

文章编号:1000-582X(2009)02-0218-05

北方地铁屏蔽门系统能耗分析及节能改造

曹荣光¹, 由世俊¹, 董书芸²

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 中国地铁工程咨询有限责任公司, 北京 100037)

摘要:分析北方地铁屏蔽门系统节能效果, 确定可有效利用活塞风的节能改造方案。采用 EnergyPlus 能耗模拟软件综合评价北方城市不同地铁环控方案, 并利用 Airpak 模拟站台温度场和速度场预测改造后的效果。比较发现屏蔽门系统与自动门系统相比仅节能 2%, 在北方城市节能效果不明显。分析发现屏蔽门系统通风尤其是站台下排风能耗过高, 过渡季节和冬季的活塞风是解决这一问题的关键。屏蔽门增加可调节的风口, 可在过渡季节和冬季有效利用活塞风, 引入站台可补充新风量, 节省机械通风耗能, 夏季关闭风口仍保留其节能优势, 全年能耗可再减少 30%, 节能效果明显。

关键词:屏蔽门; 安全门; 活塞风; 地铁通风; 节能; 计算流体力学; 能耗分析

中图分类号:U231.5

文献标志码:A

Energy consumption analysis and reconstruction of subway platform screen doors in northern cities for energy-saving

CAO Rong-guang¹, YOU Shi-jun¹, DONG Shu-yun²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China;

2. China Metro Engineering Consulting Corporation, Beijing 100037, P. R. China)

Abstract: To analyze the influence of the platform screen doors (PSD) on energy consumption of subway environmental control systems in northern cities and to make good use of piston wind, EnergyPlus, an energy analysis and thermal load simulation program, is used to evaluate such systems in northern cities. A computational fluid dynamics (CFD) simulation is made to model the velocity and temperature field of a subway station and to predict the effect on PSD reconstruction using Airpak. Compared to a system with automatic platform gates, a PSD system has 2% lower energy consumption. Thus, PSDs are inefficient for saving energy in northern cities. Because electricity consumption by ventilation equipment increases notably when PSDs are used, particularly by under platform exhaust fans, little difference exists in the overall energy consumption with or without PSD. More thoroughly using piston wind in transition seasons and the winter is the key to solving the high energy consumption problem. The energy analysis and CFD simulation results show that the adjustable vents in PSD can use the piston process to introduce outside air, thereby reducing ventilation energy consumption notably. Because the vents can be closed, PSDs also can save energy in the summer. Using these recommendations can reduced annual energy consumption 30%.

Key words: platform screen doors; automatic platform gates; piston wind; subway ventilation; energy saving; computational fluid dynamics; energy consumption analysis

收稿日期:2008-10-23

基金项目:天津市科学技术委员会社会发展资助项目(033112911)

作者简介:曹荣光(1979-),男,天津大学博士研究生,主要从事暖通空调系统节能方向的研究。

由世俊(联系人),男,天津大学教授,博士生导师,(E-mail)yousj@tju.edu.cn。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

随着世界城市地铁的迅速发展,地铁环境控制问题也愈来愈引起人们的关注。而影响站台和站厅环境的主要因素,活塞风、列车产热、颗粒物等污染、噪声主要来自隧道,因此有必要将隧道和站台公共区分隔开。地铁屏蔽门不但将来自隧道对候车环境的不利影响有效隔离了,还可以防止乘客跌落或跳下轨道而发生危险,为乘客提供了舒适、卫生、安全的候车环境。

由于隧道的得热量主要来自于刹车机构和列车及乘客,在夏季典型条件下地铁系统得热量超过 80%来自于列车的刹车机构,屏蔽门可以有效隔断这部分热量,一般来讲,屏蔽门系统的夏季空调负荷大约只占不设置站台屏蔽门时空调负荷的 1/3,减小了空调设备的容量降低了初投资,同时夏季空调的运行费用也大大降低。^[1-7]

然而,在温度较低的过渡季节和冬季,这部分热量又是有利于提高站台舒适性的因素。对于北方城市夏季持续高温时间比南方城市短,在较长的过渡季节和冬季期间屏蔽门系统起不到很好的节能效果。因此,应当综合考虑屏蔽门在北方城市地铁应用的利弊。过渡季节和冬季活塞风温度不高,有效利用活塞风,引入站台可补充新风量,节省机械通风耗能,这是在北方城市应用屏蔽门系统实现经济节能的关键。

