

青岛地铁13号线节能型能源管理系统的 节能评估与分析

李 寅

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 430056, 武汉)

摘 要 [目的] 青岛地铁13号线建设方对于运营过程中的节能具有较高的要求, 建设过程中为了贯彻轨道交通节能、环保、智能的理念以及实际需求, 需要从地铁机电系统中寻找可以通过控制系统实现节能的切入点。[方法] 通风空调是地铁的能耗大户, 也是目前节能关注的重点, 为此, 中交第二公路勘察设计研究院有限公司针对其特点创新设置了节能型能源管理系统并成功上线运行。该系统首次打通了能源管理与环控系统风水联动节能控制之间的信息传输通道, 使原本独立的两个系统可以协同运行。通过对能耗的分析、调控、管理, 利用节能型能源管理系统模型与控制策略实现环控系统内风系统和水系统的联动控制, 从技术上实现节能的目的。[结果及结论] 在节能模式与非节能模式交替运行相同时间的情况下, 对各测试车站的空调水系统和风系统能耗进行测试、记录和对比, 计算得到节能型能源管理系统的节能率, 以此判断节能效果完全能满足系统设计时的最低节能要求。类比设定时间段内两种运行模式下站内环境变化, 确定节能型能源管理系统的运行能够保证站内环境在节能的前提下能处于稳定舒适的状态。

关键词 地铁; 通风空调; 节能型; 能源管理系统; 能耗; 节能率; 风水联动

中图分类号 TK01+8: U231.5

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.09.032

Evaluation and Analysis of Energy-saving Type Energy Management System for Qingdao Metro Line 13

LI Yin

(CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., 430056, Wuhan, China)

Abstract [Objective] The constructor of Qingdao Metro Line 13 has a higher requirement for energy saving during operation. In the process of construction, in order to implement the concept of energy saving, environmental protection, and intelligence in rail transit and meet the actual demand, it is necessary to seek entry points for energy saving through the control system in metro electromechanical system. [Method] Ventilation and air conditioning, as the key energy consumers of met-

ro, are the focus of the present energy saving. Therefore, in consideration of their characteristics, CCCC Second Highway Consultants Co. Ltd. creatively sets up an energy-saving energy management system and successfully launches it for online operation. The system for the first time opens up the information transmission channel between energy management and air-water linkage energy-saving control of environmental control system, coordinating the two independent systems. With analysis, regulation and management of energy consumption, the linkage control of air and water systems within the environmental control system is realized by using the energy-saving energy management system model and control strategy, technically achieving the goal of energy saving. [Result & Conclusion] When the energy-saving mode and the non-energy-saving mode run alternately for the same period, the energy consumption of the air conditioning water and air systems at each testing station is tested, recorded and compared, and the energy-saving rate of the above management system is calculated. Based on the results, it is concluded that the energy-saving effect can fully meet the minimum energy-saving requirements during system design. By comparing the changes in the station internal environment under the two operating modes during the set time period, it is determined that the operation of the energy-saving energy management system can ensure stable and comfortable internal environment of the station under the premise of energy saving.

Key words metro; ventilation and air conditioning; energy-saving type; energy management system; energy consumption; energy-saving rate; air and water linkage

地铁作为大城市公共交通的首选, 较之普通道路交通有明显优势, 同时也具有能耗大的劣势。在其运营过程中, 通风空调系统的用电量占总用电量的40%~50%, 故实现通风空调系统节能运行的意义重大^[1]。因此, 在提高能源利用率、降低污染、科学管理、优化运营等方面有进一步发展空间。中交第二公路勘察设计研究院有限公司通过对青岛地

铁 13 号线节能依据、控制方法和节能措施进行分析和研究,建立了可行的能源管理标准体系、节能评价方法和系统评估方式,推出和设置了“节能型能源管理系统”,可为建设绿色轨道交通提供参考。

