

国家“985工程”三期清华大学人才培养建设项目资助

建筑外环境 模拟技术与工程应用

李晓锋 林波荣◎著

中国建筑工业出版社

国家“985工程”三期清华大学人才培养建设项目资助

建筑外环境模拟技术与工程应用

李晓锋 林波荣 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑外环境模拟技术与工程应用/李晓锋, 林波荣
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 10

ISBN 978-7-112-16299-4

I. ①建… II. ①李…②林… III. ①建筑设计-环境设计-环境模拟-研究 IV. ①TU-856

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 012460 号

责任编辑: 齐庆梅

责任设计: 李志立

责任校对: 陈晶晶 张 颖

建筑外环境模拟技术与工程应用

李晓锋 林波荣 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

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15 $\frac{1}{4}$ 字数: 376 千字

2014 年 10 月第一版 2014 年 10 月第一次印刷

定价: 60.00 元

ISBN 978-7-112-16299-4
(25041)

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)

前 言

世界各国目前正处于一个高速的城市化进程之中。据预测,到 2025 年,世界城市人口将增至 50 亿,而 61% 的世界总人口将居住在城市中。与此对应,我国的城镇化进程目前也处于一个高速发展阶段。到 2030 年,将有大约 10 亿中国人居住在城市。届时,中国的城市化率将达到 60%,中国将出现 221 座百万以上人口的城市,这其中还包括 23 座五百万以上人口的超大型城市。为解决城市中众多新增人口的居住和工作问题,新建大量的城市建筑将成为必然趋势。

随着城市建筑越来越多,电器和空调的使用也越来越普遍,向室外空间释放大量的人为热,城市中心的人为排热不能有效地释放到上层大气中,从而造成城市中心的空气温度高于郊区,形成了城市热岛现象。城市热岛现象一方面增加了夏季的空调负荷,另一方面对居民的安全健康也有不利的影响。据统计,室外的高温环境将导致中暑、心血管病等疾病的发病率显著增高。因此有必要对室外风环境和热环境的预测及改善技术进行深入研究。

目前国内外针对建筑周边风环境的研究成果较多,已有较为成熟的模拟方法,但由于国内建设周期普遍较短,现有研究成果无法完全满足工程应用需要;而针对热环境的研究多偏重于基础理论研究,且缺乏统一的模拟方法和系统的模拟体系,难以直接应用于解决实际工程问题。因此有必要提出一套系统的模拟方法,既保证模拟计算的精度,又能有效降低模拟计算量,以满足实际工程应用的需求。

清华大学在建筑外风环境、热环境领域开展实验与模拟研究已有十余年之久,本书将以清华大学建筑学院建筑技术科学系多年的研究成果为基础,对建筑外环境模拟相关的研究成果进行系统总结。书中将针对建筑绕流模拟方法、长波辐射与短波辐射计算方法、植物和喷泉等特殊边界条件的处理方法、流动传热辐射耦合模拟方法、室外环境评价方法等问题,从建筑外环境模拟理论和建筑外环境工程实践两方面,为相关领域的学者、设计人员提供相应的技术参考。

书中相关研究,自 1999 年以来就得到了包括国家重点自然科学基金“住区热环境的热物理问题研究(1999-2004)”的支持。而本书的出版,要特别感谢科技部“十一五”重大科技支撑课题“城镇居住区景观绿化与热岛效应改善关键技术研究”、“建筑节能设计方法与模拟分析软件开发”的支持。

目 录

第 1 章 研究现状	1
1.1 现场测试分析评价	1
1.2 计算机模拟评价	3
1.2.1 风环境模拟	3
1.2.2 热环境模拟	4
1.2.3 植物与水体的模拟研究	5
1.2.4 室外热舒适相关的模拟研究	6
1.3 研究现状总结	6
1.4 本书的主要内容	7
第 2 章 建筑绕流模拟方法	9
2.1 湍流模型	9
2.1.1 流体流动的控制方程	10
2.1.2 标准 $k\epsilon$ 模型	11
2.1.3 标准 $k\epsilon$ 模型的缺陷及其改进模型	12
2.1.4 0 方程模型	13
2.2 边界条件	15
2.2.1 来流梯度风	15
2.2.2 来流湍流动能与湍流耗散率	16
2.2.3 壁面边界条件	17
2.3 本章小结	18
第 3 章 长波辐射与短波辐射计算方法	19
3.1 直接交换面积的计算方法	19
3.1.1 射线的发出	19
3.1.2 发出点	20
3.1.3 发射方向	20
3.1.4 射线飞行轨迹的计算	20
3.1.5 直接交换面积计算	21
3.1.6 直接交换面积的对称化	21
3.2 全交换面积的计算方法	22
3.3 太阳辐射的计算方法	23
3.3.1 太阳直射辐射	23

