

第十一届全国建筑物理学术会议论文集

建筑 · 节能与物理环境

中国建筑学会建筑物理分会 编
内蒙古工业大学建筑学院

中国建筑工业出版社

● 第十一届全国建筑物理学术会议论文集

建筑·节能与物理环境

中国建筑学会建筑物理分会
内蒙古工业大学建筑学院 编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

建筑·节能与物理环境 / 中国建筑学会建筑物理分会
等编. — 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 8

(第十一届全国建筑物理学术会议论文集)

ISBN 978-7-112-14571-3

I. ①建… II. ①中… III. ①建筑 — 节能 — 学术会
议 — 文集 IV. ①TU111. 4

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第183397号

中国建筑学会建筑物理分会以“建筑·节能与物理环境”为主题举办第十一届全国建筑物理学术会议。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,会议收到参会论文188篇,经邀请业内专家学者审稿评阅,最终确定了154篇论文结集出版。其中,特邀报告3篇;绿色建筑与物理环境34篇;建筑节能34篇;建筑热工学34篇;建筑光学17篇;建筑声学21篇;建筑物理教学及其他相关论文11篇。此次收录的论文覆盖面广,内容丰富而深入,较全面地反映了我国建筑物理学界的最新科研成果。这为全面了解我国建筑物理学界的研究现状、学术水平和应用实践能力提供了有效的途径,为建筑物理学界深入交流和稳步前进提供了更广阔的平台,为建设绿色、生态、环保、可持续人居环境作出了积极的贡献。

责任编辑:陈 桦 杨 琪

责任设计:陈 旭

责任校对:王誉欣 陈晶晶

第十一届全国建筑物理学术会议论文集

建筑·节能与物理环境

中国建筑学会建筑物理分会
内蒙古工业大学建筑学院 编

*

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

北京京点设计公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本:880×1230毫米 1/16 印张:37 字数:1140千字

2012年9月第一版 2012年9月第一次印刷

定价:85.00元

ISBN 978-7-112-14571-3

(22654)

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)

第十一届全国建筑物理学术会议

► 主办单位：中国建筑学会建筑物理分会

► 承办单位：内蒙古工业大学建筑学院

► 协办单位：广东省建筑科学研究院

► 学术委员会：

主 任 秦佑国

副主任 林海燕 吴硕贤 刘加平 杨仕超 赵建平

委 员 (按姓氏笔画排序)

王立雄 冯 雅 刘 铮 任 俊 杨 柳

冷御寒 张三明 张寅平 孟庆林 林 杰

周 伟 姜 仁 赵越喆 郝洛西

► 组织委员会：

主 任 林海燕

副主任 张鹏举 杨仕超 刘 铮

委 员 王 崑 李莉娟 苏晓明 许国强 王卓男

王文新 郝占国 李 妍 张士翔 刘俊伟

谭 华

降低能源消耗、减少温室气体排放是当今世界关注的热点，也是我国政府坚持科学发展观、加快转变经济发展方式的一个重要着力点。以“节能、节水、节地、节材、保护环境”为主旨的绿色建筑，正是建筑业落实科学发展观，建设“资源节约型、环境友好型”社会的突破口。当前绿色建筑在全国即将进入高速发展时期，以建筑“声、光、热”为主要研究对象的建筑物理应该为绿色建筑的发展作出重大的贡献。作为建筑科学技术领域的一个重要组成部分，建筑物理将在节约能源、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和保障。同时，绿色建筑的大量实践也必将丰富建筑物理学科的内涵，提升学科的水平。为此，中国建筑学会建筑物理分会决定主办第十一届全国建筑物理学术会议，并将大会的主题定位为“建筑·节能与物理环境”。本届大会由内蒙古工业大学承办、广东省建筑科学研究院等单位协办，将于2012年9月13~14日在呼和浩特市内蒙古工业大学举行。

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，收到参会论文188篇，经约请业内专家学者审稿评阅，最终确定了154篇论文结集出版。其中，特邀报告3篇；绿色建筑与物理环境34篇；建筑节能34篇；建筑热工学34篇；建筑光学17篇；建筑声学21篇；建筑物理教学及其他相关论文11篇。此次收录的论文覆盖面广，内容丰富而深入，较全面地反映了我国建筑物理学界的最新科研成果。这为全面了解我国建筑物理学界的研究现状、学术水平和应用实践能力提供了有效的途径，为建筑物理学界深入交流和稳步前进提供了更广阔的平台，为建设绿色、生态、环保、可持续人居环境作出了积极的贡献。

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的指导下进行的。学术委员会的各位专家为论文的评审工作作出了诸多的贡献，保证了论文的质量。中国建筑工业出版社的编辑们为本书的出版付出了辛勤的劳动。在此诚挚感谢各位审稿专家的倾情奉献！并对给予本届会议大力支持、热情帮助和积极参与的社会各界人士表示衷心的感谢！

鉴于此次会议论文数量众多、覆盖范围广泛，加上时间短、编者水平有限，本论文的不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

第十一届全国建筑物理学术会议论文集编辑组

2012年9月

特邀报告

“十二律”——研究中国古代建筑理论的一个视角.....	秦佑国 2
建筑业的基础研究与产业振兴.....	吴硕贤 7
建筑能耗与建筑节能设计.....	刘加平 杨柳 刘铮 12

