

# 地铁屏蔽门通风空调系统 活塞风道方案研究

北京城建设计研究总院有限责任公司 刘磊<sup>☆</sup> 张良焯

**摘要** 以华东某一城市地铁工程为例,对三种活塞风道设置形式进行了数值模拟分析,对比了不同活塞风道方案下的通风效率,结合经济性分析总结了影响活塞风道方案的因素。

**关键词** 地铁 屏蔽门 通风空调系统 活塞风道

## Schemes of piston ventilation shafts in underground railway stations with platform screen doors

By Liu Lei<sup>★</sup> and Zhang Lianghan

**Abstract** Simulates and analyses three different forms of piston ventilation shafts in underground railway stations based on a real project in East China by using numerical method. Compares the ventilation efficiency in different piston ventilation shaft schemes. Summarizes the main influence factors of the schemes based on economic analysis results.

**Keywords** underground railway, platform screen door, ventilation and air conditioning system, piston ventilation shaft

★ Beijing Urban Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing, China



刘磊

### 主要设计项目

- 北京地铁昌平线(一期)
- 北京地铁9号线
- 北京地铁10号线(二期)
- 宁波地铁1号线
- 宁波地铁2号线

## 0 引言

随着地铁建设的迅速发展,地铁环境控制问题愈来愈引起人们的关注。地铁是一个大型狭长的地下空间,仅有车站出入口、风亭、隧道洞口等少数部位与地面大气相通。地铁通风空调系统的任务是控制和调节地铁内环境,保证地铁内空气的质量和温湿度等参数在一个合理的范围内,满足人员舒适性及设备的安全运行要求。通风空调系统能耗在总能耗中占相当大的比例(已经达到 50% 左右<sup>[1]</sup>),严重影响着地铁运营的经济性。因此通风空调系统的节能具有重要的意义,是降低地铁系统

总投资和运行费用的关键因素。

目前,越来越多的城市采用站台设置屏蔽门的通风空调系统,该系统将车站公共区与区间隧道分开,可以有效降低空调季车站冷负荷。区间隧道采用机械排风和活塞风自然通风的方式进行降温和换气,达到控制环境温度和为人员提供新风的目的。

传统屏蔽门系统采用双活塞风道方案,但是随着城市化进程的加速,以及地铁项目主要穿越成熟的市中心,周边用地十分紧张,国内部分城市采用了单活塞风道方案。与传统的双活塞风道相比,单活塞风道每侧线路减少一个活塞风亭,一个车站共减少两个风亭,节省了土建投资,但国内外对其通

①<sup>☆</sup> 刘磊,男,1982年9月生,大学,工程师  
100037 北京市西城区阜成门北大街5号北京城建设计研究总院有限责任公司第五设计所  
(010) 88336697 (0) 13810102862  
E-mail: 87512148@qq.com  
收稿日期:2011-03-29  
修回日期:2011-04-28

风效率和经济性的研究不够深入。如何合理设置活塞风道,有效控制、利用地铁活塞风,节省建设投资,在满足地铁通风空调功能要求的基础上,有效降低运营成本,达到节能的目的,成为必须研究的课题。

## 1 研究内容

屏蔽门通风空调系统构成主要包括车站公共区通风空调系统、区间隧道通风系统、站台轨行区通风系统、设备及管理用房通风空调系统和空调水系统。下面重点介绍与活塞风道方案有关的区间隧道通风系统。

区间隧道通风系统分为正常通风和事故通风两种运行模式。正常通风的目的是通过机械通风和活塞风自然通风的方式,调节隧道内空气环境,满足地铁正常运行时的功能要求。事故通风又称应急通风,主要包括列车阻塞通风和火灾通风两种工况。列车阻塞时,应向隧道提供足量的新风并保证维持列车空调装置连续运转的空气环境。列车在区间发生火灾时,应控制或延缓烟气蔓延,为人员疏散争取时间,为乘客和消防人员提供足够的新鲜空气,并形成一定的迎面风速,引导乘客安全迅速地撤离火灾现场。

