



地下铁道站台 屏蔽门系统

陈韶章 主 编 孙钟权 王爱仪 贺利工 副主编
卢光霖 主 审 冯矩良 副 审



科学出版社

www.sciencepress.com

地下铁道站台屏蔽门系统

陈韶章 主 编
孙钟权 王爱仪 贺利工 副主编
卢光霖 主 审
冯矩良 副 审

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍了地铁屏蔽门系统的总体设计,门本体结构,双扇滑动门的顶部操作机构,控制和电气系统,系统的可靠性、可用性和可维修性,样机、调试及验收测试,电磁兼容要求,以及生命周期成本分析。

本书可供广大从事地铁研究、设计和施工的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下铁道站台屏蔽门系统 / 陈韶章主编. —北京:科学出版社,2005
ISBN 7-03-016203-X

I. 地… II. 陈… III. 地下铁道车站-新技术 IV. U231-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 099119 号

责任编辑:杨家福 / 责任校对:郝 岚
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年11月第一版 开本: B5 (720×1000)

2005年11月第一次印刷 印张: 11 1/2

印数: 1—3 000 字数: 218 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA06)

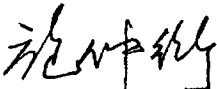
序

广州城市轨道交通二号线在我国内地是首次应用屏蔽门系统,就在节能、改善地下铁道车站站台乘客区的环境条件和提高了城市轨道交通系统安全性等方面取得了明显效益。

通过屏蔽门系统技术应用的实践和理论总结,编写出版的《地下铁道站台屏蔽门系统》一书,是我国第一部关于屏蔽门系统技术的专著。在编写过程,广州地铁管理与技术创新的倡导者、广州市地下铁道总公司总经理卢光霖亲自担任了本书的主审。本书主编陈韶章教授级高级工程师,在1978年参与英文版“香港地铁早期修正系统工程可行性研究报告”的英译中工作时,开始了屏蔽门系统有关技术的研究,在长期地铁筹建和建设实践中积累了丰富的地铁系统集成经验,为编写本书打下了厚实的理论基础。

本书的出版,为我国今后城市轨道交通系统应用屏蔽门系统提供了相关的工程设计、产品开发以及如何进行系统集成等资料。

随着我国城市轨道交通建设的发展,新技术、新工艺、新产品、新材料将会广泛应用,希望我国城市轨道交通的建设和运营工作者更多地进行理论和实践总结,编写出更多的专著,共同促进我国城市轨道交通的科学技术进步。

中国工程院院士 

2005年1月18日

前 言

1976年,由美国交通部(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 Enviroment Design Handbook),首次提出了地下铁道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的。通过采用气流来进行分隔,存在很多技术问题且难以实施,而采用隔墙分隔的概念,则发展成为现在在世界上不少地下铁道系统上得到应用的屏蔽门系统(Platform Screen Door System),其应用不但可实现节能、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下铁道安全性目的(防止乘客“有意”或不小心跌落轨行区)。

广州地下铁道的建设,早在筹建阶段的 20 世纪 70 年代,已着手研究地处亚热带气候地区的地下铁道系统应采用哪一种环境控制系统较为合适的问题。1978 年详细研究了由英国的 Freeman Fox 顾问公司(现已改名为 Hyder 顾问公司)主持编制的香港地铁早期修正系统的工程可行性研究报告,该报告花了相当大篇幅论证如何选择环境控制系统方案。1979 年建成通车的早期修正系统的观塘线以及后来相继建成的荃湾线、港岛线,鉴于当时车站站台屏蔽门系统技术还处于初步研究阶段,技术还未成熟,最终选择了开/闭式环境控制系统。开/闭式环境控制系统的主要运行模式为:当室外空气焓值小于车站空调回风空气焓值时,地下铁道系统中进风和排风井风阀打开,采用全新风的开式运行模式;当室外空气焓值高于空调回风焓值(空调季节)时,采用满足乘客卫生要求的小新风的运行模式(即闭式运行模式)。这对我国后来的上海地铁 1 号线及广州地铁 1 号线的建设产生了深远影响,这两条线均采用了上述环境控制系统(上海地铁 1 号线原采用按设置屏蔽门系统的环境控制系统设计,但最后还是按上述系统实施)。

地处赤道的新加坡,属热带气候区,全年气候湿热,在 20 世纪 80 年代初在世界范围内首次在世界上应用屏蔽门系统技术。屏蔽门系统将轨行区隧道与车站站台乘客区隔离开,隧道内以列车行驶活塞风或隧道风机来实现开式通风模式,车站空调负荷大大降低(闭式系统空调范围的站台面积由于与区间隧道连通,运行时列车产生的活塞风对车站冷负荷影响很大),车站空调的负荷不需排除列车行驶散发的热量,环控系统设备容量及设备用房面积也相应减少、降低了工程造价。该地下铁道系统投入运营使用后,达到了节能、降低运营成本、改善车站站台乘客区环境条件、提高安全性的目的。20 世纪 80 年代投入运营的法国 Lille 市的全自动无人

