

# 体育馆建筑被动式节能技术实测与分析 ——以广东药学院体育馆为例

张磊, 孟庆林, 李晋

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

**摘要:** 体育馆建筑照明和空调能耗巨大, 如何充分利用自然采光和自然通风是体育馆建筑节能的关键问题。广东药学院多功能体育馆在设计中考虑了多种被动式节能措施, 如东、西向立面设置带有垂直遮阳的条形采光窗, 南、北向立面设置可开启的外窗, 附馆屋顶采用种植屋面等。该体育馆的实测结果表明上述被动式设计方法可以增加比赛场地自然光照度, 防止眩光; 提高观众区自然通风风速, 改善舒适度; 降低附馆屋顶内表面温度, 减少热辐射。

**关键词:** 体育馆建筑; 被动式技术; 建筑节能; 实测分析

中图分类号: TU119 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2010)01-0101-06

## Measurement and Analysis of Multi-Functional Stadium of Guangdong College of Pharmacy

ZHANG Lei, MENG Qing-lin, LI Jin

(School of Architecture, State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, P. R. China)

**Abstract:** Lighting and air-conditioning energy consumption of stadium is very large. That how to use natural lighting and natural ventilation is the key pivot for stadium energy efficiency design. A variety of passive energy efficient measures were used in the Multi-functional stadium of Guangdong College of Pharmacy, such as lighting windows with vertical blinds in east and west facades, Openable windows on south and north facades, planting roof and etc. It was found that the above-mentioned passive designs could increase natural illumination of competition venues, prevent the glare, raise wind speed in audience area, improve comfort level and decrease internal surface temperature of affiliated building and reduce heat radiation.

**Key words:** stadium; passive technology; building energy efficiency; measurement and analysis

体育馆建筑自身体量和空间较大, 使用中为了满足室内光、热环境要求, 需要投入大量的照明能耗和空调能耗, 因此, 如何充分利用自然采光和自然通风是体育馆建筑节能设计的重点<sup>[1-2]</sup>。

采用主动式技术或被动式技术实现上述目的。主动式技术是指通过高技术手段和设备实现对自然资源的利用, 例如光导管技术、通风设备等, 但主动

式技术往往价格昂贵或需要消耗额外的电能; 被动式技术是指通过环境规划、建筑设计和技术分析等手段实现对自然资源的充分利用, 降低室内光、热环境对机械设备的依赖程度。采用被动式建筑节能设计一方面可以实现节能, 另一方面可以节省投资<sup>[3]</sup>。

该文以广东药学院多功能体育馆为测试对象, 阐述被动式建筑节能技术实施后的实际效果。

收稿日期: 2009-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808083)

作者简介: 张磊(1978-), 男, 博士, 主要从事城市热环境与建筑节能研究, (E-mail) arzhanglei@163.com。

### 1 建筑概况

广东药学院多功能体育馆位于广州大学城广东药学院校区内,建筑面积 14 500 m<sup>2</sup>,固定坐席 3 000 人,活动坐席 1 990 人。体育馆于 2007 年 6 月建成,并于同年 8 月承办了全国大学生运动会。多功能体育馆分为主馆和附馆 2 部分,如图 1 所示<sup>[4-5]</sup>。



图 1 广东药学院多功能体育馆

### 2 被动式建筑节能技术应用

#### 2.1 自然通风

体育馆主馆呈北高南低逐级跌落的形态,如图 1 所示,如此可强化正负风压区的对比,加强室内的自然通风<sup>[4-5]</sup>。通过 CFD 模拟获得体育馆主馆表面风压分布<sup>[6-7]</sup>,如图 2 所示,可以看出,在广州地区主导风向下,主馆迎风面的南面和东面与背风面的北面可以形成约 3 Pa 的压差,为室内自然通风创造充足的动力。

