



建筑能耗模拟前沿技术与高级应用

State-of-the-art Technology and
Advanced Application of Building Performance Modeling

潘毅群 黄森 刘羽岱 等著

中国建筑工业出版社

建筑能耗模拟前沿 技术与高级应用

State-of-the-art Technology and Advanced Application of Building Performance Modeling

潘毅群 黄 森 刘羽岱 等著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑能耗模拟前沿技术与高级应用/潘毅群等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 6
ISBN 978-7-112-23223-9

I. ①建… II. ①潘… III. ①建筑能耗-计算机模拟
IV. ①TU111.19

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 016651 号

责任编辑: 张文胜

责任校对: 王雪竹

建筑能耗模拟前沿技术与高级应用

State-of-the-art Technology and Advanced Application of Building Performance Modeling

潘毅群 黄 森 刘羽岱 等著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 23½ 字数: 585 千字

2019 年 5 月第一版 2019 年 5 月第一次印刷

定价: 89.00 元

ISBN 978-7-112-23223-9

(33306)

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)

序 言

怀着极大的兴趣，浏览了潘毅群教授及其团队的新作《建筑能耗模拟前沿技术与高级应用》，受益匪浅。感觉本书是近年来建筑能源与环境领域中并不多见的佳作之一。

已故著名美国计算机科学家吉姆·格雷提出过科学研究的“4个范式(Paradigm)”理论。即第一范式是通过实验归纳和总结；第二范式是通过理论分析建立数学模型进行推演；第三范式是通过计算机进行仿真模拟；第四范式称为“数据密集型科学发现(Data-Intensive Scientific Discovery)”，即通过大数据的收集、挖掘、分析，找出各种因素间的相关关系。

建筑能耗分析很难通过第一范式的实验和实测得出普遍性的规律。现在全国多个城市建起了建筑能耗监测系统，各种传感器检测得到的上万栋大楼的实时能耗数据，只能反映当时当地的能耗（即“right here right now”），并用其平均值或中位数为当地建筑能耗对标做参考。但由于建筑材料的大热惯性和气象参数的不可重复性，实测数据只有结合第二范式的理论分析，才能归纳出建筑的能耗特性。建筑能耗分析的基础是传热学理论，是在一定边界条件下解偏微分方程。由于辐射换热的规律是非线性的，所以对偏微分方程的解析必须做一系列边界条件的简化和假设。最早用于空调负荷计算的反应系数法或状态空间法就是依据微分方程在不同气象参数输入（谐波函数或阶跃函数）条件下的数值解。由于这种“白箱”模型计算工作量很大，我曾经用一整夜的时间，在PC-XT上计算一间办公室的全年空调能耗。只有在计算机高度发展以后，才有了离散化的“灰箱”模型以及一系列的商业化软件。在第三范式下，建筑能耗模拟技术得到迅速发展，也使得建筑节能中的一系列科学问题，如负荷预测、负荷反推、能耗预测等有了非常得力的技术路径。近年来，对建筑能耗分析有了越来越高的要求。首先，需要将模拟结果与实测数据进行比对，对模型进行“校准”。其次，因为建筑是用来住人的，建筑能耗的最终目的是满足居住者和使用者的需求。这就需要分析人的行为模式，甚至是人的心理状态和社会经济状态。要将这些看似毫无规律可循的状态与建筑能耗建立关系，需要基于大数据的“黑箱”模型，进入科学的第四范式。当然，这些工作的完成要仰仗更先进的计算机技术。

当前，处于第三范式的建筑能耗模拟已经成为建筑节能研究、绿色建筑咨询、系统方案评价、建筑能源管理和工程设计的重要手段。在大多数高校的暖通空调专业中，能耗模拟也成了研究生应知应会的一项能力。部分商业软件也得到普及。但是，很多应用者还仅仅局限在“使用”这些工具，知其然不知其所以然，不了解各种模拟软件中的核心架构、物理模型，以及各种模拟软件在算法上的差别。因此，在实际工程应用中还存在着盲目性，为模拟而模拟，对边界条件和输入参数的合理性缺乏辨别，也无法判断模拟结果的正确性。在另一方面，对于建筑能耗分析中大数据的应用还知之甚少，需要哪些数据？如何收集这些数据？如何整合大量的结构化、半结构化或非结构化数据？用什么样的算法分析这些数据？最后，如何将分析的结果转化为节能或减排的实际价值？这些都需要开展研

究。但除了正在开展的几个国家重点研发项目外，多数人对建筑环境与能源领域中大数据的应用和它所需要的工具还都处于迷茫之中。

也就是说，目前发展迅速的第三范式的建筑能耗计算机模拟技术，需要向第二范式和第四范式延伸，这也是学科创新的要求。而正是在这个时间节点上，潘毅群教授团队的著作问世，确是一场及时雨。

可能有很多读者曾经接触过《实用建筑能耗模拟手册》（简称《手册》）这本书，它是潘毅群教授团队出版的另一本著作。《手册》是一本很好的入门书，供初学者和实际操作者参考之用。而本书可说是《手册》的升级版，为读者提供了建筑能耗模拟的核心软件建模的理论基础，又为读者提供了数据驱动能耗分析建模的引导。同时，本书也提供了多个前沿应用的案例，涉及 BIM（建筑信息建模）技术、云计算、参数化设计等目前刚刚兴起的应用领域。本书还对人的行为研究、区域能源负荷预测、系统调适、需求侧响应等本学科与建筑能耗分析相关的研究领域做了探讨。可以说这本书既夯实了建筑能耗模拟的基础，又建立了通向未来的桥梁。在科学研究的四个范式中间建立了联系和传承的纽带。