1 青岛地铁 13 号线节能型能源管理系统介绍

1.1 线路概况

青岛地铁 13 号线全长 69.9 km,设车站 23 座(地下 9 座、高架 14 座)、车辆段 1 座、停车场 2 座、控制中心 1 座,最高运营速度为 120 km/h,已于 2018 年底投入运营。

1.2 节能型能源管理系统说明

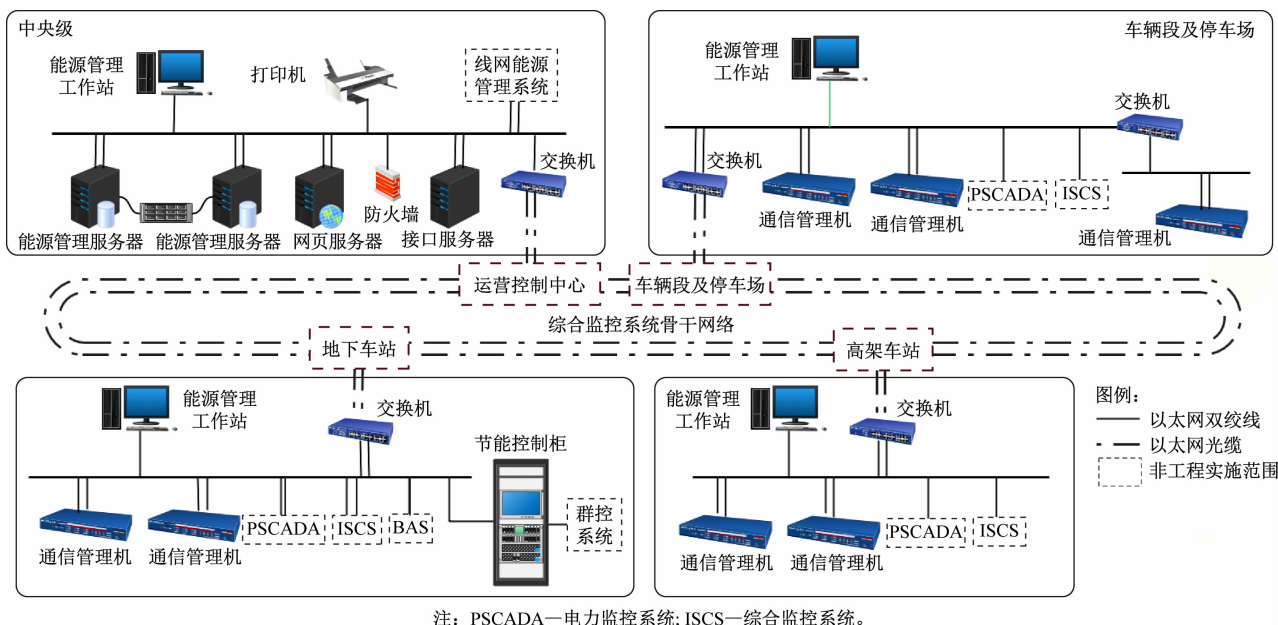
1) 能耗管理:采集现场智能电表、水表、水温传感器、压力传感器等数据,通过计量与监测,实现对车站、停车场及车辆段能耗数据分户、分类、分项统计分析。利用同比、环比、指标定额及站间比较等

评价体系,直观展示被管理设备的能耗数据、趋势等信息,运营人员可依据分析数据,采取管理手段实现节能。

2) 节能控制:通过与 BAS(环境与设备监控系统)之间的接口,接入空调、风机、风阀、两通阀、传感器及空调水系统设备,利用内嵌的数据模型及相关节能策略实现车站公共区通风系统(简称“风系统”)与车站空调水系统(简称“水系统”)的联动控制,从技术上实现节能的目的。正常运行时,保留 BAS 监视功能,由设置在地下车站的节能控制设备管理环控设备,发生火灾时,权限自动切换给 BAS,以保证火灾模式下能正常下发执行相关指令^[2]。

