

快速轨道交通隧道压力波控制及通风系统设计与实践

姚富宏

(中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031)

摘要: 文章结合工程实际, 通过数值模拟、模型试验、实车测试等多种手段, 研究并提出适用于 140 ~ 160 km/h 快速轨道交通工程的乘客舒适度标准、列车密封性指标、区间隧道净空面积、车站轨行区隧道净空面积、隧道洞口缓压措施、区间设备设施承压要求等隧道压力波控制的关键技术措施。此外, 对快速轨道交通线路的区间隧道通风制式、轨行区排热系统优化、隧道风机配置、长大山岭隧道通风防灾等问题进行分析研究及实践探索。文章给出的相应技术建议措施可为类似工程提供参考。

关键词: 快速轨道交通; 隧道压力波; 隧道通风; 山岭隧道

中图分类号: U231^{+.5}

1 引言

近年来, 国内城市轨道交通行业发展迅速。截至 2022 年 12 月 31 日, 中国内地累计共有 55 个城市投运的城市轨道交通线路总里程达到 10 291.95 km。其中, 地铁占比为 77.85%, 市域快轨(运行速度为 120 ~ 160 km/h)占比 11.89%。由此可见, 设计运行速度超过 100 km/h 的快速轨道交通运营里程不断增加, 在城市轨道交通线网运营中发挥着重要作用。

国家现行标准 GB 50157-2013《地铁设计规范》, 适用于最高运行速度不超过 100 km/h 的线路, 而随着城市化进程的不断发

展, 国内各大城市相继规划并实施了最高运行速度为 120 km/h、140 km/h、160 km/h 等的快速轨道交通线路。许多在低速时可以忽略的问题, 在列车快速运行时就会变得十分突出。本文结合工程实践, 对运行速度 140 ~ 160 km/h 快速轨道交通隧道压力波控制及通风系统设计中遇到的重难点问题进行分析、探讨。

2 工程概况

2.1 线路概况

成都市轨道交通 18 号线一、二期工程始于火车南站, 止于天府机场北站, 线路全长 69.394 km, 其中一期工程的龙泉山山岭隧道全长 9 695 m, 设 2 处施工斜井。该线为兼顾机场专线和通勤客流的复合功能线路, 同时满足机场乘客快速通达和通勤客流的出行需求。全线共设 13 座车站, 10 座中间风井, 其中地下站 11 座, 高架站 2 座。设计最高速度 140 km/h (其中天府新站至天府国际机场段预留 160 km/h 运行条件), 采用地铁 A+ 型列车 8 辆编组, AC25kV 柔性架空接触网供电。

该线具有线路长、客流量大、列车运行速度快、平均站距大、列车越行过站、快慢车混跑等典型特点, 为区间隧道压力波控制及通风系统设计带来了诸多困难和挑战。

2.2 区间概况

一期工程为火车南站至龙泉山隧道(含), 全为地下线(其中龙泉山隧道小里程端设置 225 m 敞口段), 共设地下车站 8 座。一期工程区间特征如表 1 所示。

二期工程为龙泉山隧道(不含)至天府机场北站, 其中龙泉山隧道出口至福田站区间均为高架线, 机场段为地下线, 共设高架站 2 座, 地下站 2 座, 预留站 1 座。二期工程区间特征如表 2 所示。

第一作者: 姚富宏, 男, 高级工程师

表 1 一期工程区间特征描述表

车站或分界点名称	中心里程	区间长度 /km	最高运行速度 /km·h ⁻¹	备注
火车南站	YDK10+133	1.92+1.08	135	起点站 中间风井（1座） 经停站
孵化园站	YDK13+136			
锦城广场站	YDK14+097	0.96	90	越行站
		1.50	105	
世纪城站	YDK15+592	2.23+2.18+2.47	140	越行站 中间风井（2座）
海昌路站	YDK22+477			
福州路站	YDK30+010	2.97+1.65+2.91	140	越行站 中间风井（2座） 经停站
		2.20+1.71	115	
兴隆站	YDK33+924	2.34+2.90	140	越行站 中间风井（1座）
天府新站	YDK39+160			
敞口段分界	YDK41+117	1.96	110	越行站
		0.225	-	
龙泉山入口	YDK41+342	3.12+3.40+3.12	140	敞口段 中间风井（2座）
龙泉山出口	YDK50+990			

表 2 二期工程区间特征描述表

车站（或中间风井）名称	中心里程	区间长度 /km	最高运行速度 /km·h ⁻¹	备注
龙泉山出口	YDK50+990	7.33	140	高架线 越行站（高架） 高架线
三岔站	YDK58+322			
福田站	YDK66+307	7.98	140	越行站（高架） 高架线
		1.49	110	
桥隧分界点	YDK67+796	2.30+2.81	135	中间风井（1座） 地下站（预留）
T3T4 站	YDK72+950			
T1T2 站	YDK75+474	2.52	130	经停站
		2.60	135	
机场北站	YDK78+075			经停站

3 隧道压力波控制措施

3.1 乘客舒适度标准的确定

舒适度标准关系到司乘人员的乘坐体验和职业健康，如果控制不好车内的瞬变压力变化，隧道压力波将对人体的耳膜舒适性产生很大的影响。经调查国内外压力舒适度标准可知，不同国家及研究机构采取的标准差异较大，但通常都是采取一个特定时间范围内的压力波动值作为舒适度标准，压力舒适度标准与列车类型、隧道结构及列车运行速度等密切相关。考虑到该线采用的是密封性较差的地铁 A+ 型列车，在列车运行速度一定

的情况下一味的增大隧道净空面积和提高车辆气密性均会直接导致工程建设成本增加。

根据该线实际情况，建立全线隧道压力波计算模型，经理论计算及数值模拟，该线要求采用的乘客压力舒适度标准满足我国现行 GB 50157-2013《地铁设计规范》的同时，亦满足我国客运专线（ $P_t < 800 \text{ Pa}/3 \text{ s}$ ）及美国压力舒适度标准（ $P_t < 410 \text{ Pa/s}$ ， $P_t < 700 \text{ Pa}/1.7 \text{ s}$ ）的相关要求。

3.2 列车密封性指标的确定

隧道内的压力变化是通过车体传入车内的，因此列车的密封性对车内的压力变化具有至关重要的作用。密封性能好的列车，即使隧道内压力变化很大，车内的压力变化也不会太剧烈。反之，如果车辆密封性很差，则隧道内的压力变化将直接传入车内，影响车内乘客的舒适性。

常规地铁线路的列车运行速度在 100 km/h 以内，通常采用不密封车辆，未对列车密封性指数提出具体要求。目前，国内外采用的车辆，其动态密封性指数如表 3 所示。

该项目通过研究，结合隧道净空面积及竖井布置，提出了“运行速度 140 km/h 快速轨道交通 A+ 型列车车厢客室的动态密封性指数不低于 3 s，司机室的动态密封性指数不低于 6 s”的建议。

表 3 车辆密封性能表 s

车辆类型	动态密封性指数 τ
不密封车辆	$\tau < 1$
最低密封性	$1 < \tau < 6$
密封性较好	$6 < \tau < 10$
密封性很好	$\tau > 10$

