

地铁车站空调系统瞬态能耗预测模型及应用研究

檀姊静¹, 贺思渝¹, 赵敬源²

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710060; 2. 长安大学 建筑学院, 陕西 西安 710060)

摘要: 降低地铁车站空调系统能耗是实现地铁节能的关键。地铁车站空调系统能耗受客流量影响, 存在显著的逐时变化。地铁车站空调系统节能设计及运行优化需要以准确的瞬态能耗预测为基础。据此, 本研究搭建了基于负荷判断和分时调控的地铁车站空调系统瞬态能耗预测模型, 并根据现场实测数据对该模型的准确性进行了验证。在此基础上, 对该模型在地铁车站空调系统冷源方案优化中的应用进行了探索。以广州某标准站为例, 对常规水冷冷水、整体式蒸发冷凝、直接膨胀式蒸发冷凝三种冷源方案下的系统全年逐时能耗进行预测, 进而基于技术经济分析对这三种常用冷源方案在地铁车站空调系统中的适用性进行了讨论。研究结果表明: 在三种冷源方案中, 直膨式蒸发冷凝方案的节能性能最佳, 虽然其初投资高于常规冷水水冷空调系统, 但年综合运行费用低, 具有最高的经济效益。

关键词: 地铁车站; 空调系统; 分时调控; 能耗预测; 冷源优化

中图分类号: TU83

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)01-0147-07

Transient energy consumption model and its application on cold source optimization of air conditioning system in subway station

TAN Zijing¹, HE Siyu¹, ZHAO Jingyuan²

(1. Chang'an University, School of Civil Engineering, Xi'an 710060, China;

2. Chang'an University, School of Architecture, Xi'an 710060, China)

Abstract: Reducing energy consumption of air conditioning system is the key of realizing subway station energy-saving. Energy consumption of air conditioning system in subway station is influenced by passenger flow volume and shows significant hourly variation. Energy efficiency design and operation optimization of air conditioning system in subway station is based on accurate transient energy consumption prediction. Accordingly, a transient energy consumption model of subway station ventilation and air conditioning system is presented in this study. The prediction accuracy of this model was proved to be acceptable based on field measurement. Then, the application of this model on cold source optimization was discussed. A standard station in Guangzhou was taken as an example, the annual hourly energy consumption under three different cold source schemes: conventional water-cooling system, integral evaporative cooling system and direct expansion evaporative cooling system was numerically investigated. Further, technical and economic efficiency was discussed, applicability of three cold source schemes were discussed. The results demonstrate that direct expansion evaporative cooling is the most energy-efficient cold source scheme and has the highest economic benefits due to its lowest annual combined operating expenses.

Key words: subway station; air conditioning system; transient control; energy consumption prediction; cold source optimization

地铁通风空调系统是保证地铁列车及车站环境安全、健康、舒适的关键^[1-2]。地铁通风空调系统能耗占比高, 最高可达地铁车站总能耗的 50%^[3-4], 是地铁车站节能设计与运行的关键

环节^[5-6]。

目前, 国内外学者多采用现场实测^[7-8]、系统仿真分析^[9]等方法开展地铁车站空调系统节能研究。在现场实测方面, 郝盛等^[10]采用节能诊断分

收稿日期: 2021-09-15

修改稿日期: 2023-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52008025)

第一作者: 檀姊静(1988—), 女, 博士, 副教授, 从事建筑节能研究。E-mail: tanzijing01@163.com

通信作者: 赵敬源(1972—), 女, 博士, 教授, 从事建筑节能研究。E-mail: zjyqtt@163.com

析的方法,从地铁的配置、运行模式、节能监控出发,讨论了系统整体效率的提高方式。许巍等^[11]对蒸发式冷凝机组在地铁工程中的方案进行了探讨,并对节能效果进行了分析。苏晓青^[12]通过研究发现蒸发冷凝机组对地形的适应性好,最高节能约16%。周游等^[13]分析了冷水机组+冷却塔结合风亭、冷水机组+冷却塔浅埋和蒸发式冷凝机组三种冷源方案的节能性能。张超等^[14]通过对比分析指出在仅考虑水系统能耗的前提下,蒸发冷凝式冷水机组的COP更高。石金凤等^[15]对常规制冷+地面冷却塔、蒸发冷凝式机组、集中冷站、常规制冷+下沉式冷却塔四种方案进行了分析,并指出各方案的适用性。

