

文章编号: 1671-6612 (2020) 04-493-07

大型博览建筑关键绿色节能技术探析

刘冰韵 唐澄宇 徐晓燕

(同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司 上海 200092)

【摘要】 大型博览建筑,空间高大且结构复杂,公众参与度高,且多以展教功能为主。为确保展品的安全储存,保证展教质量,空调系统需长期运行,且展陈照明及建筑设备终端用能需求较多,整体建筑能耗较高。推广绿色节能技术,最大限度的减少建筑能耗成为博览建筑首要关注的问题。以某大型科技馆为例,从与建筑能耗息息相关的四个关键设计方面(围护结构节能设计、可再生能源综合利用、暖通空调系统节能优化、被动优先的自然采光设计)出发,结合数值模拟方法,探析相关绿色节能技术的节能潜力及合理性。

【关键词】 大型博览建筑;绿色节能技术;数值模拟;能耗;可再生能源;暖通空调系统
中图分类号 TU201.5 文献标识码 A

Analysis on Key Green Energy-saving Technologies of Large Exhibition Buildings

Liu Bingyun Tang Chengyu Xu Xiaoyan

(Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd, Shanghai, 200092)

【Abstract】 Large exhibition buildings, usually designed with huge space and complex structure, have a high-level public participation and mainly used for exhibition and education. In order to ensure the safe storage of exhibits and guarantee the quality of exhibition and education, the air conditioning system needs continuous operation. Besides, great energy demands for exhibition-lighting and building equipment terminals result in the overall high energy consumption. Therefore, the primary concern of exhibition buildings is to promote green energy-saving technologies and minimize energy consumption. Take a large science museum as an example, this article mainly focuses on four key design elements which are closely related to building energy consumption, namely efficient building envelope design, comprehensive utilization of renewable energy, energy-saving optimization of HVAC systems and passive daylighting design. By combining with the numerical simulation methods, green energy-saving technologies are analyzed in this article to explore their energy-saving potential and rationality.

【Keywords】 Large Exhibition Buildings; Green Energy-saving Technologies; Numerical Simulation; Energy Consumption; Renewable Energy; HVAC Systems

作者(通讯作者)简介:刘冰韵(1991.10-),女,硕士,工程师,E-mail: 53lby@tjad.cn

收稿日期:2019-06-24

0 引言

近年来随着具有中国特色的城镇化快速推进,我国建筑行业迅猛发展,同时也带来日趋严重的能源短缺以及环境污染的问题。调查显示,西方发达国家全国总能耗的30~40%为建筑能耗^[1],我国建筑能耗也逐步升至总能耗的三分之一^[2]。建筑节能

已成为人与自然和谐共生的重要手段,绿色建筑应运而生。

现代化城市的发展,对公共建筑的功能类型、面积形式、用能需求也提出了更多更高的要求,大体量、高能耗强度公共建筑不断新增,导致公共建筑整体能耗总量持续增长,单位面积能耗强度也由

16.8kgce/m² 增长至 23.9kgce/m²[3]。其中，作为经济与人文相结合之典型的博览建筑也愈发引起重视。大型博览建筑，空间高大且结构复杂，巨大的体量致使建筑能耗与环境影响本就较高。此外，博览建筑公众参与度高，且多以展教功能为主。为确保展品的安全储存并保证展教质量，空调系统需长期运行，且展陈照明及建筑设备终端用能需求较多，进一步增加了建筑能耗。高能耗不仅造成资源浪费，也会带来相应的运营经济负担。如何运用绿色建筑的节能设计理念，推广绿色节能技术，最大限度的减少建筑能耗成为博览建筑首要关注的问题。

本文以某大型科技馆为例，根据其建筑设计特点，结合数值模拟方法，分析并探讨关键绿色技术的节能潜力及合理性。

1 项目概况

某大型科技馆（下文简称为科技馆）为新建博览建筑，选址于郑州市，自方案之初就以国内绿色建筑三星认证为目标，追求建筑设计与绿色技术的高度融合。该建筑地上共 4 层，地下 1 层，建筑高度约为 43.0m，总建筑面积约为 10.5 万 m²。建筑主要功能为展厅、影院、办公及停车配套，建筑效果图如图 1 所示。