驾驶的 VAL 系统,从确保乘客和列车行驶安全因素考虑采用了屏蔽门系统。自此以后,屏蔽门系统的技术在国外地下铁道系统得到了推广应用。

20 世纪 90 年代,香港地铁根据十几年运营实践经验,认识到采用开/闭式环境控制系统存在系统设备容量、用房面积、工程投资大,车站建筑布置设计困难,运营能耗、成本高且不安全的缺点,在后续新线建设中(例如机场线、将军澳线以及九广铁路 KCRC 的西北铁路等)均采用了屏蔽门系统,并对已运营的原 43km、38 个车站的三条地下铁路线亦花了四年时间加装屏蔽门系统进行改造。1998 年编制广州轨道交通 2 号线工程可行性研究报告时,广州地铁对是否采用屏蔽门系统做了专题论证,通过技术、经济比较,确定采用屏蔽门系统。2000 年 10 月 23 日,广州市科学技术委员会与广州市地下铁道设计研究院签订了“屏蔽门系统在广州地铁的应用标准研究”科技项目合同。坚持管理与技术创新的广州市地下铁道总公司积极推进、指导屏蔽门系统在广州轨道交通 2 号线及后续新线建设中的应用。2002 年 12 月 28 日建成开通的广州轨道交通 2 号线首通段(9 个车站,8 个区间)以及 2003 年 6 月 28 日首期工程全线开通(16 个车站,18.2km 线路),成为我国地铁第一个应用屏蔽门系统的地下铁道系统,随后该项目技术在我国上海、深圳等城市新建地铁线路中得到推广应用。

编写《地下铁道站台屏蔽门系统》一书的目的在于:在完成“屏蔽门系统在广州地铁的应用标准研究”科技合同基础上,通过我国首次应用屏蔽门系统的实践,进行系统及理论总结;在我国今后城市轨道交通系统推广屏蔽门系统中,为其提供工程设计、产品开发以及如何进行系统集成等资料。本书通过对屏蔽门系统的可靠性、可用性和可维修性以及生命周期成本分析研究论述,为地下铁道乃至其他领域的最终用户在设备系统选型、采购时如何把这些概念作为一项原则加以应用打下基础。

本书在编写过程中,得到了广州地铁管理与技术创新的倡导者、广州市地下铁道总公司总经理卢光霖先生的大力支持及指导,他还亲自担任本书的主审。近 10 年来,香港地铁公司在这一技术领域积累了丰富实践经验,做了大量基础理论研究,该公司营运总监祁辉先生亦给予了大力支持及指导,并派出了具有丰富实践经验和厚实理论基础的冯矩良工程师承担本书的副审。广州市地下铁道设计研究院是我国首次应用屏蔽门系统技术集成研究的部门,该院孙钟权、王爱仪高级工程师、贺利工工程师担任了本书的副主编。经过各方的共同努力本书才得以如期出版。

由于屏蔽门系统在我国刚开始应用,积累的实践经验不多,理论总结还不足,加上论述问题的跨度较大,因此本书可能在某些方面存在不足,甚至有错误的地方,承蒙同行批评指正,以共同促进我国地下铁道事业的科学技术进步。

陈韶章

2005 年 6 月 25 日

目 录

序

前言

| | |
|---|----|
| 第一章 地下铁道环境条件与屏蔽门系统 | 1 |
| 1.1 地下铁道内环境区域的特点 | 1 |
| 1.2 地下铁道内各环境区域简介 | 2 |
| 1.3 地下铁道内各区域环境条件要求 | 2 |
| 1.4 实现地下铁道环境条件标准的工程设计对策 | 6 |
| 1.5 地下铁道的环控系统组成..... | 10 |
| 1.6 隔离系统与屏蔽门系统技术的应用..... | 10 |
| 第二章 在高温、高湿地区地下铁道应用屏蔽门系统技术的论证方法 | 14 |
| 2.1 相关的论证理论及模拟计算软件..... | 14 |
| 2.2 主要设计参数..... | 16 |
| 2.3 采用屏蔽门系统的地下铁道环控系统设计..... | 18 |
| 2.4 采用开/闭式两种运行模式的地下铁道环境控制系统 | 20 |
| 2.5 屏蔽门系统与开/闭式系统选择方案比较 | 21 |
| 2.6 结论..... | 23 |
| 第三章 屏蔽门系统的总体设计 | 25 |
| 3.1 屏蔽门系统的组成..... | 25 |
| 3.2 门本体结构几何设计..... | 30 |
| 3.3 门本体结构总体设计的主要参数及标准..... | 36 |
| 3.4 门本体结构的受力构件设计计算..... | 42 |
| 第四章 屏蔽门系统门本体结构 | 52 |
| 4.1 门本体结构的主要设计原则..... | 52 |
| 4.2 模块单元上部与土建结构接口..... | 52 |
| 4.3 模块化单元之间的电气设计要求..... | 52 |
| 4.4 门本体结构外观设计要求..... | 52 |
| 4.5 典型的屏蔽门系统门体结构模块化单元的划分..... | 53 |
| 4.6 门本体结构材料选择..... | 54 |
| 4.7 门扇结构形式选择及技术要求..... | 69 |
| 4.8 门本体结构的门槛..... | 73 |

