

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2021.01.019

区域适应性地铁通风空调系统研究

李国庆¹, 李百战², 孟鑫¹, 张晓伟¹, 张领¹

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037; 2. 重庆大学, 重庆 400044)

摘要: 地铁作为高效安全的交通工具, 在全国各个气候区广泛应用。根据我国 5 个不同气候区的气候特点, 分别论述各个气候区应采用的地铁通风空调系统制式。针对每个气候区, 以其代表城市为例, 详细论述系统的设置形式及节能优势。综合得出: 严寒地区和温和地区可以取消活塞风道, 车站公共区应采用通风系统形式, 严寒地区可采用集成通风系统+可调门形式; 寒冷地区、夏热冬冷地区及夏热冬暖地区应设置空调系统, 其中寒冷地区和夏热冬冷地区可采用集成闭式系统及全封闭站台门系统, 夏热冬暖地区应采用全封闭站台门系统。除温和地区之外, 其他 4 个气候区可结合可调通风型站台门的设置进行空调季节与非空调季节的模式转换, 在单一模式中实现最优控制, 从而达到全年节能运行的目的。

关键词: 气候区; 地铁; 通风空调系统; 温度; 节能

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2021)01-0115-07

Regional Adaptive Subway Ventilation and Air Conditioning System

LI Guoqing¹, LI Baizhan², MENG Xin¹, ZHANG Xiaowei¹, and ZHANG Ling¹

(1. Beijing Urban Construction Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100037;

2. Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: As an efficient and safe means of transportation, subways have been widely used in various climatic zones in China. According to the climatic characteristics of five different climatic zones in China, this paper discusses the metro ventilation and air conditioning systems that should be adopted in each zone. Taking a representative city as an example of each climatic region, the setting form and energy-saving advantages of the system are discussed in detail. It is concluded that the piston duct can be canceled and public areas of the stations shall adopt the form of a ventilation system in a severely cold and mild area. Integrated ventilation systems and adjustable doors are adopted as the best forms in severely cold areas. Air conditioning systems should be installed in cold areas, areas with hot summers and cold winters, and areas with hot summers and warm winters. The integrated closed system and fully closed platform door system can be used in cold areas and areas with hot summers and cold winters. A fully closed platform door system should be used in areas with hot summers and warm winters. In addition to temperate areas, the ventilation and air conditioning systems in the common areas of the stations in the other four climate areas can be setting with the adjustable ventilation platform doors for the conversion of air conditioning and non-air conditioning seasons. Optimal control is realized in a single-mode to achieve the goal of energy-saving operation throughout the year.

Keywords: climatic zones; subway; ventilation and air conditioning system; temperature; energy efficiency

收稿日期: 2019-12-12 修回日期: 2019-12-26

第一作者: 李国庆, 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事轨道交通暖通设计及研究工作, ligq@bjucd.com

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0705000)

引用格式: 李国庆, 李百战, 孟鑫, 等. 区域适应性地铁通风空调系统研究[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(1): 115-121.

LI Guoqing, LI Baizhan, MENG Xin, et al. Regional adaptive subway ventilation and air conditioning system[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(1): 115-121.

1 研究背景

地铁具有地面任何交通工具不可比拟的优越性：安全、快捷、舒适及环保。世界各国普遍把地铁作为解决城市交通问题的根本出路，大力发展。我国城市轨道交通发展迅速，截至 2018 年底，我国大陆地区共有 35 个城市开通城市轨道交通，运营线路总长度 5 761.4 km，其中地铁线路长度累计达 4 354.3 km，

约占总长度的 75.6%。我国的气候区从北向南依次可分为严寒地区、寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区及温和地区 5 个气候区域。开通地铁的城市覆盖了我国的这 5 个气候区，而地铁的通风空调系统与每个地区的气候密切相关。各个气候区的气候特点不同，各区域的地铁通风空调系统制式也不同^[1-6]，如表 1 所示。

表 1 不同气候区地铁车站的通风空调系统制式

Tab. 1 Ventilation and air conditioning systems in metro stations in different climatic zones

