

基于 CFD 的中庭式建筑冬季供暖研究

于瑾¹,王琳¹,赫娜²,张九红³,韩超⁴

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;
2. 沈阳建筑大学后勤服务集团,辽宁 沈阳 110168;3. 沈阳建筑大学建筑与规划学院,
辽宁 沈阳 110168;4. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 对公共建筑中庭冬季供暖空调系统导致的室内温度不均现状进行改造,以满足人体舒适性,提高经济性. 方法 对沈阳地区某高校图书馆中庭冬季采用传统空调供暖的气流组织分布情况进行研究,对实测结果与 CFD 模拟结果进行对比,分析是否符合《公共建筑节能设计标准》,提出采用太阳墙技术并分析其可行性. 结果 通过对图书馆中庭进行温度场模拟发现,中庭的垂直温差达到 5℃左右,当前中庭内温度并不能达到设计温度.采用太阳墙新风系统+传统空调采暖耦合作用能很好地解决中庭内平均温度偏低的问题,且可以保证室内新风量的供给. 结论 从中庭实测数据及 CFD 模拟出发,使用太阳墙改造措施,有助于改进和优化采暖设计方案.

关键词 中庭;冬季供暖;CFD;太阳墙

中图分类号 TU834.3+3 文献标志码 A

Research on Winter Heating of Building Atriums Based on CFD

YU Jin¹, WANG Lin¹, HE Na², ZHANG Jiuhong³, HAN Chao⁴

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;
2. Logistics Service Group, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;3. School of Architecture and Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;4. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The objective of this paper is to improve the indoor temperature imbalance caused by the atrium heating and air conditioning system in public buildings in winter, in order to meet the human comfort and improve the economy. The air distribution of the university library atrium in winter was studied. The experimental results were compared with the CFD simulation, and the feasibility was analyzed by using the solar wall technology. Through the air temperature distribution simulation of the library atrium, the vertical temperature of the atrium reaches about 5℃. And the current temperature in the atrium cannot reach the design temperature. Using the solar wall fresh air

收稿日期:2017-01-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51678370);国家外专局2015年度科教文卫引智项目(W20152100016)

作者简介:于瑾(1957—),男,教授,主要从事建筑节能和污染控制技术方面研究.

system + traditional air conditioning heating coupling can solve the problem of the low average temperature in the atrium, and can ensure the supply of indoor fresh air. From the measured data and CFD simulation of the atrium, using the solar wall reconstruction measures, it is helpful to improve and optimize the heating design scheme.

Key words: atrium; winter heating; CFD; solar wall

随着经济的发展,人们对于能源的节约意识越来越高.根据清华大学建筑节能研究中心建立的中国建筑能耗模型(China Building Energy Model, CBEM)研究结果显示^[1-4],2012年建筑总能耗约占全国能耗消费总量的19.1%,建筑能耗还将继续增长,其中采暖能耗约占其中的30%~40%.且我国每年新建建筑量逾10亿 $m^{2[5-8]}$.其中,中庭式的公共建筑(体育场馆、商场、酒店、图书馆等)成为了大多数建筑师的主要选择,中庭式建筑的显著特点是采用大型中空的玻璃采光顶,阳光可以通过玻璃采光顶进入中庭,使得中庭采光效果非常好,减少了由于人工照明等带来的能耗^[9-10].但是,中庭式建筑的局限性同样不容忽视,例如中庭的玻璃采光顶,在日光的强烈照射下很可能使得顶层过热造成人们极度不适和能源的极大浪费,或是在日光照射不足的情况下,使得室温极度下降,尤其是在冬季,即使有阳光照射,但由于玻璃采光顶保温性能差,也使得顶层温度很低,加重了热负荷^[11-12].因此,研究冬季中庭式建筑的气流组织流动规律,并采取措施实施节能改造尤为重要.

采用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模拟技术来模拟仿真实的流体流动情况,具有速度快、准确度较高且可模拟各种不同工况等独特的优点,逐渐受到研究人员的青睐.基于此,笔者采用CFD模拟技术对图书馆中庭气流组织进行研究,有助于改进和优化该环境下室内温度分布不均等问题.研究表明采用太阳墙新风系统+传统空调采暖耦合作用能很好地解决中庭内平均温度偏低的问题,且可以保证室

内新风量的供给.