双活塞风道方案在车站两端各设置两个活塞风道,即对应每侧线路设置两个活塞风道,每个活塞风道(兼事故风道)内设置一台事故风机,车站每端配置两台事故风机,可同时对区间送、排风;单活塞风道方案在车站两端各设置一个活塞风道,每个活塞风道(兼事故风道)内设置两台事故风机,车站每端亦配置两台事故风机,可同时对区间送、排风。故单、双活塞风道方案均能满足事故通风的功能要求,单、双活塞风道的正常通风模式是本文讨论的重点。

目前对于屏蔽门系统活塞风道的研究主要采用数值模拟的方法。文献[2]利用 SES 与 CFD 联合模拟研究影响活塞风通风量的因素,结果显示活塞风道的断面面积对通风量的影响相对长度的影响要大得多。对于活塞风道设置方案的研究多基于开启排热风机时的风量与隧道温度的计算,文献[3-4]在开启排热风机的前提下得出双活塞风道较单活塞风道的进风量增加、区间温度降低的结论;文献[5]综合考虑了开启排热风机通风和自然通风(活塞通风)两种工况,按照上海的全年运行模

式,得出运营初期至远期,双活塞风道的运行费约是单活塞风道的 50%~62%的结论,但没有区分单活塞风道的设置位置,并且没有考虑土建初投资。

笔者将主要研究地铁屏蔽门通风空调系统设置不同活塞风道方案时地铁区间隧道的通风换气效率和热环境差异,在此基础上结合土建投资进行经济性分析,找到较优的活塞风道设置方案。以华东某城市一条地铁线路为研究对象,该工程采用站台设置屏蔽门的通风空调系统,利用成熟的地铁热环境模拟软件 STESS 对不同活塞风道设置方案进行数值模拟分析。

## 2 研究模型

该地铁线路地下线长 15.118 km,共设置地下车站 15 座,平均站间距 1.14 km。除市中心一段带商业开发区的区间断面为明挖矩形断面外,其余地下区间断面均为圆形盾构断面,盾构断面面积 22 m<sup>2</sup>,湿周长 17 m。设计远期年限为 2039 年,远期列车采用 6 节编组,四动两拖,B 型车,列车尺寸为 19 m(长)×2.8 m(宽)×3.8 m(高),拖车约 30 t,动车约 35 t;土壤导热系数为 1.367 W/(m·K),热扩散率为 7.74×10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s。

区间隧道夏季通风室外计算温度为 28 ℃,冬季通风室外计算温度为 4 ℃。GB 50157—2003《地铁设计规范》规定屏蔽门系统列车正常运行时区间隧道内最热月日最高平均温度不超过 40 ℃。

为便于分析,所有活塞风道方案中活塞风道的长度、面积、阻力系数都取相同值,活塞风道长度为 25 m,断面面积为 16 m<sup>2</sup>,阻力系数为 9。每台排热风机风量为 40 m<sup>3</sup>/s。

对单、双活塞风道方案进行数值模拟计算。采用两种单活塞风道方案,即每站的活塞风道设置在列车进站端,简称进站端单活塞风道方案;每站的活塞风道设置在列车出站端,简称出站端单活塞风道方案。活塞风道设置方案见表 1。

表 1 活塞风道设置方案

方案 1	每站 4 条活塞风道
方案 2	每站 2 条活塞风道,分别对应上、下行区间列车进站端
方案 3	每站 2 条活塞风道,分别对应上、下行区间列车出站端

## 3 数值模拟计算

### 3.1 开式通风模式下的活塞风道方案对比分析

对每个方案均模拟开启排热风机时,区间开式通风模式下列车开行 4~30 对条件下的风量,限于

篇幅,仅列出6对列车时的模拟结果,见图1~3,由于车站设置的屏蔽门将上行、下行区间完全分隔开,所以图中仅列出下行区间隧道的风量模拟计算结果。图中数据为小时平均值,同一支路的两个数