序号	气候区	修建地铁代表城市	气候特点	目前采用的通风空调系统制式
1	严寒地区	哈尔滨、沈阳、长春、呼和浩特、乌鲁木齐	最冷月平均温度≤-10℃	通风系统(区间活塞通风、车站机械通风)
2	寒冷地区	北京、天津、济南、郑州、太原、西安、兰州	最冷月平均温度-10~0℃	闭式空调系统、全封闭站台门式空调系统(区间活塞通风)
3	夏热冬冷地区	上海、南京、杭州、宁波、合肥、成都、武汉、长沙、南昌	最冷月平均温度-10~0℃；最热月平均温度 25~30℃	全封闭站台门式空调系统(区间活塞通风)
4	夏热冬暖地区	广州、深圳、厦门、福州、南宁	最冷月平均温度 10℃，最热月平均温度 25~29℃	全封闭站台门式空调系统(区间活塞通风)
5	温和地区	昆明、贵阳	最冷月平均温度 0~13℃；最热月平均温度 18~25℃	通风系统(区间活塞通风、车站机械通风)

根据全国各气候区地铁运营的数据统计，通风空调系统的能耗巨大，占地铁总能耗的 30%~40%。通风空调系统的方案对其他专业的影响比较大，因此如何根据不同气候区的气候特点选取合理的通风空调系统制式，是地铁线路通风空调系统设计的关键点，也是降低通风空调系统运行能耗的重要因素。下面笔者对我国不同气候区的通风空调系统进行分析，从实现功能、节能的角度提出一些观点。

2 严寒地区的地铁通风空调系统设计

2.1 地铁通风空调系统设计

严寒地区的气候特点鲜明，1 月份平均气温均在 -10℃ 以下，极端最低气温普遍低于 -35℃；7 月份平均气温低于 25℃。根据《地铁设计规范》，严寒地区地下车站公共区应设置通风系统^[7]。

长春地铁的隧道通风系统与车站公共区通风系统采用集成方式设置(见图 1)，地下车站每端均设置了排风道，排风道内并联设置两台参数相同的车站通风机 SVF。这两台风机为可逆转风机，平时作为车站公共区的送风机，同时兼作地下车站公共区排烟风机和区间隧道事故风机。车站两端均设置一条活塞风道，并设置了电动组合风阀与两台区间隧道相连接，在不同的季节开启对应不同区间隧道的电动组合风阀，实现区间隧道活塞通风模式的要求。车站站台端部设置

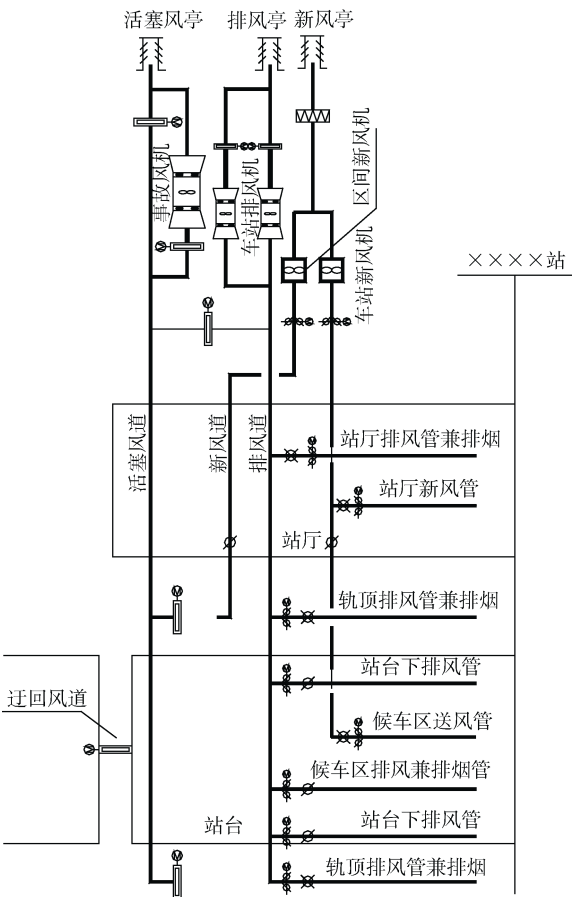


图 1 长春地区典型车站的通风系统
Fig. 1 Typical station ventilation system in Changchun

迂回风道,实现区间隧道的开式运行和闭式运行。车站两端与活塞风道并联设置一台事故(隧道)风机 TVF,该风机为可逆转轴流风机,平时不投入运行。当区间隧道发生阻塞或火灾时,TVF 与 SVF 同时运行,对事故区间进行送风或排烟。

