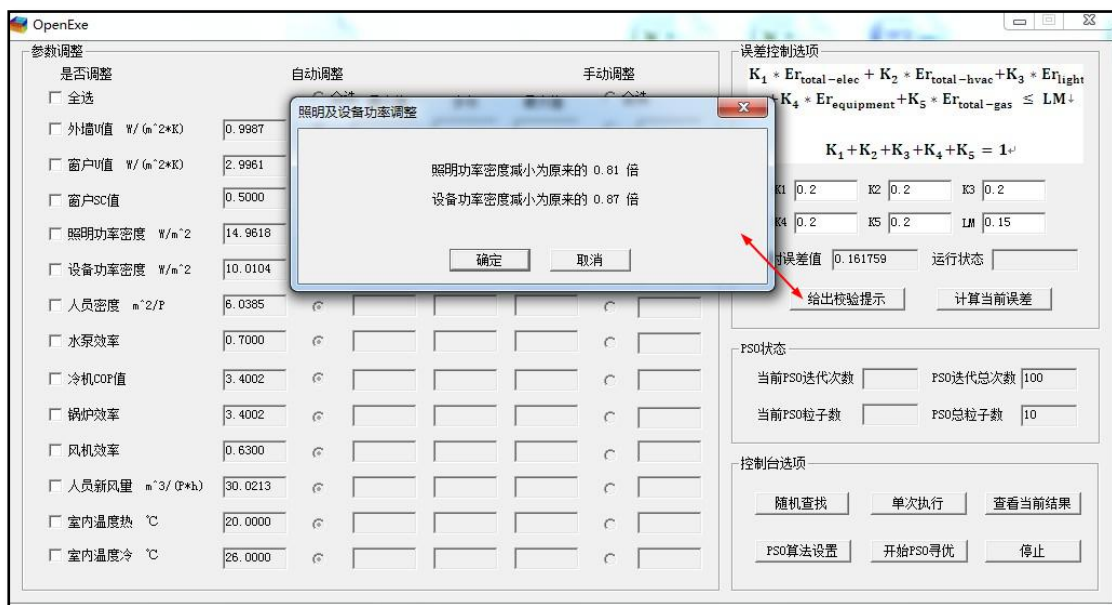


图 4.5 给出校验提示界面

在程序进行调用 DOE-2 核心进行模型能耗计算时，“运行状态”栏显示当前的状态是手动调整时的“单次执行”或是自动调整时的“PSO 算法”校验。采用算法进行自动校验时，“停止”按钮用于终止当前计算，考虑到模型输入文件和

能耗数据文件的完整性，计算不会立即停止，程序会将当前一次计算完成后提示已终止迭代。

人机交互部分包括校验开始前，分析人员需要手动将建筑的实际能耗数据输入到计算机指定路径中的文件，此文件也作为结果文件记录和保存着主程序界面上调用 DOE-2 计算核心计算的能耗结果，包括打开程序时初始模型的第一次计算结果以及当前最近一次运行计算的结果（可以是手动调整一个或几个参数时执行的单次运行计算结果，也可以是采用 PSO 算法寻优迭代时最近一次的计算结果，即迭代循环运行时，此处数据被实时覆盖）；此外，此文件还保存着最近一次的计算值与实际值之间的误差，以及采用 PSO 算法寻优校验时每一次迭代的误差值。

本程序设计时，采用简单的 Excel 文档形式存储上述数据，一方面是因为操作相对简单，另一方面可以利用 Excel 本身自带的图表功能形象地显示出实际值和计算值之间的误差以及寻优迭代时误差的收敛情况。

由于整个校验过程中程序调用 DOE-2 进行计算的次数可能会很大，产生的计算数据会很多，所以将每一次的计算数据保存在另一个文件中，以备查看。

3 程序内部的核心部分。包括调用 DOE-2 计算核心的主程序、简单规则判断程序、粒子群寻优算法（PSO）程序以及它们之间的相互承接。这是整个程序开发中几个重要的部分，也是难度最大的部分，具体的实现方法将在第三节中详细论述。

### 4.2.3 程序的运行流程

根据完成建筑能耗模型校验模拟工作的需要，模型自动校验程序的运行流程大致如下：

- 1 分析人员将初始建筑能耗模型的输入文本文件（inp 文件）以及计算所需要的对应气象参数天气文件放入指点路径的文件夹中，并将该建筑的实际能耗数据输入指定的 Excel 文件中；

- 2 打开模型自动校验程序，程序将读取初始模型的输入文本文件，将当前模型相关输入参数的设定值显示在主界面上，并调用 DOE-2 计算核心进行首次计算，保存计算结果后比较实际能耗数据，显示初始模型的误差。

- 3 分析人员点击“给出校验提示按钮”，得到相关提示后，勾选对应参数进行手动调整直接赋值，点击“单次执行”进行模型校验和计算，观察、记录和分析对应能耗分项误差值以及总误差值的变化。

- 4 最后，采用 PSO 算法进行自动寻优校验：具体的原理及流程如图 4.6 所示。首先，勾选所需参加自动寻优校验的对应输入参数，设置合理的参数变化上、

下限和变化步长；点击“PSO 算法设置”按钮，根据实际能耗模型的情况，设定或调整合理的算法参数值（惯性权重  $w$ 、粒子数目  $N$  等）和最大迭代次数；根据当前模型的误差标准，在主界面上设定和输入合理的误差标准值（一般不大于 0.15），作为迭代寻优的终止条件，点击“开始 PSO 寻优”按钮，程序即进入迭代寻优的循环计算过程，当误差达到标准或迭代达到设置的最大次数时，计算停止。

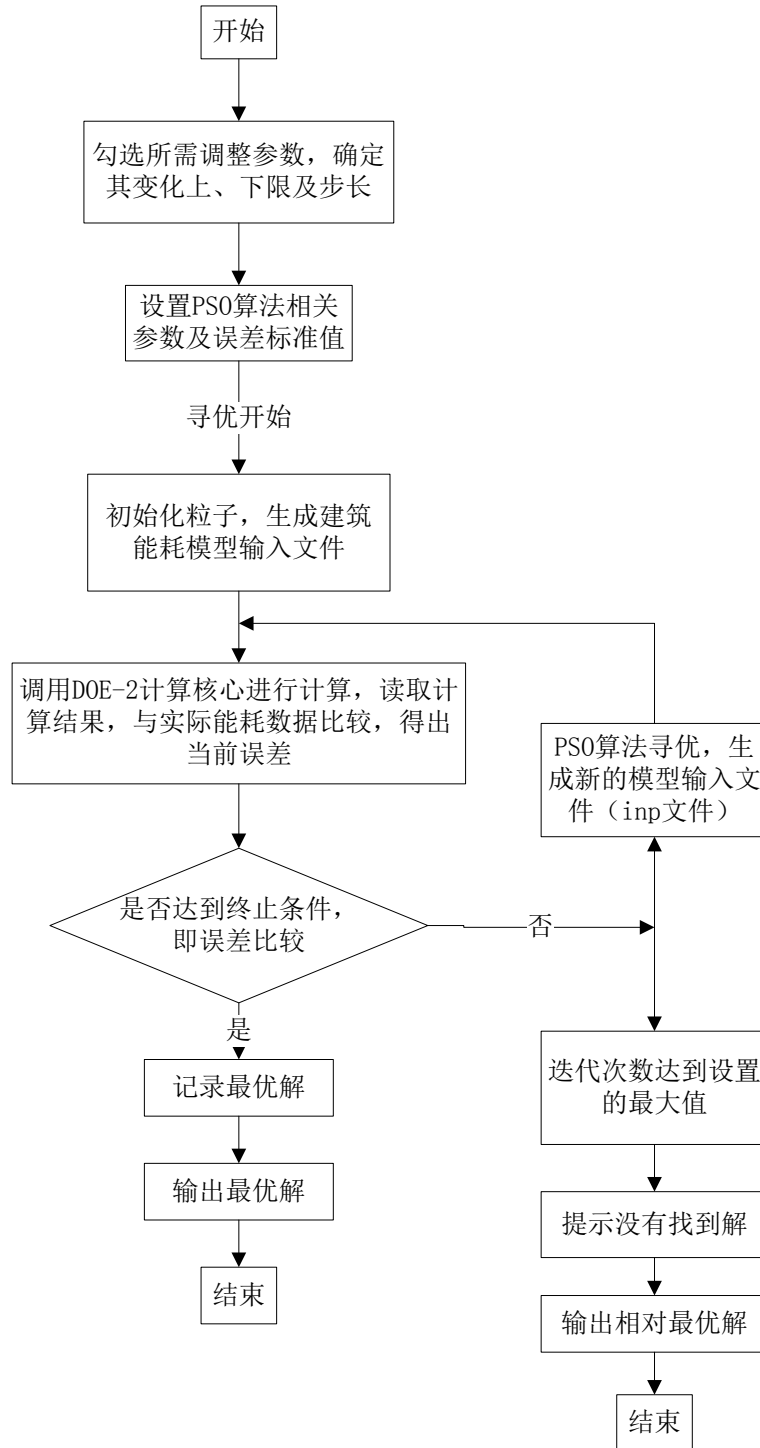


图 4.6 PSO 算法寻优校验原理及流程图

在整个校验过程中，对应生成的模型输入文件和能耗数据文件都会保存在指定路径的文件夹中，以备分析和查看。

### 4.3 程序开发的重点及处理方法

根据建筑能耗模型的校验步骤和程序完成自动寻优校验过程这一目标，在模型自动校验程序的开发过程中，有三个重点的部分需要特别注意，它们包括：

- (1) 程序如何随时调用 DOE-2 软件计算核心进行模拟计算；
- (2) 简单规则判断方法如何嵌入模型校验过程，在模型校验的初期发挥作用；
- (3) 粒子群算法 (PSO) 如何嵌入程序，与 DOE-2 计算核心合理耦合，进行能耗模型的自动寻优校验。

这三个部分是开发基于本文所研究的校验方法的模型自动校验程序的重点。本节中，将针对这几个重点部分，结合语言编程的实际操作情况，做出分析和论述。

#### 4.3.1 DOE-2 软件计算核心的调用

建筑能耗模型校验实际就是建立在计算数据和实际数据的比较分析的基础上，不断地调整模型输入参数使二者间的误差逐渐减小到一定范围内。每一次调整输入参数的数值后，都需要运行建筑能耗模拟软件进行能耗计算，所以模型的校验是一个不断改变参数、反复进行模拟计算、将计算能耗结果与实际能耗数据反复比较的过程。由于本文的研究目标是建立一种方法，力求达到建筑能耗模型的自动校验，所以对于能耗模拟软件来说，其本身应该具有很好的二次开发性，即能够被外部程序直接调用并开始运行，或能够在第三方平台上进行软件之间、或软件和程序之间的直接耦合计算和数据传递。

DOE-2 软件就具有能够被计算机语言程序直接调用运行的特点，在计算机正确安装好软件程序后，可以点击程序图标或相关程序文件开始运行程序，也可以在计算机程序命令中使用命令行输入方式打开程序，还有一些较为高级的调用方法。

在本章提及的能耗模型自动校验程序的开发中，采用的是命令行调用程序的方法，具体的程序代码可以参见附录中的第一部分。

### 4.3.2 简单规则判断方法在程序中的实现

在采用人工手动方法校验能耗模型时,总是首先寻找能从初始模型计算能耗数据和建筑实际能耗数据的比较上直接反映出来的差距,然后人为的去调整模型中对应的输入参数。这样一些简单的规律,可以做成简单的规则判断,添加到自动校验的程序中,在模型校验工作的初期发挥作用,提高校验效率。

针对建筑照明分项能耗和设备分项能耗的特点,即在运行时间表确定的情况下,这两个分项能耗的大小分别只与模型中设置的单位面积照明密度值和单位面积设备密度值直接相关。因此,在本文的程序开发中,通过程序后台对于能耗模型中这两个分项能耗的计算值与实际值的比较,通过简单的规则判断方法,直接给出校验提示,提示分析人员对模型中单位面积照明、设备功率密度的设定值进行调整。详细的程序代码参见附录中的第二部分。

### 4.3.3 粒子寻优群算法 (PSO) 的嵌入

本文提出的模型自动校验方法是基于粒子群寻优算法 (PSO) 的迭代寻优,所以,如何将 PSO 算法嵌入整个程序,并实现与程序本身以及 DOE-2 软件和模型相关文件之间的数据交换,是程序开发工作的核心。在本文第三章的内容中,已详细的叙述了粒子群寻优算法 (PSO)、DOE-2 和程序本身之间的耦合方式和数据交换的流程,此处不再赘述,详细的程序代码参见附录中的第三部分内容。