我曾在搜索引擎上和国际知名出版商的网站上做过检索，没有发现与本书涵盖内容相类似的书籍。可以说，潘毅群教授团队的研究工作，在国际上也是处在第一梯队方阵之中的。也反映了我国在建筑能耗模拟领域的整体研究水平，并不落后于发达国家。

回想几十年前，我们做建筑物的空调负荷计算，还只能靠自己编程、靠穿孔带输入数据、靠一把小锥子修改数据、等候一两天才能拿到结果；到今天能够模拟复杂的大系统、能够处理海量的数据、能够瞬间完成 10 的几十次方次的运算，不由得感慨技术进步的神速，不努力就要落伍，不前进就要退步。所以，我特别希望从事建筑能耗模拟和建筑节能领域工作的研究者和学生，都能认真读完这本书。期待建筑能耗模拟领域的普遍水平，有一个质的提高。这也是潘毅群教授和她的团队编写本书的初衷吧。



2019 年元旦

前 言

建筑能耗模拟在建筑节能领域的应用越来越广泛，覆盖建筑的全生命周期：规划、设计、建造、安装、调适、运行、维护到最后的报废和回收。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。建筑能耗模拟已经成为贯彻执行建筑节能标准的基础、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。目前正处于大数据时代，海量的建筑能耗分项计量数据如何有效应用，为建筑的优化运行和能效提升提供支持？对于数据的处理需要各种算法和模型，建筑能耗模拟及仿真的作用更显其重要性。

本书是在《实用建筑能耗模拟手册》的基础上，总结最新的建筑能耗模拟研究进展、计算原理、软件工具和相关应用，进行编写。《实用建筑能耗模拟手册》是我国第一本关于建筑能耗模拟的专业书籍，该书比较全面地介绍了建筑能耗模拟的基本原理、建模方法、主要软件工具 and 实际案例，是一本适用于相关专业领域从业者 and 学生全面了解建筑能耗模拟、从起步开始学习的书籍，书中给出大量计算案例，便于读者边学习边练习。本书的主要读者则是针对建筑能耗模拟的中级及高级用户，非初学者。

本书的内容分为三个部分：第一部分（第2章、第3章）关于建筑能耗模拟的理论基础和数学模型，从物理模型（白箱模型）和数据驱动模型（黑箱模型）两种不同的方法分别介绍；第二部分（第4章）介绍了主流的能耗模拟软件，重点介绍应用于BIM和参数化设计的工具、云计算软件和区域建筑能耗模拟工具等；第三部分（第5章~第11章）针对建筑能耗模拟领域的热点问题进行深入讨论，包括建筑中人的行为、绿色建筑认证中的能耗模拟、区域尺度的建筑负荷预测与能耗模拟、空调系统仿真调适、需求响应与能耗模拟、联合仿真、面向对象的仿真。此部分在介绍相关理论和方法的同时，也给出了计算案例。

读者可以通过本书系统地掌握和了解建筑能耗模拟的基础理论、软件工具和具体应用，也可以结合自己的工作和兴趣单独阅读任何一个章节，了解此方面的最新研究和发展动态。

本书是本课题组多年从事建筑能耗模拟相关研究的汇总，在研究过程中得到多个国家级课题和国际合作课题的支持，其中包括：“十三五”国家重点研发计划专项项目“建筑全性能仿真平台内核开发”（项目编号：2017YFC0702200）。

本书主要编写人员有：潘毅群（第1、2、5、7章）、黄森（第10、11章）、刘羽岱（第4章）、殷荣欣（第9章）、李玉明（第6章）、朱明亚（第3章）、王秋涧（第8章）。其他参编人员包括（姓名以姓氏拼音排序）：侯丹琳、李诗尧、林美顺、刘海静、吕岩、潘媛、秦冰月、王尉同、谢建彤、徐蕾、杨陶、杨一昆、姚远、张洁。

潘毅群

2018年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 建筑性能仿真模拟	2
1.3 全建筑能耗模拟	9
1.4 通用工程软件	10
1.5 联合仿真	11
1.6 模型的检验 (validation)、验证 (verification) 与校验 (calibration)	11
1.7 总结与讨论	12
本章参考文献	12
第 2 章 建筑能耗预测理论基础	14
2.1 引言	14
2.2 负荷计算与热区模型	14
2.3 空调系统与设备模型	37
2.4 控制系统模型	55
2.5 负荷、系统、设备、控制的耦合	61
本章参考文献	65
第 3 章 数据驱动模型及应用	67
3.1 引言	67
3.2 模型概述	67
3.3 回归模型 (Regression Model)	69
3.4 时间序列模型 (Time Series Model, TSM)	72
3.5 机器学习算法模型	74
3.6 灰色模型 (Gray Model)	77
3.7 校验模拟 (Calibrated Simulation)	78
3.8 案例应用	83
本章参考文献	102
第 4 章 建筑能耗模拟软件及专业辅助软件	105
4.1 引言	105
4.2 主要能耗模拟软件介绍	105
4.3 能耗模拟云计算	118
4.4 参数化设计中的能耗模拟插件	126
4.5 自动寻优能耗模拟分析平台	131
4.6 建筑节能改造分析软件	141

