



# 实用建筑能耗 模拟手册

Building Energy Simulation Handbook

潘毅群 等著

中国建筑工业出版社

# 实用建筑能耗模拟手册

Building Energy Simulation Handbook

潘毅群 等著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

实用建筑能耗模拟手册/潘毅群等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 9  
ISBN 978-7-112-15510-1

I. ①实… II. ①潘… III. ①建筑能耗-模拟-手册  
IV. ①TU111.19-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 121020 号

本书共计 5 章, 全面介绍建筑能耗模拟的应用、相关标准、研究进展、基本原理、能耗模拟软件和专业分析软件、建筑能耗模拟方法(基本方法、LEED 认证能耗模拟方法、校验模拟方法、联合模拟方法、区域建筑负荷与能耗模拟方法), 并给出 25 个案例, 涵盖不同建筑类型、空调系统形式、新建建筑模拟、既有建筑校验模拟、LEED 认证模拟等, 每个案例给出详细输入参数、建模方法和步骤、结果分析, 并在本书所附光盘中给出每个案例的输入文件与输出文件。

希望本书能为从事绿色建筑设计咨询、节能服务、合同制能源管理和低碳规划的专业人员, 暖通空调系统的设计人员, 暖通专业的在校本科生和研究生, 以及对建筑能耗模拟感兴趣的相关人员提供方法指导和技术支持, 促进建筑能耗模拟在建筑节能领域的更加广泛和深入的应用。

责任编辑: 姚荣华 张文胜

责任设计: 张虹

责任校对: 肖剑 刘钰

## 实用建筑能耗模拟手册

潘毅群 等著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京市密东印刷有限公司印刷

∞

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 23½ 字数: 590 千字

2013 年 8 月第一版 2013 年 8 月第一次印刷

定价: 79.00 元(含光盘)

ISBN 978-7-112-15510-1  
(24089)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## 参与编著人员

本书由同济大学潘毅群教授担任主编，负责本书大纲拟定以及全书的统稿工作。参与各章编写的人员有：潘毅群（第1章至第5章）；李玉明（第4章、第5章）；刘羽岱（第1章、第3章、第4章、第5章）；张洁（第4章，第5章）；黄森（第1章，第5章）；姚远（第3章）；殷荣欣（第5章）；花莉（第5章）；王龙（第5章）；林兴斌（第5章）；左明明（第5章）；朱明亚（第1章，第2章）；徐哲恬（第5章）；蔡丹丹（第1章、第5章）；王秋润（第1章）；郁丛（第2章）。

## 序

从 20 世纪 80 年代到今天，建筑能耗模拟技术已经从一项“小众”的研究工具，变成被广泛接受和普遍采用的应用技术。这当然首先得益于建筑节能事业的发展。因为建筑能耗与建筑功能、使用模式、气候条件和用户行为紧密关联，又涉及大惯性的建筑热过程，是一个非常复杂的不确定系统，必须依靠建模和模拟的手段加以预测和评价。所以，是建筑节能的市场需求推动了建筑能耗模拟技术的发展。建筑节能是能耗模拟技术赖以生存和成长的必要条件。其次，信息和通信技术的发展，为大型建筑能耗的动态模拟提供了充分条件。建筑能耗模拟已经成为建筑节能标准贯彻执行的基础、建筑节能设计的重要手段，和建筑节能研究的有力工具。而且已成为建筑信息建模（BIM）系统的重要组成部分。

但在另一方面，国内在开展建筑能耗模拟时也出现了输入参数的随意性、模拟结果与实测数据有较大偏差、对建筑能耗评价的盲目性，以及不同模拟软件之间不可比等现象。此外，在高校研究生培养中，出现“无模拟不成论文”、“模拟优于实测”等不良学风，而在设计单位中却又存在“经验重于模拟”、工程评价靠模拟来“找补”等倾向。这些都亟需厘清能耗模拟中的问题和乱象，使建筑能耗模拟更加科学、规范、健康。

潘毅群教授的这本手册出版得非常及时。手册为所有从事建筑能耗模拟和建筑节能事业的人们提供了极有价值的参考资料。潘毅群教授是国内建筑能耗模拟领域里站在前沿的少数研究者之一。她近二十年的不懈探索，在建筑能耗模拟的方法论和技术上取得很多研究成果，并在实际工程应用中积累了丰富的经验，本书是她长年工作的总结。同时，潘毅群教授也是国内率先为研究生和本科生开设建筑能耗模拟课程的教师之一，对不同层次和不同需求的人如何掌握建筑能耗模拟的技能也有着深刻的认识。她与国外建筑能耗模拟软件编制开发的主要参与者保持着交流和合作，这也使手册能够反映国内外在该领域的最新进展。

我在浏览了书稿之后，感觉本书既有理论高度，又有应用价值。既可以供初学者入门，又可以供一线实践者作为指南。所以，我很高兴地将本书推荐给读者。相信本书的出版，一定会推进建筑能耗模拟事业的发展。



2013 年 4 月 5 日于同济大学



# 前 言

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量的 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% (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 2012》)。建筑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”的建筑的运行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，达到相关的节能标准的要求。由此可见，新建建筑节能设计与既有建筑节能改造在建筑节能中具有同等重要的地位。

