

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2020.04.018

屏蔽门制式地铁车站环控系统 过渡季运行策略研究

张 越, 李晓锋

(清华大学建筑技术科学系, 北京 100084)

摘 要: 从地铁车站的舒适性和节能角度出发, 对其环境控制系统存在普遍争议的过渡季运行模式展开讨论。首先基于能耗最低原则选出全新风空调模式和单排通风模式两种可能的运行模式; 再运用理论推导给出两种模式的切换温度条件, 并总结出切换温度的计算方法。根据此计算公式, 对于包括室内负荷、制冷系统性能系数、风机效率、风道阻力、送风温差等主要影响因素进行分析。利用此计算公式, 给出不同室内负荷、制冷系统性能系数和风机效率的切换温度线算图, 此计算方法和线算图可用于实际工程的运行模式分析, 从而能够实现地铁车站环境控制系统过渡季运行的规范化和节能化。

关键词: 城市轨道交通; 地铁; 环境控制系统; 过渡季; 节能

中图分类号: U231.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2020)04-0109-04

Operation Strategy of Environment Control System in Subway Station with Platform Screen Doors during Transition Seasons

ZHANG Yue, LI Xiaofeng

(Department of Building Science, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: The demand of comfort and energy-efficiency in subway stations indicates that their environment control system operation strategy requires improvement, especially during transition seasons, when there is no consensus on environmental control systems. Primarily, two possible modes, including a completely fresh air conditioning and back/exhaust fan-ventilation mode, were proposed based on the minimum energy consumption principle. The method of calculating the transfer temperature condition via theoretical analysis is presented in this paper. The calculation formula indicates that factors including indoor cooling load, performance of chiller and fan, resistance of air duct, and supply air temperature show an effect on the value of transfer temperature. Using the proposed formula, the transfer temperature diagram was presented. The formula and diagram are useful in engineering analysis and provide guidance to the optimal operation in subway stations during transition seasons.

Keywords: urban rail transit; subway; environment control system; transition season; energy saving

中国近年来地铁建设飞速发展, 其环控系统主要由隧道通风系统、公共区通风空调系统(大系统)、设备管理用房通风空调系统(小系统)及车站空调水系统

4 部分组成。研究表明, 环控系统实际运行能耗占比可达地铁总能耗的 30%~50%, 大系统是其中能耗占比最大的子系统^[1]。大系统的主要作用是控制站厅及站台区域的温湿度、流速和空气品质。其设计工况的选择、系统的形式以及运行管理都对节能起着至关重要的作用^[2]。因此在已定的设计方案下, 运行模式优化是环控系统节能的关键所在。

当室外空气焓值处于送风焓值与室内焓值控制目标值之间的过渡季时, 地铁环控大系统的运行模式尚

收稿日期: 2019-05-13 修回日期: 2019-06-05

第一作者: 张越, 女, 博士研究生, 从事地下轨道交通环境与能耗的研究, 812687294@qq.com

导师简介: 李晓锋, 男, 副教授, 博士生导师

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0705000)

无定论,大多数研究仅用室外气象判定冷水机组启停切换点:有研究认为室外焓值处于送风焓值与室内控制焓值之间的过渡季仍应开启冷水机组,运行全新风空调模式^[3-5]。而有些研究指出当室外温度低于室内控制温度时就应该关闭冷水机组运行通风模式^[6-8]。机械通风更是存在单排、单送和送排平衡多种模式的争论:王栋等^[7]认为应同时开启送风机和回/排风机,运行送排平衡模式;王锋等^[5]认为机械通风模式应采取单送模式,仅开启送风机进行通风;周伟军等^[6,8]认为应仅开启回/排风机,运行单排通风模式。因此过渡季在不同室外条件下应采用何种运行模式及其切换条件尚无定论,有必要对此进行细致的研究。

对屏蔽门制式的地铁车站环控大系统的运行模式展开研究,研究时段专注于偏暖过渡季(室外焓值高于送风焓值、低于室内控制焓值)。首先对3种通风模式进行优缺点分析,综合舒适和节能优选出单排通风模式。再通过理论分析对过渡季两种可行的运行模式(全新风空调模式和单排通风模式)给出两种模式切换温度的计算公式,并指出模式切换点的影响因素。最后,利用理论公式对于几个实例进行了计算,给出了工程适用的切换策略。本研究可为地铁车站环控大系统运行模式优化和自控方案改进提供参考。

1 过渡季运行模式分析

过渡季可采用空调或通风模式运行。运行空调模式时,因为室外空气焓值低于室内控制焓值,应采用全新风空调模式,其中气流组织方式有送排平衡和单送两种,目前许多设计和实际运行方案均采用送排平衡方案。运行通风模式时,气流组织方式有送排平衡、单送和单排模式3种。对于屏蔽门制式的地铁车站,3种方式的具体信息及其优缺点总结见表1。

