



DINENGHAO YIJU JIANZHU YINGZAO

LILUN YU SHIJIAN

2017 QUANGUO JIANZHU REGONG YU JIENENG XUESHU HUIYI LUNWENJI

低能耗宜居建筑 营造理论与实践

——2017全国建筑热工与节能学术会议论文集

中国建筑学会建筑物理分会建筑热工与节能委员会
中国建筑西南设计研究院有限公司
四川省绿色建筑与节能青年委员会

编



低能耗宜居建筑 营造理论与实践

——2017全国建筑热工与节能学术会议论文集

中国建筑学会建筑物理分会建筑热工与节能委员会
中国建筑西南设计研究院有限公司
四川省绿色建筑与节能青年委员会

编

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

低能耗宜居建筑营造理论与实践: 2017 全国建筑热工与节能学术会议论文集 / 中国建筑学会建筑物理分会建筑热工与节能委员会, 中国建筑西南设计研究院有限公司, 四川省绿色建筑与节能青年委员会编. —成都: 西南交通大学出版社, 2017.10

ISBN 978-7-5643-5831-0

I. ①低… II. ①中… ②中… ③四… III. ①建筑热工—学术会议—中国—文集②建筑设计—节能设计—学术会议—中国—文集 IV. ①TU111.53②TU201.5-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 248638 号

低能耗宜居建筑营造理论与实践

——2017 全国建筑热工与节能学术会议论文集

中国建筑学会建筑物理分会建筑热工与节能委员会
中国建筑西南设计研究院有限公司 编
四川省绿色建筑与节能青年委员会

责任编辑	杨 勇
封面设计	何东琳设计工作室 西南交通大学出版社
出版发行	(四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸	210 mm × 285 mm
印 张	41
字 数	1180 千
版 次	2017 年 10 月第 1 版
印 次	2017 年 10 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-5831-0
定 价	198.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

2017 全国建筑热工与节能学术会议

主办单位：中国建筑学会建筑物理分会

承办单位：建筑热工与节能专业委员会

中国建筑西南设计研究院有限公司

支持单位：中国建筑节能协会山地建筑节能专业委员会

四川省土木建筑学会

四川省建筑师学会

学术委员会

主 任：刘加平

副主任：王清勤 孟庆林 冯 雅

委 员（以姓氏笔画排序）：

王万江	冉茂宇	龙恩深	石 邢	任 俊	李德荣	刘 铮
闫增峰	杨 柳	杨 红	杨仕超	连之伟	陈友明	宋德萱
林波荣	金 虹	钟 珂	周 伟	赵立华	赵敬源	张寅平
唐鸣放	高庆龙	葛 坚	董 靓	董 宏	傅秀章	谢琳娜

组织委员会

主 任：孟庆林

副主任：冯 雅 谭 华

委 员：赵立华 周 伟 高庆龙 刘大龙 李 琼 钟辉智 南艳丽
许 科 窦 枚 王 晓 邱雁玲 刘东升 刘依明 李昊阳
蔡君伟 陈 俊 于晓敏 王 皎

前 言

建筑热工学是研究室内外热湿作用对建筑围护结构和室内热环境的影响的科学，是建筑物理的组成部分。降低建筑能耗，减少温室气体排放是当今世界关注的热点问题，对宜居生活环境向往也是人们之需求。低能耗宜居的建筑环境营造是建设“资源节约型、环境友好型”社会的具体体现。当前绿色建筑在全国已经进入了高速发展时期，建筑热工学发展也持续在节约能源、优化人居环境等方面为绿色建筑的发展提供重要的技术支撑。同时大量的工程实践也一直在丰富着建筑热力学的内涵，伴随新的挑战，促进着学科的发展。为此本次全国建筑热工与节能学术会议主题定位为“低能耗宜居建筑营造理论与实践”。

本届会议得到国内相关单位及广大科技工作者的热情支持与积极响应，共收到论文 166 篇，经专家评阅，最终确定 122 篇论文出版。论文集分为四个专题：建筑热工理论与节能技术 46 篇，建筑热湿环境与围护结构热湿迁移研究 39 篇，绿色建筑与低能耗建筑 26 篇，既有建筑节能改造和能源系统综合利用 11 篇。收录的论文覆盖面广，内容丰富而深入，反映了近年来我国建筑热工领域最新的研究成果。为深入交流提供了平台，也为建筑热工的今后发展明晰了方向，也必将为加快生态文明体制改革，建设美丽中国做出积极贡献。

本论文集的编辑出版工作是在中国建筑学会建筑物理分会建筑热工与节能专业委员会的指导下进行的，同时得到了中国建筑西南设计研究院建筑技术委员会的大力支持。学术委员会的专家为论文的评审工作做出了诸多贡献，保证了论文质量。西南交通大学出版社的编辑们克服了时间短、工作量大的困难，夜以继日地为本书的如期出版付出了辛勤的劳动。对他们的贡献一并表示衷心的感谢！