3.3 隧道净空面积的确定

快速轨道交通区间隧道净空面积确定时,需要同时考虑隧道空气动力学效应、乘客舒适度、车辆限界、区间设备设施安装条件等多种因素。在车辆型式、列车运行速度一定的情况下,如何确定经济合理的隧道净空面积,显得尤为重要。

3.3.1 区间隧道净空面积

通过建立该项目的隧道压力波计算模型,在车辆动态密封指数为3s的前提下,满足人员舒适度要求的隧道净空面积约为7 000 mm。结合接触网限界需求,经比选研究,该线区间盾构隧道的内径

按7 500 mm取值,折合轨面以上隧道净空面积约为40.63 m²。其他类型的区间隧道断面面积按不小于圆形隧道的断面确定。

该项目盾构隧道的典型断面如图1所示,图中5 000 mm为接触网导线高度,7 200 mm为限界要求的净空高度尺寸,7 500 mm为盾构隧道设计内径。

3.3.2 越行车站轨行区隧道净空面积

根据行车运营组织需求,该线地下车站存在列车以100 km/h越行过站的运行情况,为减小列车快速运行带来的隧道压力波及风荷载对站台门系统及轨旁设备设施正常工作的影响,经三维数值模拟计算,对越行车站轨行区线路中心线至站台门及侧墙的距离采取了局部加宽的技术措施。局部加宽后,越行车站轨行区轨面以上的隧道净空面积约为31.2 m²。

该工程地下越行车站轨行区的典型断面如图2所示,站台门与线路中心线的距离由标准的1 650 mm提高至1 800 mm,线路中心线与侧墙的距离由标准的2 250 mm提高至3 000 mm,轨面以上的净空高度为6 500 mm。

3.4 隧道进出洞口处设置泄压井

为降低列车从室外无限空间高速进入有限空间隧道时产生的压力幅值及压力变化率,在龙泉山隧道进出

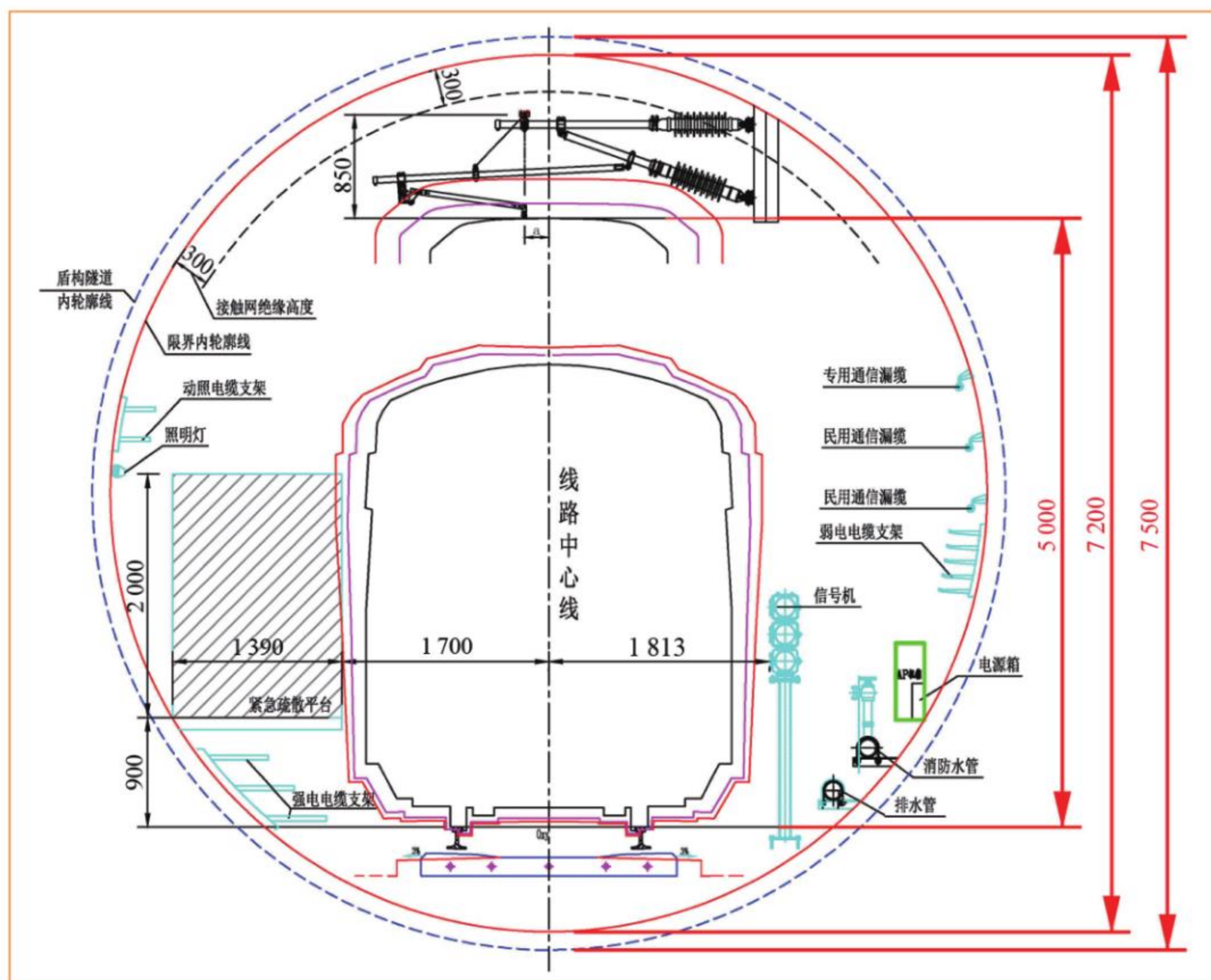


图1 圆形盾构隧道典型断面图 (单位: mm)

口、天龙区间洞口、机天区间洞口处均设置有缓压措施。泄压井采用顶部封堵、四周开口的方式,靠线路侧采用不锈钢钢网,靠室外侧采用 $\phi 10$ mm钢筋防护网。

图3为隧道进出洞口处泄压井设置示意图,图4为隧道进出洞口泄压井设置现场实施效果图。通过模拟计算可知,当在隧道进、出洞口部位设置2个3 m×2 m尺寸的泄压竖井时效果最佳,可使隧道最大压力梯度值降低30%~40%,现场实测数据证明以上措施达到了设计的缓压效果。

3.5 车站进出站端设置迂回泄压风阀

近年来,随着城市轨道交通客流量的不断增加,行车间隔被进一步压缩。实际运营过程中经常会出现前方车站列车正在上下客,后方列车已经发车越过车站(或中间风井)活塞风孔的情况。此种情况下,列车运行产生的活塞风进站,会对车站站台门的正常启闭造成不利影响。对于列车运行速度为140 km/h的线路而言,该问题更应引起充分的重视。

为改善站台门的受力条件,为其可靠启闭提供冗余保障,该工程地下车站无配线端设置迂回泄压风阀(净通风面积不小于16 m²),图5为地下车站进出站端设置迂回泄压风阀的计算模型,根据模拟计算,理想工况下