1.3 节能型能源管理系统架构

图 1 为网络构架图,分为中央级、车站级、现场级三层结构,现场级负责能耗计量及环境参数检测,车站级负责数据采集及节能控制,中央级实现能源监管。



注: PSCADA—电力监控系统; ISCS—综合监控系统。

图 1 节能型能源管理系统网络架构

Fig. 1 Architecture of the energy-saving type energy management system network

1.4 节能型能源管理系统调节方案

风水联动控制的调节对象为车站风系统与水系统。通过建立基于室内负荷预测的能效最优的风水联动控制模型,根据风系统与水系统的运行效率来决定变风量和变水量。青岛地铁 13 号线采用以水系统为场景设计进行调节,以变风量为辅方式的调节方案。在风水联动控制策略中针对风系统与水系统分别采用相关的节能策略来配合风水

联动的实现,从而达到最大化节能的目的^[3]。图 2 为“风水联动”控制工艺图。

1) 站内新风量调节策略:通过调节风阀开度、风机频率值来实现对车站 CO_2 浓度值及新风量调节,以满足乘车环境舒适性。根据实时检测数值进行动态的调节,保证车站的空气质量及舒适性。图 3 为风阀开度调节策略工艺图。

2) 车站模式选择策略:该控制策略依原有暖通

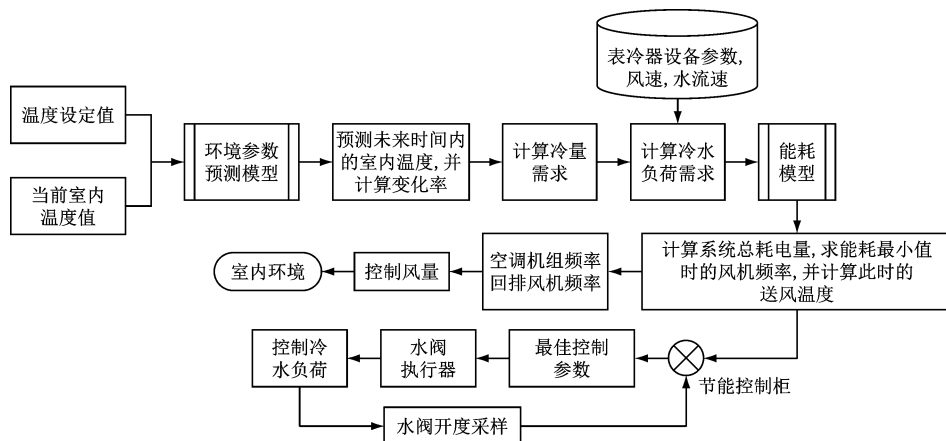


图2 “风水联动”控制工艺图

Fig. 2 Air-water linkage control process diagram

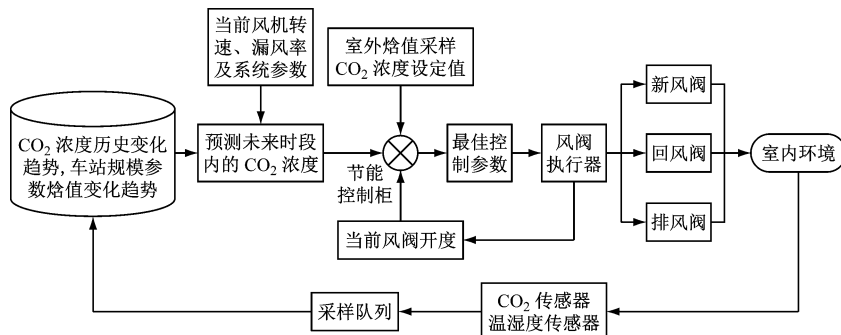


图3 风阀开度调节策略工艺图

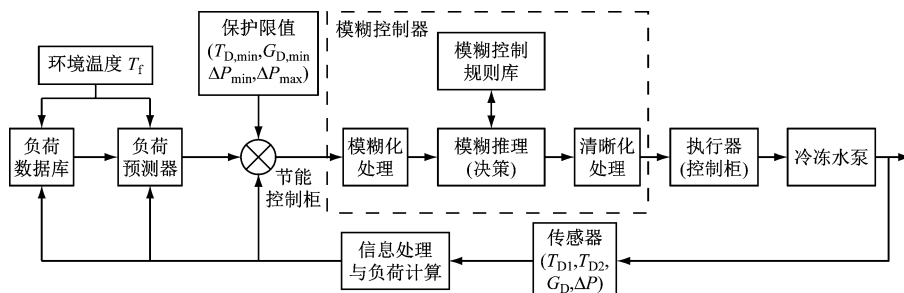
Fig. 3 Air valve opening adjustment strategy process diagram

工艺设计,结合现场通风情况进行优化,通过计算站内、外及送风的焓值比较,来确定暖通运营模式。

① 当室外焓值小于室内时,利用室外空气内能低的特点来实现室内的降温;② 当室外焓值大于室内时,利用空调系统内循环实现冷量的重复利用,以减少浪费;③ 当加入湿度保护功能时,启用小新风与内循环模式,使用表冷器实现车站除湿;④ 当空气质量较优,且相应的焓值与温度均达到设定值时,启动只送不排模式,使用室外空气优化站内空

气质量。