鉴于本次会议的论文数量多，时间短和囿于编者水平所限，论文集不当之处恳请读者提出批评指正。

本论文集的出版受到国家科技部“十三五”国家重点研发计划课题“2016YFC0700106”的资助。

论文集编委会

2017 年 10 月

目 录

专题一：建筑热工理论与节能技术

双试验段热湿气候环境风洞	李令令, 张磊, 李琼, 任鹏, 赵立华, 张宇峰, 孟庆林 / 002
极端热湿气候区气候规律探讨	董国明, 刘大龙, 刘加平 / 008
围护结构用相变材料热工性能试验研究	任俊, 陈喜明, 王莹 / 015
巴渝地区传统民居围护结构热工性能及适应性	杨真静, 徐亚男, 田瀚元 / 019
关于《民用建筑热工设计规范 GB50176—2016》几个问题思考	高庆龙, 冯雅 / 026
气候变化下的建筑气候区划研究	王赏玉, 李红莲, 吕凯琳, 杨柳, 李兆楠 / 034
呼吸式幕墙空腔通风量数值模拟计算研究	潘振, 侯燕, 管世强 / 039
加气混凝土/石蜡复合建筑材料的有效导热系数	田帅奇, 王晓, 范利武, 俞自涛, 葛坚 / 044
建筑能耗模拟的标准化方法及其意义	赵江山, 田志超, 石邢, 金星, 周欣 / 049
经济型住房微正压通风的 CFD 模拟与分析	曲凯阳, 刘琳, 刘月莉 / 054
粒径和填充厚度对气凝胶玻璃的性能影响研究	吕亚军, 黄仁达, 吴会军, 王小瑞, 周孝清 / 059
极端热湿地区建筑气候分析与设计策略初探	黄明, 李琼, 徐云飞, 孟庆林, 赵立华 / 067
气凝胶复合材料的导热和强度实验研究	钟支葵, 吴会军, 周孝清 / 071
适用城市能耗模拟的人员密度设定方法研究	武玥, 石邢, 金星, 周欣 / 076
淋水对城市沥青路面热工特性的影响	李琼, 罗中良, 孟庆林, 汪俊松 / 081
滨江住区的容积率与江风渗透能力的关联性研究 ——以武汉滨江居住区为例	夏小馨, 陈宏, 刘磊, 张家驹 / 086
温和地区居住建筑节能设计标准编制相关问题探讨	温会茹, 杜小光, 李燕微 / 092
双层通风青瓦屋顶被动蒸发冷却研究	赵群, 沈莉莉, 李峥嵘, 赵晋鹏 / 096
西安市自然通风建筑围护结构内表面温度研究	董玥, 闫增峰, 薛芳慧, 王宁 / 100
设施遮阳与绿化遮阳的节能效果对比研究	肖雪飞, 龙恩深, 金正浩 / 105
极端热湿地区湿负荷计算方法研究	宋雪丹, 刘艳峰, 王莹莹, 王登甲, 刘加平 / 111
物理模型简化对工业厂房室内自然通风数值模拟的影响	韩雪颖, 李琼, 孙文龙, 黄挺 / 116
西部地区相变蓄热通风复合降温效果研究	刘江, 刘衍, 杨柳, 侯立强, 刘加平 / 122
装配式复合墙体系围护结构热桥分析	朱晓琳, 胡冗冗 / 131
反射隔热涂料对建筑隔热性能的影响研究	张贺, 傅秀章 / 135
基于 MATLAB 的底层地面热流分析及节能优化	陈其龙, 赵西平, 胡文斌, 郝际平 / 140
基于风环境的北方农村院落平面布局研究	王皎, 黄钰, 金虹 / 147
低空遥感影像的自动拼接与配准研究	任鹏, 张欣欣, 袁旭, 孟庆林 / 154
电致变色玻璃研究及应用现状	李岩, 任鹏, 孟庆林 / 159
严寒地区夹心墙热桥形成原因分析及改进	刘琳, 曲凯阳, 刘月莉 / 164
自然通风下外窗性能对广州住宅建筑空调能耗的影响	骆诗哲, 孟庆林 / 170
办公建筑不同窗口形式自然通风规律研究	郭雷, 武艳文, 杨柳, 刘加平 / 174
城市化对城、郊冬季太阳辐射差异影响分析	贾晓伟, 刘大龙, 杨竞立, 赵辉辉 / 180

城市热岛对不同建筑类型的能耗影响	杨小山, 金涛, 姚灵烨, 朱春磊, 彭立华 / 184
参数化在建筑外遮阳优化设计中的运用	曾小洲, 赵立华, 蒋毅, 申杰 / 188
高热舒适条件下建筑节能优化分析研究	仓玉洁, 罗智星, 杨柳, 刘加平 / 193
规划引领与多维管控视角下城市风道规划应对策略研究	高月静, 赵敬源, 赵盼 / 200
嘉兴市农村住宅几何信息域相似性研究	顾绎菲, 杨利斌, 齐锋 / 206
建筑节能气候区划方法的发展与现状	白鲁建, 宋冰, 杨柳 / 213
拉萨城镇住宅冬季墙体热工测试研究	王文超, 何泉, 刘大龙, 朱新荣 / 218
麦积山所修栈道对洞窟内太阳辐射的影响	薛芳慧, 闫增峰, 董玥, 王宁 / 222
广州地区户间能耗差异初步研究	冯璐垚, 赵立华 / 227
温州市民用建筑项目节能评估实施细则中建筑专业要点与分析	曾理, 万志美, 徐建业, 林胜华 / 233
住宅建筑的气流组织研究	刘双胜 / 236
西安市酒店类建筑能耗分析	南倩, 闫增峰 / 242
西安地区居住建筑朝向调研统计研究	田悦丰, 闫增峰, 薛芳慧, 王宁, 董玥 / 247

