

# 亚热带地区地铁环控系统的工程实践和理论探讨

陈韶章, 邓先平, 贺利工

(广州市地下铁道总公司, 广州 510030)

**[摘要]** 亚热带地区修建地铁, 必须解决环境控制空调能耗大的难题。根据广州地区的气候特点和地铁建设工程实践, 广州地铁研究建立了适合亚热带地区的地铁环境控制系统——应用站台屏蔽门的节能型环控系统, 为低纬度地区的地铁建设提供了可持续发展的思路。

**[关键词]** 亚热带; 地铁; 环控系统; 屏蔽门

**[中图分类号]** U231+.6 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)10-0075-05

随着经济和人口的发展, 开发利用城市地下空间修建地下铁道已成为缓解地面交通的有效手段, 而在亚热带地区, 由于高温高湿的气候条件, 要建设经济适用的地铁环境控制系统已成为地铁工程建设的重大技术难题之一。广州地处北纬 22.3 度, 属亚热带气候, 全年雨水充沛, 年平均气温 19.5~21.4℃。广州市城市轨道交通路网规划有 15 条线路, 其中 9 条 255 km 及 164 个车站(地下线路占总线路的 68%, 地下车站占总车站数 45%) 在 2010 年前建成。面对艰巨的建设任务, 我们在认真总结一号线工程经验及教训的基础上, 在国内首次应用了地铁站台屏蔽门系统技术, 从而为地下铁道环境控制系统带来了革命性变化, 取得了控制建设成本和运营成本的显著成果, 为亚热带地区修建地下铁道提供了节能、节地、安全的可持续发展思路。

## 1 地铁环控系统概述

地铁是高效的公共交通运输工具, 也是能耗较高的用户, 特别是在低纬度的亚热带及热带地区, 维持地铁系统环境达到规定标准要求, 需要采用空调及通风的环境控制系统。而空调能耗大, 设备占用机房面积大, 根据广州地铁一号线数据统计, 环

控系统的能耗占地铁系统总能耗 50% 以上, 每个车站机房面积(包括风井风道) 达 1 600 m<sup>2</sup>。因此, 如何建立经济适用的地铁环控系统, 是制约车站规模和控制运行能耗的重要因素, 同时, 在目前全球能源短缺的形势下, 这也是制约低纬度地区地铁可持续发展的关键。

### 1.1 环控系统的主要功能

地铁系统的散热量主要有列车、人和设备的散热量, 而列车散热量占总散热量的 50% 以上。当地铁系统正常运行时, 环控系统根据地铁内不同区域的设计标准, 进行温度、湿度、空气流速、空气质量、空气压力变化控制, 保持地铁系统内各控制区域良好的空气质量和环境, 排走及平衡地铁系统的散热量, 维持控制区域的热平衡; 当列车阻塞在隧道时, 环控系统对隧道进行纵向机械通风, 以确保阻塞区段内不利点的温度不超过列车空调运行所允许的环境温度; 当车站或隧道发生火灾事故时, 环控系统与其他相关系统配合, 及时排除烟气和控制烟气流向, 诱导乘客疏散。

### 1.2 地铁环境控制系统特点

地铁环控系统主要有两种排热形式: 利用列车活塞风加机械通风的方式向室外排热; 利用空调及通风方式进行热量平衡。

1.2.1 高纬度地区系统特点 在 19 世纪中及 20 世纪初,世界上大部分地铁都是在高纬度城市修建。高纬度地区四季分明,寒冷季节较长,在这些地区修建的地铁,轨行区间与车站连通,地铁环境控制系统相对比较简单。例如,莫斯科地铁(见图 1)冬天为使车站较室外暖一些,以中间风井进风,车站出入口排风,而夏天则由车站出入口进风,中间风井排风,使区间热风不影响车站。传统的做法是以列车活塞风和机械通风作用,通过车站出入

