

湖南科技大学学术著作出版基金

湖南省教育厅科学研究项目 (08A018)

湖南省自然科学基金项目 (10JJ4032)

建筑自然通风 的 环境地表效应

Jianzhu Ziran Tongfeng De

Huanjing Dibiao Xiaoying

邹声华 李孔清 编著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

湖南科技大学学术著作出版基金

湖南省教育厅科学研究项目(08A018)

湖南省自然科学基金项目(10JJ4032)

建筑自然通风的环境地表效应

邹声华 李孔清 编著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书采用现场测试、理论分析和数值模拟的方法,对复杂下垫面的环境温度计算开展研究,获得了准确的建筑室外温度计算方法。在此基础上,还研究了复杂下垫面的温度、湿度等参数的分布规律、植被对建筑自然通风热湿特性的影响规律、室内地表对建筑自然通风热湿特性的影响规律以及水体对建筑自然通风热湿特性的影响规律。

这是一本专门研究建筑自然通风与环境地表关系的著作,是暖通专业、建筑专业和园林专业工程技术人员、教师、学生很好的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

建筑自然通风的环境地表效应/邹声华,李孔清编
著. —徐州:中国矿业大学出版社,2013.2
ISBN 978-7-5646-1798-1

I. ①建… II. ①邹… ②李… III. ①建筑物—自然
通风—环境效应 IV. ①TU834.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 011076 号

书 名 建筑自然通风的环境地表效应
编 著 邹声华 李孔清
责任编辑 陈红梅
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 8.25 字数 153 千字
版次印次 2013 年 2 月第 1 版 2013 年 2 月第 1 次印刷
定 价 22.80 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

建筑自然通风是一种经济、节能、环保的传统通风方式。它在降低建筑能耗、改善室内热湿环境、提高室内空气品质等诸多方面具有比机械通风更强的优势。国际能源署(IEA)在 2000 年的总结报告(Annex35)中指出,欧洲国家的办公楼有效地利用室外通风可以降低建筑能耗达 50%以上。近年来,美国、德国、马来西亚、古巴等国家都在发展自然通风。然而,自然通风的影响因素非常复杂,而且具有不确定性,其机理还不完善,自然通风的设计计算还处于经验与半经验状态。因此,进一步研究自然通风并充分利用自然通风对于更加合理、更有效地使用能源以及实现建筑节能具有重要的理论价值和现实意义。

本书将建筑室外大气—植被(水体)—地面和室内环境融为整体,将室内、外环境多场耦合在一起,对建筑自然通风的环境地表效应开展研究。主要研究内容包括:第 1 章为建筑自然通风概述;第 2 章以城市为典型对象,对复杂下垫面的环境温度计算开展研究,研究出准确的建筑室外温度计算方法;第 3 章采用现场测试方法,获得复杂下垫面的温度、湿度等参数的分布规律,对不同下垫面建筑室内外热湿特性进行研究;第 4 章研究植被对建筑自然通风热湿特性的影响规律;第 5 章研究室内地表对建筑自然通风热湿特性的影响规律;第 6 章研究水体对建筑自然通风热湿特性的影响规律。

室外干球温度的确定是自然通风设计计算的首要问题。本书对 CTTC 模型进行了改进,应用改进后的 CTTC 模型计算城市环境下自然通风的室外温度更准确。计算建筑间距、建筑相对高度及绿化率等参数对城市环境温度的影响,得出了以下结论:建筑群相对高度越大,环境温度会降低,最大降幅为 1℃;绿化率在 35%时,降温效果最好。同时,通过现场测试,获得了不同建筑景观布局下的室内外温度、湿度等参数的分布规律。

本书研究植被对建筑自然通风的影响,建立了完整的植被对自然通风作用的数学模型。运用该模型研究了植被高度、植被与建筑物间距以及植被宽度等对建筑自然通风的影响规律,提出了可供工程运用的经验公式。随着树林与建筑的间距的增大、林宽的增加,建筑室内通风换气次数呈减缓的趋势,

室内温度也呈下降趋势,最大温降可达 1.4°C ;当树林与建筑之间的距离与建筑高度的比值达到 75% 时,换气次数和室内温度趋于恒定;树林高度与建筑高度的比值为 50% 时,通风换气次数最低。

本书研究室内地表对建筑自然通风热湿特性的影响,充分考虑地表的传热传质作用,重组了建筑自然通风的数值计算模型。通过对某现代热源厂房自然通风的模拟与实测得出:当室外无风时,厂房地面采用吸热性能好的材料构筑可使厂房内近地表 2 m 高度范围内的空气温度降低 $1.3\sim 1.5^{\circ}\text{C}$,厂房内的压力降低了 0.2 Pa 以上,进风量增加。这种增风降温作用得以充分体现的最大室外风速为 1.5 m/s 。

