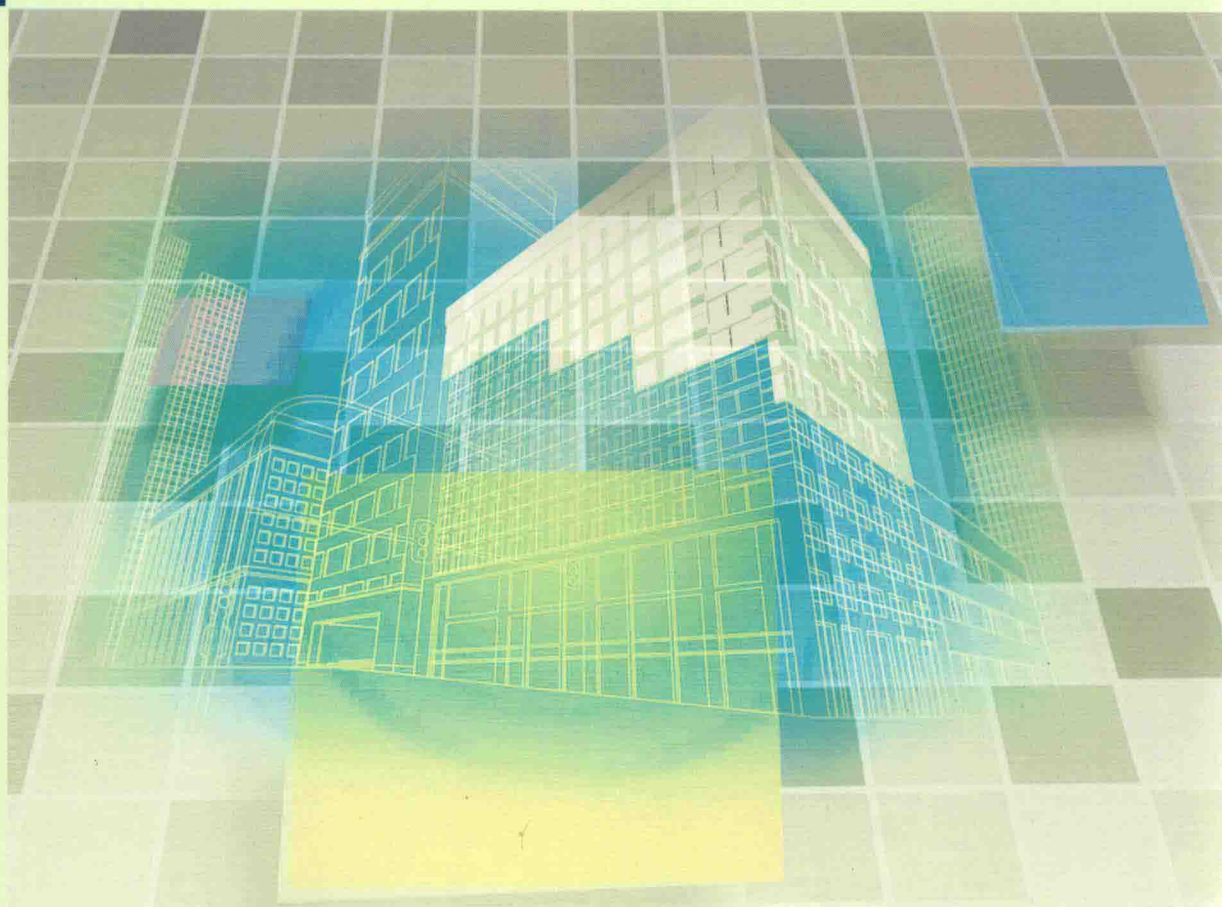


寒冷地区 高等学校建筑节能 关键技术研究

冯 伟 吕恒林 黄建恩 田国华 张丽娟 等著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

寒冷地区高等学校 建筑节能关键技术研究

冯 伟 吕恒林 黄建恩 田国华 张丽娟 等著



中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书以寒冷地区高等学校建筑为研究对象,在调查分析高等学校建筑使用特点和建筑能耗的基础上,综合运用建筑学、城市规划、建筑环境与能源应用工程等专业的基础理论,多学科、多角度地对高校建筑节能关键技术进行了研究,重点阐述了校园建筑能耗特点及节能潜力、校园微气候调节技术、建筑设计节能技术、建筑围护结构优化设计技术、门窗节能技术和建筑设备节能设计技术、可再生能源利用技术以及建筑节能技术适宜性评价指标体系,并介绍了校园建筑节能设计应用实例。

本书可供建筑节能、建筑技术研究等领域的科研人员、工程技术人员以及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

寒冷地区高等学校建筑节能关键技术研究 / 冯伟等

著. —徐州:中国矿业大学出版社,2017.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3797 - 2

I. ①寒… II. ①冯… III. ①寒冷地区—高校管理—教育建筑—节能设计—研究 IV. ①G647.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 300122 号

书 名 寒冷地区高等学校建筑节能关键技术研究

著 者 冯 伟 吕恒林 黄建恩 田国华 张丽娟 等

责任编辑 耿东锋 崔永春

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 江苏凤凰数码印务有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 15 字数 370 千字

版次印次 2017年11月第1版 2017年11月第1次印刷

定 价 48.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

我国人口众多,能源和资源短缺已成为制约社会可持续发展的重要瓶颈。目前,建筑能耗约占社会总能耗的 28%,随着城镇化的发展,人民生活水平的提高,建筑用能还在快速增加。在建筑领域实现节能减排对建设节约型社会、贯彻落实科学发展观具有十分重要的意义。建筑节能是国家确定的十大重点节能工程之一。

中国教育类事业单位数量约占全国公共机构总数的 34.46%,用能总量约占各类公共机构用能总量的 39.33%,机构数量和用能总量均居各类公共机构首位。截至 2015 年年底,全国共有普通高等学校和成人高等学校 2 852 所,其中普通高等学校 2 560 所(含独立学院 275 所),各类高等教育在校总规模达到 3 647 万人,普通高等学校校舍总建筑面积 89 141.38 万 m^2 。调查显示,高校校园能耗约占社会总能耗的 8%,高校生人均能耗指标高于居民人均能耗指标,是全国人均生活用能的 4 倍。高校资源利用主要包括土地、能源(包括电力、煤、油、气、热力等)、水、建筑材料、办公用品、教学用品、实验用品等多个方面。高校能源和资源具有种类多、总量大、人均消耗水平高、能源费用支出高、节能潜力较大等特点。实行高校建筑节能、建设节约型校园,是推行建筑节能工作的重要组成部分。