4.7 区域尺度的负荷预测与能耗模拟软件	149
4.8 BIM 与能耗模拟	159
4.9 总结与讨论	165
本章参考文献	166
第5章 建筑中的人员用能行为模拟	169
5.1 引言	169
5.2 人行为研究方法	171
5.3 人行为模型介绍	177
5.4 DeST 人行为模拟	179
5.5 酒店建筑空调使用行为模拟案例	183
本章参考文献	189
第6章 绿色建筑认证中的能耗模拟	193
6.1 引言	193
6.2 绿色建筑认证体系介绍与比较	193
6.3 美国 LEED 绿色建筑评估体系和中国《绿色建筑评价标准》的比较	198
6.4 LEED 与 ASHRAE 90.1 的版本变迁	200
6.5 ASHRAE 节能要求与中国相关规范的比较	203
6.6 总结与讨论	205
本章参考文献	206
第7章 区域建筑负荷预测与能耗模拟	207
7.1 引言	207
7.2 区域建筑负荷与能耗预测的影响因素	207
7.3 区域建筑负荷预测与能耗模拟的方法综述	213
7.4 基于软件模拟和数据挖掘的区域建筑负荷预测	217
7.5 区域建筑负荷预测案例分析	219
7.6 区域形态与建筑能耗案例分析	228
7.7 总结与讨论	254
本章附录 典型建筑模型输入参数	255
本章参考文献	263
第8章 基于模型的空调系统仿真调适	264
8.1 引言	264
8.2 建筑系统调适	264
8.3 仿真调适的意义与可行性	266
8.4 针对调适的空调风系统仿真平台	267
8.5 空调风系统仿真调适方法	281
8.6 总结与讨论	284
本章参考文献	285
第9章 能耗模拟与需求响应	286
9.1 引言	286

9.2 建筑与需求响应 296

9.3 建筑需求响应的计算模型与案例分析 301

9.4 总结与讨论 315

本章参考文献 315

第 10 章 联合仿真 319

10.1 引言 319

10.2 联合模拟的核心问题 320

10.3 联合模拟的具体案例 324

10.4 总结与展望 327

本章参考文献 327

第 11 章 面向对象，方程驱动仿真 328

11.1 引言 328

11.2 面向对象仿真的特点 328

11.3 方程驱动仿真特点 330

11.4 与传统过程驱动仿真的比较 330

11.5 案例分析 331

11.6 总结与展望 335

本章参考文献 335

附录 书中部分彩色图片 337

本书主要作者简介 365

第 1 章 绪 论

1.1 引言

随着我国城镇建设的飞速发展和人们对建筑环境要求的不断提高，建筑能耗不断增加。2016 年建筑运行的总商品能耗为 9.06 亿 tce，约占全国能源消费总量的 20%。目前我们面临各种前所未有的挑战和变化，全球气候变化与化石能源紧缺问题越发严重，而人们对室内环境品质的需求不断提高。如何设计出满足使用者各种需求的可持续建筑并使其高效率地运行？如何设计出能够应对未来挑战和需求的健康建筑？目前国内外的大量研究表明，建筑的实际运行能耗及其营造的室内环境不仅受到建筑物本体和采用的节能技术影响，也受气象条件、人居行为、围护结构、设备系统和控制策略等众多因素的共同作用与影响，而这些因素相互之间的作用是动态的且非常复杂的，如图 1-1 所示。正因为如此，迫切需要建筑性能模拟（Building Performance Simulation, BPS）对建筑围护结构、热湿环境及机电系统的运行能耗进行分析和计算，并预测和诊断建筑物在运行中可能出现的故