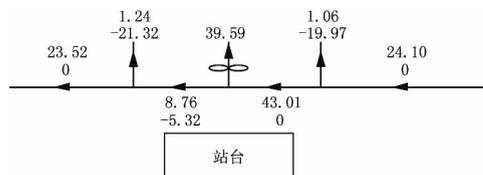


图1 4条活塞风道(方案1)开启排热风机、6对列车模拟结果(单位: $\text{m}^3/\text{s}$ )

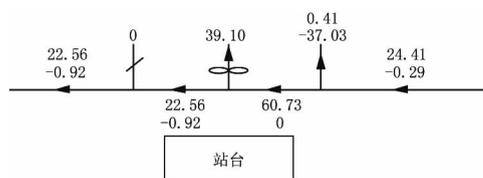


图2 2条进站端活塞风道(方案2)开启排热风机、6对列车模拟结果(单位: $\text{m}^3/\text{s}$ )

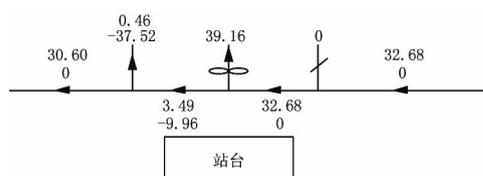


图3 2条出站端活塞风道(方案3)开启排热风机、6对列车模拟结果(单位: $\text{m}^3/\text{s}$ )

据分别表示不同方向的风量,负值表示气流方向与箭头所示方向相反。

从图1~3可以看出,当列车运行对数为6对、车站设置4条活塞风道(方案1)时,活塞风道总进风量为 $41.29 \text{ m}^3/\text{s}$ ( $21.32 \text{ m}^3/\text{s} + 19.97 \text{ m}^3/\text{s}$ ),从出站端活塞风道有效进入下一区间隧道的新风量为 $16 \text{ m}^3/\text{s}$ ( $21.32 \text{ m}^3/\text{s} - 5.32 \text{ m}^3/\text{s}$ ),从进站端活塞风道进入隧道的室外空气大部分被排热风机排走,仅有 $7.52 \text{ m}^3/\text{s}$ ( $8.76 \text{ m}^3/\text{s} - 1.24 \text{ m}^3/\text{s}$ )与列车带来的上一区间的空气掺混后进入下一区间,其中室外新风约占46%( $19.97 \text{ m}^3/\text{s} \div 43.01 \text{ m}^3/\text{s}$ ),双活塞风道有效进入下一区间隧道的总新风量为 $19.49 \text{ m}^3/\text{s}$ ( $16 \text{ m}^3/\text{s} + 7.52 \text{ m}^3/\text{s} \times 46\%$ );设置两条出站端活塞风道(方案3)时,有效进入下一区间隧道的新风量为 $27.56 \text{ m}^3/\text{s}$ ( $37.52 \text{ m}^3/\text{s} - 9.96 \text{ m}^3/\text{s}$ );而设置两条进站端活塞风道(方案2)时,从活塞风道进入隧道的室外空气大部分被排热风机排走,仅有 $22.56 \text{ m}^3/\text{s}$ 与列车带来的上一区间的空气掺混后进入下一区间,其中室外新风约占61%( $37.03 \text{ m}^3/\text{s} \div 60.73 \text{ m}^3/\text{s}$ ),有效进入下一区间隧道的新风量为 $13.76 \text{ m}^3/\text{s}$ ( $22.56 \text{ m}^3/\text{s} \times 61\%$ )。