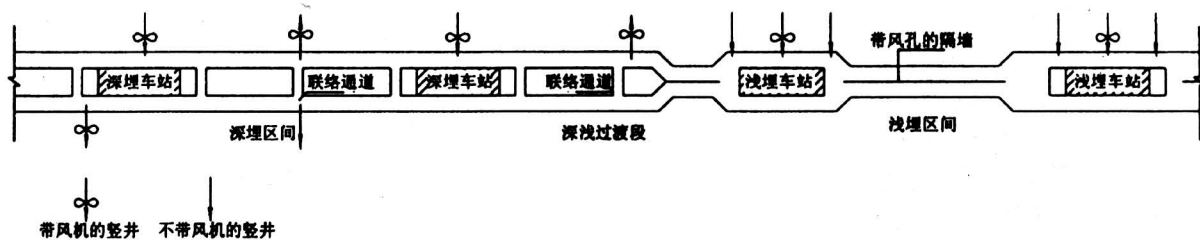


图 1 莫斯科地铁通风示意图

Fig.1 Sketch map of ventilation in Moscow Metro

度城市也开始修建地铁。低纬度热带和亚热带地区夏季长,空气温度高,在这些地区修建的地铁,如单纯以通风手段排除系统内的散热量会使通风管路庞大、占用的机房面积多,更重要的是若以夏季湿热的室外风作为通风介质,难以保持温度适宜的乘车和候车环境。冬季时间短,平衡沿线隧道土壤热壅能力低,经长时间运行,沿线隧道周围土壤热壅将逐年上升,如不加以控制,隧道温度将超过设计标准,恶化乘车和行车环境。因此,在低纬度地区修建地铁,除了通风外,还必须针对控制区域设置空调制冷,以实现隧道周围土壤温度的控制。

20 世纪 60 年代末,我国香港地区开始筹划修建地铁,在英国费尔文霍士顾问工程公司编制的“早期修正系统”工程可行性报告中<sup>[1]</sup>,花了大量篇幅叙述环控系统问题。由于当时屏蔽门系统技术正处于研发阶段,因此,1979 年建成通车的香港地铁采用了“开/闭式地铁环控系统”通风及空调制冷的环境控制方案,轨行区隧道与车站连通,车站空调系统控制候车区的温湿度,同时车站空调冷风随列车活塞风带入轨行区间对隧道起冷却作用,地铁系统内的所有运行散热量均由空调及通风予以平衡。其运作方式为:夏季室外空气焓值较高时,关闭活塞风井,减少炎热潮湿的室外空气与隧道内的空气进行交换,系统作闭式运行,由空调系统提供人员必须的最小新风量,所有热负荷(包括列车

口、隧道风井吸入室外空气,并有效排除列车运行散发的热量、人体热湿等负荷,夏季通风时,隧道内的空气温度相对于隧道壁面周围土壤温度高,通过隧道壁面传热,土壤热壅有所升高;而冬季通风时,寒冷的室外风可以使隧道周围土壤热壅下降。冬夏交替的冷热风作用,在一定的热平衡周期后,能使沿线土壤热壅长期保持基本平衡,隧道温度控制在设计标准之内。

1.2.2 低纬度地区系统特点 20 世纪中期,低纬

发热量)通过制冷空调来平衡;冬季和过渡季节室外空气焓值较低,开启活塞风井,充分利用列车活塞作用通风排热,系统作开式运行。

20 世纪 90 年代初广州地铁一号线建设开始,由于当时屏蔽门系统技术仅在新加坡地铁开始应用,技术还未成熟,因此,参考了环境条件类似的香港地铁,采用了“开/闭式地铁环控系统”,并在空调季节以“最小新风量”闭式进行运行,尽管有效控制了地铁内各区域的温湿度,但空调负荷绝对值仍很大,列车散发的热量需通过列车活塞风作用和车站空调系统冷负荷来共同进行平衡,且车站的温度场不稳定,车站的环控设备机房面积大。

## 2 寻求节能型地铁建设之路

### 2.1 建立亚热带地区地铁环控新概念

要有效控制地铁的总能耗和车站规模,必须针对亚热带地区的气候特性,建立“充分利用列车活塞效应通风,对不同区域作分隔控制,提供互不干扰的运行环境”的亚热带地区地铁环控新概念,把制定节能效果好的环境控制系统方案作为重大的研究课题,以其研究成果指导新线路的建设。

经对热源分析可知,列车活塞风及车辆本身产生的热负荷占地铁系统夏季空调总负荷的 50% 以上,若能有效阻隔和排走这部分热量,将对减少环控系统空调负荷有重要意义。1976 年,美国交通