付强等^[16]以重庆某地铁站为研究对象,采用EnergyPlus建立空调系统能耗数值模型,得到空调能耗约占全年能耗的60%~70%并且冷水机组能耗占比约为空调季节总能耗50%的结论。常军^[17]借助SES数值计算软件,对北京地铁四号线的集成通风空调系统及区间隧道独立的通风空调系统热环境开展了仿真模拟及技术经济分析。朱培根、朱颖心等^[18-19]学者利用STESS软件对地铁站的初期、近期、远期的空调负荷进行仿真模拟,分析地铁通风空调系统节能运行的最佳方案。

如上所述,目前,地铁站空调系统的能耗问题已受到工程界及学术界的广泛关注。但现有研究对于地铁车站空调系统能耗的瞬态变化特定研究尚不够深入,缺少具有普遍适用性的瞬态能耗预测模型。据此,本研究从地铁车站空调系统能耗的瞬态变化特性出发,搭建基于负荷判断和分时调控的地铁车站空调系统瞬态能耗预测模型,用以实现地铁车站空调系统瞬态能耗的准确预测。在此基础上,以广州某标准站为例,对该模型在地铁车站空调系统冷源方案优化中的应用进行探索。通过对常规水冷冷水、整体式蒸发冷凝、直接膨胀式蒸发冷凝三种冷源方案的对比分析发现,直膨式蒸发冷凝方案节能性能最佳,年综合运行费用低,具有最高的能源和经济效益。

1 地铁车站空调系统瞬态能耗预测模型

地铁车站空调系统能耗受客流量影响,存在

显著的逐时变化,对这种逐时变化特性进行准确描述,是实现地铁车站空调系统节能设计及运行的关键。然而目前,在地铁工程设计中,通常采用稳态负荷计算方法,该方法无法捕捉系统动态特征,对部分负荷情况下的系统效率估计不足,未考虑启动负荷等瞬态负荷的影响,无法准确反映地铁车站空调系统瞬态能耗。据此,通过构建地铁车站空调系统能耗预测模型并引入负荷判断与分时调控模块,实现地铁车站空调系统瞬态运行方式的仿真,进而提高地铁车站空调系统能耗预测的准确度,为地铁空调系统节能设计及运行提供数据支撑。

以目前地铁空调工程中最常见的双冷机常规水冷冷水空调系统为例,车站空调系统瞬态能耗预测模型结构如图1所示。车站空调系统动态负荷数据由TRNBUILD软件计算获得。TRNBUILD软件是TRNSYS(Transient System Simulation Program)——瞬态系统模拟程序中的一个子程序,其中包含一个可以实现创建编辑模型功能的模块,用户通过调用功能模块,实现系统构建及仿真计算。

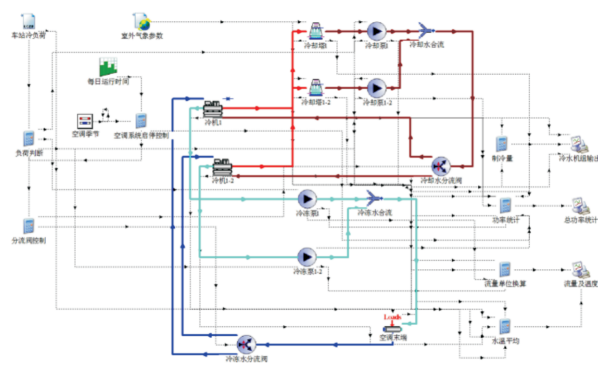


图1 车站常规空调系统的瞬态能耗预测模型

Fig. 1 Transient energy consumption model for station conventional air conditioning system

图中实线表征真实流体管路,虚线表示数据传输路径。系统中冷源机组、水泵、冷却塔、分流阀等设备控制信号来自包含分时控制和负荷判断两个模块的控制系统。分时控制和负荷判断模块的控制流程如图2所示。

每小时进行一次控制流程判断。整个控制流程由分时控制和负荷判断两个模块组成。通过分时控制模块,可实现目标车站的空调运行时间表控制。通过负荷判断模块,可依据动态负荷数据实现设备台数精确控制。