本书研究水体对建筑自然通风热湿特性的影响,在描述水体蒸发时,考虑到水体与空气的热质交换,引用气象研究文献中提出的拟合公式计算水体的平衡温度及对应情况下的蒸发量,建立了水体对建筑自然通风热湿影响的数学模型。研究来流温度、湿度、水体宽度、水体与建筑之间的距离等因素对室内相对湿度的影响规律,并对各影响因素进行了相关性分析。结果表明:水体对建筑室内的湿度影响比温度影响更明显,水体面积越大,影响越大;水体距离建筑 10~15 m 范围对室内的相对湿度影响较显著。

本书是一部专门研究建筑自然通风与建筑室外环境关系的著作,可作为建筑环境与能源应用工程专业和建筑学专业的学生、教师和工程技术人员的参考书。该书的出版为进一步制定建筑自然通风设计标准和城市景观设计、绿化设计规范奠定了理论基础,对建筑自然通风的发展有一定的促进作用。

本书在撰写与出版过程中,得到了湖南科技大学学术著作出版基金、湖南省教育厅科学研究项目(08A018)和湖南省自然科学基金项目(10JJ4032)的资助,在此表示衷心的感谢!

编著者

2012 年 9 月

目 录

1 建筑自然通风概述	1
1.1 建筑自然通风的定义与发展背景	1
1.2 自然通风的研究现状	2
1.3 建筑自然通风的研究意义	10
本章参考文献	11
2 复杂下垫面建筑室外温度的计算	19
2.1 CTTC 和 STTC 模型及建筑群室外温度计算	19
2.2 模型的改进	23
2.3 模型验证与应用	25
2.4 本章小结	27
本章参考文献	28
3 不同下垫面建筑室内外热湿特性实验研究	29
3.1 研究对象	29
3.2 测试仪器	31
3.3 测试结果	32
3.4 测试结果分析	40
3.5 本章小结	41
本章参考文献	41
4 植被对建筑自然通风影响的三维数值模拟	42
4.1 物理数学模型	42
4.2 计算区域的确定	52
4.3 计算方法与步骤	54

4.4	植被对建筑自然通风影响的三维数值模拟实例·····	54
4.5	植被及下垫面参数对建筑室内热湿影响规律研究·····	62
4.6	本章小结·····	67
	本章参考文献·····	67
5	室内地表对建筑自然通风热湿影响研究·····	71
5.1	室内地表对建筑自然通风的作用·····	71
5.2	考虑地表对建筑自然通风作用的室内环境数值模拟·····	72
5.3	数值模拟结果与分析·····	76
5.4	室内地表对自然通风作用的实测结果与模拟结果的对比·····	83
5.5	本章小结·····	84
	本章参考文献·····	85
6	水体对建筑自然通风热湿影响研究·····	86
6.1	模拟水体对建筑自然通风影响需要解决的问题·····	86
6.2	水面蒸发量的计算模型·····	87
6.3	水面蒸发散热量的计算模型·····	89
6.4	数值计算步骤·····	91
6.5	考虑水面蒸发对建筑自然通风影响的数值模拟·····	91
6.7	本章小结·····	98
	本章参考文献·····	98
7	结论与展望·····	100
7.1	结论·····	100
7.2	主要创新点·····	101
7.3	展望·····	101
	附录·····	103
	附录 A CTTC 模型部分源代码·····	103
	附录 B 第 4 章 FLUENT UDF 部分子程序·····	111

1 建筑自然通风概述

1.1 建筑自然通风的定义与发展背景

建筑通风是建筑必须具备的功能,它分为机械通风和自然通风两种方式。完全依赖自然风压(包括热压、风压和扩散)来实现建筑室内外空气的置换过程称为自然通风。热压是两空气柱在某一水平单位面积上的重力差;风压是大气流动动压转变而成的静压;扩散是空气分子间的运动。

随着社会的发展,人类对自然的过度开发已危及人类自身的生存和繁衍,迫使人们必须在资源、环境和发展之间寻求平衡。1987年,联合国世界环境与发展委员会在《我们共同的未来》中提出了“可持续发展”的概念:“既满足当代人的需要,又不对后代人满足需要的能力构成危害的发展”^[1]。进入21世纪,“可持续发展”的概念已经被全世界各国广泛认同,成为各个国家发展的指导方针和基本战略,也成为各学科研究的指导原则和目标,而建筑自然通风则是建筑可持续发展的需要。