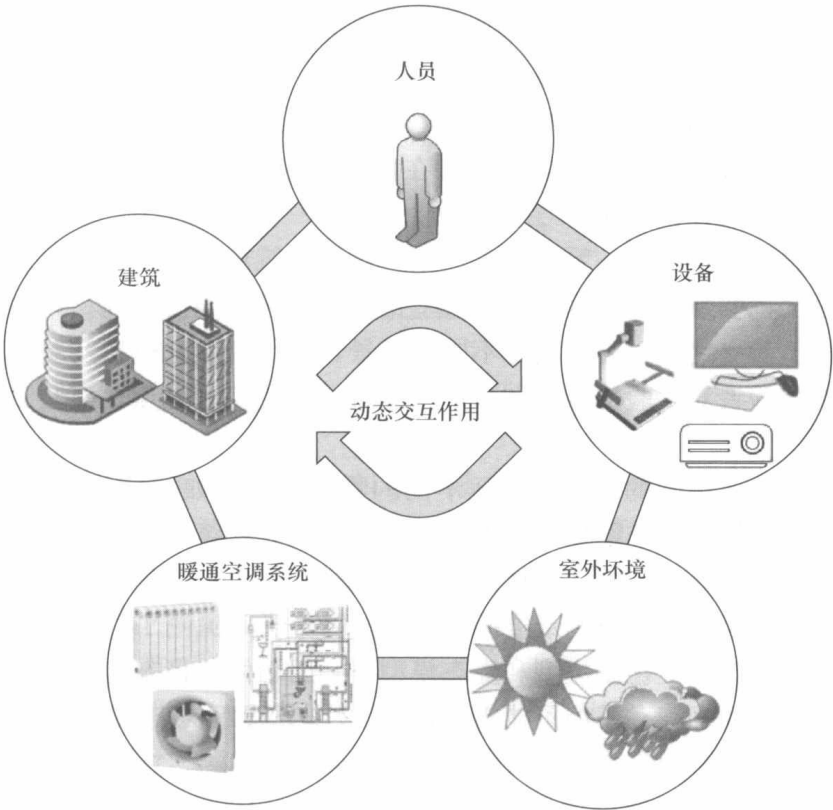


图 1-1 建筑子系统的动态交互作用

障与问题。

建筑性能仿真模拟对我国绿色建筑的发展,实现节能减排的目标具有重要的推动作用。这种重要作用不仅体现在建筑设计阶段对建筑性能参数及节能技术的应用进行评估分析,更体现在建筑运行过程中对建筑能源设备的管理、调适和控制以及建筑节能改造过程中对改造方案的适宜性和经济性分析中。建筑性能仿真模拟贯穿建筑的全生命周期,对建筑节能工作具有重要的基础性意义。

1.2 建筑性能仿真模拟

建筑在发挥其美观的作用和技术功能之外,同时也是一个复杂的系统,这个系统由多个“子系统”构成,包括建筑结构、围护结构和建筑设备等。这些“子系统”相互协作来保证建筑实现全方位的功能,从其最初的为人们“遮风避雨”到提供舒适健康的居住和工作环境。建筑的“性能”是个多角度的动态概念,包括建筑外观的展示性能、抵御外界气候的性能、功能空间的使用性能等。在本书中,建筑性能主要是指其工程技术性能,即在满足建筑环境要求的基础上尽可能地降低建筑运行能耗以实现建筑节能,提高建筑能效,以应对日益紧缺的能源现状。

建筑性能的预测和评价可以采用两种方法:一是通过实测和实验,即对实际建筑在正常运行工况下进行直接测量。然而多数情况是一幢建筑仅有部分系统具备直接测量的条件,其他部分可能需要在实验室里完成测量。而将建筑整体放到实验室中进行测试,由于费用太高,往往很少进行。另一种方法是模拟计算,即采用数学模型对实际建筑和系统的物理特性进行描述,从而对建筑的性能进行预测和评价。模拟的方法无需进入实际建筑就能远程完成,既可以用于评价还在设计中的虚拟建筑,也可以计算和分析相同工况下成千上万的变量,这都是实测与实验很难做到的。即使是实测可以完成的工作,模拟仿真所需的费用、人力和时间成本往往低很多,而且在比较大的空间尺度(如区域或城区),模拟仿真可能是唯一可行的评价方法。

建筑性能仿真模拟要采用一系列数学模型,对于建筑物的基本物理原理进行描述和表达,且必须遵循工程实际情况。这些数学模型构成了建筑性能仿真模型,仿真和模拟建筑的真实情况。模型建立之后,可以设定不同的情景,进行一系列模拟实验,其方法与物理实验相似,需要实验者对实验进行规划,设定建筑、系统、测试点、实验工况,并且遵循相关标准。

建筑仿真模型具有不同的形式,表达不同的物理过程,如热质传递、声学、光照等,其包含的数学模型有线性或非线性、静态或动态、离散或连续、确定性或随机性等不同类型。模型可以是建筑的一个构件如墙体的一维传热模型,也可以是一整幢建筑及其系统的模型。建筑仿真模型可以根据时间或空间的尺度进行分类(见图 1-2),根据其与时空的相关性可以分为稳态模型、准稳态模型和瞬态模型。一面墙体的稳态传热模型需要建立一个方程组并进行求解,而准稳态模型可能需要建立 12 个方程组代表一年的 12 个月,瞬态模型则要进行逐时求解,一年就是 8760h。

另一种分类方法是将模型分为黑箱模型(black box)、灰箱模型(grey box)和白箱模型(white box),如图 1-3 所示。数学模型是输入和输出之间的联系。在黑箱模型中,