## 4.4 本章小结

自动校验程序的开发是进行能耗模型校验实例验证的工具,也是验证自动校验方法的基础。本章的研究内容主要是基于简单规则判断和粒子群寻优算法 (PSO) 的建筑能耗模型自动校验程序的开发。首先介绍了编程语言 Visual C++、开发环境 Microsoft Visual Studio 的特点,在对程序所要实现的功能进行详细地分析后,提出了程序的设计思路和设计构架,然后简单地介绍了程序的界面设计和运行流程等,最后对程序开发中需要注意的几个重点及其处理方法做出了分析和论述。



## 第5章 校验方法的案例验证

为了检验模型自动校验程序功能的可靠性和自动校验方法在实际模型校验工作应用中的有效性，本章将利用以开发的自动校验程序，分别对两个建筑能耗模型（一个典型建筑模型、一个实际建筑模型）进行校验，并对校验过程和校验结果进行记录和分析。

### 5.1 典型建筑能耗模型案例验证

本节选择了第二章中所建的上海地区典型办公建筑能耗模型作为实例，并假设了建筑的实际能耗数据，用开发的程序对此典型建筑能耗模型进行校验。

#### 5.1.1 典型建筑模型概况及实际能耗数据的取得

##### (1) 典型建筑能耗模型概况

该典型模型建筑概况、能耗模型的相关输入参数设定值及建模情况参见本文第二章内容。

##### (2) 实际能耗数据的取得

由于此处的典型办公建筑是虚拟的建筑，不是实际存在的工程项目，无法取得实际的各个分项能耗数据。笔者查阅了相关资料，根据上海市多栋大型办公建筑的能耗统计结果，得出上海地区办公建筑单位面积的分项能耗数据统计值，结合本典型建筑模型能耗结构情况，假设出此典型建筑逐月分项能耗数据值，详见表 5.1，用于此典型能耗模型的对比校验。

表 5.1 典型办公建筑实际能耗数据

	空调总耗电 (kWh)	设备耗电 (kWh)	照明耗电 (kWh)	总耗电量 (kWh)	总耗气量 (kBTU)
一月	47250	80950	121425	249625	688766
二月	48313	79450	119175	246938	279240
三月	50938	88642	132962	272542	226872
四月	70625	80425	120638	271688	43147
五月	132875	81025	124038	337938	39000
六月	165688	83725	125588	375001	36000
七月	230563	86275	126912	443750	36000
八月	237125	86475	127213	450813	35000
九月	183000	86625	129938	399563	35000

十月	108500	81308	124463	314271	35000
十一月	59063	86550	129825	275438	36000
十二月	53375	89175	133763	276313	267802
总计	1387315	1010626	1515939	3913880	1757827

### 5.1.2 典型建筑模型校验过程及分析

模型建成后，将生成的模型输入文本文件（inp 文件）和上海地区典型气象年天气文件复制并保存到校验程序指定路径的文件夹中，并将表 5.1 中各个分项能耗的实际数据输入到指定的 Excel 文件中，运行程序开始进行模型校验。

第一步，打开校验程序，模型首次计算，计算能耗结果如表 5.2 所示。

表 5.2 初始模型计算能耗数据

	空调总耗电 (kWh)	设备耗电 (kWh)	照明耗电 (kWh)	总耗电量 (kWh)	总耗气量 (kBTU)
一月	58991	93241	138355	290587	784000
二月	60050	92171	137675	289896	356000
三月	66608	97350	144921	308879	271000
四月	85193	92884	138128	316205	48000
五月	163925	93241	138355	395521	43000
六月	217515	92884	138128	448527	40000
七月	304199	97350	144921	546470	39000
八月	295891	97350	144921	538162	37000
九月	242810	96993	144694	484497	37000
十月	139787	93276	138377	371440	37000
十一月	76685	96959	144672	318316	41000
十二月	62080	97350	144921	304351	240000
总计	1773734	1141049	1698068	4612851	1973000

初次计算后，各分项能耗实际数据和计算数据的比较如图 5.1—图 5.5 所示。

将程序主界面上的误差控制选项栏中各个分项能耗误差对应的权重系数值逐个设为 1（一个分项权重为 1，其他全设为 0）并点击“计算当前误差”按钮，可逐个显示各对应分项的误差值，详见图 5.1—图 5.5。