| | | |
|------------|---------------------------|------------|
| 4.9 | 门本体结构上部结构 | 73 |
| 4.10 | 固定屏和端墙的顶部结构 | 74 |
| 4.11 | 门本体结构安装误差控制 | 75 |
| 第五章 | 屏蔽门系统双扇滑动门的顶部操作机构 | 76 |
| 5.1 | 双扇滑动门顶部操作机构的设计原则 | 76 |
| 5.2 | 双扇滑动门的驱动机构 | 76 |
| 5.3 | 电动机总承 | 77 |
| 5.4 | 减速机构 | 82 |
| 5.5 | 滚动螺旋副门机总承 | 86 |
| 5.6 | 同步(齿形)带传动副门机总承 | 95 |
| 5.7 | 门锁总承 | 98 |
| 5.8 | 导轨 | 101 |
| 5.9 | 非标准双扇滑动门的门机总承 | 102 |
| 第六章 | 屏蔽门系统的控制及电气系统 | 105 |
| 6.1 | 屏蔽门系统的控制 | 105 |
| 6.2 | 屏蔽门系统的门控单元 | 115 |
| 6.3 | 屏蔽门系统的监控系统 | 127 |
| 6.4 | 屏蔽门系统的供电系统 | 133 |
| 6.5 | 屏蔽门系统的电气连接与绝缘 | 137 |
| 第七章 | 屏蔽门系统的可靠性、可用性和可维修性 | 141 |
| 7.1 | 概述 | 141 |
| 7.2 | 屏蔽门系统的RAM分析 | 142 |
| 7.3 | 屏蔽门系统RAM分析的应用目的 | 144 |
| 7.4 | 屏蔽门系统RAM分析研究实例 | 145 |
| 第八章 | 屏蔽门系统的样机、调试及验收测试 | 155 |
| 8.1 | 屏蔽门系统的样机 | 155 |
| 8.2 | 屏蔽门系统安装后的检查、调整 | 156 |
| 8.3 | 验收测试 | 156 |
| 第九章 | 屏蔽门系统的电磁兼容要求 | 158 |
| 9.1 | 概述 | 158 |
| 9.2 | 单台装置的电磁兼容特性 | 160 |
| 第十章 | 屏蔽门系统的生命周期成本分析 | 163 |
| 10.1 | 概述 | 163 |
| 10.2 | 屏蔽门系统的生命周期成本的定量分析方法 | 163 |
| 10.3 | 屏蔽门系统寿命周期成本的估算 | 172 |

第一章 地下铁道环境条件与屏蔽门系统

1.1 地下铁道内环境区域的特点

地下铁道是城市中一种大运量的轨道交通运输系统,是一种特殊建筑物,即由多个车站通过隧道连接成整体。大多数情况下地下铁道系统位于地下,相对封闭,内部空间较大,但与外界连通的出口较少,只有通风井、车站的出入口、隧道洞口、车辆段出入段线洞口等与外界连通。由于服务于城市市民,地下铁道一般全年运行,而且每天的服务时间较长。其车站和隧道内有大量的人流和行驶车辆。

地下铁道内环境区域有以下特点:

(1) 地下车站及区间受太阳辐射、雨雪、雷电等气象条件的影响小。

(2) 地下铁道内部区域与外界的热、湿交换是通过出入口、风井、隧道洞口进行的。

(3) 地下铁道内部的热源主要有列车运行的发热(包含运行、启动、刹车时牵引系统散热)、列车上空调散热、人员(乘客及工作人员)散热、设备(扶梯、电梯、闸机、自动售票机等)发热、照明和广告发热等。

(4) 列车是地下铁道内的主要发热热源,由于客流量的变化,列车的行车对数将会调整,故热源累积的强度在不断变化。

(5) 因地层土壤温度一般是恒定的,此温度一般低于夏季最热月平均温度,例如广州的地层温度为 25℃,所以深埋于地下的地下铁道隧道及车站周围的土壤在夏季有蓄热能力,热惰性明显。

(6) 若不对车站及隧道内的热环境进行调节,隧道及车站内环境温度要升高,在恶劣的情况下将会造成超出乘客舒适性要求的情况。

(7) 由于列车断面面积与隧道断面面积比(阻塞比)比公路隧道的要大,一般大 40%~50%,列车在隧道内的运动会引起活塞效应,产生“活塞风”,此风量很大,是隧道内通风换气及换热的主要动力。