为促进节约型校园建设,教育部 2005 年发布了《关于贯彻落实国务院通知精神做好建设节约型社会近期重点工作的通知》,2006 年发布了《关于建设节约型学校的通知》,2008 年和建设部联合发布了《关于推进高等学校节约型校园建设,进一步加强高等学校节能节水工作的意见》和《高等学校节约型校园建设管理与技术导则》,2013 年下发了《教育部关于勤俭节约办教育建设节约型校园的通知》,这些文件的制定说明国家对建设节约型校园高度重视和关注。

受寒暑假的影响,高校建筑在使用方面具有间歇性,然而在现行的居住建筑和公共建筑节能设计标准中没有对高校建筑的特殊性做出专门规定,亟待展开相关研究。本书在调查分析寒冷地区高等学校建筑使用特点和建筑能耗特点的基础上,综合运用建筑学、城市规划、建筑环境与能源应用工程等专业的理论基础,多学科、多角度地对校园微气候调节技术、建筑围护结构节能技术、建

筑设备节能技术以及可再生能源应用技术等高校建筑节能关键技术进行研究,建立高校建筑节能技术适宜性评价指标体系,提出满足节能标准要求的校园建筑节能技术方案,并将研究成果加以推广应用,可为寒冷地区节约型校园建设提供参考和借鉴。

本书是在江苏省“六大人才”高峰项目“寒冷地区高等学校建筑节能关键技术研究”、江苏建筑节能与建造技术协同创新中心开放基金项目等研究成果的基础上撰写而成的,全书由冯伟负责整体策划和组织,拟定编写大纲和审稿。具体编写分工如下:第1章由冯伟、黄建恩、陈艳霞、张丽娟编写;第2章由冯伟、周泰、陈艳霞编写;第3章由黄建恩、冯伟、周永阳、刘朋编写;第4章由田国华编写;第5章由吕恒林、黄建恩、李悦、申亚楠编写;第6章由冯伟、张丽娟编写;第7章由张丽娟、黄建恩编写;第8章由黄建恩、陈艳霞、李悦编写;第9章由田国华、陈艳霞编写;第10章由吕恒林、黄建恩、冯伟、田国华、张丽娟编写。周淑春副教授、刘志勇副教授、胡波老师、张见超老师等在本书撰写过程中给予了热情指导和帮助,研究生闫加贺、张丙利、周泰、周永阳、张胜旺、刘朋、李思慧、申亚楠、郭大鹏、邱玉、薛雨凝等在本书实验测试和相关研究开展中给予了极大帮助;中国矿业大学基建处、档案馆,江苏建筑职业技术学院,江苏省建筑节能工程技术研究中心等相关单位提供了相关工程案例和资料,在此一并对他们的工作给予诚挚的感谢。

本书可供建筑节能、建筑技术等领域的科研人员、工程技术人员以及大专院校师生参考。

由于时间仓促,作者水平有限,书中难免存在缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

著 者

2017年6月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景、目的与意义	1
1.2 节约型校园建设概况	2
1.3 微气候调节技术	4
1.4 建筑设计节能技术	7
1.5 围护结构节能技术	10
1.6 建筑设备节能技术	16
1.7 可再生能源利用技术	20
1.8 建筑节能技术评价	25
1.9 研究内容	27
1.10 技术路线	28
2 建筑能耗调查及节能潜力	29
2.1 调查目的、内容与方法	29
2.2 建筑能耗调查	29
2.3 能耗特点与节能潜力	40
2.4 小结	43
3 校园微气候调节技术	44
3.1 植被对微气候的影响测试	44
3.2 建筑布局对室外风环境影响数值模拟计算	46
3.3 微气候调节技术措施	62
3.4 小结	69
4 建筑设计节能技术	70
4.1 建筑朝向	70
4.2 自然通风	72
4.3 建筑体形	75
4.4 平面布局	77
4.5 窗墙比与遮阳	79
4.6 小结	82

5 围护结构节能技术	83
5.1 外墙.....	83
5.2 屋面.....	105
5.3 楼地面.....	107
5.4 外窗.....	108
5.5 小结.....	113
6 建筑设备节能技术	114
6.1 采暖.....	114
6.2 空调.....	118
6.3 冷热源.....	128
6.4 给水排水.....	133
6.5 电气.....	138
6.6 小结.....	142
7 可再生能源利用技术	143
7.1 太阳能.....	143
7.2 地热能.....	152
7.3 空气热能.....	156
7.4 小结.....	157
8 建筑节能技术适宜性评价	158
8.1 评价目的、原则和方法.....	158
8.2 评价指标体系.....	158
8.3 冷热源综合评价.....	162
8.4 建筑外墙综合评价.....	189
8.5 小结.....	194
9 工程实例	195
9.1 学生公寓设计实例.....	195
9.2 新建图书馆设计实例.....	206
10 结论与展望	215
10.1 结论.....	215
10.2 展望.....	216
参考文献	217

1 绪论

1.1 研究背景、目的与意义

1.1.1 研究背景

由于资源和能源日趋紧张,生态环境日益恶化,土地资源日渐减少,节能减排已成为世界各国政府的重要工作。据统计,建筑物在其建造、使用过程中消耗了全球能源的 50%,产生的污染物约占污染物总量的 34%。在严峻的现实面前,建筑业别无选择,必须走可持续发展之路^[1]。根据近 30 年来能源界的研究和实践,目前普遍认为,在各种节能途径中,潜力最大、最为直接有效,且能缓解能源紧张、解决社会经济发展与能源供应不足这对矛盾的有效措施之一就是建筑节能^[2]。