图 1 建筑效果图

Fig.1 Architectural Rendering

2 关键绿色节能技术探析

针对大型博览建筑能耗高、用能需求大的显著特点，本文就与建筑能耗息息相关的方面，从

围护结构、可再生能源、暖通空调系统、自然采光的设计出发，结合数值模拟方法，分析并探讨绿色节能技术的运用。

2.1 围护结构节能设计

寒冷地区冬季气温较低、时间较长、室内外温差较大，建筑保温尤其重要。围护结构作为建筑内外空间的连接界面，其传热损失约占建筑总损失的 70%~80%^[4]，因此围护结构节能设计是实现建筑节能的重要手段。

为提高建筑通透性并美化立面造型，博览建筑通常采用玻璃幕墙设计元素。科技馆外立面采用金属幕墙与玻璃幕墙相结合的幕墙形式，各朝向玻璃幕墙与所在立面面积之比均在 0.4 以上；屋面采用金属保温屋面。整体围护结构节能设计优化如下：

(1) 外墙优化：外墙是整体围护结构的重要组成部分，因其所占面积较大，外墙传热损失约占整体围护结构的 25%^[4]。增加保温材料厚度，选用 150mm 岩棉板，可有效减少围护结构热损耗。

(2) 屋面优化：虽然屋面在整体围护结构中占比较小，传热损失比例约为 8%~10%^[4]，但对建筑顶层空间来说，屋面占比最大，对室内环境的影响也最为显著。屋面优化的原理与外墙优化一致，以提高热工性能来减少热传递，同样选用 150mm 岩棉板。

(3) 玻璃幕墙传热系数与遮阳系数优化：玻璃幕墙是建筑保温最薄弱部位，热损失比例约为 40%~50%^[4]。不同季节对于玻璃幕墙的性能要求不同，冬季要求提高保温性能且增加室内太阳得热，夏季室内则需尽量避免太阳辐射。降低玻璃幕墙传热系数可增强保温效果，但遮阳系数的选取需平衡冬季采光与夏季遮阳的需求。科技馆采用较低透光 Low-e 三玻双中空玻璃，可同时保温隔热。

为探讨科技馆围护结构设计的节能效果，采用建筑节能设计分析软件 PKPM，以 DOE-2 为计算核心，对比分析设计建筑与参照建筑的全年空调、采暖能耗，围护结构设计见表 1。

表 1 围护结构设计

Table 1 Building Envelope Design

部位	设计建筑			参照建筑		
	保温材料 /玻璃类型	传热系数 (W/(m ² ·K))	遮阳系 数	保温材料 /玻璃类型	传热系数 (W/(m ² ·K))	遮阳系数

部位	保温材料 /玻璃类型	传热系数 (W/(m ² ·K))	遮阳系 数	保温材料 /玻璃类型	传热系数 (W/(m ² ·K))	遮阳系 数
外墙	150mm 岩棉板	0.34	—	100mm 岩棉板	0.50	—

续表 1 围护结构设计

设计建筑				参照建筑		
部位	保温材料 /玻璃类型	传热系数 (W/(m ² ·K))	遮阳系 数	保温材料 /玻璃类型	传热系数 (W/(m ² ·K))	遮阳系 数
屋面	150mm 岩棉板	0.34	—	110mm 岩棉板	0.45	—
玻璃幕墙	6 较低透光 Low-e +12A+6 透明+12A+6 透明	1.80	0.38	6 中透光 Low-e +12A+6 透明	2.20	0.50

注: 参照建筑围护结构设计参数以满足《公共建筑节能设计标准》GB 50189-2015 规定的限值要求来设定。

经过能耗模拟分析计算, 得出设计建筑各围护结构部位优化后的全年能耗与节能率, 如表所示 2。由表 2 可知, 科技馆的外墙、屋面及玻璃幕墙在降低传热系数后, 全年采暖能耗均大幅下降, 而空调能耗小幅上升。玻璃幕墙遮阳系数降低后全年空

调降低的能耗远大于采暖增加的能耗, 即总能耗大幅降低, 达到了冬季采光与夏季遮阳的相互协调。经整体优化后, 科技馆围护结构的节能率达到 7.66%, 节能效果相当可观; 其中玻璃幕墙作为最薄弱部位, 对于围护结构节能意义重大。

表 2 各围护结构部位优化后全年能耗与节能率

Table 2 Annual Energy Consumption and Energy Efficient Rate of Optimized Building Envelope Parts