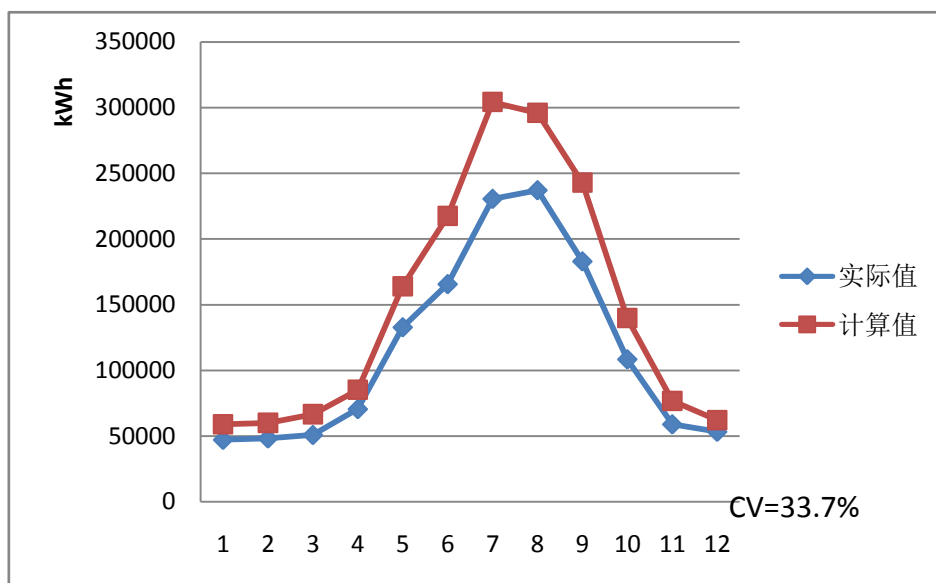


图 5.1 空调逐月耗电量实际值与初次计算值对比图

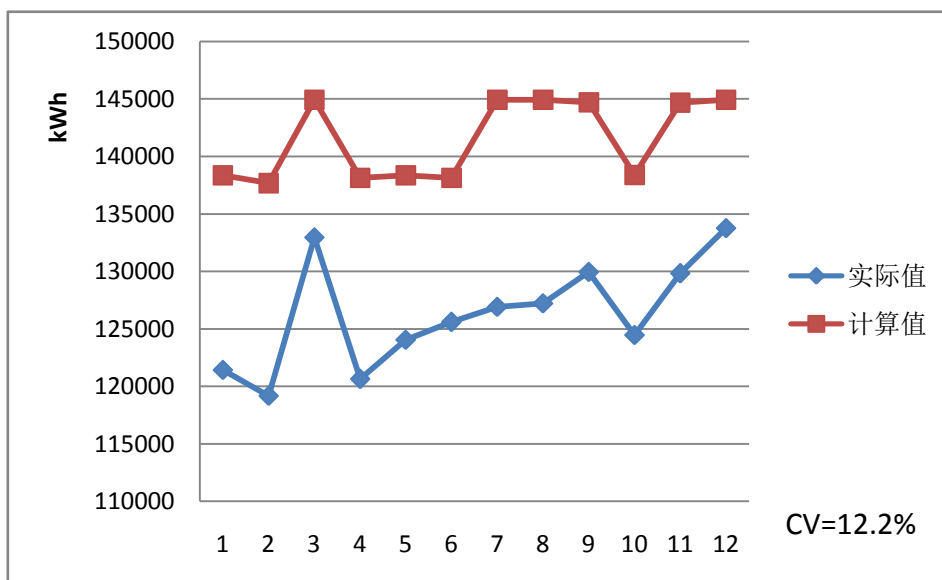


图 5.2 照明逐月耗电量实际值与初次计算值对比图

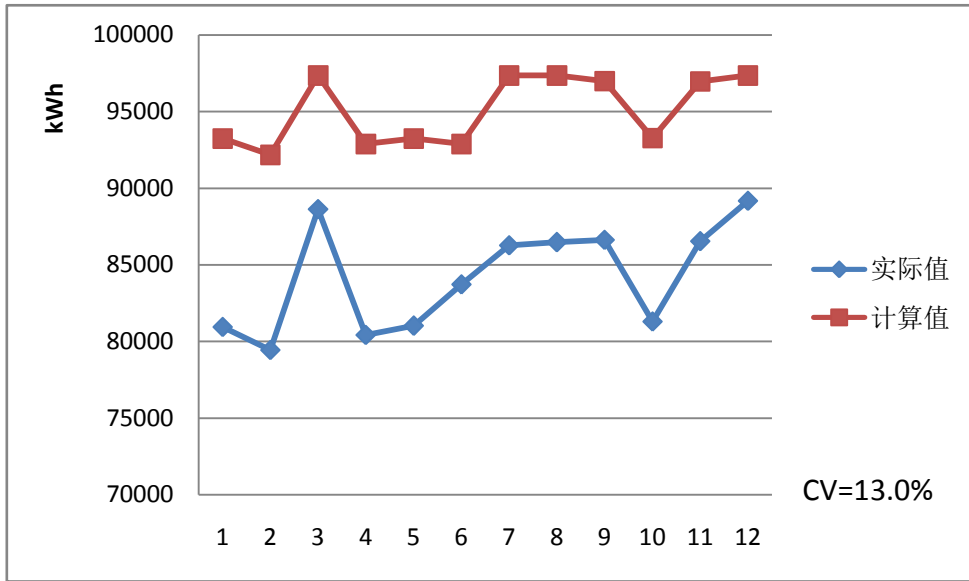


图 5.3 设备逐月耗电量实际值与初次计算值对比图

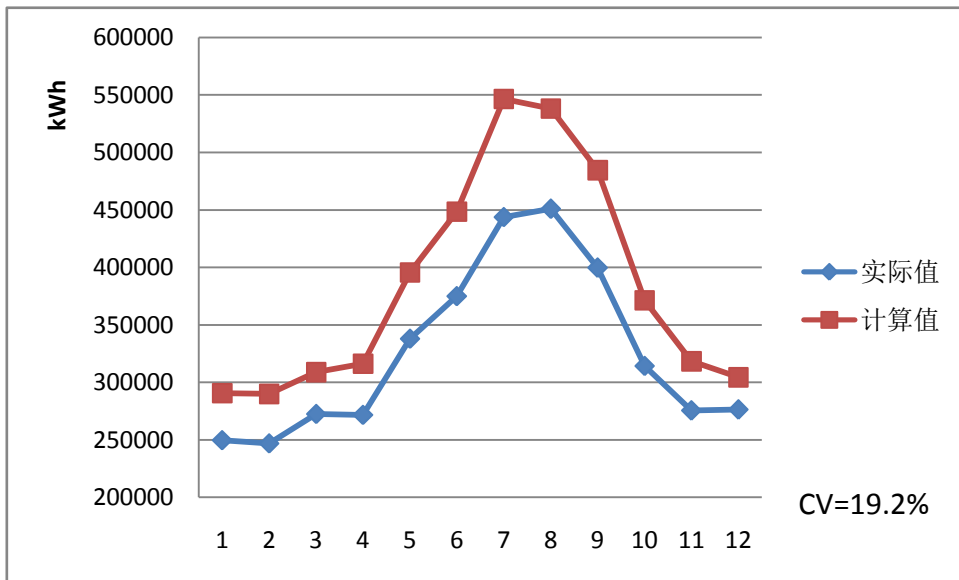


图 5.4 逐月总耗电量实际值与初次计算值对比图

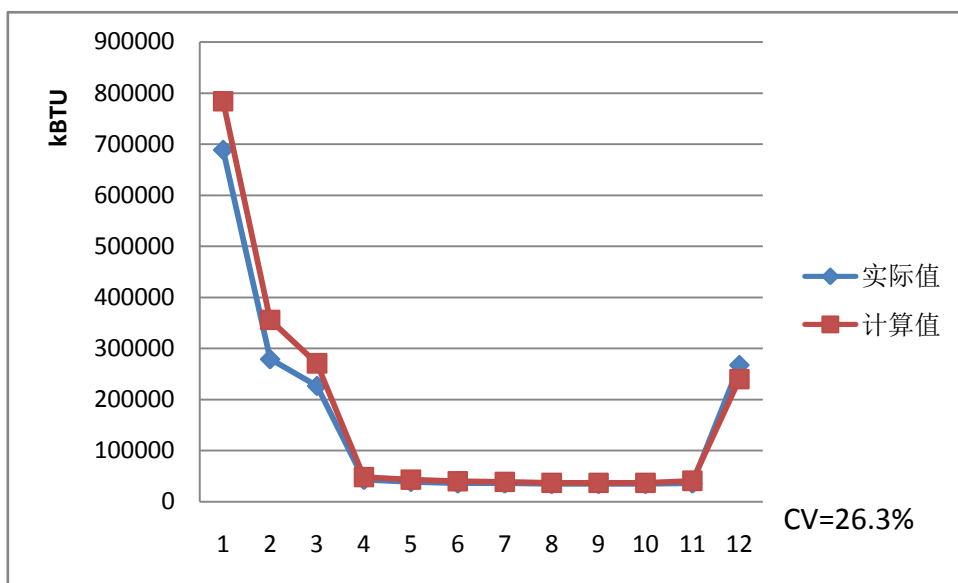


图 5.5 逐月总耗气量实际值与初次计算值对比图

第二步，在程序的主界面上点击“给出校验提示”按钮，显示出的提示框如图 5.6 所示：

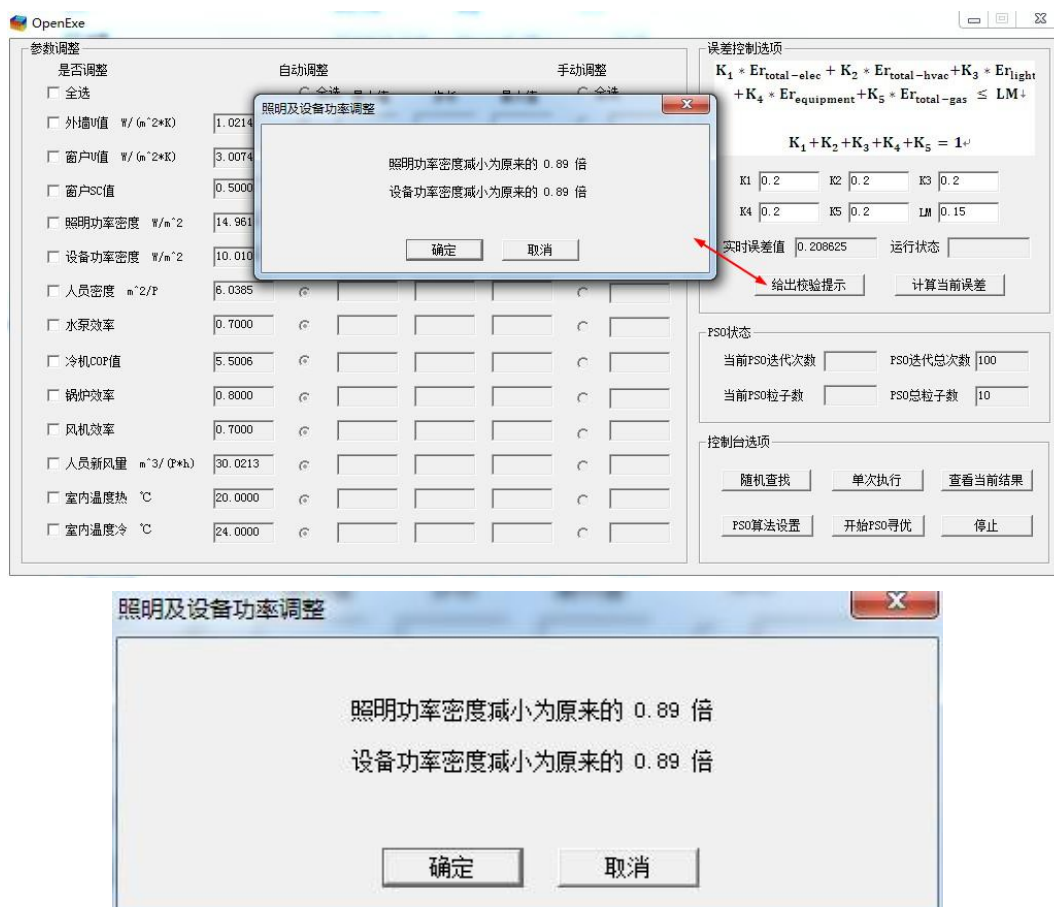


图 5.6 校验提示

根据提示，手动将照明功率密度调整为  $15\text{W}/\text{m}^2 \times 0.89 = 13.4\text{W}/\text{m}^2$ ；设备功

率密度调整为  $10\text{W}/\text{m}^2 \times 0.89 = 8.9\text{W}/\text{m}^2$ ，单次执行后，照明耗电量校验后的计算值与实际值对比如图 5.7，误差值下降到 2.0%；设备耗电量校验后的计算值与实际值对比如图 5.8，误差值下降到 2.1%。

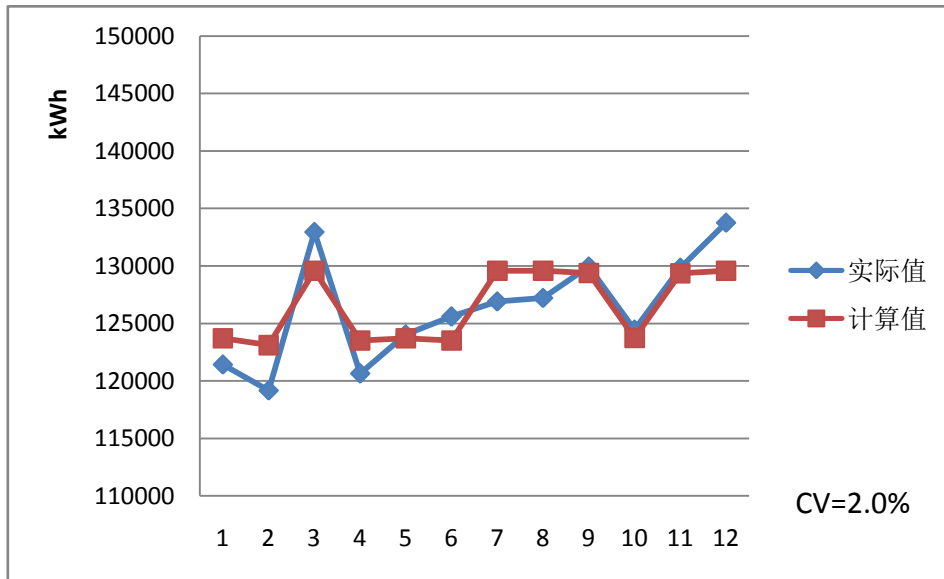


图 5.7 校验后照明逐月耗电量计算值与实际值对比图

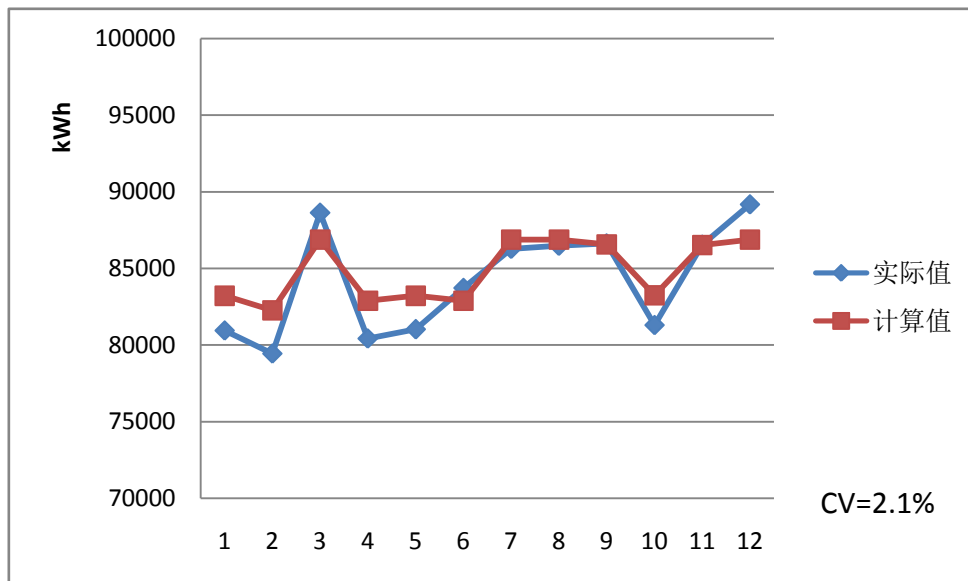


图 5.8 校验后设备逐月耗电量计算值与实际值对比图

此时，照明和设备分项能耗的校验误差已满足标准要求（15%以内），空调分项能耗的误差也有所降低，从初始模型的 33.7% 下降到当前的 27.7%，但总耗气量的误差从初始模型的 26.3% 增大到当前的 47.2%，虽然此时的平均误差有所减小（从 20.9% 下降到 17.8%），但仍超出了模型校验的误差标准范围。所以需要进一步采用寻优算法对空调分项能耗和总耗气量进行自动寻优校验。

第三步，在程序的主界面上设置勾选除照明功率密度和设备功率密度外的所

有参数，参数的变化范围和步长采用程序默认值，PSO 寻优算法相关参数也采用程序默认值。

为了综合考虑空调能耗分项和总耗气量这两个分项的误差，在程序主界面上误差控制选项栏中将对应空调分项能耗、总耗气量的权重系数分别设为 0.5 ( $K_2 = K_5 = 0.5$ )，其余权重设为 0，设寻优迭代终止的误差标准为 15%，运行程序开始自动寻优校验。

程序迭代计算 5 次后，上述设定的误差收敛到 14.6%，收敛情况见图 5.9，计算用时约 1.5 小时。此时，空调能耗分项误差为 17.2%，总耗气量误差为 12.0%，五个项目（空调耗电、照明耗电、设备耗电、总耗电量、总耗气量）的平均误差也从原来的 17.8%减小到 7.9%，满足建筑能耗模型校验模拟的误差标准。

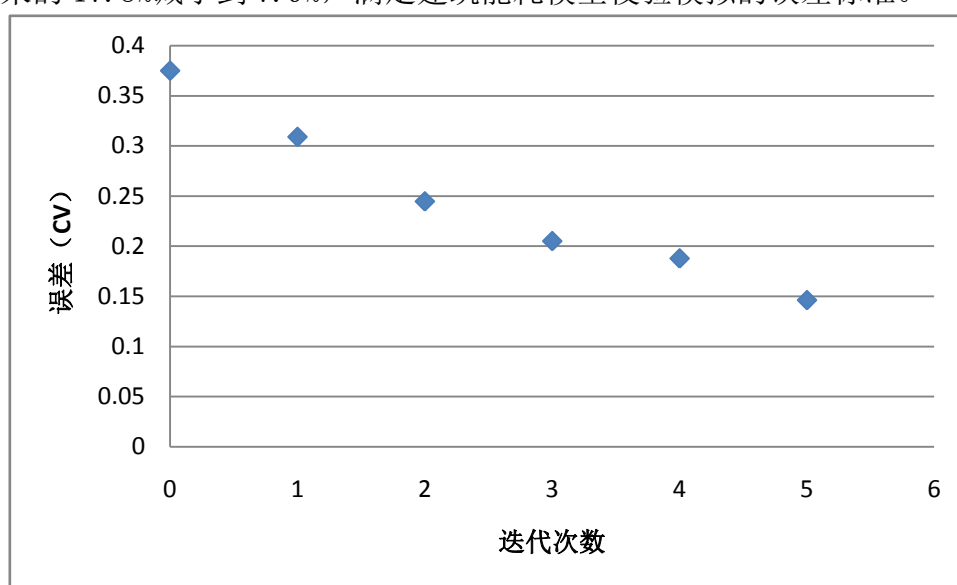


图 5.9 寻优校验误差迭代收敛情况

校验后的空调逐月耗电量计算值与实际值对比如图 5.10，校验后的逐月总耗电量（包括空调、照明和设备）计算值与实际值对比如图 5.11，校验后的逐月总耗气量计算值与实际值对比如图 5.12。