哈尔滨地区的地下车站也采用通风系统,哈尔滨地铁 1 号线采用的是车站两端设置通风机,为车站公共区进行机械通风,兼顾地下车站火灾排烟通风。隧道通风系统设计为在地下车站两端分别设置一座机械/活塞风井,内设两台区间隧道风机,上下行线路合用活塞风道,在站台层两端区间与地下车站衔接处设置迂回风道。长春地铁的集成式机械通风系统与哈尔滨地铁的分设系统相比,能有效地缩短车站长度、降低土建投资以及设备系统初期投资。

严寒地区冬季室外气温很低,再加上列车运行时的活塞效应,室外冷风对地下车站的站厅及出入口附近造成强烈的吹风感,极大地降低了乘客的舒适度。为了改善这个问题,长春地区采用了可调通风型站台门^[8-9]。严寒地区的可调通风型站台门与其他气候区的运行模式恰恰相反,冬季时关闭转换装置,关闭活塞风道,开启迂回风道,以闭式运行作为常规模式,切断活塞风与外界的联系,开启车站和区间的送风机,对车站和区间送新风。两台送风机对公共区和区间进行送风,同时配置电加热装置,将新风加热后分别送至车站公共区和区间隧道。

呼和浩特及沈阳地铁的通风系统与上述形式类似。乌鲁木齐属于严寒地区,与严寒地区的其他城市相比,这里气候干燥,室外湿球温度低,小于等于 18℃,最热月的平均温度为 23.7℃,全年的平均温度为 7.1℃。按照《地铁设计规范》,应设置机械通风系统。结合城市的气候特点,因其湿球温度低,相对湿度小,气候比较干燥,所以车站公共区采用一级蒸发冷却降温系统。该系统比通风系统具有明显的节能优势,无需设置机械冷源,在消耗少许电能的情况下,利用雾化后的水与空气直接接触进行热湿交换。经过蒸发冷却处理后的空气,干球温度降低,风机的风量能够大幅下降,有效地降低了机械通风能耗,同时也能够有效减少土建规模及占地面积,减少设备容量及通风管道管材等。

乌鲁木齐冬季通风室外计算温度-12.7℃,冬季室外平均风速 1.6 m/s。为了减少室外低温及活塞风的影响,地铁 1 号线的车站站台设置了全封闭站台门;为了排除列车停站区域的热量,车站两端分别设置了排热风机。隧道通风系统采用了双活塞风道,每条活塞风道分

别并联事故风道,车站两端分别设置两台隧道风机 TVF。

2.2 严寒地区的优化节能建议

在哈尔滨地铁 1 号线的可调通风型站台门上方,转换装置与吊顶之间的缝隙过大,没有达到设计标准。冬季实际运营时,运营人员将活塞风井临时封堵,以减少室外低温对公共区温湿度度的影响。

基于 1 号线的运营状况,为了减少严寒低温的影响,哈尔滨地铁 2、3 号线将可调通风型站台门调整为全封闭站台门。但是,该系统与其他气候区的全封闭站台门系统不同,车站公共区仍采用通风系统,为排除轨行区列车停站处的热量,车站两端设置了排热风机,同时保留了单活塞风道,每端设置两台隧道风机,站台两端设置迂回风道。

从全寿命周期的技术经济分析角度来看,严寒地区地铁通风系统采用可调通风型站台门系统制式相对最佳。为了能够有效地降低系统能耗,结合严寒地区的气候特点,该地区可以考虑取消车站两端的活塞风道,冬季运行时开启迂回风道,区间设置新风机,以保证乘客的最小新风量。同时,严寒地区冬季应考虑利用区间土壤蓄热及车站的设备发热量,供给人员房间热量,或者为公共区及区间新风加热。例如:区间隧道内壁处敷设换热管道,吸收隧道的热量;供电设备房间发热量较大,可采用热回收装置将其回收利用,与新风进行热交换等。

3 寒冷地区的地铁通风空调系统设计

寒冷地区以北京为例。依照《地铁设计规范》13.1.5.3,北京的最热月平均温度为 25.8℃,当高峰时间内每小时行车对数和每列车车辆数的乘积大于 180 时,依照规范应采用空调系统。北京地铁目前运营线路的通风空调系统有两种制式,分别为全封闭站台门系统和集成闭式系统。