3) 基于负荷预测的冷冻水控制策略(见图4):在冷冻水总管回路上设置温度与流量传感器,实时测算冷冻水实际需求。由于空调冷媒循环过程中的损耗,实时采集的供、回水温度值不能直接反映当时冷媒水传递的热量,故传统温差变频控制难以保证跟踪控制的有效性和稳定性。故此,运用基于历史数据序列的预测算法模型,通过统计法计算未来时刻的输出负荷,根据负荷变化的趋势与车站



注: $T_{D, \min}$ —供水温度最小值; $G_{D, \min}$ —回水流量最小值; ΔP_{\min} —供回水压差最小值; ΔP_{\max} —供回水压差最大值; T_{D1} —供水温度; T_{D2} —回水温度; G_D —回水流量; ΔP —供回水压差。

图4 基于负荷预测的冷冻水调节策略

Fig. 4 Chilled water pump adjustment policy based on load prediction

内冷负荷需求情况,推测出未来时刻的冷量需求,从而预测需求量来动态调节冷冻水泵的运行频率及运行泵组台数,以达到精准控制冷冻水的回水温度。

4) 基于制冷机组效率负荷特性的群控技术:根据空调负荷及制冷机组的效率负荷特性来确定机组运行的台数组合,并动态分配各台机组的负荷,使每台机组都在高性能系数的负荷区域内运行^[4]。通过空调机组效率与负荷的动态匹配,达到机组群运行的整体最佳效率,以实现最低总能耗。

2 节能型能源管理系统评估分析

2.1 评估方案

应用能否达到节能预期,需满足建设工程招标的要求:“车站通风空调系统的年综合节能率不低于 30% (对比传统运行模式)”,并经过相应的测试来验证。目前,节能效果测试主要采用能耗比较法,即在空调负荷基本相同的条件下,将空调系统采用非节能模式和节能模式交替运行相同的时间,分别对其能耗进行测试、记录和对比,通过计算得到系统的节能率作为评估结果^[5]。

对地下车站的风水联动控制效果评估,所有数据均以现场能耗测量表计与传感器检测值为基础进行统计分析。通过对数据进行处理得到最终节能模式与非节能模式下各类设备及总的能耗数据,从而计算出最终的节能率数值。节能率 = (平均每小时非节能能耗 - 平均每小时节能能耗)/平均每小时非节能能耗。

2.2 数据测试过程

数据测试选择节能模式运行较好的两个车站,选取空调季中最重要的一个时段约 90 d,以此时段内自动生成的抄表记录作为原始数据进行分析研究。

为了科学地对比节能模式与非节能模式下暖通设备的能耗情况,首先需要删除一种模式连续运行不足 20 h 的数据,再对处理后的数据进行分析,梳理出对象车站的节能型能源系统能耗统计表。