建筑内的物理环境对居住者和使用者的舒适健康具有非常重要的意义。为了抵御恶劣的自然环境,人类利用各种通风空调手段营造舒适的热湿环境,往往需要消耗大量的社会资源和能源。在西方发达国家,建筑能耗占社会总能耗的40%左右^[2]。我国建筑能耗已占社会总能耗的27%~29%^[3]。因此,建筑节能必将成为影响能源安全、优化能源结构、提高能源利用效率的关键因素,是贯彻可持续发展战略的重要组成部分。近年来,美国、德国、马来西亚、古巴等国家都在发展自然通风^[4-7];国际能源署在2000年的总结报告(Annex35)中指出,欧洲国家的办公楼有效地利用室外通风可以降低建筑能耗达50%以上^[8]。因此,充分利用自然通风对于更合理、更有效地使用能源以及实现建筑节能具有非常重要的意义。

自然通风的最终目的是要改善建筑室内环境,自然通风对建筑室内环境的贡献可用自然通风潜力^[9]来表示。自然通风潜力的概念是近年来才提出来的,是指仅依靠自然通风就可确保有可接受的室内空气品质和室内热舒适性

的能力。从这个定义来看,自然通风的潜力除了与自然通风的风量有关以外,还与自然通风的空气质量(主要体现在温度、湿度、风速等方面)有关。

影响自然通风潜力的因素有很多,主要包括建筑室外环境(包括室外空气温度、湿度、室外空气品质、建筑布局、建筑周围地形、地貌及地质、水文条件、绿化状况等)和建筑本身及内部的结构特性(包括室内热源、污染源、围护结构和室内地板结构的物性及热工特性、建筑用途、建筑通风进回风口的大小位置、建筑朝向等)。实际上,影响建筑室外环境的主要因素是下垫面。

下垫面是大气圈的下界,也是地球的水陆表面。下垫面作为人居环境所依托的底界面,是一类最重要的界面系统,包括水体、土壤、植被等。这些不同的表面有着各自不同的热工和物理特性,不同程度地影响着大气环境,近地面的空气与地表之间存在明显的热质交换,产生环境地表效应。由于自然通风的动力来自建筑室内外空气温度差形成的热压和室外风压及扩散作用(在有风压和热压存在时,扩散作用是非常微弱的,可忽略不计)。因此,下垫面直接影响了建筑自然通风的通风量和热舒适性(包括温度、湿度和风速)。

综上所述,研究复杂下垫面建筑自然通风的热湿特性及环境地表效应,为发展新的自然通风方法、进行建筑规划和指导自然通风设计和绿化设计提供理论基础,意义非常重大。

1.2 自然通风的研究现状

1.2.1 复杂下垫面热湿特性的研究综述

不同的下垫面(或地表)会对建筑物周围的微气候产生很大的影响。实测表明,绿化草坪、植被、水泥地面、裸地面在夏季工况下,由于太阳辐射的作用,其表面温度差异较大。这种差异的存在会影响建筑物所处的微气候、建筑物热工特性和建筑室内环境等。

城市是一种典型的复杂下垫面,也是建筑和人口聚集最多的地方。城市热湿环境是人居环境的主要因素之一,人类对城市热环境的研究至少已有近200年的历史。自1818年Lake Howard根据对伦敦城市温度场的观察,出版了《伦敦气候》一书后,英国、法国、美国、日本、德国、加拿大以及后来的中国、澳大利亚、印度、马来西亚等许多国家也陆续出版了有关这方面的研究成果论著^[10]。

早在1818年,英国的Lake Howard对伦敦市内和郊区的气象进行了观测和记录,从大量的资料中总结出伦敦城市气候的特点,其中有一个著名的发

现是:伦敦城市中心的温度比四周郊区高,人们把这种现象称为“城市热岛”^[11]。近年来,阳丽娜、李玉国等学者^[12]研究香港城市无风条件下的城市温度的时空分布,分析了由建筑表面热浮力引发的热力通风率。

然而,人们在计算建筑物的自然通风时,使用的室外参数都是来源于建筑所在地区的一个大范围内的气象资料,而这些气象资料又是由气象人员在空旷的城市近郊进行监测得到的。既然许多研究资料都已证明城区气温与郊区气温确实存在着较大的差别,那么在对建筑物自然通风进行各种分析计算中,如果把这些由气象台站测出的气象数据作为城区内建筑的室外计算参数,其结果就很可能出现偏差,由此得出的结论不准确,甚至是错误的。