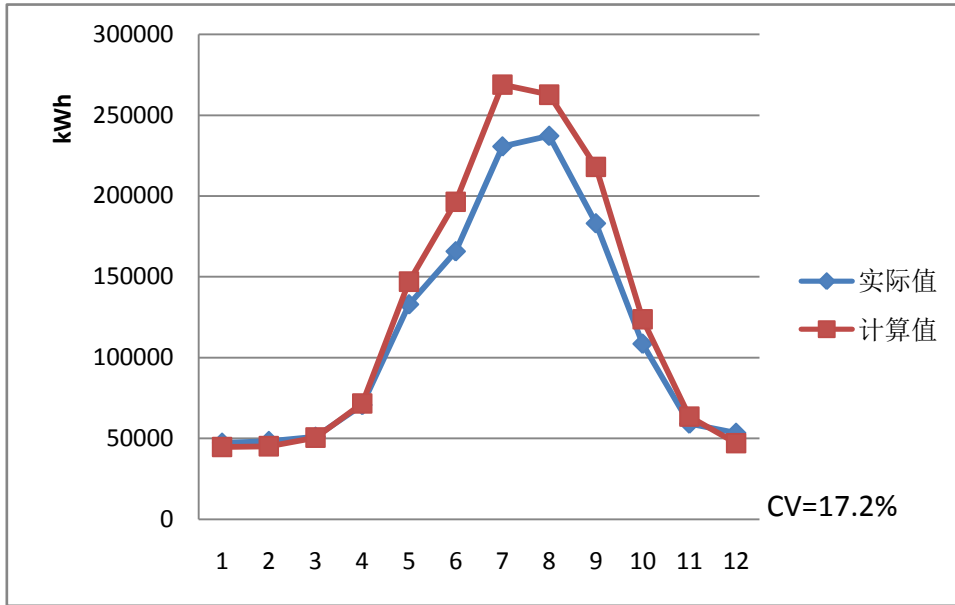


图 5.10 校验后空调逐月耗电量计算值与实际值对比图

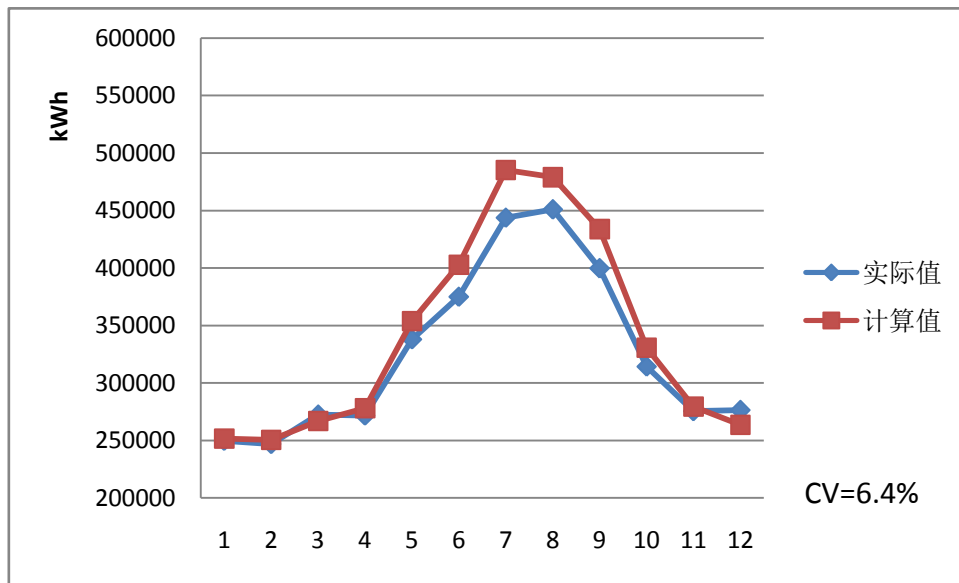


图 5.11 校验后逐月总耗电量计算值与实际值对比图



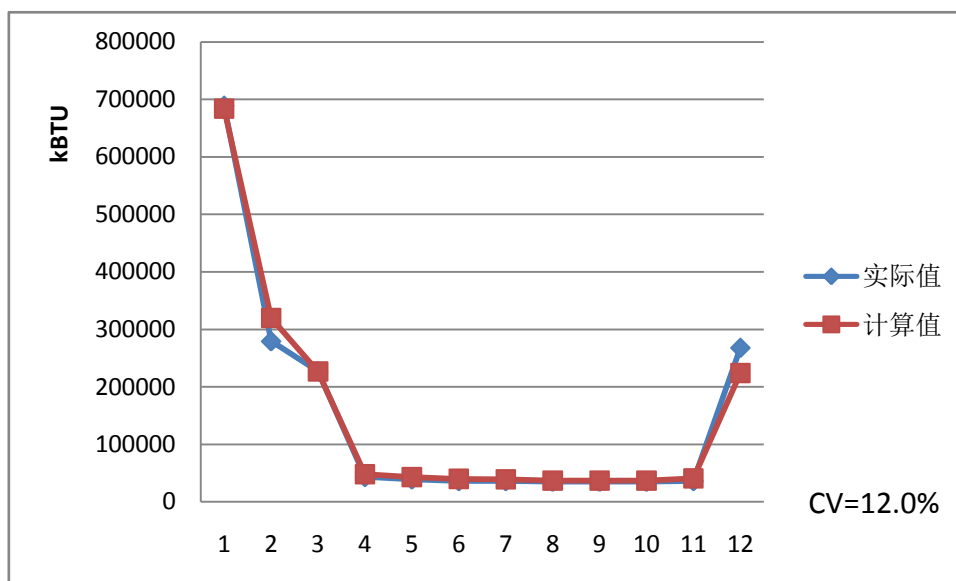


图 5.12 校验后逐月总耗气量计算值与实际值对比图

建筑能耗模型校验前后的各个能耗分项的误差值变化见表 5.3。

表 5.3 校验前后各能耗分项误差值变化

误差值 (CV)	空调耗电	照明耗电	设备耗电	总耗电量	总耗气量	平均值
初始模型	33.7%	12.1%	13.0%	19.2%	26.2%	20.9%
照明、设备调整后	27.7%	2.0%	2.1%	10.2%	47.2%	17.8%
寻优校验后	17.2%	2.0%	2.1%	6.4%	12.0%	7.9%

表 5.4 列出了校验前后模型的输入参数值变化情况。

表 5.4 校验前后模型的输入参数值变化

参数	单位	校验前	校验后
外墙 U 值	W/(m <sup>2</sup> * K)	1.0	0.86
窗户 U 值	W/(m <sup>2</sup> * K)	3.0	2.0
窗户 SC 值	——	0.5	0.44
照明功率密度	W/m <sup>2</sup>	15.0	13.4
设备功率密度	W/m <sup>2</sup>	10.0	8.9
人员密度	m <sup>2</sup> /P	6.0	9.0
水泵效率	——	0.70	0.70

冷机 COP 值	---	5.50	5.62
锅炉效率	---	0.80	0.82
风机效率	---	0.70	0.64
人员新风量	$\text{m}^3/(\text{P}*\text{h})$	30.0	26.5
供热室内温度	$^{\circ}\text{C}$	20.0	22.8
供冷室内温度	$^{\circ}\text{C}$	24.0	25.9

### 5.1.3 典型建筑模型校验结果的不确定性分析

通过表 5.3 和表 5.4 可以看出, 能耗模型的整个校验过程十分清晰, 校验后的参数值变化合理, 校验后的误差结果也基本满足相关标准要求, 其中空调耗电分项能耗的均方差变异系数为 17.2%, 较标准的限值 15%略高, 分析造成此结果的原因是: 一方面, 用于校验的实际能耗数据是基于统计数据假定的, 不是实际数据, 会造成一定的误差; 另一方面, 是考虑了迭代时参数的变化值不能太靠近极端的缘故。如当供冷室内温度调整到  $28^{\circ}\text{C}$  时, 空调耗电分项的误差会有所下降, 但实际情况下, 夏季工作时段室内  $28^{\circ}\text{C}$  的情况还是相对少见。

在上述典型模型校验的最后一步采用算法自动寻优校验的过程中, 笔者也试图将迭代终止的误差条件设为空调耗电量这一个分项, 虽然最后空调能耗分项的误差能满足标准要求 (小于 15%), 但由于建筑供热、供冷能耗的相互影响, 总耗气量分项误差仍然较大, 且部分输入参数校验后的值靠近参数变化范围的两个极端点, 校验后模型的合理性下降, 所以在自动寻优校验时, 综合考虑建筑供冷和供热这两个因素, 将误差标准设置为空调能耗分项权重和总耗气量能耗分项权重各位 50%, 力求校验后得到更为合理的能耗模型。

## 5.2 实际建筑能耗模型案例验证

为了进一步验证模型自动校验程序的有效性, 本文选择了上海地区的一栋办公大楼作为实例, 采用能耗分析模拟软件 eQUEST3-64 建立能耗模型, 并结合实际能耗数据对此能耗模型进行校验。

### 5.2.1 实际建筑模型概况

所选办公大楼位于上海市虹桥经济开发区商业中心内, 共 19 层, 层高均为

4.8m, 总建筑高度 91.2m。标准层面积为 1093.7 平面图 $m^2$ , 总建筑面积 20780 $m^2$ 。标准层平面图如图 5.13 所示。

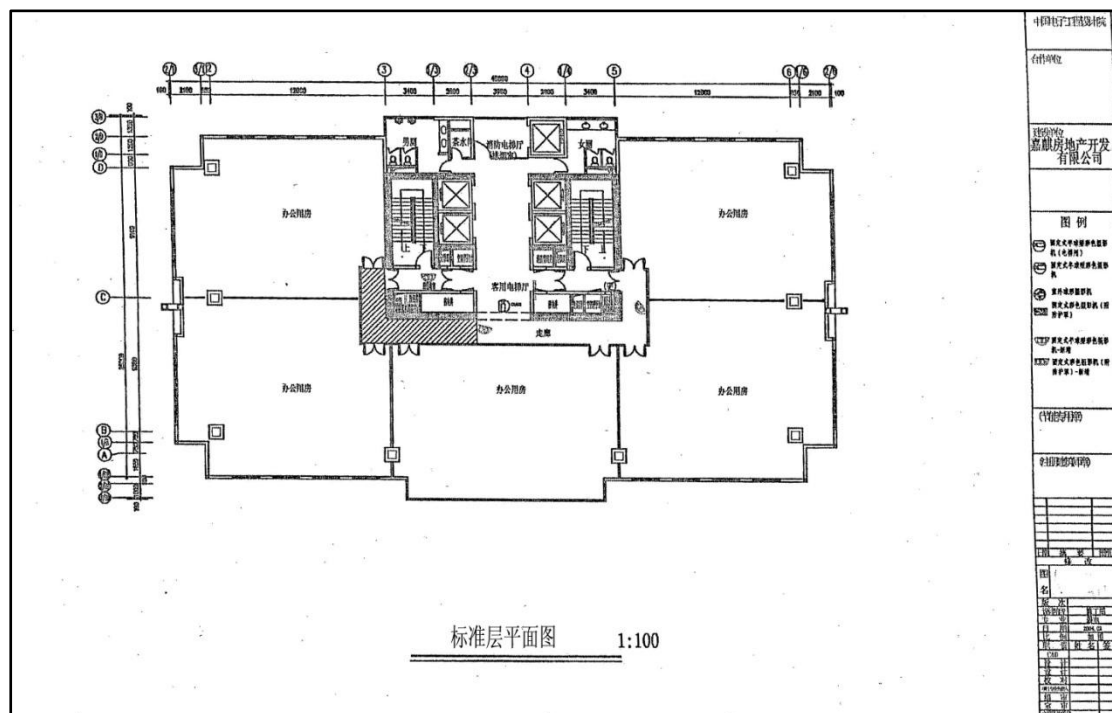


图 5.13 标准层平面图

根据建筑设计资料可知大楼内空调冷热源由风冷热泵提供, 夏季提供 10 度冷水进行制冷、冬季提供 38 度热水取暖。空调系统为变风量空调系统 (VAV), 末端装置为 VAVBOX。由于水系统采用的是两管制, 所以无法同时供冷供热, 即运行工况只是单一的夏季供冷或冬季供热。

采用建筑能耗模拟软件 eQUEST3-64 进行初始模型的建立, 根据建筑设计资料 and 实际运行情况 (部分参数由于缺乏实际数据, 依据相关建筑设计规范进行设定), 部分重要参数在初始模型中的设定值见表 5.5。建模时, 标准层空调系统热分区如图 5.14 所示, 图 5.15 为建筑模型的 3D 示意图。

表 5.5 模型输入参数表

围护结构传热系数	外墙 $W/(m^2 * K)$	外窗 $W/(m^2 * K)$	窗户 SC 值	窗墙比			
				东	南	西	北
	1.00	3.00	0.50	0.47	0.29	0.37	0.29
内部负荷	照明密度 $W/m^2$	设备密度 $W/m^2$	人员密度 $m^2/人$				
	15.0	10.0	6.0				

空调系统	室内设计温度℃	新风量 M <sup>3</sup> /(人 * h)	冷机 COP	风机效率	水泵效率
	供冷 26.0 供热 20.0	30.0	3.40	0.63	0.70