绿色建筑与物理环境

建筑生态观的历史沿革及脉络.....	莫弘之 宋德莹 16
生态模拟技术在建筑规划设计阶段中的应用.....	李运江 唐小虎 范波 21
城市住区外部公共空间绿色设计初探.....	宋德莹 初奇峰 25
高层建筑空中庭院布局的生态性探讨.....	谢振宇 郑楠 王承华 28
解读诺曼·福斯特.....	杨丽 32
北京市高层办公建筑交通核绿色设计浅析.....	吴江滨 杨红 36
和谐共生的立体农场——城市农场设计实践探索.....	李越 李英 41
内蒙古沙漠绿洲生态旅游区建筑形式调研.....	吕思维 刘铮 46
三种建筑全生命周期碳排放计算软件比较研究.....	李蕊 石那 50
居住区组团的参数化设计优化方法初探.....	吴杰 张宇峰 54
草原传统民居建筑物理环境探析——以蒙古包为例.....	董国明 刘加平 58
武汉城区高架道路的现状及环境影响分析.....	屈万英 62
气候地图在中央商务区微气候环境评价中的应用.....	王频 孟庆林 65
高层建筑双层表皮的气候适应性.....	谢振宇 李超 詹旷逸 71
中国传统民居的气候适应性研究浅析.....	高欢 杨柳 75
高密度城市风环境与空间特征相关性分析.....	袁磊 刘莹微 许雪松 78
室外风环境人体舒适性指标试验研究.....	肖丹玲 许伟 李庆祥 杨仕超 82
改善室外风环境的高层建筑形态优化设计策略.....	谢振宇 杨纳 86
高层办公建筑开放式平面的自然通风设计探讨.....	谢振宇 杨帆 92
上海高层住宅小区夏季室外风环境实证研究.....	杨峰 钱锋 刘少瑜 96
关中窄院民居风环境数值模拟.....	武舒韵 闫增峰 刘雪辉 吴士杰 李亚亚 苏士凯 马江波 李雪妮 100
相变材料在夜间通风中的应用综述.....	张璞 杨柳 朱小波 105
中国行业标准《城市居住区热环境设计标准》介绍.....	孟庆林 张磊 赵立华 李琮 张玉 张宇峰 108
浅议绿色建筑评价中热岛效应的评价.....	罗智星 杨柳 武舒韵 韩冰 112



佛山市街谷形态对热环境的影响研究.....	杜晓寒 陈东 吴杰 张宇峰	117
被动式建筑外墙理想导热系数确定方法与理解.....	张宇 张寅平 王馨	120
气压对建筑表面对流换热系数影响的理论分析.....	王润山 朱新荣 刘加平	123
关中民居夏季防热被动式技术解析——以安家民宅为例.....	吴士杰 闫增峰 刘雪辉 武舒韵	
	李亚亚 苏士凯 马江波 李雪妮	126
屋顶绿化内表面传热临界状态.....	唐鸣放 杨真静	130
屋顶绿化种植土有效导热系数计算方法.....	郑澍奎 唐鸣放 杨真静	133
夏热冬冷地区校园广场冬季热环境实测与分析.....	黄艳雁 张辉 邓世超	137
关中民居被动式环境调节技术解析.....	马江波 闫增峰 刘雪辉 武舒韵 吴士杰	
	李亚亚 李雪妮 苏士凯 徐浩	141
外立面穿孔板最佳穿孔率研究.....	李怡 赵立华	144
基于空气负离子浓度的城市居住区环境空气质量评价.....	王薇 黄艳雁 左丹	147

建筑节能

公共建筑不同节能改造措施的技术经济评价.....	任俊 王鹏 江向阳	152
《建筑节能气象参数标准》简介.....	董宏 周辉 林海燕	157
寒冷地区气候变化条件下窗墙面积比对建筑能耗的影响.....	刘大龙 刘加平 杨柳	160
湖南省既有建筑节能改造的效果及经济性分析.....	翟威锋 时章明 唐艺芳 陈波 谭果 易汝杨	163
重庆市渝中区人民路既有居住建筑节能改造效果分析.....	窦枚 唐鸣放	167
住宅阳台优化设计的探讨.....	陈冰俐	170
建筑立面被动蒸发层节能效果分析.....	钟辉智 冯雅 雷波	173
农村住宅局部采暖节能方式研究.....	李洋 刘艳峰 刘加平	176
农村住宅的一种秸秆复合墙体节能研究.....	钱城 吕媛媛 朱传波	180
浙江省新农村建设中既有农居的节能改造.....	王美燕 陈钰 陶石磊 吴庆驰 汪潇 陈淑华	184
中国三个典型农村地区建筑能耗调查.....	司鹏飞 高庆龙 杨正武 闵晓丹	188
内蒙古赤峰地区典型农村住宅被动式节能改造模拟.....	赵红利 冉茂宇	191
西安地区酒店建筑能耗调查及限值研究.....	苏士凯 闫增峰 李延俊 贾媛 周鑫 李亚亚	195
西安地区商场建筑能耗调查及限值研究.....	李亚亚 闫增峰 李延俊 贾媛 苏士凯	198
居住建筑在温和地区节能设计的原则和措施.....	赖竹寒 李家泉	201
夏热冬冷地区住宅建筑节能技术优化探讨.....	朱珠 秦孟昊	205
关中地区“半边盖”民居之节能策略分析.....	陈萍 王卓男	209
基于传热理论对牧区传统民居的绿色节能改造研究.....	王文新 郝战国 贺乾辉	213
广州地区居住建筑能耗影响因素的研究.....	李志红 赵立华 秦翠翠	216
建筑朝向对成都市居住建筑能耗的影响.....	王晓 高庆龙 南艳丽 司鹏飞	220
住区规划节能设计影响因子初探.....	张良 石邢 朱一字	223
基于气候适应性的建筑围护结构节能新技术探析.....	张辉 寇扬	226
主动式建筑理想节能通风策略确定方法.....	程瑞 王馨 张寅平	229
南京地区建筑混合通风系统效能分析.....	武鼎鑫 傅秀章	232
基于通风降温节能的卧室换气次数研究.....	秦翠翠 赵立华	236



SIR 法对建筑节能方案的优化集成作用	邓小燕 欧阳金龙 240
遮阳装置的遮阳效果计算分析	杨仕超 周荃 江飞飞 余凯伦 244
内遮阳窗帘附加热阻研究	王登甲 刘艳峰 刘加平 248
浅议大型屋面挑檐对建筑外窗遮阳系数的影响	张卓鹏 申杰 赵立华 252
温和地区建筑遮阳设计双重属性的案例分析	李家泉 张军 朱学韬 257
无网现浇外墙外保温系统施工质量控制措施	张杰 261
大体形系数建筑的节能设计因素评价研究	闫幼锋 孙路倩 264
恒温室内游泳池气流组织模拟分析	徐龙 高艳娜 王子云 龙思深 267
幕墙型材节能设计关键技术研究	姜仁 韩智勇 邱铭 271