优化措施	全年空调能耗 (kWh)	全年采暖能耗 (kWh)	总能耗 (kWh)	节能率 (%)
参照建筑	1640147.60	1273893.78	2914041.38	—
仅外墙优化	1643328.40	1213698.93	2857027.33	1.96
仅屋面优化	1644524.80	1245843.91	2890368.71	0.81
仅玻璃幕墙传热系数优化	1673230.40	1172050.46	2845280.86	2.36
仅玻璃幕墙遮阳系数优化	1460737.60	1391788.38	2852525.98	2.11
围护结构整体优化-设计建筑	1532458.00	1158526.71	2690984.71	7.66

2.2 可再生能源综合利用

为满足日益增长的能源需求, 解决传统能源短缺的问题, 鼓励可再生能源在建筑供能系统中的综合应用已成为我国能源产业发展的重中之重。目前, 在建筑供能系统中, 应用较多且技术相对成熟的可再生能源主要为太阳能和地热能。

2.2.1 空调系统—地热能利用

郑州市地层属华北平原分区, 浅层地热能资源丰富。土壤温度基本稳定在 16~20℃ 之间, 土质松软以黏土、中砂为主, 且土壤含水层富水性较好, 有良好的换热效果, 对推广地埋管地源热泵有优势性。科技馆本身占地面积较大, 配备大型室外广场, 经计算有足够的埋地面积布置地埋管以满足空调及生活热水负荷需求。

作为博览建筑, 冬季科技馆内区同时也存在供冷需求以满足展品的安全储存和平衡人员、设备散热, 导致冷负荷比热负荷高出近一倍。由于冷热负荷相差较大, 若冷热源仅采用地源热泵系统, 夏季土壤排热远大于冬季土壤取热, 则会导致土壤温度

逐年上升, 机组制冷效率也会降低^[5]。考虑到单一采用地源热泵系统供能的不稳定性, 科技馆的集中空调系统选用复合供能系统, 由地埋管地源热泵系统提供 23% 的空调用冷量和 72% 的空调用热量, 其余冷热负荷由冷水机组和市政管网承担; 配套用房等独立房间, 采用变冷媒流量多联空调系统。结合科技馆空调系统需长期运行的特点, 复合供能系统还可通过间歇运行模式促进系统稳定运行: 当夜间室外温度较低时, 可关闭地埋管换热器, 开启冷却塔, 使得土壤温度、供回水温度得以有效恢复, 解决冬夏季向土壤排热量不均的问题^[6]。

地源热泵系统节能效果显著, 节能量约占空调系统能耗的 35%~50% 和建筑总能耗的 15%^[7]。在充分利用地热的前提下结合常规空调系统, 可最大限度的体现可再生能源的节能优势, 为科技馆带来极高的节能潜力。

2.2.2 热水系统—太阳能与地热能综合利用

科技馆作为大型博览建筑, 功能性较全且配套设施完善, 热水需求量较大, 包括商业餐饮、员工

淋浴等。根据用水点布置，主要设置两套集中热水系统，满足建筑南、北两区集中热水供应。为响应国家节能减排政策，以优先利用可再生能源供热作为热水系统的设计基础，尽可能减少传统能源的消耗。

随着绿色建筑的蓬勃发展，太阳能热水系统作为太阳能应用发展中最具经济性、技术最成熟的产品，在建筑设计中得到了广泛应用^[8]。郑州地区水平面年平均总太阳辐照量 4866.19MJ/m²·a，属 III 类太阳能资源较丰富区^[9]。科技馆优先考虑太阳能作为北区集中热水系统的热源，屋顶最大可利用面积为 320m²，设置平板式太阳能集热器，辅助热源采用燃气热水炉，太阳能保证率 50%，太阳能产热量占建筑生活热水总耗热量的比例约为 17.3%。

在此基础上，现有的地理管地源热泵系统可提供 55℃ 热水作为南区集中热水系统的热源，地源热泵热水系统产热量占整个建筑生活热水耗热量的比例约 56.6%。此外，由于地源热泵系统承担了部分生活热水负荷，在夏季回收了热泵机组向地下的冷凝排热，在冬季增加了地下取热，有利于改善土壤热失衡，促进系统稳定运行^[10]。

综上，通过太阳能与地热能的综合利用，可再生能源产热水总比例约 73.9%，产热量约 25×10⁶MJ/a，折合天然气的量为 78 万 m³/a，年节约费用约 270 万元/a，有效减少传统能源的消耗，且具有较高的经济性。