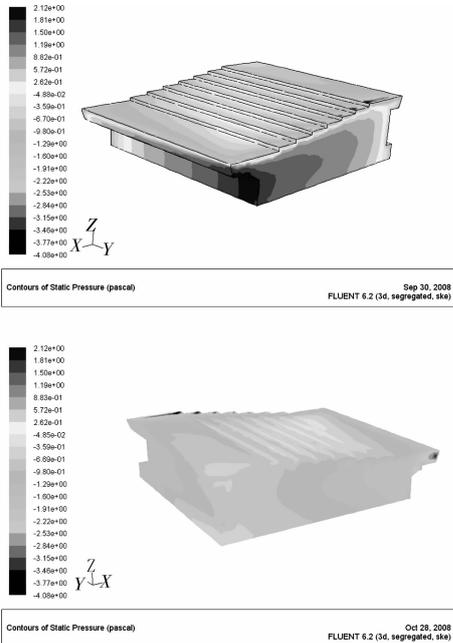


图 2 主馆外表面风压分布

在进风口的选择方面,根据建筑表面风压模

拟结果,在处于正压区的南向立面和屋顶布置可开启通风窗,将风引入室内<sup>[8-9]</sup>,如图 3 所示。



图 3 体育馆南立面通风窗

出风口在北立面的檐口下,出风口选择在倾斜屋顶的高端一侧,使热空气沿倾斜屋顶上升排出室外。主馆内自然通风 CFD 模拟如图 4—5 所示。

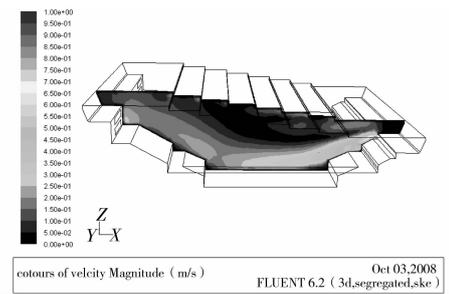


图 4 主馆内南-北剖面风速分布

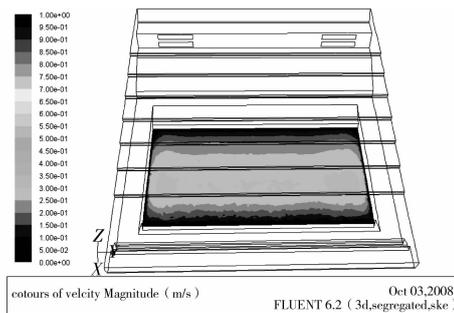


图 5 主馆内 1.5 m 高处风速分布

从图 4—5 可以看出,南立面上下 2 层外窗是主要进风通道,窗口处风速接近 0.9 m/s,通风窗口下部的座位区也可以获得较为理想的自然通风,平均

风速达到  $0.5 \text{ m/s}$ , 人员可以感受到空气流动; 而在下沉式比赛场地周围没有明显的进风通道, 形成“盆地效应”, 该区域风速相对较低, 平均风速低于  $0.2 \text{ m/s}$ , 人员几乎感受不到空气流动; 在主馆北部区域, 由于场馆进深过大, 空气流动动力不足, 风速衰减较为明显, 北部座位区平均风速也不足  $0.2 \text{ m/s}$ , 自然通风效果不显著。

## 2.2 自然采光

体育馆东西立面设置条形采光窗, 并在窗口设置向南旋转  $30^\circ$  的垂直遮阳板, 如图 6 所示。直射光线照射在垂直遮阳板上, 形成漫射光进入室内, 一方面, 增加室内自然光照度, 防止眩光产生, 改善室内的光环境; 另一方面, 阻挡了过量的太阳辐射热进入室内, 减少场馆空调能耗<sup>[10]</sup>。



图 6 体育馆东西采光窗和遮阳

东、西向采光窗上的垂直遮阳板倾斜角度根据广州地区太阳运行轨迹而确定, 广州地区夏季的上午和下午时刻, 太阳光线从偏北方向入射东、西立面, 而在冬季相同时刻, 太阳光线一般垂直或从偏南方向入射东、西立面, 因此, 将垂直遮阳板偏转角度设计为向南倾斜  $30^\circ$  有利于遮挡夏季过量太阳辐射, 透过冬季适量太阳辐射。采用采光分析软件模拟了有无垂直遮阳板室内直射光分布情况, 如图 7 所示, 可以看出夏季直射辐射几乎全部被遮挡<sup>[11-13]</sup>。