建筑热工学

基于空间分布的建筑热工设计气候分区之研究	高庆龙 冯雅 刘加平 276
空气湿度对人体热舒适的影响	王倩 孟庆林 280
围护结构主体材料含湿率微波测试分析研究	任俊 谭伟 284
基层墙体材料含水率和空气湿度关系的实验研究	杨玉忠 孙立新 何晓燕 赵芳 288
多孔建筑材料中热湿耦合传递方程的解析解	张厚亮 秦孟昊 291
附加阳光间式太阳房室内热环境影响因素分析	马超 刘艳峰 刘加平 295
内蒙古地区太阳房设计用气象参数的研究	赵春颖 唐汝宁 姜丝拉夫 299
基于 Probit 的热舒适指标分析方法	周书兵 杨柳 闫海燕 王东政 陈长 302
寒冷地区农村住宅室内舒适度指标研究	刘畅 高元鹏 王立雄 306
寒冷地区夏季住宅热舒适及居民生活习惯调查	杨柳 高璐 309
黔东南地区夏季民居热环境测试与舒适度分析	姜敏 刘加平 杨柳 313
吐鲁番地区农村住宅现状与热环境调研分析	杜晓磊 杨柳 闫海燕 朱小波 316
苗寨吊脚楼室内热环境测试分析	陈燕 320
新农村住宅室内热环境测试分析	王兴龙 王雪 326
河西走廊乡村住宅冬季室内热环境测试研究	李廷俊 闫增峰 329
岭南广府式民居秋季室内热环境测量分析	高云飞 赵立华 333
锡盟地区牧民冬营地居住建筑热环境研究	王娟 张敏 马明 苏浩 王文明 337
珠三角村镇住宅室内温湿环境实测与空调作息研究	李婷婷 赵立华 340
川西北湿热湿冷地区自建民居典型季节热环境分析	吴瑾 梁爽 刘加平 刘大龙 343
广西龙胜民居建筑夏季室内热环境实测与评价	张源 刘加平 陈敬 348
夯土和木楞藏族民居热环境测试与分析	李莉萍 352
郎德苗寨室内物理环境测试分析	房威 周岚 356
建筑外墙外保温材料的保温、防火以及耐候性分析	杨柳 赵云兵 361
民用建筑围护结构热湿特性及优化设计研究	丁文磊 秦孟昊 365
真空绝热板在外保温系统中应用的基础研究	孙立新 杨玉忠 370
复合自保温墙体热工性能实验研究	陈志刚 张三明 张磊 373
农村钢结构住宅的墙体热工性能分析及其优化设计	万健 王怡 谭相前 376
徽州民居主要砌体外墙热工性能测试与分析	郑彬 傅秀章 380



西安地区围护结构热桥计算分析.....	金姝倩 闫增峰 武舒韵	384
动态建筑环境实验舱数据采集及自控软件开发.....	陈蕾 傅秀章 石邢	390
不同的夜间通风策略对建筑能耗影响的模拟分析.....	朱小波 杨柳 杜晓磊 张璞 高玺军	393
真空中空复合玻璃的热工性能研究及其应用与发展.....	盖凯凯 郭娟利 房涛	398
建筑门窗保温性能试验室检测与模拟计算研究.....	潘振	402
室外机安装方式对散热影响的数值研究.....	展圣洁 张三明 喻文广	406

建筑光学

居住区与室内光环境优化保障技术研究.....	赵建平 罗涛 王书晓 张滨	412
城市住区夜间光污染综合评价研究.....	苏晓明 郝占国	415
高层住宅区日照控制标准的探讨.....	袁磊	418
基于典型年照度数据的中国天然光气候研究.....	罗涛 林若慈 赵建平 王书晓 燕达	422
华北地区农村住宅天然采光研究.....	陈燕男 王立雄 刘畅	425
我国高辐照度气候区建筑采光研究方法——从亚热带建筑科学国家重点实验室采光研究谈起.....	边宇 马源	428
高层办公楼平面类型的天然采光效率分析.....	李博 袁磊	431
浙西传统民居天井对建筑自然采光的影响.....	蒋福建 赵群 李峥嵘	434
多媒体教室天然光环境问题及对策探讨.....	李坤明 赵立华	438
新版《建筑采光设计标准》的主要技术特点.....	赵建平 林若慈	442
旧建筑改造中的和谐光环境——内蒙古工业大学建筑系馆光环境分析.....	徐骏 刘铮	446
城市中心区中国古建筑夜景照明需求研究.....	张明宇 王立雄	449
隧道采光光纤照明系统应用的可行性分析.....	许景峰 宗德新 吴静 尹轶华	453
满足设计标准是 LED 在照明工程中应用的基本保证.....	赵建平	457
居住区与室内光环境仿真系统的研究与开发.....	赵建平 罗涛 王书晓 张滨	461
基于无线网络的建筑光环境快速监测系统.....	叶炜 孙文响 张钰唯	464
图像式街道亮度计的研发和应用.....	王书晓 罗涛 张滨 赵建平 利岚	467

建筑声学

传统戏场亭式戏台拢音效果初析.....	王季卿 莫方朔	472
音乐厅乐师及其座椅的缩尺模型对应材料实验研究.....	赵越喆 李倩 吴硕贤	476
大中型体育馆混响时间限值研究.....	张昌佳 吴硕贤 赵越喆	479
大型综合医院急诊科声环境和静音设计方法研究.....	王海瑞 李英	482
商业休闲空间声要素初探.....	于博雅 宋剑玮 马蕙	488
中央电视台新址工程建筑声学设计.....	王静波	491
空间扩散体对室内声场衰变的影响.....	蒋国荣 王珏	495
声源方向变化对教室室内语言清晰度的影响.....	彭健新 汪俊东	498
太原市区域环境噪声的拟合分析.....	陆风华 赵海军	501
SoundPLAN 室外声环境模拟与实测比较分析.....	姚珊珊 傅秀章	504
Ambisonics 声重发系统质量的虚拟验证方法.....	龚惠哲 赵越喆	508



声学时域有限差分法中的全吸收边界模型及其应用.....	黄坤朋 赵越喆 吴硕贤	511
弹性边界对玻璃窗瞬态声特性的影响.....	欧达毅 麦卓明	515
一个评价瞬态激励下结构声控制性能的指标.....	王俊芳 麦卓明	517
界面随机入射散射系数测试的边界效应.....	赵越喆 张冉 张世武 吴硕贤	520
1/f 噪声特性与声景观.....	陈国斌 赵越喆	523
心理恢复景观中声景观的挖掘与遴选探讨.....	毛建西	526
城市开放空间声景观研究——以南京山西路广场为例.....	叶起瑾	530
《中国古典园林史》声景观设计案例赏析.....	李楠 赵越喆	533
室内声学表达融入建筑风格的尝试.....	王鹏 杨金鹏	537
祁门古戏台研究.....	任舒雅 张昭 饶永	540