专题二：建筑热湿环境与围护结构热湿迁移研究

北方冬季采暖前后的人体热适应性分析	纪文杰, 万瀚隆, 曹彬, 朱颖心, 林波荣 / 252
重力影响下的毛细吸水实验数据处理方法	冯驰, Hans Janssen / 256
我国某机场航站楼室内环境质量测评	张德银, 林波荣, 黄彦祥 / 260
夏季两种模式架空地面室内热环境的实验研究	钱慧博, 唐鸣放 / 265
基于主观反馈的室内环境控制新方法	张小曼, 林波荣 / 269
严寒地区冬季农村老年人居住建筑温热环境调研	张会波, 邬夏, 吉野博, 张金峰 / 276
利用优选的平衡含湿量拟合等温吸放湿曲线	崔雨萌, 孙立新, 冯驰 / 281
木质室内环境内人员心理反应的性别差异	张熙, 连之伟, 尹杰, Joseph Allen / 286
围护结构内表面辐射率与人体热舒适关系的理论研究	卢素梅, 孟庆林 / 292
外保温系统保护层的湿特性控制指标探讨分析	孙立新, 李艳娟, 周辉 / 297
中小学生学习效率与温度关系的实验研究	许延超, 王登甲, 蒋婧, 刘艳峰, 刘加平 / 302
多孔建筑材料热湿耦合传递实验研究	王友辉, 韩晓峰, 徐旭, 范利武, 俞自涛 / 308
多孔建筑材料逐时刻蒸发量计算模型的研究	王志刚, 赵立华 / 313
透水砖含水率测试标定方法研究	莫馥任, 赵立华, 张磊, 汪俊松 / 318
高湿墙基下空斗墙与实砌墙传热实验对比	孔振懿, 李永辉, 冯世虎 / 324
陶土砖对改善农村住宅地面潮湿的模拟研究	方巾中, 唐鸣放 / 328
建筑外墙外保温系统防潮概论	徐洪涛, 周辉 / 333
中性环境下人体生理适应及主观评价研究	徐沁韵, 杨柳, 林宇凡, 郑武幸, 刘加平 / 341
开敞式办公室夏季空调行为研究	
——以南京为例	刘天策, 周欣, 石邢, 金星 / 346
热景观刍议	叶海, 罗森, 徐婧 / 351
广州市城市轨道交通高架车站站台热环境研究	白雪, 白雪, 赵立华 / 358
关中地区乡镇办公建筑夏季室内热环境调查与测试分析	葛碧秋, 赵西平 / 363
建筑非绝湿地面热湿状态影响因素：实验研究	王莹莹, 姜超, 刘艳峰, 王登甲, 刘加平 / 367
建筑围护结构热湿模型建立方法及数值模拟应用	李昊阳, 姜大 / 372

城市化进程对热环境影响的 WRF / UCM 模拟评估: 大连案例研究	郭飞, 金云, 祝培生, 王时原 / 376
城市局地热岛强度预测评价	姚灵烨, 杨小山, 金涛, 朱春磊, 彭立华, 叶燕华 / 381
南京城市局地热岛效应观测	杨小山, 姚灵烨, 朱春磊, 金涛, 姜之点, 彭立华 / 385
徽州传统民居冬季热环境改善研究	黄志甲, 卓飞飞, 石玉洋, 鲁月红 / 389
岭南地区水体对微气候的影响	李丽, 曾志伟, 周孝清 / 394
长沙地区集中空调办公建筑热舒适现场研究	徐诚, 翟永超, 周翔, 张慧, 杨柳, 刘加平 / 398
建筑布局对室外风环境舒适性的影响分析	
——以南沟门水库管理站为例	郭华, 陆平, 何梅, 方媛 / 403
天津市水体周边夏季热环境状况调查研究	贾筱芸, 王岩, 李雅洁, 武晶晶 / 410
天津市机构养老设施冬季建筑热环境调查研究	王岩, 杨明熹, 冯思宁 / 414
邢台市机构养老设施夏季室内热环境调查研究	李雅洁, 王岩, 武晶晶, 贾筱芸 / 419
天津市既有住宅夏季室内热环境现状调查研究	杨瑾霞, 王岩, 周晓杰, 张敏 / 423
快速城市化对城市热环境的影响分析	吕楠, 赵敬源 / 428
贵阳地区建筑幕墙建筑冬季热环境分析	胡文斌, 姚羽楠, 赵西平 / 436
云南“一颗印”民居冬季室内热环境实测与分析	杨冬兰, 谭良斌 / 440
居住区绿化对建筑热湿环境影响的测试分析	孟思佩, 王金奎 / 444

专题三: 绿色建筑与低能耗建筑

我国被动超低能耗建筑技术体系对夏热冬暖地区适应性的分析	赵士怀 / 450
加拿大的零能耗建筑研究	董靓, 斯蒂芬·哈里森 / 456
寒冷地区被动房节能设计关键问题讨论	孙弘历, 林波荣 / 463
PCM 热物性对被动太阳房自然室温的影响	孙晓雨, 段思迪, 王馨 / 469
原竹龙骨组合结构住宅中太阳能技术的应用	夏奇龙, 赵西平 / 474
夏热冬冷地区某低能耗办公建筑负荷情况分析	钟辉智, 邱雁玲, 冯雅 / 481
交互技术在绿色建筑中的应用及探索	宋德萱, 韩珊珊 / 486
论美丽乡村建设中建筑物理环境的忧与患	周伟, 张苏晖, 段超, 温又刚 / 490
屋顶绿化结合夜间通风的被动降温研究	冉建东, 唐鸣放 / 495
屋顶绿化基质层热工参数随含水率变化规律研究	马路遥, 张磊, 张玉 / 500
我国被动式超低能耗建筑气密性实测分析	杜争, 袁涛, 杨华秋, 游晓静, 杨芳 / 507
回顾与展望: 建筑智能化与绿色-智能建筑	宋德萱, 张璐璐 / 512
日本低碳建筑认定制度及其对中国的启示	叶海, 徐婧, 罗森 / 516
崖州合院天井尺度对通风的影响机制	刘向梅, 刘加平, 刘大龙, 赵辉辉 / 521
试探温和地区学校建筑绿建设计策略	吴茜, 陈荔晓, 杨春松 / 526
寒冷地区高端商业写字楼绿色技术设计与实践	葛鑫, 孟莹莹, 段然, 刘加根 / 531
大气污染下住宅室内空气品质设计节能策略	杨玉锦 / 536
寒冷地区夏季传统商业街污染物扩散研究	王琼, 赵敬源, 吴晓冬 / 541
绿色技术在建筑设计中的应用理念	
——以台达杯建筑设计参赛作品“青松自在”为例	田悦丰, 闫增峰 / 545
宁夏须弥山石窟窟区风环境测试研究	李昊, 闫增峰, 张君杰, 吴楚雄 / 549
以昆明为例浅谈温和地区绿色建筑设计的	姜树新, 吴茜, 李晓琴 / 553