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，建筑能耗模拟越来越受到重视，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。

建筑能耗模拟可以应用于两种类型的建筑：新建建筑和既有建筑。对于新建建筑，通过建筑能耗的模拟与分析对设计方案进行比较和优化，使其符合相关的标准和规范，进行经济性分析等；对于既有建筑，通过建筑能耗的模拟和分析计算基准能耗和节能改造方案的能耗的节省和费用的节省等。美国绿色建筑标准 LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) Credit EA1——优化能耗性能中定义了三种评估建筑能耗性能的方法，建筑能耗模拟就是其中之一。而《国际测量与验证协议》(International Performance Measurement and Verification Protocol, IPMVP) 和 ASHRAE 标准委员会编写的 M&V Guidelines (Measurement and Verification for Federal Energy Projects) 中都详细规定和叙述了四种对于节能改造方案的节能量进行测试与认证的方法，其中方法 D 为通过模拟部

分或整个设备系统的能耗水平来确定节能量。因此，对于绿色建筑设计和建筑节能改造来说，建筑能耗模拟都是非常重要的支持工具。

在建筑能耗模拟被越来越多地应用于实际工程和项目的同时，也受到很多的质疑。由于建筑及其系统的复杂特性和众多的影响因素，一个能耗模型的建立需要进行很多参数的输入和定义，在建模时需要参考很多相关的标准和规范，因而建模人员对专业知识的掌握程度和模拟软件的熟练应用程度以及建模方法和步骤是否规范等都会影响模型的准确程度。因此，很多人认为“模拟只是模拟，不能反映真实情况”，很多人提出“模型与实际建筑的误差究竟有多少”、“怎样才能建立一个准确的模型”、“哪些模拟软件是可以信赖的建模工具”、“特殊功能的建筑如何进行模拟”等问题。本书将为这些问题一一提供解答。

本书的第1章概括介绍建筑能耗模拟的意义、发展和应用领域、相关学术组织、相关标准和最新的相关研究进展；第2章介绍建筑能耗模拟的基本原理，包括简化模拟方法（度日数法、温频法）和详细模拟方法（正演模拟和逆向建模方法）；第3章介绍各种建筑能耗模拟软件和专业分析软件；第4章深入介绍建筑能耗模拟方法，包括基本方法（如何进行软件选择、规范性建模方法与步骤等）、LEED认证能耗模拟方法、校验模拟方法、联合模拟方法、区域建筑负荷与能耗模拟方法；第5章给出25个案例，涵盖不同建筑类型、空调系统形式、新建建筑模拟、既有建筑校验模拟、LEED认证模拟等，每个案例给出详细输入参数、建模方法和步骤、结果分析等。第4章的方法介绍与第5章的案例分析中，贯穿介绍建筑能耗模拟的一些实用建模技巧，如气象文件格式转化、模型输入参数核查、模拟计算结果合理性检查、设备性能曲线的拟合、LEED认证能耗模拟的实用技巧和问题讨论、建模尺度与模型精细程度以及模型简化方法的讨论、特殊建筑和系统（高大中庭、置换通风、冷辐射吊顶、地源热泵、冰蓄冷、自然通风等）的模拟等。案例以常用能耗模拟软件 eQUEST 和 EnergyPlus 为主进行介绍。在本书附录中给出模拟输入参数整理表格、英制与国际制单位转换表格。本书所附光盘中收录所有案例的输入和输出文件，方便读者在学习建模时使用和参考。

为了方便读者使用，本书中软件界面均为屏幕截图，未经任何加工处理。

希望本书能为从事绿色建筑设计咨询、节能服务、合同制能源管理和低碳规划的专业人员，暖通空调系统的设计人员，暖通专业的在校本科生和研究生，以及对建筑能耗模拟感兴趣的相关人员提供方法指导和技术支持，促进建筑能耗模拟在建筑节能领域的更加广泛和深入的应用。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正，提出宝贵建议。读者如对相关疑问有疑问，可访问 <http://bsim.tongji.edu.cn> 进行讨论和交流。