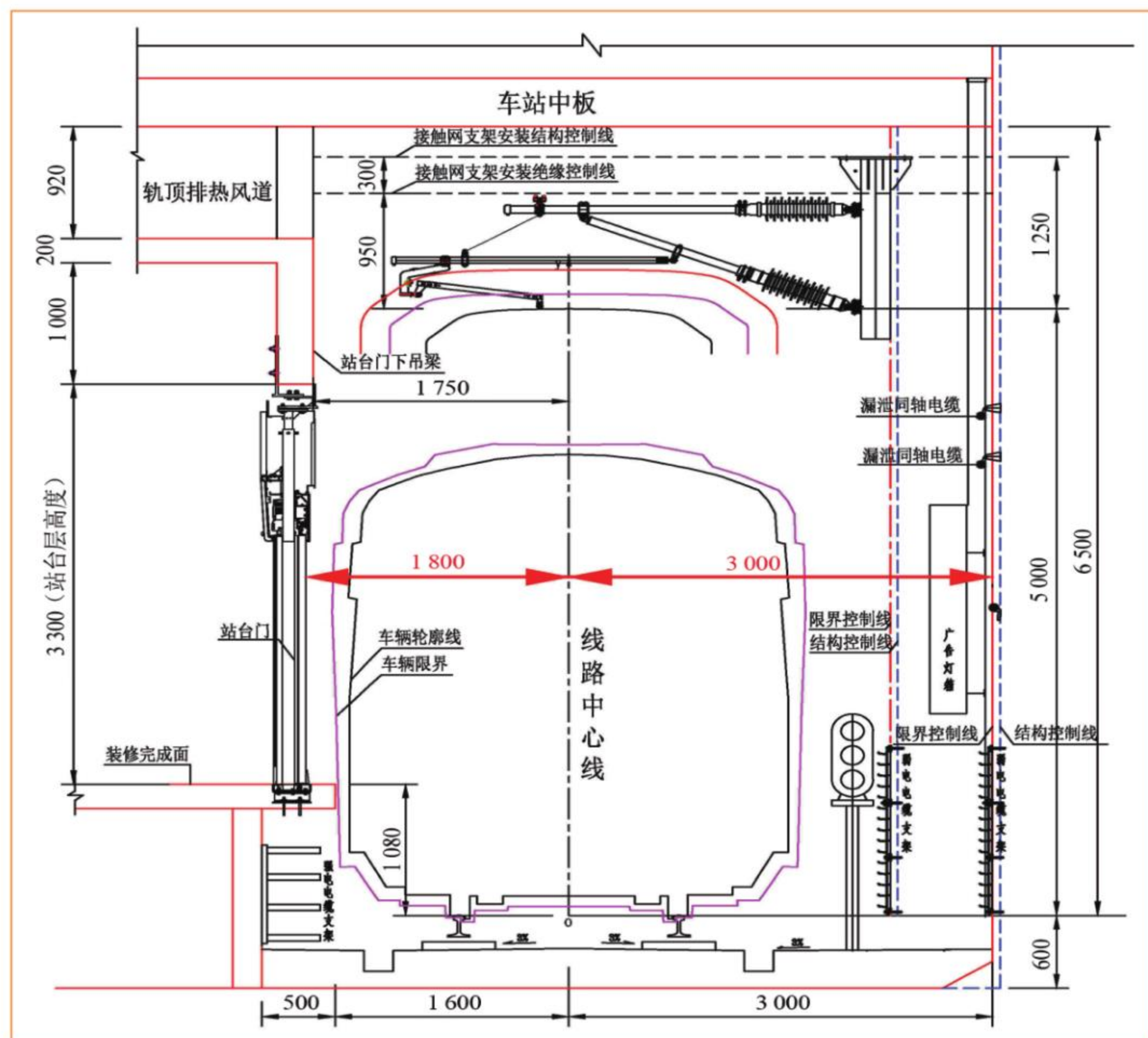


图2 地下越行车站轨行区典型断面图 (单位: mm)

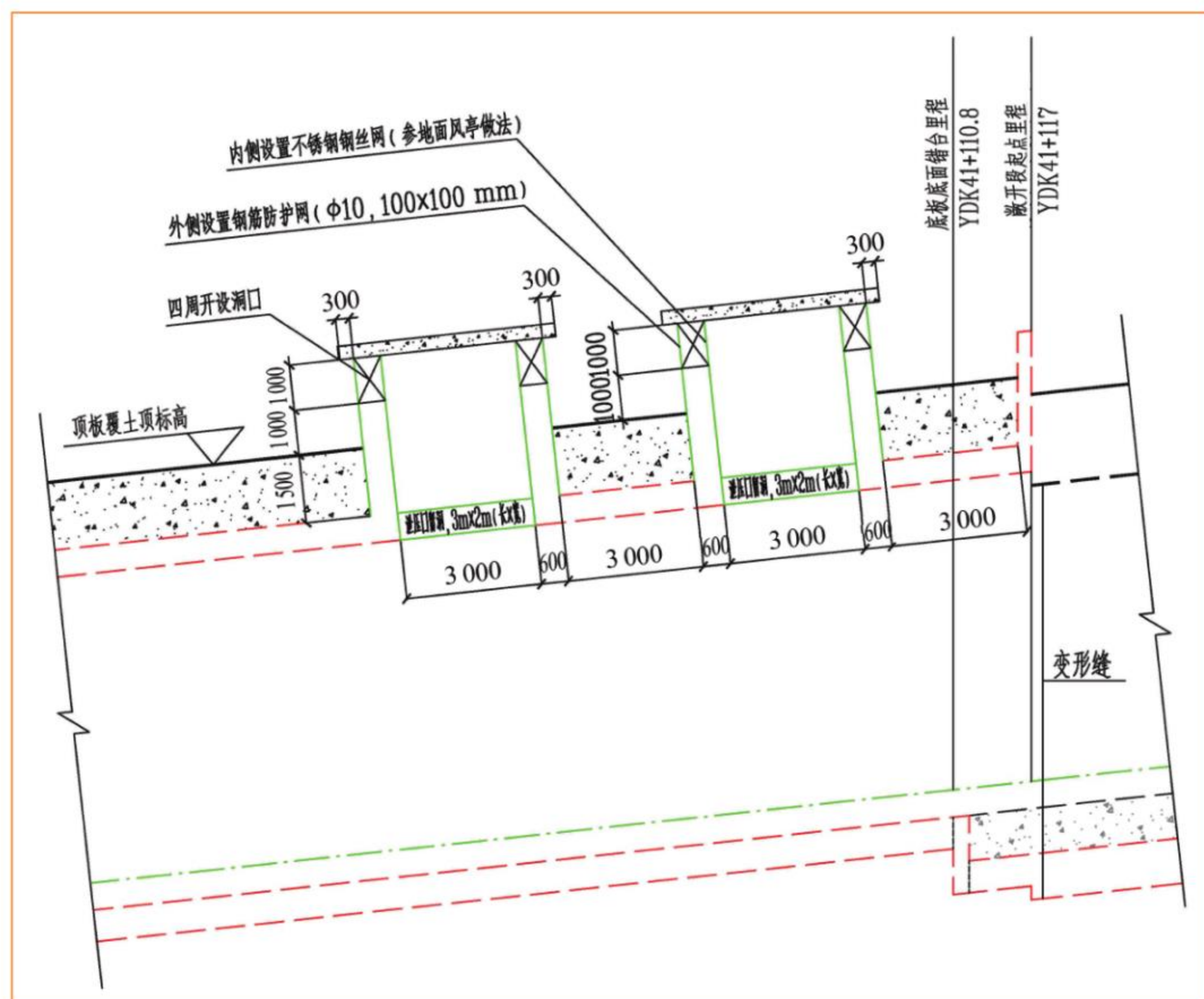


图3 隧道进出洞口泄压井设置示意图 (单位: mm)