地铁线路具体采用哪种制式,应根据该条线路的全寿命周期的技术经济分析得出。集成闭式系统是在传统的无站台门系统(上海地铁 2 号线及广州地铁 1 号线)的基础上提出的(见图 2),它将隧道通风系统与车站公共区通风空调系统有机地结合在一起。车站两端分别设置一条送风道及一条排风道。每端的送风道内设置电动可开启的表冷器、过滤器、送风机、消声器及电动风阀,排风道内设置排风机、消声器及电动风阀等,共同组成地下车站公共区空气处理系统。公共区通风空调系统兼作站厅、站台的排烟系统。送排风道内的风机均为耐高温的轴流变频风机,同时兼作区间隧道的事​​故风机。

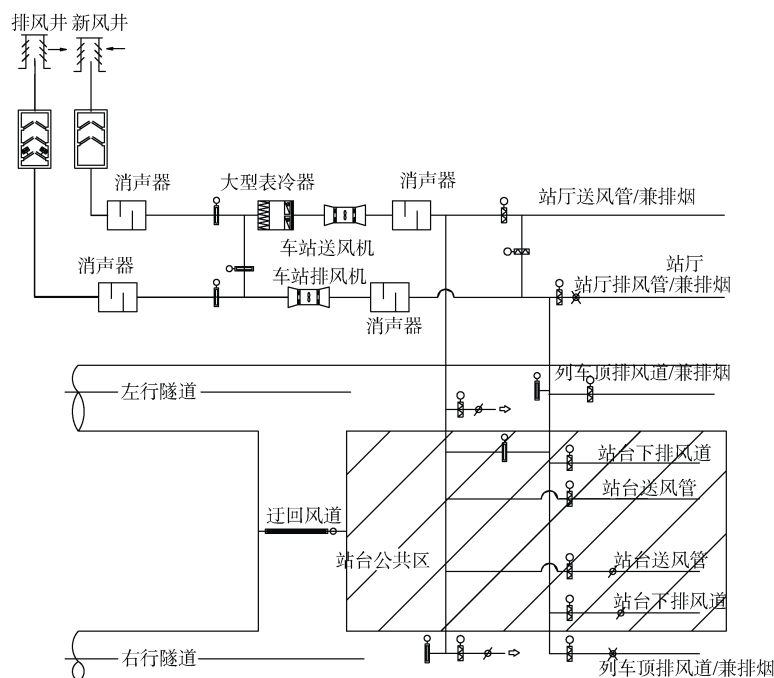


图2 集成封闭式空调系统原理

Fig. 2 Schematic diagram of integrated closed air conditioning system

该系统车站公共区与轨行区是相通的，站台处设置非全封闭站台门，站台门高度一般不超过2.5 m。车站端部不设置活塞风道。该系统通过可开启式换热器、可逆转轴流风机等新型设备，有机地将车站公共区通风空调系统和区间隧道通风排烟系统合二为一地集成在一起，极大地减少了通风空调机房的占地面积，缩短了车站长度；同时采用变频风机适应运营初、近远期的不同负荷变化，变频调速可以保证在较低的输出功率时有较高的电机效率。电动可开启式换热器在空调季节时对空气进行降温除湿，在通风季节时将其电动打开，减少阻力约200 Pa，约占风系统阻力的20%，有效地降低了通风空调系统的运行能耗。

以石家庄地区为例，该市最热月的月平均温度为26.7℃，高于25℃；远期高峰小时对数为30对，列车为6节编组，两者乘积为180，所以石家庄地铁应采用空调系统。经过全寿命周期的技术经济比较后，石家庄地铁1、2号线采用了全封闭站台门系统。隧道通风系统与车站公共区通风空调系统分开设置，隧道通风系统如图3所示，车站公共区通风空调系统如图4所示。该系统的特点是站台公共区与隧道轨行区完全分开，车站公共区通风空调系统不承担轨行区的通风排热，需要单独设置排热风机。