(8) 对于站台未设置屏蔽门的地下铁道系统,“活塞风”是地下车站通风换气的主要动力之一,由于活塞风将大量室外空气带入车站及隧道,为控制这些区域的环境温度,空调负荷比装设屏蔽门系统的地下铁道系统成倍增加。

(9) 地下铁道内部空间发热量大,为了维持其合适的环境条件,通风空调系统的风机、制冷机、空调机的装机容量大,会引起大量的设备投资和运行能耗费用。根据广州地铁一号线 2001 年运营用电量的统计,环控(含电扶梯、通风、空调等)电耗占运营能耗的 55.76%。可见环控节能是地下铁道环控系统必须考虑的问题。

(10) 由于地下铁道投资巨大,内部空间大多都是“量身订做”,因此人员防灾疏散困难,在设计时就必须充分考虑其安全疏散。

地下铁道环境的这些特点,使得地铁的环境控制不同于常规的建筑,因此地铁建设者必须在地下铁道系统的设计和运行中,针对这些特点充分利用有利的因素,克服不利的因素,在满足设备及人员对环境的要求的基础之上,采用合理的系统设计并进行科学的运行控制,以实现最小的初投资和最低的运行费用。

1.2 地下铁道内各环境区域简介

地下铁道根据乘客及工作人员活动的不同场所,分为出入口通道、乘客区(包括集散厅和站台)及设备管理用房区。所谓出入口通道,是指为乘客从外界地面进入车站的走道及长廊,即连接了地面及车站乘客区。乘客区指车站范围内乘客买票进站或出站部位及站台区域,一般分为集散厅及站台。设备管理用房区为地铁管理人员工作办公区域及设备安置场所。

区间隧道是连接两个车站的“通道”,列车在区间隧道内穿梭行驶。

对于服务于乘客的地下铁道系统,环境控制的最关键的两个区域是车站和区间。

对于采用空调系统的列车,区间内环境的舒适性往往依靠车厢内的空调系统;对于采用通风系统的列车,对区间内的环境必须有较高的要求,才能保证乘客的舒适性。在大多数情况下,乘客在车站的时间虽然要少于在列车上的时间,但车站环境的控制是非常重要的,特别是对于站台未设置屏蔽门系统的地下铁道车站更加如此。

车站设备管理用房区设有两类用房:一类是为工作人员提供服务、办公的房间,如更衣室、站长室、车站控制室等,此类房间有舒适性要求,需要设置空调;另一类为地下铁道系统设备用房,如通信、信号、变压器室、环控电控室等,此类房间设备发热量大,必须采取有效的通风或冷风降温措施,才能保障设备的工作环境。

1.3 地下铁道内各区域环境条件要求

为了最大限度吸引更多的乘客搭乘地下铁道,环境舒适条件是极为重要的,因此地下铁道的环境应比公共汽车、电车运输系统更为舒适。1976年3月由美国交通部(United States Department Of Transportation)的都市集体运输交通研究和发展管理局(Urban Mass Transportation Administration Office Of Research And Development)编写出版的《地下铁道环境设计手册》(Subway Environment Design Handbook),对地下铁道环境条件做了详细论述,并提出地下铁道必须考虑的环境因素、环境条件标准,也就是地下铁道系统内环境舒适度的影响因素。

(1) 温度和湿度。

人体向环境的传热通过对流、辐射和水分蒸发散热的方式完成。人体传热过程

受 6 个主要热舒适度参数,即活动强度、衣着情况、空气温度、空气湿度、空气流速、四周墙体温度的影响。

随着空气温度的升高,对流换热减少,同时蒸发造成的潜热增加,而潜热与显热的比值随空气温度的变化而有很大不同。

O. Fanger 教授在其经典的有关热舒适性的调查实验中指出,温度的变化对舒适度影响比相对湿度变化影响小,但此结论是有适用条件的,其原因是调查实验基本是基于办公室内的人员,人员活动强度变化很小,穿着很相似的衣服和稳定的空气温度。通过约由 30 人组成的一个小组对若干个温、湿度不同的空调房间进行测试,要求他们辨别出哪些房间比其他房间更冷,结果他们一致认为 26℃ 和 30% 相对湿度的房间确实比 24℃ 和 60% 相对湿度的房间冷,详见图 1.1。