4~30对列车时的活塞风量分析计算结果汇总见表2。

表2 开式通风模式下设置不同型式的活塞风道对比分析

列车对数	对下一区间的有效换气量			对停站区域的有效换气量			活塞风道总进风量		
	方案1	方案2	方案3	方案1	方案2	方案3	方案1	方案2	方案3
4	21.09	14.14	28.28	22.73	25.44	11.78	43.82	39.58	40.06
6	19.49	13.76	27.56	21.80	23.27	9.96	41.29	37.03	37.52
8	26.41	17.84	34.82	16.33	21.02	4.06	42.74	38.86	38.88
10	29.13	19.24	37.17	16.00	20.86	3.05	45.13	40.10	40.22
12	30.12	20.15	38.42	14.94	19.80	1.49	45.06	39.95	39.91
15	30.80	21.51	39.07	13.65	18.12	0.22	44.45	39.63	39.29
20	34.30	23.33	39.55	11.69	16.22	0.00	45.99	39.55	39.55
21	32.82	22.28	38.34	11.73	16.08	0.00	44.55	38.36	38.34
30	35.56	24.76	38.84	10.21	15.09	0.00	45.77	39.85	38.84

从以上分析和表2可以得出以下结论:

1) 对下一区间的有效换气量方案3最大,方案1为方案3的71%~92%,方案2为方案3的50%~64%。

2) 对列车停站区域的有效换气量方案2最大,方案1为方案2的72%~94%,方案3小于方案2的46%。

3) 活塞风道总进风量方案1最大,方案2,3约为方案1的85%~91%。

4) 由于列车停站时开启屏蔽门,人员新风可以由车站公共区补充,轨行区又设置有局部排风系统,相对来说,活塞风对下一区间的有效换气尤为重要,可以为人员提供足够的新风和降低隧道内温度。方案1总的进风量虽然最大,但对下一区间的有效换气量小于方案3。方案2对列车停站区域的有效换气量最大,但对下一区间的换气效率最低。在开式通风模式下,方案3的通风效率最高。

3.2 闭式通风模式下的活塞风道方案对比分析

下面再对关闭排热风机时区间采用闭式通风模式的方案进行分析,6对列车时的模拟结果见图4~6。

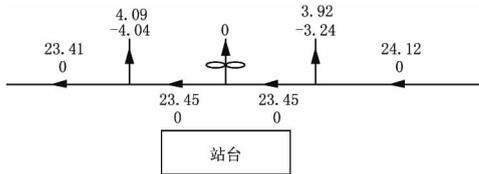


图4 4条活塞风道(方案1)关闭排热风机、6对列车模拟结果(单位: $\text{m}^3/\text{s}$ )

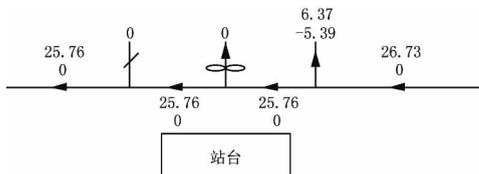


图5 2条进站端活塞风道(方案2)关闭排热风机、6对列车模拟结果(单位: $\text{m}^3/\text{s}$ )

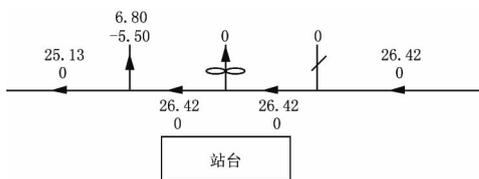


图6 2条出站端活塞风道(方案3)关闭排热风机、6对列车模拟结果(单位: $\text{m}^3/\text{s}$ )