1 冬季工况下的温度场测试

1.1 研究对象

笔者以沈阳地区冬季工况下某高校图书馆中庭为研究对象,图书馆总建筑面积 $24\,623.2\,m^2$,占地面积 $4\,004.4\,m^2$.总建筑面积高度 $23.95\,m$,其中一层层高 $3.9\,m$,二~六层层高 $3.8\,m$,中庭基本尺寸为 $63.3\,m \times 16\,m \times 23.95\,m$.外墙采用 $370\,mm$ 厚非承重空心砖,东西方向采用塑钢骨架中空玻璃的玻璃幕墙,屋顶采用塑钢骨架中空玻璃的玻璃采光顶.南北两方向均有阅览室及办公室,中间格局是有从一层贯穿至顶层的通透式的大中庭.建筑南向四季均有阳光照射且充足,温度比北向房间高,由于屋顶为玻璃采光顶,自然形成了一个大的“生态天井”.

1.2 测试条件及实验仪器

于2017年1月14日11时~15日11时期间(室外平均气温 $-10\,^{\circ}C$)进行冬季工况的现场测试,两天室外温度相当,处于图书馆正常空调供暖时期.笔者在中庭各层回廊上布置测点,利用热电偶线测试中庭温度分布,连接至数据记录仪上,再连至终端计算机读取测试数据.利用手持式空气品质测试仪测试各处风口送风温度、利用EY3-2A电子微风仪测试各处风口送风风速.实验仪器:数据记录仪、24根k型热电偶线、手持式空气品质测试仪、EY3-2A电子微风仪.

1.3 实验方案

由于图书馆顶层有金属结构的框架,因此将两根粗铁丝分别固定在顶层A、B、C、D点的金属框架上,再在1、2、3和4测点所对

应的垂直方向的粗铁丝上分别固定一根玻璃
 丝绳垂到一层,将每层 1.5 m 处的每个测点
 所对应的玻璃丝绳上各固定一根热电偶感
 触头,所有热电偶线的另一端都连至位于 4
 层的数据记录仪上,用于记录各层各测点全
 天的温度情况.实验时间为全天 24 h,每隔

1 s 测量一次温度会造成数据太过庞大,经研
 究,每隔 40 min 测量一次温度且测量高度为
 每层的 1.5 m 处的人员活动高度.

实验测点每层选取 4 个,共 6 层,即 24
 个测点,测点位置及编号如图 1 所示.

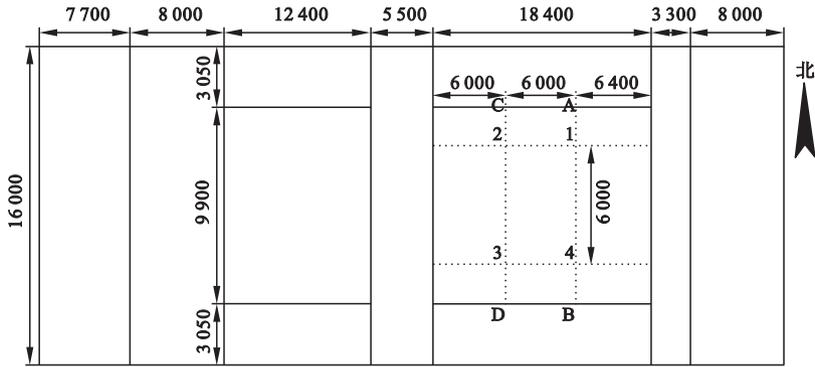


图 1 图书馆实验测点平面布置图

Fig. 1 The plane arrangement drawing of the experiment measuring point in the library

1.4 数据记录

经实际测试,一层至六层送风口出风速
 度及出风温度见表 1,中庭各层 1.5 m 处平
 均温度见图 2.

表 1 送风口出风速度及出口温度测试数据

Table 1 Test data of outlet velocity and outlet temperature of air outlet

层数	送风口平均温度/℃	送风口平均风速/(m·s ⁻¹)
1	0.44	0.446 870
2	20.38	0.516 875
3	22.63	0.495 620
4	33.60	0.506 250
5	39.44	0.533 750
6	51.30	0.544 300