我国人口众多,能源和资源短缺已成为制约社会可持续发展的瓶颈。目前,建筑能耗约占社会总能耗的 28%^[3],随着城镇化的发展和人民生活水平的提高,建筑用能还在快速增加。在建筑领域实现节能减排对建设节约型社会、贯彻落实科学发展观具有十分重要的意义,建筑节能也是国家确定的十大重点节能工程之一。

中国教育类事业单位数量约占全国公共机构总数的 34.46%,用能总量约占各类公共机构用能总量的 39.33%,机构数量和用能总量均居各类公共机构首位^[4]。截至 2015 年年底,全国共有普通高等学校和成人高等学校 2 852 所,其中普通高等学校 2 560 所(含独立学院 275 所),各类高等教育在校总规模达到 3 647 万人,普通高等学校校舍总建筑面积 89 141.38 万 m²^[5]。调查显示,高校校园能耗约占社会总能耗的 8%,高校生人均能耗指标高于居民人均能耗指标,是全国人均生活用能的 4 倍^[6]。高校资源利用主要包括土地、能源(包括电力、煤、油、气、热力等)、水、建筑材料、办公用品、教学用品、实验用品等多个方面。高校能源和资源具有种类多、总量大、人均消耗水平高、能源费用支出高、节能潜力较大等特点。实行高校建筑节能、建设节约型校园,是推行建筑节能工作的重要组成部分。

为促进节约型校园建设,教育部 2005 年发布了《关于贯彻落实国务院通知精神做好建设节约型社会近期重点工作的通知》,2006 年发布了《关于建设节约型学校的通知》,2008 年和建设部联合发布了《关于推进高等学校节约型校园建设,进一步加强高等学校节能节水工作的意见》和《高等学校节约型校园建设管理与技术导则》,2013 年下发了《教育部关于勤俭节约办教育建设节约型校园的通知》,这些文件的制定说明国家对建设节约型校园高度重视和关注。

随着国家的发展,高等教育将进一步普及,按 2010 年制定的《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》,高等学校的毛入学率将从 2009 年的 24.2% 提高到 2020 年的 40%,高等学校办学规模将进一步扩大。受寒暑假的影响,高校建筑在使用方面具有间歇性,然而在现行的居住建筑和公共建筑节能设计标准中没有对高校建筑的特殊性做出专门规定,缺少专门针对高校建筑节能的相关标准和成熟的技术方案,亟待展开相关研究。因

此,开展寒冷地区高等学校建筑节能关键技术研究具有十分重要的意义,是建设节约型校园的重要支撑。

1.1.2 目的与意义

当前我国经济社会发展进入新的历史时期,中央明确提出建设节约型社会。高等院校作为培养人才、传播和创造知识并为社会服务的重要场所,在我国社会和经济发展中占有相当重要的位置,应该为建设节约型社会做出应有的贡献。

在调查分析寒冷地区高等学校建筑使用特点和建筑能耗特点的基础上,综合运用建筑学、城市规划、建筑环境与能源应用工程等专业的基础理论,多学科、多角度地对校园微气候调节技术、建筑围护结构节能技术、建筑设备节能技术以及可再生能源应用技术等高校建筑节能关键技术进行研究,建立高校建筑节能技术适宜性评价指标体系,提出满足节能标准要求的校园建筑节能技术方案,并将研究成果加以推广应用,为节约型校园建设提供重要技术支撑,具有十分重要的意义。

(1) 对大学生具有重要的教育示范作用。培养大学生正确的世界观、人生观、价值观是高等学校的根本任务,在高校中开展节能减排行动,并将其与学校管理、学生工作有机结合,可以让大学生充分认识和体会到建设节约型校园的重要意义,培养节能减排理念。

(2) 控制校园建筑总能耗。随高校招生规模的扩大,我国高等教育逐步由精英教育转向大众教育,一些高校纷纷建设新校区,高校建筑总量不断增加。控制高校建筑能耗是节能减排的重要组成部分。开展高校建筑节能关键技术研究与应用有利于控制校园建筑能耗总量。

(3) 高等学校具有丰富的人力资源和技術优势,广大师生具有极高的社会责任感和使命感,为推行建筑节能提供了良好的客观条件。相对于社会其他地方,高校推广建筑节能具有十分强的示范作用,可促进全社会对可持续发展理念的理解和接纳。

(4) 研究寒冷地区高校建筑节能关键技术有助于完善建筑节能技术体系,研究成果可转化性强,市场前景广阔,经济效益、社会效益较大,对促进节约型校园建设具有重要的意义,对整个建筑领域的节能发展也具有重要的参考和借鉴意义。

1.2 节约型校园建设概况

1.2.1 国外发展概况

西方发达国家十分重视节约型校园建设工作^[7]。欧美国家自 20 世纪 70 年代能源危机以来,在这方面进行了很多的研究和尝试,值得我们学习。1972 年斯德哥尔摩人类环境会议第一次提出了绿色学校的理念。1994 年联合国教科文组织提出了“可持续性的教育”^[8]。美国成立了气候变化应对协议校长联盟,有 318 所学校加盟;美国、加拿大还联合成立高等教育可持续发展协会,由 320 所学校组成^[9];英国开展了以学校为舞台,学生为主体的“人与地球”环保节能运动,加盟高校有 55 所;英国还成立了由 170 多所大学和其他机构组成的高等院校环境联合会,以论坛形式的有 18 所高等教育机构参加的面向可持续的高等教育合作社^[10-12]。可见,发达国家在高校推广节能与环保的理念和行动走在世界的前列,已经取得了显著的成效^[12-14]。

不同的国家,不同的学校,情况不同,具体的做法也存在着差异,但目标是一致的,即促

进可持续发展的节约型校园建设。例如,耶鲁有一个综合全面的可持续发展的框架,包括对自然生态环境的保护、水资源的节约保存、材料回收再生,以及在餐厅使用自然、当地产的食品等。2000年,耶鲁成立了一个由教员领头的工作组——环境管理咨询委员会,对学校在环境上的做法提出改进意见。其后,学校建设了一系列的小型环境工程,还创立了可持续发展办公室。耶鲁的主要目标是到2020年使学校的温室气体排放在2005年的基础上降低43%。