潘毅群

yiqunpan@tongji.edu.cn

2013.4.28

# 目 录

|  |    |
|--|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....                                      | 1  |
| 1.1 建筑能耗模拟的意义 .....  | 1  |
| 1.2 建筑能耗模拟的发展与应用 .....                                     | 1  |
| 1.3 建筑能耗模拟相关学术组织 .....                                     | 2  |
| 1.4 建筑能耗模拟相关标准 .....                                       | 6  |
| 1.4.1 ASHRAE 90.1 .....                                    | 6  |
| 1.4.2 ASHRAE 189.1 .....                                   | 7  |
| 1.4.3 ASHRAE 140 .....                                     | 8  |
| 1.5 建筑能耗模拟相关文献 .....                                       | 9  |
| 1.6 建筑能耗模拟相关研究与应用最新进展 .....                                | 10 |
| 1.6.1 集成建筑设计、BIM 与建筑能耗模拟 .....                             | 10 |
| 1.6.2 建筑调适 (commissioning)、既有建筑节能改造与校验模拟 .....             | 12 |
| 1.6.3 用于能耗模拟的天气参数 .....                                    | 14 |
| 1.6.4 室内人员行为模型 .....                                       | 15 |
| 1.6.5 联合模拟与仿真 .....  | 17 |
| 1.6.6 硬件在环模拟 .....   | 18 |
| 1.6.7 建筑优化设计、系统优化控制与故障诊断的相关应用 .....                        | 19 |
| <b>第 2 章 建筑能耗模拟基本原理</b> .....                              | 27 |
| 2.1 简化能耗估算方法 .....   | 27 |
| 2.1.1 度日数法 .....   | 27 |
| 2.1.2 变基准温度的年度日数法 (Variable-base annual degree-days) ..... | 29 |
| 2.1.3 温频 (Bin) 法 .....                                     | 30 |
| 2.2 正演模拟方法与模型 .....  | 30 |
| 2.2.1 模型组成 .....   | 30 |
| 2.2.2 负荷计算方法与模型 .....                                      | 31 |
| 2.2.3 系统部件模型 .....   | 37 |
| 2.2.4 冷热源设备模型 .....  | 41 |
| 2.2.5 系统模拟方法 .....   | 42 |
| 2.2.6 系统控制模拟方法 .....                                       | 43 |
| 2.2.7 天气参数 .....   | 43 |
| 2.3 逆向建模方法 (数据驱动方法) .....                                  | 45 |
| 2.3.1 经验 (黑箱) 法 .....                                      | 45 |
| 2.3.2 校验模拟法 .....  | 48 |



|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 2.3.3      | 灰箱法                                       | 48        |
| <b>第3章</b> | <b>建筑能耗模拟软件</b>                           | <b>50</b> |
| 3.1        | 建筑全能耗分析软件分类                               | 50        |
| 3.2        | 建筑全能耗分析软件介绍                               | 51        |
| 3.2.1      | DOE-2                                     | 51        |
| 3.2.2      | EnergyPlus                                | 55        |
| 3.2.3      | TRNSYS                                    | 59        |
| 3.2.4      | DeST                                      | 61        |
| 3.2.5      | ESP-r                                     | 65        |
| 3.3        | 相关专业分析软件介绍                                | 66        |
| 3.3.1      | 自然采光/照明模型                                 | 66        |
| 3.3.2      | 透明围护结构模拟工具                                | 69        |
| 3.3.3      | 详细热湿传递模型                                  | 69        |
| 3.3.4      | 渗透/正压/污染物传递模型                             | 70        |
| 3.3.5      | CFD/气流模型                                  | 71        |
| 3.3.6      | 基于方程的模拟软件                                 | 73        |
| 3.3.7      | HVAC 部件和设备模型                              | 73        |
| 3.3.8      | 详细制冷系统模型                                  | 73        |
| <b>第4章</b> | <b>建筑能耗模拟方法</b>                           | <b>75</b> |
| 4.1        | 建筑能耗模拟基本方法                                | 75        |
| 4.1.1      | 建筑能耗模拟软件工具的选择                             | 75        |
| 4.1.2      | 建筑能耗模拟的基本方法                               | 78        |
| 4.1.3      | 建筑能耗模拟的规范性建模步骤                            | 79        |
| 4.1.4      | 模型和模拟结果合理性检查                              | 87        |
| 4.2        | LEED 认证的建筑能耗模拟方法                          | 88        |
| 4.2.1      | 概述  | 88        |
| 4.2.2      | LEED 认证的建筑能耗模拟的基本方法                       | 88        |
| 4.2.3      | ASHRAE 90.1-2007 附录 G 解读及 LEED 认证能耗模拟注意要点 | 91        |
| 4.2.4      | 模型结果的检查和验证                                | 98        |
| 4.2.5      | 常见错误                                      | 100       |
| 4.3        | 校验模拟方法                                    | 101       |
| 4.3.1      | 校验模拟的适用范围                                 | 101       |
| 4.3.2      | 校验模拟的级别                                   | 102       |
| 4.3.3      | 校验模拟评价标准                                  | 103       |
| 4.3.4      | 校验模拟的基本方法与步骤                              | 104       |
| 4.4        | 能耗模拟软件与其他软件的联合模拟                          | 110       |
| 4.4.1      | 概述  | 110       |
| 4.4.2      | 联合模拟的原则                                   | 111       |