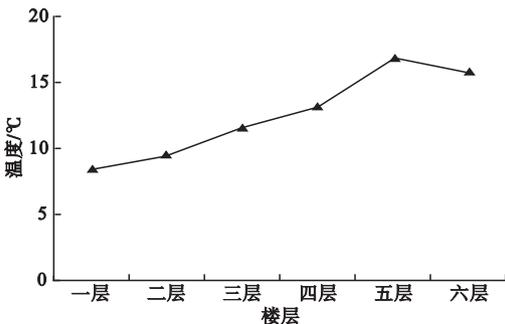


图 2 中庭各层 1.5 m 处平均温度

Fig. 2 1.5 meters of the layers of the average temperature in the atrium

2 中庭内温度场的 CFD 模拟

2.1 物理模型

以实测图书馆中庭为研究对象,利用
 CFD 技术进行室内空气状态的数值模拟.由
 于中庭内部结构复杂,存在多套外加桌椅和
 沙发且位置无法固定,使得模型网格数目稍
 大,因此,将模型简化(见图 3).

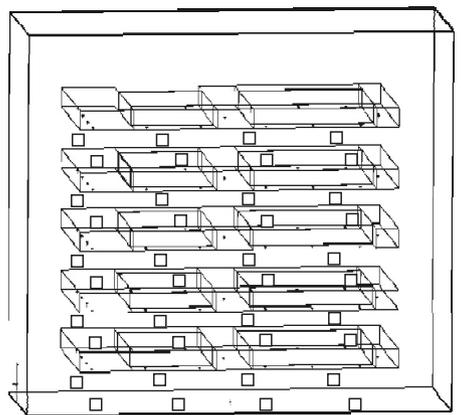


图 3 物理模型

Fig. 3 Physical model

每层有 16 个分散排布的规格为
 400 mm × 300 mm 的单层百叶送风口,送风
 口分布见图 4.且每层南、北内墙各设有 4 个

规格为400 mm × 300 mm的单层百叶回风口,共8个,矩形回风口分布见图5。为了使中庭内气流组织模拟的更加准确、合理,在划分网格时对有物体的地方,如外门、送风口,回风口等处的网格划分相对其他区域更密集。

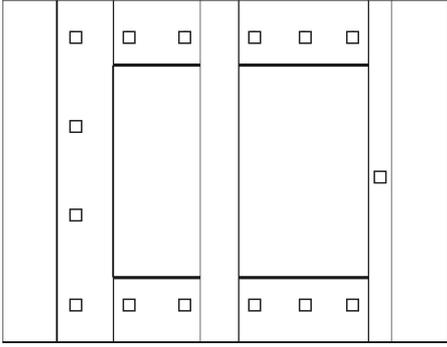


图4 中庭每层楼板送风口位置分布图

Fig. 4 Distribution drawing of each floor the air outlet in the atrium

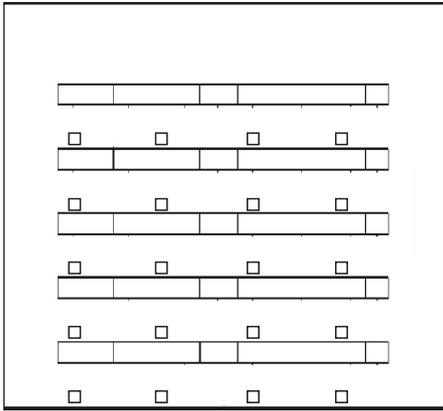


图5 南墙侧回风口位置分布图

Fig. 5 Distribution drawing of the air outlet position on the south wall

2.2 边界条件的设置

入口边界条件:中庭每层送风方式均采用百叶顶送风方式,送风口出风速度按照实测结果取平均值0.507 m/s,送风温度按照实测结果取平均值17.98 °C,室外气温为-10 °C。

壁面边界条件:由于该图书馆的中庭处于建筑内区,南北向的墙壁均属于内墙,因此忽略南北两方向的墙体传热,只考虑东西向玻璃幕墙和玻璃采光顶的传热,每层间楼板

均视为绝热面。

中庭内热负荷:经实际模拟发现,在每层增加若干人员后,划分的网格数会增加至100多万,这样给模拟计算带来十分大的困难,且图书馆人员多集中有室内阅览室,中庭人员分布较少且随时间其数目和活动范围不固定,基于以上原因,人员不作考虑,即模拟无人员流动于中庭内区的情况。

2.3 数学模型

由于图书馆中庭内的空气流速较低,因此将中庭内空气流动视为不可压缩流体,同时为牛顿黏性流体稳态流动。对于该紊流流动模型,采用 $k-\varepsilon$ 紊流模型进行数值模拟,假定条件如下:

(1) 中庭内气体为理想气体,且满足Boussinesq假设,即认为空气冷的变化仅对浮升力产生影响;