《被动式超低能耗绿色建筑技术导则(试行)(居住建筑)》在广州地区的适用性研究·····	黄冬娜, 赵立华 / 557
绿色技术效果后评估研究·····	于晓敏, 钟辉智 / 562
不同类型被动式太阳能建筑模拟分析比较·····	李智卓, 刘铮 / 570
被动式全装配民居节能设计策略研究·····	王冰冰, 胡冗冗 / 574
内蒙古河套地区低能耗住宅冬季室内热环境优化研究·····	金国辉, 张东杰, 崔宝霞 / 579

专题四：既有建筑节能改造和能源系统综合利用

供应热电比对“热电协同”蓄能型联供系统节能率影响研究·····	魏志远, 张堙, 王馨, 张寅平 / 586
北京市农村地区煤改清洁能源供热改造实例研究·····	张群力, 郝杨洋, 孙东晗, 聂茜 / 591
高密度居住区形态与太阳能潜力关联性研究·····	史洁, 朱丹, Maria Wall / 596
热湿地区住宅自然通风与空调组合运行控制方法研究·····	刘露露, 刘艳峰, 王登甲, 董宇, 刘加平 / 605
平板集热器热性能动态模型及实验验证·····	李皓月, 龙恩深, 周静 / 610
基于BP神经网络的太阳日总辐射推算·····	于瑛, 曹其梦, 杨柳 / 616
佳木斯草砖农宅优化设计·····	徐旭东, 杨晶晶, 杨柳, 刘加平 / 620
传统民居坡屋顶节能改造方案探讨·····	熊珂, 杨真静 / 625
四川嘉绒藏族传统民居环境适应性设计策略·····	罗能, 王崇 / 631
西藏传统民居外围护结构更新策略研究·····	赵盼, 赵敬源, 高月静 / 636
寒冷地区被动式新风系统热损耗降低技术研究·····	王金奎, 于沈尉 / 642

专题一：

建筑热工理论与节能技术

双试验段热湿气候环境风洞

李令令, 张磊, 李琼, 任鹏, 赵立华, 张宇峰, 孟庆林

(华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘要: 风洞试验是城市物理研究的一个重要方法, 但是不同的研究内容需要采用不同功能的风洞, 而本文介绍的风洞是一个功能较齐全的回流式双试验段热湿气候环境风洞。风洞的第一试验段(长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $5\text{ m}\times 3\text{ m}\times 2.5\text{ m}$)可以实现大陆及海岛极端含盐热湿气候环境的复现, 用于建筑材料、单元模块构件在不同环境条件的性能测试研究; 第二试验段(长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $20\text{ m}\times 3\text{ m}\times 2\text{ m}\sim 3\text{ m}$)可以实现中性及非中性大气边界层的相似模拟, 用于城市热岛效应、区域规划、大气污染物扩散等不同尺度问题的研究。同时, 本文对比了该风洞与其他同类风洞的控制参数, 尤其对第二试验段的温度梯度、模型比例、试验段长度、边界层高度做了相关校核计算, 确保风洞的可行性。

关键词: 双试验段; 相似理论; 气候; 环境风洞

Double Test Section Hot-Wet-Climate Environmental Wind Tunnel

Li Lingling, Zhang Lei, Li Qiong, Ren Peng, Zhao Lihua, Zhang Yufeng, Meng Qinlin

(State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology,
Guangzhou 510641, China)

Abstract: Wind tunnel test is an important method of urban physics research, but different research needs to adopt different function wind tunnel. This paper introduces a double test section hot-wet climate wind tunnel for the study of city physical thermal. The first test section (Length $\times$ width $\times$ height is $5\text{ m}\times 3\text{ m}\times 2.5\text{ m}$) can realize the reappearance of the extreme salt, heat and humidity climate environment in the mainland and the island. It can be used to test the performance of building materials and modules in different environmental conditions. The second test section (Length $\times$ width $\times$ height is $20\text{ m}\times 3\text{ m}\times 2\text{ m}\sim 3\text{ m}$) can realize the similar simulation of neutral and non neutral atmospheric boundary layer. It can be used for the study of different scales of urban heat island effect, regional planning and the diffusion of atmospheric pollutants. At the same time, this paper compares the control parameters of the wind tunnel with other tunnels. In order to ensure the feasibility of the wind tunnel, the temperature gradient, model proportion, length of test section and boundary layer height of the second test section are checked and calculated.