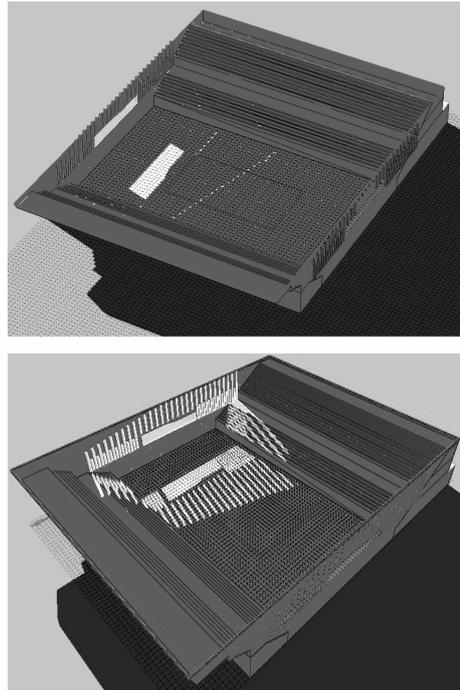


图 7 东、西向采光窗有(上图)无(下图)遮阳板情况下  
6月21日下午17:00主馆内太阳阴影

## 2.3 种植屋面

在附馆屋顶设计了覆土种植屋面, 改善屋顶隔热能力, 降低屋面内表面温度<sup>[14-15]</sup>, 如图 8 所示。



图 8 附馆屋顶覆土种植屋面

## 3 实测结果

为了评价该体育馆被动式节能设计的实际效果, 在 2008 年 7 月 24 日—26 日对体育馆主馆和附馆进行了自然通风、自然采光、室内热环境、室外热环境以及附馆屋顶隔热测试。

### 3.1 自然通风测试结果

在主馆内东、南、西和北 4 个区域进行风速测量, 测试结果如图 9 所示。可以看出, 主馆内东区、西区 and 南区风速相对较高, 而北区和比赛场地则基本处于静风状态。测试期间, 多为南风或偏南风, 南向外窗是主要的进风口, 而东、西向外窗可以作为主要的出风口, 偶尔也有空气流入, 而在场馆北侧区域

尽管也有外窗开口但由于空气流动路程太长,衰减较为严重,因此北侧区域的空气流速相对较低。而在比赛场地,空气在场地内较难流动,形成“盆地效应”,造成这种下沉式的比赛场地几乎无法有效利用自然通风。

主馆自然通风测试结果与模拟结果基本一致,表明传统下沉式的体育馆容易在比赛场地形成“盆地效应”,造成场地通风不畅,无法有效利用自然通风改善此处热舒适水平。

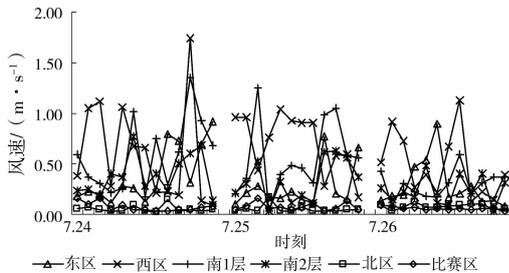


图 9 测试时间段主馆内不同区域风速分布

### 3.2 自然采光测试结果

在主馆比赛场地布置了 7 个照度测点,如图 10 所示,选择 7 月 26 日测试结果进行重点分析,如图 11 所示。可以看出,7 个测点自然光照度分布规律性明显,上午时间段内,太阳位于东侧,造成东侧测点 1 和 6 在上午时间段内自然光照度明显高于其他测点,而在下午时间段内,情况正好相反,西侧测点 3、4 的自然光照度相对较高,中间测点 2、5 和 7 则变化较为稳定。

在自然光可利用时间段内(9:00—17:00),7 个测点的自然光照度均大于 150 Lux,可以满足体育馆基本使用需要,此外,比赛场地的采光均匀度除在 9:00 为 0.58,其他时刻均大于 0.7,光线均匀性较好,可以避免在比赛场地产生眩光。