部 (United States Department of Transportation) 的都市集体运输研究和发展管理局 (Urban Mass Transportation Administration office of Research and Development) 出版的《地下铁道环境设计手册》(Subway Environment Design Handbook), 首次提出了地铁车站站台乘客区与轨行区通过气流或隔墙分隔开来, 以达到节能、改善车站站台乘客区环境条件的目标。以气流来进行分隔, 存在很多技术问题且难以实现, 而采用隔墙分隔的概念, 则发展成为现在世界上不少地铁系统上得到应用的屏蔽门系统 (platform screen door system), 其应用不但可以实现节能、改善车站站台乘客区环境条件两个目的, 同时亦可以达到提高地铁安全性的目的 (防止乘客“有意”或不小心跌落轨道区)。为适应常年湿热的亚热带气候环境特点, 在广州地铁二号线建设中就采用了站台屏蔽门系统, 将车站站台和轨行区隧道气流分隔, 这是一个阻隔隧道内活塞风热量 (亦即列车散热量) 进入车站的非常有效的办法。广州属亚热带地区, 对通风降温而言, 冬季和过渡季节气候条件优于热带地区, 应用站台屏蔽门系统分隔车站站台与轨行区隧道, 并对两个区域以两种不同的标准分别控制, 以车站空调通风为乘客提供舒适的候车环境, 利用隧道活塞通风和机械通风为列车提供适宜的行车环境, 可从根本上改变亚热带地区地铁环控系统的配置。在减少隧道及出入口热风影响车站的同时, 也能有效防止车站空调冷风通过隧道及出入口流失, 减少车站空调负荷, 降低地铁运营总能耗。

2.2 应用屏蔽门系统技术的环控系统<sup>[2,3]</sup>

应用站台屏蔽门系统, 地铁列车在隧道内运行、加速、刹车产生的热量以及列车空调设备散发的热量可由列车活塞风通过隧道风井直接排至室外, 但由此对隧道通风带来了更高的要求: 夏季时, 隧道通风必须保证隧道行车环境满足设计要求, 年复一年地, 隧道周边土壤热壅要基本得到平衡。如果隧道内的散热量不能由室外风充分排除和平衡, 将积聚在区间隧道, 而深埋于地下的车站周围的土壤有一定的蓄热能力和热惰性, 将会使区间隧道壁面附近土壤温度上升。为避免这种情况, 隧道内就必须送入冷负荷。因此, 单纯利用室外空气能否控制隧道温度是实施节能环境控制新概念的关键。鉴于此, 在决定系统方案之前, 我们对广州的气候和土壤特性作了详细调研和分析, 利用环境控

制模拟程序, 计算在不同的通风条件下隧道周围土壤热壅温度的变化趋势, 论证以通风手段进行隧道温度控制的安全性和可实施性。

地铁隧道通风计算与其系统配置相关, 以二号线为例, 站间距离在 2 km 之内, 为满足隧道内温度控制及防灾 (火灾排烟、送风) 等要求, 在两个地下车站之间隧道设置通风风井及风机。列车在区间内行驶产生活塞效应, 所形成的活塞风将服从节点处气流质量守恒定律 (气体流动连续性微分方程)、非恒定流伯努利能量方程等。其中非恒定流伯努利方程示意图 2, 列车在空旷的地面上运行, 车头前面的空气将无阻挡地被“排挤”到列车的两侧和上方, 然后绕流到列车的后面; 而在隧道内运行时, 由于隧道壁面的限制, 列车“排挤”的空气不能全部绕流到列车后方, 部分空气被列车推向前方, 造成了车辆前后的压力差, 形成活塞效应。活塞风量是控制区间温度的重要因素之一, 活塞风量的大小与行车速度、阻塞比 (列车断面与隧道断面的面积比)、隧道长度、风井位置和面积等因素息息相关。

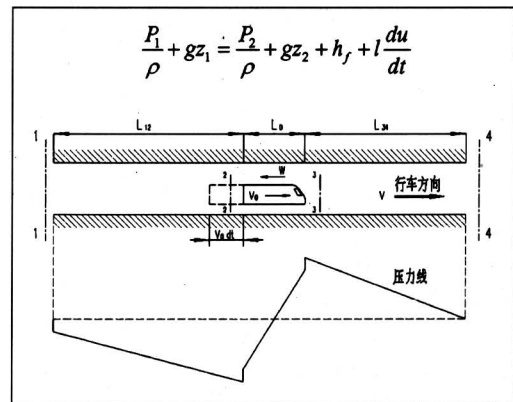


图 2 隧道内风压力示意图

Fig.2 Sketch map of air pressure in tunnel

$\rho$ —气体密度;  $u$ —流速;  $A$ —隧道断面面积;  
 $t$ —时间;  $v$ —断面流速;  $s$ —流线路程;  $P$ —压强;  
 $F$ —流体单位质量阻力;  $g$ —重力加速度;  $z$ —高程