建筑物理教学及其他

建筑物理实验室建设与教学内容优化.....	杜晓辉 易中	546
结合真实生活情境的建筑物理课程——意大利帕维亚大学“技术物理”课程的启示.....	谢振宇 刘蕊	549
注重应用能力培养的建筑物理教学探索——以建筑光环境教学为例.....	胡华	553
把学生的主体作用贯穿于建筑物理实验教学中.....	谢浩	556
建筑声、光、热技术与建筑设计教学融合的探讨.....	鲍学芳	559
建筑物理中的计算机模拟技术教学方法初探.....	吴蔚 董妹婧	562
“卓越工程师”视野下建筑物理教学的定位探讨.....	屈万英	565
基于建筑技术与艺术整合模式的建筑物理教学改革的实践.....	董海荣 常征 陈建平	568
开放式建筑物理课程教学方法初探.....	郝占国 苏晓明	571
浅议四边支承中空玻璃的挠度计算.....	何瑄 赖燕德	574
浅谈推拉铝合金窗水密性能.....	丘榆	578

特邀报告

建筑·节能与物理环境

“十二律”

——研究中国古代建筑理论的一个视角

秦佑国

(清华大学建筑学院, 北京 100084)

摘要: 本文对中国古代乐律学的“十二律”应用于中国传统建筑 and 传统文化的研究做了介绍, 用建筑声学 and 建筑热工的专业理解, 解读“十二律”和“立杆测影”。提出建筑物理教学要加强历史文化方面的教育和人文修养的培养。建筑物理专业人员要扩大学术视野, 可以涉猎人文、历史领域, 尤其是中国建筑历史和中国传统文化。

关键词: 十二律; 立杆测影; 中国建筑史

1 引言

最近这一年, 为中央美术学院建筑学院和清华大学建筑学院的学生开设了《建筑数学》课。备课期间, 查阅到王贵祥教授的《中国古代木构建筑比例与尺度研究》和张杰教授的《中国古代空间文化溯源》, 两本著作都涉及“十二律”, 这本是古代乐律(亦即音乐声学)问题, 却都和建筑发生了联系。王贵祥教授在“ $\sqrt{2}$ 与唐宋建筑柱檐关系”一文中写道:“唐宋建筑中存在的这种 $\sqrt{2}$ 倍的比例关系, 很可能还有更为深广的中国古代文化背景。……尤其在音乐中, 更以所谓‘方圆相涵’的原理, 作为乐律计算的基本理论。‘方圆相涵’原理之中, 实际就已包含 $\sqrt{2}$ 倍的比例关系。”“中国古代乐律, 一般称为律吕, 是指中国古代音乐中的十二律, 即所谓六律、六吕。”“这十二律, 实际上是指由12个长短不等的律管产生的十二个不同高低的音。”张杰教授在其著作中研究了中国古代“律管候气”, 论述了“十二律与黄赤交角”, 他在后记中写道:“经过大量比较数据和反复考证文献, 我终于发现十二律不同律管长度之间的比例与北纬 35° 二至(冬至和夏至)暑影之间的内在关系, 从而揭示了反映一周年暑影的变化正常与否的十二律对以礼文化为核心的中国古代器物文化的系统性影响。”天津大学王其亨教授也曾说到:“材分八等与中国古代音乐有关。……第一至第八等之间, 其材等之广的尺寸数值及递降规律, 同自黄钟及青黄钟之间的各律管长及递降规律相谐和。”三位教授从不同的方面: 唐宋建筑比例, “立杆测影”(冬至和夏至间暑影变化), 营造法式材分制, 研究了中国古代建筑与中国古代乐律“十二律”的关系, 为中国古代建筑的理论研究开辟了新的视角和新的切入点。

2 现代声学的“十二平均律”

要弄清楚中国古代的“十二律”, 可以用现代声学的概念和原理解音调高低的分辨和标准的确定。声学的基本常识告诉我们, 人耳对音调高低的分辨, 取决于所听声音的频率(Hz), 频率高, 则音调高, 频率低则音调低。一般人难以准确地给出所听声音频率的绝对数值, 但当频率加倍后, 都能判断出音调高了八度, 如从do(1)变到高音do(i)。也就是建筑声学中常说的, 一个倍频程等于八度音程。钢琴键盘上的中音A是440Hz, 高音A就是880Hz, 低音A是220Hz。八度音阶的唱名就是: do(1)、re(2)、mi(3)、fa(4)、sol(5)、la(6)、si(7)、do(i)。高音do(i)的频率是do(1)的一倍。设do(1)的频率是1, 则高音do(i)的频率是2, 其他音的频率呢? 众所周知, mi(3)与fa(4)之间, si(7)与do(i)之间是“半音”, 而其他音之间是“全音”, 即八度音程包含2个“半音”和5个“全音”, 共包含有12个半音。八度音程划分成12个区间, 也就是一个倍频程划分成12份。如何划分? 在建筑声学测量中, 有 $1/3$ 倍频程的概念, 即把一个倍频程划分成3份: $1, 2^{1/3}, 2^{2/3}, 2$ 。现在要分成12份, 显然是: $1=2^{0/12}, 2^{1/12}, 2^{2/12}, 2^{3/12}, 2^{4/12}, 2^{5/12}, 2^{6/12}, 2^{7/12}, 2^{8/12}, 2^{9/12}, 2^{10/12}, 2^{11/12}, 2^{12/12}=2$ 。写成小数(近似到小数4位) $1, 1.0594, 1.1225, 1.1892, 1.2599, 1.3348, 1.4142, 1.4983, 1.5874, 1.6818, 1.7818, 1.8877, 2$, 这实际是一个等比数列, 公比为 $2^{1/12}(\sqrt[12]{2})$ 。上述12个数中, 加粗的就是8个唱名: do(1)、re(2)、mi(3)、fa(4)、sol(5)、la(6)、si(7)、do(i)。这就是现代音乐声学的“十二平均律”。钢琴键盘上, 每个键(包括黑键和白键)之间差一个“半音”, 频率之比是 $1:2^{1/12}=1:1.059463$ 。这种