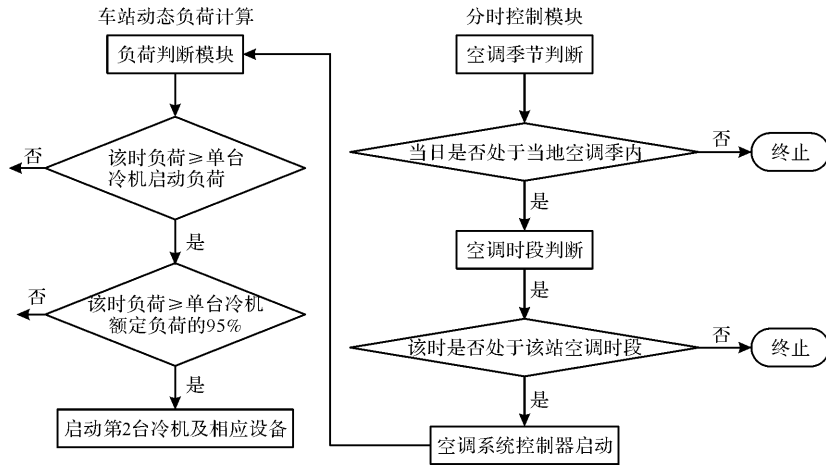


图2 分时控制及负荷判断模块控制流程

Fig. 2 Control flow of real-time control and load determine modules

2 应用实例

2.1 标准站概况

以广州市某标准站为例,对本文所建立的地铁车站空调系统瞬态能耗预测模型开展应用分析。该地铁车站为地下二层岛式车站,地下一层为站厅区,层高 5.5 m,地下二层为站台区,层高 5.0 m,车站总长度 164.1 m。站台层采用屏蔽门系统,公共区采用全空气空调系统。站厅夏季空调设计参数:干球温度 29℃,相对湿度 45%~65%;站台夏季空调设计参数:干球温度 27℃,相对湿度 45%~65%。客流量按远期 2032 年夏季晚高峰计算,预测客流 3 780 人,其中上行上车人数 2 210 人,上行下车人数 153 人;下行上车人数 220 人,下行下车人数 1 197 人,超高峰系数取 1.3。

该站采用常规水冷冷水全空气空调系统,设有两台螺杆式水冷冷水机,两台冷却塔,两台组合式空调机组以及三台冷冻水泵(两用一备)和三台冷却水泵(两用一备)。冷水机采用压缩机台数可调节的变制冷量冷机,冷冻泵、冷却泵采用定频泵,冷却塔风机采用定频风机。

2.2 模型验证

利用 2019 年 6 月 13 至 16 日的实测数据,对本文提出的地铁车站空调系统瞬态能耗预测模型进行准确性验证。实际运行情况下的主机 COP 与本文模拟结果对比如图 3,模拟结果与实测值在整个测试时段内的平均偏差约为 7%,接近度较高,表明本模拟方案对于地铁空调系统能耗具有较高的预测精度。

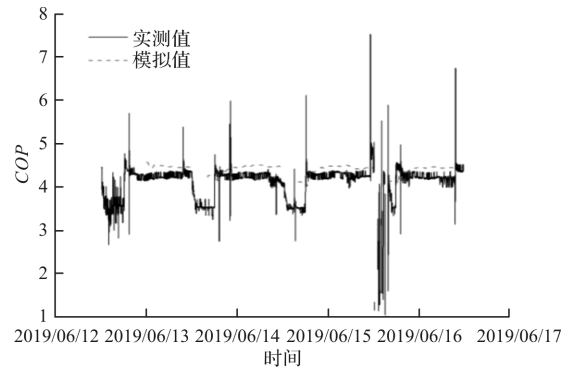
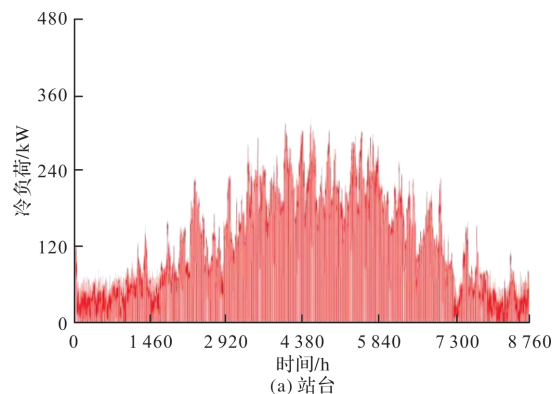