《地下铁道环境设计手册》是国际上通用的地铁设计手册, 由于广州与高纬度地区的设计条件有较大差异, 为保证程序应用的正确性和准确性, 必须仔细分析边界条件。广州地铁采用与《手册》配套的环境控制模拟计算软件 SES (subway environmental simulation) 进行数值模拟分析, 首先通过测试初期土壤的温度 (见表 1), 根据全线环



能耗降低了 30% 以上。

### 2.3 优化隧道通风系统

目前，隧道通风系统的状况是设备大，数量多，车站规模普遍较大；车站每端需要四个风道，地面风亭多；一般隧道风机只在早晚时投入使用，设备利用率低。随着线网的逐步建设，在城市密集区域设置风井和地面风亭的难度将进一步加大。因此，在确保满足系统功能的前提下，还需重点研究优化系统配置<sup>[4]</sup>，主要包括活塞风井数量、风机配置、安装方式和系统合并等，以进一步减少系统用房面积、降低工程造价和实现节能运行。为了提高隧道风机利用率，我们将区间隧道通风系统与车站隧道排风系统合并。在正常情况下运行，利用两端的一台隧道风机兼作车站隧道通风系统（即站台下及轨顶排风系统）的排风机使用（见图 5）。从初投资

和运营费用综合分析可知，若采用优化方案，每个车站初投资可节省 280 万元，此数据尚未考虑风亭用地等因素。目前，此优化方案已应用于广州城市轨道交通四、五号线，并获得良好的经济效益。

### 3 结语

应用站台屏蔽门的环境控制系统综合新技术有利于减小车站规模、控制工程造价和降低系统运行能耗，为乘客提供安全舒适的候车环境，为亚热带地区城市轨道交通建设指出节能、环保、安全的可持续发展之路。然而，亚热带地区地铁环控系统的优化，包括系统设备性能、系统布置、控制手段等仍然是地铁设计的重点，以求获得更好的节能和环保效果。

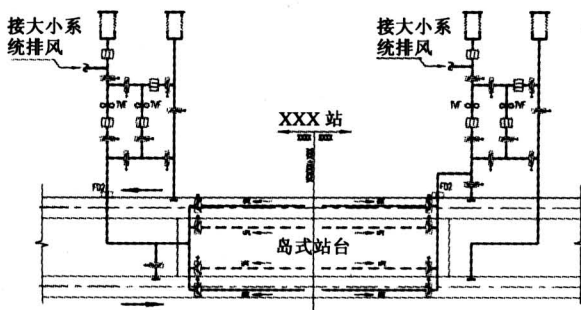


图 5 区间隧道通风系统与车站隧道排风系统合并

Fig.5 A coalition of tunnel ventilation systems

#### 参考文献

- [1] Fieman Fos. 香港地铁早期修正系统的工程可行性研究报告 [R]. 香港, 1969
- [2] 胡志辉. 城市轨道交通屏蔽门系统的适用性分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2002, 5 (3): 34~36
- [3] 范洪顺. 屏蔽门系统在轨道交通中的应用 [J]. 上海铁道科技, 2002, (3): 45~46
- [4] 高俊霞, 等. 保持线网先进性系列专题研究之隧道通风及集中供冷方式研究 [R]. 广州: 广州市地下铁道总公司, 2005

## Practice and Research of Subway Environment Control System

Chen Shaozhang, Deng Xianping, He Ligong

(Guangzhou Metro, Guangzhou 510030, China)

**[Abstract]** Building subway in subtropics, to reduce the power consumption for air conditioning is a complicated matter. According to the weather characteristics of Guangzhou and the engineering practice in Line 1 GZ Metro, an economic environment control system is established, which applies the Platform Screen Door System and is adapted to subtropic subway for controlling environment.

**[Key words]** subtropics; subway; environment control system; platform screen door system