|            |                                     |            |
|------------|-------------------------------------|------------|
| 4.4.3      | 系统分解与耦合策略 .....                     | 111        |
| 4.4.4      | 联合模拟平台的介绍 .....                     | 112        |
| 4.5        | 区域建筑负荷与能耗模拟方法 .....                 | 115        |
| 4.5.1      | 概述 .....                            | 115        |
| 4.5.2      | 自上而下方法 .....                        | 117        |
| 4.5.3      | 自下而上方法 .....                        | 117        |
| 4.5.4      | 区域负荷与能源模拟中的情景分析 .....               | 118        |
| <b>第5章</b> | <b>建筑能耗模拟案例 .....</b>               | <b>124</b> |
| 5.1        | eQUEST 案例 .....                     | 124        |
| 5.1.1      | 定风量系统+常规水系统 .....                   | 125        |
| 5.1.2      | 变风量系统(无风机型)+常规水系统 .....             | 135        |
| 5.1.3      | 变风量系统(无风机型)+冰蓄冷水系统 .....            | 137        |
| 5.1.4      | 变风量系统(风机动力型)+地源热泵系统 .....           | 140        |
| 5.1.5      | 二管制风机盘管+独立新风系统 .....                | 145        |
| 5.1.6      | 家用分体空调(热泵)及窗式空调器 .....              | 153        |
| 5.1.7      | 整体式变风量变风温系统 .....                   | 161        |
| 5.2        | EnergyPlus 案例 .....                 | 168        |
| 5.2.1      | 定风量系统+常规水系统 .....                   | 171        |
| 5.2.2      | 四管制风机盘管+独立新风系统 .....                | 195        |
| 5.2.3      | 四管制风机盘管+独立新风系统+地源热泵系统 .....         | 201        |
| 5.2.4      | 变风量系统+常规水系统 .....                   | 204        |
| 5.2.5      | 变风量系统+冰蓄冷水系统(本案例采用 E+V7.2 模拟) ..... | 209        |
| 5.2.6      | 变制冷剂流量空调系统(VRV) .....               | 216        |
| 5.2.7      | 辐射吊顶+置换通风+常规水系统 .....               | 224        |
| 5.2.8      | 自然通风 .....                          | 231        |
| 5.3        | 实际案例 .....                          | 243        |
| 5.3.1      | eQUEST_某商业写字楼 LEED 认证能耗模拟 .....     | 243        |
| 5.3.2      | eQUEST_区域供能系统的模拟 .....              | 290        |
| 5.3.3      | EnergyPlus_带天窗的中庭建筑空间的负荷计算 .....    | 303        |
| 5.3.4      | EnergyPlus_某研发中心 LEED 认证模拟 .....    | 306        |
| 5.3.5      | EnergyPlus_某会展中心能耗模拟 .....          | 312        |
| 5.3.6      | EnergyPlus_新风按需控制策略的模拟 .....        | 320        |
| 5.3.7      | VisualDOE_上海某既有商用办公楼的校验模拟 .....     | 325        |
| 5.3.8      | EnergyPlus_既有校园办公建筑的校验模拟 .....      | 331        |
| 5.3.9      | TRNSYS_变风量空调系统的模拟 .....             | 343        |
| 5.3.10     | TRNSYS+MATLAB_变风量空调系统的联合模拟 .....    | 351        |
| <b>附录一</b> | <b>英制单位与国际制单位的转换 .....</b>          | <b>357</b> |
| <b>附录二</b> | <b>建筑模型输入参数汇总 .....</b>             | <b>359</b> |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 建筑能耗模拟的意义

建筑模拟 (Building Simulation) 是指对建筑环境与系统的整体性能进行模拟分析的方法, 因此也可称为建筑性能模拟 (Building Performance Simulation)。建筑性能模拟主要包括建筑能耗模拟、建筑环境模拟 (气流模拟、光照模拟、污染物模拟) 和建筑系统仿真。其中建筑能耗模拟是对建筑环境、系统和设备进行计算机建模, 并计算出逐时建筑能耗的技术。

建筑能耗通常是指民用建筑的运行能耗, 即在住宅、办公建筑、学校、商场、宾馆、交通枢纽、文化娱乐设施等非工业建筑内, 为居住者或使用者提供采暖、通风、空调、照明、炊事、生活热水以及其他为了实现建筑的各项服务功能所消耗的能源。根据清华大学建筑节能研究中心的最新数据, 2010 年我国建筑总能耗为 6.77 亿吨标准煤, 占全国总能耗的 20.9%<sup>[1]</sup>。由于我国建筑面积的迅速增长和能耗强度的逐年上升, 建筑总能耗逐年上升, 建筑能耗占比也不断上升。建筑能耗已成为温室气体排放的主要贡献者, 而高速城镇化所带来的大量的能源资源消耗已成为社会可持续发展的突出问题。因此, 通过发展绿色建筑、开展既有建筑节能改造推动我国建筑的可持续发展是解决我国能源和资源问题的重要战略。

在民用建筑能耗中, 采暖空调能耗和照明能耗通常是占比例最大的, 也是节能潜力最大的两个部分。建筑能耗不仅取决于其围护结构、照明系统和空调系统各自的性能, 更取决于其整体的性能。一幢大型的商业建筑, 其各个系统和设备之间以及其环境之间的复杂和动态的相互影响需要进行模拟才能得以分析。可以说, 建筑模拟是绿色建筑设计和既有建筑节能改造的重要分析工具。对于新建建筑, 通过建筑能耗的模拟与分析对设计方案进行比较和优化, 使其符合相关的标准和规范, 进行经济性分析等; 对于既有建筑, 通过建筑能耗的模拟和分析计算基准能耗和节能改造方案的能耗的节省和费用的节省。在全世界和我国的绿色建筑迅速发展和既有建筑改造大力推进的形势下, 建筑能耗模拟已经成为建筑设计、评价、分析的必不可少的重要工具之一。