分法既符合人耳的听觉特性,又可方便地进行转调,以任何一个键作 do (1),都可以方便地得到八度音的 8 个唱名音(图 1)。

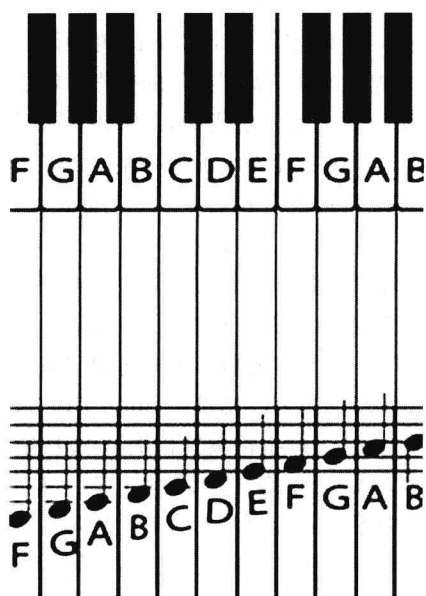


图 1
钢琴键盘排列
示意图

3 毕达哥拉斯与“五度相生法”

那么古代是怎样认识这个问题的呢?公元前 6 世纪古希腊哲学家毕达哥拉斯及其学派提出“万物皆数也”,认为世界万物都可以用整数和整数的比来表示。古希腊就知道弦可发声,不同长度的弦发出的音,音调不同。毕达哥拉斯企图用弦长的 $1/2$, $2/3$, $3/4$ ……来划分音阶,发现弦长减半,即原长的 $1/2$,也就是现代声学的频率增加一倍,为 2,音调提高八度;弦长是原长的 $2/3$,也就是现代声学的频率增加为 $3/2=1.5$,定为五度。如果原来弦长发音为 do (1), $2/3$ 弦长发音就是 sol (5)。它和现代十二平均律的值 $2^{7/12}=1.4983$ 非常接近,人耳难以分辨两者的差异。然后在此基础上再做八度音程的细分,这叫“毕达哥拉斯率”,因为是以五度音程为基础生成全部音阶,所以又叫“五度相生律”。但因为现代的十二平均律是以 $\sqrt[12]{2}$ (2 开 12 次方) 的各次幂来划分的,都是无理数,不可能用整数比来表示,所以“五度相生律”不可能用整数比的连乘,即 $1/1$, $2/3$, $3/4$ ……反复连乘,得到半弦长度的 $1/2$ 。而弦长减半为 $1/2$,频率加倍,是八度音程,这是不能改变的“定律”。所以“五度相生律”相生八度音阶,不能“还原”,有差值存在,称为“毕达哥拉斯差”。顺便说一下,毕达哥拉斯在数学上最伟大的成就是“毕达哥拉斯定律”,即中国古代的勾股弦定律。但他的一个弟子发现,边长为 1 的等边直角三角形的斜边长度 $\sqrt{2}$,不能用整数比来表示,这违背了毕达哥拉斯学派的宇宙哲学,他把这个秘密说了出来,结果被学派的其他成员扔进河里。 $\sqrt{2}$ 后来被称为“无理数”。

4 “黄钟律吕”与“三分损益法”

中国古代对乐律十分重视,被作为礼乐制度重要的方面。孔子曰:“兴于诗,立于礼,成于乐。”礼乐制度起源于西周时期,相传为周公所创建,“制礼作乐”。它和封建制度、宗法制度一起,构成整个中国古代的社会制度。礼乐制度分礼和乐两个部分。礼的部分主要对人的身份进行划分和社会规范,最终形成等级制度。乐的部分主要是基于礼的等级制度,运用不同的音乐和仪式予以配合。

正因为“乐”与国家制度有关,制定统一的乐律就是国家重要的事务。统一乐律,有两件重要的事:一是确定标准音(高),一是统一音程划分。古代没有声音频率的概念和测量方法,只能用以国家名义制作的某种乐器发出的音作为标准。西周时代已有八种乐器:埙、笙、鼓、管、弦、磬、钟、柷。很显然,在这八种乐器中,用金属制成的钟,声音最洪亮,器形最稳定,材质最耐久,所发声音经久不变,最适合作为标准器。钟体大,音调低,钟体小,音调高。制定一套标准的大小不一的钟,就可对音调确定标准。成书于战国初期的《国语》,记载有周景王二十三年(公元前 522 年),周景王想铸造钟,曾向名叫州鸠的乐官询问有关音律问题。州鸠讲了关于律和数的关系,并列了十二律的名称。体型最大的钟,即发音频率最低的被称作“黄钟”,其发的音也就作为音律的第一率“黄钟”。十二律的名称,以频率由低到高排列是:黄钟、大吕、太簇、夹钟、姑洗、仲吕、蕤宾、林钟、南吕、夷则、无射、应钟。其中序数是奇数的 6 个称为“六律”,序数是偶数的 6 个称为“六吕”。所以十二律又称“律吕”(图 2)。



图 2 曾侯乙墓出土的编钟

但钟的铸造代价高,复制困难,尤其是钟壁厚薄很难控制。后来倾向于用管,管长长音调低,管长短音调高,管长减半,音调升高八度。每个国家都制定有长度标准(尺、寸),制定一套标准的长短不一的管,就可对音调统一标准。但当时的管是竹管,容易变形开裂和霉腐,不耐久(图 3)。而钟是金属铸造,不易损坏变形,有耐久性。于是就想到以一套标准钟的音调为准,以和其音调相谐的管的长度定标。管可以方便地复制,控制长度即可。反过来,只要这个钟还在,就可以用它的音调确定管的长度,则国家的长度标准也就确定和传承了。这就是,以音律定国家长度标



准(度),以长度标准定容积标准(量),以权重(一定体积的铁)和秤杆刻度(长度)或天平定重量(衡),于是度量衡三者都可定矣。这就是“黄钟律吕”除了“正声”以外,还与国家度量衡定标有关。

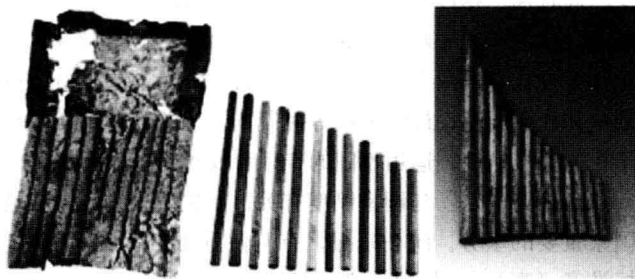


图3 出土的律管

宋徽宗崇宁三年(公元1104年),在今河南商丘出土了六件春秋时期宋公成钟,因该钟出土于宋地,宋徽宗认为是祥瑞之兆,遂设立“大晟府”,以宋公成钟为式样铸成“大晟钟”,计12编,每编28只,共336件,每套钟基准音高都是黄钟宫,发送州府,作为标准音律定音。大晟钟是宋代朝廷重要的测音和定音的工具(图4)。