Keywords: double test section; similarity theory; hot-wet-climate; environmental wind tunnel

1 引言

随着工业技术的发展, 空气动力学已跨出航空航天领域, 扩展到机械、农业、林业、建筑构筑物、车辆、船舶、气象、环境保护和体育等领域, 并形成了一门新的学科, 称为“工业空气动力学”。而风洞试验由于具有试验条件控制精度高、可重复性好、不受室外气候条件影响等优点, 也因此从航空航天领域被广泛应用到工业空气动力学的研究。随着研究内容、实验要求的多样化, 环境风洞的应用类型在不断拓展, 并形成一些承担某一特定实验任务的专用风洞, 比如大气环境风洞、材料热湿环境风洞,

基金资助: 国家自然科学基金重大项目(51590912), 国家自然科学基金项目(51308223, 51678243), 广东省自然科学基金项目(2016A030313506), 亚热带建筑科学国家重点实验室自主课题(2015ZC14), 中央高校基本科研业务费项目(2017ZD017, 2017ZD039)

作者简介: 李令令(1990—), 女, 河南周口人, 博士生, E-mail: huananlilingling@163.com

整车热环境风洞等。

2 环境风洞在城市物理研究的应用

在城市物理研究中，环境风洞主要有用于城市风环境、污染物扩散研究的大气环境风洞以及用于材料热湿迁移、蒸发换热研究的材料热湿环境风洞。

2.1 大气环境风洞的应用

目前国内外学者大多采用中性大气环境风洞研究大气边界层的风场下的城市环境问题，忽略了大气边界层温度场即非中性（稳定或不稳定）大气边界层稳定度的影响。然而，实际大气条件下中性大气稳定度的情况只占 20%~40%^[1]。目前，已有专家学者对大气边界层温度场的影响做了相关研究。Snyder^[2]通过水槽实验，验证了热分层对于污染物在建筑尾流区的影响。Uehara^[3]研究了大气环境的热分层对于街谷流态的影响，发现街谷涡流在大气稳定时变弱，在大气不稳定时增强。Kovar^[4]采用风洞测试研究了太阳辐射的热效应对街谷流场的影响，得到该热效应不能被忽略时弗劳德数阈值为 0.73 和 1.20。因此，非中性大气边界层稳定度对于城市物理的研究仍是一个重要的因素。环境风洞应该不仅能够模拟大气湍流结构，各种地形条件下的速度剖面，还应模拟不同稳定度下的大气环境的温度梯度。国内外现有可以实现非中性大气边界层的环境风洞很少，如下表 1 所示。美国科罗拉多州立大学环境风洞^[5-6]是第一台环境风洞，但是该风洞试验段较长。随着试验设备的更新，温度梯度的发展可由温度车实现，如英国萨里大学的环境风洞^[7-9]，缩短了试验段长度。

表 1 国内外部分大气环境风洞

序号	国家	单位	型式	试验段（m）			风速 （m/s）	气流 温度 （℃）	地板 温度 （℃）	温度车温 度梯度 （℃/m）
				长	宽	高				
1	美国	科罗拉多州立大学 ^[5-6]	回流	27	1.8	1.8	0.5~36	0~60	0~150	—
2	英国	萨里大学 ^[10]	直流	20	3.5	1.5	0.3~3	0~80	5~120	80
3	日本	国立环境研究所 ^[11]	回流	24	3	2~2.4	0.2~10	12~87	7~112	25
4	中国	中国环境研究院 ^[12]	回流	24	3	2	0.2~10	10~50	7~85	15
5	中国	中国辐射防护研究所	直流	17	1.5	1	0.2~20	4~10	10~90	75
6	中国	华南理工大学	回流	20	3	2~3.0	0.5~10	10~40	10~90	80

注：华南理工大学的试验段尺寸为热湿气候环境风洞的第二试验段尺寸。

根据调研，目前国内现有此类风洞只有中国辐射防护研究院的风洞在 2016 年经过改造，增加了模拟温度层结的系统，可以实现对大气温度场及地面环境温度的模拟。由此可以看出，能够模拟非中性大气边界层的环境风洞对于城市物理的研究很重要，且国内外尚缺少此类风洞，因此有必要发展此类风洞。

2.2 材料热湿环境风洞的应用

材料热湿环境风洞主要是通过复现室外环境，实现材料相关性能的研究。台湾大学构建的风洞^[13]，可以调控空气温度、湿度，用于研究蒸发冷却填料的性能；日本九州大学的风洞^[14]，增加了模拟太阳辐射照度为试件连续或间歇加水等技术，可实现热湿耦合现象下材料蒸发换热的研究；华南理工大学的动态热湿气候风洞实验台^[15-17]，实现了全天 24 小时气象情况（气温、相对湿度、太阳辐射、风速）的动态模拟复现，用于材料热湿迁移和蒸发换热问题研究。

表 2 国内外部分材料热湿环境风洞

序号	单位	风洞	风速 (m/s)	温度 (℃)	相对湿度 (%)	太阳辐射 照度 (w/m ²)	天空有效 温度 (℃)	降雨 强度 (mm/h)	盐雾浓 (mg/m ³)	控制 方式
1	日本九州大学	蒲野蒸发 换热风洞	0~4.5	30	40~60	500	—	—	—	静态
2	华南理工大学	热湿气候 风洞	0~5	20~40	40~90	0~1000	—	—	—	动态
3	华南理工大学	热湿气候 环境风洞	0~10	10~40	40~98	0~1000	7~45	5~200	0.3~25	动态

在当前各国大力发展海岛建设的形势下，海岛建筑的热工物理性能迫切需要研究。但是目前材料热湿环境风洞大多是复现普通大陆环境，尚不能复现复杂极端含盐热湿海岛气候，因此材料热湿环境风洞的功能还需拓展。

3 双试验段热湿气候环境风洞

当前国内外缺乏非中性大气边界层环境风洞及能够复现海岛气候的材料热湿环境风洞，且又迫切需要相关的风洞试验研究，促进城市环境的研究及海岛的建设。华南理工大学亚热带国家重点实验室在此形势下，设计建设双试验段热湿气候环境风洞。该风洞集合了大气环境风洞与材料热湿环境风洞的功能，可以实现非中性大气边界层下的城市环境研究；可以复现极端含盐热湿海岛气候，实现建筑材料及模块构件的相关性能研究，促进海岛城市的建设。