## 1.2 建筑能耗模拟的发展与应用

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。初期的研究重点是传热的基础理论和负荷计算方法, 例如一些简化的动态传热算法, 如度日法和温频法等。在这个阶段, 建筑模拟的主要目的是改进围护结构的传热特性。20 世纪 70 年代的全球石油危机之后, 建筑能耗模拟

越来越受到重视,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70年代中期,在美国形成了两个著名的建筑模拟程序,BLAST和DOE。欧洲也于20世纪70年代开始研究模拟分析的方法,产生的具有代表性的软件是ESP-r。20世纪70年代末期,一些模块化的空调系统模拟软件也逐渐被开发出来,如美国开发的TRNSYS和HVACSIM+。同时,亚洲各个国家也开发出了一些建筑模拟软件,包括日本的HASP和中国的DeST。20世纪90年代初,化石能源的大量消耗和氟利昂制冷剂的泄漏造成大气臭氧层的破坏,全球变暖现象加剧,健康舒适但能耗较低绿色建筑成为全世界范围建筑的发展重点。绿色建筑的发展使得建筑模拟成为必须。这段时间,建筑模拟软件不断完善,并出现一些功能更为强大的软件,例如EnergyPlus,建筑模拟的研究重点也逐步从模拟建模(modeling)向应用模拟方法转移,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。

经过多年的发展,建筑模拟已经在建筑环境和能源领域得到越来越广泛的应用,贯穿于建筑的整个寿命周期,包括建筑的设计、建造、运行、维护和管理,具体的应用有:

- (1) 建筑冷/热负荷的计算,用于空调设备的选型;
- (2) 在设计新建筑或者改造既有建筑时,对建筑进行能耗分析,以优化设计或节能改造方案;
- (3) 建筑能耗管理和控制模式的设计与制订,保证室内环境的舒适度,并挖掘节能潜力;
- (4) 与各种标准规范相结合,帮助设计人员设计出符合国家或当地标准的建筑;
- (5) 对建筑进行经济性分析,使设计人员对各种设计方案从能耗与费用两方面进行比较。

### 1.3 建筑能耗模拟相关学术组织

**国际建筑性能模拟协会 International Building Performance Simulation Association (IBPSA): <http://www.ibpsa.org/>**

IBPSA是一个以改善建筑环境为宗旨,致力于为建筑能耗模拟领域内的研究人员、开发人员以及所有从业者提供良好交流平台的非盈利性国际学术组织。

迄今为止,IBPSA在全球范围内的27个国家和地区建立分会,亚洲范围的分会包括IBPSA中国分会、日本分会、韩国分会、新加坡分会、印度分会和澳大利亚分会。各个分会积极举办地区会议、促进学术交流,对所在地区建筑能耗领域的学术发展起着重要的推动作用。

IBPSA的官方期刊名为:Journal of Building Performance Simulation。每年发行六期,内容涉及建筑设计、建筑设备、建筑环境、计算机辅助设计、绿色建筑、暖通空调、可再生能源以及仿真与建模等方面。值得一提的是,IBPSA近期出版了一本名为《Building Performance Simulation for Design and Operation》的专业书籍,该书由21位业界专家合作完成,共536页,视角独特,全面介绍了建筑能耗模拟的方方面面,同时也是IBPSA

出版的第一部著作。

IBPSA 国际会议 Building Simulation 每两年召开一次，届时全球范围内的业内人士汇聚一堂，分享最新的建筑模拟学术成果。2013 年的 Building Simulation 于 2013 年 8 月在法国召开。除了国际会议以外，各个分会举办的地区会议也同样具有重要意义。2012 年 11 月第一届亚洲区建筑模拟大会（ASim2012）在中国上海同济大学成功举办。本次会议由同济大学主办，清华大学、IBPSA 中国分会、日本分会和韩国分会协办，以后将两年举办一次，下届会议（2014 年）将在日本举行。

**美国暖通工程师学会 American Society Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE): <http://www.ashrae.org/>**

ASHRAE 成立于 1894 年，在全球范围内拥有超过 50000 名会员、设有 191 个分会，是全世界最具影响力的建筑环境与能源领域的学术组织。

ASHRAE 研究领域广泛，各个领域都分别设有技术委员会，其中 Technical Committee 4.1-Load Calculation Data and Procedures（设计负荷计算技术委员会，简称 TC 4.1）主要涉及负荷计算工程规范的编制和审定，以及发展暖通空调负荷计算理论等方面的工作。Technical Committee 4.7-Energy Calculations（能耗计算技术委员会，简称 TC 4.7）主要负责确立、评价、完善和推荐建筑能耗的计算方法。

在 ASHRAE 编写的众多标准中涉及能耗模拟的主要有 ASHRAE 90.1 “Energy Standard for Building Except Low-Rise Residential Buildings”，ASHRAE 189.1 “Standard for the Design of High-Performance Green Buildings”，ASHRAE 140 “Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs”。

**国际能源署 International Energy Agency (IEA), <http://www.iea.org/>与国际能源署建筑与社区系统节能协议 IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECBCS): <http://www.ecbcs.org/>**