3.3.2	天空散射辐射	24
3.3.3	街区内短波辐射的相互反射及日射得热量	24
3.4	辐射计算方法的室外应用分析	24
3.4.1	计算准确性检验	24
3.4.2	大尺度网格问题分析	25
3.4.3	网格数、射线数量与误差关系	28
3.5	本章小结	29
第4章	特殊边界的处理——植物模型	30
4.1	三维植物冠层流动模拟体系	30
4.1.1	物理模型	30
4.1.2	风洞实验	31
4.1.3	模拟说明	32
4.1.4	结果分析	32
4.2	冠层模型源项中经验参数研究	34
4.2.1	关于源项模型中的经验参数 CPE 的讨论	34
4.2.2	不同 C_{PE1} 、 C_{PE2} 取值下的模拟结果讨论	35
4.2.3	拽力系数的选择	36
4.3	不同形状冠层剖面流动模拟的分析	37
4.3.1	模型描述	38
4.3.2	计算结果分析	38
4.4	植物冠层的热辐射	39
4.4.1	长波辐射	40
4.4.2	短波辐射	40
4.5	包含植物冠层的通用辐射计算体系	41
4.5.1	基本假设	41
4.5.2	辐射计算模型	41
4.6	植物的热质交换模型	42
4.6.1	叶片与空气的对流热交换	43
4.6.2	蒸散潜热计算	43
4.7	本章小结	43
第5章	特殊边界的处理——喷泉模型	45
5.1	水珠与空气的热质交换过程	45
5.1.1	准稳态蒸发过程分析	45
5.1.2	预热阶段计算	47
5.1.3	预热阶段对流对蒸发的影响	48
5.1.4	在强制对流情况下水珠的温度与直径变化	49
5.1.5	物性参数计算	49

5.1.6 单水珠蒸发过程的实验验证	50
5.2 水珠在空气中的运动	51
5.2.1 基本运动方程	51
5.2.2 拉格朗日时间步长	52
5.2.3 随机湍流模型	52
5.2.4 水珠方程的求解	53
5.3 PSI-CELL 模型	53
5.3.1 PSI-CELL 模型介绍	53
5.3.2 PSI-CELL 模型连续态公式	54
5.3.3 水珠源项公式	54
5.4 水珠平均直径和直径分布	55
5.4.1 水珠平均直径参数	55
5.4.2 水珠直径分布函数	55
5.4.3 平均水珠速度	57
5.4.4 SMD 计算	58
5.5 直管射流边界条件	58
5.5.1 直管射流破碎的基本机理	59
5.5.2 直管射流的模式	60
5.5.3 直管射流破碎的过程	61
5.5.4 小结	64
5.6 喷泉模拟	64
5.6.1 模拟模型	64
5.6.2 模拟的气象边界条件	66
5.6.3 模拟的射流边界条件	67
5.6.4 模拟结果与实验对比	68
5.7 喷泉联合模拟方法	70
5.7.1 联合模拟方法	71
5.7.2 显热交换统计方法	72
5.8 本章总结	72
第 6 章 流动传热辐射耦合模拟方法	73
6.1 模拟方法的总体思路	73
6.2 热平衡模型	74
6.2.1 热平衡方程	74
6.2.2 太阳辐射得热量	74
6.2.3 长波辐射换热量	75
6.2.4 固体导热量	76
6.2.5 对流换热热量	77

6.2.6 潜热得热量	78
6.2.7 方程组的求解	78
6.3 空气流动与固体表面热平衡耦合计算方法	78
6.4 模拟方法实验验证	79
6.4.1 模拟条件	79
6.4.2 模拟与测量结果比较	81
6.4.3 小结	85
6.5 本章总结	85
第7章 层次化住区微气候模拟分析体系	86
7.1 模拟模式分析与讨论	87
7.1.1 计算模型说明	87
7.1.2 低风速单栋建筑土壤地表模拟	88
7.1.3 高风速单栋建筑土壤地表模拟结果及比较	90
7.1.4 低风速单栋建筑草坪地表模拟结果及比较	91
7.1.5 低风速多栋建筑土壤地表模拟结果及比较	94
7.1.6 小结	95
7.2 湍流模型比较与分析	96
7.2.1 低风速单栋建筑土壤地表模拟结果及比较	96
7.2.2 高风速单栋建筑土壤地表模拟结果及比较	98
7.2.3 不同流场计算模型比较	98
7.2.4 小结	100
7.3 本章总结	100
第8章 室外环境的全年模拟方法	101
8.1 “全年”范畴下的研究先例	103
8.2 全年风环境模拟的实现	104
8.2.1 风速场计算的简化假设	105
8.2.2 全年风速场计算的实现	110
8.2.3 SPOTE 流动计算模块的完善	111
8.3 全年热环境模拟的实现	115
8.3.1 辐射计算体系的简化	115
8.3.2 对流换热的计算方法	119
8.3.3 平均辐射温度的计算方法	120
8.4 全年耦合算法的实现	120
8.5 本章小结	121
第9章 室外环境评价方法	122
9.1 评价指标的选取	122
9.1.1 直接从环境参数评价舒适性的方法	122

