

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.03.007

地铁站环控系统控制方案的 节能对比研究

张云霞¹, 苏子怡², 李晓锋²

(1. 中国铁路通信信号上海工程局集团有限公司, 天津 300380;

2. 清华大学 建筑学院, 北京 100084)

摘要: 为明确常见的地铁车站环控系统控制方案的用能表现和节能潜力, 为地铁车站节能降碳提供参考和指导, 以北京、上海和广州分别作为寒冷、夏热冬冷和夏热冬暖地区的代表性城市, 在 TRNSYS 软件中搭建屏蔽门地铁站模型, 探究增设自控系统和优化时刻表控制这 2 种优化方案相比于当前常规的時刻表控制方案在站内环境控制、节能潜力、改造成本方面的表现。结果显示, 采用 2 种优化方案均可有效提高站内空调控制温度, 实现类似的站内温度控制效果。用能方面, 相比于当前的時刻表控制方案, 增设自控系统可为各气候区地铁站环控系统降低 41%~49% 的年能耗, 优化時刻表控制方案可降低 38%~48% 的年能耗。改造成本方面, 优化時刻表控制方案仅需要提高管理水平, 无需增加设备和系统, 而增设自控系统方案的设备成本和后期运维管理成本较高。因此, 综合考虑站内环境控制效果、能耗情况和改造成本, 建议地铁站采用优化時刻表控制方案进行节能运行优化, 以实现节能目标。

关键词: 地铁站; 环控系统; 自控; 時刻表控制; 节能

中图分类号: U231.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)03-0057-07

Comparative Study of Energy-Saving Optimization Control Strategies of Ventilation and Air-Conditioning Systems for Subway Stations

ZHANG Yunxia¹, SU Ziyi², LI Xiaofeng²

(1. China Railway Signal and Communication Shanghai Engineering Bureau Group Ltd., Tianjin 300380;

2. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: To advance the energy conservation of subway stations, this study focused on the optimization of control strategies for ventilation and air-conditioning (VAC) systems. In this study, Beijing, Shanghai, and Guangzhou were selected as representative cities for the cold, hot-summer cold-winter, and hot-summer warm-winter regions, respectively. In addition, a model of a subway station with a platform screen door system was established using a transient system simulation program (TRNSYS). The performances of automation and optimized timetable control were compared in terms of station environment, energy performance, and renovation costs. The results show that both automation and optimized timetable control can effectively improve the station air temperature during the cooling season, thereby achieving a similar station environment. Automatic control can reduce the annual energy consumption of the VAC system by 41%–49% compared with the current conventional timetable control, whereas optimized timetable control can decrease the annual energy use by 38%–48%. For renovation costs, optimized timetable control

收稿日期: 2023-05-26 修回日期: 2024-02-04

第一作者: 张云霞, 女, 本科, 工程师, 从事设备安装与施工, 55240614@qq.com

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题(2018YFC0705006)

引用格式: 张云霞, 苏子怡, 李晓锋. 地铁站环控系统控制方案的节能对比研究[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(3): 57–63.

ZHANG Yunxia, SU Ziyi, LI Xiaofeng. Comparative study of energy-saving optimization control strategies of ventilation and air-conditioning systems for subway stations[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(3): 57–63.

merely requires improvement in management without supplementing devices, whereas automatic control requires higher equipment and maintenance costs. Therefore, we recommend the adoption of optimized timetable control for subway stations to achieve energy savings.

Keywords: subway stations; ventilation and air-conditioning systems; automation control; timetable control; energy savings

1 研究背景

截至 2022 年底,中国大陆地区共有 41 座城市开通地铁,运营线路总长度 8 008.17 km,占城轨交通线路总长的 77.84%,另有 5 050.07 km 在建地铁线路^[1]。随着地铁投运和新建线路的增加,地铁站能耗持续增加。在车站用能中,环控系统能耗占比为 54%~71%^[2],是第一大用能系统。