2.3 各站测试结果

2.3.1 青岛地铁 13 号线学院路站

学院路站节能报表见表 1,为 2019-07-16 至 2019-09-16 时段内,删除一种模式下连续运行不足 20 h 的节能型能源管理系统能耗统计表^[6]。

表 1 学院路站节能报表

Tab.1 Energy saving report of Xueyuan Road Station

项目		非节能模式		节能模式		节能率/%
		总能耗/kW	小时平均能耗/(kWh)	总能耗/kW	小时平均能耗/(kWh)	
水系统	冷水机组	35 325	59.22	15 376	39.15	33.89
	冷冻水泵	6 482	10.87	1 547	3.94	63.75
	小计	41 807	70.09	16 923	43.09	38.52
风系统	新风机	434	0.73	28	0.07	90.20
	柜式空调器	4 502	7.55	2 154	5.48	27.34
	小回排风机	8 888	14.90	4 100	10.44	29.94
	组合式空调	22 721	38.09	4 496	11.45	69.95
	大回排风机	7 539	12.64	2 462	6.27	50.40
	小计	44 084	73.90	13 240	33.71	54.39
合计		85 891	143.99	30 163	76.80	46.67

注:非节能模式下总开启耗时为 596.5 h;节能模式下总开启耗时为 392.8 h。

非节能模式下,该站水系统设备小时平均能耗 70.09 kWh,风系统设备小时平均能耗 73.90 kWh。开启节能模式时,水系统设备小时平均能耗 43.09 kWh,节能率为 38.52%;风系统设备小时平均能耗 33.71 kWh,节能率为 54.39%;风、水系统合计节能率为 46.67%,满足设计要求。

2.3.2 青岛地铁 13 号线朝阳山站

朝阳山站节能报表见表 2,为 2019-07-16 至 2019-09-16 时段内,删除一种模式下连续运行不足 20 h 的节能型能源管理系统能耗统计表。

非节能模式下,水系统设备小时平均能耗 108.35 kWh,风系统设备小时平均能耗 75.43

表2 朝阳山站节能报表

Tab.2 Energy saving report of Chaoyang Station

项目		非节能模式		节能模式		节能率/%
		总能耗/kW	小时平均能耗/(kWh)	总能耗/kW	小时平均能耗/(kWh)	
水系统	冷水机组	82 119	97.60	31 339	53.21	45.49
	冷冻水泵	9 045	10.75	2 739	4.65	56.74
	小计	91 164	108.35	34 078	57.86	46.60
风系统	新风机	165	0.20			100.00
	柜式空调器	17 461	20.75	11 311	19.20	7.47
	小回排风机	25 144	29.88	17 120	29.07	2.74
	组合式空调	15 077	17.92	3 248	5.51	69.23
	大回排风机	5 616	6.67	1 658	2.81	57.83
	小计	63 463	75.43	33 337	56.60	24.96
合计		154 627	183.78	67 415	114.46	37.72

注:非节能模式下总开启耗时为 596.5 h;节能模式下总开启耗时为 392.8 h。

kWh。开启节能模式时,水系统设备小时平均消耗 57.86 kWh,节能率为 46.60%;风系统设备小时平均消耗 56.60 kWh,节能率为 24.96%;风、水系统合计节能率为 37.72%,满足设计要求。

2.4 节能型能源管理系统技术性能分析

为了保证节能效果的真实性,测试时需满足以下前提条件:

1) 测量仪表的一致性,即两种模式交替运行时,测量各设备能耗的智能电表应一致。

2) 运行的冷源设备(冷水机组、冷冻水泵)的一致性。

3) 开机、停机时间的一致性,每天的测试过程应覆盖空调系统正常运行的全部时间。

4) 负荷情况应基本一致,即室外气候条件应基本相同。

5) 室内环境在满足通风设计要求时,其环境状况应基本一致。

在设置两种模式运行时间均为 6×24 h 的情况下,选学院路站模式运行时间段内的数据进行分析,结果显示以上 5 种前提条件均能满足。

3 节能型能源管理系统效益分析

3.1 综合节能效果评估

通过分析各站测试结果,结合前期设计情况,评估得出各站空调季节能率、节能量,各站节能效果统计表见表 3。

表3 各站节能效果统计表

Tab.3 Energy saving results of each station

车站名	空调季天数/d	设计节能率/%	实际总能耗/(kWh)	实际日均能耗/(kWh)	节能率/%	节能量/(kWh)
灵山卫站	90	30	449 280	4 992	30.03	134 918.7
学院路站	90	30	311 018	3 456	46.07	143 285.9
朝阳山站	90	30	396 966	4 410	37.72	149 735.6
两河路站	90	30	363 226	4 036	35.85	130 216.5

3.2 对环境参数影响评估

3.2.1 相邻两天节能模式下与非节能模式下站内环境分析

以学院路站 2019-08-19、2019-08-20 相邻两天数据为例,通过对比分析来评估对环境参数的影响,其中 8 月 19 日为非节能模式下,8 月 20 日为节能模式下,且这两天室外天气情况相似。

1) 室外环境参数:图 5 为两日室外温湿度对比图,可见两日外界温湿度条件类似。

2) 公共区湿度变化:图 6 为学院路站相邻两天节能模式下与非节能模式下公共区平均湿度,在相邻两天同一个时间,即 10:00 至 22:00,非节能模式下公共区湿度略高于节能模式下;22:00 至次日 07:00,节能模式下平均湿度高于非节能模式下。说

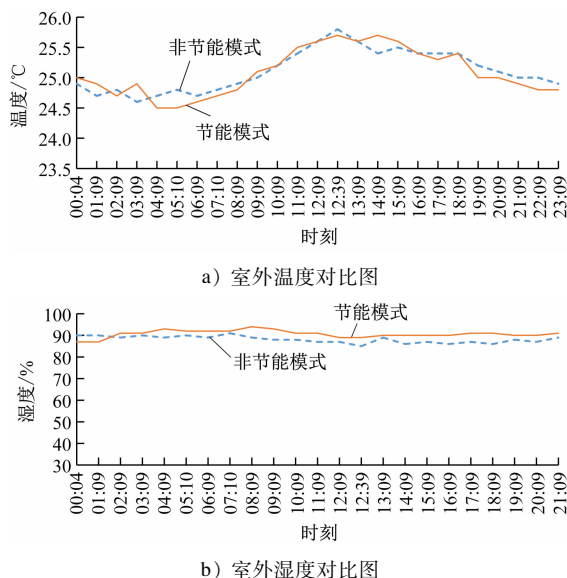


图5 两日室外温、湿度对比图

Fig. 5 Comparison of outdoor temperature and humidity within 2 days

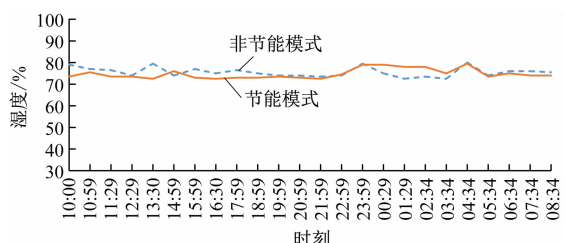


图6 学院路站相邻两天节能与非节能模式下公共区平均湿度

Fig. 6 Average humidity in the public area of Xueyuan Road Station under energy-saving and non-energy-saving modes within two consecutive days

明在列车运营时间段内能有效地对站内湿度进行控制。

3) 公共区温度变化:图7为学院路站相邻两天节能模式下与非节能模式下公共区平均温度,相对于非节能模式下,节能模式下05:00至24:00公共区温度略高,但最高仅 23.8°C (当天设定温度为 23.0°C),并未造成站内环境不适。因通风设计一般按远期考虑,而近期客流较小,沿海环境空调季站内普遍湿度较大,为满足除湿需求,暖通系统经常需要满负荷运行,因此公共区实测温度低于规范要求。