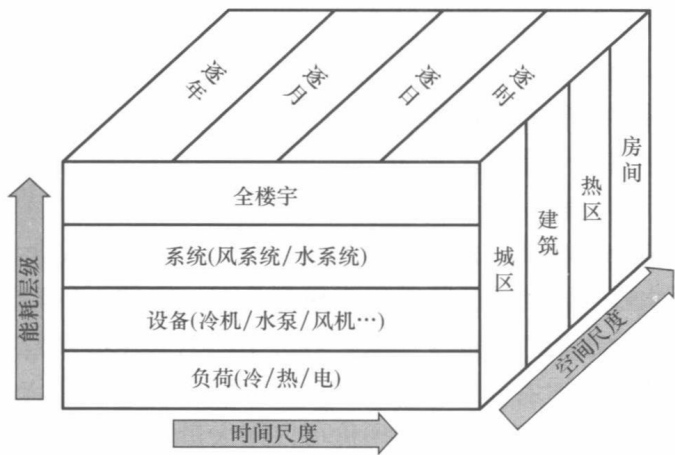


图 1-2 建筑仿真模型的时空尺度和层级

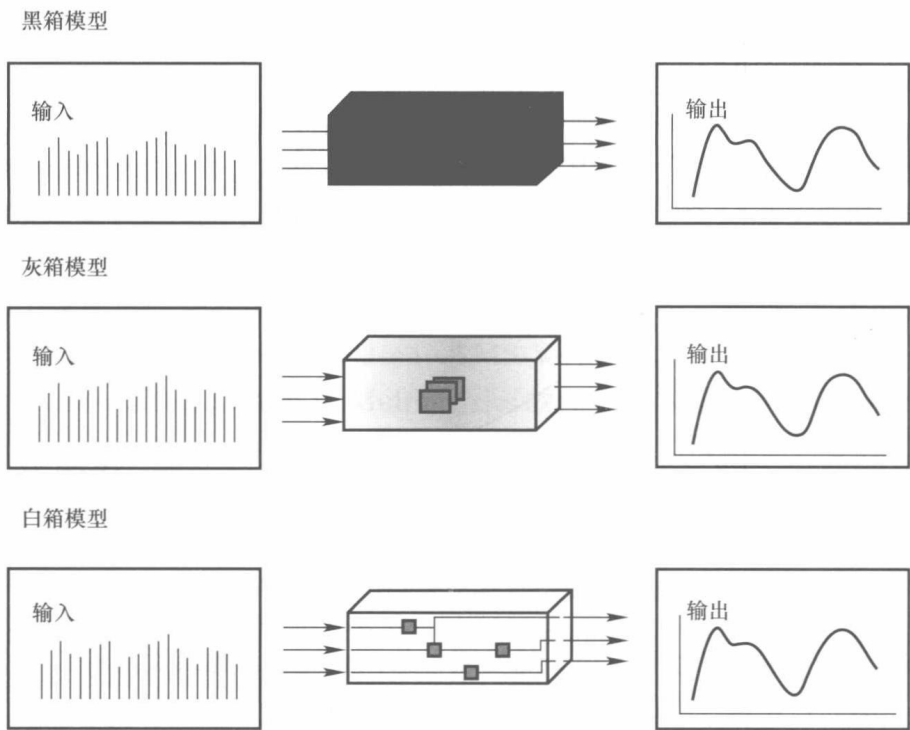


图 1-3 黑箱、灰箱和白箱模型

输入和输出之间的关系通过统计方法或机器学习方法得到，没有任何物理原理，常用的方法有回归和神经网络。灰箱模型中，可以获知一部分物理原理，但是特性参数和变量关系仍然需要通过统计的方法得到。白箱模型中则所有的物理原理和过程都是可以获知的，因此可以建立输入和输出之间的物理模型。白箱模型也被称作“玻璃模型”或显式模型，而黑箱模型则被称为隐式模型。

建筑的复杂性不仅体现在建筑本体及其系统上，也体现在其外扰和内扰的复杂性上。在建模的过程中往往要对实际的复杂情况进行一定的简化，从而求解复杂问题。然而，仿真模拟也不是万能的，以下情况就不适合采用模拟：

- (1) 用解析法就可以求解；

- (2) 用简单的实验和测试方法就可以求解；
- (3) 建模的费用超出预算；
- (4) 无法获取足够、充分的数据和资源用于建模；
- (5) 没有足够的时间用于建模；
- (6) 模型无法验证和校验；
- (7) 系统过于复杂，很难描述。

对实际问题的简化过程，必然会使得仿真模型具有一定的不确定性。仿真模型是设计方案的理想情况，而实际建筑的运行极少能够与仿真模型一样，模型与实际之间的差距主要包括模型的不确定性、实际运行与假设的不同、物性参数的变化、系统和设备的性能衰减、维护与保养等。最终实际建筑的性能评价可以用大量仿真模拟结果的分布来评价。需要明确的是，并非模型越详细越复杂，就可以得到更加准确的结果。模型越复杂，则包含更多需要估计的参数，模拟误差增大的风险也可能越大（见图 1-4）。

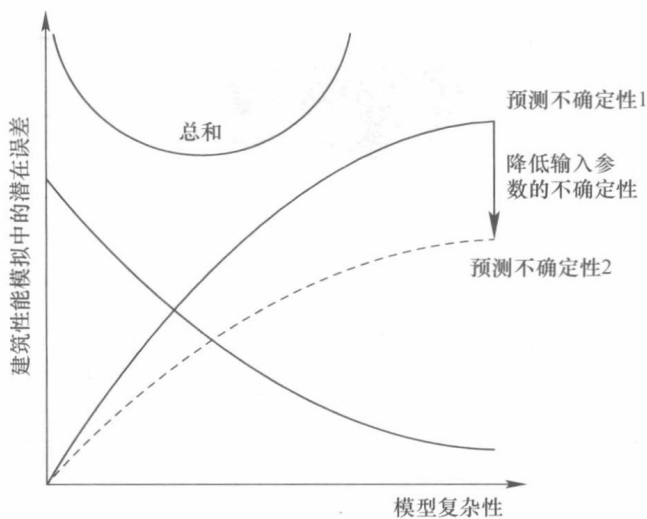


图 1-4 模型的复杂性与模型的不确定性之间的关系

建筑模拟近几十年来已经有了很大的发展，并且已经成为建筑性能评价和分析的主要方法和工具。然而，建筑模拟仍然面临着一些挑战和困难：

(1) 模拟与实测之间的差距。其原因包括模型的不确定性、工具的缺陷、模拟人员的错误等。由经过培训的专业人员来完成模拟工作，模型的输入根据实际的建筑数据并采用实时监测数据和能耗账单进行校验，可以减少模拟的误差。