在地铁站环控系统节能领域,已有大量研究探讨了各类节能措施及其效果,包括系统制式选择^[3]、机械新风控制^[4-5]、站内温度控制^[6]、设备能效优化^[7-8]等。环控系统控制方面,YANG 等以我国南方某地铁站夏季典型日为例,采用理论计算和模拟的方法研究了冷冻水泵和风机变频优化的节能效果,指出其可实现 59.5%~73.4%的节能量^[7];KIM 等以韩国首尔地铁 3 号线某车站为例,研究了风机变频的节能表现,通过理论分析得出对于室外一般污染工况,风机变频运行的节能潜力可达 21%,对于室外严重污染工况可达 39%^[9]。相关研究均以典型车站为对象,作为节能的比较基准,但以其评估节能效果缺乏普遍性和可推广性。

为此,本文以北京、上海、广州三座城市各地铁车站的环控系统平均能耗为比较基准,探讨了节能优化的系统控制方案,从站内环境控制效果、能耗情况和改造成本方面对比了增设自控系统方案和优化时刻表控制方案的节能效果。

2 研究方法

2.1 研究对象

本文以北京、上海和广州分别作为寒冷、夏热冬冷和夏热冬暖地区的代表性城市,以屏蔽门地铁站为对象,探究了增设自控系统和优化时刻表控制这两种环控系统控制方案相比于当前常规的时刻表控制方案在站内环境控制和节能潜力实现方面的表现。对于其他气候区其他城市的地铁车站,采用本研究提出的方法,通过预先模拟即可方便、快速地获得用能水平及运行方案。

2.2 比较基准

为提供更加可靠、具有普遍意义的节能效果评估,

需要以地铁车站常规运行模式和运行管理水平作为比较基准。苏子怡等开展了广泛调研,了解了当前各气候区地铁车站运行管理现状,进而通过能耗模拟得到当前地铁车站环控系统能耗分布情况,并将模拟结果与实际结果进行对比,验证发现模拟结果能够反映实际情况^[10]。对于北京、上海、广州的地下岛式非换乘屏蔽门地铁车站,环控系统年能耗平均值分别为 53.6 万、68.0 万和 109.1 万 kWh/a。本文以上述各地能耗平均值对应的运行工况作为后续环控系统优化控制方案节能效果评估的比较基准,能够反映各城市地铁站的平均节能效果。

2.3 两种环控系统优化控制方案

本文探究了两种地铁站环控系统的优化控制方案:一是基于负荷预测的优化时刻表控制方案;二是增设自控系统方案。

目前,地铁站环控系统广泛采用时刻表控制方案,即全年划分为不同的几个时段,车站每个时段在预设的模式下运行,以北京某线路地铁站为例,当前时刻表控制方案见表 1。常规时刻表控制方案具有简单、易操作的优势,无需针对具体情况频繁调节,便于运维管理。但由于模式固定,无法按照车站实际情况进行动态调节,可能导致站内温度控制不稳定、能耗偏高等现象。本文拟采用时刻表控制方案实现适宜的站内环境和节能潜力,为此需根据各车站的气候条件、客流量、发车对数等实际情况,对未来一段时间的环控系统负荷进行预测,从而得到各时刻地铁车站环控系统的运行模式和各设备的运行状态。为了降低车站的控制复杂程度,将空调季、通风季、冬季分别设置为单一运行模式,各城市控制方案见表 2,后文将上述系统控制方案称作优化的时刻表方案。

除常规时刻表控制方案外,也有地铁站环控系统采用自控方案,即根据车站实际负荷、环境等情况进行动态判断和模式切换,其具有可调节性好、节能的优势,但逐站安装自控系统的改造成本和后期维护成本较高。本文探究通过在车站中增设自控系统的方案实现适宜的站内环境和节能潜力,自控方案见表 3。

表 1 当前时刻表控制方案

Table 1 Current timetable control scheme

运行模式	运行时段	冷水机组	公共区通风系统	设备管理用房通风系统
冬季通风模式	11月15日—次年3月15日	关闭	6:00—23:00 组合式空调机组、回排风机小新风运行	6:00—23:00 房间风机、新风机组运行
过渡季通风模式	3月16日—5月31日、10月11日—11月14日	关闭	6:00—23:00 组合式空调机组、回排风机小新风运行	房间风机、新风机组全日运行(可开启备用多联机)
夏季空调模式1	6月1日—6月30日、9月16日—10月10日	8:00—20:00 水冷式冷水机组运行	6:00—23:00 组合式空调机组、回排风机小新风运行	房间风机、新风机组全日运行(可开启备用多联机)
夏季空调模式2	7月1日—9月15日	7:00—22:00 水冷式冷水机组运行	6:00—23:00 组合式空调机组、回排风机小新风运行	房间风机、新风机组全日运行(可开启备用多联机)