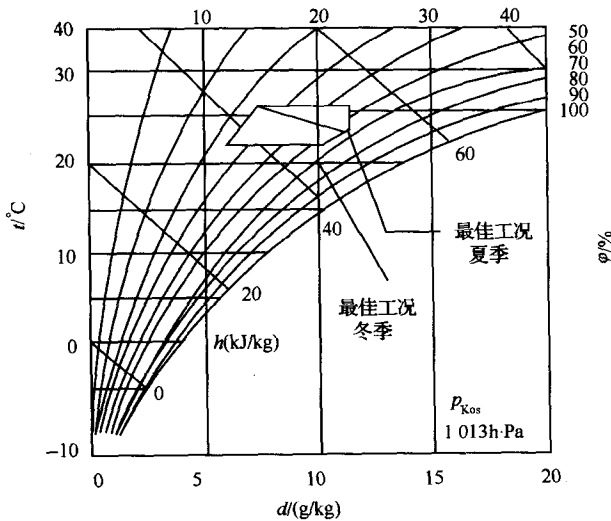


图 1.1 DIN1946 第 2 部分的舒适区域

地下铁道的环境与办公室及地面建筑的情况不同,地下铁道的地下车站一般由出入口通道、集散厅、站台、设备用房区、轨行区隧道等部分组成。世界上大部分地下铁道地下车站的站台、轨行区隧道是连通在一起的,乘客从地面通过出入口通道,依次经过集散厅、站台、进入列车车厢。为了给乘客提供一种过渡性的舒适环境条件,各区域间的温差不宜太大,对不同区域应有不同的环境控制标准,使乘客的途经区域实现温度的逐渐变化,户外与车站之间必须有合适的温差。

对于地下铁道内环境控制系统,美国运输部采用相应的舒适性评价指标:相对热指数 RWI(Relative Warmth Index)或热损失率 HDR(Heat Deficit Rate)是一个针对热环境的热感觉指标。此指数由在同一环境条件下人可承受的热强度指数和美国暖通工程师协会的实验值共同确定。其中热强度指数可通过人体汗液蒸发的热损失数来测定。热损失是用来保持人体温恒定的。当空气中水蒸气的分压力超

过 0.67 ft Hg (1ft=3.048×10⁻¹m) 时, RWI 可按下式 [摘自《地下铁道环境设计手册》2~4 页公式(2.2(a))] 计算, 即

$$RWI = \frac{M(I_{cw} + I_a) + 1.13(t - 95) + RI_a}{70 \times (1.73 + p)} \quad (1.1)$$

当空气中水蒸气的分压力小于 0.67 ft Hg 时, RWI 可按下式 [摘自《地下铁道环境设计手册》2~4 页公式(2.2(b))] 计算:

$$RWI = \frac{M(I_{cw} + I_a) + 1.13(t - 95) + RI_a}{74.2} \quad (1.2)$$

式中: M ——新陈代谢率 [Btu/(h·ft²)] (1Btu=1.05506×10³J), 其中分母是人体皮肤面积单位;

t ——干球温度 (F);

$t-95$ ——当人刚刚感到热不舒服时与皮肤干球温度的差值;

I_{cw} ——服装热阻 (clo) (1clo=0.155 m²·°C/W);

I_a ——空气边界层热阻 (clo);

R ——在室温下, 热源的平均辐射热 [Btu/(h·ft²)];

P ——空气中水蒸气分压力 (ft Hg)。

美国暖通工程师协会的实验测试也给出了相对热指数 RWI 数值与舒适关系的对照, 内容详见表 1.1, 同时还绘制出了相对热指数 RWI 数值从 0.08~0.3 之间乘客要求凉爽的百分比曲线, 通过曲线可以看出, 当相对热指数 RWI 数值在 0.2~0.3 之间时有 75%~98% 的人感觉周围环境热, 需求凉爽的环境。夏季对于地下铁道的情况, 设计师就可以根据相对热指数 RWI 较好地确定设计参数。

表 1.1 相对热指数 RWI 数值与舒适度关系的对照

| 舒适度类别 | 相对热指数 RWI 数值 |
|-------|--------------|
| 热 | 0.25 |
| 较热 | 0.15 |
| 舒适 | 0.08 |
| 有点凉 | 0.00 |

热损失率 HDR 是一个针对寒冷环境的热感觉指标, 综合考虑了温度、湿度、辐射、风速、人体新陈代谢率、衣着等影响人体热舒适的因素。HDR 的单位是 Btu/(h·ft²), 其中分母是人体皮肤面积单位。人的平均皮肤温度是随着外界环境的变化而变化的, 感觉基本舒适的平均皮肤温度范围约为 30.6~35°C。在冷环境下人体的体温调节中枢首先会使皮肤血管收缩, 皮肤温度降低, 从而减少散热量。当平均皮肤温度下降到舒适下限 30.6°C 时, 如果散热量仍然大于发热量, 体温进一步下降, 人体出现热债。HDR 值即表示人体在较冷环境下平均皮肤温度为舒适皮肤温度下限时的净热损失速率, 即负的人体蓄热率。HDR 对时间的积分即热债。