1 EnergyPlus 能耗模拟

1.1 2 种系统全年空调通风运行模式

依据天津市室外气象资料,通过对天津市近 20 年来各个月份的最高温度、最低温度以及平均温度的统计与分析,将 6、7 和 8 月划分为夏季酷热季,将 12、1 和 2 月划分为冬季严冬季,而其它 6 个月为过渡季^[8-10]。

1.1.1 半高安全门系统全年空调通风模式

夏季:在空调运行时间(5~23 时)18 h 内,当室外空气焓值高于回风焓值时,系统采用最小新风量空调工况;当室外焓值小于等于车站回风焓值时,系统转为全新风运行模式,车站空调进入全新风空调运行状态。夏季无夜间通风。

过渡季:地铁运行时间内(5~23 时)转为开式运行,制冷系统关闭,车站进入通风运作模式。此时,采用活塞风井自然进风,靠活塞风冷却隧道区间。过渡季无夜间通风。

冬季:冬季采用通风模式,在室外空气温度小于 0℃时,这种控制方式仍可能会使地下站台温度在 5℃以下。此时,地铁系统通风运行方式应为封闭式运

行,出入口进风,且仅靠自然通风来维持满足乘客舒适度的最小新风量 $12.6 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{h}^{[11-12]}$ 。靠活塞风在区间内的流动来冷却隧道区间。冬季无夜间通风。

1.1.2 屏蔽门系统全年空调通风模式

夏季:空调运行模式与安全门系统相同。新风均由每站的新风机提供。区间通风方式为站台两侧列车出站端活塞风井进风。在列车的活塞风作用下,流过下游区间隧道,由下一站的站台下排风机排出,以冷却隧道区间。夜间工况(23~5 时)6 h 内活塞风口进风、机械方式排风,以冷却隧道区间。

过渡季:当进入过渡季节,此时地铁转为通风运行工况,空调水系统关闭,空调系统停止供冷。可仅开启新风机。区间机械通风方式与夏季相同。

冬季:站台区域由新风机供给维持满足乘客舒适度的最小新风量 $30 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{h}^{[11-12]}$ 。冬季隧道区通风,活塞风井自然进风,活塞风在隧道内流动冷却区间隧道。无夜间通风。

1.2 下瓦房站概况及物理模型

算例所选取能耗模拟分析模型为天津地铁一号线下瓦房站。天津处于中国华北地区,东经 $117^\circ 10'$,北纬 $39^\circ 10'$ 。下瓦房车站为双层岛式站台结构布局,分为站厅层和站台层。车站结构尺寸为: $120 \text{ m} \times 19.2 \text{ m} \times 8.13 \text{ m}$ 。安全门形式为半高安全门。模拟主要模拟计算分析车站公共区能耗,故将站厅层公共区和站台层公共区作为 2 个分区进行模拟。设备等散热量均为定值,人员负荷则根据早高峰预测客流量和各时刻的客流密度计算^[13]。

1.3 地铁站空调通风能耗分析

图 1 是计算得到的屏蔽门系统和无屏蔽门系统的地铁站逐时得热量,安装屏蔽门之后地铁站得热量减少到原来的 1/3,从而可以减少空调设备的容量,减少空调设备部分的初投资和运行费用。然而比较 2 种系统模式的全年通风空调方案,会发现虽然屏蔽门系统减少了设备容量,但增加了一年四季的新风机运行能耗和夜间的通风能耗。另外为保证隧道中温度不超过 $37^\circ\text{C}^{[12]}$,安装屏蔽门之后,隧道机械通风兼排烟系统,即 TVF 系统和车站范围内、屏蔽门外站台下排热和车行道顶部排热兼排烟系统,即 UPE/OTE 系统,2 个系统的风量需增加。经计算发现各个月的能耗变化如图 2 所示,夏季屏蔽门系统的能耗大约是半高安全门系统的 1/2,但其它季节屏蔽门系统都高于半高安全门系统。