2.3 暖通空调系统节能优化

暖通空调系统的能耗一般占建筑总能耗的50~60%^[11]。博览建筑展陈区域的空调系统需长期运行能耗较高，节能的重心在于优化暖通空调系统。暖通空调系统能耗主要分为建筑物能耗和空调系统

能耗，为降低系统运行能耗，可从围护结构保温隔热、冷热源替代能源以及系统自身的节能优化着手^[12]。上文已分析了围护结构节能设计、地热能替代空调部分常规能源的绿色节能技术，本节主要侧重于探讨暖通空调系统自身的节能优化。

科技馆暖通空调系统的节能优化主要采用以下五项绿色节能技术：

- (1) 采用高效冷热源机组：提高冷热源机组能效比，有效节约制冷、供暖主机能耗。
- (2) 风机水泵变频控制：空调风系统、水系统均采用变频技术。
- (3) 采用排风热回收装置：展厅区域空调箱设置排风热回收装置，全热效率为 60%，利用排风预冷、预热新风，降低新风负荷，从而降低空调主机能耗。
- (4) 过渡季新风可调：全空气系统过渡季节实现全新风运行。
- (5) 冷却塔免费供冷：对于冬季存在供冷需求的区域，冷却塔利用室外低温空气进行免费供冷，降低主机能耗。

为探讨空调系统设计方案的节能效果，利用能耗分析软件 Trace700 结合 Revit 模型，建立计算分析模型，分析对比设计建筑与参照建筑的全年能耗。两者的围护结构设计参数、室内设计参数、照明\设备功率、人员密度、空调系统运行时间等均设定为一致，区别在暖通空调系统。设计建筑的暖通空调系统按实际设计设定，考虑各类节能措施；参照建筑的冷热源按常规形式设定，末端与设计建筑一致，但不考虑各类节能措施。设计建筑和参照建筑的空调冷热源及能效设置对比如表 3 所示，节能措施设置对比如表 4 所示。

表 3 空调冷热源及能效设置对比

Table 3 Comparison of Cold and Heat Sources and Energy Efficiency Index in HVAC systems

应用区域	空调冷热源	设计建筑	参照建筑
集中空调系统区域	空调冷源	3 台制冷量为 4315kW 的定频离心式冷水机组（能效比 COP: 6.15） 2 台制冷量为 2009kW（制热量为 2200kW）的定频螺杆式地源热泵机组（能效比 COP: 5.83）	3 台制冷量为 4315kW 的定频离心式冷水机组（能效比 COP: 5.8） 2 台制冷量为 2009kW（制热量为 2200kW）的定频螺杆式水冷冷水机组（能效比 COP: 5.5）
	空调热源	2 台制冷量为 2009kW（制热量为 2200kW）的定频螺杆式地源热泵机组（能效比 COP: 5.83）	市政管网
配套用房等	空调冷热源	市政管网 变冷媒流量多联空调系统（制冷综合性	变冷媒流量多联空调系统（制冷综合

独立房间	能系数 IPLV (C) : 5.6~6.5)	性能系数 IPLV (C) : 3.75~3.90)
------	-------------------------	----------------------------

表 4 节能措施设置对比

Table 4 Comparison of Energy-saving Technologies

	对比分类	设计建筑	参照建筑
冷热源 能效	风冷热泵机组 COP	提高 6%	限值
	螺杆式地源热泵机组 COP	提高 6%	限值
	变冷媒流量多联空调机组 IPLV	提高 49.3%以上	限值
	水泵、风机	变频	定频
	展厅区域排风热回收	有	无
	过渡季新风可调 (新风比 70%)	有	无
	冷却塔免费供冷	有	无

注: 表格中“提高 6%”、“提高 8%”、“限值”分别指与《公共建筑节能设计标准》GB 50189-2015 规定的限值相比提高 6%、8%和满足该标准。

经过能耗模拟分析计算, 得出设计建筑与参照建筑中暖通空调系统全年能耗与节能率, 如表 5 所示。由表 5 可知, 冷热源能耗在总能耗中的占比最高, 提高能效、采用排风热回收与冬季冷却塔免费供冷, 有效降低了冷热源能耗, 相比参照建筑, 节能率达 26.83%。水泵能耗占比虽不大, 但变频技术的应用, 使得节能率非常可观, 达 67.83%。风