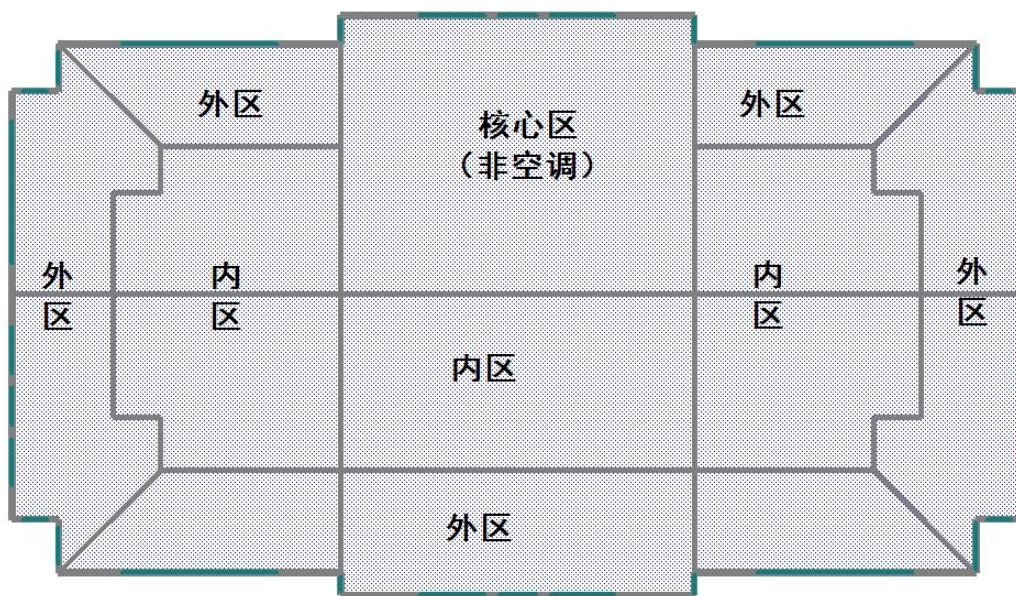


图 5.14 标准层空调系统建模热分区示意图

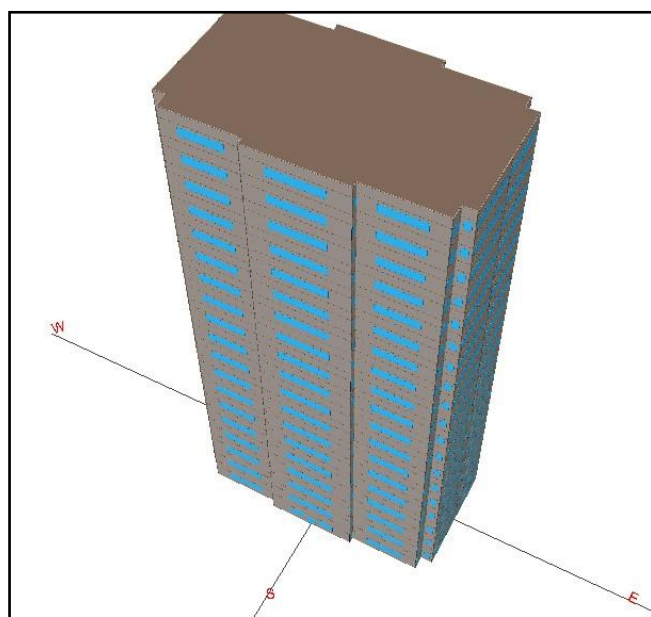


图 5.15 建筑模型 3D 示意图

## 5.2.2 实际建筑模型校验过程及分析

模型建成后，将生成的模型输入文本文件（inp 文件）和 2013 年上海市实时气象天气文件（由于用于模型计算的实时气象数据很难获得，只能获取干球温度和相对湿度，因此，只将原有的典型气象年天气文件中的这两项替换掉，因此会造成一定的能耗计算误差，在本文中无法体现出来）复制并保存到校验程序指定路径的文件夹中，并将本大楼 2013 年的实际用电数据（参见表 5.6）输入到指定的 Excel 文件中，运行程序开始进行模型校验。

第一步，打开校验程序，模型首次计算，计算能耗结果如表 5.7 所示。

表 5.6 实际能耗数据

耗电量(kWh)	空调	设备	照明	总耗电量
一月	45160	39179	58851	143190
二月	35215	36874	51624	123714
三月	30242	38828	54360	123430
四月	27721	35486	49882	113089
五月	56285	32962	54677	143924
六月	90649	35936	47808	174392
七月	165639	42504	54215	262358
八月	157477	40990	52429	250896
九月	109899	38022	48875	196796
十月	45949	34235	47519	127702
十一月	19818	33088	46906	99812
十二月	30370	35729	51167	117266
总计	814423	443834	618312	1876569

表 5.7 初始模型计算能耗数据

耗电量 (kWh)	空调	设 备	照明	总耗 电量
一月	34197	42205	62533	138935
二月	22872	40735	61550	125157

三月	23162	43556	65152	131870
四月	19921	41715	62206	123842
五月	43731	42206	62533	148470
六月	77493	41715	62206	181414
七月	122485	43556	65152	231193
八月	117242	43556	65152	225950
九月	87078	43066	64824	194968
十月	34400	42205	62533	139138
十一月	14654	43066	64824	122544
十二月	23312	43556	65152	132020
总计	620547	511137	763817	1895501

初次计算后，各分项能耗实际数据和计算数据的比较如图 5.16—图 5.19 所示。

将程序主界面上的误差控制选项栏中各个分项能耗误差对应的权重系数值逐个设为 1（一个分项权重为 1，其他全设为 0）并点击“计算当前误差”按钮，可逐个显示各对应分项的误差值，详见图 5.16—图 5.19。