图3 模拟方案下 COP 计算值与实测值对比

Fig. 3 Comparison of COP

2.3 全年瞬态能耗预测

首先,利用本文所建立的地铁车站空调系统瞬态能耗预测模型对该标准站进行全年 8 760 h 连续动态冷负荷预测及系统能耗预测。冷负荷预测结果如图 4 所示。站台区峰值冷负荷为 326 kW;站厅区峰值冷负荷为 186 kW;公共区总冷负荷峰值 512 kW,所有峰值负荷均出现在第 4 554 小时。站厅区空调季总冷负荷 463 199 kW,站台区空调季总冷负荷 742 709 kW,车站公共区空调季总冷负荷 1 205 907 kW。



(a) 站台

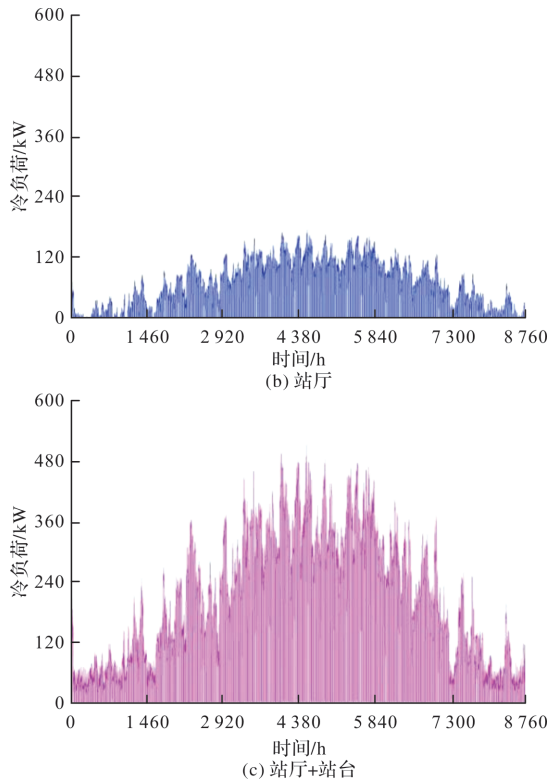


图4 站厅、站台全年逐时冷负荷

Fig. 4 Hourly cooling load of station hall and platform throughout the year

广州市空调季节为每年3月1日至11月1日. 通过该标准站的地铁列车运行时间表确定该站点空调时段为每日早晨4:30至次日凌晨0:30. 将负荷计算数据及运行时段数据导入分时控制及负荷判断模块, 实现该站空调系统运行仿真. 该站空调系统全年运行数据如图5~7所示.

如图所示, 空调系统主机制冷量变化与全年冷负荷变化同步, 能够及时提供系统所需冷量, 消除站厅站台余热, 但冷机负荷率最高仅为40%, 全年均值约为20%, 始终处于低负荷率运行. 较低的负荷率使得主机COP降低, 全年均值为4.5左右, 远低于机组额定COP5.8; 同时系统供回水温差小, 全年维持在1~2℃, 远低于额定值5℃, 输配能耗比例高.

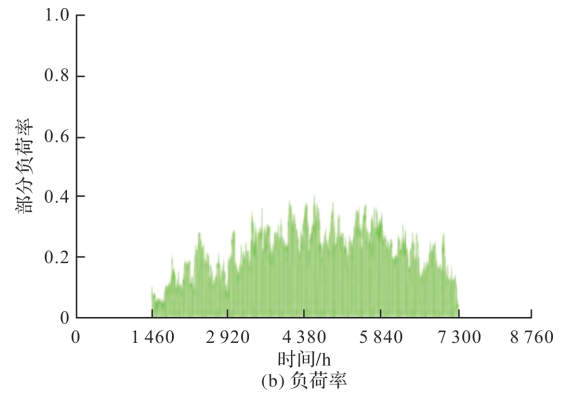
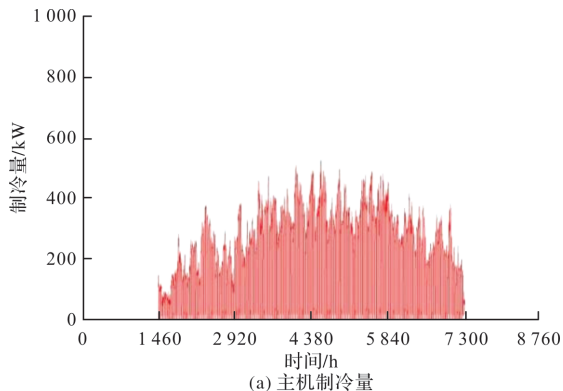


图5 车站空调系统主机制冷量及负荷率

Fig. 5 Main cooling capacity and part load rate of station air conditioning system