表 2 优化时刻表控制方案

Table 2 Modified timetable control scheme

城市	运行模式	运行时段	冷水机组	公共区通风系统	设备管理用房通风系统
北京	空调模式	6月20日—9月10日	冷水机组全日运行(出水温度设定值为14℃)	8:00—21:00 组合式空调机组、回排风机运行无新风工况(风机频率调至20 Hz)	空调机组全日运行小新风工况(可开启备用多联空调)
	通风模式	3月16日—6月19日、9月11日—11月30日	关闭	8:00—21:00 组合式空调机组运行全新风工况(风机频率调至20 Hz), 回排风机关闭	空调机组全日运行全新风工况(可开启备用多联空调)
	自然通风模式	12月1日—次年3月15日	关闭	关闭	空调机组全日运行全新风工况(可开启备用多联空调)
上海	空调模式	6月20日—9月16日	冷水机组全日运行(出水温度设定值为10℃)	6:00—22:00 车站组合式空调机组、回排风机运行无新风工况(风机频率调至20 Hz)	空调机组全日运行小新风工况(可开启备用多联空调)
	通风模式	3月1日—6月19日、9月17日—12月15日	关闭	6:00—22:00 组合式空调机组运行全新风工况(风机频率调至20 Hz), 回排风机关闭	空调机组全日运行全新风工况(可开启备用多联空调)
	自然通风模式	12月16日—次年2月28日	关闭	关闭	空调机组全日运行全新风工况(可开启备用多联空调)
广州	空调模式	5月1日—10月22日	冷水机组全日运行(出水温度设定值为8℃)	6:00—22:00 车站组合式空调机组、回排风机运行无新风工况(风机频率调至20 Hz)	空调机组全日运行小新风工况(可开启备用多联空调)
	通风模式	2月1日—4月30日、10月23日—12月31日	关闭	6:00—22:00 组合式空调机组运行全新风工况(风机频率调至20 Hz), 回排风机关闭	空调机组全日运行全新风工况(可开启备用多联空调)
	自然通风模式	1月1日—一年1月31日	关闭	关闭	空调机组全日运行全新风工况(可开启备用多联空调)

表 3 自控方案

Table 3 Automation control scheme

运行模式	切换条件	空调风机	回/排风机	冷水机组	新风阀
通风模式	通风模式站内不高于27℃	大系统: 关机 小系统: 全天定频运行	大系统: 运营时段开机, 20 Hz 运行 小系统: 关机	关机	大系统: 开 小系统: 开
全新风空调	通风模式站内高于27℃, 切换为全新风空调	大系统: 运营时段开机(根据站内温度与设定值, PID 变频调节, 20~50 Hz) 小系统: 全天定频运行	大系统: 运营时段开机(根据站内温度与设定值, PID 变频调节, 20~50 Hz) 小系统: 关机	开机(根据送风温度与设定值, PID 调节出水温度)	大系统: 开 小系统: 开
小新风空调	室外焓值>室内焓值	大系统: 运营时段开机(根据站内温度与设定值, PID 变频调节, 20~50 Hz) 小系统: 全天定频运行	大系统: 运营时段开机(根据站内温度与设定值, PID 变频调节, 20~50 Hz) 小系统: 关机	开机(根据送风温度与设定值, PID 调节出水温度)	大系统: 关 小系统: 关