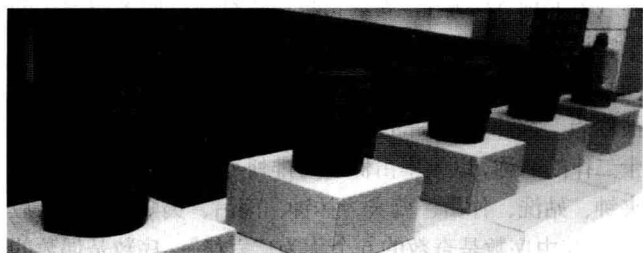


图4 宋大晟钟(开封博物馆藏)

中国古代如何把一个八度音程划分成十二份,以对应“十二律”呢?其方法就是“三分损益法”。《吕氏春秋·音律》(卷六):“三分所生益之一分以上生,三分所生去其一分以下生。”《史记·律书》:“以下生者,倍其实,三其法;以上生者,四其实,三其法。”都是说的以黄钟律管管长为1个单位长,分成3等分,做“损”的操作,就是去掉三分之一,剩三分之二,管长变成 $2/3$ (倍其实,三其法),发音频率增高为黄钟(设为do)频率的 $3/2=1.5$,作为“林钟”(sol);然后再把现有管长3等分,做“益”的操作,就是管长加长三分之一,管长变为 $4/3$ (四其实,三其法),这时,管长是原来黄钟管长的 $2/3 \times 4/3 = 8/9$,频率变为 $9/8 = 1.125$,作为“太簇”(re);再做“损”,管长 $9/8 \times 3/2 = 27/16 = 1.6875$,作为“夷则”(la);再做“益”, $27/16 \times 3/4 = 81/64 = 1.265625$,作为“姑洗”(mi);……但辗转多次,误差已经较大。三分损益辗转相生第12次所得的第13律,管长度略短,两者的长度比是 $(2^{19}/3^{12}) = 524288/531441 = 0.98654$,而不是1,频率比是其倒数1.013643,音高略高于首律黄钟。这就是中国古代律学中有名的“仲吕上生不及黄钟”的问题,亦即“黄钟不能还原”。这和古希腊毕达哥拉斯“五度相生法”一样,企图用整数1、2、3、4的比值辗转相乘来把八度音程(一个倍频程)划分成12份,即12个半音,总是和2开12次方的各个幕次的无理数值不能吻合。只是前4次“损益”得到的数值误差较小,即do、sol、re、la、mi,按音调从低到高排列,do、re、mi、sol、la,对应的正是中国古代的“五音”:宫、商、角、徵、羽。

具体的计算见表1。

三分损益法计算与十二平均律的差异

表1

序次	三分损益求算频率比(分子/分母)	计算数值	对应的十二平均律数值	律吕名称
0	$3^0/2^0$	1	$2^{0/12} = 1$	黄钟
1	$3^1/2^1$	$3/2 = 1.5$	$2^{7/12} = 1.4983$	林钟
2	$3^2/2^3$	$9/8 = 1.125$	$2^{2/12} = 1.1225$	太簇
3	$3^3/2^4$	$27/16 = 1.6875$	$2^{9/12} = 1.6818$	夷则
4	$3^4/2^6$	$81/64 = 1.2656$	$2^{4/12} = 1.2599$	姑洗
5	$3^5/2^7$	$243/128 = 1.8984$	$2^{11/12} = 1.8877$	应钟
6	$3^6/2^9$	$729/512 = 1.4238$	$2^{6/12} = 1.4142$	蕤宾
7	$3^7/2^{11}$	$2187/2048 = 1.0679$	$2^{1/12} = 1.0595$	大吕
8	$3^8/2^{12}$	$6561/4096 = 1.6018$	$2^{8/12} = 1.5874$	南吕
9	$3^9/2^{14}$	$19683/16384 = 1.2014$	$2^{3/12} = 1.1892$	夹钟
10	$3^{10}/2^{15}$	$59049/32768 = 1.8020$	$2^{10/12} = 1.7818$	无射
11	$3^{11}/2^{17}$	$177147/131072 = 1.3515$	$2^{5/12} = 1.3348$	仲吕
12	$3^{12}/2^{19}$	$531441/524288 = 1.0136$	$2^{0/12} = 1$	黄钟(还原)

注:序次5至6和6至7,序次10至11和11至12,连续做了两次管长的“益”,频率连续两次降低 $3/4$ 。



需要说明的是,实际管子发音时,振动的空气柱长度要比管长略长一些,这是“管端效应”引起的。所以,管径不变,管长减半,所发音并不是频率加倍,而是略低一点。上面的讨论是一种“理论”上的讨论,是一个倍频程(八度音程)如何划分成十二个“半音”的问题。古代没有频率概念和测量手段,只能借托管长来讨论。

5 朱载堉与十二平均律

千年困扰,千年争议,直到明朝中叶,万历二十四年(1596年),朱载堉在其著作《律吕精义》(内外篇)一书中,提出了“新法密率”,即“十二平均律”解决了这个问题。他把2开2次方,再开2次方,再开3次方,得到2开12次方,并计算到 $\sqrt[12]{2}=1.059463094359295264561825$ (25位数字),再求其值的n次方($n=0\sim 12$)。这就是把八度音程(一个倍频程)划分成一个等比数列,每个音的频率都是前一个音的 $2^{1/12}$ ($\sqrt[12]{2}$)倍,从1($2^{0/12}$)到2($2^{12/12}$),一个倍频,中间11个无理数($2^{1/12}$ 的若干次方),天衣无缝!解决了“毕达哥拉斯差”和“黄钟不能还原”的千年困扰,这确实是一个了不起的成就。后由传教士带到欧洲,巴赫写成了《平均律钢琴曲集》。十二平均律逐渐在欧洲和全世界范围内得到普及。德国物理学家亥姆霍茨这样评价朱载堉:“在中国人中,据说有一个王子叫朱载堉的,他在旧派音乐家的大反对中,倡导七声音阶。把八度分成十二个半音以及变调的方法,也是这个有天才和技巧的国家发明的。”“这一发现彻底解决了困扰人们千年的难题,是音乐史上的重大事件。现代乐器的制造都是用十二平均律来定音的。”(《中国科学技术史稿》)