9.1.2 综合评价指标	123
9.1.3 SET 与 PET 的对比分析	124
9.1.4 评价指标选取小结	127
9.2 室外环境的“舒适性”	127
9.3 最优化服装热阻的提出	128
9.3.1 最优化服装热阻的计算方法	128
9.4 一些特殊气象条件下的最优服饰	131
9.5 适用于全年评价的热舒适指标	132
9.5.1 舒适小时数	132
9.5.2 不舒适度时数	132
9.6 本章小结	132
第 10 章 居住区风环境模拟应用	134
10.1 AIJ 和 COST 的推荐设定	134
10.1.1 AIJ 推荐设定的背景	135
10.1.2 COST 推荐设定的背景	135
10.1.3 AIJ 和 COST 的推荐设定汇总	136
10.1.4 不同计算要素的研究	138
10.1.5 设定推荐汇总	148
10.1.6 简单小区算例验证	149
10.2 小区风环境模拟实例	152
10.2.1 主导风速和风向的选择	152
10.2.2 初始方案模拟结果	153
10.2.3 修改方案模拟	159
10.3 本章总结	167
第 11 章 建筑表面风压系数模拟应用	168
11.1 建筑表面风压系数理论基础	168
11.2 典型建筑表面风压系数模拟	168
11.2.1 计算工况	169
11.2.2 模拟结果分析	170
11.2.3 小结	196
11.3 标准建筑法	198
11.4 三基本算例法	198
11.4.1 三个基本算例	198
11.4.2 影响因素	198
11.4.3 前后间距修正方法探讨	199
11.5 本章小结	201

第 12 章 居住区热环境影响因素模拟分析	202
12.1 居住区住宅形式选择	202
12.2 定容积率的建筑排布	204
12.3 居住区绿化形式及布局	206
12.4 下垫面铺装对热环境的作用	210
12.5 居住区周边环境	211
12.5.1 上游地块	211
12.5.2 居住区周边道路	213
12.5.3 居住区上游水体	215
12.6 本章小结	216
第 13 章 居住区热环境优化设计导则的实践应用	218
13.1 小区背景资料简介	218
13.2 小区建筑设计	219
13.3 植物布局设计	222
13.4 本章小结	223
参考文献	224

第1章 研究现状

为了营造一个优质舒适的建筑外环境,世界各地政府建立了一系列相关的评价标准与设计导则。由美国绿色建筑协会建立的 LEED 评价体系的子系 LEED 绿色社区认证体系^[5]中关于改善室外热环境的条款,要求在 50% 以上的项目非屋面区域使用高反射涂料/材料等措施,或在 50% 以上的项目屋面区域采用屋面绿化,或二者之和超过项目占地面积的 50%。而在日本的建筑环境综合性能评价体系 CASBEE 中专门为室外热环境建立了 CASBEE-HI^[6]评价体系,以辅助设计师设计出更优质的室外热环境。在我国的《绿色建筑评价标准》^[7]中,对住宅和公建的室外环境舒适性均提出了评价标准,要求住区室外日平均热岛强度不高于 1.5℃ 且住区风环境有利于冬季室外行走舒适及过渡季、夏季的自然通风,要求公建建筑物周围人行区风速低于 5m/s,不影响室外活动的舒适性和建筑通风。然而目前这些评价体系多为指导性准则,所以其实并不能给出具体的设计建议,某些条款实施起来也有一定的难度与模糊性。因此对每一个设计案例进行具体问题具体分析仍然是最有效的设计方法。

优秀的设计方案可以在固有的自然环境与城市环境下,通过合理的组合绿化、下水面、水体、遮阳、建筑排布等将社区内的室外热环境进行优化,然而如何评判该设计方案的优劣是一个很难回答的难题,必须寻求一种合适的研究模式。目前对社区热环境及热舒适性的研究主要有两种研究模式:(1) 现场测试分析评价;(2) 计算机模拟评价。