(2) 建筑中人的行为是造成模拟与实测的差距的一个非常重要的原因。而对于人员在建筑中的移动和动作进行预测是非常困难的。最近刚刚完成的国际能源署（IEA）Annex66 项目对这个问题进行了研究。

(3) 不同模拟环境之间的数据分享和交互。很多的研究工作致力于开发可以互换数据的交互模型，而建筑信息模型（Building Information Modelling, BIM）可以将不同的模拟环境连接起来。

(4) 建筑技术的革新与发展也给仿真模拟带来挑战。高大中庭空间、特殊的几何外形、复杂的遮阳系统、部分埋入地下的建筑、新型空调系统，都给建模带来难度。有些问

题目目前的模拟工具已经无法胜任，需要新的模拟工具的开发。

建筑性能仿真模拟涉及建筑的各个方面，从建筑物理（声、光、热）到建筑内部和周围的气流、建筑设备和系统，再到建筑中的人以及建筑火灾和结构模拟等。

1.2.1 声学模拟

建筑声学模拟主要解决建筑内部及周边的包括噪声在内的声学 and 声环境评价问题。建筑室内声环境设计与评价不仅在音乐厅、剧院、报告厅等特殊空间需要，在一些普通的空间，如起居室、开放办公室、图书馆阅读室、候诊室等，也同样需要。建筑周边的噪声环境对建筑室内声环境有直接影响。在对室内声环境的模拟研究中，常用的做法是将建筑空间表示为具有特定吸收特性的表面集合。考虑其他属性（例如质量和刚度）的模型常用于探讨声音通过建筑结构的传播。用于建筑声学模拟的建模方法主要有：几何模型（Geometrical model）、波函数模型（Wave-based models）和扩散方程模型（Diffusion equation models）。其中，几何模型是根据声音沿直线传播这一概念建立的，也叫射线模型，其具体方法包括：图像源模型、粒子追踪、射线追踪、金字塔追踪、圆锥追踪和辐射度模型；波函数模型则是利用偏微分方程对声波在介质中的传播进行描述；扩散方程模型描述了声能如何传播。模拟结果主要以单点或多点声源下的声场特性描述的形式呈现。近期对于声学模拟的研究主要集中在以下两个方向：（1）“声景观”，即通过声学模拟，建立积极声场，减少噪声干扰；（2）“可听化”，实现声音的预测与复现。

目前用于建筑声学模拟领域的声学软件包有：CATTAcoustic, Enhanced Acoustic Simulator for Engineers (EASE), Odeon, LMS VirtualLab Ray Acoustics, OTL-Suite/Room 和 LMS Raynoise。COMSOL Multiphysics 软件中的声学模块也可支持声学模拟。

1.2.2 光照模拟

光照模拟由自然采光和人工照明模拟组成。由于需考虑室内外环境的交互作用、人员与系统行为以及视觉舒适性、心理、感知等因素，光照模拟存在其固有的复杂性。光照模拟的目标是基于物理定律，得到反映真实照度的渲染图，其主要采用的方法是光线追踪法与光能传递法。光线追踪法遵循光的传播路径，按起始点的不同，分为起始点为光源的前向追踪、由观测点向光源路径追踪的后向追踪和两者结合的双向追踪；光能传递法与辐射换热模型类似，将空间分成若干小容积，并计算这些小容积的辐射能量交换形状因子，利用光源的强度及整个空间内辐射能量守恒来计算每一个小容积的辐射强度。总体而言，对于通过透明材料直射、镜面反射和折射的情况，光线追踪法应用性较好。然而，当处理漫反射时，光线追踪法复杂且计算成本高。

进行光照模拟时，首先需要对研究对象的几何特性进行建模，这一步通常在 CAD 或 BIM 中完成。然后需要确定模型中各表面的相关属性，例如反射率与透射率。对于人工照明的模拟，需要定义人工光源的位置、光源及灯具的属性，以及相关操作参数，例如时间表与照明水平。对于自然采光的模拟，一个重要的建模步骤是对天空模型的选择或定义。常见的做法是采用现有的参考天空模型，例如 CIE 标准天空模型，或使用测量数据。通过照明模拟，可得到一系列照明性能指标，例如全自然采光百分比（DA）、空间全自然采光百分比（sDA）和有效自然采光照度（UDI），以上指标可用于量化自然采光的质量。除