此项措施可降低站台门风压值 40% ~ 50%，如图 6 所示。该迂回泄压风阀按常闭工况考虑，纳入隧道通风系统模式控制。当远期高峰小时存在列车追踪运行工况站台门启闭受阻时，由站务人员根据实际情况人工一键开启泄压模式。

3.6 区间渐变段设置对压力波的影响

由理论分析可知，车站或中间风井与区间隧道连接部位采用渐变段结构和突变结构相比，渐变结构可以减小活塞通风的局部阻力，从而增大活塞通风风量。该工程采用三维数值模拟的方法，对中间风井处采用 2 种不同结构形式对隧道压力波幅值和压力变化率的影响进行分析研究。列车从室外进入直径为 7 500 mm 的区间隧道后，按速度 140 km/h 匀速行驶通过中间风井。图 7 为中间风井处渐变结构计算模型示意图，图 8 为各测点布置图。

2 种不同结构形式下隧道内各测点计算的最大正压幅值、最大负压幅值及压力波动值如表 4 所示。根据计算结果，2 种工况下，测点的压力变化规律相同且幅值大小相当，在中间风井与盾构隧道连接处采用渐变结构对隧道压力波的改善效果并不明显。在不增加土建规模的前提下，可以在车站或中间风井两端截面突变处设置