HDR ≤ 0 是不出现热债的必要条件。由于人体具有一定的蓄热量,当人体的热债达到约 100 kJ/m² 时,人才会感到冷不适,相反,当人体蓄热量达到 100 kJ/m² 时,将感到热不适。

HDR 可按式[摘自《地下铁道环境设计手册》2~4 页公式(2.3)]计算,即

$$\text{HDR} = \frac{D}{H} = -M - \frac{11.3(t - 87)}{I_{cw} + I_a} + 9 - \frac{RI_a}{I_{cw} + I_a} \quad (1.3)$$

式中: D ——热债(Btu/ft²);

H ——暴露时间(h);

$t - 87$ ——当人刚刚感到冷不舒服时与皮肤干球温度的差值;

M ——新陈代谢率[Btu/(h · ft²)];

t ——干球温度(F);

I_{cw} ——服装热阻(clo);

I_a ——空气边界层热阻(clo);

R ——在室温下,热源的平均辐射热[Btu/(h · ft²)].

(2) 空气质量。

地下铁道系统中制定空气质量标准的目的是控制地下铁道空气中影响乘客、工作人员健康的污染物数量和类型。污染物的浓度应符合卫生标准,不会对乘客或工作人员的健康、舒适感或视觉感产生不良影响。空气质量控制包括气味、粉尘微粒污染、气体污染物(氧化氢、碳化氢、臭氧、一氧化碳、二氧化碳、硫化氢以及不充分燃烧羟基燃料产生的有机产物等)等标准。

(3) 风速及风压急剧变化。

列车在地下隧道内行驶时,活塞作用引起了空气运动及空气压力的变化。从通风角度来看,这种空气运动是有益的,但如果活塞通风过于强烈,将导致风速过高,从而使人产生不舒适的感觉。另外,列车与隧道空气相互作用,过高风速就会使地下铁道内的空气压力发生变化,一般高速列车才会造成此种效应,因此必须在地下铁道控制风压的变化率。风压变化率会对地下铁道内的乘客和工作人员产生生理上的影响,人耳是感觉到压力变化的最敏感器官,因此从对人耳会不会造成不良或极不舒服感觉的影响来确定风压变化速率。风速对人会产生两种作用:一是影响人的热平衡,从而会影响舒适感(如在较热天气里,较高风速的气流使人感到凉快,而在较凉天气里,同样风速可能导致产生寒冷的感觉);二是过高的风速会带起沙尘或垃圾,造成人们不舒服的感觉,或是吹乱头发、吹掉帽子和吹起裙子等。因此,应按上述因素来确定最高风速。

(4) 地下铁道紧急情况下的环境条件。

此环境条件包括空气质量标准、温度标准和风速标准。

(5) 国家规范。

1992年6月13日国家技术监督局和建设部联合发布了中华人民共和国国家标准《地下铁道设计规范》(GB50157-92)。随着近年来全国各城市地铁建设的发展,2003年8月1日国家又发布了新版国家标准《地铁设计规范》(GB50157-2003)。新版规范在第12章通风、空调和采暖对地下铁道环境条件作出了明确规定,其要点是:

1) 地下铁道的内部空气环境应采用通风或空调系统进行控制。地下铁道车站的站厅和站台厅、区间隧道、折返线和尽头线隧道应设置隧道通风或空气调节系统。车站内的设备、管理用房应设置局部通风或局部空气调节系统。

2) 结合防烟、排烟与事故通风,应明确隧道内事故通风应具备的功能及基本设计要求。

3) 提出了有关噪声标准。

新规范对于隧道通风与空气调节系统也提出了明确的要求,其要点是:

1) 地下铁道正常通风应采用活塞通风,当活塞通风不能满足排除余热要求或布置活塞风道、通风亭有困难时,可采用机械通风系统。

2) 夏季当地最热月的平均温度超过 25°C 且地下铁道高峰时间内每小时的行车对数和每列车车辆数的乘积大于180时,可采用空气调节系统;或夏季当地最热月的平均温度超过 25°C ,全年平均温度超过 15°C 且地下铁道高峰时间内每小时的行车对数和每列车车辆数的乘积大于120时,也可采用空气调节系统。

新规范还提出了站厅和站台厅、区间隧道的温、湿度标准,对于管理设备用房的局部通风要求如下:

1) 地下铁道车站的各类用房应根据使用要求设置独立的或集中的通风系统,必要时可设置空气调节系统。

2) 提出了车站各类用房的环境条件要求,包括每立方米的粉尘含量、通风设备管理各房间内噪声要求、室内计算温度和换气次数、通风系统设计要求。

3) 采暖在最冷月份室外平均温度低于 -10°C 的严寒地区的地下铁道站厅应设热水采暖系统,提出车站的出入口在最冷月份的防寒措施要求和采暖技术要求。

1.4 实现地下铁道环境条件标准的工程设计对策

(1) 实现环境温度标准设计对策。

1) 热源分布。为满足环境控制的温度要求,必须正确地分析和计算地下铁道内的热源性质及所占总负荷的比率。地下铁道内的热源构成,详见表1.2。

表 1.2 地下铁道内的热源构成

| 项目 | 有否传入隧道内的热量 | 有否传入车站内的热量 |
|----------------|------------|------------|
| 列车顶部空调冷凝器散热量 | 有 | 有 |
| 列车进站刹车时的发热量 | 有 | 有 |
| 列车离站启动时的发热量 | 有 | 有 |
| 列车受电回路发热量 | 有 | 有 |
| 列车附件运转发热量 | 有 | 有 |
| 车站机电设备和照明设备发热量 | 没有 | 有 |
| 车站人员产热量、产湿量 | 没有 | 有 |
| 隧道洞口的热交换 | 有 | 没有 |
| 车站出入口通道的热交换 | 没有 | 有 |

表 1.2 中包括了两个部分,其中传入车站内的热量就是每个车站的余热,传入隧道内的热量一般依靠隧道通风的方法来控制隧道不会超过规范要求的温度。

2) 地下结构(包括车站和隧道)以及其周围岩土形成的热壅效应。由传热学的理论可知,地下土壤具有热惰性的特点,当深度达到一定数值时,若没有外界热源的干扰,地下土壤的温度是恒定的,我们将此温度叫做热壅温度。广州地区根据精确的地质测量出的热壅温度为 25°C 。由于温度恒定,地下铁道隧道内的空气将与周边的土壤进行热交换,当隧道内温度高于热壅温度时,隧道向土壤放热,反之则土壤向隧道放热;这种调节被称做热壅效应。它由于有限制温升的效果,故在地下铁道环境控制中发挥重要作用,一般均应考虑其对湿热的吸收作用。由于地下铁道系统列车运行产生大量的热,且随着运营年度的增加,热壅温度将逐渐上升。根据北京地铁实测记录,第一期工程(石景山至北京站)隧道内夏季最高温度在逐年上升,目前已经达到 31°C ,大大超过了设计值,隧道内年平均温度已高于室外年平均温度。根据 1984~1989 年的统计,第二期工程(建国门至复兴门环线)隧道内的温度大致每年以 1°C 的速度在上升。

3) 站台底部的建筑布置及相关的排风系统。在地下铁道内部热源中,列车产生的热占最大部分。列车运行从电网取得能量,再转换为机械能(动能及势能),制动刹车时列车的动能大部分转化成热能,这部分热散发于隧道和车站中,是车站热负荷的主要来源。其转化的途径有多种,主要途径为车底刹车装置散热;通过对现代地下铁道车辆性能的研究,机车在再生制动时部分能量返回电网,但比例不大,列车运行密度达到设计值时,刹车热基本为定值。因此,一个行之有效的直接排除热的方法就是利用站台下的空间及相关的排风系统。由于列车发热的区域多在车站附近(进站区域、出站区域、停站区域),站台下的空间及相关的排风系统可以直接将列车产生的热排至外界。此部分通风系统,根据其设置的位置,通常称为车站隧道通风系统。世界范围地下铁道的车站隧道通风系统有三种模式:第一种为只有排风的系统;第二种为送风与排风结合的系统;第三种为只有送风的系统。

对于车站隧道通风系统的评价,通常以排热效率来评价,排热效率可按式 [摘自《地下铁道环境设计手册》3~55 页公式(3.62)计算],即

$$E = \frac{q_{\text{ex}}}{q_{\text{rel}}} \quad (1.4)$$

式中: E ——车站隧道排风系统排热效率;

q_{ex} ——通过车站站台底隧道通风系统排除的热量(Btu/h);

q_{rel} ——列车在车站区域发出的热量(Btu/h)。

4) 其他技术措施。对热源实施隔离,根据不同区域热源的情况可有效地进行区域分隔,根据舒适性或工艺要求的不同制定相应的控制标准。由于列车是主要发热源,而且在隧道行车区域运行,系统设计工程师很早就考虑采用合适的措施将隧道行车区与车站隔离,这也就是屏蔽门系统诞生的最初构思。

为了减少车辆机械能转化为热量,目前先进的地下铁道列车都采取了节能措施,如采用飞轮储能、再生制动等措施,目的都是尽可能地将列车机械能再转化为电能反馈给列车附属用电设备(如空调、压缩机、照明设备等)或牵引网。广州地铁四、五号线采用了直线电机车辆,为减少列车热量散发至隧道,配置了“能量吸收装置”,将多余的无法再利用的能量以热的形式在室外的制动电阻室内散发,避免了散发到隧道内。