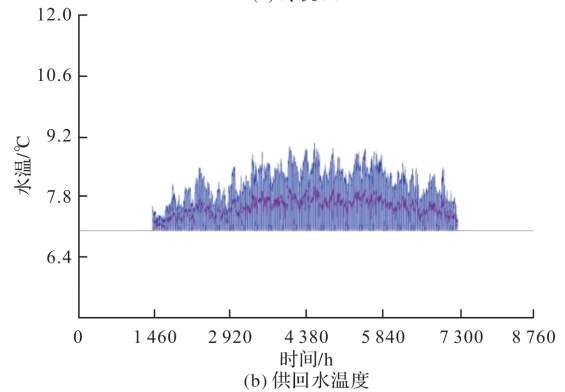
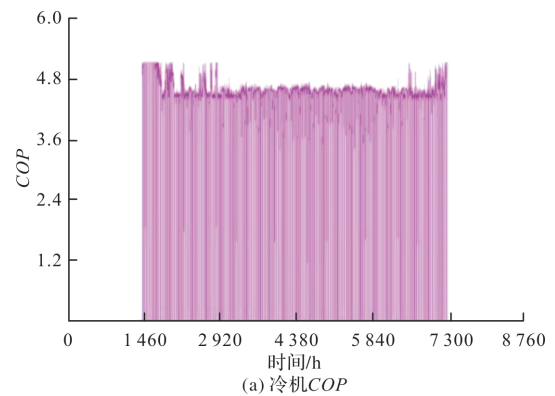
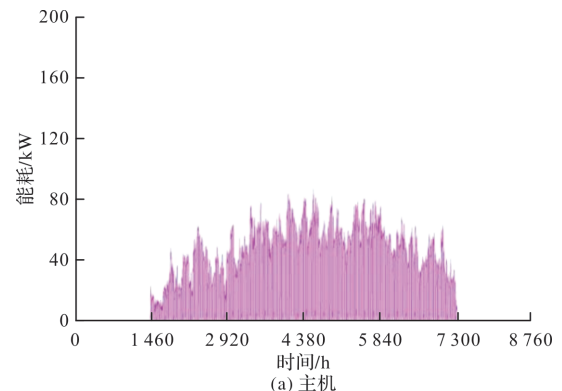
图6 车站空调冷机COP及空调主机供回水温度
(下层线: 供水温度; 上层线: 回水温度)

Fig. 6 Station air-conditioning chiller COP and water supply and return temperature of the station air-conditioning host (lower line: water supply temperature; upper line: return water temperature)



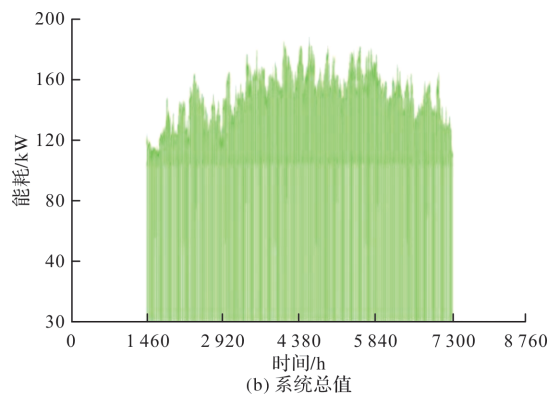


图 7 车站空调系统全年逐时耗电量

Fig. 7 Power consumption of subway station air-conditioning system throughout the year

该车站常规水冷冷水系统下的各设备全年总能耗如表 1 所示. 冷冻水泵能耗占系统总能耗的 29%, 冷却水输配系统(冷却水泵与冷却塔)能耗占系统总能耗的 36%, 冷水机组能耗占系统总能耗的 36%. 冷却水与冷冻水输配系统能耗占比较高, 其总能耗达到冷水机组能耗的 1.8 倍. 冷水主机的年均能效比 4.5, 系统综合能效比年均 1.6. 以上结果表明, 该站空调系统综合能效低, 输配系统具有较高的节能潜力, 是节能优化的关键.