2.4 模拟工具

在瞬时系统模拟程序(transient system simulation program, TRNSYS)中选择合适的模块搭建地铁站环控系

统模型, 各设备的性能参数和系统连接根据实际情况进行设定。TRNSYS 模型的示意图图 1, 图中绿色线表示风系统、红色线表示冷却水系统、蓝色线表示冷水系统。

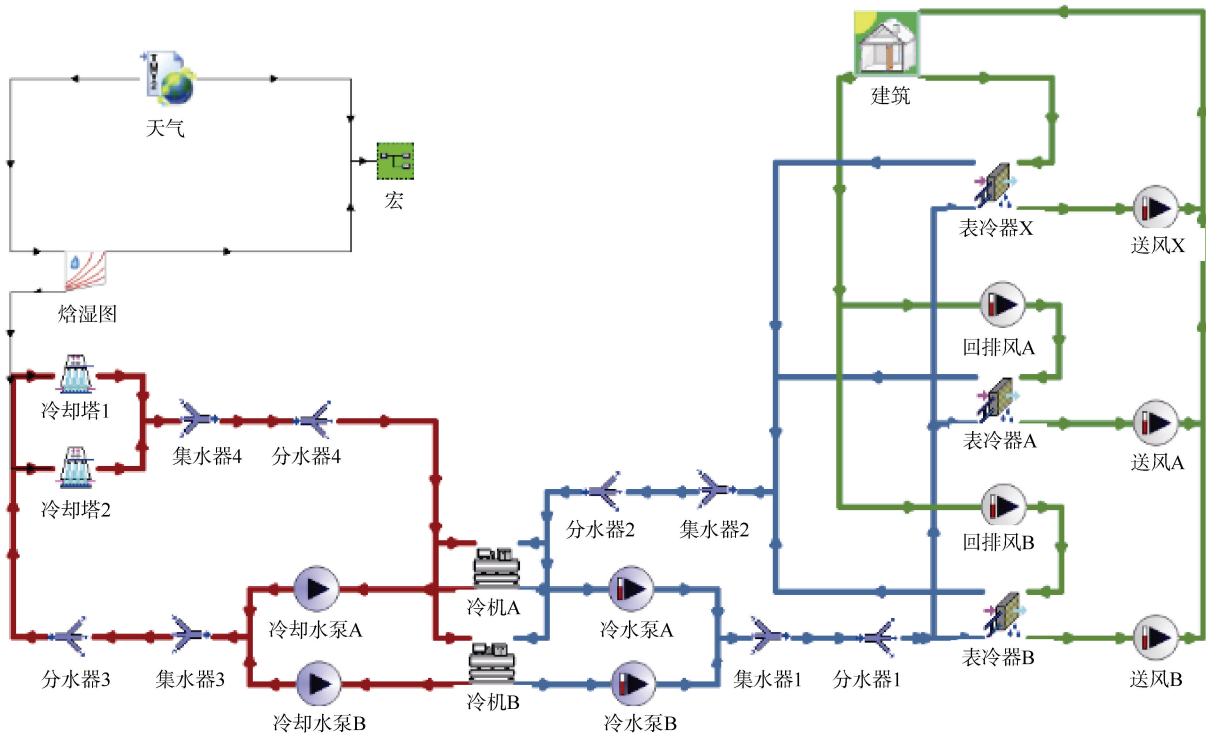


图1 环控系统及设备的TRNSYS模型示意
Figure 1 TRNSYS model of the VAC system

1) 水冷式冷水机组: 选用 Type666 模块, 该模块用于模拟蒸汽压缩式水冷式冷水机组, 其冷却侧和蒸发侧的性能由外部文件定义。在系统中将其与冷水泵、冷却水泵和分集水器进行连接, 该模块能够根据末端负荷的变化(即冷冻水回水温度)自动计算冷水机组 COP、制冷量和功率, 冷水机组的出水温度设定值、冷机性能参数根据实际选型及运行性能由用户进行设定。

2) 冷水泵: 选用 Type110 模块, 该模型能够模拟将任何出口质量流量保持在零和额定值之间的变速泵, 泵的质量流量随控制信号设置线性变化。在系统中将其与冷水机组和集水器进行连接, 该模块能够模拟水泵变频运行, 水泵性能曲线根据实际情况进行设定。

3) 冷却塔: 选用 Type51b 模块, 该模块中热水流与空气流直接接触, 空气流和水流可以被配置成逆流或横流布置。在系统中将其与冷却水泵、集水器和室外气象模块进行连接; 选用 Type114 模块作为冷却水泵, 该模块能够模拟变频水泵的运行, 在系统中将其与冷水机组和集水器进行连接。