澳大利亚的 M. M. Elnahls 等在阿德莱德地区建造了一个典型的建筑群,对城市化对住宅建筑空调负荷的影响曾做过实验和模拟研究。研究结果表明,冬、夏两季建筑群内的平均空气温度都高于气象温度。对空调系统而言,在对室内加热时减少 10% 的能耗,供冷时增加 15% 的能耗。两种算法的能耗总和(供热能耗与供冷能耗之和)相差不多。但“这并不意味着因为相互抵消就可以忽略对空气温度的修正。忽略了修正温度的影响就意味着对冷负荷估计不足,对热负荷估计过高”^[13]。2002 年,李先庭等人^[14]对此问题做了进一步研究,他们的研究结论是:由于夏季室内外温差较小,城市热岛效应造成的升温可能对室内负荷计算造成较大的影响。这种影响在主要以外围护结构传热和新风为主的民用建筑中计算冷负荷时是不可忽略的。在冬季,由于热岛效应带来的温差相对室内外温差而言较小,因此在计算热负荷时可以忽略。

关于建筑群内空气温度的模型,前人已经做了不少的研究工作^[10-14,89-91]。最具代表性的是由 Hanna Swaid 和 Milo E Hoffman 等人近年来提出的 CT-TC(cluster thermal time constant,居住区域热时间常数)和 STTC(surface thermal time constant,地表热时间常数)模型,它主要用于预测和评价建筑物参数、城市设计特征、街道走向和人为散热等对城市覆盖层内热环境影响,该模型适合用于工程预测与评价,它以城市的物理模式为基础,具有较好的实用性^[5]。

1.2.2 大气—土壤—植被(水体)的传热传质研究综述

关于大气—土壤—植被(水体)的传热传质研究,美国、法国、日本等国家的学者做了大量的工作。我国的清华大学、北京大学、兰州大学、中国科学院、中国环境规划院等单位也有很多的研究成果。

陆地表面是一个非常复杂的系统,除了地形起伏外,还有诸如森林、草地、作物、积雪等覆盖物,而能量平衡和水分平衡是陆面过程模式的物理基础。水

是穿过地表向上、向下被连续不断输送的最重要物质,蒸发会从地球的水面、土壤及雪原上连续不断地发生;而土壤中的液态水被植被吸收后,可以通过蒸腾作用以水汽形式释放到大气中。来自土地的蒸发和来自植被的蒸腾的综合过程称为蒸散。蒸散过程之所以重要是因为它不仅是水循环的基本环节之一,而且在水相变过程中涉及大量的能量。在曾经相当长的一段时间内,人们主要关心的是陆面和洋面的热力差异作用,陆面本身不均匀性的影响则较少被考虑。同时,在边界条件中对温度要素刻画得比较详细,而对湿度要素的描述则很粗糙。这种下边界的考虑虽然在対大尺度大气环流的研究方面取得了成功,但很显然不能满足局地环流和中尺度问题的研究需要。Johnson 在其研究中特别强调了土壤湿度的重要性,而且现在的一些观点也认为水文因子可能是控制陆面过程的关键因素。土壤水分不仅在水循环中扮演着重要的角色,而且影响着从几小时到多年尺度的气候变化。最早的陆面过程研究出现于 20 世纪 50 年代,Budyko 提出简单的陆面方案来参数化大气和陆面的相互作用。20 世纪 60 年代末 GCM 出现以后,陆面过程就作为其中的一个分量来表达。20 世纪 80 年代以来,随着观测手段改进和实验数据的积累,复杂的陆面过程迅速发展起来。陆面模式的发展大致可以分为 3 个阶段^[15]:最初是 Manabe 等人提出的简单吊桶模式,在整个陆面上将地面参数取为均值。这一模式虽然引进了少量的地面特征参数,但是方案仅把地面与大气之间的能量和水汽交换作为彼此独立的纯物理过程。因此,它们虽然显示了这些地面特征对辐射平衡、热量交换和蒸发的影响,但却不能真实地估计它们的反馈效应^[16]。20 世纪 80 年代以来,发展了较为复杂的模式将地表覆盖物区分为不同的类型,不同类型对应不同的参数化方法,而且较为真实地考虑植被在其中的作用,较为典型的有 Dickinson 等人的生物圈—大气传输方案(BATS)^[17], Sellers 等人的简单生物圈模式(SIB)^[18,19]等。这一时期模式最重要的变化就是在大气和土壤之间增加了植被层(即生物过程),用以研究生物物理过程对显热和潜热交换的作用;到了 20 世纪 90 年代,新一代陆面模式中进一步考虑了植被的水汽吸收和碳交换等,发展了植物的生理机理—生物化学耦合模式,系统地模拟了植物界面的光合生理生化过程^[20]。如陆面过程的发展与国际间的合作密不可分,国际上许多组织、机构及院校对陆面过程进行了多学科研究。为了进一步改进模式,提高模式对陆面—大气间水、能量的模拟准确性。自 20 世纪 80 年代以来,在国际地圈—生物圈计划(IGBP)和世界气候研究计划(WCRP)的“全球能量和水循环试验(GEWEX)”研究项目的协调组织下,以全球大气环流模式(GCM)网格为基本尺度,在世界不同地区进行了一