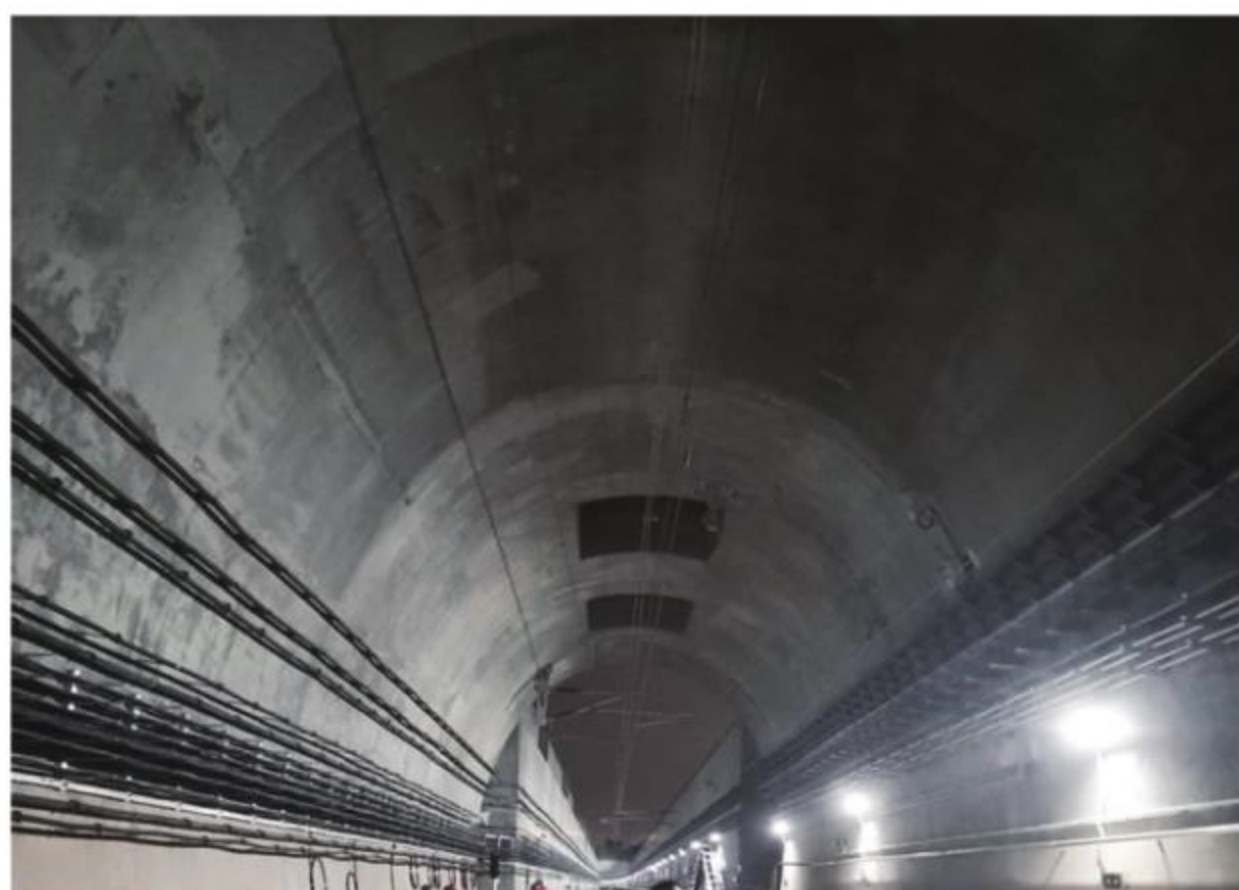


图4 隧道进出洞口泄压井设置现场图

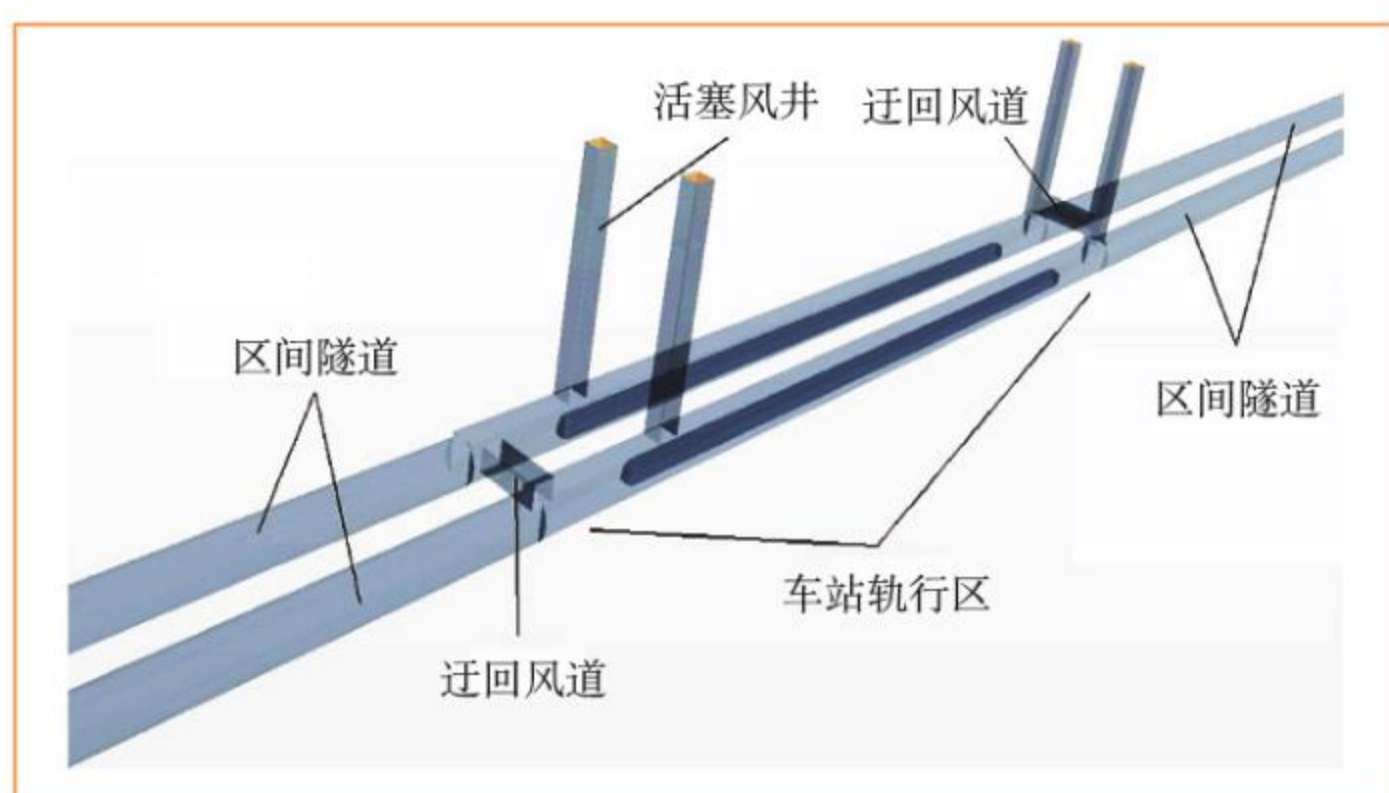


图5 迂回泄压风阀计算模型示意图

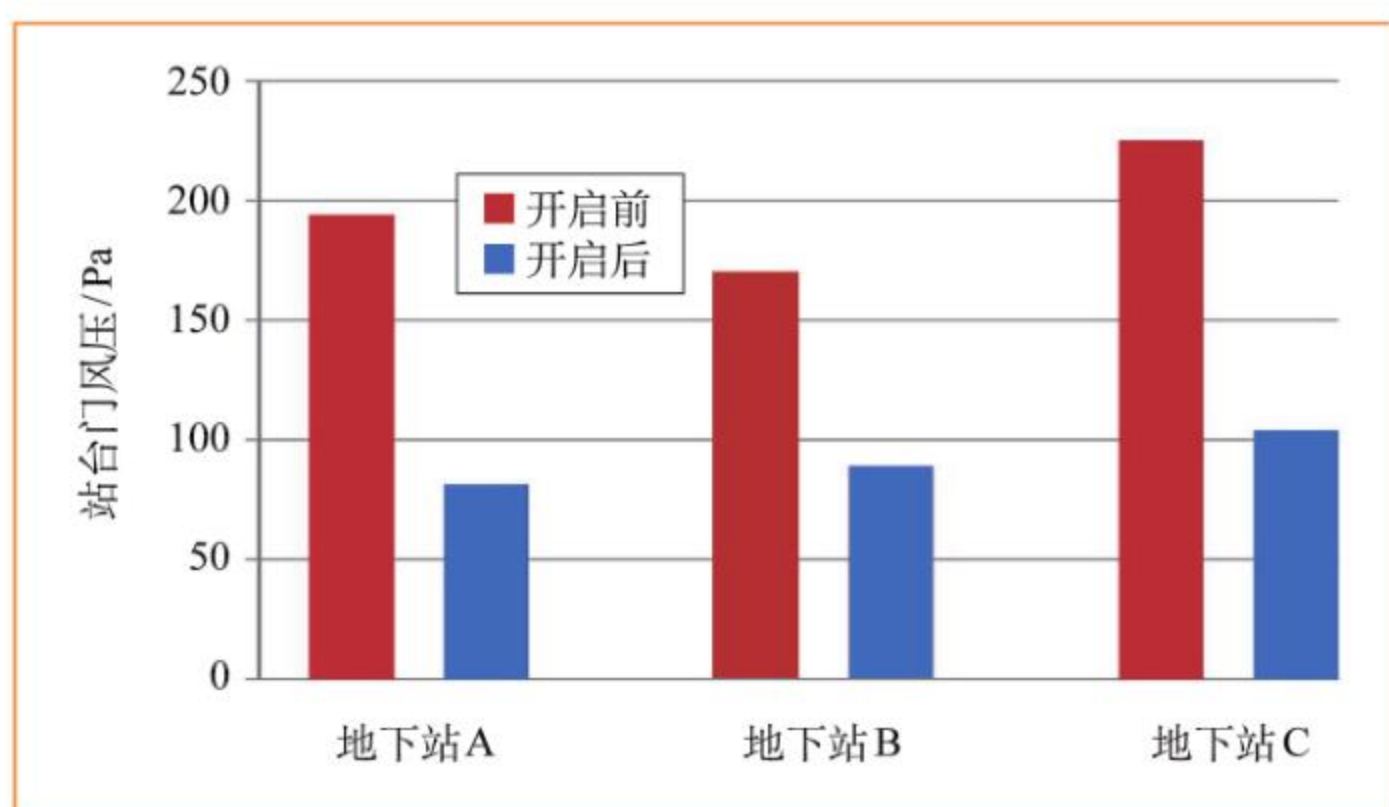


图6 风阀开启前后站台门风压对比

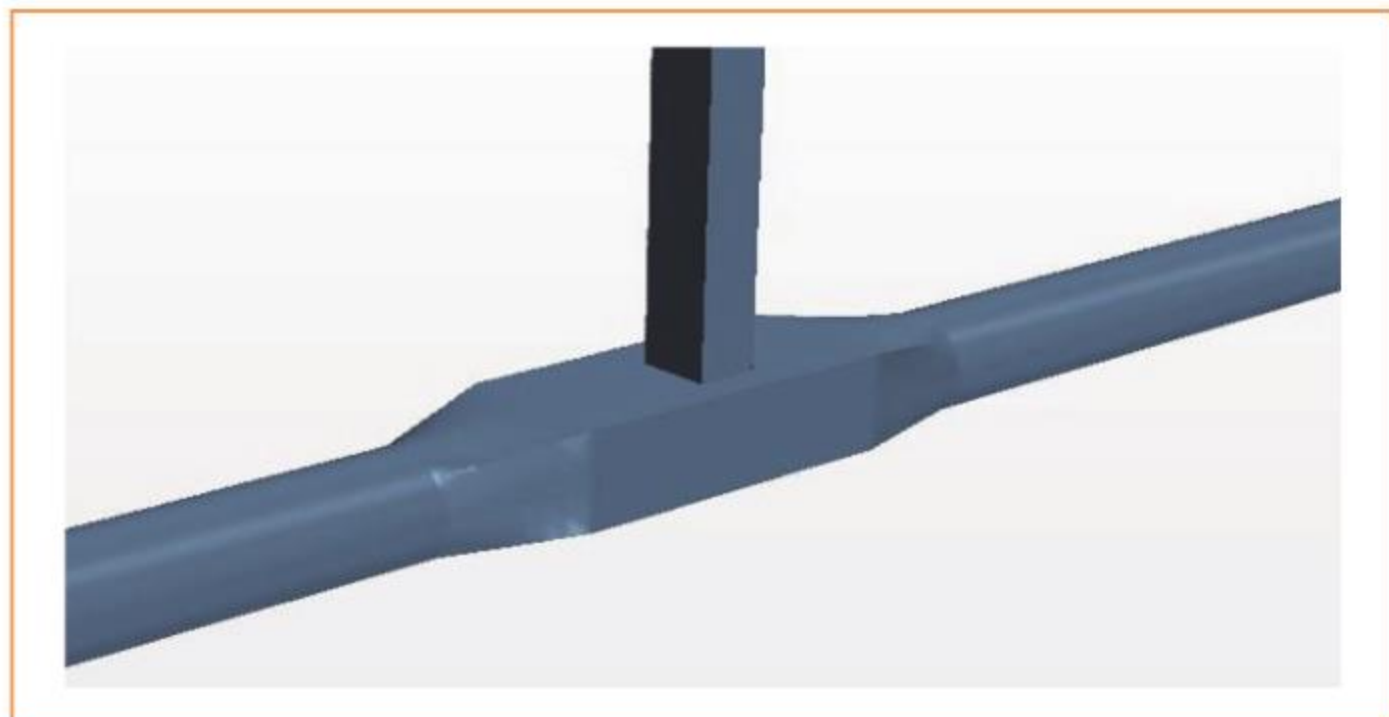


图7 中间风井处渐变结构计算模型示意图

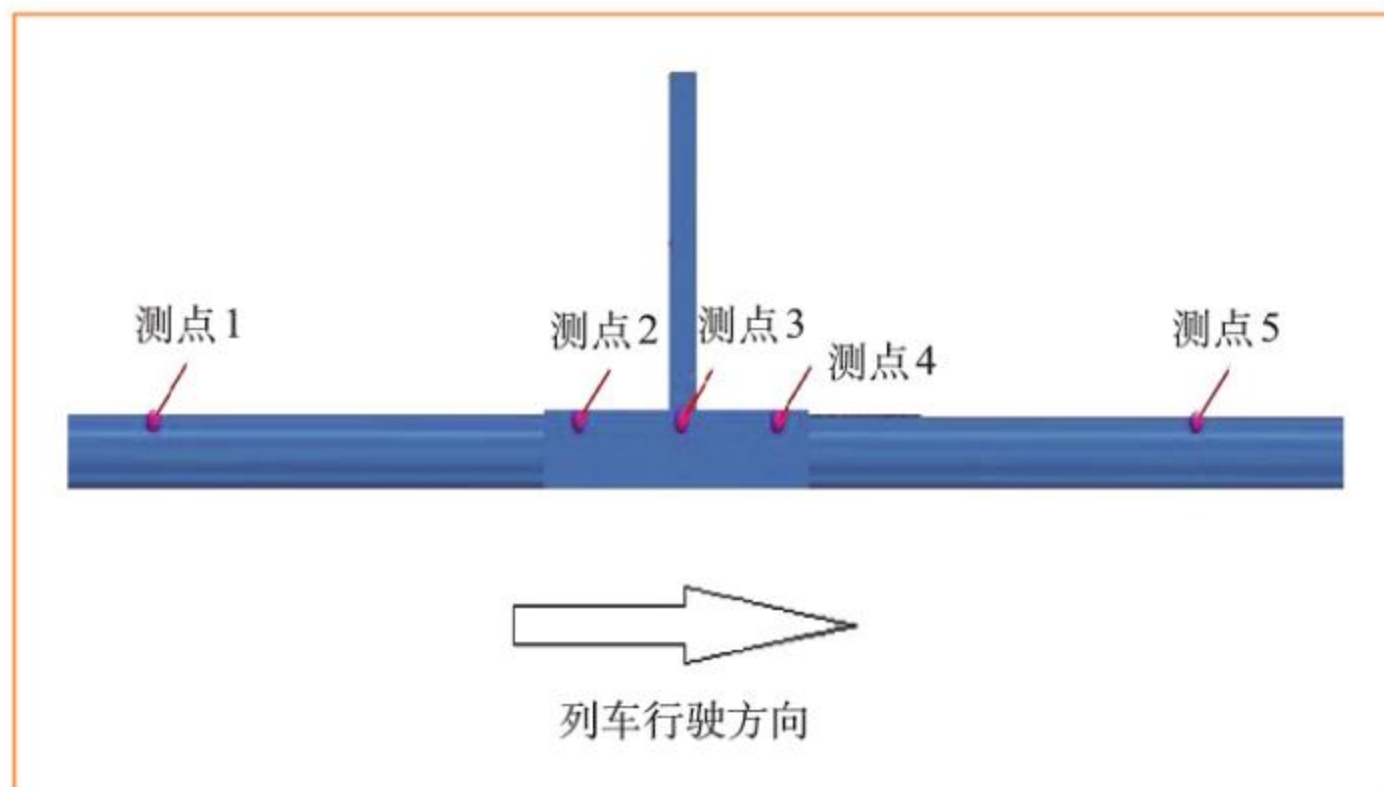


图8 测点布置示意图

表4 不同结构形式下各测点压力计算

测点	突变结构			渐变结构		
	最大正压 /Pa	最大负压 /Pa	压力波动 /Pa·s ⁻¹	最大正压 /Pa	最大负压 /Pa	压力波动 /Pa·s ⁻¹
测点1	634	574	804	630	572	786
测点2	432	311	463	421	296	458
测点3	408	278	407	405	275	404
测点4	429	396	429	428	377	418
测点5	413	525	678	410	516	674
车身外测点	310	583	555	270	579	543

部分导流墙体,以降低区间活塞通风的阻力。

3.7 区间设备设施承压要求的确定

快速列车在区间隧道内运行时,产生的空气压力波及活塞风荷载会对区间隧道设备设施的正常运行带来不利影响。项目设计阶段,通过理论分析、数值模拟、模型试验等手段,对区间隧道内可能达到的最大压力峰值进行了分析预测,得出区间隧道内最大正压幅值为+2 210 Pa,最大负压幅值为-1 120 Pa。综合考虑计算边界条件、模型差异、多列车追踪运行、最大正负压叠加、正负压长期交替作用、疲劳荷载等不利因素后,隧道内设备设施承压按最大正压+3 500 Pa,最小负压-1 800 Pa进行设计。