表 1 空调系统各设备全年总能耗及系统能效比

Tab. 1 Annual total energy consumption and system energy efficiency ratio of each equipment of air conditioning system

设备	年耗电量/kWh	占比/%	年均能效比
冷冻水泵	221 400	29	
冷却水泵	182 040	24	
冷却塔	92 802	12	
冷水机组	254 742	34	COP=4.5
系统总	750 985	100	EER=1.6

2.4 冷源方案优化分析

在前述的研究基础上, 对地铁车站空调系统瞬态能耗预测模型在地铁车站空调系统冷源方案优化中的应用进行探索分析. 基于案例车站, 对方案一: 常规水冷冷水空调系统; 方案二: 整体式蒸发冷凝空调系统; 方案三: 直膨式蒸发冷凝空调系统, 三种空调系统冷源方案开展对比研究.

三种方案的主要设备组成及功率如表 2 所示. 整体式蒸发冷凝空调系统与传统水冷冷水空调系统相比, 省去了冷却水循环系统, 但为保证蒸发冷凝器散热效果, 一般需加设强排风机; 直膨式蒸发冷凝空调系统与传统水冷冷水空调系统相比省去了冷冻水与冷却水两个输配系统, 但需增设

制冷剂循环泵及风机墙, 并以压缩机及蒸发冷凝装置替代常规冷水机组实现制冷循环.

表 2 三种方案的主要设备组成及功率

Tab. 2 Equipment composition and power of the three schemes

设备名称	方案一	方案二	方案三
冷冻水泵	45 kW, 2 台	49.5 kW, 2 台	
冷却水泵	37 kW, 2 台		
冷却塔	18.9 kW, 2 台		
冷水机组	267 kW, 2 台	207 kW, 2 台	
强排风机		30 kW, 2 台	
循环泵			3.5 kW
风机墙			57.5 kW
压缩机及蒸发 冷凝装置			249 kW

三种方案的年能耗及系统能效比如表 3, 与常规水冷冷水空调系统(方案一)相比, 整体式蒸发冷凝空调系统(方案二)及直膨式蒸发冷凝空调系统(方案三)均具有良好的节能效果. 整体式蒸发冷凝空调系统能效比可达 2.0, 直膨式蒸发冷凝空调系统能效比可达 2.2. 使用整体式蒸发冷凝及直膨式蒸发冷凝替代常规水冷冷水空调系统, 可实现节能 19.6%和 28.4%.

表 3 三种方案的年能耗及系统能效比

Tab. 3 Annual energy consumption and system energy efficiency ratio of the three schemes

	方案三	方案一	方案二
年能耗/kWh	750 985	604 142	537 689
年制冷量/kW	1 205 907	1 205 907	1 205 907
EER	1.6	2	2.2
与方案一相比的节能率/%		19.6	28.4

三种方案的设备初投资对比如表 4 所示, 常规水冷冷水空调系统设备初投资最小, 约为 256 万元, 而整体式蒸发冷凝空调系统与直膨式蒸发冷凝空调系统初投资较接近, 分别为 397 万元和 388 万元, 约为常规空调系统的 1.5 倍.

三种方案的土建需求对比如表 5 所示, 常规水冷冷水空调系统需设置不小于 130 m² 的制冷机房及 140 m² 左右的冷却塔基坑^[20]; 整体式蒸发冷凝空调系统用蒸发冷凝机房替代传统的冷水机房, 并省去了冷却塔基坑的土建需求; 当车站新、排风道尺寸满足要求时, 直膨式蒸发冷凝空调系统不需增设额外的机房, 蒸发冷凝装置可直接布置于排风道内, 无额外土建需求.

表 4 三种方案的设备初投资对比

Tab. 4 Comparison of initial equipment investment of the three schemes

方案一 常规水冷冷水			方案二 整体式蒸发冷凝			方案三 直膨式蒸发冷凝		
设备名称	数量	总价/万元	设备名称	数量	总价/万元	设备名称	数量	总价/万元
冷冻水泵	3	9	冷冻水泵	3	9	蒸发冷凝装置 (含压缩机)	2	264
冷却水泵	3	9	整体式蒸发冷凝机组	2	296	直膨式空调箱	2	60
冷却塔	2	26	强排风机	2	12	风机墙	2	30
冷水机组	2	112	组合式空调箱	2	30	循环泵	2	4
组合式空调箱	2	30	冷冻机房群控	1	10	冷冻机房群控	1	10
冷冻机房群控	1	10	管路及阀门附件	若干	40	冷媒管路及阀门附件	若干	20
管路及阀门附件	若干	60						
总计		256	总计		397	总计		388