系列大型陆面过程试验,着重研究在 GCM 网格单元尺度上地表与大气之间动量、能量、水分和 CO_2 等的交换过程。其中主要的大型项目有:法国西南部湿润森林与农业区的 HAPEX-MOBILHY、美国 Kansas 草原的 FIFE、西班牙中部干旱半干旱区的 EFEDA,以及巴西亚马逊河流域的大尺度生物圈—大气项目 SALSA 等^[21]。我国学者对陆面过程的研究无论是观测方面还是模式方面都获得了一定的成果。

实验方面,1990~1992 年在河西走廊黑河流域中段进行的水分和热量交换为中心的地气相互作用综合观测试验,被列为 WCRP(world climate research programme)关于水文大气先行性试验(HAPEX)的第 3 个较大国际性实验项目和“国际地圈—生物圈研究计划(IGBP)”的组成部分。模式发展和改进方面,我国学者针对不同的情况发展了许多陆面方案。例如,孙菽芬的复杂 3 层雪模式^[22],比较详细地考虑了雪盖内部的压实、融化及相变等内部过程;戴永久^[23]根据多孔介质理论,由土壤、雪盖和植被水分和热量守恒型控制方程发展的陆面模式 IAP94 等;张晶等人^[24]在 BATS 的基础上,采用物理方程和经验解析公式相结合的方法求解土壤温度和湿度,并考虑了降水次网格分布和雪盖的影响,发展了陆面过程模式 LPM-ZD,并与区域气候模式 RegCM2 耦合,对 1991 年的特大暴雨模拟效果比 BATS 有较大改进;林朝晖^[25]通过改进 IAP2-LAGCM 中的地表反照率参数化方案,使得 IAP2-2LAGCM 模式能成功地模拟出旬平均时间尺度上东亚夏季风降水带的突跳现象^[15]。

近年来,土壤—植被—大气作为连续体的耦合模式得到了发展。在土壤—植被—大气连续体中存在着两个基本的变换过程:水的循环和热的输送。早期土壤—植被—大气系统水热通量的观测研究只限于斑块尺度陆面过程的研究,如农田、草原和森林生态系统内部的研究。这些研究的主要目标是调查土壤—植被—大气界面能量、水的垂直交换情况,在这个尺度上已发展了许多方法以计算及观测近地层水分及热量的湍流输送,如波文比—能量平衡法(BREB)、涡度相关法、空气动力学方法和廓线梯度迭代法等。但是,这些方法对土壤、植被、大气间的相互作用考虑得不多,使得蒸散的计算具有限制性。随着计算机技术的发展,在气象学领域出现了土壤—植被—大气连续体的耦合数值模式,刘树华等人^[26-28]利用一维土壤—植被—大气耦合数值模式,研究了我国干旱半干旱地区不同植被覆盖度情况下近地层的水分蒸散过程。这种模式的建立需要微气象学、土壤物理学、植被生理学等学科的综合知识,特别是对地表水热平衡、辐射特征进行周密考虑,使模式更真实地模拟蒸散及热量输送过程。迄今,土壤—植被—大气系统水分能量传输模型,按其対作物冠

层的处理,大致可以分为3类:单层模型、双层模型和多层模型。单层模型能够反映大气和植被下垫面间总的能量、动量和物质交换过程,且因其计算简单而被广泛采用,但这类模型忽略了植被冠层与土壤两者之间的水热特性差异;双层模型将冠层与土壤分开,分别考虑两者的动量吸收、能量和物质的转化传输过程以及两者的相互作用,具有较清晰的物理含义;多层模式将冠层分成若干层,高分辨地描述冠层小气候、辐射分布以及大气界面的交换过程^[29]。目前,研究中常用的陆面模式仍然是第二阶段的模式,本课题所采用的模式就参考了 Deardroff 在 1978 年提出的具有历史意义的方案,以及 Xue Y 等在 SIB 基础上简化单层生物圈模式(SSIB)等^[30]。Deardroff 提出的“大叶”模式和处理土壤内热交换过程的 Force-Restore 概念及方程,很长时间成为第二代模式陆面物理过程模式发展的基础^[31]。Nolihan^[32]在 Deardroff 的基础上提出了一个当时最有效的模拟方案,在他的模式中,继续沿用 Deardroff 的预报地表温度和土壤含水量的方法,但对方程进行了一定的改进,强调重力对循环过程的影响。他的贡献在于提出了一套新的土壤—植被—大气的参数化方案,并提高了预报的准确性。孙菽芬概述了近年来陆面过程研究中的一些值得注意的问题^[33]。