空载试运行期间,利用实车测试手段对区间隧道最大正负压幅值进行了验证,列车最高运行速度140 km/h时的实车测试数值如图9、图10所示。由图可知,龙泉山隧道内的实测最大压力峰值为-618 ~ +895 Pa,兴天风井内的实测最大压力峰值为-1 282 ~ +1 690 Pa。区间隧道内最大正负压设计值均有一定的安全冗余度。

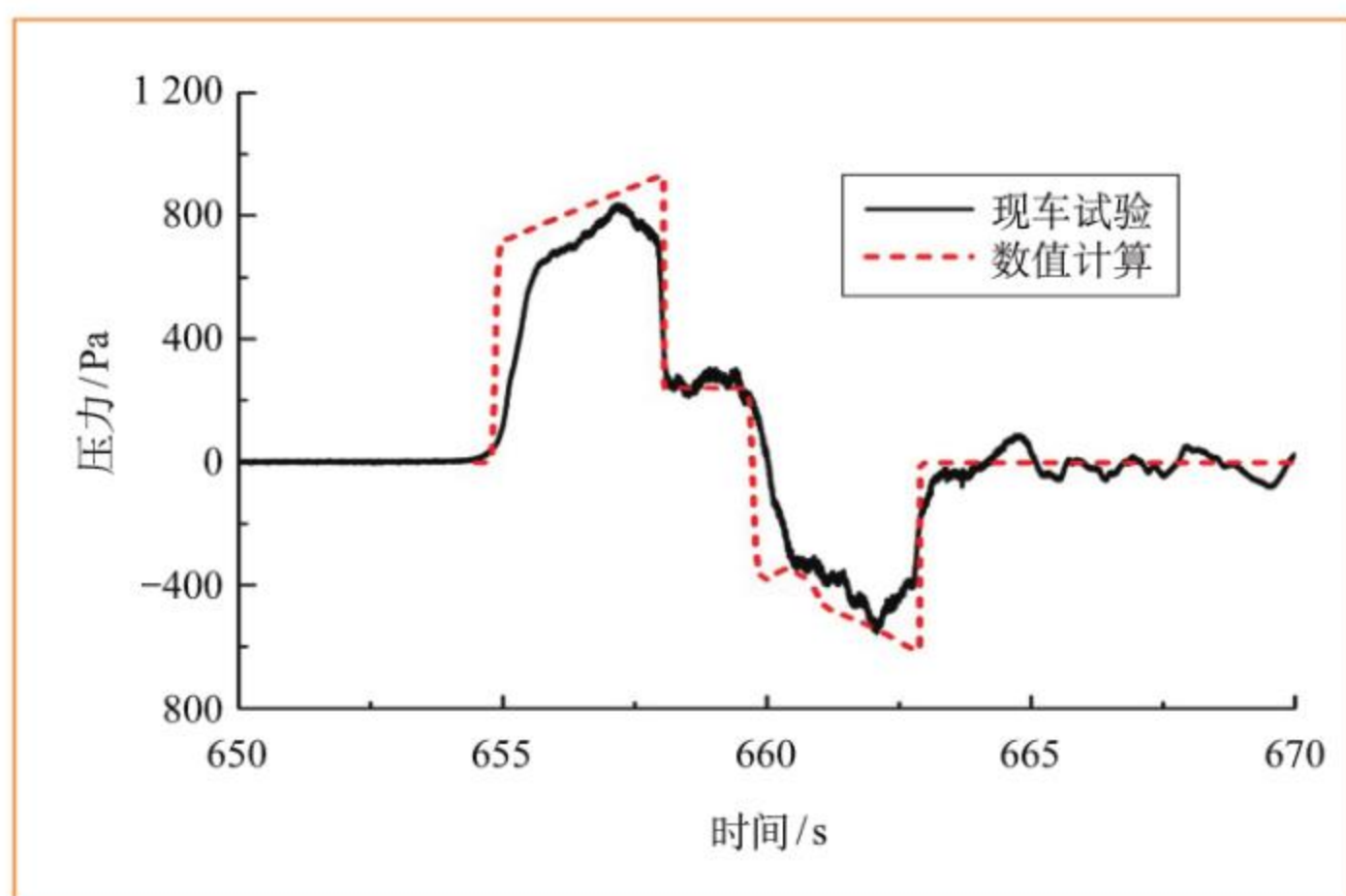


图9 龙泉山隧道内测点压力

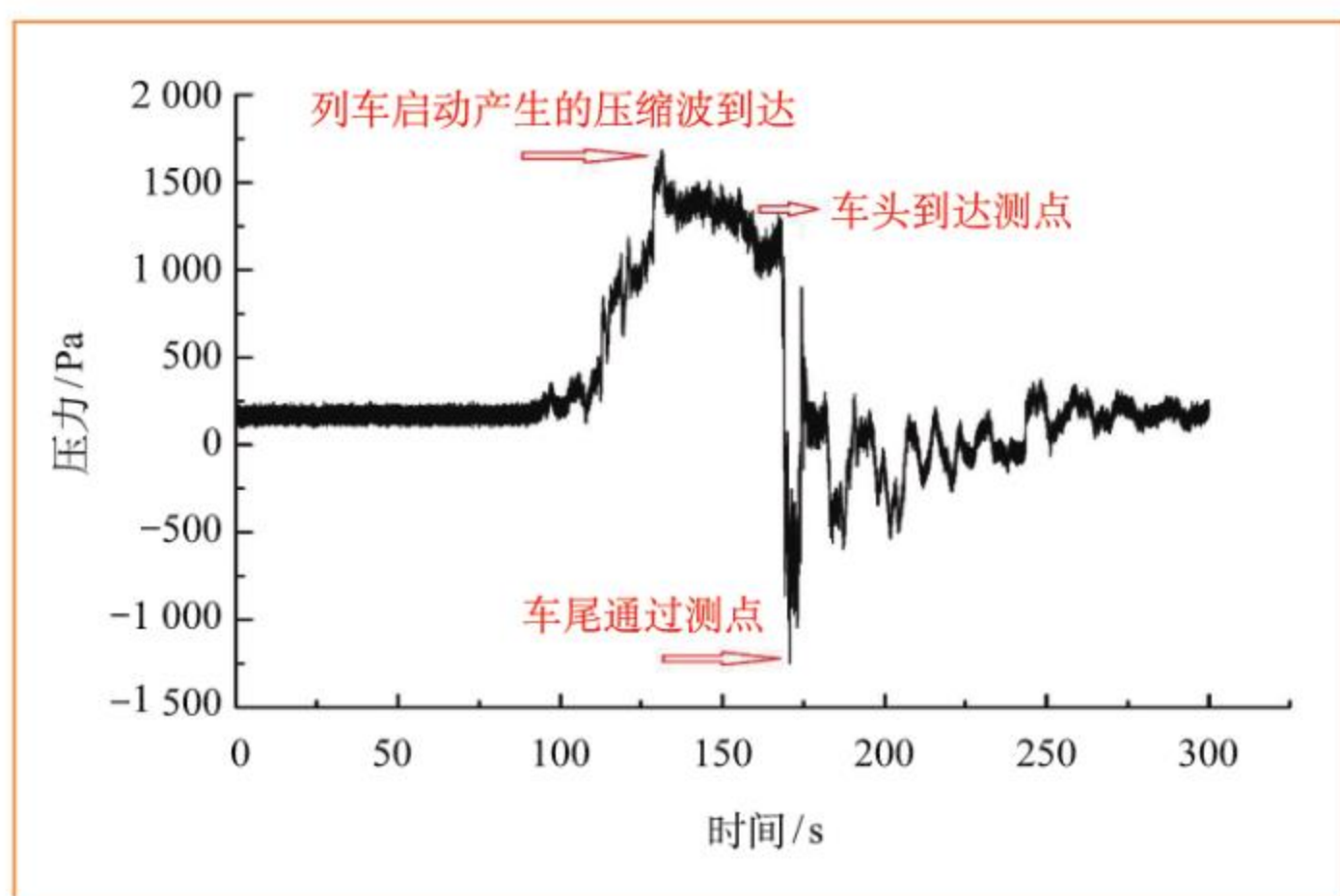


图10 兴天风井内测点压力

4 隧道通风系统设计



图12 轨顶排热风道设置现场图

4.2 车站轨行区轨顶排热风道设置优化

因该线采用的车辆为 AC25kV 供电制式，列车无下部制动电阻，故在列车停站区域，相应取消轨道下排热风道，仅设置列车顶部排热风道，列车顶部排热风道兼做列车停站区域火灾时的排烟风道。

同时，因地下车站轨行区接触网安装高度为轨面以上 6 500 mm，若按照常规方式布置轨顶排热风道，轨面至中板的高度将达到 7 200 mm，必然会导致工程投资进一步增加。为控制工程规模，降低站台层轨行区高度，该工程的列车顶排风道设置在侧站台上部，通过侧面开口的方式与车行区连通，如图 11、图 12 所示。如此可在满足使用功能的前提下，大大降低站台层高度，节约土建投资。