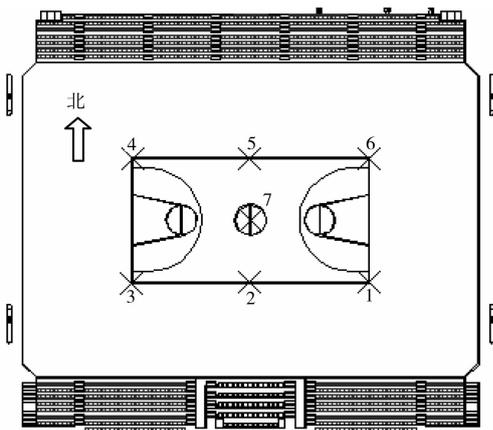


图 10 比赛场地自然光照度测点布置

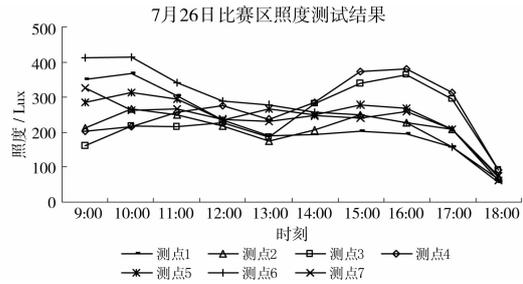


图 11 比赛场地自然光照度测试结果

### 3.3 室内热环境测试结果

采用湿球黑球温度(简称:WBGT)作为室内热环境测试对象,受仪器限制,重点测量了南侧座位区的 WBGT 指标,如图 12 所示。



图 12 室内热环境 WBGT 测试结果

在国际标准 ISO7243 中对不同新陈代谢率的人员所处环境的 WBGT 限值进行了规定,观众在静坐时新陈代谢率为 58.2 W/m<sup>2</sup>,则 WBGT 上限值为 32 °C<sup>[16-17]</sup>,而现场 WBGT 测试结果表明:测试时间段内,观众区 WBGT 指标均小于 32 °C,处于热安全范围。

### 3.4 室外热环境测试结果

体育馆主馆的屋顶挑出部分可以在地面形成阴影,对改善此处空间热环境效果显著,通过测试该局部遮阳空间与相邻日照空间热环境指标 WBGT,如图 13 所示,遮阳空间的 WBGT 指标相比日照空间 WBGT 指标较低,测试时间段内两者最大相差 6.2 °C,平均相差 2.9 °C。说明建筑被动式节能设计除了可以改善室内热环境也可以改善建筑室外的空间热环境。

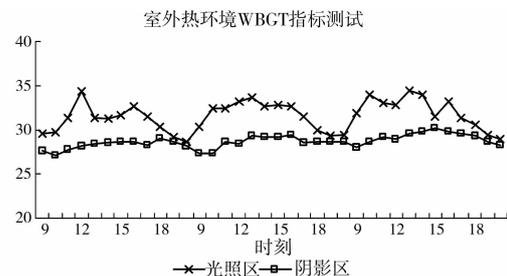


图 13 室外热环境 WBGT 指标测试结果

### 3.5 种植屋面测试结果

采用热红外温枪测试了主馆和附馆屋顶的内表面温度,如图14所示。

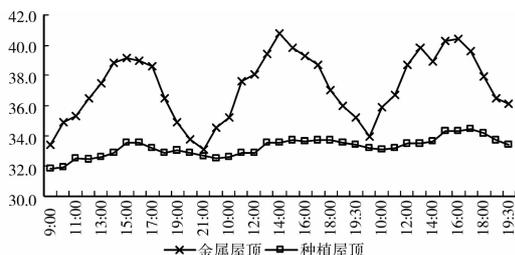


图14 主馆和附馆屋顶内表面温度测试结果

主馆屋顶为金属屋顶,热惰性较低,阳光照射下升温较快,而附馆屋顶为种植屋面,热惰性较高,屋顶内表面温度变化较为平滑。主馆屋顶内表面温度在14:00左右出现最高温度,并且变化较为剧烈,而附馆屋顶内表面温度相对较低,并且变化较为平滑,与主馆相比最大温差为7.3℃,种植屋面对降低屋顶内表面温度效果显著。

针对主馆金属屋面温度过高的问题,可以考虑在屋顶外表面喷涂热反射隔热涂料,该涂料具有较低的太阳辐射吸收率,有效减少屋面吸收的太阳辐射热,有报道表明,喷涂热反射隔热涂料的屋面与普通屋面相比,外表面温度最大相差19℃,内表面温度最大相差10℃,降温效果明显<sup>[18]</sup>。