4) 空调末端风机: 选用 Type111b 模块, 该模型能够模拟在零和额定风速之间转动的变速风机, 空气的质量流速与控制信号线性相关。该模块能够模拟风机变频运行, 在系统中将其与表冷器和房间模块进行

连接。

5) 表冷器: 选用 Type508c 模块, 模型中冷却盘管采用旁路方法建模, 其中用户指定绕过盘管的气流的一部分, 两股气流在盘管后重新混合, 该模型能够控制将出口空气干球温度维持在用户指定的最小值以上, 将空气出口绝对湿度比维持在用户规定的最小值之上, 或将流体出口温度维持在某个用户指定的最大值以下。在系统中将其与冷水泵、冷水机组、送风机和回/排风机进行连接。

6) 分/集水器: 选用 Type647 模块和 Type649 模块分别作为分水器和集水器, 在系统中将其与表冷器、冷水机组、冷水泵、冷却水泵和冷却塔进行连接。

7) PID 控制器: 选用 Type23 模块, 该模块模拟比例、积分和微分(PID)控制器。在自控方案中将其与空调末端风机、冷水机组连接。

8) 其他: 选用计算器功能作为设备的启停控制器和变频控制器等, 选用 Type109 模块输入气象数据, 选用 Type65c 模块输出模拟计算结果。

3 结果分析

3.1 模拟结果

以上海地铁站为例, 表 4 列出了当前时刻表控制

方案、增设自控系统方案和优化时刻表控制方案的模拟参数设置及模拟结果。下面从站内环境控制效果、能耗情况等方面，评估优化时刻表控制方案和增设自控系统方案。

表 4 3 种控制方案参数及结果对比(以上海市为例)
Table 4 Comparison of the three control strategies (Shanghai)

参数名称	当前时刻表控制	增设自控系统	优化时刻表控制
空调季时段	6月1日—10月15日	6月20日—9月16日	6月20日—9月16日
公共区空调风机频率/Hz	35	PID 调节	20
冷机出水温度/°C	10	PID 调节	10
空调季站内平均温度/°C	26	27.3	27.0
机械新风量/(万 m ³ /h)	2.6	0	0
屏蔽门当量缝隙宽度/mm	8.5	6.9	6.9
冷水机组 COP	3	5.8	5.6
空调箱能效比	8.2	14.9	12.1
环控系统年能耗/(万 kWh/a)	68.0	36.2	37.3

3.2 站内环境控制效果对比

站内环境控制方面，采用增设自控系统的方案和优化时刻表控制的方案，各气候区地铁站空调季站内温度日波动均可控制在 2°C 以内(见图 2)。统计整个空调季运营时段的站内温度分布情况，结果见图 3。可以发现，相比于当前的时刻表控制方案，增设自控系统方案和优化时刻表控制方案均可提高站内空调控制温度，两种方案可实现类似的站内温度控制效果。优化时刻表控制方案比增设自控系统方案的站内空调温度平均值低 0.3~0.9°C，原因是后者动态可调节性更好，不易过量供冷。

3.3 节能效果对比

节能潜力方面，对比不同系统控制方案下环控系统能耗模拟结果，见图 4 及表 5。结果显示，相比当前时刻表控制方案，增设自控系统将各项运行管理参数控制至引导值水平(即结合实际调研和设计规范制定的空调季站内环境参数、无组织渗风量、机械新风量、设备能效等运行管理参数的合理水平，具体取值详见文献[11])，可以大大降低能耗，各气候区地铁站增设自控系统后，环控系统年能耗可分别降低 41%(寒冷地区)、47%(夏热冬冷地区)和 49%(夏热冬暖地区)。采用优化时刻表控制的方案也可显著降低能耗，主要