从图4~6可以看出,当列车运行对数为6对、车站设置4条活塞风道(方案1)时,出站端活塞风道直接进入下一区间隧道的新风量为 $4.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ,进站端活塞风道有 $3.24 \text{ m}^3/\text{s}$ 的新风和上一区间的空气掺混后先冷却停站区域,部分由出站端活塞风道排出,其余部分再进入下一区间,进入下一区间的风量为 $19.36 \text{ m}^3/\text{s}$ ( $23.45 \text{ m}^3/\text{s} - 4.09 \text{ m}^3/\text{s}$ ),其中新风比例约为14%( $3.24 \text{ m}^3/\text{s} \div 23.45 \text{ m}^3/\text{s}$ ),进站端活塞风道进入下一区间的有效新风量为 $2.67 \text{ m}^3/\text{s}$ ( $19.36 \text{ m}^3/\text{s} \times 14\%$ ),则进入下一区间总的新风量为 $6.71 \text{ m}^3/\text{s}$ ( $4.04 \text{ m}^3/\text{s} + 2.67 \text{ m}^3/\text{s}$ );设置2条进站端活塞风道(方案2)时,有 $5.39 \text{ m}^3/\text{s}$ 的新风先冷却停站区域再进入下一区间,进入下一区间的新风量为 $5.39 \text{ m}^3/\text{s}$ ;而设置2条出站端活塞风道(方案3)时,直接进入下一区间隧道的新风量为 $5.50 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

4~30对列车时的活塞风量分析计算结果汇总见表3。

从以上分析和表3可以得出以下结论:

1) 方案1的活塞风总换气气量最大,能为区间提供最大的新风量;方案2,3进入下一区间的新风量为方案1的67%~90%。

表3 闭式通风模式下设置不同型式的活塞风道对比分析

列车运行对数	直接对下一区间的换气量			直接对停站区域的换气量			进入下一区间的新风量		
	方案1	方案2	方案3	方案1	方案2	方案3	方案1	方案2	方案3
4	4.04	0	6.35	3.38	6.09	0	7.03	6.09	6.35
6	4.04	0	5.50	3.24	5.39	0	6.71	5.39	5.50
8	5.53	0	7.68	4.31	7.58	0	9.11	7.58	7.68
10	6.65	0	9.24	5.16	8.94	0	11.11	8.94	9.24
12	7.32	0	9.08	5.64	8.85	0	12.17	8.85	9.08
15	7.93	0	8.55	5.80	8.72	0	12.86	8.72	8.55
20	10.17	0	10.99	6.55	10.80	0	15.87	10.80	10.99
21	9.57	0	10.11	6.40	10.03	0	15.03	10.03	10.11
30	10.91	0	12.43	6.37	11.06	0	16.54	11.06	12.43

2) 方案2对停站区域的冷却效果较好,方案3对下一区间的冷却效果较好,方案1介于两者之间。

3) 闭式运行时,方案1能为区间提供最大的新风量,对区间隧道的冷却效果较好并能兼顾车站列车停站区域,应优先采用。

### 3.3 不同活塞风道方案的热模拟分析

基于开式和闭式通风模式下的风量对比分析,按照相同的初、近、远期全年通风控制策略,在三种

活塞风道方案下进行热模拟分析。结果显示,车站列车停站区域温度方案2最低,方案3最高,方案1介于方案2,3之间;区间隧道温度方案3最低,方案2最高,方案1介于方案2,3之间。

### 3.4 小结

根据以上计算结果,三种活塞风道设置方案均能满足区间隧道正常通风的功能要求。

在开启排热风机时,方案3的通风效率最高;关闭排热风机时,方案1的通风效果最好。在运营

初期及低行车密度时,应优先采用区间闭式通风运行模式,在远期和高行车密度时,应采用区间开式通风运行模式。

由于双活塞风道可以通过关闭风阀切换到出站端单活塞风道形式,故在选择活塞风道设置方案时,宜优先选用双活塞风道方案,实现最佳的通风效果,条件受限时再选择出站端单活塞风道方案。

#### 4 经济性分析

通过前面的分析计算可知,单活塞风道方案能够满足区间隧道通风的功能要求。由于出站端单活塞风道方案较优,现只对出站端单活塞风道和双活塞风道方案进行经济性对比分析。由于地铁土建投资巨大,按照 1 万元/ $\text{m}^2$  的土建造价计算,若采用单活塞风道方案,车站每端活塞风道可压缩 4 m 宽度,按车站主体宽度 21.5 m、主体外风道长度 22 m 计算,每端活塞风道可减小面积 174  $\text{m}^2$  ( $(21.5 \text{ m} + 22 \text{ m}) \times 4 \text{ m}$ ),每个车站共减小面积 348  $\text{m}^2$ ,按每个活塞风亭综合造价 60 万元估算,一个车站可节省土建投资 468 万元 ( $348 \text{ m}^2 \times 1 \text{ 万元}/\text{m}^2 + 60 \text{ 万元} \times 2$ )左右。