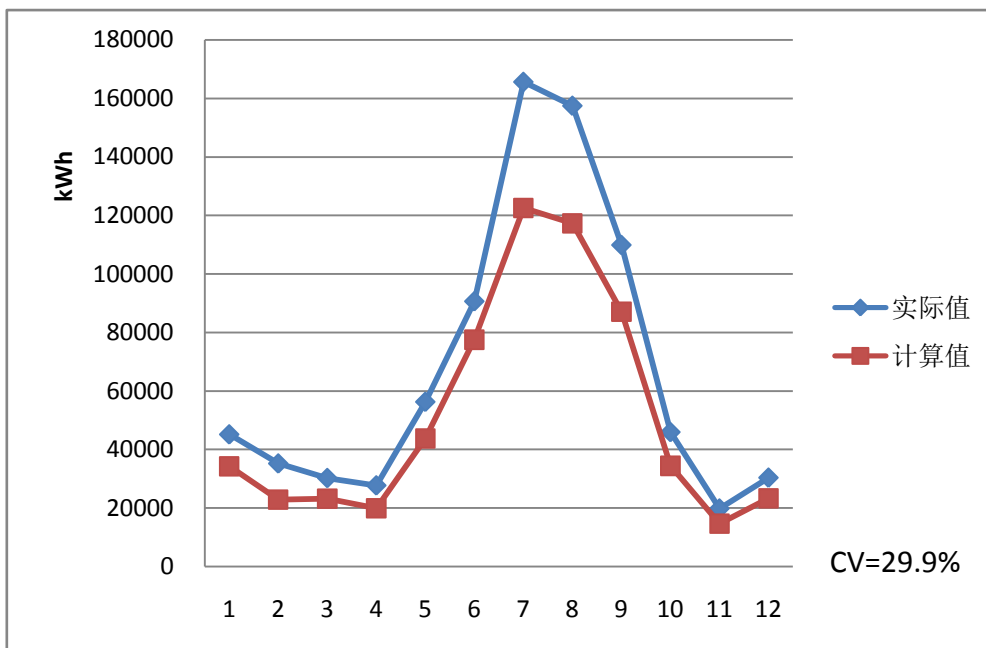


图 5.16 空调逐月能耗实际值与初次计算值对比图

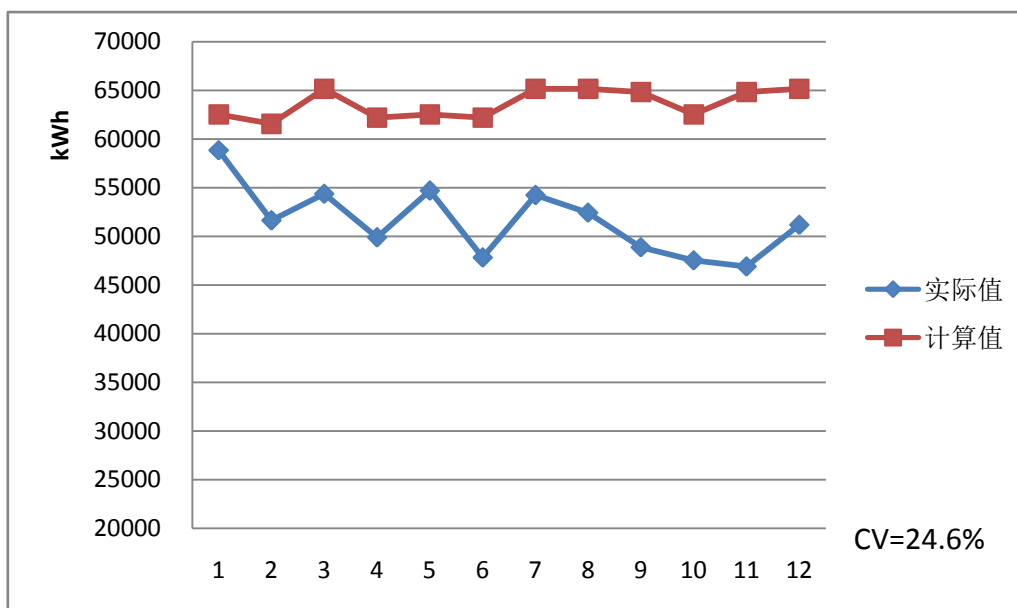


图 5.17 照明逐月能耗实际值与初次计算值对比图

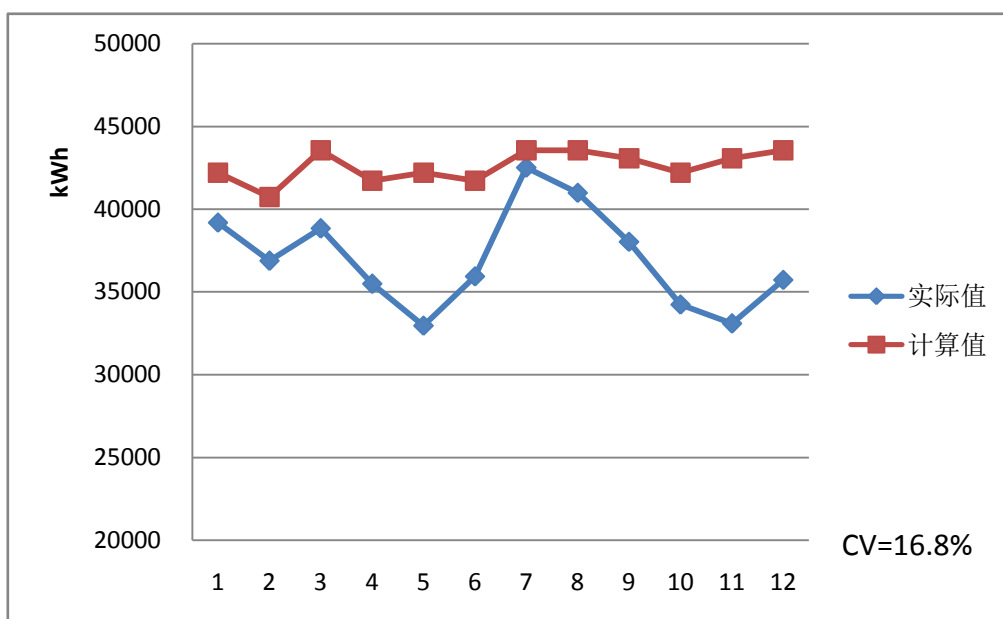


图 5.18 设备逐月能耗实际值与初次计算值对比图

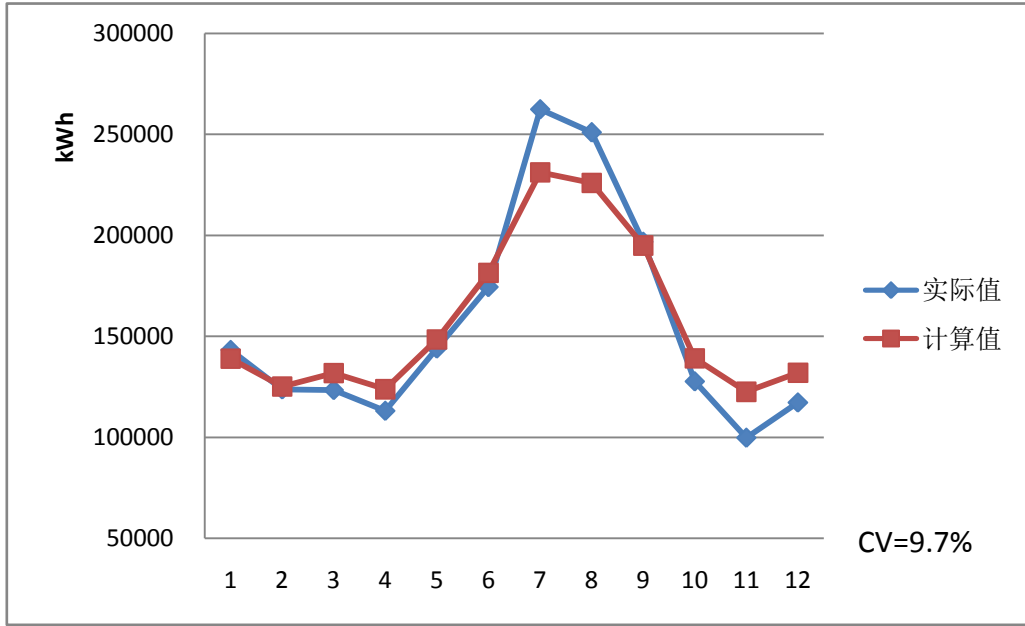


图 5.19 逐月总能耗实际值与初次计算值对比图

第二步，在程序的主界面上点击“给出校验提示”按钮，显示出的提示框如图 5.20 所示：

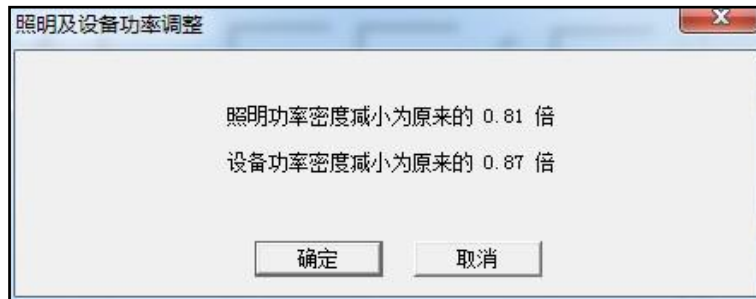
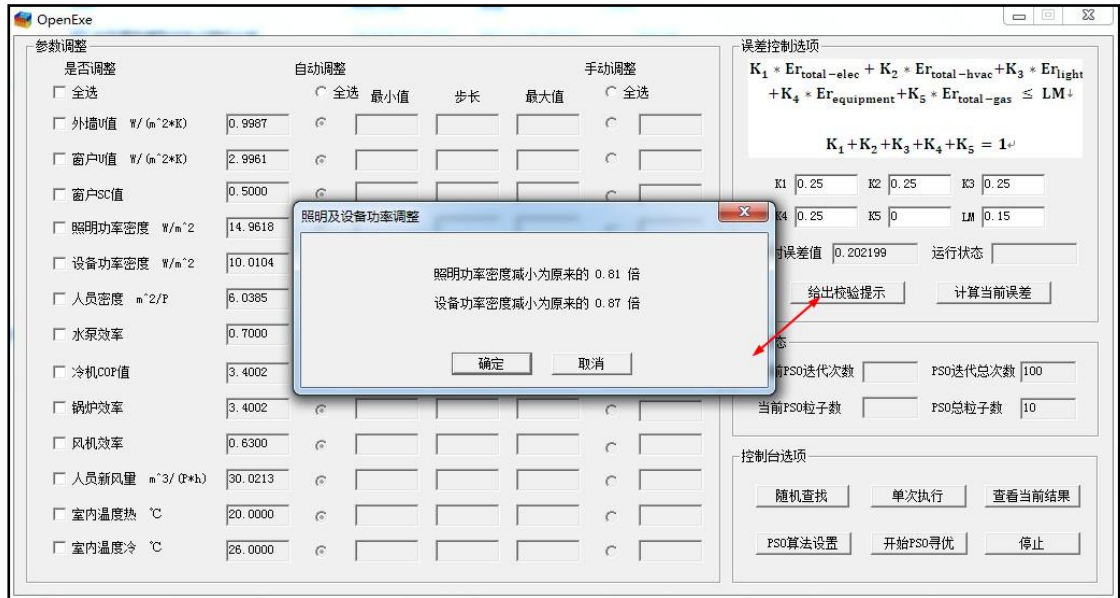




图 5.20 校验提示

根据提示,手动将照明功率密度调整为  $15\text{W}/\text{m}^2 \times 0.81 = 12.2\text{W}/\text{m}^2$ ; 设备功率密度调整为  $10\text{W}/\text{m}^2 \times 0.87 = 8.7\text{W}/\text{m}^2$ , 单次执行后, 照明能耗校验后的计算值与实际值对比如图 5.21, 误差值下降到 7.3%; 设备能耗校验后的计算值与实际值对比如图 5.22, 误差值下降到 7.2%。

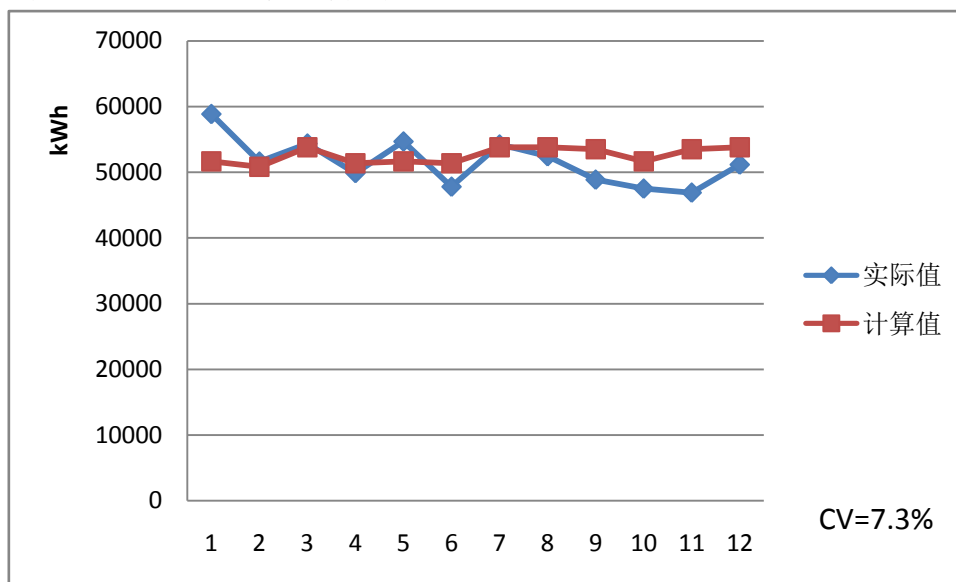


图 5.21 校验后照明逐月能耗计算值与实际值对比图

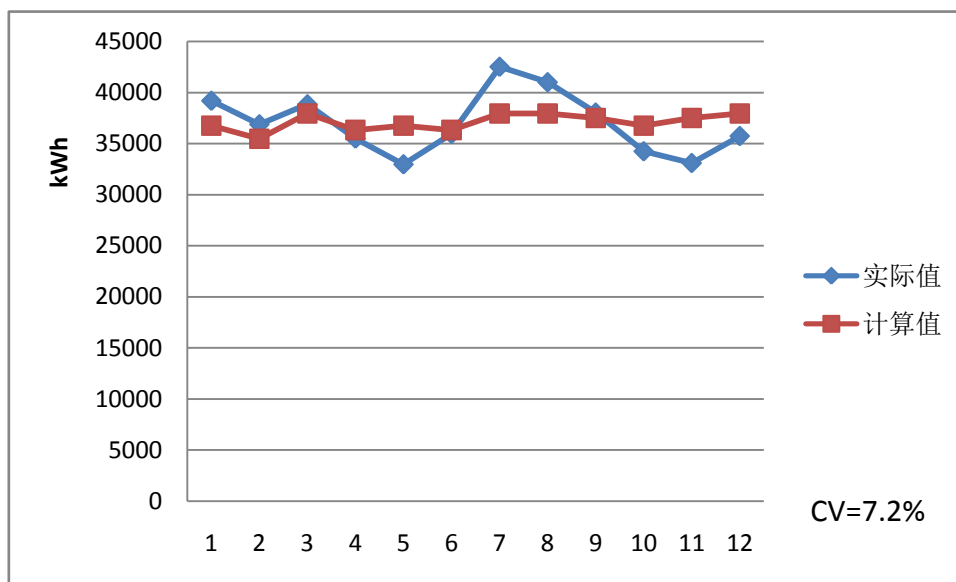


图 5.22 校验后设备逐月能耗计算值与实际值对比图

此时, 照明和设备分项能耗的校验误差已满足标准要求 (15%以内), 但空调分项能耗的误差有所提高, 从初始模型的 29.9% 增大到当前的 34.8%, 这也导致总能耗误差从初始模型的 9.7% 增大到当前的 15.6%, 虽然此时的平均误差有所减小 (从 20.2% 下降到 16.2%), 但仍超出了模型校验的误差标准范围。所以需要进

一步采用寻优算法对空调能耗分项进行自动寻优校验。

第三步，在程序的主界面上设置勾选除照明功率密度和设备功率密度外的所有参数，参数的变化范围和步长采用程序默认值，PSO 寻优算法相关参数也采用程序默认值。在误差控制选项栏中将对应空调分项能耗的权重系数设为 1 ( $K_2 = 1$ )，其余权重设为 0，设寻优迭代终止的误差标准为 15%，运行程序开始自动寻优校验。

程序迭代计算 4 次后，空调能耗分项误差收敛到 11.6%，收敛情况见图 5.23，计算用时约 1 小时。此时，总能耗误差也下降到 6.1%，四个项目（空调能耗、照明能耗、设备能耗、总能耗）的平均误差减小为 8.0%，均满足建筑能耗模型校验模拟的误差标准。