3.1 双试验段热湿气候环境风洞设计

华南理工大学双试验段热湿气候环境风洞为回流立式风洞，全长 40.5 m，最宽处为 4.9 m，最高处为 10.4m。该风洞由第一稳定段、第一试验段、扩散段、风机段、过滤段、收缩段、第二稳定段、第二试验段八部分组成。具体的尺寸布置见下图 1 和图 2。

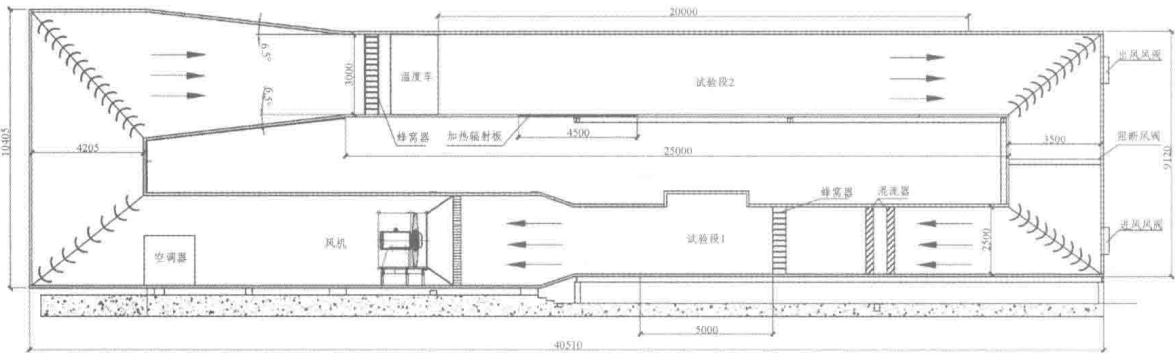


图 1 双试验段热湿气候环境风洞剖面图

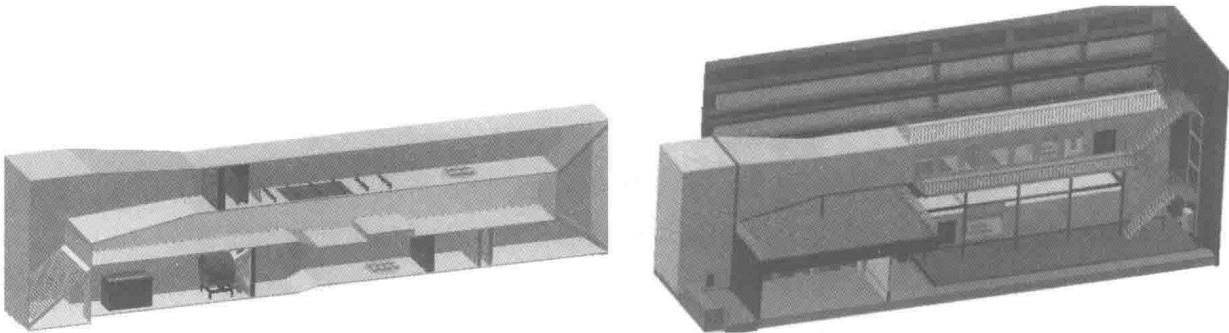


图 2 双试验段热湿气候环境风洞轴测图

3.2 第一试验段介绍

第一试验段为材料热湿环境测试段，尺寸长×宽×高为 5 m×3 m×2.5 m。试验段顶部布置的有太阳辐射模拟器、天空有效温度模拟器、降雨模拟器、盐雾发生器；试验段底部布置了直径为 2.4 m 的可拆卸式转盘；具体控制参数见下表 3。该试验段的试验原理是通过环境参数相关设备的布置，复现大陆及海岛极端热湿气候环境条件，从而实现建筑材料、单元模块构件在不同环境条件的性能测试研究。此试验段相比原有热湿气候风洞^[15]，增加了天空有效温度、降雨强度、盐雾浓度的控制设备，可以实现更多复杂室外环境的复现；增大了试验段尺寸，可以增加测试构件的测试面积，减弱测试构件的形状、尺寸、种类等的限制，提高了测试研究的准确性和可能性。

表 3 第一试验段控制参数

项目	风速 (m/s)	温度 (℃)	相对湿度 (%)	太阳辐射 照度 (w/m ²)	天空有效 温度 (℃)	降雨强度 (mm/h)	盐雾浓度 (mg/m ³)
参数范围	0.5~10	10~40	40~98	0~1000	7~45	5~200	0.3~25
动态控制偏差	≤5%	≤0.3	≤5%	≤5%	≤0.5	≤10%	—

3.3 第二试验段介绍

第二试验段为大气边界层试验段，尺寸长×宽×高为 20 m×3 m×(2m~3 m)。试验段沿流动方向布置的有温度车，湍流发生器（尖劈、粗糙元），加热、冷却地板，直径为 2.4 m 的模型转盘，具体控制参数见下表 4。该试验段的试验原理是依据相似理论中的几何相似、动力相似、热力相似、运动相似、边界条件相似，通过布置设备、建立缩尺模型，再现实际大气边界层的流动现象，从而用于城市热岛效应、区域规划、大气污染物扩散等不同尺度问题的研究。