6 律吕与节气

中国古代律吕学不仅是音乐范畴的问题,还与气候和节令密切相关。中国古代是农耕社会,种庄稼要知道节气(节令和气候),但中国古代使用的历法“阴历”是月亮历,以观察月亮围绕地球转动的周期状态确定月份和日期,所以不能以其月份和日期确定节气。节气是与地球围绕太阳运行的周期状态相关的,所以中国的24节气与阳历月份和日期的对应关系是固定的,只有一两天的变动。然而中国古代没有“阳历”,如何确定节气呢?就是通过“立杆测影”,观察垂直的立杆在当地正午时刻太阳照射下影长的变化来确定节气的,这已是“建筑热工学”日照计算的常识。冬至日杆影最长,夏至日杆影最短。(或说成“一年中杆影最长的那一天是冬至日,杆影最短的那一天是夏至日”。)河南登封的元代郭守敬建的观象台是大尺度的“立杆测影”,而东汉的铜圭表,是小尺度的(图5、图6)。

显然影长还和测点的地理纬度有关,西周时期的中原地区,纬度在北纬35°左右。《周髀算经》中以八尺高

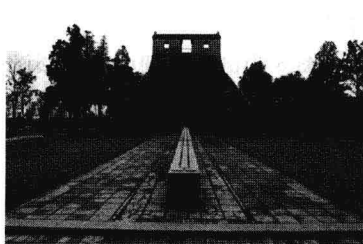


图5 登封观象台(元)

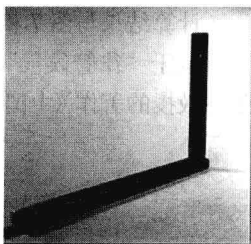


图6 东汉铜圭表

的表(杆高),得到“冬至晷长一丈三尺五寸,夏至晷长一尺六寸。……置冬至晷以夏至晷减之余为实,以十二为法。”就是把冬至杆影长度减去夏至杆影长度,分成12分。期间有11个分点,因为从冬至影长缩短到夏至,再增长到冬至,每个分点经过2次,11个分点对应除冬至和夏至以外的22个节气,加上冬至和夏至,就是24个节气。在这里,我们又看到了“十二”划分。因为测点纬度和测量精度有所差异,《晋书·天文志》的尺寸与《周髀算经》略有差异,见图7。

图中表高8尺,冬至晷影长13.096尺,夏至晷影长1.5

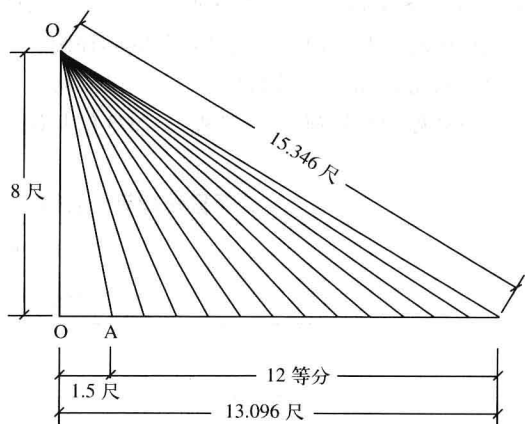


图7 根据《晋书·天文志》绘制的两至晷影图(张杰)

尺,两至晷影长之差为11.596,分成12份,每份0.9663尺。“十二分”是等分的,不是“三分损益法”求得的。但张杰教授计算了各分点的斜长(弦长),发现12根弦长相互之比竟然和“三分损益法”求得的12根律管长度之比很是接近,见表2。这不能说是巧合,而是反映了中国传统宇宙哲学内在的融贯性。

今天,可用日照计算公式:当地时间正午12点,太阳高度角 $h_0=90^\circ-(\phi-\delta)$, ϕ :地理纬度, δ :赤纬(春分、秋分为 0° ,冬至 $-23^\circ 27'$,夏至 $23^\circ 27'$)北纬 35° ,冬至日 $h_0=90-(35+23^\circ 27')$
 $=31^\circ 33'$,夏至日 $h_0=90-(35-23^\circ 27')=78^\circ 27'$ 。如果杆高8尺,冬至日影长13.03尺,夏至日影长是1.63尺。二至影长差值是11.4尺。



计算结果与图 7 相差不大。

至于“律管候气”，可以图 8 为例，详细论述可阅读张杰教授的著作《中国古代空间文化溯源》第一章第二节。

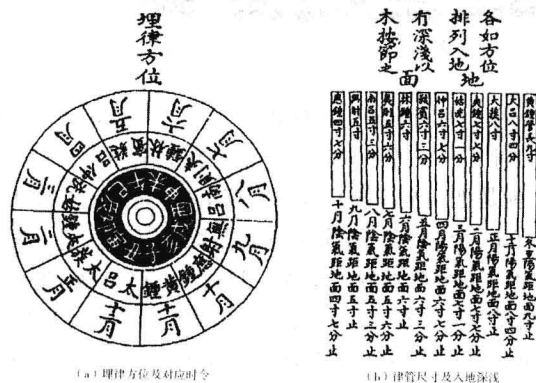


图 8 月令十二律管候气图（宋《六经图卷》，卷八）

7 结语

本文是教学备课时查阅资料整理出来的一篇阅读报告，用建筑物理的专业知识——建筑声学的频段概念和建筑热工的日照计算，做了一番梳理。“十二律”从现代声学来看是一个频段划分问题，“倍频段”、“1/3 倍频段”对

建筑声学专业的人来说，太熟悉了，太简单了；“立杆测影”，日照计算对建筑热工来说，也是简单的公式应用。然而，它们却含有十分丰富的人文历史的内容，与中国古代的宇宙哲学、社会制度和农业生产有如此紧密的关联。而且本来是乐律（建筑声学）方面的“十二律”，却和节令气候（建筑热工）方面的“立杆测影”联系起来。所以，我感到我们以往建筑物理教材和教学，只顾了专业知识的讲授，缺少了历史文化方面的教育和人文修养的培养。建筑物理专业人员，尤其是研究生，要扩大学术视野，寻找新的研究切入点，不能只在建筑物理本身专业范围内，甚至只在声、光、热各自范围内转圈圈，要跨出去。这些年，建筑物理与生态、绿色、节能结合，研究范围和学术视野扩大了很多。但还要和建筑创作、建筑历史和理论研究结合，还可以涉猎人文、历史、地理等领域，尤其是中国建筑历史和中国传统文化。

