

# 东莞轨道交通2号线列车客室空气压力波动控制

周 杨

(东莞市轨道交通一号线建设发展有限公司, 523420, 东莞//工程师)

**摘 要** 简述了地铁列车客室空气压力波动对乘客舒适性的影响。从理论上对列车客室空气压力波动进行了分析,并给出了提升列车气密性和优化列车造型来抑制车内压力波动的措施。通过上述措施对东莞轨道交通2号线列车进行了优化。在东莞轨道交通2号线正线进行的列车客室空气压力波测试结果表明,客室空气压力波动控制效果良好。

**关键词** 地铁快线; 列车; 空气压力波动; 乘客舒适性; 气密性

**中图分类号** U270.38<sup>+</sup>3

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2020.07.016

## Train Air Pressure Fluctuation Control on Dongguan Rail Transit Line 2

ZHOU Yang

**Abstract** The influence of the train air pressure fluctuation on passenger comfort is briefly introduced, and the air pressure fluctuation is theoretically analyzed. On this basis, control measures such as improving train air tightness and optimizing train shape are proposed. The measures are applied to trains running on the main line of Dongguan rail transit Line 2 to suppress the pressure fluctuation, and the test result shows that the control of pressure fluctuation is effective.

**Key words** metro express; train; air pressure fluctuation; passenger comfort; air tightness

**Author's address** Dongguan Rail Transit Line 1 Construction Development Co., Ltd., 523420, Dongguan, China

近年来,在我国已投入运营的时速为100~120 km的地铁快线中,由于列车客室空气压力变化而引起乘客耳朵不适甚至出现耳鸣的问题时有发生。本文针对列车室空空气压力波动对乘客的影响进行了基本分析,介绍了东莞轨道交通在降低2号线列车客室空气压力波动方面所采取的措施,并通过测试验证了客室空气压力波的抑制效果。

## 1 地铁列车客室空气压力波动对乘客舒适性的影响

GB 50157—2013《地铁设计规范》和建标104—2008《城市轨道交通工程项目建设标准》限定的列车最高速度目标值为100 km/h。按此规范要求,地铁列车在隧道内一般以不高于100 km/h的速度运行,乘客对隧道及列车客室的压力和压力变化尚未有不良反应。然而,随着地铁列车运行速度等级的提高,列车在隧道内运行引起的空气压力变化明显变大,传入客室内的压力变化给乘客造成的不舒适程度会明显增加。

国内外对列车空气动力学和压力波动的研究主要集中在高速列车领域,而对运行速度较低的城市轨道交通领域的研究刚刚起步,相关资料比较匮乏。国内只是在铁建设[2007]88号《铁道隧道设计施工有关标准补充规定》中提出了单线隧道列车客室空气压力变化应小于800 Pa/3 s,以此来作为人体舒适性评判标准。

为了解地铁快线特别是120 km/h线路列车客室空气压力变化与乘客耳朵舒适性的关系,东莞轨道交通曾委托相关单位在同行地铁线路上做了列车客室空气压力测试,测试时列车的最高运行速度为110 km/h。测试结果如图1所示。

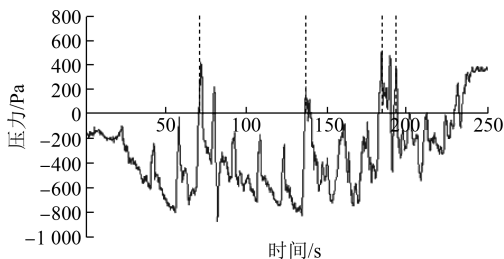


图1 地铁列车在隧道内运行时客室气压波形图

图1中,虚线标记的都是有耳鸣反应的时间记录点。从图1中可以看出:气压从低点处向高点处

剧烈变化时容易引起耳膜反应;从最低点到引起耳膜反应记录点的时间一般为 2.0~2.5 s 左右。由图 2 的局部放大图可见,引起耳膜明显不适时记录的压力变化超过了 900 Pa/3 s,高于“单线隧道压力变化小于 800 Pa/3 s”的评判标准。