2005~2007年,耶鲁的具体做法如下:在全校的300座大楼中,对90座大楼的供暖、通风和冷气系统进行了改装;供暖和照明采用全自动控制;所有大楼都安装了隔热窗;多个大楼内安装了地热泵,帮助供暖和制冷;学校还使用太阳能和风能。根据绿色建筑评级系统——领先能源和环境设计(LEED),所有的新建大楼和既有建筑改造均达到或超过了“银”级标准。因此,在项目启动的前两年,耶鲁的碳排放减少了43 000 t,即在2005年的水平上下降了17%。

英国在高等教育可持续化的议题上所采取的措施是相当领先和独特的,尤其是在绿色高校学生公寓方面很有建树。东英吉利亚大学康斯特布尔学生宿舍(Constable Terrace, The University of East Anglia, England)和牛津大学利纳克尔学院亚伯拉罕楼(Abraham Building, Linacre College, Oxford University, England)都是著名的绿色低能耗建筑,使用了混合型通风、被动太阳能设计、保温隔热等措施,且利用厚重结构调节室内环境,使环境自我调控;人工照明采用配有高频镇流器的节能荧光灯,并在公共区域设有自动红外线照明控制感应器;供热系统采用高效节能的冷凝式燃气锅炉;对于水资源的回收与利用,设计了中水回收及利用系统,并综合场所特点、植被特点、经济等因素提出了运用场所绿化的手段来抵消因运营而产生的温室气体的方案^[12,15]。

可见,发达国家在高校推广节能和环保理念方面与行动上已走在世界的前列,且取得了较为显著的建设成效。学习国外先进的节能措施固然非常重要,但考虑到国外气候、环境、文化等因素与我国的差异性,应根据我国校园建筑的实际情况进行选择性地借鉴和吸收。

1.2.2 国内发展概况

有关资料显示,我国高校年电力消耗总量占全国总消耗量的5%,能源费用超过800亿元,单位面积电耗是普通居民家庭单位面积电耗的4倍以上,单位建筑面积能耗超过世界头号耗能大国——美国^[16-17]。自2007年开始,住房和城乡建设部、教育部、财政部以推进节约型校园建筑节能监管体系建设为切入点,通过综合应用制定政策、建立标准、财政扶持和示范引导等手段全面推进高校建筑能效提升工程^[18]。从2008年浙江大学、同济大学等12所高校试点建设节约型校园建筑节能监管体系示范项目以来,截止到2016年,我国的节约型示范校园建设已覆盖全部部属院校,并带动了一批地方院校的示范校园建设,数量超过300所。2011年由我国第一批节约型校园示范大学为核心发起中国绿色大学联盟,成为推动我国节约型校园建设的第一个NGO组织和核心力量^[19]。

屈利娟、王立民、陈伟^[18]对52所监管平台示范建设高校2013年度的能耗与水资源消耗情况进行了统计分析,所有样本高校的平均能耗为754 kgce(千克标准煤)/生,单位面积能耗平均为2 079 kgce/m²,平均水耗为65 m³/生。其中:增均能耗以严寒地区高校最高,为1 290 kgce/生,是夏热冬暖和温暖地区高校的3.75倍,是夏热冬冷地区高校的2.76倍;相应的单位面积能耗也与平均能耗一致,为夏热冬暖和温暖地区高校的4.2倍,是夏热冬冷

地区高校的 2.66 倍;平均用水量以夏热冬冷地区高校最高,严寒地区高校最低,分别为 $90 \text{ m}^3/\text{生}$ 和 $61 \text{ m}^3/\text{生}$ 。

从监测建筑物类型分析,各高校纳入能耗监管平台的建筑类型均较为齐全,其中,教学楼、行政办公楼、图书馆、食堂餐厅、综合楼、科研楼和学生宿舍等 7 类校园常规建筑的监测率均达到 94% 以上,教学楼达到 100% 监测,其他建筑如场馆建筑、特殊实验室、校医院、集中浴室和交流中心等,由于部分高校并不具备该项功能的建筑,因此在受监测的比例上有所降低,分别在 87%~75% 之间。从各高校总体节能节水量化成效的自我评价来看,大多数高校认为通过节能监管平台节能节水成效在 5%~10% 之间;而水耗节约与能耗节约比较,校园节水的量化效果优于节能量化效果。

为了从制度上保障节约,北京 90 多所高校成立了节约型校园建设领导小组和能源管理办公室,将建设节约型校园纳入学校规划,建立长效机制,加大投资规模,改善设施设备,完善节能团体和志愿者队伍建设。同时建立完善的节约制度,包括仓库管理,物资设备配备,设备运行与修缮管理,资源与能源统计、公示、审计等制度,做到节能、节水、节地、节材、节粮和保护环境。北京计划投资 3 亿多元,为 90 多所高校的 150 个校区免费安装餐厨垃圾就地资源化处理设备。试点已在昌平区内的北京农学院、中央财大、华北电力大学等 11 所高校展开,学校每天产生的剩饭剩菜将就地处理,变废为宝。据统计,近年来,北京高校在节能减排方面共投资 8.9 亿元,用于节水、节电、节气、节能等工程建设。目前北京绝大部分高校装有雨水透水砖和下凹式绿地等雨水利用装置,有 48 所学校完成水平衡测试,建立了 52 座中水处理站,每天可处理污水回收利用近 2.1 万 m^3 。为节约能源,高校普遍采用了加装有限电装置的智能 IC 卡用电管理系统,学生食堂实行用电成本核算,办公场所普遍更换节能灯具,图书馆、自习室采用分区照明技术等。供暖期内,则采取低温供暖、寒假期间合并学生宿舍等办法,以减少采暖能耗^[20]。