关于植被(地表)的环境效应,Clonco 和 Ellefsen^[34]研究城市绿化对城市风场和温度场的作用,考虑城市结构、植被和可变的地形等要素之间的相互作用和影响,开发了分析软件,并进行了计算分析。中国环境规划院的张景远等人^[35]对城市景观格局和组分的大气环境效应进行了研究。郭清和、周红妹、Spronken-smith、Oke 和杨士弘的研究结论是:绿地能降温增湿,绿地周边地区的气温比周围低 1~7℃,最大降幅达 12℃,相对湿度增加 3%~12%,最高增幅达 33%^[36-39]。清华大学王威、林波荣也研究了不同地表下的温度分布及绿化对热环境的影响^[40-41]。北京大学的刘树华、王仰麟和中国科学院的胡菲、张勇等人对近地表附近的大气下垫面的传热传质问题进行过一系列的研究^[43-49],结果表明:下垫面会影响大气微环境。中国矿业大学的崔亚莉、中国地质大学的徐映雪等人应用遥感方法研究了黄河三角洲地表蒸发及其与下垫面的关系。早在 1983 年,叶笃正^[50-51]就做了土壤湿度对短期气候和水文变化影响的数值实验;苏从先等人^[52]于 1984 年对河西地区的近地表气象进行观测分析,研究了河西地区绿洲的小气候特征,发现存在“绿洲冷岛效应”;吕世华等人^[53]用数值模拟也证实了绿洲有“冷湿气候效应”,沙漠有“暖干气候效应”;张强和马耀明等人^[54-55]采用敦煌的观测资料,分析了绿洲边缘戈壁沙漠的边界层特征;高艳红等人^[56-57]采用 MM5 模式模拟研究了绿洲冷效应

和沙漠逆湿现象;胡隐樵等人^[58-59]再进一步研究了沙漠和戈壁由于绿洲水汽平流作用出现的逆湿现象。王艳霞等人^[49]在研究城市绿地与城市热岛效应关系时也得出有益的结论:绿化树木可以削减太阳辐射,城市绿地有降温增湿效应。清华大学的林波荣^[60]还采用现场实测和计算的方法研究了不同绿化形式对室外热环境的影响效果和特点;美国的绿色建筑设计导则 LEED^[61]中给出了改善小区微气候、降低热岛强度的推荐做法;日本的 CASBEE^[62]也分别针对小区风环境和热环境提出了限制,并推荐了改进做法,其中包括利用数值模拟的方法分析评价和改进小区风环境。蒋慧君^[63]就绿色植被对建筑室内外空气环境的影响开展了初步研究。

关于植被(地表)的动力效应,北京大学的茅宇豪等人^[64]对不同下垫面的空气动力学参数进行了研究,结果表明:不同下垫面的粗糙长度与植被高度和地表起伏程度有明确关系,风速、粗糙度都与摩擦速度呈正相关关系。中国科学院的吕萍等人^[65]利用风洞实验的风速廓线资料,采用空气动力学方法,计算了不同类型地表近地层湍流输送随风速及地表性质的变化特征,结果表明:地表越粗糙,风速越大,湍流输送越强。兰州大学的郑晓静等人^[66]在定量给出不同时刻的近地表温度和垂直风速的基础上,计算了由于太阳辐射所引起的近地表层垂直气流对沙粒跃移运动的影响,发现垂向风速在午后可达到 1.5 m/s,并且沙粒跃移轨迹的最大高度和长度可增加 55% 和 73%。清华大学的李亮等人^[67]采用 CFD 和风洞实验研究了树木对城市微气候的影响。并得出结论:树冠模型可简化为长方体。Green^[68]研究表明:树木使大气流场的风速减小、湍流度增加,对长波和短波辐射有削减作用,树木本身有蒸腾作用,影响地表的热平衡。蒋慧君等人^[69-70]研究了绿色植被内的空气温、湿度计算和受树冠遮蔽时建筑物外表面辐射换热量的计算问题。罗哲贤^[71]对植被带宽度对局地环流及温度场影响开展了数值计算。北京大学的柯咏东等人^[72]对小型绿化带对城市建筑物周围风场的影响开展了数值模拟,其研究表明,合理设置绿化带可降低建筑物侧面的角隅流。崔桂香^[92-94]课题组更是就城市大气环境大涡模拟做了详细的研究。