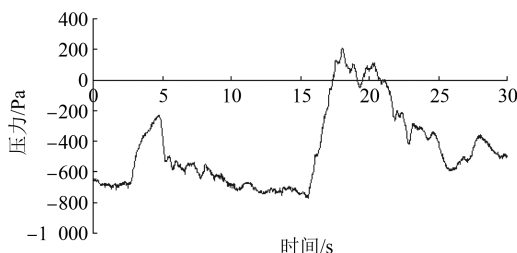


图2 地铁列车在隧道内运行时客室气压波形局部放大图

## 2 列车客室空气压力波动理论分析及抑制措施

上述实际测试结果,证明了乘客耳膜反应与列车客室空气压力波动程度有直接关系。地铁列车通过单线隧道时,客室空气压力的变化率与车内外压差成正比,其表达式为:

$$dP_{in}/dt = 1/\tau(P_{out} - P_{in}) \quad (1)$$

式中:

$P_{out}$ ——列车车体表面压力;

$P_{in}$ ——列车客室空气压力;

$\tau$ ——密封指数;

$t$ ——时间。

由式(1)可见,列车客室空气压力的变化率与车外压力和车辆的密封性有直接关系,车外压力变化越大,对应的客室空气压力变化率就增大,即车辆密封性能良好,能对客室空气压力变化起到直接抑制作用。因此,要减小列车客室空气压力变化,需从减小车外压力变化和提升列车气密性两方面着手考虑。而单列列车通过单线隧道时内外压力变化幅值关系式为:

$$\Delta P = \rho v^2 \beta / (1 - 2\beta) \quad (2)$$

式中:

$\Delta P$ ——列车车体表面压力变化幅值,Pa;

$v$ ——列车运行速度,km/h;

$\rho$ ——阻塞比;

$\beta$ ——空气密度,常温下取 1.225 kg/m<sup>3</sup>。

由式(2)可以看出,车外压力变化受列车运行

速度和阻塞比直接影响,而阻塞比则和隧道型式(隧道截面面积、形状等)、列车的相关参数(车头形状、列车表面阻力系数等)等条件有关。

综上所述,列车客室空气压力波动可以通过提升列车气密性、降低运行速度和降低列车阻塞比进行抑制;而阻塞比可以通过改善隧道条件(采用 6 m 内径大断面等)、优化列车造型减小表面阻力等措施进行优化。因此,就列车本身而言,在设计速度、车辆选型既定的前提下,提升气密性和优化列车造型是抑制客室空气压力波动的重要措施。

## 3 东莞轨道交通 2 号线车辆优化设计

为抑制列车在隧道运行时客室空气压力变化,杜绝客室空气压力波对乘客耳膜不适的影响,东莞轨道交通在 2 号线车辆设计时进行了充分研究,并采取以下措施进行了设计优化。

### 3.1 车头流线型优化设计

普通速度等级地铁列车车头一般采用短平直面罩造型。东莞轨道交通综合考虑 2 号线列车车速、结构及工艺材料等方面的因素,将车头加长了约 0.7 m,采用更加流线型的设计,流线型部分的长度达到了 1.5 m,整体长度约为 2.7 m,如图 3 所示。流线加长后,车头横截面变化梯度较小,较传统地铁列车短平车头能表现出更好的气动性能。

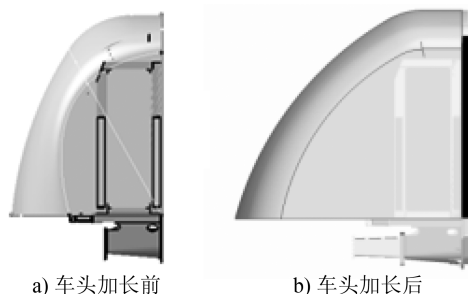


图3 流线型车头设计图

为更有效抑制客室空气压力波动,东莞轨道交通在 2 号线列车车头流线拉长的基础上,结合仿真情况,对车头的几何模型进行了进一步优化设计,如图 4 所示。相比原始车头头型,优化模型一方面细化了工业设计要求,另一方面在面罩流线、面罩与车体过渡处、列车裙板处进行了造型调整,使得列车车头整体流线型更强。