国际能源署（IEA）是一个政府间组织，担任其 28 个成员国的能源政策顾问，并与成员国一起协力为其国民提供可靠及经济的清洁能源。国际能源署在 1973~1974 年石油危机期间成立，其初始作用是负责协调应对石油供应紧急情况的措施。随着能源市场的变迁，国际能源署的使命也随之改变并扩大。纳入了基于提高能源安全、经济发展和环境保护“3 个 E”的均衡能源决策概念。国际能源署当前的工作重点是研究应对气候变化的政策、能源市场改革、能源技术合作和与世界其他地区，特别是主要能源消费和生产国，如中国、印度、俄罗斯和欧佩克（OPEC）国家展开合作。

ECBCS 为国际能源署就建筑及社区系统节能问题签署的一项实施协议，其功能在于组织相关领域研究、提高国际社会对于建筑节能的关注程度。通过一系列附属项目研究推动节能技术发展，以及积极地将理论技术付诸实践，以此帮助国际间和各国家内部制定节能方面的政策标准。

在 ECBCS 开展的众多附属项目中有一些与建筑模拟相关的项目，如：Annex 55 “Reliability of Energy Efficient Building Retrofitting-Probability Assessment of Performance & Cost (RAP-RETRO)”、Annex 53 “Total Energy Use in Buildings: Analysis &



Evaluation Methods”、Annex 46 “Holistic Assessment Tool-kit on Energy Efficient Retrofit Measures for Government Buildings”、Annex 43 “Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools”、Annex 42 “The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems (COGEN-SIM)”、Annex 34 “Computer-Aided Evaluation of HVAC System Performance、Annex 30 Bringing Simulation to Application”、Annex 25 “Real Time HEVAC Simulation、Annex 10 Building HEVAC Systems Simulation” 等。

**落基山研究院 Rocky Mountain Institute (RMI): <http://www.rmi.org/>**

美国落基山研究院 (RMI) 是一所独立的、由企业支持的非盈利性研究机构, 主要致力于通过综合设计提高能效的相关研究工作。RMI 在建筑、电力、交通、工业这四个使用化石燃料的主要领域内展开研究工作, 促进这些领域内用能方式的转变与能效的提高。

在建筑能耗模拟领域, 与 IBPSA 美国分会接洽, 开展了涉及建模基本原理以及成功案例分析的培训课程。2010 年 8 月在美国的 SimBuild 2010 会议上第一次开展讲习班, 之后在美国多个城市开展了多次研习班, 受到从业者的欢迎。培训课程的课件可以在 RMI 网站上免费下载。此外, RMI 也发表了大量有关能源及财务分析方面的文献和论文, 供读者查阅学习。

2011 年 3 月, RMI 协同 ASHRAE、IBPSA-USA、美国绿色建筑委员会 USGBC 以及市场转化协会 IMT, 举办了建筑能耗模拟技术创新峰会。会议共有近 55 人参加, 包括软件开发人员、专家学者、美国能源部和国家实验室代表以及行业标准和政策的指定人员。会议提出了引领建筑模拟行业未来发展路线图, 同时指出了行业内存在的若干问题。

**英国皇家注册工程师协会 UK Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE): <http://www.cibse.org/>**

英国皇家注册工程师协会 (CIBSE) 于 1976 年获得皇家特许资格, 致力于支持建筑设备行业的发展, 为其会员和公众提供信息和教育服务。CIBSE 制定了很多建筑设备工程行业内的标准, 出版的手册和规范在世界范围内被视为权威, 并被广泛参考和应用。

其下属设有建筑模拟技术组 (CIBSE Building Simulation Group), 主要目的是促进建筑模拟软件在建筑中的应用和提高其对建筑实际性能的预测准确度, 为舒适健康并拥有最佳能效的建筑设计提供支持。具体包括: 帮助会员拓宽知识面, 知晓更多可用的计算机模拟软件、评价方法和一些问题的解决方法、提高相应的技能等; 为相关组织在建筑设备与系统的设计与运行中应用模拟程序提供相关信息; 撰写建筑模拟相关的指导手册和出版物; 与 CIBSE 内的其他组合作, 如自然通风组、智能建筑组等, 推广建筑模拟软件的应用。

**美国能源部 Department of Energy, USA: <http://www.doe.gov/>**

美国能源部是美国最重要的联邦政府机构之一, 主要负责核武器研制、生产和维护, 联邦政府能源政策制定, 能源行业管理, 能源相关技术研发等。

在建筑能耗模拟领域美国能源部出资支持了如今被业界广泛认可并使用的 DOE-2 和 EnergyPlus 两款模拟软件的开发。

美国劳伦斯伯克利国家实验室仿真技术组 Lawrence Berkeley National Laboratory, Simulation Research Group: <http://simulationresearch.lbl.gov/>