关于水体对环境的影响,张景明^[42]和 Saaronih、Ziv 等人的研究表明:大面积的水体下风向最大降温有 16℃,最大增湿 6%,小面积的水体对气温没有明显的调节作用。北京师范大学的刘娇妹^[99]以北京地区为研究对象,研究不同下垫面的局地气候差异,结果表明:水体对城市的气候调节作用(增湿降温)最显著。李书严等人^[100]应用观测资料分析和数值模拟的方法研究城市水体的微气候效应,结果表明:水体的调节作用明显。目前,有关水面蒸发的

实验数据和理论模型有很多。例如:闵骞^[95]对水面蒸发模拟进行了研究;濮培民、陈惠泉、毛世民^[96-97]对水面蒸发与散热系数进行了研究,给出了全国通用公式;赵振国^[98]对水面散热的焓差公式及应用进行了深入的研究。

1.2.3 自然通风的研究综述

研究建筑自然通风的学者有很多。归纳起来,人们对建筑自然通风的研究主要集中在建筑室内,研究方法主要有经验方法、数值模拟和科学实验 3 类。在这些研究方法中,数值模拟方法具有许多的优越性:成本低、速度快、资料完备、具有模拟真实条件和理想条件的能力等近年来被广泛应用。在自然通风的研究内容方面,主要集中在自然通风设计(包括风口的形状、大小、位置选择等)和自然通风量的计算方面。

室内空气流动(传质问题)的数学研究起源于空气质量守恒、动量守恒、能量守恒方程组的求解。由于方程组的非线性特性及空气流动的紊流特点,给室内空气流动的数学研究带来了许多困难,同时也引出了许多的方法和求解技巧。随着计算机技术的发展和运用,方程组的非线性求解问题由计算流体力学数值解所代替,而空气流动的紊流特性也逐步被发展的 $k-\epsilon$ 等紊流模型所求解。数值求解方法能较全面地进行室内流场与温度场的计算,但随着计算模型不断完善,它的计算也越来越复杂,同时数学与物理模型的准确程度也常常需要模型试验与现场实测方法的检验。因此,目前还没有一种比较简单并适合工程推广的室内空气流动的数学研究方法^[73]。

自然通风的数值模拟大多是建立在确定性和简单模型的基础上,没有考虑动态的输入参数,更没考虑建筑室外环境对自然通风的影响,这与现实是大不相符的。为了解决这个问题,出现了随机性模型,认为压力、风速、风向、温度等参数都有一定的概率。Haghighat 等人采用随机差分方程预测不确定因素,后来又提出了频谱分析方法模拟开口的脉动气流。在隋学敏^[74]的研究中,利用数值模拟的方法主要研究热源强度、热源面积、热源高度、间距、进排风口的高差、进风口面积、排风口的布置形式、房间高度等因素对室内自然通风状况的影响,分析了各影响因素变化时室内流场、温度场的变化规律,分别给出了较为合理的自然通风量、进排风温差、有效热量系数、中和面高度等参数。

影响自然通风的因素很多,人们对此也进行了许多的研究,这主要包括建筑外环境条件和建筑本身结构及室内环境条件。室外环境条件主要有:大气温度、湿度、风速等气象条件,室外空气品质,建筑布局,建筑周围地形,地貌及地质,水文条件等;建筑本身结构特性包括:围护结构和室内地层结构的物性、热工特性,建筑用途,建筑通风进回风口的大小位置,建筑朝向等;室内环境条

件主要包括:热源、室内污染源及室内温、湿度等。建筑围护结构是室内环境与室外环境的联系纽带,而建筑室外环境会直接影响自然通风效果。由于这种影响非常复杂,目前还很少有人研究。

自然通风的物理数学模型包括很多方面:从建筑通风的形式上可分为单面通风和双面通风;从室内通风的进出口的数量上,有两风口、三风口和多风口模型;在风口的大小上,有小风口和大风口之分;按自然通风的作用机理分类,自然通风包括热压作用通风、风压作用通风以及两者联合作用通风(在自然通风不能满足通风的需要时,也可采用自然通风与机械通风结合起来的混合通风);如果对室内的气流进行分区,则有单区模型、两区模型、三区模型和多区模型之分。