表 5 三种方案的土建需求对比

Tab. 5 Comparison of civil construction requirements of three schemes

土建需求	方案一	方案二	方案三
冷水机房/m ²	130	145	0
冷却塔基坑/m ²	140	0	0

通过计算设备投资、土建投资、年耗电量、耗水量及运行维护费用,对三种方案的全寿命周期经济性进行对比分析,结果如表 6 所示。其中土建费用按照 1 万元/m²,水费按照 7.85 元/t,电费按 1 元/kWh 计算^[14, 21]。

表 6 三种方案的经济性分析

Tab. 6 Economic analysis of the three schemes

项目	类别	方案一	方案二	方案三
初投资 /万元	设备投资	256	397	388
	土建投资	270	145	0
	小计	526	542	388
年耗 /万元	设备年费(按 20 a 折算)	12.8	19.9	19.4
	土建年费(按 100 a 折算)	2.7	1.5	0
	初投资折合年费	15.5	21.3	19.4
年运 营费 /万元	电费	75.1	60.4	53.8
	水费	48.1	16.6	16.6
	维护费	1	2	3
年运营费总计/万元		124.2	79	73.4
年总费用合计/万元		139.7	100.3	92.8

常规水冷冷水空调系统虽然设备初投资低,但因其土建需求大,土建初投资费用极高,致使其寿命周期内的年总费用高达 139.7 万元。整体式蒸发冷凝空调系统与直膨式蒸发冷凝空调系统的年总费用为 100.3 和 92.8 万元,分别为传统空调系统的 72%和 66%。整体式蒸发冷凝空调系统与直膨式蒸发冷凝空调系统的设备初投资较接近,但因直膨式蒸发冷凝系统省去了冷源机房,节省了大量的土建费用,同时因省去冷冻水与冷却水系统而具有更小的运行能耗,故其寿命周期内年总费用最低,体现出最好的经济性。

3 结论

鉴于地铁车站空调系统能耗时变性,本文搭建了基于负荷判断和分时调控的地铁车站空调系统瞬态能耗预测模型。进而,应用该模型开展了地铁车站空调系统冷源方案优化分析。本研究可为地铁车站空调系统的节能设计及运行优化提供有效工具及数据支撑,详细结论如下:

(1)基于负荷判断和分时调控的地铁车站空调系统瞬态能耗预测模型可依据动态负荷数据实现设备台数精确控制,能够对地铁车站空调系统瞬态能耗进行准确预测。此模型较之以往基于稳态负荷的算法能更加精确反映空调系统瞬态特征,且普适性更好。对于已有系统可根据模型预测结果重新规划空调系统启停或系统方案进行优化,对于新系统可参考模型预测结果进行建设;

(2)对于案例车站,三种冷源方案中,直膨式蒸发冷凝空调系统能效比最高,节能性能最佳,使用直膨式蒸发冷凝替代常规水冷冷水空调系统,可实现节能 28.4%;

(3)常规水冷冷水空调系统设备初投资最低,但土建需求高。全寿命周期经济分析表明,直膨式蒸发冷凝空调系统年综合费用最低,仅为常规系统的 66%,经济效益最佳。

参考文献 References

- [1] LI G, MENG X, ZHANG X, et al. An innovative ventilation system using piston wind for the thermal environment in Shanghai subway station[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32:101276.
- [2] LV W, LI A, MA J, et al. Relative importance of certain factors affecting the thermal environment in subway stations based on field and orthogonal experiments [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 56:102107.
- [3] YIN H, YANG C, YI L, et al. Ventilation and air conditioning system of deep-buried subway station in