3.2.2 相邻两周节能与非节能模式下站内环境分析

1) 室外环境参数:图8为朝阳山站相邻两周节能与非节能模式下室外环境参数,该站2019-08-13

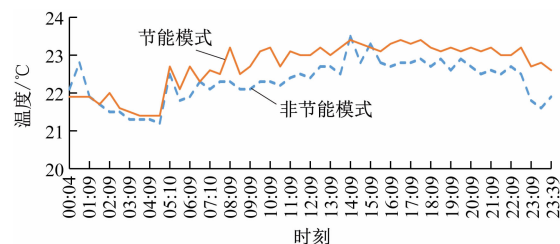


图7 学院路站相邻两天节能与非节能模式下公共区平均温度

Fig. 7 Average temperature in the public area of Xueyuan Road Station under energy-saving and non-energy-saving modes within two consecutive days

至2019-08-20站内按非节能模式运行,2019-08-20至2019-08-27站内按节能模式运行。两周时间内不同模式下,室外温度变化不大,湿度波动较大。非节能模式下室外平均温度为 26.9°C ,平均相对湿度为69%,最大湿度为93%;节能模式下室外平均温度为 27.3°C ,平均相对湿度为68%,最大湿度为89%。

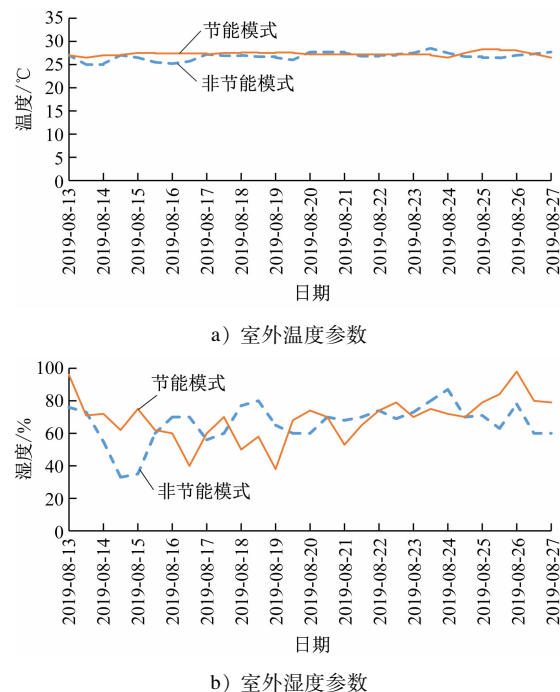


图8 朝阳山站相邻两周节能与非节能模式下室外环境参数

Fig. 8 Chaoyangshan Station outdoor environmental parameters under energy-saving and non-energy-saving modes within two consecutive weeks

2) 公共区温度变化:图9为朝阳山站相邻两周节能与非节能模式下公共区温度参数变化,两种模式下公共区温度都在舒适范围内,节能模式下公共区温度略高,在 27°C 以下,且参数波动较小,维持在

设定值旁(设定值为 26°C),站内环境依然舒适。

3) 公共区湿度变化:图10为朝阳山站相邻两周节能与非节能模式下公共区湿度参数变化,节能与非节能模式下变化不大,湿度主要受天气影响,暖通系统对站内湿度调控能力有限,在节能模式下,相关湿度均在可控范围内,未出现结露情况。