1.1 现场测试分析评价

对于已经建成的小区,可以通过现场测试的方法对小区的室外热环境及热舒适性进行研究,通过对实验结果的分析来总结设计经验。由于实际环境通常较为复杂,影响热环境的因素较多,因此一些学者针对相对较为简单的街谷热环境进行了实测研究。

Niachou 等人^[8,9]为了研究炎热天气下街谷中的空气温度和风速分布以及街谷中自然通风的潜力,于 2002 年的夏天在希腊雅典的一个街谷中进行了现场实测。实验观测到的街谷内表面温度差可以达到约 30℃,并分析出沥青路面的高温是形成街谷内自然对流的主要原因。

Krüger 等人^[10]通过实测的方法研究了街区形状对街区中热环境的影响。通过研究街区的 Sky View Factor 与街区内热岛强度、辐射温度的关系,发现街区越开阔则平均辐射温度越高。

为了研究干热地区街区形式对室外热舒适的影响,Johansson^[11]在 Fez, Morocco 的一个窄巷子和一个宽巷子中进行了连续的室外热环境测试,并对该环境中的人体热舒适进行了评估。根据测试的结果,在该地区夏季窄巷子的空气温度比宽巷子平均低 6℃,最高达到 10℃。而在冬季,宽巷子由于有日照,热舒适性要优于窄巷子。

Pearlmutter 等人^[12]为了研究街谷中的能量交换过程,在室外真实环境中进行了一系列的模型实验,并基于实验数据,用一些简化的算法计算人体得热。研究结果认为形状高且窄的街谷会减低日间的得热量,并改善行人的热舒适。但作者在实验中采用 0.5mm 的热电偶测量空气温度并且认为不需要防辐射,其测量结果值得商榷。

Offerle 等人^[13]为了研究街谷中的热环境,以及街谷与大气环境的热交换方式进行了一组现场实测,实验结果表明建筑的几何形状、位置、表面材质对街谷中热环境以及街谷和上层大气的热交换方式有最主要的影响。

为了研究希腊雅典的某个街谷中的风环境和热环境,Santamouris 等人^[14]对街谷中的空气流动和空气温度进行了为期一个星期的测试。实测结果显示街谷中两个不同朝向的表面之间的表面温度差可以达到 19℃。且街谷中的空气温度分层很明显,白天的空气温度相差最大可以达到 3℃,并且不同朝向表面附近的空气温度相差最高可以达到 4.5℃。

在实际环境中,建筑的表面材质往往会对周边热环境产生较大的影响,为了研究这一影响,一些学者通过现场测试的方法进行了研究分析。Synnefa 等人^[15]为了研究高反射率表面对环境的影响,实测了 14 种表面材质在太阳下的表现,测量结果显示白色混凝土表面具有很好的降温作用,选取合适的表面涂层可以有效地改善周围的热环境和降低城市热岛强度。Hagishima 等人^[16]为了研究建筑表面的对流换热系数,通过实验的方法得到了建筑表面对流换热系数的计算方法,并通过对实验数据的回归分析得出了对流换热系数与速度的关系。

Giridharan 等人^[17,18]为了研究建筑表面反射率、天空角系数、海拔、灌木覆盖率、乔木覆盖率、建筑体量等因素对室外热环境的影响,对香港 216 个高密度住区的室外热环境进行了测试,并用回归分析的方法得出了这几个因素对室外热环境的影响。Prado 等人^[19]为了研究屋顶材质对室外热环境的影响,实测了几种不同屋顶材质的太阳辐射反射率。实测结果表明,为了降低屋顶的太阳辐射吸热,应该选取太阳辐射反射率高且长波发射率高的表面材质。金属材质虽然反射率高,但长波发射率低导致辐射散热量低,从而表面温度并不低,不适合作为节能型屋面的材质。

在人们的常识中,植物绿化和水体不仅能够美化环境,还能改善室外热环境提高人们的舒适度。因此,很多学者为了研究清楚植物在室外热环境中的具体作用,展开了相应的实测研究。

Huang 等人^[20]通过实测的方法研究了南京四种下垫面形式对热环境的影响,研究结果给出了四种不同下垫面形式对空气温度的提升程度,由高到低依次为水泥地面、草地、水面、树木,相比水泥下垫面,其他三种下垫面可以降低温度 0.2~2.9℃。