采用出站端单活塞风道方案时,由于列车进站端没有活塞风道泄压,在正常运行条件下,屏蔽门承受的风压会有所提高,但增加幅度是有限的。屏蔽门的最大承压是按照列车以一定的速度直接通过站台的条件设定的,其数值大于正常情况下的活塞风压,故不会引起屏蔽门造价的提高。

在运行费用上,由于双活塞风道可以实现单活塞风道的功能,在开式运行时,可以采用相同的高效率通风方案,故只对比闭式运行时单、双活塞风道方案的总进风量。单活塞风道方案若要达到与双活塞风道方案一样的新风量,需延长机械通风时间,增加能耗。按照电价 0.7 元/( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )估算,每站全年需增加机械通风的电费约为 2 万元。

采用单活塞风道方案后,屏蔽门的漏风量也会相应增加,若按照增加 40% 估算,双活塞风道屏蔽门的漏风量时均值为 9  $\text{m}^3/\text{s}$ ,则单活塞风道屏蔽门的漏风量时均值为 12.6  $\text{m}^3/\text{s}$ 。单活塞风道方案漏风量增加导致每站负荷增加约 125 kW,空调季按 4 个月计算,每年空调运营能耗增加,折合为

电费增加约 9 万元。

按照现行利率 6.6% 计算,与出站端单活塞风道方案相比,双活塞风道方案土建投资增加 468 万元,土建年费(按 100 年折算)增加 31 万元,排热风机年耗电费用减少 2 万元,空调运行年耗电费用减少 9 万元,年运营费合计减少 11 万元,年综合费用增加 20 万元。

通过以上经济性分析,单活塞风道方案的年综合费用较低,但年运营费用较高,需考虑以后电价增长情况和未来能源状况等因素,综合比选活塞风道方案。

#### 5 结论

通过对华东某地铁工程不同活塞风道设置方案的技术经济分析,单活塞风道、双活塞风道方案均能满足区间隧道通风的功能要求,出站端单活塞风道方案的通风效率较高,经济性较好。但是我国正在提倡建设节能型社会,单活塞风道方案的运营能耗较高,考虑到电价增长和未来能源短缺等因素,宜优先采用双活塞风道方案;在市中心用地紧张的地铁车站可采用出站端单活塞风道方案。在工程实践中,还应当结合具体情况,如当地室外温度较高、车站埋深较深时,双活塞风道的自然通风效果不十分明显,也可采用单活塞风道方案。另外,根据目前国内实际情况,若运营时不开启排热风机,采用单活塞风道方案时会造成区间隧道内温度急剧上升和区间新风量减少,而双活塞风道方案在闭式运行时能够提供较大的换气量,这也是一个需要考虑的重要因素。

#### 参考文献:

- [1] 李国庆. 城市轨道交通通风空调多功能设备集成系统[J]. 暖通空调, 2009,39(5):31-32,141
- [2] Ke Ming-Tsun, Cheng Tsung-Che, Wang Wen-Por. Numerical simulation for optimizing the design of subway environmental control system [J]. Building and Environment, 2002, 37(11): 1139-1152
- [3] 匡江红,余斌,何法江,等. 地铁活塞风井设置的优化研究[J]. 机电设备, 2007(12):24-28
- [4] 胡维擷. 对地铁环控系统设计中几个问题的探讨[J]. 地下工程与隧道, 2006(1):42-61
- [5] 郑晋丽,裘纯,刘文胜. 浅议轨道交通屏蔽门系统区间活塞通风[J]. 地下工程与隧道, 2007(2):33-37