全年 2 系统空调能耗、通风能耗比较,如图 3 示。由图 3 可以看出全年半高安全门系统的空调能耗大于屏蔽门系统的空调能耗,前者约为后者的 2.2 倍。

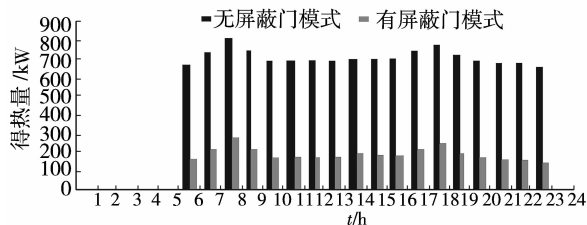


图 1 地铁站逐时得热量

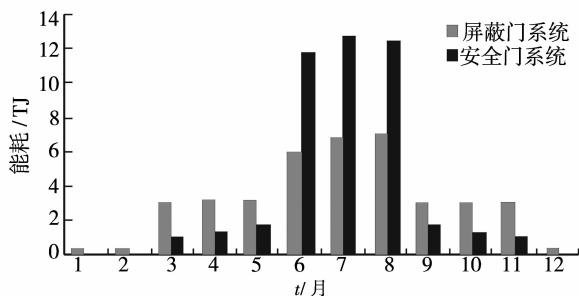


图 2 地铁站各个月的能耗变化图

而屏蔽门系统的通风能耗则大于半高安全门系统的通风能耗,前者约为后者的 1.55 倍。同时综合可以看出半高安全门系统全年空调能耗大于通风能耗,而屏蔽门系统全年空调能耗小于通风能耗。半高安全门系统全年空调通风总能耗为 4.14 TJ,屏蔽门系统全年空调通风总能耗为 4.05 TJ。屏蔽门系统比半高安全门系统节能约 0.09 TJ。全年屏蔽门系统的空调通风能耗大约为半高安全门系统通风能耗的 98%。屏蔽门系统比半高安全门系统节约耗电量约 24 145 kWh。^[14]

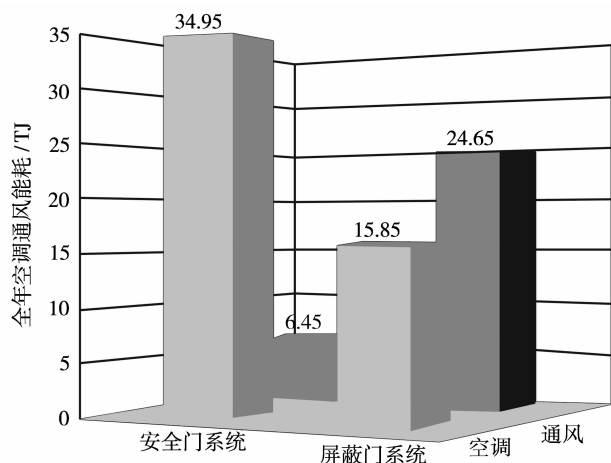


图 3 全年 2 系统空调、通风能耗比较

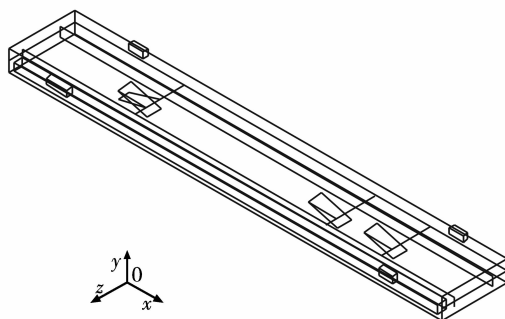
2 活塞风的有效利用

整个列车进站的过程中,风压表现为负压向正

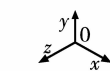
压变化的过程,出站的过程基本上表现为负压的先增大后减弱的过程^[15]。如果很好地利用这个压力的变化,就可以有效利用活塞风的作用,在列车进站时,将车站需要的热量由隧道送入候车区,在列车出站时,由出入口将车站需要的新风吸入到候车区。因此设计了一种带有风口的屏蔽门,在温度比较低的过渡季节和冬季,打开风口,在夏季则关闭风口,从而实现全年更进一步的节能。