表1 3种气流组织方式比较

Tab. 1 Comparison of 3 ventilation modes

模式名称	送排平衡	单送	单排
运行风机	送风机+回风机	送风机	排风机
运行能耗	最大	居中	最小
气流组织	送风道进风 回/排风道排风	新风道进风 车站出入口排风	车站出入口进风 回/排风道排风
舒适度	出入口无吹风感 车站零压	进站乘客迎面暖风 车站正压	出站乘客迎面冷风 车站负压

首先,3种通风模式中运行风机数量和风道阻力不同,导致运行能耗不同:送排平衡模式开启两台风

机,运行能耗明显高于单排和单送模式;对比单送和单排两种通风模式,在管道沿程阻力和局部阻力大致相同的情况下,由于送风通路上空调箱的存在,送风通路阻力高于回/排风通路阻力,因此,在相同的风量下单送模式的风机运行能耗高于单排。其次,由于气流组织形式不同,进出站乘客舒适度感受也有所不同。送排平衡模式下由于车站处于近零压状态,出入口无明显吹风感。单排或单送模式下由于车站处于负压或正压状态,出入口处存在一定吹风感。单送模式下进站乘客迎面吹来站厅的室内风,此情况下风温度较为适宜,舒适度较好;单排模式下出站乘客迎面吹来室外风,但在过渡季室外温度在设定的送风温度(18℃)以上,舒适度可接受。

出于节能和舒适度的综合考虑,若开启冷机运行全新风空调模式,则优选单送模式;若关闭冷机运行通风模式,则优选单排通风模式。因此,过渡季两种可能的运行模式为单送的全新风空调模式或单排通风模式。

2 过渡季运行模式切换条件

单排通风模式无冷机电耗,但在过渡季节(室外温度高于送风温度)与全新风空调模式相比送风温差小,风机能耗大。所以单排通风与全新风空调两种模式的切换条件无法直接得到,需要进行定量分析。

先定义室外和送风点的温差 ΔT_{os} 、室内和送风点的温差 ΔT_{is} 。式(1)给出全新风空调模式下的系统能耗 P_{AC} 计算方式, P_{AC} 包括冷水系统能耗 P_{chill} 和送风机能耗 $P_{supply fan}$ 两部分;冷水系统能耗 P_{chill} 可以由冷负荷除以制冷系统 COP_{sys} 计算得出,送风机能耗 $P_{supply fan}$ 可以根据风量、扬程和风机效率计算得出。式(2)给出单排通风模式下系统的能耗 P_{Vent} 的计算方式, P_{Vent} 仅来自于回/排风机能耗 $P_{back/ex fan}$ 。

根据切换温度下全新风空调模式和单排通风模式能耗相等原理,可以推导出模式切换的室外温度 $T_{outdoor}$ 的隐式表达式(3),系数 a, b, c 由以下影响因素确定:室内负荷 Q_{in} 、冷水系统 COP_{sys} 、送风温差 ΔT_{is} 、风机效率 η_{supply} 、 $\eta_{back/ex}$ 、风道阻力系数 S_{supply} 、 $S_{back/ex}$ 。

$$P_{AC} = P_{chill} + P_{supply fan} = \frac{Q_{indoor}}{COP_{sys}} \times \frac{\Delta T_{os}}{\Delta T_{is}} + \frac{S_{supply}}{\eta_{fan} \times (\rho G)^3} \times \left(\frac{Q_{indoor}}{\Delta T_{is}} \right)^3 \quad (1)$$

$$P_V = P_{back/ex\ fan} = \frac{S_{back/ex}}{\eta_{fan} \times (\rho G)^3} \times \left(\frac{Q_{indoor}}{T_{indoor} - T_{outdoor}} \right)^3 \quad (2)$$

$$a \times (T_{outdoor} - T_{indoor})^4 + b \times (T_{outdoor} - T_{indoor})^3 + c = 0 \quad (3)$$

式中, $a = \frac{Q_{indoor}}{COP_{sys} \Delta T_{is}}, b = \frac{S_{supply} Q_{indoor}^3}{\eta_{supply} (\rho C_p \Delta T_{is})^3} + \frac{Q_{indoor}}{COP_{sys}},$

$$c = \frac{S_{back/ex} Q_{indoor}^3}{\eta_{back/ex} (\rho C_p)^3}$$

取表 2 参数应用以上公式进行计算, 其中室内负荷、送风温度、风道阻力、风机效率按照某夏热冬冷地区城市近期实际工况取值。

表 2 算例参数设置

参数	符号	数值	单位
室内负荷	Q_{in}	100	kW
送风温度	T_{supply}	18	℃
室内控制温度	T_{in}	28	℃
送风道阻力系数	S_{supply}	2.16	Pa/(m³/s)²
回/排风道阻力系数	S_{back}	1.44	Pa/(m³/s)²
送风机效率	η_{supply}	70%	/
回/排风机效率	$\eta_{back/ex}$	70%	/