我国香港地区学者李玉国基于流体静力学的孔口理论对开有两个小风口的单区建筑的不同自然通风系统进行了理论分析和研究^[75-76]。Fracastor^[77]对单区和两区建筑的热压驱动的单侧通风,采用CFD方法在不同的室内外温差、窗户安装高度的情况下得出了室内垂直温度分布、通风量及室内温度随时间的变化关系。Kindnagen^[78]用CFD方法和实验方法研究了自然通风建筑中,屋顶形状和屋顶高度对自然通风情况下的室内气流分布和室内气流流速的影响。西安建筑科技大学的王怡^[79]建立了自然通风系统和建筑热过程系统的耦合作用模型,编写了动态数值模拟分析计算程序,用来模拟我国寒冷地区夏季自然通风条件下的室内环境。Montazeri和Azizian^[80]利用风洞对单面和双面自然通风性能进行了实验研究,得出了一些性能指标;Meng Qinglin等人^[81]采用CFD对机场航站楼内的夏季自然通风的两个案例进行了研究,夏季增加自然通风可以降低空调能耗,而冬季的自然通风会增加热负荷;Gao Jun和Ji Y等人^[82-83]对高大空间的流场和温度场进行了CFD分析,得出了热分层规律;Liu Peichun^[84]对中庭的流场和温度场进行数值分析,说明建筑外环境温度 and 天窗对自然通风影响很大。Stavrakakis等人^[85]利用先进的计算流体力学方法,对高温封闭空间的热舒适性进行了评价;Jiang Y^[86]采用大涡模拟分析了热压作用下的建筑自然通风机制;BRE^[87]从房间进深和高度的关系出发,对贯流通风进行了研究。

自然通风的风量计算一直困扰着自然通风理论的发展。以前的自然通风计算一般考虑的是基于小开口的空气渗流,并不适合门、窗等大开口的自然通风计算;常用的风压作用下的自然通风量计算方法存在较大的误差^[88]。

人们对建筑自然通风进行研究,自然会涉及建筑自然通风的流场分析及其传热传质问题。事实上,对复杂下垫面建筑自然通风的传热传质过程进行

动力学分析,会得出一些有价值的规律,或许会发现比较有趣的、复杂的动力学现象(如风场发生变化),这些对理解、评价和控制建筑物内的空气流动对热舒适、室内空气品质等都很重要。

1.3 建筑自然通风的研究意义

综上所述,对建筑自然通风的研究还存在如下一些问题和不足。

对建筑自然通风与下垫面(如含有植被、水体等的气地交界面)关系问题的研究还少见报道。

无论何种工业厂房或建筑群,其自然通风都要充分地利用室外环境。自然通风强烈依赖变化莫测的室外环境,影响因素非常复杂。

在太阳辐射下,不同的下垫面有着不同的温度、湿度分布。为了营造良好的居住环境,有人提出构造柔性下垫面,即:在建筑物的周围保留和种植植被、设置人工湖等;在建筑选址时,先辈们早就有了依山傍水的习惯,这些都说明植被、水体对建筑室内环境改造有着很好的作用。然而,原重庆建筑大学的陈启高教授等研究多年、流传久远的中国民居的“风水”观念,至今颇有争议,说明其理论尚不完善。至今,人们还不能描述植被、水体和各种地形、地貌、地质等因素对建筑自然通风的室内流场、温度场和湿度分布的影响。

植被对自然通风的影响是不能忽视的。一方面,它改变了建筑室内外的温度分布,使自然通风的热压发生变化;另一方面,植被对自然通风的风压有阻碍作用,然而这些作用目前还未见到有人进行过深入的研究。

水面的蒸发量与水体的大小、温度和周围环境空气的温度、湿度、风速、辐射换热等因素密切相关,且一般来讲是一个时变过程,不但水体周围的空气的温度和湿度会发生变化,而且水体本身的温度也在发生变化,同时也会向水体底部和周边的土壤、岩石等进行热质交换。进一步细微考察,水体在蒸发的同时,水面的高度与交界面也在不断发生变化。因此,水体的模拟也是一个瞬态模拟的问题。如此一来,在具体模拟时必须要求同时对水体和周围大气、水体下部的土壤、岩石以及建筑物进行一体化建模,划分网格。从模拟的模型上讲,至少是涉及了气液两相流动。正是这两方面的原因,往往会导致计算区域过大、模型太复杂,由于目前普遍使用的微机内存和计算速度的限制,网格不可能细化,因而水汽这一重要的交界面很难准确描述,计算的速度和结果的精度也会受到制约。

在工程的具体应用中,尤其是在建筑自然通风设计中,在条件允许的前提