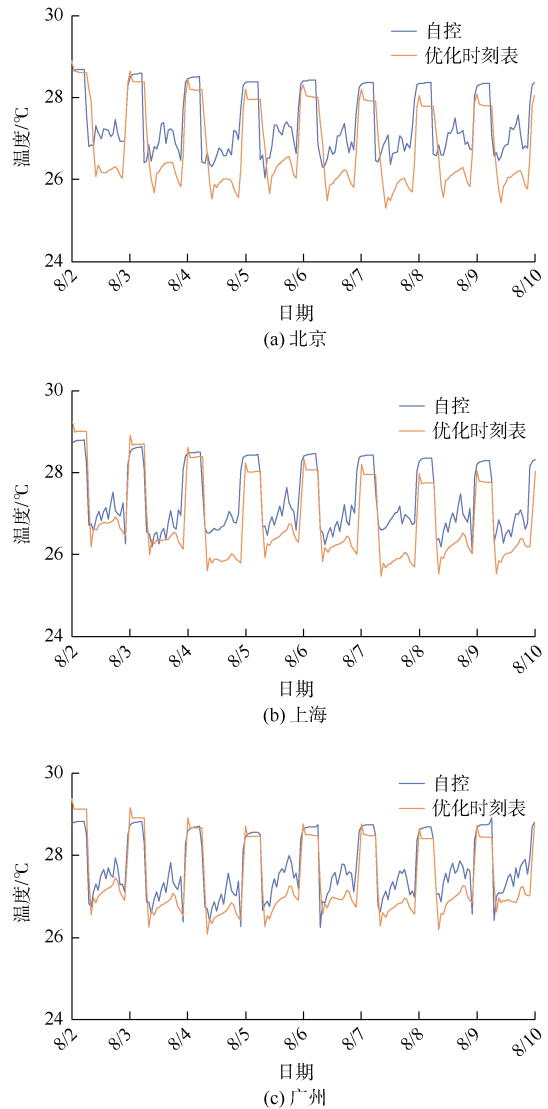


图 2 空调季典型周内站内温度波动情况
Figure 2 Fluctuation in station air temperature in a typical week during the air-conditioning season

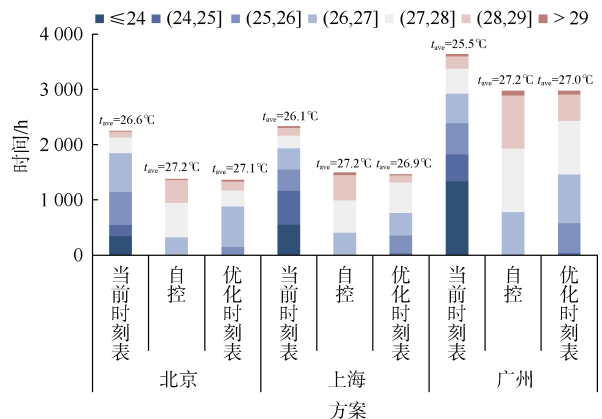


图 3 不同系统控制方案下的空调季运营时段站内温度对比
Figure 3 Comparison of the three control strategies on station air temperature during the air-conditioning season

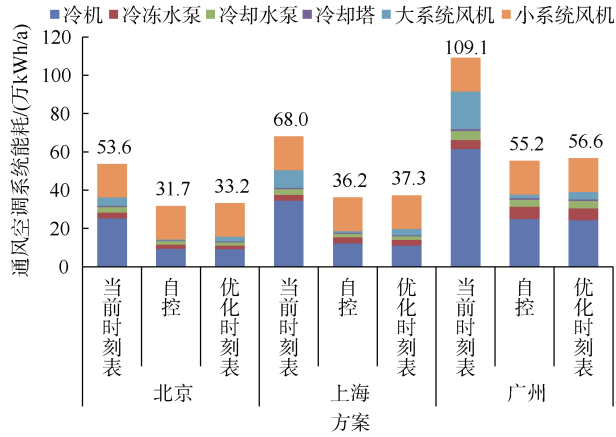


图 4 不同系统控制方案下的环控系统年能耗对比
Figure 4 Comparison of the three control strategies on VAC energy use

表 5 不同系统控制方案的环控系统节能潜力

Table 5 Energy-saving potentials of the control strategies

城市	增设自控系统		优化时刻表控制	
	节能量/ (万 kWh/a)	节能 百分比/%	节能量/ (万 kWh/a)	节能 百分比/%
北京	21.9	41	20.4	38
上海	31.8	47	30.7	45
广州	53	49	51.6	48