表 4 第二试验段控制参数

项目	风速 (m/s)	气流温度 (℃)	地板温度 (℃)	温度车温度梯度 (℃/m)
参数范围	0.5~10	10~40	10~90	80

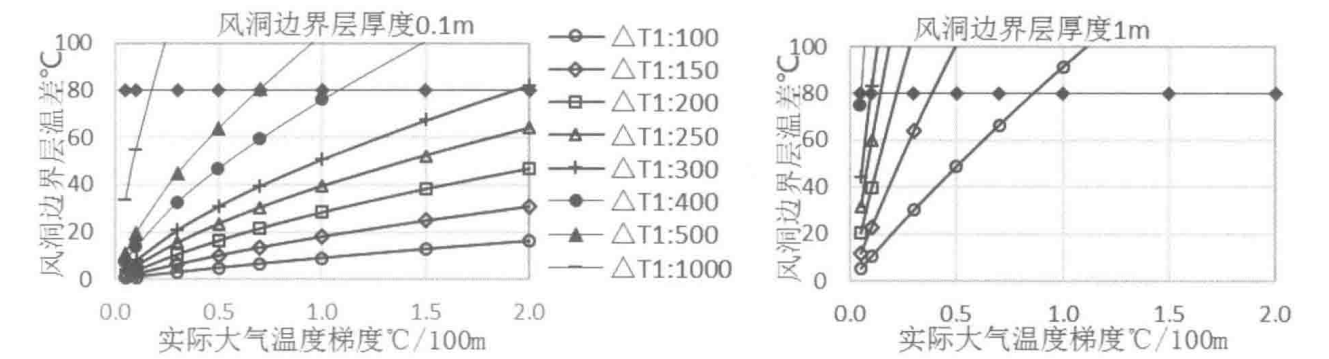


表 5 可用的缩尺比例关系表

试验段中温度车和加热、冷却地板为非中性大气边界层风洞试验营造需要的温度层结。根据形成大气边界层温度层结的主要指标：气流温度、地板温度、温度车梯度，由表 1 各环境风洞的指标对比，可以看出本风洞第二试验段具备实现温度层结的能力。根据热力相似的相似准则数理查森数 Ri 的计算公式 1，本文计算了在风速比例为 1，若风洞内形成 1 m 及 0.1 m 厚度的大气边界层时，该温度车可以相似模拟的实际大气温度梯度及可用的缩尺比例关系，见上表 5。由于温度车最大温差为 80 ℃，所以相应缩尺比例下风洞边界层的温差只要不超过 80 ℃，则该模型缩尺比例可用。由表 5 可以看出，模型比例越大该风洞可以模拟的实际大气温度梯度范围越小；在风洞边界层厚度为 0.1 m 时，在缩尺比例从 1：100

到 1:1000 该风洞均可实现实际大气温度梯度的模拟,只是不同比例模拟的温度梯度范围不同;在风洞边界层厚度为 1 m 时,该风洞在缩尺比例 1:100 到 1:400 时,可实现实际大气温度梯度的模拟。

$$Ri = \frac{\Delta T}{T_0} \cdot \frac{Lg}{U^2} \quad (1)$$

$$h = \frac{1.39\delta}{1 + \frac{\alpha}{2}} \quad (2)$$

式中: L 为边界层厚度; ΔT 为边界层厚度内的温差; T_0 为环境平均温度; U 为实验段自由流速; h 为三角形尖劈的高度; α 为风剖面指数; δ 为风洞内大气边界层高度。

试验段中尖劈和粗糙元为中性和非中性大气边界层风洞试验营造所需要的速度梯度。尖劈和粗糙元的尺寸设置,可以根据试验需要具体计算。这里只对试验段长度、边界层厚度是否能满足试验要求做基本的校核分析。参考风洞试验经验及相关文献^[18],为避开顶壁边界层的影响,试验段尖劈需要比试验段高度低 30 cm 左右;为得到有效稳定的边界层,粗糙元需要在尖劈下游布置尖劈高度的 4~6 倍距离;为了充分观察扩散实验的现象,需要在模型转盘下游预留 8 m 长的观察区。根据第二试验段高度为 2 m、转盘直径为 2.4 m 及以上条件限制,可以计算得到尖劈最大高度约为 1.7 m,粗糙元最大摆放长度为 6.8 m~10.2 m,试验段最大长度约为 17.2 m~20.6 m。本风洞设计试验段长 20 m,可以基本满足本风洞试验的最大长度需求。此外,风洞形成的速度边界层高度按照公式 2 尖劈高度与边界层高度的关系式计算,可以得到在 D 类粗糙度下,形成的边界层厚度最大为 1.4 m;在常用 B 类粗糙度下,形成的边界层厚度最大为 1.07 m;这与温度边界层的高度基本一致,可以满足试验要求。

4 总 结

本文介绍的双试验段热湿气候环境风洞,第一试验段可以实现大陆及海岛极端含盐热湿气候环境的复现;第二试验段可以实现中性及非中性大气边界层的相似模拟。此外本文通过对比风洞与其他同类风洞的控制参数,以及校核计算第二试验段的温度梯度、模型比例、试验段长度、边界层高度,确保了该风洞用于复杂城市物理研究的可行性。

参考文献:

- [1] WALCZEWSKI J, FELEKSY-BIELAK M. Diurnal variation of characteristic sodar echoes and the diurnal change of atmospheric stability[J]. *Atmospheric Environment*, 1988, 22 (9): 1793-1800.
- [2] SNYDER WH. Some observations of the influence of stratification on diffusion in building wakes.in I. P. Castro and N. J. Rockliff (eds.), *Stably Stratified Flows: Flow and Dispersion over Topography*, Clarendon Press, Oxford, U.K [J]. 1994, 301-24.
- [3] UEHARA KIYOSHI, MURAKAMI SHUZO, OIKAWA SUSUMU, WAKAMATSU SHINJI. Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34 (10): 1553-62.
- [4] KOVAR-PANSKUS A, MOULINNEUF L, SAVORY E, et al. The Influence of Solar-Induced Wall Heating on the Flow Regime within Urban Street Canyons[J]. *Panskus*.
- [5] CERMAK J E. Thermal effects on flow and dispersion over urban areas: Capabilities for prediction by physical modeling [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30 (3): 393-401.
- [6] CERMAK JACK E. Wind-tunnel development and trends in applications to civil engineering [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2003, 91 (3): 355-70.
- [7] HANCOCK P E, PASCHEKE F. Wind-Tunnel Simulation of the Wake of a Large Wind Turbine in a Stable Boundary