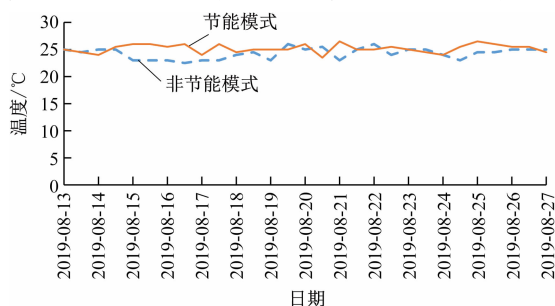


图9 朝阳山站相邻两周节能与非节能状态下公共区温度参数变化

Fig. 9 Temperature parameter change in the public area of Chaoyangshan Station under energy-saving and non-energy-saving modes within two consecutive weeks

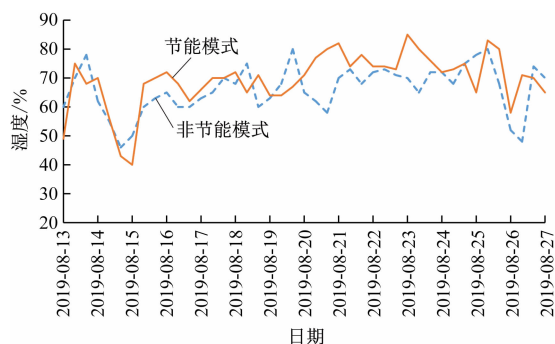


图10 朝阳山站相邻两周节能与非节能模式下公共区湿度参数变化

Fig. 10 Humidity parameter change in the public area of Chaoyangshan Station under energy-saving and non-energy-saving modes within two consecutive weeks

4 结语

通过一系列的分析评估,可得以下结论:

1) 节能模式下运行稳定的测试车站,其计算节能率均超过30%,实际节能效果满足设计需求。

2) 分析两种模式下运营情况可知,节能模式开启后站内的温度和湿度未产生较大变化,故节能型能源管理系统能有效地调节站内温湿度,使环境状态稳定舒适。

3) 节能型能源管理系统运行之初,单个车站一个空调季节能量接近15万kWh,节能效果明显、经济效益显著。随着逐步稳定及参数的自我优化,节

能效果与投入产出比将会更加明显。

4) 通过改变暖通系统控制及运营模式,利用相匹配的运营与维护方式可提高其运行效率。

参考文献

- [1] 唐敏. 基于负荷预测的地铁通风空调系统节能优化方案[J]. 都市快轨交通, 2008, 21(4): 74.
TANG Min. Energy-saving scheme based on the prediction of air-conditioning and ventilation load in metro[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2008, 21(4): 74.
- [2] 张洪涛. 地铁环境控制系统与节能控制系统的集成方式[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(9): 85.
ZHANG Hongtao. Integration mode of metro environment control system and energy saving system[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(9): 85.
- [3] 李志俊. 南昌地铁2号线综合节能控制系统的接入方案[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(增刊2): 70.
LI Zhijun. Access scheme of comprehensive energy-saving control system for Nanchang Metro Line 2[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(S2): 70.
- [4] 赵建伟. 某地铁车站空调水系统节能控制系统设计及节能测试数据分析[J]. 暖通空调, 2017, 47(5): 9.
ZHAO Jianwei. Energy saving control system design and test data analysis of air conditioning water system in an underground railway station[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2017, 47(5): 9.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中央空调水系统节能控制装置技术规范: GB/T 26759—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. The technical specification for energy-saving control device for water system of central air-conditioning: GB/T 26759—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [6] 青岛地铁集团有限公司运营分公司. 青岛地铁13号线工程能源管理系统节能系统能耗统计报表(2019.7~2019.9)[R]. 青岛: 青岛地铁集团有限公司运营分公司, 2019.
Operation Branch of Qingdao Metro Group Co., Ltd. Energy management system's energy consumption statistical report of energy consumption system of Qingdao Metro Line 13 Project[R]. Qingdao: Operation Branch of Qingdao Metro Group Co., Ltd., 2019.

· 收稿日期:2022-05-17 修回日期:2022-12-21 出版日期:2024-09-10

Received:2022-05-17 Revised:2022-12-21 Published:2024-09-10

· 通信作者:李寅,高级工程师,116551231@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license