原因是通过预先计算供冷时段减少、设备能效提升、风机频率和冷机出水温度优化、机械新风量减少等。相比于增设自控系统的方案，采用优化时刻表控制的方案也可以达到类似效果，年能耗比增设自控系统分别高约 5%(寒冷地区)、3%(夏热冬冷地区)、2%(夏热冬暖地区)。由于气候寒冷地区空调季整体温度较低、波动较大，动态调节需求较高，因此相比于优化的时刻表控制，增设自控系统在气候更寒冷地区的节能优势更加明显。

3.4 系统改造及后续维护对比

改造成本、系统复杂程度及后期维护所需人员专业性等方面也是实际工程中值得关注的问题。改造成本方面，优化时刻表控制的方案仅需要提高管理水平，即通过对具体车站进行预先模拟，从而根据车站实际情况制定有针对性的时刻表控制优化方案，而无需增加设备和系统，改造成本低。增设自控系统的方案需要逐个车站加装自控系统，系统较为复杂，改造成本较高。后期维护方面，增设自控系统的方案需要配备专业人员进行后期调试和运行维护，由于系统复杂程度较高，对运维管理人员的专业性要求高。优化时刻表控制的方案需要根据未来一周的天气预报、预测客流

等情况进行预先模拟，从而生成相应的运行方案，相比于自控方案对运维管理人员的专业性要求较低。因此，对于地铁站这类分布分散、单体面积较小的建筑，采用优化时刻表控制的方案改造成本低、后期维护简单，同时能够实现与增设自控系统基本相同的控制效果和节能潜力，具有明显的优势。

4 结论

为推动地铁站实现节能潜力，同时兼顾站内环境和改造成本，本文探究了几种不同的环控系统控制方案。以北京、上海、广州作为代表性城市，以当前时刻表控制作为基准，对比了增设自控系统和优化时刻表控制这 2 种方案在站内环境控制情况、节能潜力、改造成本方面的表现，表 6 提供了 3 种方案的定性对比，可以为运营单位的方案选择提供简单、便捷的参考。结果显示：优化时刻表控制与增设自控系统均能在保证站内环境控制水平的前提下实现类似的节能的效果；综合考虑站内环境控制效果、能耗情况和改造成本，建议地铁站采用优化时刻表控制的方案进行节能运行优化，以实现节能潜力。本文的研究成果对于各气候区地铁站节能运行方案的选择具有重要参考价值。

表 6 3 种控制方案对比

Table 6 Comparison of the three control strategies

方案	温度控制效果	用能情况	系统复杂程度	人员专业要求
当前时刻表控制	差	高	低	低
增设自控系统	好	低	高	高
优化时刻表控制	较好	较低	较低	较高

参考文献

[1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2022 年度统计和分析报告[J]. 城市轨道交通, 2023(4): 13-15.
 [2] SU Ziyi, LI Xiaofeng. Sub-system energy model based on actual operation data for subway stations[J]. Sustainable cities and society, 2020, 52: 101835.
 [3] 林炎顷, 李先庭, 吴成斌, 等. 地铁可调通风型站台门过渡季节自然通风性能测试[J]. 制冷与空调(四川), 2016, 30(3): 316-320.
 LIN Yanqing, LI Xianting, WU Chengbin, et al. Natural ventilation performance of the subway adjustable platform screen door in transition season[J]. Refrigeration & air conditioning, 2016, 30(3): 316-320.
 [4] YANG Le, ZHANG Yichi, XIA Jianjun. Case study of train-