机变频的节能效果也很明显, 节能率为 14.70%。通过以上绿色节能技术的综合利用, 设计建筑空调系统单位面积年能耗为 38.54kgce/m², 较参照建筑降低幅度为 25.72%, 节能效果相当显著, 对于大型博览建筑暖通空调系统的节能优化具有借鉴意义。

表 5 暖通空调系统全年能耗与节能率

Table 5 Annual Energy Consumption and Energy Efficient Rate of HVAC Systems

能耗种类	设计建筑		参照建筑		节能率 (%)
	年能耗 (tce)	单位面积年能耗 (kgce/m ²)	年能耗 (tce)	单位面积年能耗 (kgce/m ²)	
冷热源	2389.77	22.81	3266.03	31.17	26.83
水泵	122.94	1.17	382.17	3.65	67.83
风机	1524.84	14.55	1787.58	17.06	14.70
合计	4037.55	38.54	5435.79	51.88	25.72

注: (1) 冷热源能耗包括主机、冷却塔和市政热源能耗。(2) 空调系统能耗为电力, 将其均折算为标煤进行总能耗统计对比。(3) 市政热源能耗为热力, 将其折算为标煤进行总能耗统计对比。

2.4 被动优先的自然采光设计

照明能耗也是建筑能耗的重要组成部分, 约占总能耗的 10%~40%^[13]。相比办公等常规公共建筑, 博览建筑因存在展陈照明需求, 照明能耗不可小觑。对于有采光需求的房间, 优先考虑被动式自然采光设计, 充分合理利用太阳能以满足采光需求, 实现被动式节能。

科技馆采用大面积玻璃幕墙, 大部分有采光需求的房间沿外墙布置, 房间主要功能为办公、会议、管理等; 窗地面积比均达到 1/4 以上, 为室内自然采光创造了优越的条件。此外, 在建筑屋顶及侧面设置天窗, 将阳光引入中庭, 优化中庭采光效果的

同时, 也能在建筑内部形成独特的光影效果, 满足公众生理和心理需求。相对于地上空间来说, 地下空间对光线具有更大的需求。地下一层设下沉庭院, 使原本封闭的地下建筑具有敞开的空间, 有效改善了沿下沉庭院布置的地下房间的采光效果, 缓解了采光不足的弊端。

利用光环境模拟软件 PKPM-Daylight, 建立建筑模型, 探讨建筑被动设计的自然采光效果。建筑各层采光系数分布见图 2, 图中蓝色采光系数为 0 的区域为影院、展厅、机房、控制室等。由于影院展厅等大空间有特殊的放映、展陈照明要求, 机房、控制室等无采光要求, 故均不考虑自然采光设计。

经分析计算，地上 81.2% 的有采光需求的房间及建筑中庭的平均采光系数满足标准值要求，首层地下室 18.3% 的地下空间平均采光系数不小于 0.5%。

通过一系列建筑被动式设计，在最大限度利用自然采光的基础上，再对影院、展厅区域照明系统合理优化，如选用节能灯具、采用高效照明控制策略等主动式节能技术，可进一步减少照明能耗，实现建筑节能。