Barradas 等人^[21]为了研究植被对室外热环境的影响,在墨西哥市的 Pedregal de San Angel 地区进行了植被地表能量收支平衡的测试。测试结果表明当地干旱季的太阳辐射得热主要由地表显热(约占 69%)交换散出,而雨季中太阳辐射得热主要由潜热交换散出(约占 70%)。

Wong 等人^[22]为了研究绿化对室外热环境以及城市热岛效应的影响,采用卫星拍照、现场测试、数值模拟的方法对新加坡国立大学内的热环境进行了研究。通过卫星拍照的方法鉴别新加坡国立大学内较凉爽和较热的区域,进一步的通过现场实测的方法获得实际的空气温度数据。测量结果显示,绿化可以有效地降低室外空气温度。

Kruger 等人^[23]为了研究太阳辐射和风速对室外空气温度的影响,实测了巴西七个区域的室外热环境,并采用数据拟合的方式将太阳辐射和风速对空气温度的影响处理成拟合公式。

为了研究植物对室外环境的冷却作用,Shashua-Bar 等人^[24]于 1996 年的 7~8 月在 11 处绿地进行了室外热环境的测试。测试结果表明,绿化区内的温度主要受两个因素影响:树荫面积和附近无绿化区域的空气温度。

通过对这些文献的调研总结,可以发现现场实测是检验小区外环境的最直接的手段,许多研究者通过现场实测的方法对某些特定的问题进行了研究,并得出了一些具有指导意义的结论。大量实验数据表明,太阳辐射强度、来流空气温湿度、来流风速风向这几个气候参数是影响室外热环境的最主要参数。在相同天气条件的影响下,植物和水体对室外环境的改善作用被广大研究者所认同并在实测数据中得到了验证。此外建筑布局、街区的几何形态、建筑表面及地面的太阳辐射吸收率等等因素也是形成复杂的室外热环境的原因。

但是现场测试的局限性也暴露无遗。测试不仅需要耗费大量的人力物力,且由于实验仪器数量有限,只能对某些固定测试点进行测试,得到的实验数据在时间和空间上是离散的,不可能完整重现室外环境的复杂性。现场测试方法最大的局限性在于只能对已经建成的街区进行研究,并得出一些相应的结论,对于设计中的案例,实测的结论可以给予方向性的指导,却不能具体地介入其中。

1.2 计算机模拟评价

由于现场测试的种种局限性,伴随着计算机模拟技术的飞速发展,采用计算机模拟的方法来研究室外热环境逐渐成为主流。其中发展最早最成熟的应用当属室外风环境的计算机模拟,很多学者就室外风环境的模拟模型以及相关应用与验证进行了大量的研究。

1.2.1 风环境模拟

Blocken 等人^[25]用 CFD 商业软件 Fluent 对两栋建筑之间的楼道风进行了模拟,并称壁面函数对模拟结果的影响很大。Soulhac 等人^[26]为了研究任意来流风向下街谷中的空气流动,采用数值模拟的方法进行了研究。在 CASBEE HI 体系中,为了评价风环境对东京任何地区建筑外热环境的影响,Oguro 等人^[27]采用多尺度模拟的方法将东京 23 区所有的既有建筑进行了 CFD 建模,采用模拟的手段建立了一套风环境数据库。Stathopoulos^[28]用 CFD 模拟了建筑群周围的风环境,并用风洞实验结果进行了验证,虽然文中提到空气温湿度和辐射也是必须考虑的因素,但并未做更深入的研究。

Cheng 等人^[29]采用 LES 模型和标准 $k\epsilon$ 模型对方块阵绕流进行了数值模拟,并与风洞实验结果进行了对比,研究者认为 LES 模型和标准 $k\epsilon$ 模型均可以合理地再现方块阵绕流的主要特性,但 LES 模型在结果上较标准 $k\epsilon$ 模型更为准确。Lun 等人^[30]比较了 durbin 模型、标准 $k\epsilon$ 模型和 $S\text{-}\omega$ 模型在坡体绕流问题中的模拟精度,并与风洞实验进行了对比。研究结果表明 $S\text{-}\omega$ 模型在坡体绕流问题中的精度最佳。Li 等人^[31]采用数值模拟的方法研究了挡风墙对风环境的影响,并通过与风洞实验的数据进行对比,发现采用 $k\epsilon$

两层模型和 SMART 的离散格式时模拟结果最接近实验值。

Mochida 等人^[32]对近年来计算流体力学在室外风环境模拟预测中的发展与应用进行了总结综述。该研究指出,随着计算流体力学技术的发展,室外风环境模拟已经较为成熟,是研究室外环境的一个必要组成部分。在采用模拟手段对室外环境进行模拟时,LES 湍流模型最为准确,但迫于现在的计算能力还不能得到实用化,将是今后室外风环境模拟发展的一个趋势。