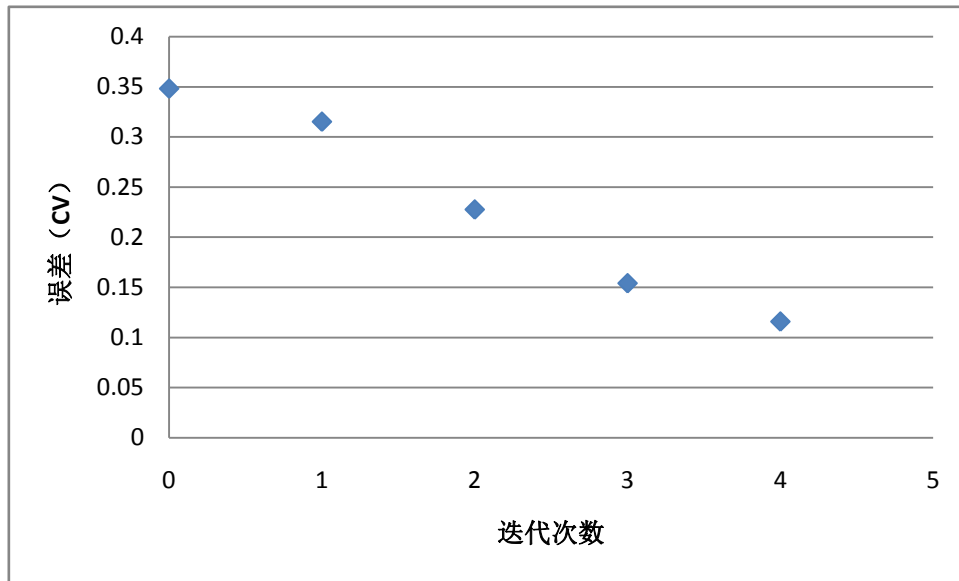


图 5.23 寻优校验误差迭代收敛情况

校验后的空调逐月能耗计算值与实际值对比如图 5.24，校验后的逐月总能耗计算值与实际值对比如图 5.25。

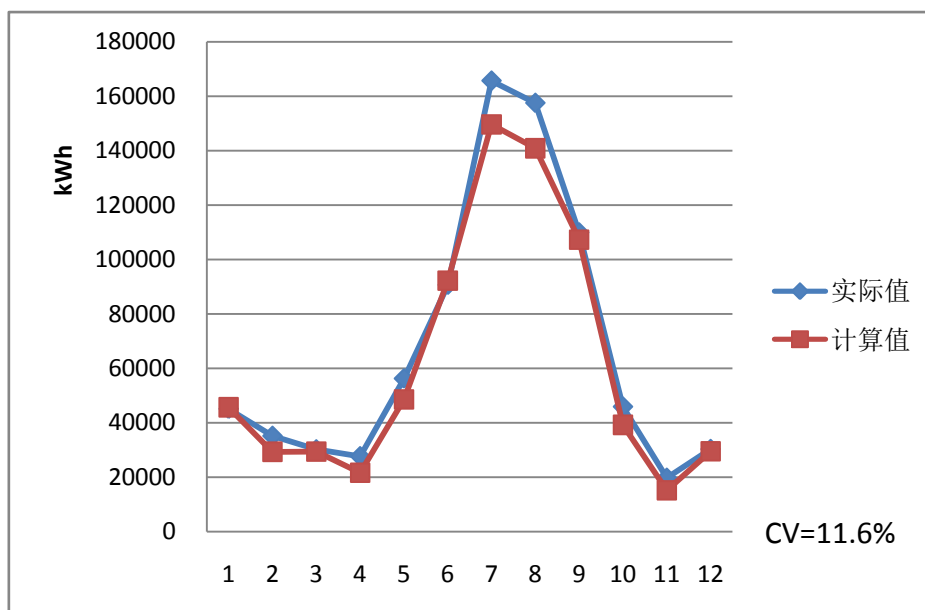


图 5.24 校验后空调逐月能耗计算值与实际值对比图

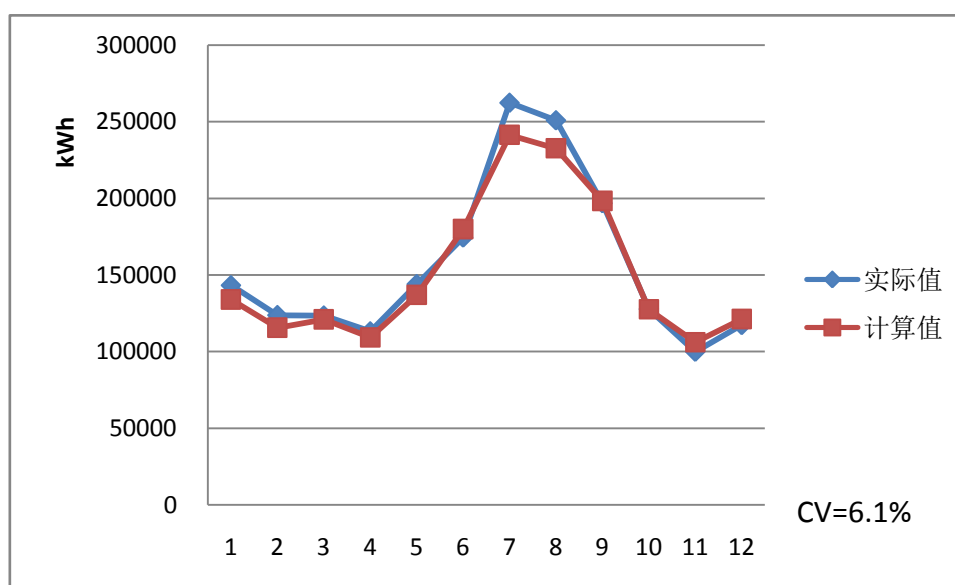


图 5.25 校验后逐月总能耗计算值与实际值对比图

建筑能耗模型校验前后的各个能耗分项的误差值变化见表 5.8。

表 5.8 校验前后各能耗分项误差值变化

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

表 5.9 列出了校验前后模型的输入参数值变化情况。

表 5.9 校验前后模型的输入参数值变化

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

### 5.2.3 实际建筑模型校验结果的不确定性分析

通过表 5.8 和表 5.9 可以看出,实际建筑能耗模型的整个校验过程十分清晰,各个能耗分项的误差及平均误差都下降明显,达到了误差标准的要求,校验后的参数值变化较为合理,模型准确性有所提高。

## 5.3 本章小结

本章基于建筑能耗模型自动校验程序,分别对一个典型建筑能耗模型和一个实际建筑能耗模型进行校验,并对校验过程和结果进行了详细的记录和分析,使程序的可靠性和校验方法的有效性得到验证。

## 第6章 总结与展望

通过校验模拟的方法获得既有建筑的能耗基准模型,进而在基准模型的基础上模拟计算各种节能改造方案(ECM)的节能效果和投资回收期,此种分析方法和决策工具,在现今兴起的建筑节能改造工程中发挥着日益重要的作用。相对现场测量或账单分析的方法,校验模拟法适用的场合更为广泛,且不失科学合理性。

然而,依据人工的手动校验模拟难度较大。一方面,需要分析人员有十分扎实的专业知识和较高的模拟软件应用技巧,另一方面,建筑能耗模型中可调整的输入参数太多,人工校验费时费力,要将模型校验准确,难度很大。近年来,国内外学者和工程界人员也日益重视对建筑能耗模型校验方法的研究,进行了大量的研究工作,总结了一系列的方法和措施,但至今仍然未探索出一套完善而实用的校验方法,这也促使了更深入的研究工作的开展。

本文在前人研究的基础上,通过理论学习和实际分析,提出一套基于简单规则判断和现代寻优算法的建筑能耗模型自动校验方法,旨在通过计算机程序和现代数学寻优算法的应用减少人工校验的工作量,提高校验工作的效率和校验模型的准确度。

首先,本文以办公建筑为例,采用建筑能耗模拟软件 eQUEST 构建上海地区办公建筑的典型模型,选取模型中建筑围护结构、室内负荷及空调系统等三个方面的多个输入参数,分别调整并进行能耗模拟计算,比较各个输入参数对于能耗结果的影响,即进行敏感性分析,作为后文提出自动校验模拟方法时筛选可调整输入参数的基本依据。

其次,详细地分析了简单规则判断方法和粒子群寻优算法(PSO)各自的特点,论述这两种现代方法在建筑能耗模型校验模拟中的作用,明确其有效性和具体实现方式,提出基于上述二种方法的模型自动校验方法;在此基础上,针对建筑模型自动校验过程的功能需求进行分析,利用 C++语言作为开发工具,使用 Visual C++开发出针对 DOE-2 为计算核心的建筑能耗模型自动校验程序,将上述方法用计算机程序实现。

最后,基于开发出的模型自动校验程序,分别对一个典型建筑能耗模型和一个实际建筑能耗模型进行校验,并对校验过程和结果进行了详细的记录和分析,使程序的可靠性和校验方法的有效性得到验证。

本文通过分析和总结,得出以下结论:

- (1) 整体上定性地来说,室内负荷、空调系统相关的模型输入参数对能耗

的敏感性要大于建筑围护结构相关的输入参数对能耗的敏感性。具体来说,围护结构因子中,屋顶的面积所占典型模型总体表面积很小,故对能耗的敏感性很小,其他围护结构因子的敏感性基本相当。内部负荷因子中,照明功率密度和设备功率密度除了分别对照明能耗和设备能耗有直接的敏感性外,还对空调系统的能耗有一定的影响,而室内人员密度对空调系统能耗的影响最大。空调系统因子中,制冷机组 COP 的敏感性最为显著,其次是室内设计温度和新风量的大小,风机效率和水泵效率的影响相对较小,敏感性相当。

(2) 简单规则判断方法和粒子群寻优算法(PSO)可以有效地应用在建筑能耗模型的校验中,使校验过程达到自动或半自动化。具体的程序开发和实例验证过程表明,基于上述方法的建筑能耗模型自动校验程序能够有效地减少校验工作量,提高校验模型的准确性,达到相关标准的要求。

(3) 上述模型自动校验方法具有一定的普适性,可以推广到其他一些建筑能耗模拟软件中去。本文在进行方法论述和程序开发时,均以建筑能耗模型软件 DOE-2 为特定对象,然而,上述自动校验模拟方法的有效性也可以推广到其他建筑能耗模拟软件(如 EnergyPlus, TRNSYS 等),这些软件需要满足两个共同的条件:一个是它们的模型输入文件有一定的格式和语法结构,能够被外部语言程序方便地读取和修改参数;另一个是它们的计算核心都是相对开放的,能够被外部语言程序随时调用并触发运行计算,具有良好的二次开发性。

由于本人专业知识水平有限,计算机语言程序开发能力欠缺,加上时间等因素的限制,使得本文的研究内容和成果还不够完善,在整个分析过程中还有不少问题未能解决。以下是本文的不足之处及需要进一步研究的方面:

(1) 敏感性分析针对的模型输入参数十分有限,更加全面的输入参数对各个能耗分项的个体、整体敏感性有待分析研究。

(2) 开发出的自动校验模拟程序构架十分简单,一些功能实现的方法相对刻板,程序目前仅针对 DOE-2 所建的建筑模型,暂且无法通用到不同的建筑设备系统,界面设置也不是非常合理,整个程序有待继续开发和完善。

(3) 规则判断的方法仅针对特定的两个参数实现了校验提示的功能。后期的研究工作应该以此为重点,针对建筑能耗模型进行能耗数据分析,构造规则库,甚至开发特定的专家系统,提高自动校验的效率,发挥这一人工智能技术在校验模拟领域的应用。

(4) 此外,本文的论述和分析仅针对粒子群寻优算法(PSO)这一特定的现代数学优化算法,随着现代数学方法的推广和计算机技术的进步,后续的研究可以分析多种现代数学方法,将多种寻优算法集成到自动校验的程序或软件中,比较各个方法的有效性,力求最好的校验结果。

## 致谢

三年的硕士研究生生活即将结束，这篇论文也即将完稿，回首同济的这段美好时光，心中充满了不舍和感激！

首先，我要感谢我亲爱的导师潘毅群教授。从论文的选题、开题到最后定稿，潘老师都给予了耐心的指导和帮助，付出了时间和精力。在科研方面，潘老师严谨的治学态度让我非常敬仰，科学高效的工作方法也让人惊叹，对我们的严格要求也促使我们积极进步；生活方面，潘老师和蔼可亲，对学生关怀备至，给予我们莫大的支持和帮助；此外，潘老师还给我提供了很多次宝贵的参与实际工程项目的机会，这些项目经历拓宽了我的专业视野，巩固了专业知识，是一笔宝贵的人生财富。感谢课题组的指导老师黄治钟老师，黄老师孜孜以求的严谨态度、广博的知识面、敏锐的洞察力和强大的执行力让我佩服之极，向黄老师请教问题总能让我受益匪浅。在此谨向潘老师和黄老师表示最衷心的感谢和崇高的敬意！

感谢三年来与我朝夕相处，共同学习和进步的同门师兄姐妹们：姚远、王龙、花莉、周芮锦、刘羽岱、徐哲恬、秦业美、朱明亚、蔡丹丹、邓小茜、田柏秋、郁丛、王秋润、孙勇、林美顺。感谢你们的关心和帮助，感谢在最美的日子里遇到你们！

感谢我的家人，是他们的爱给了我追求梦想的勇气和动力。感谢他们的支持和鼓励，让我在遇见困难的时候能勇敢面对，积极努力地去坚持。

感谢在过去生活学习中所有关心我、鼓励我、支持我、帮助我的人！

## 参考文献

- [1] 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》. 中国建筑工业出版社. 2012
- [2] 中国城市科学研究会.《绿色建筑 2012》. 中国建筑工业出版社. 2012
- [3] 《公共建筑节能改造技术规范》. JGJ176—2009
- [4] International Performance Measurement and Verification Protocol Committee. International performance measurement and verification protocol (IPMVP). 2012
- [5] ASHRAE Standards Committee. ASHRAE Guideline 14-2002. Measurement of Energy and Demand Savings. 2002
- [6] U.S. Department Of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. M&V Guidelines: Measurement and Verification for Federal Energy Projects. Version 2.2. 2000. DOE/GO-102000-0960
- [7] T. Hong, S.K. Chou, T.Y. Bong. Building simulation, an overview of developments and information sources, Building and Environment. 2000(35): 347-361
- [8] 建筑环境系统模拟分析方法——DeST. 中国建筑工业出版社. 2006
- [9] ASHRAE Handbook – Fundamentals. Chapter 32 – Energy estimating and modeling methods. 2005
- [10] T. Reddy, I. Maor. Procedures for reconciling computer-calculated results with measured energy data. ASHRAE Research Project 1051-RP. Philadelphia, PA, USA. Jan 2006
- [11] J. Stein. Calibrated simulation: an improved method for analyzing building energy use. E-Source Tech Update TU-97-10. Boulder, CO, USA. Sep 1997
- [12] J.P. Waltz. Computerized Building Energy Simulation Handbook. Fairmont Press, Liburn, GA. 2000
- [13] J.A. Clarke, P.A. Strachan, C. Pernot. An approach to the calibration of building energy simulation models. ASHRAE Transactions. 1993, 99(2): 917-927
- [14] S.C. Diamond, B.D. Hunn. Comparison of DOE-2 computer program simulations to metered data for seven commercial buildings. ASHRAE Transactions. 1981,87(1): 1222-1231
- [15] TRC. DOE-2: Comparison with measured data: design and operational energy studies in a new high-rise office building – vol.5, report prepared by Tishman Research Corporation New York to U.S. Department of Energy under contract no. DE-AC02-79CS20271. Mar 1984
- [16] L.K. Norford, R.H. Socolow, E.S. Hsieh, G.V. Spadaro. 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): 121-131
- [17] T.A. Lunneberg. Improving simulation accuracy through the use of short-term electrical end-use monitoring. IBPSA Conference. Kyoto, Japan. Sep 1999
- [18] A. Pedrini, F.S. Westphal, R. Lamberts. A methodology for building modeling and calibration