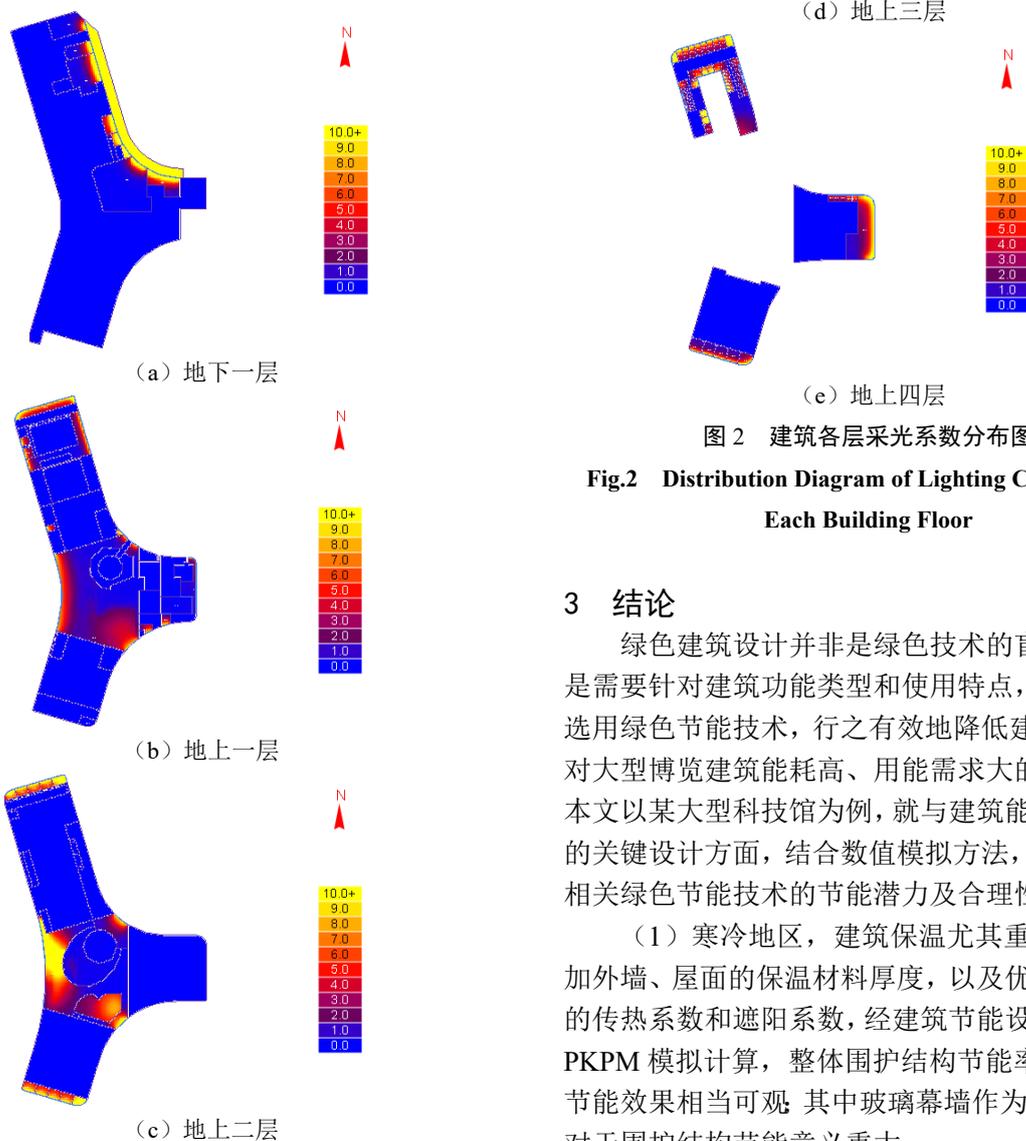


图 2 建筑各层采光系数分布图

Fig.2 Distribution Diagram of Lighting Coefficient in Each Building Floor

3 结论

绿色建筑并非绿色技术的盲目堆砌，而是需要针对建筑功能类型和使用特点，有针对性地选用绿色节能技术，行之有效地降低建筑能耗。针对大型博览建筑能耗高、用能需求大的显著特点，本文以某大型科技馆为例，就与建筑能耗息息相关的关键设计方面，结合数值模拟方法，分析并探讨相关绿色节能技术的节能潜力及合理性，结论如下：

(1) 寒冷地区，建筑保温尤其重要。通过增加外墙、屋面的保温材料厚度，以及优化玻璃幕墙的传热系数和遮阳系数，经建筑节能设计分析软件 PKPM 模拟计算，整体围护结构节能率达 7.66%，节能效果相当可观；其中玻璃幕墙作为最薄弱部位，对于围护结构节能意义重大。

(2) 博览建筑一般配有大型室外广场，且屋顶面积可利用，这为地热能 and 太阳能的综合利用提供了场地条件。空调设置复合供能系统，其中地埋管地源热泵系统提供 23% 的空调用冷量和 72% 的空调用热量；热水系统综合利用太阳能和地热能提供生活热水，可再生能源产热水比例为 73.9%。可

再生能源的综合利用可减少传统能源的消耗,合理的系统设计也能促进地埋管地源热泵系统的稳定运行。

(3) 博览建筑展陈区域的空调系统需长期运行能耗较高,节能的重心在于优化暖通空调系统。采用了高效冷热源机组、风机水泵变频控制、排风热回收、过渡季新风可调 and 冷却塔免费供冷这五项绿色节能技术,通过 TRACE 软件进行全年能耗模拟分析,节能率为 25.72%,节能效果显著。