(2) 室内空气为辐射透明介质;

(3) 由于中庭内采用空调系统,因而保持正压;

(4) 由于中庭顶部的玻璃采光顶及东、西向的玻璃幕墙,白天图书馆中庭的自然采光效果非常好,因此节能灯是不开启的,即忽略节能灯的影响。

中庭室内气体流动满足质量守恒、动量守恒和能量守恒方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho U = 0. \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho U u_i) = \text{div}[(\mu + \mu_t) \text{grad} \times (\mu_t)] - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho_{\text{ref}} g \delta_{is} \beta \nabla t. \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho U T) = \text{div}\left(\frac{\mu}{p_r} + \frac{\mu_t}{\sigma_T}\right) \text{grad} T + \frac{q}{c_p}. \quad (3)$$

式中: v_i 为流速矢量在3个坐标上的分量,分别是 $v, \mu, \omega, i=1, 2, 3$ 分别代表三维直角坐标系的3个方向; β 为体积膨胀系数; μ_t 为紊

流黏性系数; μ 为层流黏性系数。

2.4 CFD 模拟结果分析

中庭 z 截面的温度分布如图 6 所示,从图中可以直观反映出垂直方向上的温度梯度。可以看出,沿高度方向,高度越高,温度越高:一层的平均温度最低,五层的平均温度最高。由于篇幅所限,将各层 1.5 m 处的温度云图绘制成图 7。从图 7 可以得出,一层 1.5 m 处的平均温度为 8.2 °C,二层 1.5 m 处的平均温度为 11.8 °C,三层 1.5 m 处的平均温度为 12.6 °C,四层 1.5 m 处的平均温度为 14.1 °C,五层 1.5 m 处的平均温度可达到 15 °C,六层 1.5 m 处的平均温度为 14.3 °C,垂直温差达到 7 °C 左右。

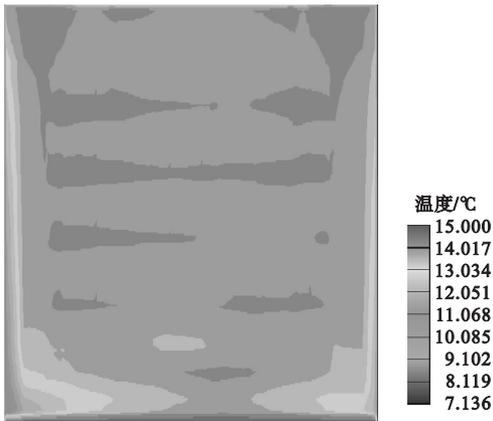


图 6 中庭 z 截面 ($z=8$ m) 温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution plot of Z section ($z=8$ m) in atrium

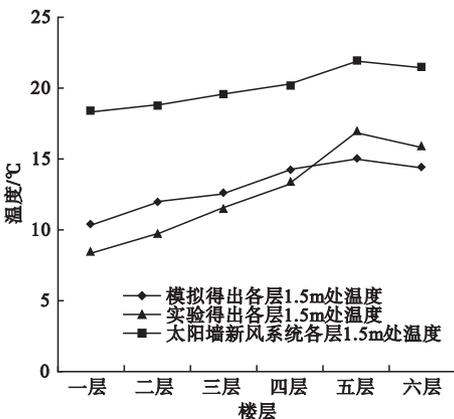


图 7 中庭各层 1.5 m 处的温度分布图

Fig. 7 Temperature distribution plot of each layer of 1.5 meters in atrium

从图 7 中可以看出,外门附近的温度偏低,主要是由于在图书馆开放期间一直开启,因此外门可以采用门斗、热空气幕等措施减少冷风入侵。且靠近东西外玻璃幕墙的区域温度也比室内偏低,可见玻璃幕墙除了增大透光性、美观之外,保温性能很差,会加大冬季室内热负荷。

通过图 7 中模拟结果和实测结果的对比可见,两者走势大致一致且温度相差不多,说明笔者所建立的 CFD 模型正确,CFD 技术可以用于中庭建筑室内空气气流组织和热力学参数的分析。

通过 CFD 的测试结果,可得出建筑物内外热压差:

$$\Delta p = gh \times (\rho_o - \rho_i). \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度; h 为高程差; ρ_o 为室外空气密度; ρ_i 为室内空气密度。