- in warm climates. *Building and Environment*. 2002(37): 903-912; also, A. Pedrini, R. Lamberts. Methodology for building modeling and calibration for warm climates. 7th IBPSA Conference. Rio de Janeiro, Brazil. Aug 2001
- [19] J. Yoon, E.J. Lee, D.E. Claridge. Calibration procedures for energy performance simulation of a commercial building. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*. 2003(125): 251-257
- [20] Y. Pan, Z. Huang, G. Wu. Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in Shanghai. *Energy and Buildings*. 2007(39): 651-657
- [21] V.I. Soebarto. Calibration of hourly energy simulations using hourly monitored data and monthly utility records for two case study buildings. IBPSA Conference. Prague, Czech Republic. Sep 1997
- [22] K. Subbarao. PSTAR- primary and secondary terms analysis and renormalization: a unified approach to building energy simulations and short-term testing. TR-254-3175. National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO, USA. 1988
- [23] J. Manke, D. Hittle. Calibrating building energy analysis models using short term test data, Proceedings of the 1996 ASME International Solar Engineering Conference: ASME Solar Energy Division. 1996: 369-378
- [24] T.A. Reddy, S. Deng, D.E. Claridge. Development of an inverse method to estimate overall building and ventilation parameters of large commercial buildings. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*. 1999(121): 40-46
- [25] M. Liu, D.E. Claridge. Use of calibrated HVAC system models to optimize system operation. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*. 1998(120): 131-138
- [26] G. Liu, M. Liu. A rapid calibration procedure and case study for simplified simulation models of commonly used HVAC systems. *Building and Environment*. 2011(46): 409-420
- [27] W.L. Carroll, R.J. Hitchcock. Tuning simulated building description to match actual utility data: methods and implementation. *ASHRAE Transactions*. 1993, 99(2): 928-934
- [28] P. Raftery, M. Keane, A. Costa. Calibrating whole building energy models: detailed case study using hourly measured data. *Energy and Buildings*. 2011(39): 12-26
- [29] K.J. Lomas, H. Eppel. Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs. *Energy and Buildings*. 1992(19): 21-44
- [30] G.C. Corson. Input-output sensitivity of building energy simulations. *ASHRAE Transactions*. 1992, 98(1): 618-626
- [31] Y.J. Huang, J.W. Hanford, M. Piraino. The impact of variations in building parameters and operating conditions on commercial building energy use and load shapes. IBPSA Conference. Adelaide, Australia. Aug 1993
- [32] J.C. Lam, S.C.M. Hui. Sensitivity analysis of energy performance of office Buildings. *Building and Environment*. 1996, 31(1): 27-39
- [33] D.P. Bloomfield. An overview of validation methods for energy and environmental software. *ASHRAE Transactions*. 1999, 105(2), SE-99-6-1, 9 pages
- [34] R.D. Judkoff, J.S. Neymark. Building energy simulation test (BESTEST) and diagnostic method. NREL/TP-472-6231. National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO, USA .

1995

- [35] L. Tabary, N. Ramdani. An error analysis method applied to a building simulation software: An example of applications and results. IBPSA Conference. Madison, WI, USA. Aug 1995
- [36] 《ASHRAE Standard 90.1-2007》
- [37] 《公共建筑节能设计标准》GB50189—2005
- [38] 李玉明, 潘毅群. 上海市既有公共建筑节能改造适用技术研究. 建筑热能通风空调. 第 28 卷第 2 期. 2009 年 4 月
- [39] 余秋萍. 上海典型办公建筑能耗影响因素研究及其在 LEED 标准中的应用: [学位论文]. 上海: 东华大学, 2011
- [40] 张荣元. 建筑能耗需求相应仿真模型的自动生成和模型校正: [学位论文]. 山东: 山东大学, 2008
- [41] 于颖, 李永生. 粒子群算法在工程优化设计中的应用. 机械工程学报. 第 44 卷第 12 期. 2008 年 12 月
- [42] Z-H. Zhan, J. Zhang, Y. Li. Adaptive particle swarm optimization. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 2009, 39 (6): 1362 - 1381
- [43] M.E.H Pedersen, A.J Chipperfield. Simplifying particle swarm optimization. Applied Soft Computing. 2010, 10 (2): 618 - 628
- [44] 侯俊杰. 深入浅出的 MFC 第 2 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001
- [45] 明日科技. Visual C++ 典型模块与项目实战大全. 北京: 电子工业出版社, 2012
- [46] MSDN 资源库: <http://msdn.microsoft.com/library/>
- [47] Stanley B, Lippman Barbara E, Moo JoséeLaJoie 著, 李师贤等译. C++ Primer(中文版). 第 4 版. 北京: 人民邮电出版社, 2010

## 附录 部分程序代码

### 1. 调用 DOE-2 软件的编程代码

通过开启一个线程函数执行 CMD 命令行：

```
_beginthreadex (NULL, 0, CmdThread, NULL, 0, NULL);
```

线程函数的定义如下：

```
unsigned __stdcall CmdThread(void *pParam)
{
    SECURITY_ATTRIBUTES sa;
    HANDLE hRead, hWrite;
    sa.nLength = sizeof(SEcurity_ATTRIBUTES);
    sa.lpSecurityDescriptor = NULL;
    sa.bInheritHandle = TRUE;

    CString strCmd;
    strCmd = "doe22 back 1 CHN_Shanghai. Shanghai. 583620_CSWD";
    // g_dlg->m_cmdEdit. GetWindowText(strCmd); //从控件获得 cmd 命
    令串
    strCmd="cmd /k"+strCmd;//加上"cmd /k"是为了能执行类似 dir 的命令

    if(strCmd. IsEmpty())
    {
        return TRUE;
    }
    //创建命名管道
    if (!CreatePipe(&hRead, &hWrite, &sa, 0)) {
        //MessageBox("Error On CreatePipe()");
        return FALSE;
    }
    STARTUPINFO si;
    PROCESS_INFORMATION pi;
```

```

    si.cb = sizeof(STARTUPINFO);
    GetStartupInfo(&si);
    si.hStdError = hWrite;//数据输出用的文件句柄
    si.hStdOutput = hWrite;//数据输出用的文件句柄
    si.wShowWindow = SW_HIDE;
    si.dwFlags = STARTF_USESHOWWINDOW |
STARTF_USESTDHANDLES;

    OutputDebugString("1");

    if (!CreateProcess(NULL, strCmd.GetBuffer(strCmd.GetLength())// 执
行 cmd 命令, 并在命名管道中写入 cmd 命令返回的串
        , NULL, NULL, TRUE, NULL, NULL, NULL, &si, &pi)) {
        return FALSE;
    }
    CloseHandle(hWrite);
    OutputDebugString("2");

    char buffer[4096] = {0};
    DWORD bytesRead;
    CString strResult="";

    while(1)
    {
        memset(buffer, 0, 4096);
        if(ReadFile(hRead, buffer, 4096, &bytesRead, NULL) != NULL)//从
命名管道中读取数据
        {
            strResult += buffer;
            // m_iWindowOut.SetWindowText(strResult);//显示到界面上去
            OutputDebugString(buffer);
        }
    }

```

```

else //表示命令行执行完毕
{
    //可以执行相关函数
    //AfxMessageBox("success!!!");
    break;
}
}
CloseHandle(hRead);
return TRUE;
}

```

## 2. 简单规则判断方法中参数调整提示的编程代码:

//m\_ActualLingtCase[12] 跟 m\_ALLYearLingtCase 分别为全年照明用电实际值跟计算值

//m\_ActualEquitCase[12] 跟 m\_ALLYearEquitCase 分别为全年设备用电实际值跟计算值

```

void CanshuFix ()
{
    FLOAT LightMixPer, EquitMixPer;
    LightMixPer =
    FLOAT(m_ActualLingtCase[12]-m_ALLYearLingtCase)/FLOAT(m_ActualLingtCase[12]);
    EquitMixPer =
    FLOAT(m_ActualEquitCase[12]-m_ALLYearEquitCase)/FLOAT(m_ActualEquitCase[12]);
    CString str;
    m_iWindowsOut. SetWindowText("");
    m_iWindowOut2. SetWindowText("");
    if (LightMixPer > 0.1)
    {
        LightMixPer += 1;
        str. Format("照明功率密度增大为原来的 %.2f 倍", LightMixPer);
        m_iWindowsOut. SetWindowText(str);
    }
    else if (LightMixPer < -0.1)

```

```

{
    LightMixPer -= 1;
    LightMixPer *= -1;
    LightMixPer = 1/LightMixPer;
    str.Format("照明功率密度减小为原来的 %.2f 倍", LightMixPer);
    m_iWindowsOut.SetWindowText(str);
}
else
{
    g_dlg->m_isLightMixCanOK = TRUE;
    str.Format("照明功率密度合适, 不必再调整");
    m_iWindowsOut.SetWindowText(str);
}
if (EquitMixPer > 0.1)
{
    EquitMixPer += 1;
    str.Format("设备功率密度增大为原来的 %.2f 倍", EquitMixPer);
    m_iWindowOut2.SetWindowText(str);
}
else if (EquitMixPer < -0.1)
{
    EquitMixPer -= 1;
    EquitMixPer *= -1;
    EquitMixPer = 1/EquitMixPer;
    str.Format("设备功率密度减小为原来的 %.2f 倍", EquitMixPer);
    m_iWindowOut2.SetWindowText(str);
}
else
{
    g_dlg->m_isEquitMixCanOK = TRUE;
    str.Format("设备功率密度合适, 不必再调整\n");
    m_iWindowOut2.SetWindowText(str);
}
}

```

### 3. 粒子群寻优算法 (PSO) 及嵌入程序的编程代码:

定义一个具有粒子属性的结构体:

```
typedef struct node
{
    float canshu[m_dimension];           //粒子位置, m_dimension 表示
    粒子维数
    float fitness;                       //粒子适应度
    float bestcanshu[m_dimension];       //局部最佳适应度的粒子位置
    float bestFitness;                   //局部最佳适应度
    float speed[m_dimension];           //粒子更新速度
} nodeFindout;
```

定义一个数组表示粒子群:

```
nodeFindout m_individual[40];
```

定义全局最佳适应度及其位置:

```
float gbestCanshu[m_dimension];
float gBestFitness;
```

定义找出一个粒子中最佳适应度的函数, 输入参数为粒子在粒子群中的次序:

```
void COpenExeDlg::LocalBest(int i)
{
    if(m_individual[i].bestFitness > m_individual[i].fitness)
    {
        for(int j=0; j<m_dimension; j++)
        {
            m_individual[i].bestcanshu[j]=m_individual[i].canshu[j];
        }
        m_individual[i].bestFitness=m_individual[i].fitness;
    }
}
```

定义找出粒子群中最佳适应度的函数:

```
void COpenExeDlg::GlobalBest()
{
    for(int j=0; j<m_popsize; j++)           // m_popsize 表示粒子个数
    {
        if(m_individual[j].bestFitness < gBestFitness)
        {
```

```

        for(int k=0; k<m_dimension; k++)
        {
            gbestCanshu[k]=m_individual[j]. bestcanshu[k];
        }
        gBestFitness = m_individual[j]. bestFitness;
        gBeatPopsiz = j;
    }
}
}

```

定义粒子速度及位置更新的函数，输入参数为粒子在粒子群中的次序：

```

void COpenExeDlg::SetNodeCanshu(int i)
{
    srand((int)time(0));
    for (int j = 0;j < m_dimension; j++)
    {
        m_individual[i]. speed[j] = Node_w*m_individual[i]. speed[j] +
            Node_c1*rdft()*(m_individual[i]. bestcanshu[j] -
m_individual[i]. canshu[j]) +
            Node_c2*rdft()*(gbestCanshu[j] - m_individual[i]. canshu[j]);
        if (m_individual[i]. speed[j] > Node_Vmax[j])
        {
            m_individual[i]. speed[j] = Node_Vmax[j];
        }
        m_individual[i]. canshu[j] += m_individual[i]. speed[j];
        if (m_individual[i]. canshu[j] > Node_CanshuMax[j])
        {
            m_individual[i]. canshu[j] = Node_CanshuMax[j];
        }
        if (m_individual[i]. canshu[j] < Node_CanshuMin[j])
        {
            m_individual[i]. canshu[j] = Node_CanshuMin[j];
        }
    }
}
}

```



## 个人简历、在校期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历:

王永龙, 男, 1988 年 11 月出生。

2011 年 7 月毕业于东华大学 建筑环境与设备工程专业 获学士学位。

2011 年 9 月至今 入读同济大学硕士研究生。

### 已发表的论文:

[1] 王永龙, 潘毅群 . 典型办公建筑能耗模型中输入参数单因子敏感性的分析研究 [J]. 建筑节能, 2014, (2): 9-14