根据节能原则, 应尽量将室内温度控制在舒适范围的上限温度。相对热舒适指数 RWI(relative warmth index)和热损失率 HDR(heat deficit rate)是美国运输部为确定地铁车站站台、站厅和列车空调设计参数而提出的考虑人体再过渡空间热反应的热舒适指标^[9]。江泳研究了车站温度上限和室外温度的关系^[10], 根据他的研究结果, 笔者研究的过渡季室外温度区间范围(19~28℃)对应的室内温度上限为 27~28℃, 因此, 采用 28℃作为此时段的室内温度控制目标值。

按照车站实际的负荷情况, 选取符合《公共建筑节能设计标准》^[11]的冷水机组样本, 在不同室外气温下冷机负载率不同、冷却水出水温度不同。随着室外气温的下降, 冷机负载率降低、内部效率(DCOP)下降; 冷却水出水温度降低, 外部效率(ICOP)上升, 最终的冷机 COP 是 DCOP 与 ICOP 的乘积。综合考虑冷冻水和冷却水输配系数, 得到制冷系统 COPsys 可用作后面的全新风空调模式能耗计算。表 3 给出了在不同室外温度情况下 DCOP、ICOP、冷机 COP、制冷系统 COPsys 的计算结果。

表 3 冷水系统效率

室外温度/℃	DCOP	ICOP	冷机 COP	系统 COPsys
27	0.51	12.17	6.16	4.92
26	0.45	12.73	5.79	4.68
25	0.41	13.33	5.40	4.43
24	0.36	14.00	5.00	4.15
23	0.31	14.74	4.58	3.86
22	0.27	15.56	4.13	3.53
21	0.22	16.47	3.65	3.18
20	0.18	17.50	3.14	2.78
19	0.14	18.67	2.58	2.34

计算得到的全新风空调和单排通风在不同室外温度下的运行能耗如图 1 所示。根据能耗最低原理优选运行模式, 可以得出冷机启停切换的室外温度约为 24℃, 工程运行时, 若室外温度高于此切换温度, 则应运行全新风空调模式; 室外温度低于此切换温度时, 则应运行单排通风模式。

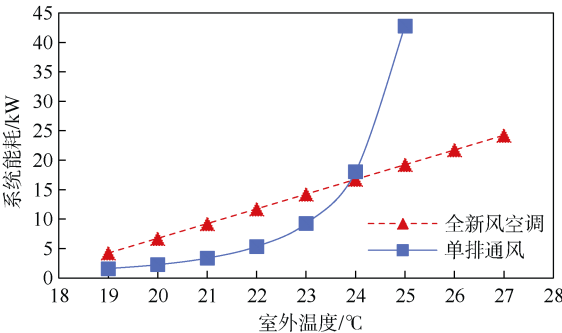


图 1 系统能耗随室外温度变化关系

Fig. 1 Relationship between energy consumption and outdoor temperature

按照理论公式, 切换温度的影响因素有室内负荷(设备、灯光、人员产热量) Q_{in} 、制冷系统效率 COP_{sys} 、送风温差 ΔT_{is} 、风机效率 η_{supply} 及 $\eta_{back/ex}$ 、风道阻力系数 S_{supply} 及 $S_{back/ex}$ 。对大多数地铁车站, 送风温差 ΔT_{is} 取值较为固定, 风道阻力系数变化范围很小, 因此主要选取室内负荷、风机效率、制冷系统平均效率 3 个影响因素进行探讨, 其取值范围分别为室内负荷 $Q_{in} \in [50\text{ kW}, 300\text{ kW}]$ 、风机效率 $\eta \in [50\%, 70\%]$ 、制冷系统平均效率 $COP_{sys} \in [3, 5]$ 。

根据公式和上述参数取值范围, 算出不同情况下全新风空调模式和单排通风模式的切换温度如图 2 所示, 可见室内负荷 Q_{in} 的提高使制冷系统平均效率 COP_{sys} 提高, 从而使风机效率 η 降低, 切换温度也随