可见,国内对节约型校园建设也十分重视,国家和地方政府出台了相关政策大力推动节约型校园建设。研究校园建筑节能关键技术对推动节约型校园建设具有重要的意义。

1.3 微气候调节技术

20 世纪 50 年代以来,国内外学者持续关注绿化和建筑布局对室外微气候的调节作用,并通过实验、现场测试和数值模拟计算等方法进行了很多相关的研究。

1.3.1 植被对微气候的调节

植物蒸发、成荫性、冷却通风等天然功能,能十分有效地调节城市微气候^[21]。苏联学者研究了不同种类的树木对室外热湿环境的改善效果,分析了各个树种的影响程度^[22],为绿化树种的选择提供了理论指导。日本学者 Akira Hoyano 从建筑物的温度和空气的温度着手研究了绿化对建筑热环境的改善作用^[23]。Toshickt Ichinose 通过现场实测的方法研究了绿化对建筑热环境的影响,结果显示,绿化对建筑热环境改善效果明显^[24]。美国学者主要对绿化缓解热岛效应进行了研究,定量分析了绿化对环境的改善作用;通过研究发现,通过增加果园的面积和加大灌溉力度的方法可以使城市的温度降低 $2 \text{ }^\circ\text{C}$,说明城市绿化可以有效缓解热岛效应^[25-26]。B. Bonan 利用卫星观测图片,测试了科罗拉多的一个居民小

区,以研究建筑设计对室外温度、风速及相对湿度等环境变量的影响,从而研究植物选择、浇灌草坪和住房密度对室外热环境的影响。新加坡学者 Nyuk Hien Wong 等对不同密度和高度的绿化进行了数值模拟,并对结果进行了验证,在对 32 种情况进行分析的基础上,提出绿化是改善热环境的有效措施,绿化可以使城市的温度降低 2°C ^[27]。

王廷夷^[28]研究了夏热冬冷地区植被对建筑热湿环境的影响,在对不同覆盖物地面的温度进行了现场测试的基础上,通过数值模拟分析了植被的面积、高度及覆盖率对室外温度和风压的影响。李帅、敬鑫、于海漪^[29]对北方工业大学的三处典型性地段实地检测,用温度和湿度两个指标定量分析了绿化、铺地面材料和建筑布局对校园微气候的影响。林波荣^[30]通过大量现场实测工作,建立相关数据模型,研究了不同绿化形式对室外热环境的影响效果及特征,提出利用有效遮阳绿量的概念以指导绿化,改善小区热环境。胡永红、王丽勉、秦俊等^[31]在研究上海植物园群落的基础上,选择了单纯草坪、乔灌草复合型群落、纯林等几个比较典型的群落配置,对微环境的改善效果进行了现场实测,结果表明,结构越复杂的群落在增湿降温方面的效果越明显,而单纯草坪对微气候的调节能力则相对较弱。

晏海、王雪、董丽^[32]选择北京奥林匹克森林公园 8 个植物群落为研究对象,对其夏季日间微气候效应进行了量化研究,在夏季时,植物群落与对照点相比,日平均空气温度、相对湿度及光照强度之间的差异均达到了极显著差异。群落日均空气温度降低 $1.6\sim 2.5^{\circ}\text{C}$,平均值为 2.0°C ;日均相对湿度增加 $2.9\%\sim 5.2\%$,平均值为 4.3% ;日均遮光率达 $61.0\%\sim 96.9\%$,平均值为 82.2% 。不同树种的微气候因子也存在差异,日平均温度排序均为:钻天杨/油松>旱柳>洋白蜡>银杏>刺槐>毛白杨>栾树;日平均相对湿度排序均为:栾树>银杏/毛白杨>刺槐>旱柳>油松>钻天杨>洋白蜡;日平均光照强度排序为:旱柳>钻天杨>银杏>油松>洋白蜡>刺槐>栾树>毛白杨。

李英汉、王俊坚、陈雪等^[33]选取深圳市 3 个典型居住小区为研究对象,利用实地观测及景观格局分析方法,探讨居住区绿地植物冠层格局特征对微气候的影响。3 个小区绿地温湿度调控效应都与高度在 1.5 m 以上植物的冠层格局特征显著相关,表明以乔木为代表的高大绿化树种温湿度调控能力最强,基于温湿度调控功能的小区绿化应考虑以乔木为主的绿化方式。在温湿度调控能力达到预期目标的基础上,再考虑结合灌木、草坪等绿化方式,以完善小区绿地的综合功能。赵娜^[34]对草地、草地+灌木、草地+乔木+灌木、树林+草地等四个不同植被结合方式的调节温度效果进行了实测比较:单纯露天草地最差,草地+灌木结合次之,树林+草地结合再次之,灌木+乔木+草地的结合方式最优。由此看出,当前很多地方采用大面积草地的绿化手法对降低温度效果并不是很好,特别是在武汉这种夏季时间相对较长的地区。

赵敬源、刘加平^[35]利用街谷动态模型,对典型街谷进行了温度场数值模拟。通过大量的数值分析,比较了街谷高宽比、下垫面材料、街谷走向以及街谷两侧建筑立面形式等一系列街谷设计因素对其热环境的影响。模拟结果定量地揭示了各项因素对街谷热环境的影响方式和影响程度,给出了最佳高宽比的推荐范围。

众多学者的研究表明,植被绿化对缓解城市热岛效应、调节城市微气候环境具有十分显著的效果。绿地率对建筑能耗的影响最大,可使气温降低 2°C 左右,这将导致建筑能耗降低 4.5% 。

1.3.2 建筑布局对风环境的影响

风环境对城市人居环境的质量具有重要影响,建筑单体设计或建筑群体布局不当会影响行人的舒适感与安全感、不利于开窗通风、局部通风不良致使污染物难以扩散等。对建筑室外风环境进行预测评价可以为城市规划设计的优化提供一定的指导意义,城市风环境的研究越来越受到重视。

印度学者 Kamlesh Dutta 等^[36]在考虑室外风环境的基础上分析了合理的规划布局和建筑空间结构,并且基于一定的参数给出了一些可行的解决方案。英国学者 Hugh Barton 等列举了几种比较典型的规划布局形式,并对其进行了通风效果的模拟,分析了几种典型规划布局的优劣,提出了有利于通风和降低能耗的建议^[37]。Hsieh、Lien 和 Zhai、Chen 均借助于 CFD 软件对室外风环境对建筑的影响进行了研究,分析了其影响因素^[38-39]。吴晓冬^[40]从城市住宅组团的空间形态出发,基于局地微气候的合理性,从组团规划布局各要素几何特征、组团空间形态界面、组团空间填充物分布及特点等方面,研究住宅组团布局对组团居民居住心理舒适度、微气候环境所产生的正作用及局地微气候对于组团布局起到的反作用,从而得到间距、高度比等量化的规划因子评价指标体系。