除此之外,模拟可得到眩光等级(UGR)、日光眩光指数(DGI)和日光眩光概率(DGP),用于预测与防治眩光。

光照模拟工具包括 AGi32, Adeline, DELight, DIALux, DIVA, Inspirer, Lightscape, Lightsolve, Lightswitch, Mental Ray, Radiance, Relux, Zemax OpticStudio, 3ds Max 和 Velux Daylight Visualizer。此外还有一些专业工具,用于透镜、光导管等光学元件及系统的模拟。这些工具中, Radiance 功能多样且使用广泛,因此有一系列接口与预处理程序,包括 Daysim, Desktop Radiance, LightSketch 和 Fener。Ecotect 有时也会被列入照明模拟工具,但实际上它是一种可访问各种分析引擎的早期设计工具。

1.2.3 热湿传递模型 (HAM, Heat and Moisture)

虽然一些研究将建筑热过程与湿过程单独进行讨论,但在许多情况下(例如建筑结构的表面或间隙可能存在结露风险,水汽的存在可能导致结构材料性能的显著变化,从而引发霉变、膨胀、开裂、热损增加等问题)需要综合考虑建筑热湿传递的相互影响,此类模型即为热湿传递模型,主要基于对基本的能量与质量方程的求解。一般而言,热湿模型使用偏微分方程对进入系统、离开系统以及系统内积累的热与湿进行数学描述,同时考虑热湿的产生与消耗,遵守经典的能量和质量守恒定律,建立等式关系。其中,由于湿度传递存在一系列复杂过程,包括:毛细运动、相变、吸附、吸收和解吸,对湿传递的建模存在困难。由于热湿传递发生的时间尺度存在一定差异,加之两者存在复杂的相互关系,对于热湿传递过程的模拟在计算上也存在困难。在模拟工具应用之前,对于建筑构件的结露风险评估通常采用 Glaser 图或露点法,将水蒸气分压力与饱和蒸汽压力绘制在建筑中以辨别结露高危区域。模拟工具则考虑了更多的因素,包括毛细管流动、吸附、水汽扩散与材料属性变化等。然而在实际情况中,湿过程往往是复杂且难以用标准的值与方法描述的,大多建筑构件与设计也有较大偏差,给模拟工作带来了困难。

一些专用的 HAM 模拟工具包括: Delphin, HAM-Tools, HAMVIE, Match 和 WUFI。由于 HAM 模型结合了各个领域,一些通用的工程工具也可用于热湿模拟,例如 Matlab/Simulink 和 COMSOL Multiphysics。

1.2.4 计算流体力学模型 (CFD, Computerized Fluid Dynamics)

在建筑模拟领域内,对于部分通风与渗透的问题可采用较简单的节点模型或区域模型(也称为多区域模型)解决。CFD 模型常用于对建筑内部及周围流场与温度场的模拟,求解气流与温度分布、污染物扩散等问题。由于 CFD 模型能够将可能的影响因素,例如浮力、分层及紊流考虑在内,其准确度较上述简单模型有所提升。CFD 模拟通常基于 Navier-Stokes 运动方程(N-S 方程),包含一系列模型:雷诺时均 N-S(RANS)方程、大涡模拟(LES)、分离涡流模型(DES)和直接数值模拟(DNS)等。模型的选择视具体流体运动过程与特性而定。

CFD 建模时,首先需要对研究对象的几何特性进行描述,其研究对象从室内空间到城市微环境,各个尺度均有涉及。其次,对控制体内的流体进行离散化处理,该过程称为网格划分。由于 CFD 是计算密集型的,网格的定义与分辨率对计算结果有重要影响,因此如何通过合理的网格划分实现空间分辨率与时间尺度之间的平衡是该过程的难点,目前主

要可通过网格独立性检验和使用专用网格生成工具包实现网格的合理划分。之后,需要对 CFD 模型的边界条件进行定义,包括对入口参数、温度效应的设置以及对表面空气动力学粗糙度的定义。CFD 建模的关键步骤在于选择合适的湍流模型,常见的有 $k-\epsilon$ 湍流模型,进一步的湍流模型有 $k-l$ 模型, $v2f$, LVEL, RSM 和 $k\omega$ -SST (剪切应力传输) 模型。除此之外,建模者还必须确定建筑开口、烟囱等影响气流的因素,例如建筑内部的热源情况等。

建筑模拟领域中常用的一些 CFD 软件包包括: ADREA-HF, FloVENT, PHOENICS, STAR-CCM+ 和 OpenFoam。工程分析软件 ANSYS 内置专用的 CFD 工具,其中 CFX 和 Fluent 常用于建筑模拟。

1.2.5 行人移动(疏散)模型

对于建筑内部人员与建筑周围行人移动的模拟是建筑模拟中一个独特的领域。行人移动模型一般分为两种模式:正常移动和紧急情况下的移动,后者多用于建筑内人员疏散的研究。

1. 正常行人移动

对正常情况下行人移动模型的研究目的包括舒适性、效率评价和行人安全的风险评估等。模拟结果可用于指导建筑空间设计、安全出口数量与位置规划以及险情规避等。人员移动的模拟应真实反映个体的行为以及个体与环境、个体与个体之间的交互和影响。由于人员行为受个体的多样性、差异性,群体的同一性、社会性和智能性以及空间结构的影响,对行人移动行为的模拟需综合考虑相关问题,例如人员活动路线,速度、人群密度及生理与心理问题,存在一定复杂性。目前用于模拟行人移动的模型主要有:元胞自动机模型(CA)、社会力模型、智能体模型、网络流模型、流体动力学模型和气体动力学模型。其中,元胞自动机模型、社会力模型和智能体模型属于微观模型,侧重于个体行为的真实性与多样性;其余模型属于宏观模型,侧重于整个群体的真实性,将人群的移动描述为由一定规则和关系控制的粒子系统。从空间和时间分辨率的角度,这些模型还可以分为离散模型和连续模型。许多模型采用多层结构,例如运动层和决策层,对行人移动行为进行多维度描述;也有模型对特定移动行为进行描述,例如排队模型;除此之外,还有导航图、路由算法、转向算法和信念—愿望—意图(BDI)模型。这些模型的底层算法包括最短路径算法、 A^* 算法和蚁群算法等。