之降低。在室内负荷为 100 kW 时, 切换温度在 23.6 ± 0.7 °C; 室内负荷为 200 kW 时, 切换温度在 21.0 ± 0.7 °C; 室内负荷为 300 kW 时, 切换温度在 20.0 ± 0.4 °C。可以根据工程实际情况, 采用图 2 所示线图查得切换温度, 进而判断过渡季室外某状态下应运行全新风空调或是单排通风模式。

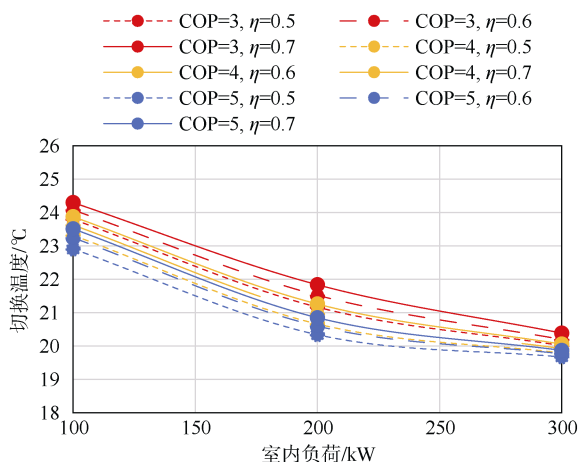


图2 不同影响因素下的切换温度线图

Fig. 2 Transfer temperatures under different conditions

3 结语

对地铁车站环控大系统过渡季的运行模式进行了探讨。首先优选出全新风空调和单排通风两种可能的运行模式; 再通过理论推导给出了两种模式切换温度的计算方法, 此切换温度由一元四次方程式隐式表示, 影响因素包括室内负荷、制冷系统 COP、风机效率、风道阻力、送风温差; 最后对于不同室内负荷、制冷系统 COP、风机效率进行了影响因素分析, 并给出了切换温度的计算线图, 从图中可以看出, 在室内负荷为 100、200、300 kW 时, 切换温度在 23.6 ± 0.7 °C、 21.0 ± 0.7 °C、 20.0 ± 0.4 °C。

实际工程判断运行模式时, 既可以使用理论公式进行计算, 也可参照本文给出的切换温度线图进行判定, 从而能够有效指导地铁车站环控大系统过渡季运行模式的正确选择, 实现节能运行。

参考文献

[1] 丁大勇, 许玲, 朱培根, 等. 地铁运行初期通风空调系统能耗模拟与分析[J]. 建筑热能通风空调, 2008(2): 69-72.
DING Dayong, XU Ling, ZHU Peigen, et al. Energy consumption simulation and analysis of ventilating and air conditioning system of metro during its primary stage service[J]. Building energy & environment, 2008(2): 69-72.

[2] 高波, 李先庭, 韩宗伟, 等. 地铁通风空调系统节能的新进展[J]. 暖通空调, 2011, 41(8): 21-26.
GAO Bo, LI Xianting, HAN Zongwei, et al. Energy saving progress of ventilation and air conditioning system for underground railway stations[J]. HV & AC, 2011, 41(8): 21-26.

[3] 杨东旭. 地铁空调通风节能研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
YANG Dongxu. Study on the energy-saving of air-conditioning & ventilation in subway[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.

[4] 常莉. 地铁环控系统区域适用与节能性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
CHANG Li. The regional applicability and energy efficiency analysis research for the metro environment control system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.

[5] 王锋. 地铁车站公共区通风空调系统智能控制的研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2012.
WANG Feng. Research on intelligent control for the ventilation and air conditioning system in the public area of subway station[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2012.

[6] 周伟军. 过渡季节地铁环控模式分析研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
ZHOU Weijun. The analysis research for the metro environment control systems in transition seasons[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.

[7] 王栋, 吴喜平, 于连广. 地铁车站过渡季节环控测试研究[J]. 建筑节能, 2010, 38(11): 72-75.
WANG Dong, WU Xiping, YU Lianguang. Environment control test research of subway station in transitional seasons[J]. Building energy efficiency, 2010, 38(11): 72-75.

[8] 周伟军, 冯炼, 罗世辉. 过渡季节地铁环控模式比较分析[J]. 制冷与空调(四川), 2008(3): 101-103.
ZHOU Weijun, FENG Lian, LUO Shihui. The comparative analyses for the metro environment control system in transitional seasons[J]. Refrigeration and air conditioning, 2008(3): 101-103.

[9] United States Department of Transportation. Subway environment design handbook (Volume 1) [M]. 1976.

[10] 江泳. 地铁环控系统全年运行研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.
JIANG Yong. Year-round operation of subway environment control system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2002.

[11] 公共建筑节能设计标准: GB 50189—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Design standard for energy efficiency of public buildings: GB 50189—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.

(编辑: 王艳菊)