1.2.2 热环境模拟

相比之下,热环境模拟的相关研究大多不太成熟,在 Ali-Toudert 等人^[33]的研究中提到室外模拟的难点在于室外热环境牵扯到太多的环境因素与传热传质过程,因此关于室外热环境对人体舒适性影响的研究非常有限。各种室外微气候模拟的软件及模型在物理模型、精度、分辨率等上有差异,其中风环境模型比较成熟,而包含热模型的微气候模式较少,因为这些模型大多非常耗时。所以大多数研究是针对参数化、模型化、简化了之后的模型而进行的,城市街谷模型就是其中的一个典型。

HARMAN 等人^[34]采用精确解来计算街谷中的辐射换热情况,并与两种简化的近似模型进行了对比。由于解析解只适用于这种简单的街谷模型,因此在实际中并没有应用价值。Pearlmutter 等人^[35]为了研究干热地区街谷形状对行人热舒适的影响,对街谷内的环境进行了长期的测试,并建立了一套数值模拟模型。测试和模拟的结果显示,紧凑的街谷形状在夏季可以遮阳,冬季可以防风,是提升热舒适性的最佳街谷形式。Pearlmutter 等人^[36]采用半经验的算法考虑了街谷中的太阳辐射分布情况,用半经验的方法计算长波辐射及风速温度,进而进行了人体热舒适指标的计算分析,进行了大规模的室外模型实验,以研究建筑冠层中的热环境,并验证了作者提出的半经验模型。

在室外热环境模拟中,计算量最大的当属辐射换热的模拟计算。因此很多学者就一些特殊问题提出了一些简化的辐射模拟方案。Kanda 等人^[37]提出一种用来计算方块阵中辐射换热情况的算法,可以给出方块阵列辐射换热情况的精确计算结果。但在研究实际建筑布局的时候没有实用价值。Panão 等人^[38]提出一种适用于方块阵辐射换热的快速计算方法,该方法基于蒙特卡罗法并结合表面之间的换热矩阵换算关系,可以节省大量的计算时间,但对于实际建筑的适用性未知。

Krayenhoff 等人^[39]开发了一种用于计算建筑表面温度的软件 TUF-3D,其中辐射模型采用纯几何算法计算角系数,考虑了长短波辐射,并且用迭代算法计算了多次反射。该软件中固体导热采用一维非稳态有限差分法,对流换热计算采用的是一种基于来流梯度风的经验公式。MONTÁVEZ 等人^[40]采用蒙特卡罗法研究了一个街谷中建筑的辐射换热情况,并计算得到建筑的表面温度分布。Bozonnet 等人^[41]采用一种简化的辐射计算模型以计算太阳辐射分配,并将该模型与区域模型相结合以研究街谷中的热环境。

此外,也不乏一些学者采用开源的模拟软件对室外热环境进行了模拟研究。Bruse 等人^[42]开发了一款对流传热辐射耦合模拟的计算软件 ENVI-met。该软件包含了两方程的湍流模型,并加入了植物对流动以及湍流的影响,其中植物模型的动量方程和湍流方程采用 Liu 等人^[43]提出的模型。该款软件采用一种简化的辐射模型进行辐射换热计算,并能够计算固体内部的非稳态导热过程。

Ali-Toudert 等人^[33]采用模拟软件 Envi-met 对室外环境的流动、辐射、传热进行模拟再现,并研究了街谷形状、朝向等因素对室外热环境的影响。之后 Ali-Toudert 等人^[44]又采用 Envi-met 模拟了走廊、幕墙、植被等因素对街谷中热环境的影响,并采用热舒适指标 PET 对街谷中的人体热舒适情况进行了评价。为了研究绿化率下降对校园热环境的影响,Wong 等人^[45]结合 GIS 和模拟软件 Envi-met 模拟分析了绿化率下降后的校园热环境,模拟结果表明由于绿化率的下降,学校的环境温度会上升 1℃。

Priyadarsini 等人^[46]通过红外成像的方法直接得到建筑表面的温度分布并作为边界条件导入 CFD 软件中进行模拟,从而规避了辐射模拟。并采用数值模拟的手段研究了建筑形态、外墙材料以及空调室外机位置等因素对室外热环境的影响。

Li 等人^[47]采用反应系数法计算固体非稳态传热,并将表面温度简化为“阴影区温度”和“太阳直射区温度”来进行模拟计算,并用一栋建筑周围的室外环境实测结果验证了该套简化算法的可靠性。