美国劳伦斯伯克利国家实验室下属的仿真技术研究组 (Simulation Research Group) 主要致力于建筑设计及运行辅助软件的研究、开发和应用, 以及下一代建筑能源和控制系统的研究。该研究组之前负责开发了 DOE2.1 和 SPARK 软件, 并负责 EnergyPlus 软件的开发和版本升级、EnergyPlus 图形用户界面 Simergy 的开发、建筑能源与控制系统动态仿真模型库 Modelica 的开发、联合仿真平台 BCVTB 的开发、全局优化软件 GenOpt 的开发等。

美国威斯康星大学工程学院太阳能实验室 Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison: <http://sel.me.wisc.edu/>

美国威斯康星大学工程学院太阳能实验室 (SEL) 因其在太阳能实际应用方面的许多研究成果而受到美国国内乃至世界范围内的广泛认可。SEL 研究开发的模块化瞬态系统模拟软件 TRNSYS 得到广泛应用。

太平洋能源中心 Pacific Energy Center, Pacific Gas and Electric Company, USA: <http://www.pge.com/pec/>

美国太平洋燃气与电力公司下属的太平洋能源中心 (PEC), 旨在支持建造更多高效建筑, 创造更舒适室内环境, 为建筑能源领域内人士开设相关培训课程, 提供软件支持并提供发展建议。PEC 工作重点围绕商业建筑展开, 同时也开展一些住宅建筑的相关研究。

PEC 开设的培训课程可以在其网站上根据内容进行搜索, 涉及建筑模拟方面的课程包括 eQUEST 软件培训课程、EnergyPro 非住宅建筑软件介绍及培训课程等。

瑞士洛桑理工大学太阳能及建筑物理实验室 Laboratoire d'énergie solaire et physique du bâtiment (LESO-PB), Switzerland: <http://leso.epfl.ch/page-5745-en.html>

瑞士洛桑理工大学的太阳能及建筑物理实验室隶属于其建筑学院土木环境工程专业, 主要在可再生能源、建筑科学和城市物理学等领域开展前沿研究。对于复杂建筑系统的计算模拟问题也是其研究重点, 该课题研究主要包括两个方面: 在室人员行为模式与天气的随机性等非确定性因素的模拟问题; 建筑群的模拟问题。

加拿大国家研究委员会建设研究院 Institute for Research in Construction, NRC, Canada: <http://www.cisti.nrc.ca/irc/ircontents.html>

加拿大国家研究委员会下属建设研究院 (NRC-IRC) 是加拿大主要的建筑技术研发机构。其研究内容包括建筑围护结构、制定规范和评价方法、防火研究、室内环境以及城市基础设施建设等。

在建筑环境方面, NRC-IRC 开发了多款软件, 如声环境模拟软件 IBANA (Insulating Buildings Against Noise from Aircraft)、COPE-Calc、SOCRATES、SPMSOft; 光环境模拟软件 Daysim, 该软件以劳伦斯伯克利国家实验室开发的 Radiance 作为计算内核, 基于

日光系数概念以及佩雷斯 (Perez) 天空模型建立, 可以用来模拟预测日光可用度和室内人工照明需求; 室内空气品质模拟软件 IA-QUEST (Indoor Air Quality Emission Simulation Tool)。

英国斯特拉斯克莱德大学能源系统研究所 Energy Systems Research Unit (ESRU), University of Strathclyde: <http://www.strath.ac.uk/Departments/ESRU/esru.html>

ESRU 迄今共开发了 10 款软件并开放下载, 涉及能耗监测、可再生能源规划、建筑与设备仿真等方面。其中值得一提的是 ESP-r, 该软件是一款大型集成建筑热环境模拟软件, 软件的详细介绍将在后面的对应章节展开。

## 1.4 建筑能耗模拟相关标准

### 1.4.1 ASHRAE 90.1

ASHRAE 90.1 标准全称为“建筑能耗标准——除低层住宅建筑 (Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings)”<sup>[83]</sup>, 由 ASHRAE 编制, 旨在确立建筑 (除低层住宅建筑) 的最低能源效率要求。ASHRAE 90.1 标准最初于 1975 年出版, 之后经过美国国家标准协会 (ANSI) 和 ASHRAE 的定期修订于 1980 年、1989 年、1999 年先后发布修订版本。自 2001 年版之后, ASHRAE 90.1 标准每三年进行一次修订并出版相应的完整版文本, 而在这三年间若有修改之处, 则以附件的形式对外发布。2011 年在美国能源部 (DOE) 宣布 90.1-2010 标准成为国家标准后, 至 2013 年 10 月 18 日前, 美国各州都需要确保其各自的商用建筑能效水平达到或超过 90.1-2010 标准的要求。根据 DOE 对 90.1-2010 标准的数据分析, 与 90.1-2007 标准相比, 商用建筑能耗可降低 18.2% 的一次能源, 实际建筑节能可达 18.5%。

ASHRAE 90.1 标准由 12 个章节和 6 个附录组成。前 3 节介绍标准的目的、适用范围、术语、缩写词; 第 4 节解释该标准的管理与执行; 第 5~10 节, 分别对建筑的围护结构、暖通空调系统、生活热水系统、电力系统、照明系统以及其他设备系统进行了详细的说明和规定; 第 11 节介绍建筑能耗预算方法; 第 12 节给出引用标准。