2.1 模型的建立及边界条件的设置

仍然根据下瓦房站的情况建立物理模型,采用 Airpak 进行数值模拟。几何模型如图 4 所示。按冬季工况通风情况进行模拟。为简化计算和了解单侧进车活塞风的变化规律,模型中仅考虑单侧进车,发车间隔按每小时 30 对计算。



(a)



(b)

1. 站厅层送风口; 2. 乘客出入口; 3. 站台层轨顶排风口;
4. 列车; 5. 站台层送风口; 6. 站台层轨底排风口;
7. 屏蔽门; 8. 楼梯口; 9. 站台回风口

图 4 屏蔽门系统车站整体模型及 x 方向断面图

2.1.1 车站各项发热量设定

1) 列车发热量

由于列车发热量在安全门系统热负荷中占到 60% 以上,所以列车发热量的精确设定非常重要。

经计算得到,机车冷凝器和制动电阻的发热量为

528.5 kW。其中,冷凝器和制动电阻均可看作是沿轨道方向均匀散热的热源。

2) 照明灯具

车站公共区 13 W/m^2 。

3) 广告灯箱

站厅 20 kW/站 , 站台 30 kW/站 。散热位置布置在地铁站台的侧墙壁上。

4) 人员散热量

按站厅、站台 29°C 时 182 W/人计 。

2.1.2 边界条件设置

由于活塞风进入车站进站口是一个非稳态的过程,气体流速不断变化,但可在一段时间维持一个相对稳定的速度值,通过实测这段时间风速值取平均值作为模拟的边界条件。

壁面温度 13°C ; 列车进站口活塞风速度 3.1 m/s ; 列车进站口的对口活塞风速度 0.6 m/s ; 列车进站口的邻口活塞风速度 1.08 m/s ; 列车进站口的斜对口活塞风速度 0.5 m/s 。

2.2 速度场及温度场分析

图5为打开风口的状态,列车进站时,隧道的压力增大而使风吹到站台上。为了避免给候车的乘客带来不舒服的吹风感,风口的位置设置在脚踝位置和头顶以上位置。图5中显示风速比较高的区域在人的头顶以上和脚踝处,人员活动区域风速在 1.2 m/s 左右,有轻微吹风感。在风口处加装过滤器还可滤除隧道里的尘、菌等污染物。

图6为列车开始运行 10 min 温度场变化情况。选取了4个点监测车站的温度变化,分别为站台中心位置的点 $(0, 0, 4, 9.1)$, 站厅中心位置的点 $(0, 0, 6, 9.1)$, 站台靠近楼梯口位置的点 $(45, 4, 9.1)$, 站台靠近出入口位置的点 $(45, 6, 9.1)$ 。由图6可以看出冬季站台温度可以达到 10°C 以上,站厅温度可以达到 0°C 以上,出入口处由于不断吸入室外新风,温度波动比较大。

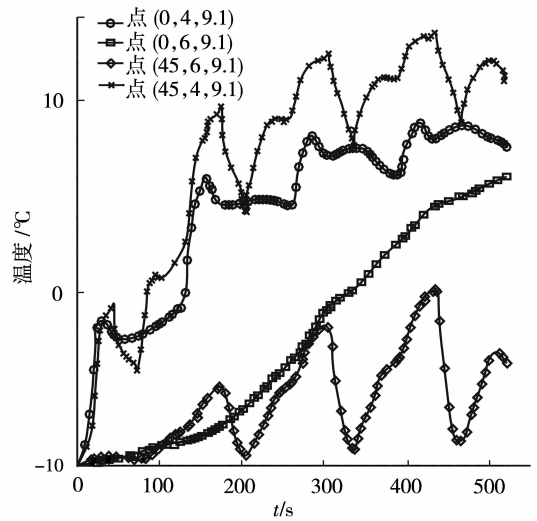


图6 列车开始运行 10 min 温度场变化图

2.3 节能效果分析

列车进站的时候,隧道内形成较大的正压,使得车站内的空气由出入口流出;列车出站的时候,隧道内形成较大的负压,可以将出入口的新风吸入。统计4个出入口的风量得到列车进出站时进入空间的最高风量约为 $45 \text{ m}^3/\text{s}$,进风时间约为整个周期的 $1/4$,双向列车交替运行时,进风时间大约占整个周期的一半时间,按照每人需新风量 $12.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 计算,由于活塞风作用进入空间的新风量,可满足约 6500 人的需求,从而可大大减少新风机的运行时间。另外由于活塞风的作用将部分热量带入站台,可相应减少轨底排风的风量。若按风机功率为 110 kW ,在屏蔽门系统基础上可再节约能耗 1.21 TJ ,为屏蔽门系统总能耗 4.05 TJ 的 30% ,占屏蔽门系统通风能耗 2.47 TJ 的 50% 。