车站公共区通风空调系统为一次回风的全空气系

统，隧道通风系统采用双活塞风道，车站每端活塞风道并联2台事故风机。由于全封闭站台门的设置，车站公共区的空调冷负荷大约减少35%。

该系统在空调季节运行时能够有效降低运营能耗。寒冷地区空调季节大约为4个月，相对较短。全封闭站台门系统在非空调季节时无法利用列车活塞效应产生活塞风，只能通过机械通风方式实现车站内部与外界的通风换气，机械通风能耗增大。因此，降低非空调季节通风系统能耗是寒冷地区系统节能的重点。

从运营节能降耗的角度来看，全封闭站台门系统在寒冷地区没有明显的优势。寒冷地区建议采用可调通风型站台门，这种系统能够将上述两个系统有机地结合在一起：空调季节关闭可调门上方的转换装置，可以达到全封闭站台门系统的运营模式；过渡季节及冬季开启可调门上方的转换装置，可以充分利用活塞风为车站公共区通风换气，以节约车站公共区机械风机的运行能耗。根据济南地铁的相关运营资料，这种系统的耗电量约为集成闭式系统的60%^[10]。

4 夏热冬冷地区的通风空调系统设计

夏热冬冷地区的最冷月平均温度为-10~0℃。以杭州地区为例，最热月的平均温度为28.4℃；远期

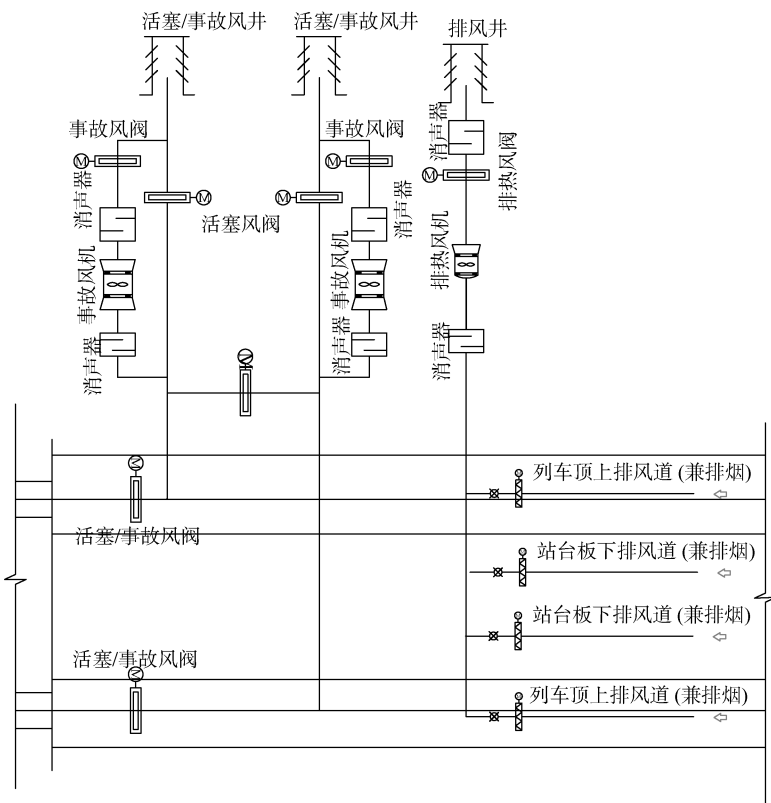


图3 双活塞隧道通风系统原理

Fig. 3 Twin-piston tunnel ventilation system

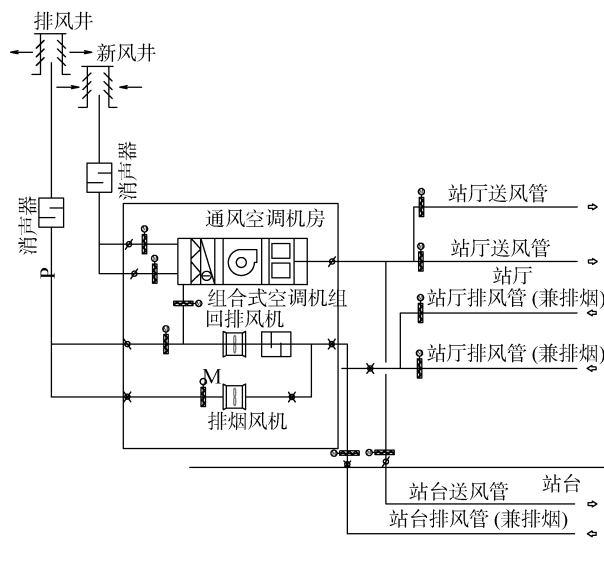


图4 全封闭站台的站通风空调系统

Fig. 4 Station ventilation and air-conditioning system for fully closed platform doors