由于本次模拟以室外温度 -10 °C 为例, -10 °C 时空气密度为 1.44 kg/m^3 , 因此 $\rho_o = 1.44 \text{ kg/m}^3$, 内一层的平均温度为 8 °C, 空气密度为 1.245 kg/m^3 , $\rho_i = 1.245 \text{ kg/m}^3$, 外门重心与顶层之间的高程差为 22.95 m , 则中庭内外热压差为

$$\Delta p = 9.78 \text{ m/s}^2 \times 22.95 \text{ m} \times (1.44 - 1.248) \text{ kg/m}^3 = 41.299 \text{ Pa}.$$

尽管冬季顶层密封没有天窗等设施的开启,但由于室内外空气密度差和高差,仍然会有局部小循环的风量存在,压力会达到 41.299 Pa , 以此进行热压下的自然通风,将会给中庭内的热负荷带来负担,给人员带来不舒适感,进而增大空调消耗。同时,根据《公共建筑节能设计标准》(GB - 50189—2015)中规定,图书馆大厅的空调采暖设计计算温度为 18 °C。而从实测和模拟中也得出中庭各层现有的冬季空调送风参数并不能满足室内供暖舒适度要求,必须进行供暖方案的改造。姚旭辉^[13]等研究发现,当建筑中庭采用各层均匀送风的空调采暖方案时,中庭的垂直温差较大,形成较大的垂直温差,造成

各层温度偏离设计温度,室内热舒适度较差。因此,将通过调整各层空调送风参数,结合太阳墙新风系统,进行中庭建筑冬季供暖改造方案的模拟分析。

3 中庭式建筑节能优化设计

太阳能技术与常规能源相比,具有节能环保的特点^[14-17],对于这种图书馆既有建筑来说可以就地开发利用,避免引用过多的设备,造成资金浪费。因此,笔者研究采用“太阳墙”替代传统采暖空调系统,利用太阳能技术对图书馆中庭的供暖空调系统进行改造。

太阳墙新风系统主要原理是在冬季,白天室外空气通过小孔进入空腔,在流通中获得太阳墙板吸收的太阳辐射热,受热压作用上升,通过送风口送入建筑物的送风系统,然后由管道分配输送到中庭各层空间。笔者通过 CFD 模拟计算,对图书馆中庭采用“太阳墙”技术采暖的可行性进行分析,以确定此工程方案是否合理。

由于到达地面的太阳辐射强度受地区、气候和昼夜变化等因素影响,因此太阳能受天气影响较大。沈阳地区冬季供暖期 1 月份的总时数为 744 h,日照时数为 306 h,约占 2/5。因此,可将太阳墙黑色板材的集热器敷设于中庭建筑的南外墙立面,太阳墙板材可以充分吸收太阳辐射热以加热新风,在运行中只需要耗费风机运行的电能。传统的空调采暖作为辅助方式,以达到节能环保的目的。

由式(5)可以得出同一出口速度下,出口温度受室外太阳辐射强度和室外空气温度共同影响,当出口速度较小时,太阳辐射为主导因素;当出口速度较大时,室外空气温度起主导作用。

$$V_{\text{theory}} = \frac{Q_{\text{solarwall}}}{\rho c_p A_{\text{inlet}} (t_s - t_w)} \quad (5)$$

选取面积为 6 m² 的太阳墙板,风口尺寸为 0.4 m × 0.1 m,通过对太阳墙板物理模型

的选取及计算得出,太阳墙吸收总热流密度为 1 494.07 W。为达到室内平均温度为 18 ℃,湿度为 30%,按冬季送风状态变化过程^[10],确定室外平均温度为 -10 ℃,湿度为 68%,从而得到新风需要处理的送风温度 t_s 为 24.1 ℃,得出理论风速为 0.84 m/s。根据太阳墙送风口面积及太阳墙面积可计算 1 月份每平方米可以提供满足条件的新风量为 21.6 m³/h。根据文献[18]显示,每平方米太阳墙可以处理的满足送风状态的新风量在 18 ~ 180 m³/h 时,该系统具有可行性。

保持该图书馆中庭冬季空调系统各送风口送风温度 24.1 ℃ 不变,利用建立的 CFD 模型,进行在太阳墙新风系统的辅助作用下的中庭室内温度分布的模拟分析,得到中庭各层 1.5 m 处平均温度如图 7(矩形填充)所示。可见,基于太阳墙新风系统 + 传统空调采暖系统耦合作用改造方案,各层中庭室内平均温度均达到 18 ℃ 以上,可满足人员舒适性的要求。