- Layer. Part 1: The Boundary-Layer Simulation[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2014, 151 (1): 3-21.
- [8] HANCOCK P E, PASCHEKE F. Wind-Tunnel Simulation of the Wake of a Large Wind Turbine in a Stable Boundary Layer: Part 2, the Wake Flow[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2014, 151 (1): 23-37.
- [9] HANCOCK P E, ZHANG S. A Wind-Tunnel Simulation of the Wake of a Large Wind Turbine in a Weakly Unstable Boundary Layer[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2015, 156 (3): 395-413.
- [10] HANCOCK P E, ZHANG S, HAYDEN P. A Wind-Tunnel Artificially-Thickened Simulated Weakly Unstable Atmospheric Boundary Layer[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2013, 149 (3): 355-380.
- [11] OGAWA Y, DIOSEY P G, UEHARA K, UEDA H. A wind tunnel for studying the effects of thermal stratification in the atmosphere [J]. Atmospheric Environment, 1981, 15 (5): 807-21.
- [12] 李永富. 用于大气污染研究的风洞设计[J]. 四川环境, 1987 (1): 3-10.
- [13] Liao Chung Min, Chiu Kun Hung. Wind tunnel modeling the system performance of alternative evaporative cooling pads in Taiwan region [J]. Building & Environment, 2002, 37 (2): 177-87.
- [14] 尾崎 明仁, 浦野 良美, 渡辺 俊行, 龍 有二, 長谷川 敬一郎, 熊添 齊一. 建築外表面の熱伝達に関する実験的研究: その3 共存対流における熱伝達と物質伝達について [J]. 建築雑誌 建築年報, 1989.
- [15] 张玉, 孟庆林, 陈渊睿. 太阳能被动蒸发用动态热湿气候风洞实验台研制 [J]. 太阳能学报, 2008, 29 (5): 509-14.
- [16] ZHANG LEI, FENG YANSHAN, MENG QINGLIN, et al. Experimental study on the building evaporative cooling by using the Climatic Wind Tunnel [J]. Energy & Buildings, 2015, 104 (360-8).
- [17] ZHANG L, FENG Y S, MENG Q L, et al. Experimental research on the evaporation cooling of porous decorative tile based on wind tunnel[J]. Hunan Daxue Xuebao/journal of Hunan University Natural Sciences, 2014, 41 (9): 113-119.
- [18] 施宗城. 中性大气功连层模拟试验调试方法研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1994 (4): 469-480.

极端热湿气候区气候规律探讨

董国明, 刘大龙, 刘加平

(西安建筑科技大学, 陕西西安 710055)

摘 要: 明确了极端热湿气候区的地理范围。对我国南海部分岛礁和夏热地区部分城市的相关气象参数进行对比分析, 指出了极端热湿气候区“极端热湿”的内涵及气象参数特征。引入“最热季”概念, 进一步对比分析我国南海地区极端热湿气候与大陆夏热地区的气候差异, 得出极端热湿气候区的气候规律。

关键词: 极端热湿气候区; 气象参数; 气候规律; 最热季

Study on Climatic Regularity of Extreme Hot and Humid Climate Zone

Dong Guoming, Liu Dalong, Liu Jiaping

(Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055)

Abstract: Define the geographical range of extreme hot and humid climate zone. Analyze some related meteorological parameters of the south China sea islands and cities in hot summer areas. Point out “extreme hot humid” connotation and characteristics of the extreme hot humid climate zone. Introduce the concept of “hottest season” to further compare and analyze the climatic differences between extreme heat and humidity in China’s south China sea and hot summer regions. Provide the climatic regularity of extreme hot and humid climate zone.

Keywords: extreme hot and humid climate zone; meteorological parameters; climatic regularity; hottest season

1 引言

气候是影响建筑冷热负荷及建筑能耗量的最主要因素, 因地制宜地设计和建造不仅有利于建筑节能, 同时还有利于建筑材料性能的有效发挥, 还能避免因盲目提高建筑热工性能以致增加建造成本并浪费建材等问题。

随着三沙市的成立、永暑礁机场建设等的完成, 我国南海地区城市发展和岛屿建设将进入迅速发展的时期。南海地区整体气候特性与我国陆地气候差异较大, 且南北跨越近 20 个纬度, 不同区域气候也有差异, 高温高湿的气候状况对该南海岛礁的建筑热湿环境影响巨大, 同时使得建筑制冷能耗巨大。

南海岛屿建筑节能设计需要明确该地区的气候规律特征, 研究并探讨我国南海极端热湿气候区的气候规律, 对我国南海地区以及其他热湿地区的建筑防热和节能设计具有重要意义。

2 极端热湿气候区范围

本文研究对象涉及的范围是中国南海地区, 经度范围是 $105^{\circ}\text{E} \sim 118^{\circ}\text{E}$, 纬度范围是 $3^{\circ}\text{N} \sim 21^{\circ}\text{N}$ 。它北起中国广东、海南、广西, 东至中国台湾、菲律宾的吕宋和民都洛及巴拉望岛, 西至中南半岛和马来半岛, 南至印度尼西亚的苏门答腊岛与加里曼丹岛之间的隆起地带。

基金项目: 国家自然科学基金重大项目“极端热湿气候区超低能耗建筑模式及科学基础”(51590913)

作者简介: 董国明, 男, 西安建筑科技大学建筑学院博士生, E-mail: 405230436@qq.com