3 结论

1) 北方城市地铁屏蔽门系统节能效果不明显,与安全门系统相比较仅节能 2% 左右。

2) 冬季活塞风作用可为站台带来隧道的热量,提高冬季站台的舒适性,并为过渡季节和冬季提供大量新风,因此在过渡季节和冬季活塞风是节能降耗的有利因素,应当合理有效利用活塞风。

3) 屏蔽门增加风口之后,由于风口可关闭,仍保留了夏季的节能优势,并在过渡季节和冬季有效利用活塞风,通风能耗可减少 50% ,并且全年能耗可再减少 30% ,节能效果明显。

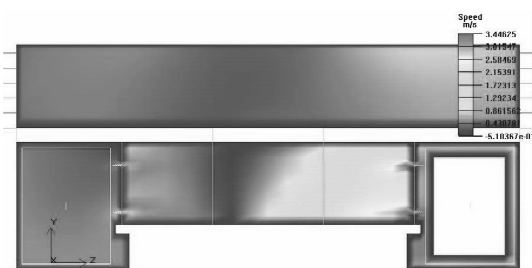


图5 列车进站时风速分布图

参考文献:

- [1] AMPOFO F, MAIDMENT G, MISSENDEN J. Underground railway environment in the UK part 2: investigation of heat load [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24 (4): 633-645.
- [2] HU S C, LEE J H. Influence of platform screen doors on energy consumption of the environment control system of a mass rapid transit system: case study of the Taipei MRT system [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(5): 639-650.
- [3] MOIN P, KIM J. Numerical investigations of turbulent channel flow [J]. Fluid Mechanics, 1982, 118: 341-377.
- [4] KE M T, CHENG T C, WANG W P. Numerical simulation for optimizing the design of subway environmental control system [J]. Building and Environment, 2002, 37(8): 1139-1152.
- [5] ZHANG L, FENG J, CHOW T T, et al. CFD analysis of ventilation effectiveness in a public transport interchange [J]. Building and Environment, 2006, 41 (3): 254-261
- [6] KAZUHIRO F. 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(7): 706-718.
- [7] HONG W W, KIM S. A study on the energy consumption unit of subway stations in Korea [J]. Building and Environment, 2004, 39(12): 1497-1503.
- [8] 王春, 刘应清. 地下铁道中的环境控制系统 [J]. 地下空间, 2003, 23(3): 310-313.
- WANG CHUN, LIU YING-QING. Environment control system in metro [J]. Underground Space, 2003, 23(3): 310-313.
- [9] 郑晋丽. 通风如何控制地铁区间隧道温度 [J]. 地下工程与隧道, 2004, 34(2): 17-20.
- ZHENG JIN-LI. How to control the tunnel temperature in subway by ventilation controlling [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2004, 34(2): 17-20.
- [10] DRURY B C, HAND J W. Improving the weather information available to simulation programs [J]. In Proceedings of Building Simulation, 1999(2): 529-536.
- [11] 中华人民共和国国家标准. GB 50019-2003 采暖通风与空气调节设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1989.
- [12] 中华人民共和国国家标准. GB50157-2003 地下铁道设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [13] 那艳玲. 地铁车站通风与火灾的 CFD 仿真模拟与实验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [14] 徐波. 地铁安全门系统和屏蔽门系统舒适性与能耗性研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [15] 吴培浩, 杨仕超, 马扬, 等. 地铁屏蔽门风压实测研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2007(6): 57-59.
- WU PEI-HAO, YANG SHI-CHAO, MA YANG, et al. A survey of wind pressure on metro screen door [J]. Urban Mass Transit, 2007(6): 57-59.

(编辑 赵静)