使用 ANSYS Fluent 仿真软件对列车空气动力学进行仿真分析。设定列车密封性指标  $\tau \leq 0.5$  s,设定隧道断面为面积最小的矩形断面,根据线路情

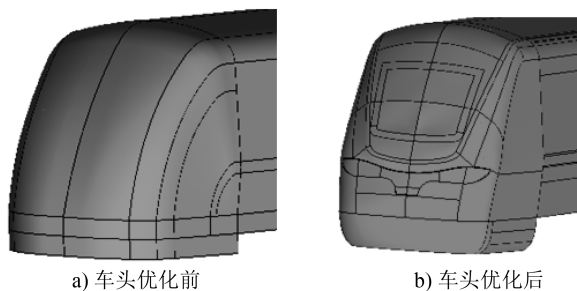


图4 列车车头几何模型优化后

况,建立隧道模型,隧道两端设置为开阔场地。采用滑移网格来模拟列车和隧道区域的相对移动,整个流场区域网格划分为移动部分和固定部分,即列车周围网格以列车运行速度滑移。固定部分包括隧道区域以及隧道外部流场区域,固定部分和移动部分的网格信息通过交界面来传递,如图5所示。采用网格划分工具 ICEM CFD 来划分网格,固定区域采用结构化网格进行划分,移动区域采用非结构化网格进行划分,如图6和图7所示。

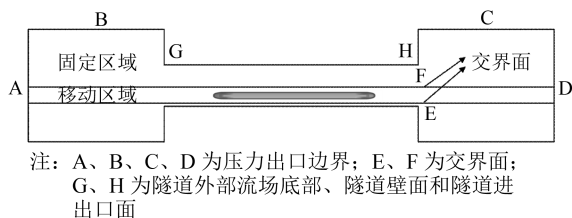


图5 列车-隧道流场分区示意图

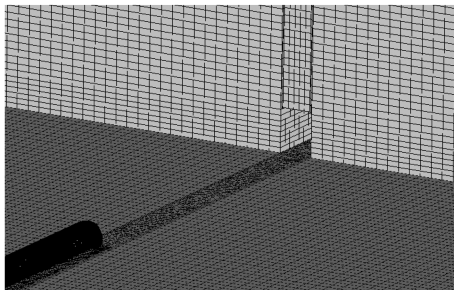


图6 隧道及地面网格示意图

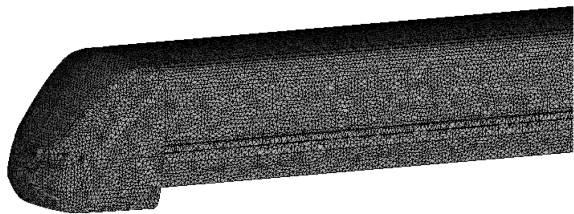


图7 列车表面网格示意图

模拟计算列车以 100 km/h 的速度通过最不利长度为 1 100 m 隧道时的列车内外压力波动。车头

流线型造型优化前的模拟计算结果如图8所示。由图8可知,3 s内客室空气压力变化最大值约为 810 Pa。

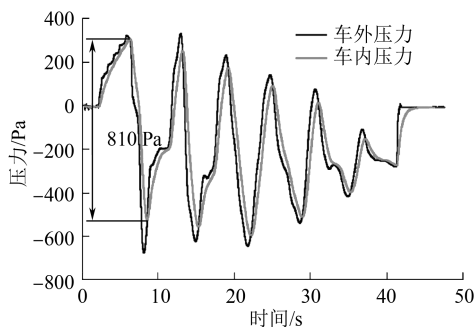


图8 列车造型优化前车内外压力波动曲线

造型优化后的模拟计算结果如图9所示。由图9可知,3 s内客室空气压力变化最大值约为782 Pa。通过对比可以看出,在气密性指标不变的情况下,列车造型优化对车外和车内压力变化有一定的抑制效果。