- sub-tropical climates: Energy-saving strategies [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 178:115555.
- [4] PAN S, WANG H, PEI F, et al. An investigation on energy consumption of air conditioning system in Beijing subway stations[J]. Energy Procedia, 2017, 142: 2568-2573.
- [5] PAN S, PEI F, WEI Y, 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.
- [6] 郭谊婵. 蒸发式冷凝技术在地铁车站空调系统中的应用研究[J]. 黑龙江科技信息, 2017(17): 82-83.
- GUO Yichan. Research on application of evaporative condensation technology in air conditioning system of metro station[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2017(17): 82-83.
- [7] WEN X, CAI L, ZHANG X, et al. Theoretical and experimental research on high efficiency screw chiller used in subway station [J]. Procedia Engineering, 2017, 205:373-380.
- [8] SU Z, LI X. Sub-system energy model based on actual operation data for subway stations[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 52:101835.
- [9] FUKUYO K. Application of computational fluid dynamics and pedestrian-behavior simulations to the design of task-ambient air-conditioning systems of a subway station[J]. Energy, 2006, 31(5): 706-18.
- [10] 王晖, 郝盛. 地铁环控系统节能诊断分析[J]. 都市轨道交通, 2012, 25(3): 48-51.
- WANG Hui, HAO Sheng. Energy-saving diagnosis analysis of subway environmental control system[J]. Metropolitan Rail Transit, 2012, 25(3): 48-51.
- [11] 许巍, 王怀良, 罗硕成. 蒸发式冷凝空调系统在地铁中的应用[J]. 暖通空调, 2011, 41(6): 43-6.
- XU Wei, WANG Huailiang, LUO Shuocheng. Application of evaporative condensing air conditioning system in metro[J]. HVAC, 2011, 41(6): 43-46.
- [12] 苏晓青, 黄翔, 高源基. 蒸发式冷凝(冷却)技术在地铁通风空调系统中的应用[J]. 制冷与空调, 2016, 16(9): 12-4,20.
- SU Xiaqing, HUANG Xiang, GAO Yuanji. Application of evaporative condensation (cooling) technology in subway ventilation and air-conditioning system[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2016, 16(9): 12-14,20.
- [13] 周游, 李财钧. 广州地铁集中空调冷源的选择[J]. 制冷与空调, 2015, 15(7): 54-58,42.
- ZHOU You, LI Caijun. Selection of cold sources for centralized air conditioning in Guangzhou metro[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2015, 15(7): 54-58,42.
- [14] 张超, 丁路. 蒸发冷凝式螺杆冷水机组在地铁车站空调系统中的应用[J]. 暖通空调, 2018, 48(1): 96-98,108.
- ZHANG Chao, DING Lu. Application of evaporative-condensing screw chiller in the air-conditioning system of subway station [J]. HVAC, 2018, 48(1): 96-98,108.
- [15] 石金凤, 张静, 刘善金, 等. 南京某地铁换乘车站空调冷源设置方案研究[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(1): 78-85.
- SHI Jinfeng, ZHANG Jing, LIU Shanjin, et al. Research on the setting plan of air-conditioning cold source for a subway transfer station in Nanjing [J]. Metropolitan Rail Transit, 2019, 32(1): 78-85.
- [16] 付强, 冯炼, 袁中原. 地铁车站变风量空调系统能耗模拟分析[J]. 制冷与空调(四川), 2019, 33(1): 21-24,39.
- FU Qiang, FENG Lian, YUAN Zhongyuan. Simulation analysis of energy consumption of variable air volume air conditioning system in metro station[J]. Refrigeration and Air Conditioning (Sichuan), 2019, 33(1): 21-24,39.
- [17] 常军. 北京新建地铁通风空调系统模拟分析[J]. 建筑科学, 2006(5): 27-34.
- CHANG Jun. Simulation analysis of ventilation and air conditioning system in Beijing's new metro[J]. Building Science, 2006(5): 27-34.
- [18] 朱培根, 张宏, 何志康, 等. 地铁环控节能策略研究[J]. 制冷与空调, 2010, 24(5): 80-3.
- ZHU Peigen, ZHANG Hong, HE Zhikang, et al. Research on energy conservation strategy of metro environmental control [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2010, 24(5): 80-83.
- [19] 朱培根, 朱颖心, 李晓峰. 地铁环控模拟与分析[J]. 地下空间, 2004(2): 161-5.
- ZHU Peigen, ZHU Yinxin, LI Xiaofeng. Metro environmental control simulation and analysis[J]. Underground Space, 2004(2): 161-165.
- [20] 周群, 高吉祥, 罗佳. 直膨式蒸发冷凝空调系统应用于南方地铁车站的可行性分析[J]. 建筑技术开发, 2017(1): 151-152.
- ZHOU Qun, GAO Jixiang, LUO Jia. Feasibility analysis of direct expansion evaporative condensing air conditioning system applied in southern metro station[J]. Building Technology Development, 2017(1): 151-152.
- [21] 李国庆, 孟鑫, 张晓伟, 等. 新型蒸发冷凝型冷媒直膨式通风空调系统在地铁车站中的应用[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(3):52-56.
- LI Guoqing, MENG Xin, ZHANG Xiaowei, et al. Application of new type of evaporative condensing refrigerant direct expansion ventilation and air conditioning system in metro station [J]. Metropolitan Rail Transit, 2019, 32(3):52-56.