可模拟正常情况下的行人移动的工具包括: Aseri, Crowd-Z, Legion, Nomad, PedGo, SimWalk, VisSim (包括 VisWalk) 和 Witness。也可以使用通用工程工具对行人运动进行模拟,例如,Stroboscope 离散事件模拟软件。

2. 疏散模型

研究疏散行为的主要目的是降低火灾、恐怖袭击、自然灾害等突发极端事件下的疏散风险,保障人员健康与安全。通常疏散模拟的目标是得到某建筑物的疏散时间,判断人群是否能安全疏散。与正常情况下的行人移动不同,疏散过程往往由一系列时间上连续的事件组成,在此过程中,人群恐慌与竞争性疏散将对安全疏散造成障碍;大部分人员对疏散路径与空间连接关系都缺乏全局认知,基于掌握的局部信息,仓促做出逃生决策;人员在疏散过程中可能参与建筑及事故的互动,例如尝试灭火;随着时间推移,人员健康和移动

能力面临更高的风险。与正常情况下的行人移动相似的是人员也需要对疏散的路径、速度以及与他人、障碍物的互动做出决策。

对于建筑内部疏散的模拟大多数采用宏观模型,即只关注总体情况和平均疏散速度。对于个体行为,例如个体在低能见度和障碍物情况下的反应以及人员在疏散过程中的推拉踩踏行为则需要使用耦合模型进行描述。在建模时,首先需要确定事故情景,并进一步细化情景。建模者需要决定研究关注个体行为还是群体,从而选择合适的模型以及是否需要使用耦合模型,还需要对建筑内部人员在疏散过程中的行为特征进行定义,并设定其中某些行为特征与环境条件的关系。在某些情况下,建模者还需确定恐慌在人群中传播的方式。

相关模拟工具有: AIEva, BGRAF, Defacto, DBES, Escape, Egress, EgressPro, ESM, Evacnet, Evacsim, Exit, Exodus, F. A. S. T, Simsite, Simulex, Steps, Timtex 和 Wayout 等。

1.2.6 火灾模拟

火灾模拟是一个专业性较强的领域,其物理原理与其余建筑模拟领域存在部分重叠,尤其是热力分析与气流模型部分。但整个模拟过程与其余建筑模拟有明显区别。火灾模拟需对着火、火灾发展、闪燃、大火阶段、最后火灾扑灭全阶段进行模拟。其间温度往往远高于供暖与制冷的温度范围,且温度梯度对于火灾的发展有重要作用。建筑材料和建筑内部物品作为火灾的燃烧物,随着时间推移,逐渐耗尽。火灾模拟还可对烟雾在建筑物内的传播进行模拟,一些火灾模拟软件可以实现区域与城市尺度的模拟。

专用的火灾模拟工具有: ASET, Consolidated Model of Fire, Growth and Smoke Transport (CFAST), Fire Dynamics Simulator (FDS), FireFOAM 和 SCHEMA-SI。还有专门的火灾风险评估工具,如 CRISP2 和 FiRECOM。

1.2.7 结构模拟

负荷对建筑结构的影响也是模拟应用较为广泛的研究领域,对于分析建筑物的承载能力(强度、刚度与稳定性)及其寿命具有重要作用。该领域探讨建筑构件在负荷作用下发生拉压、剪切、弯曲、扭转及各种组合动变形和动应力响应,以及它们发生屈曲、疲劳、损伤和断裂失效的机制与评价准则。结构模型的建立通常基于有限元分析(FEA),该方法将复杂结构通过单元划分和分片插值进行离散,再组装,通过能量泛函的变分求解偏微分方程组的数值解。建模者需要对具体问题选用恰当的分析模块,需要对建筑物的几何形状和材料属性进行定义,部分软件允许从 BIM 模型中导入相关数据。此外,还需要对作用于建筑的负荷进行定义,通常有以下负荷类别:静荷载,与永久荷载有关,例如结构本身重量;活荷载,与人或家具造成的可变荷载有关;环境荷载,由雪、雨水、风、霜冻、热膨胀和地震活动引起;其他荷载,可能包括火灾或爆炸的影响。更详尽的结构分析可能还包括腐蚀、疲劳和损伤对结构性能的影响。

结构模拟软件包括: Abaqus, Adaptic, ADINA, ANSYS Mechanical, Autodyn, Calrel, Comet, FEAP, LS-DYNA, midas FEA, MSC Marc, Nastram, OpenSees, OpenSHA, Perform-3D, SeismoStruct, SimScale, SolidWorks 和 VisualFEA;通用工程软件在结构分析领域也有广泛的应用。