陈飞^[41]对不同形式的建筑室外风环境进行了研究,分析了建筑形式、平面布局及空间形态对风环境的影响,运用层次分析法建立了夏热冬冷地区风环境评价体系,为城市建筑布局的选择提供了必要的技术参考。王新华^[42]对不同室外环境和建筑形式等对室内流场分布的影响进行了研究,采用 FLUENT 软件对室内外气流场稳态湍流流动进行数值模拟,分析了小区的室内外风环境,使得风环境的研究更加全面和系统。都桂梅^[43]采用 FLUENT 软件对小区人行高度的风环境进行了模拟研究,主要从规划布局和风向两个方面对人行高度的风环境进行了分析,并且对建筑的规划布局提出了相应建议。

于海泳和全远丽借助于 CFD 软件模拟研究了室外风环境的影响因素^[44-45]。殷超杰^[46]通过现场调研的方法,对室外地形、水体和植被等因素对小气候的影响进行了调查,在现场调研与理论分析的基础上,利用 Phoenix 软件分析了建筑室外风环境的影响。王珍吾、高云飞、孟庆林等^[47]以广州为例,针对典型规划布局的室外风环境进行研究,对常见的楼群布局(并列式、错列式和周边式)进行了整体的风环境模拟,分析了不同布局方式对室外风环境的影响。杨晓彬、陈志龙、上官林宏等^[48]以南京某居住小区地下停车规划为实例,利用微气候流体力学模拟软件 ENV-met 量化分析了地下停车规划对该居住区室外环境的影响,探讨了地下停车规划对居住区城市微气候的影响与效益。邱长存、任乃鑫^[49]以临沂地区某住宅项目为例,通过 Ecotect 软件模拟,从风环境、光环境、热辐射等影响因素方面对规划住宅小区的单体朝向、建筑间距、布局形式进行了分析,并依托分析结果,对该项目规划方案的合理性进行了评价。张春灵、姜允芳^[50]以常州某一住宅小区规划设计方案为例,运用计算流体力学 Airpak 软件对居住建筑群进行了风环境数值模拟和优化。郑子豪、陈颖彪、千庆兰等^[51]将快速三维建模软件 CityEngine 2012 与局地微气候模拟软件 ENVI-met 相结合对珠江新城西区的微气候进行了数值模拟研究,利用 CityEngine 这一交互建模工具可以基于 GIS 数据快速建立大范围观测模型,并且能够方便、快捷地更新与维护模型系统的特点,同时,应用 ENVI-met 软件进行城市局部地区的微气候模拟,将城市三维模型与微气候模拟结果相结合,进行可视化展示。冯伟、吕恒林、田国华等^[52]采用 FLUENT 软件对 8 种苏北地区典型布局方式的农村住宅建筑群的室外风场进行数值模拟计算,对比分析不同布局建筑

群室外风场的优劣,提出了合理的住宅建筑布局方式。李晗、吴家正、赵云峰等^[53]以青岛市居住区最常采用的3种建筑布局形式(行列式、围合式和点群式)为研究对象,采用城市微气候模拟软件 ENVI-met 进行数值模拟,研究了不同建筑布局居住区的室外微环境特征。叶宗强、周典、徐怡珊^[54]通过对大型居住区风环境的实测调查,验证了利用 FLUENT 流体计算软件并合理设置参数与计算方法是可以用来研究及表达大型居住区风环境特点的,并利用正交实验设计对居住区的空间规划方案进行典型化提取,通过对规划方案的风环境进行模拟评估,分析总结了大型居住区在建筑平面布局、空间高度控制和住宅单元组合方式上的规划策略。麻连东^[55]运用微气候模拟的数值模拟软件对哈尔滨地区多层住宅行列式、围合式和混合式建筑布局的室外微气候环境进行了数值模拟研究,运用人居环境评价标准对各种布局模式的微气候环境水平进行了对比,并提出了优化设计策略。

龚晨、汪新^[56]针对行列式、错列式、斜列式、混合式等4种典型的城市住宅小区布局形式,采用 ANSYS-CFX 软件建立76种不同参数的数值模型,并通过 CAARC 标准模型对采用的网格划分、模拟方法及边界条件进行验证分析,对数值模型进行三维流场模拟,研究不同参数(风向角、布局形式、建筑尺寸等)对典型城市住宅小区风环境的影响。分析结果表明:微风环境下,当来流风速垂直于建筑长度方向进入小区时其内部风环境较差;不同工况下人行高度(离地1.5 m)处风速主要发生区域为小区过道入口;建筑物长度对小区风环境的影响较为显著,当长宽比 $L/B=3:1$ 时及采用斜列式布局能够有效改善小区内风环境状况。

王宇婧^[57]运用 Phoenics 方法,对不同周边范围影响下的典型板式建筑街区、塔式建筑街区进行了风环境模拟与对比,同时还研究了不同等级的道路、公园等开场空间,不同夹角的主导风向以及建筑高度对城市街区风环境的不同影响。

李顺^[58]以济南市某大学校园为研究对象,运用计算流体力学(CFD)软件模拟了夏季典型风向下风速为2.8 m/s和冬季典型风向下风速为2.7 m/s时的校园室外风热环境分布状况,对校园内的风速分布和压力分布以及温度分布进行了模拟分析及评价。王芬^[59]利用流体力学计算软件 Phoenics 分析法和现场调查法,对赣南师范学院校园内部的风环境舒适状况进行了全面分析,针对风环境条件较差的区域,在建(构)筑物布局、绿化种植和景观设计等方面提出人性化改进措施。徐进欣^[60]对现有风环境舒适度评估标准进行归纳总结,确立了适合大学园区的风环境舒适度评价标准。利用风环境模拟软件 Phoenics,针对山东建筑大学现状和规划方案分别建立模型,通过对山东建筑大学风环境的分析总结,从校园整体布局、建筑群优化、建筑单体设计和景观布置利用等方面提出大学园区的风环境优化策略,为大学园区的建设提供参考和借鉴。