高峰小时对数为30对，列车为6节编组，两者乘积为180，依照《地铁设计规范》13.1.5.3，应采用空调系统。该地区的车站公共区空调系统运行时间为5月1日—10月1日，共5个月，比寒冷地区长1个月。该

地区可采用寒冷地区的闭式系统(如南京地铁1、2、3、5、S8线及上海地铁1号线)，也可采用全封闭站台门系统。实际运营线路的统计表明，大部分城市采用全封闭站台门系统。

全封闭站台门系统可参考集成闭式系统的理念，设置为集成全封闭站台门系统，如图5所示。车站两端分别设置1条送风道及1条排风道。每端的送风道内设置电动可开启的换热器、过滤器、2台送风机、消声器及电动风阀，排风道内设置1台排风机、2台排热风机、消声器及电动风阀等，共同组成地下车站公共区空气处理系统。公共区通风空调系统兼作站厅、站台的排烟系统。送排风道内的风机均为耐高温的轴流变频风机，并兼作区间隧道的事​​故风机。同时，车站两端设置活塞风道。

从运营的实际情况来看，夏热冬冷地区运营能耗应重点关注空调季节制冷以及非空调季节通风工况能耗，建议考虑采用可调通风型站台门系统。

5 夏热冬暖地区的通风空调系统设计

夏热冬暖地区的最冷月平均温度大于 10°C ，最热月平均温度为 $25\sim 29^{\circ}\text{C}$ ；远期高峰小时对数为30对，列车为6辆编组，两者乘积为180，依照《地铁设计规范》13.1.5.3，应采用空调系统。以深圳为例，其地铁站空调季节的运营时间一般为7个月，空调季节在各气候区内是最长的。由于该地区空调季节运营时间为全年的83%，因此其地铁节能设计应重点关注空调季节的能耗。该地区的地铁通风空调系统制式大多为全封闭站台门系统，详见前面石家庄地铁的系统制式描述。

空调季节的节能降耗措施可以从以下两点考虑。第一，该系统控制模式应根据初、近、远期空调系统的负荷变化进行调节，降低运营能耗。在进行系统模式(空调模式、机械通风模式、车站公共区自然通风模式)的切换中，不应只基于空气状态，还应基于系统能耗最小进行转换。第二，针对不同模式下的空调负荷及室内外参数，实现该模式的最优控制：一种是空调模式，通过风系统变风量、水系统变水量、冷水机组开启台数进行控制；另一种是机械通风模式，通过风系统变风量、风机开启及关闭的时间进行控制。