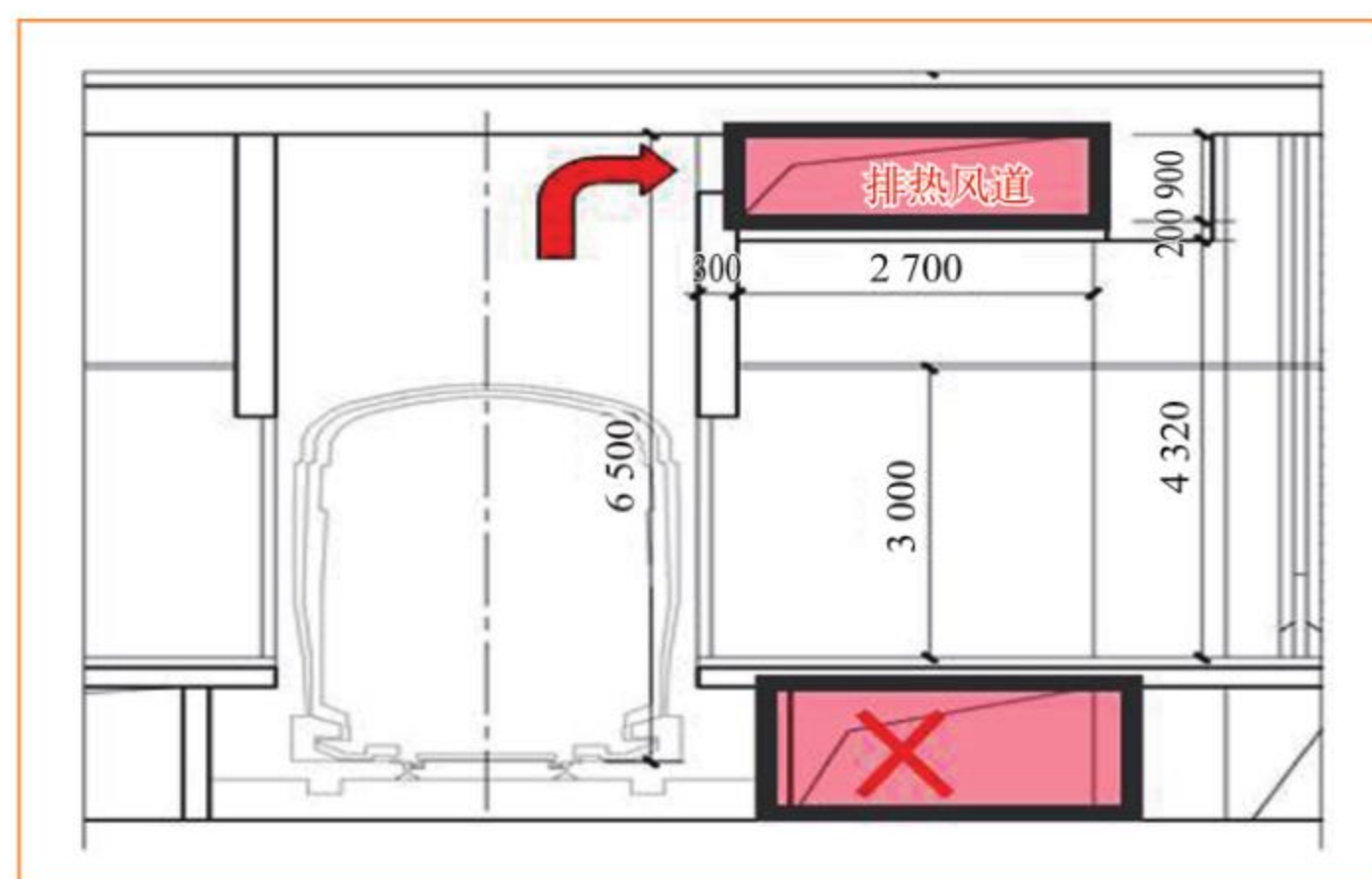


图11 轨行区排热风道设置优化示意图(单位: mm)

为节约投资并减小风亭构筑物对地面景观的影响，近年来部分城市已开通线路大都采用单活塞风井的隧道通风系统，即仅在出站端设置活塞通风道，进站端的活塞风阀呈关闭状态。单个活塞风道的净通风面积为 16 m^2 ，标准车站每站的活塞通风面积共 $2 \times 16 \text{ m}^2 = 32 \text{ m}^2$ 。

因该线设计运行速度高达 140 km/h，区间活塞风量大。全线地下车站、中间风井均采用双活塞风井的隧道通风系统，即在进站、出站端均设置有活塞通风道。单个活塞风道的净通风面积为 20 m^2 ，每站的活塞通风面积共 $4 \times 20 \text{ m}^2 = 80 \text{ m}^2$ 。根据模拟计算可知，单线隧道的活塞通风量中，通过列车进站端活塞风道泄漏的风量比例约占 40% ~ 50%，由此可见，当车站采用双活塞风道的通风模式时，由于列车进站活塞风井的泄压作用，可以大大降低站台门启闭过程中的附加风压值，同时还能增加区间隧道的通风换气量。