目前,建筑室外风环境评价方法主要有现场实测、风洞实验法和数值模拟计算等方法^[61]。风洞实验法具有模型制作成本高、周期长、难以同时研究不同方案等特点,而数值模拟计算方法利用计算流体力学理论进行模拟分析,具有快速简便、准确有效、成本较低等优点,受到广泛认可并大量应用到工程实践中。

1.4 建筑设计节能技术

对于建筑师来说,可以通过科学规划布局、合理建筑设计等手段,在保证和提高建筑舒

适度的条件下,减少采暖、空调的能耗,来实现建筑节能。建筑平面的布局,特别是建筑物的平面形状、进深、长度、层高、层数等参数对建筑室内热环境影响非常大,决定了建筑的被动节能效果。为了使室内获得良好的通风效果,必须在规划和设计阶段进行节能控制,包括庭院的绿化、建筑的布置、建筑的朝向、开口位置和方向等。

我国在最初执行建筑节能标准的过程中,很多时候更加注重建筑围护结构和采暖空调的节能技术,没有足够重视建筑设计阶段的节能工作。随着建筑节能工作的深入,对于建筑本体的节能设计技术越来越重视,在我国各类建筑节能设计规范中,都对建筑节能的节能技术提出了相应的要求。

建筑体形系数是建筑设计重要的参数,其体形的变化直接影响着建筑采暖空调负荷的大小。《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 26—2010)对建筑体形系数提出了相应的要求,规定了寒冷地区3层以下建筑体形系数 ≤ 0.52 ,4~8层建筑 ≤ 0.33 ,9~13层建筑 ≤ 0.30 。有研究资料表明,体形系数由0.4减少到0.3,围护结构传热损失可降低25%,全年采暖空调能耗可减少13%,建筑体形系数对建筑能耗影响显著。但是体形系数在节能建筑设计中的变化规律和应用、在操作过程中的价值讨论甚少,使建筑师对体形系数了解不多,重视不够。

建筑物的朝向对于建筑能耗指标的影响也非常大。在冬季,采暖建筑的能耗主要由建筑的热损失减去得到的太阳辐射热,为了在寒冷的冬季得到更多的太阳辐射热,减小能耗,就需要建筑具有南向的主立面。而夏季的空调能耗主要是太阳辐射热和建筑室外热传递的总和,因此在夏季应尽量减少太阳热辐射,这就需要减少东西向的空调房间数量和面积。

国内对校园建筑的量化研究不多,王洪光^[62]对西安地区高校教学楼建筑室内热环境进行了研究,通过测试和问卷之间的对比分析找出了西安地区高校教室室内热环境存在的问题。即夏季处于自然通风状态的教室室内热环境质量较差,需要进一步改善。冬季采暖教室内的温度偏高,不利于学习,而且老教室门窗渗透严重,热能损失过多,室内温度偏低。由于教室无换气设施,室内空气质量较差,空气比较干燥。

胡帆^[63]从低能耗角度探讨长沙地区高校教学楼低能耗优化设计策略。但其有关论文仍然以经验研究为主,没有提出具体设计方法。

王磊、龚波等^[64-65]采用计算流体力学方法,对成都某高校新校区教学楼周围风环境进行数值模拟分析,比较了风向及教学楼间距对教学楼周围自然通风引入的影响。然后在此基础上进一步对自然通风教室室内温度场、速度场进行模拟,并利用国内外自然通风热舒适研究成果,结合成都地区气象特点建立了成都自然通风热舒适评价模型,对自然通风教室内学生热舒适性做出评价及比较分析。但其对于教室的模拟是以自习课教室为对象,在教室门窗全开敞的状态下进行的,这与高校教室以上课为主的情况不一致,并且多媒体教室在上课时无法对流通风。该研究没有考虑自然通风的不确定因素,故其研究成果不具有广泛意义。

在建筑设计节能方面,涌现出了很多优秀的设计实例^[12,15]。

东英吉利亚大学康斯特布尔学生宿舍能容纳将近400名学生,是英国迄今为止规模最大的低耗能宿舍,总面积9100 m²,造价约620万英镑。在建筑设计过程中,以下几个方面与众不同:首先是形体,依照传统类型演变过来的联排房单元,以服务空间为中心沿东西分布,形体与空间紧凑,体形系数小,加之由于联排而使外部围护面积暴露少,因此使得冬季热损失少,同时又减少了保温层使用量,节省造价;缺点是不利于自然通风、自然采光和利用太

阳能。其次是保温绝热设计,其外墙是由 100 mm 的泡沫型加强砌块、50 mm 的空气层、100 mm 的矿棉保温层、100 mm 的泡沫型加强砌块构成的(顺序由外到内),此种围护结构拥有较好的热惰性,可以滞后和减弱室温波动。窗采用双层中空低热反射率玻璃;为了减少热损失,窗的尺寸采用了规范中的底值(1 400 mm×900 mm)。在节能建筑中,由于不完善的冬季通风控制导致的热耗是相当大的。该楼采用混合型通风方式(mixed mode ventilation)设计,夏季通过开窗实现自然通风[大致 6 AC/h(AC 为一个循环)];冬季置换式机械通风系统将室外新鲜空气从屋顶挑檐下引入,途经位于顶层的热回收系统低速低位送进室内,室内陈旧空气亦途经热回收系统排出(卧室 0.5 AC/h,卫生间 6 AC/h),用以加热进入室内的冷空气(大致可利用 70% 的潜在热量)。研究表明,虽然此设计增加了 2 000 kW·h 的通风耗能,但通风方式的改变在加强型保温隔热方案的基础上节省了 7 863 kW·h 的供热耗能(达到 333 kW·h)。

牛津大学利纳克尔学院亚伯拉罕楼(以下简称“利楼”)建于 1994 年,面积 986 m²。采取的基本设计策略如下:

(1) 充分利用被动太阳能设计

利楼的设计平面具有短进深的特点,将自习型卧室置于朝阳的南侧,把诸如厨房、储藏、卫生间等空间置于北侧。房间南墙开大型高窗,配合百叶遮阳,减少冬季供热量,并充分利用自然采光,减少照明用电。

(2) 加强保温隔热措施

利楼的围护结构采用了较高水准的保温隔热措施,围护结构的传热系数约为英国当时规范标准的一半。墙体采用“三明治”构造,即外层红砖墙加 125 mm 矿物纤维保温层再加内侧混凝土砖墙;窗采用皮尔金顿(Pilkington)低散热型双层中空玻璃窗。

(3) 利用自然通风

利楼除地下室的健身房采用机械通风系统以及厨卫采用了抽风装置外(设置热回收装置),其余部分均采用自然通风系统。卧室在夏季通过开窗实现自然通风,冬季依靠上下推拉窗的细部设计实现微量通风。厨房与卫生间平时可利用烟囱效应拔风,其效果受室内外温度和气压影响较大,但监测表明在一般状态下,其通风效果良好。

(4) 利用厚重结构调节室内环境

混凝土楼板和室内外厚重的砖墙热容量较大,使室内温度变化幅度受室外影响减小。

清华大学超低能耗示范楼总建筑面积为 3 000 m²,包括地下一层,地上四层。其中地下层主要为设备用房(包括空调冷、热水机房,配电室及水泵房等),地上部分主要为实验室、办公室及展示厅。建筑采用钢框架结构,内部可以根据使用要求灵活隔断。建筑物东立面和南立面采用双层皮幕墙及玻璃幕墙加水平或垂直遮阳两种方式,综合得热系数为 1.0 W/(m²·K),太阳得热因数为 0.5。西北向采用 300 mm 厚的轻质保温外墙,铝幕墙外饰面,传热系数为 0.35 W/(m²·K),外窗采用双层中空玻璃,外设保温卷帘。屋顶采用种植屋面,同时还设置了光导管采光系统,利用太阳光为楼道和地下室提供采光,减少白天照明电耗。室内采用相变蓄热活动地板,使得冬季室内温度波动不超过 6℃。除卫生间冬季采用散热器供暖外(热源接自相邻建筑),整个建筑物均采用模块化结构的集中空调方式来保证室内的温湿度要求。节能楼全年电耗仅是同类建筑物的 30%,节能 70%^[66-68]。

中国台湾成功大学被称为“绿色魔法学校”,其采取的主要建筑节能措施为^[69]:(1) 采

用百分之百的绿色建材设计。首先该建筑采用了高炉水泥技术,减少了30%的水泥用量与10%的二氧化碳排放量,同时增加混凝土最终强度40%;其次将水库的污泥烧制成陶粒,作为隔间墙骨材以及屋顶花园的土壤,可吸音、保水;采用不会产生戴奥辛(Dioxins)与卤酸气体等有害物质的电线、回收尼龙做的地毯、回收宝特瓶抽纱制作的窗帘,以及不含甲醛与重金属的油漆、抑菌钢板,可吸臭气的墙面等。此外,建筑外的车道,采用的是柳中明教授设计的生态工法,“可耐高压,开坦克车都行”,还可吸附二氧化碳。屋顶有空中花园隔绝热气,还有可随太阳转向的太阳能板,以及作为风力发电的桅杆。(2)采用灶窑通风系统。该建筑利用古老的灶窑原理,使其崇华厅内部的风速即使在冬天11月至3月不开空调也可维持在0.1~0.6 m/s的舒适范围内,新鲜空气的换气次数可达5~8次的最健康水平。当气候变热、室内人数增多时,会增加烟囱效应的热流动力,同时也会增强室内风速与通风量,符合通风卫生上的需求。

尽管国内外都曾针对校园建筑进行过很多节能设计研究,但由于各地气候差异、社会经济发展状况不同,造价等各方面原因,这些技术并没有在高校建筑中普及采用,因此,根据目前的现状,我国亟须发展适合于高校建筑的节能关键技术,特别是形成一整套具体详细的技术措施和评价体系,具体应用于学校建设和管理中,促进节约型校园的发展。

1.5 围护结构节能技术

建筑围护结构是构成建筑空间、抵御环境不利影响的构件。随着全球可持续发展和节能减排意识的不断增强,建筑围护结构再次成为人们关注的焦点。在建筑能耗中有60%左右为采暖空调能耗,是建筑能耗中最大的部分,其中,围护结构的耗热量占建筑采暖空调能耗的1/3以上^[70-72]。围护结构节能是建筑节能的关键组成部分。

1.5.1 外墙

研究表明,外墙的热损失占建筑总热损失的30%左右^[73],外墙保温体系的优化对整个建筑的节能起着重要的作用。

1.5.1.1 外墙保温系统

国外关于建筑外墙保温体系的研究起步较早,早在30多年前就制定了很多的相关法规。国外称外墙保温体系为EIFS系统——外墙保温和装饰系统。德国在过去的几十年里使保温系统变成了建筑标准构件,在1973~2004年,德国有大约6.5亿m²的外墙使用了EIFS系统。瑞典在20世纪40年代就将抹灰砂浆喷在较高密度的矿棉板上,形成一种外墙保温系统。20世纪70年代,石油危机使得能源出现了短缺,外墙保温系统也迅速发展起来。20世纪80年代中期,经过对大量的既有建筑进行翻新改造,德国和瑞士约有40%的建筑采用了EIFS系统^[74]。20世纪90年代,欧洲的外墙保温系统逐渐趋于成熟,并稳定发展。目前,国外对于外墙保温的研究主要集中在材料上,并且重点考虑材料的燃烧性、适用性、美观性等,使得外墙保温体系更加趋于完善。

在国内,随着建筑节能研究的深入和要求的提高,单一的节能墙体逐渐地不能满足节能标准的要求,于是产生了复合节能墙体。复合节能墙体按照保温材料位置不同,分为外墙内保温、外墙外保温和夹芯墙保温,其中外墙内保温和外保温技术是大量采用的技术,在建筑