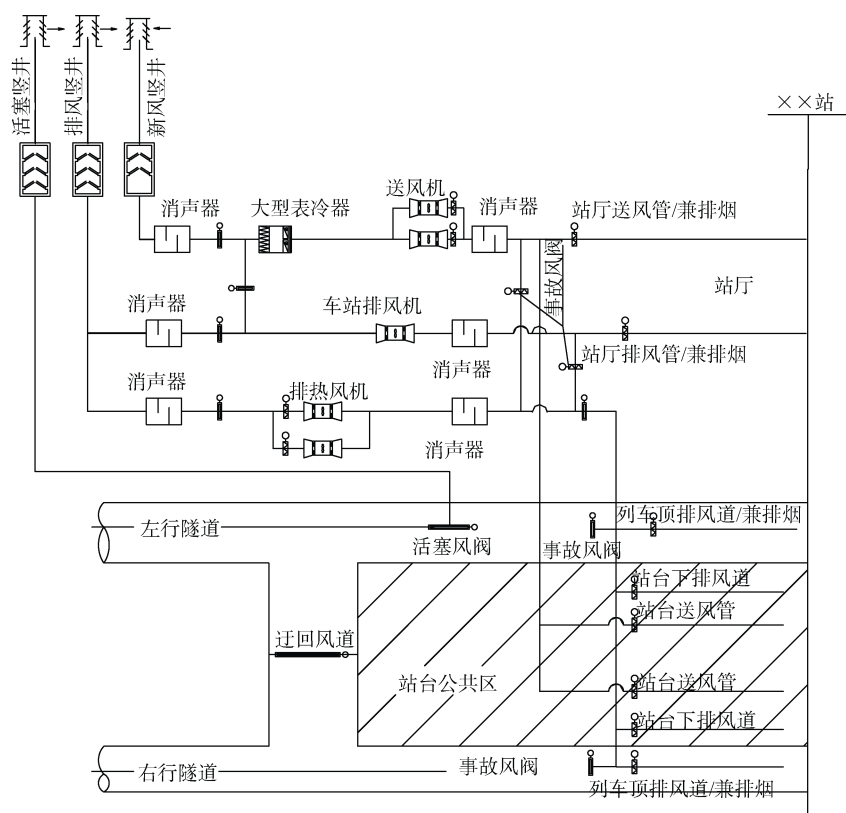


图 5 集成全封闭站台门车站公共区通风空调系统

Fig. 5 Ventilation and air conditioning system for the common area of a station with integrated closed platform doors

6 温和地区的通风空调系统设计

温和地区的最热月平均温度为 18~23℃，未超过 25℃(如昆明地区)，最热月的月平均温度为 19.7℃，因此这类地区可本着节约能源的原则，地铁车站公共区采用通风系统。温和地区冬季气温的最冷月平均温度为 0~13℃，因此应采用轨行区与公共区连通的安全门系统制式。如图 6 所示，车站公共区采用机械送风、出入口和区间采用自然排风的系统，公共区的送风管道兼作排烟管道，车站两端分别单独设置送风机和排烟风机。

如图 7 所示，车站隧道通风系统采用列车出站端的单活塞风道系统，车站两端分别设置两台耐高温可逆转的轴流隧道风机，事故风机在运营时间正常工况下不运行，隧道风机只在区间隧道排烟工况下运行。

从节能降耗角度出发，结合该地区的气候特点，地铁车站站台应采用非封闭型站台门。建议取消车站端部设置的活塞风道，利用列车活塞作用，由车站出入口与室外的新鲜空气进行直接交换，节省土建及设

备投资。运营能耗应重点关注机械通风能耗，可采用车站机械排风、出入口自然补风的模式。同时，结合车站公共区的 CO₂ 浓度，可关闭公共区机械通风，采用出入口自然通风换气模式。

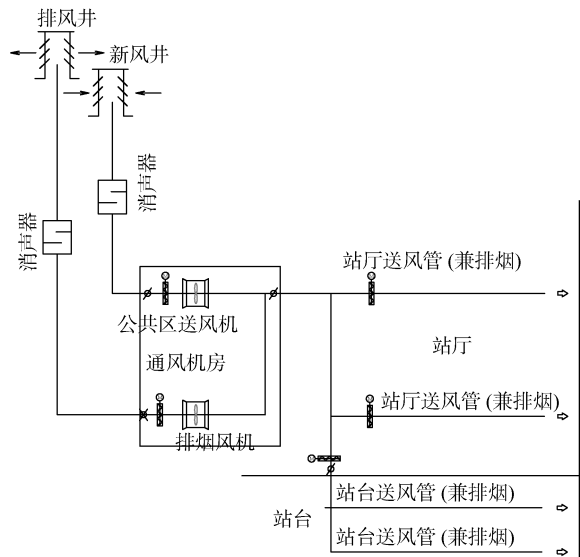


图 6 温和地区车站公共区的通风系统
Fig. 6 Ventilation system of common areas in stations in moderate area climatic zones

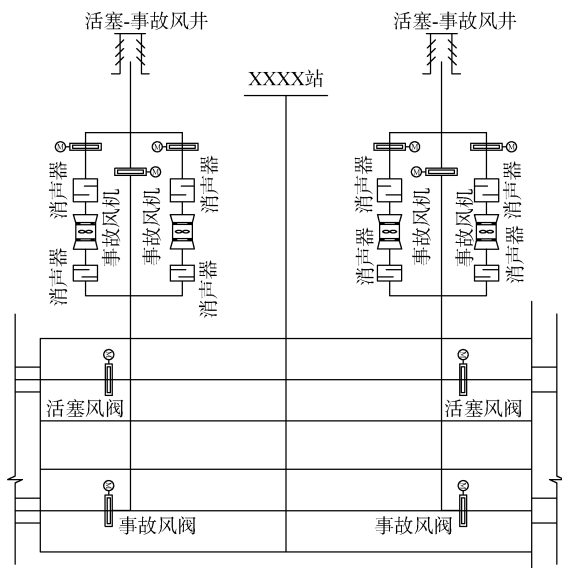


图7 温和地区的隧道通风系统

Fig. 7 Tunnel ventilation system of common areas in stations in moderate climatic zones