## 4 结论

对体育馆的实测结果表明:

1)作为主要进、出口口的东、南和西窗附近区域风速较大,平均风速分别为0.31 m/s、0.40 m/s和0.60 m/s,而北窗附近平均风速为0.06 m/s,比赛区域由于“盆地效应”,平均风速只有0.07 m/s。

2)在自然光可利用时间段内(9:00—17:00),主馆内7个测点的自然光照度均大于150 Lux,可以满足体育馆基本使用需要,此外,比赛场地的采光均匀度除在9:00为0.58,其他时刻均大于0.7,光线均匀性较好,可以避免在比赛场地产生眩光。

3)室内热环境评价指标WBGT在测试期间均低于人员热安全限值32℃,处于热安全范围。

4)南向屋顶挑檐设计形成局部遮阳空间,遮阳空间的WBGT指标相比日照空间WBGT指标较低,测试时间段内两者最大相差6.2℃,平均相差2.9℃,屋顶挑檐改善室外空间热环境效果显著。

5)覆土屋面对降低屋顶内表面温度效果显著,附馆覆土屋面内表面温度与主馆金属屋顶内表面温度最大相差7.3℃。

在体育馆建筑的设计过程中,考虑多种形式的

被动式节能技术,例如,在建筑的主要迎风面和背风面设置开口,以充分利用自然通风,减少空调设备的开启时间;在建筑外立面上合理开窗并科学设计遮阳构件,以充分利用自然采光,同时遮挡直射光,防止眩光产生;围护结构材料选择过程中,除需考虑传热系数外,还应考虑材料热惰性指标,以减少内表面温度波动,降低屋面冷热辐射对人员热舒适的不利影响。

### 参考文献:

- [1]周登高.现代体育建筑造型设计的创作思路[J].重庆建筑大学学报,2007,29(5):15-22.  
ZHOU DEN-GAO. Creating ideas of modern sport buildings' mould-making design [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(5): 15-22.
- [2]孙一民.回归基本点:体育建筑设计的理性原则——中国农业大学体育馆设计[J].建筑学报,2007(12):26-31.  
SUN YI-MIN. Return to the basic point: rational principles of sport building design-China agricultural university gymnasium design[J]. Architectural Journal, 2007(12):26-31.
- [3]孟庆林,胡文斌,张磊,等.建筑蒸发降温基础[M].北京:科学出版社,2006.
- [4]郭卫宏,李晋.广州大学城广东药学院多功能体育馆[J].建筑学报,2008(3):46-49.  
GUO WEI-HONG, LI JIN. Multi-function gymnasium of medicine college of Guangzhou province in Guangzhou university city[J]. Architectural Journal, 2008(3): 46-49.
- [5]何镜堂,郭卫宏,李晋.与环境、气候的积极对话——2007年全国大学生运动会艺术体操馆创作体会[J].城市建筑,2006(3):16-18.  
HE JING-TANG, GUO WEI-HONG, LI JIN. An active dialogue with the environment and climate——experience in designing the eurythmics gymnasium for the 2007 national university games[J]. Urbanism and Architecture, 2006(3): 16-18.
- [6]钟军立,曾艺君.建筑的通风设计浅析[J].重庆建筑大学学报,2004,26(2):18-21.  
ZHONG JUN-LI, ZENG YI-JUN. Natural ventilation design in architecture[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2004, 26(2): 18-21.
- [7]杨玉容,龙天渝,刘腊美.室内通风优化的三维数值分析[J].重庆建筑大学学报,2006,28(3):78-81.  
YANG YU-RONG, LONG TIAN-YU, LIU LA-MEI. Three dimensional numerical analysis of optimum design of the indoor ventilation [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(3): 78-81.
- [8]万鑫,苏亚欣.现代建筑中自然通风技术的应用[J].建筑节能,2007,35(9):9-12.