4 结 语

通过对中庭进行现场实测及 CFD 模拟均发现,中庭各层温度不均且达不到设计标准规定的供暖设计温度,利用太阳墙新风系统对冬季空调供暖方案进行改造,并通过对温度场的模拟表明,中庭各层可满足室内平均温度 18 ℃ 的基本要求。因此,太阳墙技术对中庭冬季供暖效果改善有所帮助,为今后研究人员研究公共建筑中庭冬季供暖的节能改造提供了参考依据。

参考文献

- [1] 殷文强,李春生. 建筑能耗分析思路及节能诊断方法[J]. 节能技术,2011(5):21-23.
(YIN Wenqiang, LI Chunsheng. Building energy consumption analysis and energy saving diagnosis method[J]. Energy saving technology, 2011(5):21-23.)
- [2] 姜玉双. 沈阳地区办公建筑能耗分析[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2012.

- (JIANG Yushuang. Analysis on energy consumption of office buildings in Shenyang[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2012.)
- [3] 彭涛. 建筑能耗分析与研究[J]. 建筑安全, 2016(12):34-38.
(PENG Tao. Analysis and research on building energy consumption[J]. Building safety, 2016(12):34-38.)
- [4] 关伟民. 建筑节能措施分析[J]. 中国房地产业, 2011(3):34-40.
(GUAN Weimin. Analysis of building energy saving measures[J]. Chinese real estate industry, 2011(3):34-40.)
- [5] 李勇强. 浅论建筑节能措施[J]. 山西财经大学学报, 2011(增刊1):54-58
(LI Yongqiang. Discussion on building energy saving measures[J]. Journal of Shanxi finance and economics university, 2011(S1):54-58.)
- [6] BLUMBERGA D, HARALDS V. Energy efficiency and energy management nexus[J]. Energy procedia, 2016(4):644-658.
- [7] ZOU Caineng, ZHAO Qun, ZHANG Guosheng. Energy revolution: from a fossil energy era to a new energy era[J]. Natural gas industry, 2016(6):236-239.
- [8] MATHEW A, WANG Meihong. Energy storage technologies and real life applications - a state of the art review[J]. Applied energy, 2016(8):78-82.
- [9] ALDONA K, PAWEL O. Energy audits in industrial processes[J]. Journal of cleaner production, 2016(2):56-57.
- [10] 陆亚俊, 马最良, 邹平华. 暖通空调[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
(LU Yajun, MA Zuiliang, ZOU Pinghua. HVAC[M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2007.)
- [11] 任艳莉. 高大空间气流组织的数值模拟与实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
(REN Yanli. Numerical simulation and experimental study of air flow in large space[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.)
- [12] 于建伟. 开启式中庭建筑冬季空调气流组织的CFD模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
(YU Jianwei. CFD simulation study on air distribution of air conditioning in open atrium[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.)
- [13] 姚旭辉, 李锐. 北京某建筑中庭冬夏季空调环境的数值模拟分析[J]. 流体机械, 2016(5):47-51.
(YAO Xuhui, LI Rui. Numerical simulation of air conditioning environment of a building atrium in winter and summer in Beijing[J]. Fluid machinery, 2016(5):47-51.)
- [14] 于瑾, 马冬娇, 宋嘉林. 严寒地区太阳墙新风系统节能模拟分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(5):957-960.
(YU Jin, MA Dongjiao, SONG Jialin. Simulation and analysis of solar energy saving system in cold area[J]. Journal of Shenyang construction university (natural science), 2010, 26(5):957-960.)
- [15] SAMA M, HALEH B. Analysis of atrium pattern, trombe wall and solar greenhouse on energy efficiency[J]. Procedia engineering, 2016(4):388-395.
- [16] YU Guoqing, ZHAO Pengcheng. Experimental verification of state space model and thermal performance analysis for active solar walls[J]. Solar energy, 2016(6):321-326.
- [17] NARJES D, LEILA D. Experimental heat flux analysis of a solar wall design in Tunisia[J]. Journal of building engineering, 2016(8):167-191.
- [18] Conservall Engineering, Inc. Solar Wall SW150/SW250 Profile [EB/OL]. [2010-04-26]. [Http://sol-arwall.com/en/products/solarwall-air-heating/architects-and-engineers.php](http://sol-arwall.com/en/products/solarwall-air-heating/architects-and-engineers.php).