7 结论

综上所述,不同气候区地铁车站对应的通风空调系统制式不同。严寒地区的地铁车站系统方案相对较多,目前没有形成统一的做法,以集成通风系统+可调通风型站台门方案为相对最优方案。对于气候干燥的地区,在水源充足的条件下,车站公共区采用蒸发冷却降温系统相对比较节能。

寒冷地区及夏热冬冷地区目前运营的地铁线路,车站公共区在夏季均设置了空调系统,通风空调系统的能耗应重点关注系统全年的设备运行状态,特别是非空调季节的通风工况下的运行能耗。夏热冬暖地区应重点关注空调季节的节能运行。温和地区的站台应设置非封闭型站台门,车站公共区应采用通风系统。严寒地区和温和地区建议取消活塞风道,利用出入口作为活塞风道,为车站及区间进行通风降温。

在严寒地区、寒冷地区、夏热冬暖及夏热冬冷地区,地铁车站的站台皆可设置可调通风型站台门。可调通风型站台门能够满足这4个气候区地下车站节能运行的需求,同时避免了站台公共区发生火灾时开启滑动门带来的安全隐患。行业内应在各城市地铁建设中大力推广,站台门设备生产企业应加大研发力度。

参考文献

[1] 陆俊. 车站通风空调系统运行与优化[J]. 都市快轨交通, 2016, 29(2): 109-112.

LU Jun. Optimal operation of ventilation and air-conditioning system in subway station[J]. Urban rapid rail transit, 2016, 29(2): 109-112.

[2] 谢朝军. 地铁通风空调系统优化新思路[J]. 都市快轨交通, 2008, 21(1): 89-93.

XIE Chaojun. New ideas for the optimization of ventilation systems in subways[J]. Urban rapid rail transit, 2008, 21(1): 89-93.

[3] 祝岚. 北京地铁9号线通风空调系统节能示范[J]. 都市快轨交通, 2013, 26(5): 44-48.

ZHU Lan. Demonstration of ventilation and air-conditioning energy-saving technology in Beijing Metro Line 9[J]. Urban rapid rail transit, 2013, 26(5): 44-48.

[4] 张涛, 刘晓华, 关博文. 地铁车站通风空调系统设计、运行现状及研究展望[J]. 暖通空调, 2018, 48(3): 8-14.

ZHANG Tao, LIU Xiaohua, GUAN Bowen. Design, operating status and research prospects of ventilation and air conditioning systems in underground railway stations[J]. HV & AC 2018, 48(3): 8-14.

[5] 朱建章, 孙兆军. 地铁通风空调系统新观点[J]. 暖通空调, 2015, 45(7): 1-6.

ZHU Jianzhang, SUN Zhaojun. Updated insights on ventilation and air conditioning system in underground railway [J]. HV&AC, 2015, 45(7): 1-6.

[6] 石锐. 地铁通风空调系统研究[J]. 研究探讨, 2018(6): 174.

[7] 地铁设计规范: GB50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 119-130.

Code for design of metro: GB50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 119-130.

[8] 李国庆. 城市轨道交通通风空调系统新技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 120-150.

[9] 李国庆. 用于地铁的可调通风型站台门系统综合技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.

LI Guoqing. Comprehensive technology research of adjustable ventilation platform doors system in subway[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

[10] 王国富, 刘海东, 潘雷. 可调通风型站台门系统在济南地铁中的适用性研究[J]. 都市快轨交通, 2016, 29(5): 99-103.

WANG Guofu, LIU Haidong, PAN Lei. Research on adjustable ventilation platform doors system of Jinan Rail Transit[J]. Urban rapid rail transit, 2016, 29(5): 99-103.

(编辑: 王艳菊)