1.2.3 植物与水体的模拟研究

De La Flor 等人^[48]为了研究建筑外局部微环境对建筑能耗的影响,建立了一套简化算法以考虑建筑周边的辐射、传热过程。对于建筑周边区域的流动采用区域模型,并且考虑了植物和水体对环境的影响。文中作者提到考虑多次反射非常困难,因此仅考虑一次反射的影响。对空气温度和辐射情况进行了模拟分析,并就温度、辐射对建筑能耗的影响进行了模拟分析。通过现场实验的结果,验证了作者提出的模型。

为了研究空调排热位置、绿化、反射率、交通容量等因素对室外热环境的影响,Chen 等人^[49]使用耦合模拟的方法对东京的两个区的室外热环境进行了模拟研究。模拟结果显示交通排热增加会导致空气温度上升,尤其是建筑背风向,而空调排热对较窄小的街道影响很明显。Chen 等人^[50]还提供了一种基于遗传算法的设计方法,可以通过计算机数值模拟的方式,对设计对象进行计算机最优化设计。进一步的,Chen 等人^[51]对一个小区中的植物布置方案进行了遗传算法最优化模拟设计。但该方法计算周期非常长,在目前的计算机水平下很难推广到实际应用中。

Alexandri 等人^[52]用简单的二维模型对植被墙面和植被屋面对环境的影响进行了模拟计算。计算结果显示,植物不仅在干热的环境中作用明显,而且在潮湿的环境中也有利,并且有明显的节能效果。

Shashua-Bar 等人^[53]基于 CTTC 模型,添加了对植物的考虑,建立了 GREEN CTTC 模型,并用实验数据对新模型进行了验证。进而基于 GREEN CTTC 模型对植被的冷却作用进行了模拟分析^[54]。为了研究街谷的方向形状以及绿化对街谷内热环境的影响,Shashua-Bar 等人^[55]采用可以考虑绿化效果的 GREENCTTC 模型对街谷内热环境进行了模拟研究。研究表明,树木对环境的冷却效果主要取决于树木的数量和遮阳的范围。

Robitu 等人^[56]为了研究植物和水体对室外热环境的影响,采用数值模拟的方法进行了模拟研究。建立了植物和水体的流动和能量传递模型,采用天空角系数的方法进行长波辐射换热的计算,太阳短波辐射得热通过计算模型 Solene^[57]计算得到。计算耗时近两个月,结果表明植物和水体的存在可以降低固体表面温度并改善周围环境的舒适性。

1.2.4 室外热舒适相关的模拟研究

Li 等人^[58]采用 CFD 模拟的方法研究了建筑间距、建筑排布等因素对建筑周边热环境的影响,并采用热舒适指标 SET 研究了这些因素对行人热舒适的影响。该文中的模拟研究大致可以分为四个步骤:大区域非等温模拟、非稳态热平衡分析、小区域中的非等温模拟、热舒适分析。研究结果表明建筑排布对建筑周边的风环境影响较为明显,而对建筑周边的空气温度相对湿度等的影响较弱。

为了研究植物对室外热环境及室外热舒适的影响,YOSHIDA 等人^[59]建立了一套三维植物模型,提出了植物的流动模型、辐射模型和植物热平衡模型。并进行了数值模拟,分析了建筑周围的热环境与人体热舒适指标 SET 的分布。模拟结果显示种草可以有效改善热环境,而由于树木会降低环境风速,过密的种树反而会降低室外热舒适性,因此种树的密度需要进一步研究。

Tanabe 等人^[60]建立了一套数值算法用以计算各种姿态下人体接受辐射的有效面积,并计算了站立人体与一个立面之间的角系数。Zhu 等人^[61]在前人的研究基础上,提出了一套用于模拟建筑能耗以及建筑外环境的模拟方法。研究表明由于太阳辐射的影响,热舒适指标 SET 和空气温度之间有明显的差别,因此遮阳对改善夏季人体热舒适非常有效。

传统的人体对流换热系数都只和风速相关而不考虑湍流脉动的影响。为了研究湍流脉动对人体对流换热的影响,Ono 等人^[62]用数值模拟的方法研究了人体的对流换热情况,并与风洞实验结果进行了对比,证明了模拟方法的可靠性。在此基础上采用数值模拟的方法研究了对流换热系数与风速、湍流强度的关系,建立了新的对流换热公式。并且对一个典型的室外环境进行了模拟,模拟了有树和没树的情况。旧公式只考虑风速的影响,由于树木降低了风速,采用旧的对流换热系数公式计算会发现树木的综合作用是恶化热环境。而新公式由于考虑了湍流的影响,有树的工况就会优于没树的工况,说明新的对流换热系数可以更好地再现人体的热舒适情况。根据该文献的研究结果,旧的对流系数计算公式 Seppanen 公式在湍流不强烈的时候不会造成太大的误差。