附录中, 规范性附录有 4 条, 内容分别为保温层的额定热阻值和多层结构的  $U$  值、 $C$  值和  $F$  值的测定方法; 北美和世界部分国家及地区的气候分区准则; 建筑围护结构热工性能权衡选择方法; 北美和世界部分国家及地区的气象参数。资料性附录有 3 条, 内容分别为资料性参考文献、修改附件汇总信息和能耗性能评级方法。

ASHRAE 90.1 标准的一个重要内容是第 11 节中给出的一套具体的计算方法——建筑能耗预算方法 (Building Energy Cost Budget Method)。该方法首先要求设计建筑满足标准第 5~10 节中的各项强制性条款; 其次, 采用同一被权威机构认可、满足一定技术要求的模拟软件、同一天气参数、同一能源费率按照标准要求, 分别建立设计模型 (Proposed Building Design) 和基准模型 (Budget Building Design), 计算对应的设计能源费用 (Design Energy Cost, DEC) 和基准能源费用 (Energy Cost Budget, ECB), 满足计算得到的 DEC 不超过 ECB。并要求在建模时设计模型中使用的建筑组件的能效水平不低于基准模型。当以上条件都满足时, 即说明该建筑设计方案满足 ASHRAE 90.1 标准的要求。

ASHRAE 90.1 标准中另一个更为重要的内容是资料性附录中的附录 G——能耗性能评级方法 (Performance Rating Method, PRM)。该方法与能耗预算方法相仿, 也需建立两个模型 (设计模型和基准模型, 建模的具体要求和规定在表格 G3.1 中有详细说明), 然后将两个模型的计算结果进行比较。PRM 方法与能源预算方法的不同之处在于该方法并不用于判定建筑是否满足 ASHRAE 90.1 标准要求, 而是用于定量地评价建筑的设计方案优于 ASHRAE 90.1 标准要求的基准的程度, 为评价那些满足且超出 ASHRAE 90.1 标准要求的建筑提供了更大的灵活性。能效优化的程度通过计算基准模型与设计模型能耗之差与基准模型能耗的比值得到。在建筑咨询领域中, 附录 G 的 PRM 方法的应用更为广泛, 例如 LEED 认证标准 (LEED NC: 绿色建筑评估体系——适用于新建和重大改建工程) 中能源与大气这一项的得分就是按照附录 G 的方法计算出的节能率的多少进行评定的。

总而言之, ASHRAE 90.1 标准对于提高建筑能效有着重要的指导意义, 从中我们可以看到提高建筑能效的方向; 另一方面对于建筑能耗模拟, ASHRAE 90.1 标准也是需要详细研究的范本。

#### 1.4.2 ASHRAE 189.1

ANSI/ASHRAE/USGBC/IESNA 189.1 标准的全称是“高效绿色建筑设计标准——除低层住宅建筑 (Standard for the Design of High-Performance Green Buildings Except Low-Rise Residential Buildings)”<sup>[84]</sup>, 由 ASHRAE、USGBC 和美国照明工程学会 (IESNA) 合作编写的一套专为高效绿色建筑而设立的标准, 内容上与 ASHRAE/IESNA 90.1 标准、62.1 标准和 55 标准相辅相成。ASHREA 189.1 标准对建筑选址、设计、施工、高效运行和绿色建筑等方面提出了可接受的最低要求, 以平衡建筑的环境友好性、资源节约性、人员舒适性和社区敏感性四个方面, 在不影响子孙后代满足其自身需求的前提下, 达到满足当代人需求的目的。

ASHRAE 189.1 标准最初于 2009 年出版, 目前最新的版本为 2011 年版。2011 年版与 2009 年版相比, 标准的许多条款都有改动, 如引用的 ASHRAE 90.1 标准和 62.1 标准的版本更改为 2010 年版而不是之前的 2007 年版; 对于冷凝水可用的地区, 新标准根据不同的气候条件限制了对机械制冷系统冷凝水回收的要求; 新标准中要求根据具体的建筑和空间类型有区别地降低照明密度, 取代了 ASHRAE 90.1 标准中统一降低室内照明密度的规定等。

标准由 11 个章节和 9 个附录组成。前 3 节主要介绍标准的目的、使用范围以及一些术语和缩略词; 第 4 节解释标准的管理与执行; 第 5~10 节为标准的重点部分, 分别就建筑的场址可持续性、水资源利用效率、能源使用效率、室内空气品质、建筑对于大气、材料和资源的影响以及施工和运行计划六个方面进行了详细的说明和规定。第 11 节给出引用标准。

而附录中, 规范性附录有 6 条, 内容分别涉及建筑围护结构性能、连续的空气隔层、设备能效要求、性能达标判定模型化方法、室内空气品质 (IAQ) 对办公室家具和座椅的要求以及建筑污染物浓度。资料性附录有 3 条, 内容分别为资料性参考文献、一体化设计以及修改附件汇总信息。

ASHRAE 189.1 标准的第 7 节——“能源效率”对建筑及其设备的能效、可再生能源系统以及能耗计量三个方面做出了具体的规定。在判定一栋建筑是否符合 ASHRAE