另外是通过制冷(或供热)设备来调节多余(或缺乏)的负荷。

(2) 风速控制。

1) 由于活塞风效应,列车运行将产生大量的空气流动,又由于隧道内外的压力不同,同等质量的流动空气在不同的断面下将产生不同的风速。根据国内外的资料,由于活塞效应,隧道内产生的活塞风可达 $100 \sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$,按照普通单洞单线的隧道断面面积为 $20 \sim 25 \text{ m}^2$ 计算,隧道内的风速可达到 $5 \sim 10 \text{ m/s}$ 。若车站附近没有设置泄压的活塞风井,则活塞风量可能全部由出入口通道排出,通道或扶梯处的风速可达到 $3 \sim 6 \text{ m/s}$;特别是车站出入口数量少于 3 个时,风速超标的情况将频繁发生。因此必须对环境区域内的风速加以控制,控制风速的方式有如下几种:

- ① 完善车站气流组织。
- ② 采用泄压风井调节,控制局部区域不出现过高风速。
- ③ 通过改变车站或区间几何形状及尺寸来控制过高风速。
- ④ 改变隧道内风速。
- ⑤ 隔离过高风速区。

2) 采用站台屏蔽门系统,就可以将活塞作用产生的空气与站台候车区隔离,达到控制站台区域风速的目的。图 1.2 反映了广州地铁某线路站台采用屏蔽门系统后,车站进出站端活塞风井内的模拟计算瞬时风量,正值代表从隧道向外界排风,负值代表外界空气通过风井进入隧道,横坐标为逐时时间(s),纵坐标为风量数值(m^3/s)。由图 1.2 可以看出,屏蔽门系统的安装可阻止大量的活塞风进入站台候

车区,提高了站台候车的舒适性。

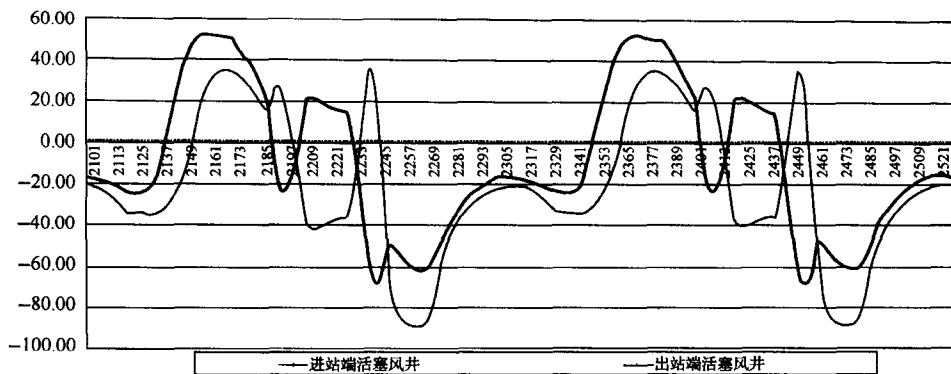


图 1.2 活塞风井活塞风量图

(3) 空气质量的控制。

地下铁道系统与外界连通的区域比较少,人流密集。就可吸入颗粒物一项而言,列车在隧道内运行时会产生大量的颗粒物。根据北京地铁 1、2 号线调查,每年产生的颗粒物达 1.7 吨,再加上众多乘客进入车站带进大量灰尘,隧道内空气可吸入颗粒物浓度就会超过最高允许浓度标准。空气质量对地铁环境来讲非常重要,因此为满足乘客的舒适性及卫生标准,应进行空气质量控制。控制的方式如下:

- 1) 合理选择进风亭形式和位置。
- 2) 加强对风道的维护和清洁。
- 3) 对空气进行过滤。
- (4) 风压控制。

活塞作用在造成活塞风的同时,也同时会在隧道内的特殊区域造成风压急剧变化。根据人体的生理特点,风压急剧变化率过大时会造成耳朵有刺痛感。对于运行速度快的地下铁道系统,这种情况更为严重。例如广州轨道交通三号线的最高行车速度为 120km/h,就对其隧道空气压力变化制定了相应的控制要求:当压力变化绝对值 $\leq 700\text{Pa}$ 时,在 1.7s 内隧道内的压力变化应 $\leq 700\text{Pa}$;当压力变化绝对值 $> 700\text{Pa}$ 时,压力变化率必须 $< 410\text{Pa/s}$ 。

根据列车运行的空气动力学特性,隧道内存在压力突变的地点有以下三种情况:第一种情况为不设中间风井的长区间隧道中断面积发生突变的部位;第二种情况为设有中间风井的长区间隧道中间风井处(气流产生分流);第三种情况为列车由地面段进入地下段的隧道口。其中后两种情况容易造成压力变化率超标,为满足乘客的舒适要求,应考虑对风压进行控制,控制的关键点如下:

- 1) 熟悉、了解风压产生的基本原理。
- 2) 可能情况下对列车速度进行限制。
- 3) 合理的设置隧道风井。
- 4) 改变隧道结构形式。