(4) 博览建筑因存在展陈照明需求,照明能耗不可小觑。优先考虑被动式自然采光设计,充分利用太阳能以满足采光需求。通过光环境模拟软件 PKPM-Daylight 分析得到地上 81.2% 的有采光需求房间和中庭满足自然采光要求,首层地下室 18.3% 的地下空间平均采光系数不小于 0.5%,采光效果良好,可有效减少照明能耗。

大型博览建筑公众参与度高,合理运用绿色节能技术,有利于树立绿色建筑典型,推动建筑行业的可持续发展。在设计过程中采用绿色节能技术仅是基础工作,后续还需做好建筑的运行维护,制定合理的节能运行策略,以实现建筑全寿命期的节能。

参考文献:

- [1] 刘伊生. 建筑节能技术与政策[M]. 北京: 北京交通大学出版社,2015,(9):1-7.
- [2] 韩京彤. 围护结构节能方案对供暖能耗的影响及经济

分析[C].2018 供热工程建设与高效运行研讨会论文集,2018:250-254.

- [3] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2019[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2019: 9-15.
- [4] 余奉卓,曹双华,杨兵,等. 围护结构节能技术浅谈[J]. 上海节能,2018,(8):623-627.
- [5] 金宁,李春旺,李红扩. 土壤源热泵适用性分析[J]. 制冷与空调,2011,25(6):585-588.
- [6] 王颖. 地埋管地源热泵系统在上海地区的适用性探讨[J]. 住宅科技,2015,35(12):27-29.
- [7] 李晨玉,王健,王颖. 上海地区地源热泵系统应用现状与分析[J]. 住宅科技,2018,38(12):48-51.
- [8] 恽晔,刘焱. 公共建筑太阳能热水利用探讨[J]. 江苏建筑,2016,(179):93-96.
- [9] GB 50364-2018,民用建筑太阳能热水系统应用技术标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [10] 马宏权. 土壤源热泵系统的热平衡问题[C]. 中国制冷学会 2009 年学术年会论文集,2009:6.
- [11] 童宁. 浅析公共建筑暖通空调系统的降耗及能耗平衡途径[J]. 中国设备工程,2019,(1):109-111.
- [12] 赵青玲,陈灵阁,户澳文. 暖通空调系统现行节能技术问题的探讨及分析[J]. 能源研究与利用,2019,(2):46-49.
- [13] 李怀,徐伟,于震,等. 某超低能耗办公建筑照明能耗分析[J]. 建筑科学,2017,33(12):51-56.

(上接第 480 页)

(2) 监测了四个典型天气条件下太阳能热辅助溴化锂吸收式制冷机组空调系统的运行数据,当太阳总辐照量为 20.37MJ/m² 时,集热器集热效率最大,为 81.50%;当太阳总辐照量为 15.51MJ/m² 时,溴化锂制冷机组制冷效率最大,为 80.49%。

(3) 提出了太阳能贡献率、节煤量、CO₂ 减排量的计算方法,可对系统的经济性和节能环保性进行分析评价。

参考文献:

- [1] 李培涛. 太阳能溴化锂吸收式制冷系统性能研究[D]. 内蒙古:内蒙古工业大学,2018.
- [2] 赵耀,葛天舒,代彦军. 基于太阳能驱动连续除湿换热器空调系统的实验研究[J]. 工程热物理学报,2014,35(2):223-227.
- [3] 雷达. 太阳能空调制冷技术的应用研究[J]. 环境科学,2017,(11):98.
- [4] 胡国华,贺立三,赵柳洁,等. 太阳能热驱动在吸收式制冷技术中的应用[J]. 中国科技信息,2015,(11):98-100.
- [5] 陈杰,毕月红,刘肖,等. 太阳能吸收式制冷技术发展及展望[J]. 制冷与空调,2015,15(6):59-68.
- [6] 王如竹. 太阳能制冷[M]. 北京:化学工业出版社,2006.

-
- [7] 冯春红,钟文乐,丁飞.空气源热泵+太阳能热水系统效益分析[J].泰州职业技术学院学报,2018,18(5): 42-45. 北京:国家能源局,2013.
- [8] NB/T 32018-2013,户用太阳能采暖系统技术条件[S].