- induced airflow inside underground subway stations with simplified field test methods[J]. *Sustainable cities and society*, 2018, 37: 275-287.
- [5] GUAN Bowen, ZHANG Tao, LIU Xiaohua. Performance investigation of outdoor air supply and indoor environment related to energy consumption in two subway stations[J]. *Sustainable cities and society*, 2018, 41: 513-524.
- [6] 李超, 王春青, 齐洁, 等. 基于实测数据对地铁站环控系统能耗及其影响因素的分析[J]. *暖通空调*, 2021, 51(增刊 2): 311-316.
- [7] YANG Zhao, YU Zhuangzhuang, YU Longqing, et al. Research on frequency conversion technology of metro station's ventilation and air-conditioning system[J]. *Applied thermal engineering*, 2014, 69(1/2): 123-129.
- [8] PAN Song, PEI Fei, WEI Yixuan, et al. Design and experimental study of a novel air conditioning system using evaporative condenser at a subway station in Beijing, China[J]. *Sustainable cities and society*, 2018, 43: 550-562.
- [9] KIM M, BRAATZ R D, KIM J T, et al. Indoor air quality control for improving passenger health in subway platforms using an outdoor air quality dependent ventilation system[J]. *Building and environment*, 2015, 92: 407-417.
- [10] 苏子怡, 李晓锋. 中国各气候区屏蔽门地铁站环控系统节能潜力研究[J]. *都市轨道交通*, 2023, 36(3): 131-138.
SU Ziyi, LI Xiaofeng. Energy-saving potential of ventilation and air-conditioning systems of PSD subway stations in various climate regions in China[J]. *Urban rapid rail transit*, 2023, 36(3): 131-138.
- [11] 苏子怡, 李晓锋. 中国各气候区屏蔽门地铁站通风空调能耗指标[J]. *都市轨道交通*, 2023, 36(1): 148-155.
SU Ziyi, LI Xiaofeng. Energy use index of ventilation and air-conditioning system for subway stations in various climate regions in China[J]. *Urban rapid rail transit*, 2023, 36(1): 148-155.

(编辑: 王艳菊)

(上接第 10 页)

参考文献

- [1] 严作人, 杜豫川, 张戎. 运输经济学[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [2] 国家发展改革委. 投资项目可行性研究报告编写大纲及说明(发改投资规[2023]304号)[A/OL]. (2023-04-07) [2024-04-19]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jd/jd/202304/t20230407_1353388.html.
- [3] 城市轨道交通建设项目后评价导则: 建标[2015]52号[S]. 北京: 中国计划出版社 2015
- [4] (英国)弗洛里迪. 信息哲学[M]. 牛津: 牛津大学出版社, 2011.
FLORIDI L. The Philosophy of Information[M]. Oxford: Oxford University Press, 2011.
- [5] 朱扬勇, 熊赞. 数据学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2009.
ZHU Yangyong, XIONG Y. Dataology and data science[M]. Shanghai: Fudan Press, 2009.
- [6] 石川, 王啸, 胡琳梅. 数据科学导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.
SHI Chuan, WANG Xiao, HU Linmei. Introduction to data science[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2021.
- [7] Chen, P.P. 关系实体模型: 走向数据的统一视角[J]. 美国计算机协会数据库系统会报, 1976, 1(1): 9-36.
Chen, P.P. The Entity-Relationship Model-Toward a Unified View of Data. *ACM Transactions on Database Systems*, 1976, 1(1): 9-36.
- [8] 罗素·艾可夫. 从资料到智慧[J]. *应用系统分析*, 1989, 16: 3-9.
- [9] (美国)卡托克, 哈塞尔布拉特. 现代动力系统理论导论[M]. 金成桴, 译. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [10] 杨振山, 杨航, 杨林生, 等. 可持续发展目标的多尺度空间解构与评估[J]. *自然资源学报*, 2024, 39(3): 489-507.
YANG Zhenshan, YANG Hang, YANG Linsheng, et al. Multi-scale spatial deconstruction and evaluation of Sustainable Development Goals[J]. *Journal of natural resources*, 2024, 39(3): 489-507.
- [11] 深圳大学. 深圳市可持续发展评估报告(2016至2021年)[R]. 深圳, 2022.
- [12] 于松伟, 刘巍, 仲莹莹. 基于复杂巨系统理论的城市轨道交通可持续发展综合评价[J]. *都市轨道交通*, 2023, 36(5): 1-10.
YU Songwei, LIU Wei, ZHONG Yingying. Comprehensive evaluation of sustainable development of urban rail transit based on open complex giant system theory[J]. *Urban rapid rail transit*, 2023, 36(5): 1-10.
- [13] (荷兰)约翰·H. 遗传算法与试验的最优分配[J]. *SIAM 计算*, 1973, 2.2: 88-105.
John H. Genetic algorithms and the optimal allocation of trials[J]. *SIAM journal on computing*, 1973, 2.2: 88-105.

(编辑: 王艳菊)