- WAN XIN, SU YA-XIN. Application of natural ventilation in modern architecture design [J]. Construction Conserves Energy, 2007, 35(9): 9-12.
- [9] WEST S. Improving the sustainable development of building stock by the implementation of energy efficient, climate control technologies[J]. Building and Environment, 2001, 36: 281-289.
- [10] MENG QING-LIN, ZHANG LEI. The rooftop shading system of the Humanities Building at SCUT [J]. Energy and Buildings, 2006, 38(11):1356-1359.
- [11] 黄海静, 陈纲. 建筑采光节能设计的整体思维[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(4):6-7.
- HUANG HAI-JING, CHEN GANG. The holistic thinking on the energy saving in architectural design [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(4): 6-7.
- [12] 唐鸣放, 张恒坤, 赵万民. 户外公共空间遮阳分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(6):5-8.
- TANG MING-FANG, ZHANG HENG-KUN, ZHAO WAN-MIN. Analysis of sun-shading for the external public space [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(6): 5-8.
- [13] 王雪松. 生态技术策略——双层皮外墙类型分析研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(6):5-9.
- WANG XUE-SONG. Ecological technology strategy the typologic analysis and research of double-skin facade [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, 25(6): 5-9.
- [14] ELEFTHERIA ALEXANDRI, PHIL JONES. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates[J]. Building and Environment, 2008, 43(4):480-493.
- [15] 孟庆林, 张玉, 张磊. 热气候风洞内测定种植屋面当量热阻[J]. 暖通空调, 2006, 36(10):111-113.
- MENG QING-LIN, ZHANG YU, ZHANG LEI. Measurement of equivalent thermal resistance of plated roof in hot-climate wind tunnel[J]. Heating Ventilatin & Air Conditioning, 2006, 36(10): 111-113.
- [16] ISO. International Standard 7243, Hot environments-estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature) [S].
- [17] MORAN D S, PANDOL F K B, SHAPIRO Y, et al. An environment stress index (ESI) as a substitute for the wet bulb globe temperature (WBGT)[J]. Journal of thermal biology. 2001 (26):427-431.
- [18] 陆洪彬, 陈建华. 隔热涂料的隔热机理及其研究进展[J]. 材料导报, 2004, 19(4):71-73.
- LU HONG-BIN, CHEN JIAN-HUA. Mechanism of thermal insulation coatings and its development [J]. Materials Review, 2004, 19(4): 71-73.

(编辑 胡 玲)

(上接第 50 页)

- [8] CHEE KIONG SOH, YANG YAO-WEN. Genetic programming-based approach for structural optimization. Journal of Computing in Civil Engineering. 2000, 14(1): 31-37.
- [9] STORN R, PRICE K. Differential evolution-A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4):341-359.
- [10] VESTERSTROM J, THOMSEN R. A comparative study of differential evolution, particle swarm optimization, and evolutionary algorithms on numerical benchmark problems [J]. Evolutionary Computation, 2004, 2:1980-1987.
- [11] GONG WEN-YIN, CAI ZHI-HUA, ZHU LI. An efficient multi-objective differential evolution algorithm for engineering design [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2009, 4(2):137-157.
- [12] COELHO, LEANDRO DOS SANTOS. Reliability-redundancy optimization by means of a chaotic differential evolution approach [J]. Chaos Solitons Fractals, 2009, 41(2), 594-602.
- [13] WU ZHI-FENG, HUANG HOU-KUAN, YANG BEI, et al. A modified differential evolution algorithm with self-adaptive control parameters [C] // Proceedings of 2008 3rd International Conference on Intelligent System and Knowledge Engineering, ISKE 2008, 524-527.
- [14] VIANA, FELIPE ANTONIO CHEGURY. Differential evolution applied to the design of a three-dimensional vehicular structure[C]//2007 Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2008, Vol. 6(B): 1321-1330.
- [15] 王勇. 基于微粒群算法的桁架结构优化设计[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2008.
- [16] 王栋, 张卫红, 姜节胜. 桁架结构形状与尺寸组合优化[J]. 应用力学学报, 2002, 19(3): 72-76.
- WANG DONG, ZHANG WEI-HONG, JIANG JIE-SHENG. Combined shape and sizing optimization in truss design[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2002, 19(3):72-76.
- [17] 朱朝艳. 离散变量结构优化设计中遗传算法的研究和应用[D]. 沈阳: 东北大学资源与土木工程学院, 2004.

(编辑 王秀玲)