1.3 研究现状总结

通过前面几节对大量文献的调研总结,可以发现室外环境的重要性得到了学术界广泛的认同。现场测试的研究方法虽然可以直接得到室外环境在某些特定时刻的环境特征,但由于需要耗费大量的人力物力,且只能对有限数量的测试点进行测试,最为重要的是现场测试的研究方法只能针对已经建成的街区进行研究。因此并不适宜作为设计过程中指导设计的手段。

相反的,计算机模拟的方法虽然不能百分之百重现室外环境的复杂性,但大量的模拟研究与实验验证表明,在实测的边界条件下,合理的模拟模型可以有效地再现实测时的室外环境参数,是指导设计的有效手段。

在众多的模拟研究中,风环境的模拟研究发展的较为成熟,而热环境的模拟模型相对

较少。在风环境模拟中以两方程湍流模型和大涡模型应用最为广泛,但由于目前的计算能力,两方程模型仍然是风环境模拟中的主流模型。复杂案例的研究较少而模型化案例较多,这主要是因为辐射计算较为复杂,相关的研究较少,而较为完善的辐射计算方法往往计算量很大。此外植物和水体对环境的改善作用也在实验和模拟中得到了证实。

1.4 本书的主要内容

清华大学在建筑外风环境、热环境领域开展实验与模拟研究已有十余年之久,在这一过程中积累了很多的经验教训。本书将以清华大学多年的研究为基础,对建筑外环境模拟相关的研究成果进行总结,从建筑外环境模拟理论和建筑外环境模拟实际工程应用两方面,为相关领域的学者、设计人员提供相应的技术参考。

本书的作者之一李晓锋^[63]于2003年在博士论文中建立了一套用于住区微气候模拟的数值模拟体系 SPOTE (Simulation Platform of Outdoor Thermal Environment), SPOTE 采用标准 $k\epsilon$ 模型对室外风环境进行模拟,采用反应系数法对固体内部的非稳态导热过程进行模拟计算,采用杰勃哈特-蒙特卡罗法对固体表面的太阳辐射得热以及长波辐射进行模拟,将室外环境的对流、导热、辐射过程进行耦合求解。通过与现场实测数据的对比,验证了 SPOTE 模拟体系在预测室外热环境时的可靠性。这部分研究成果作为清华大学建筑外环境研究的基础,将分别在第3章、第6章、第7章进行介绍。

在此基础上,林波荣^[64]于2004年在其博士论文中对室外环境的植物模型进行了详细的研究,提出了用于包含植物的室外热环境的辐射模拟体系,完善了 SPOTE 的植物模型,并通过深圳某住宅小区的现场实测数据对模拟体系进行了验证。此后冯宁等人^[65]于2008年对清华大学荷清苑小区的风环境进行了现场实测与数值模拟,再一次验证了包含植物模型的湍流模型在室外风环境模拟研究中的可靠性。这部分研究成果将在第4章进行介绍。

张志勤^[66]于2004年在其硕士论文中对水珠在空气中的传热传质及运动过程进行了研究,建立了喷泉的数值计算模型,对喷泉在室外热环境中的作用进行了数值模拟研究。并通过对喷泉周边热环境的现场测试验证了喷泉模型的可靠性。这部分研究成果将在第5章进行介绍。

苏雅璇^[67]于2007年通过模拟与标准风洞实验的对比以及对相关国际标准的整理,分析了各种计算因素对模拟结果的影响,提出了一套适用于工程应用精度要求的模拟参数推荐设定。这部分研究成果将在第10章进行介绍。

冯莹莹^[68]于2007年利用 SPOTE 平台对建筑表面风压系数的分布展开了模拟研究,并总结出了一套适用于我国板式建筑表面风压系数快速计算的算法。这部分研究成果将在第11章进行介绍。

马杰^[69]于2012年在博士论文中提出了全年热舒适模拟评价的思路,在 SPOTE 的基础上对计算量最大的辐射模拟体系进行了优化,大幅缩短了热环境模拟所需要的计算时间,对 SPOTE 平台进行了完善。提出了全年风环境的简化模拟方法,并开发了一套相应的风环境模拟软件,完成了室外热环境全年模拟所需要的软件平台。为了评价全年室外热环境的舒适性,建立了室外热舒适的全年评价体系,提出了适用于室外环境全年热舒适评