参考文献

- [1] 百度百科、维基百科，网上搜索相关词条的内容。
- [2] 王贵祥等，中国古代木构建筑比例与尺度研究，中国建筑工业出版社，2011。
- [3] 张杰，中国古代空间文化溯源，清华大学出版社，2012。

二至晷差 12 等分后相应弦长及其与三分损益法十二律的比对

表 2

暑长（单位：尺）		弦长（单位：尺）		冬至弦长与其他各弦长的比		各弦在十二律中代表的月份	按三分损益法生成的管律值推出的黄钟与其他管律之比
				调整前	调整后		
13.096		15.346				十一月	
12.130		14.531		1.06	1.06	十二月	2187/2048=1.07
11.163		13.734		1.12	1.12	正月	9/8=1.13
10.197		12.961		1.18	1.18	二月	19683/16384=1.20
9.231		12.215		1.26	1.26	三月	81/64=1.266
8.264		11.502		1.33	1.33	四月	177147/131072=1.35
7.298		10.829		1.42	1.42	五月	729/512=1.424
6.332		10.203		1.50	1.50	六月	3/2=1.50
5.365		9.632		1.59	1.59	七月	6561/4096=1.60
4.399		9.130		1.68	1.68	八月	27/16=1.688
3.433	2.950 (调整后暑长)	8.705	8.527 (调整后弦长)	1.76	1.80	九月	59049/32768=1.80
2.466		8.371		1.83			
1.500		8.139		1.89	1.89	十月	243/128=1.90

注：按《晷书·天文志》取夏至晷影为 1.5 尺，黄赤交角为 24 天度，则可表出冬至晷影。其他晷影长度按二至晷影差十二等分损益生成。

建筑业的基础研究与产业振兴

吴硕贤

(华南理工大学建筑学院 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘要:本文指出建筑业是节能减排的关键领域, 提出在我国推行绿色建筑, 促进建筑业节能减排的政策措施。本文还指出建筑科学理应成为基础研究和科技投入的重点领域, 并论述了建筑领域一些基础研究与技术开发课题。最后, 本文就开展建筑业的基础研究与产业振兴提出几点建议。

关键词: 建筑业; 基础研究; 产业振兴

1 建筑业是节能减排的关键领域

建筑业是一个十分重要的领域。建筑业事关国计民生。人们的衣食住行四件大事中, 住行直接与建筑业相关, 衣食也间接与建筑业相关。俗话说: 安居乐业。安居才能乐业。目前, 我国城市化进程大大加快, 城市化率已从 1990 年的 26.4%, 上升至 2008 年底的 45.7%, 预计到 2020 年将达到 60%。据世界银行预测, 到 2015 年, 中国建筑竣工面积将是全世界的一半, 从 2000 年开始的 15 年间, 我国城市建筑面积将翻一番。因此, 建设小康社会的首要任务之一就是搞好建筑业。

建筑物是资源与能源的固化物。建筑业是资源、能源最大的终端用户。世界上大约 50% 的资源用于建筑物, 所产生的固体废弃物的 50% 也来自建筑物。建筑运行能耗已占社会总能耗的 28%, 而且相当大份额的工业与交通运输能耗, 也与建筑业密切关联。例如建筑材料工业与冶金工业, 包括钢铁、水泥、玻璃、砖石等的生产与运输能耗等, 最终绝大部分都固化在建筑物中。若加上这部分能耗, 则建筑业的总能耗将高达 46.7%。在二氧化碳的排放量中, 也有 40% 来自建筑。可见, 建筑业占据节能减排的近半壁江山。

建筑节能是所有节能减排措施中最具有经济效益的措施。据政府间气候变化专门委员会的最新报告指出: “最具经济效益的措施往往是提升用户的能源效率, 而不是增加能源供应来满足需求。”在中国, 提供一兆瓦新增电力的发电费用, 至少相当于通过改善能效节省一兆瓦电力费用的 4 倍。据麦肯锡全球节能的一项研究指出, 降低温室气体排放最具成本效益的五项措施中, 建筑物的节能措施就占了四项, 包括建筑物的隔热系统、照明系统、空调系统及热水系统。实践证明, 建筑物只要节能设计合理, 只需投入少量甚至零成本便可轻易取得 50% ~ 60% 的节能

效果。加上建筑物的使用寿命远比其他工业产品长, 其节能效果也更加持久和深远。

建筑业还是占地大户。目前我国已成为世界上最大的建筑工地。仅以住宅面积为例, 截至 2008 年底, 我国城镇和村镇的房屋建筑面积已达 530 多亿平方米, 其中城镇住宅面积近 200 亿 m^2 , 村镇住宅面积近 270 亿 m^2 。今后我国每年还将新建建筑面积达 20 亿 m^2 。因此, 我国要贯彻落实可持续发展战略, 建设资源节约型、环境友好型社会, 建筑业无疑是关键领域。我国要实现节能减排的目标, 若建筑业不作为, 则至少是半句空话。

建筑业是国民经济四大支柱产业之一。建筑业的耗资和产值巨大。许多大型公共建筑, 投资动辄数亿、数十亿元, 如央视大楼, 投资 50 亿; 广州白云国际会议中心, 投资近 40 亿。相比我国载人航行计划, 也不过投资 14 亿元, 仅相当于广州大剧院一栋建筑物的投资, 由此可见一斑。目前, 我国房地产业在 GDP 中的比重已接近 10%。2007 年底与 2008 年底, 全国房地产开发投资额都达到 2.5 万亿规模, 更遑论其他建筑的投资, 所占比例更高。而且建筑业能带动的上下游相关产业众多, 包括交通运输业、建材、冶金、化工、轻工、机械、电子与纺织等 50 多个行业。据国家统计局投入产出模型计算, 在中国 100 亿元房地产投资, 可带动国民经济各部门产出 286 亿元产值。

正由于建筑业在可持续发展、节能减排和拉动经济方面具有举足轻重的重要地位, 因此, 目前发达国家都将建筑业列入实现低碳经济、绿色经济, 促进节能减排, 克服金融危机的重点领域, 将之列入战略性新兴产业予以高度重视。

2009 年 1 月 25 日, 美国白宫发布《经济振兴计划进度报告》, 强调 2009 年要对 200 万所美国住宅和 75% 的联邦建筑物进行翻新, 提高其节能水平, 将建筑节能改造作为美国克服金融危机、振兴经济的重大举措。美国前副