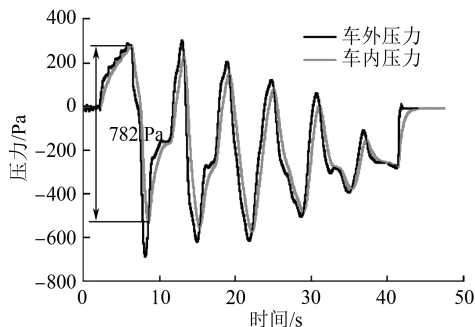


图9 列车造型优化后车内外压力波动曲线

### 3.2 列车密封性优化设计

#### 3.2.1 排风方式优化

地铁列车通常采用自然排风方式,排风时车内外通过废排风口直接连接,从而导致列车密封性较差。为进一步提高列车密封性,东莞轨道交通2号线列车设计了专用的废排风道,并设置了废排风阀,废排风阀可根据情况控制开启与关闭,关闭时可使列车成为一个相对密闭的空间,明显提升了列车密封性,以达到抑制客室空气压力波动的效果。

#### 3.2.2 采用单侧三塞拉门设计

列车的密封性能和车门存在紧密联系,客室车门的结构型式和数量对密封性能有直接影响。为尽可能提升密封性能,东莞轨道交通2号线列车单节车客室门选用密封性能良好的塞拉门。而在车门数量选择方面,东莞轨道交通专门进行了2号线

列车单节车单侧 3 车门通过能力研究。根据客流预测情况,选择初期、近期、远期 3 个时期中高峰时段上下客最多的车站进行计算。在规划的 3 个时期不同对开列数的情况下,算得在最大客流量的车站上下客时间均不到 20 s,大大低于预测的停站时间。研究证明,单节车单侧 3 车门布置方案通过能力足以满足东莞轨道交通 2 号线的客流需求。因此在此前提下,东莞轨道交通 2 号线列车采用单节车单侧 3 客室门设计,较传统的 B 型车单侧 4 车门设计减少了车门数量,因而进一步提升了列车密封性。

3.2.3 车体结构优化

东莞轨道交通 2 号线列车在车体结构上,采用连续焊缝以消除焊接气隙。取消了车体排水孔,并对直通车下的管路和电缆孔都采取了必要的密封措施,最大可能保证了车体结构的高气密性。

3.2.4 选用高气密性贯通道

东莞轨道交通 2 号线列车选用一体式侧墙贯通道,其双层折棚和一体式侧墙的结构,具有良好的隔音、隔热性能,并最大程度提升了贯通道的的气密性。

4 列车客室空气压力波测试

为直观掌握东莞轨道交通 2 号线列车正线运行时客室空气压力波动情况,东莞轨道交通委托相关测试单位在 2 号线正线进行了客室空气压力波的测试。测试列车以 100 km/h、110 km/h、120 km/h 3 种速度级通过常规隧道断面(内径为 5.4 m)时车体内外的压力波变化。测试结果如图 10、图 11 和表 1 所示。

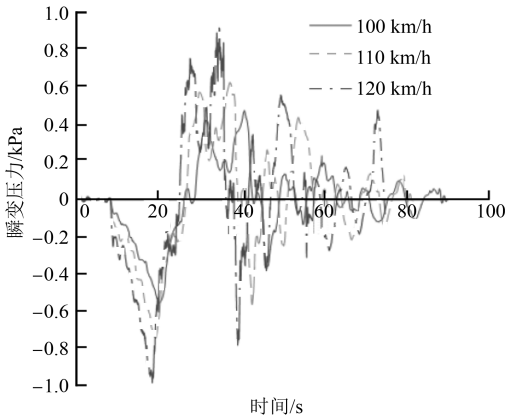


图 10 列车车外压力波曲线

由图 10、图 11 和表 1 可以看出,车体内外瞬变压力的变化率、3 s 极值最大值、峰值最大值均出现在速度级为 120 km/h 的状态下。瞬变压力变化率最大值为 0.463 0 kPa/s,瞬变压力 3 s 极值最大值

为 0.528 7 kPa,瞬变压力峰值最大值为 0.579 1 kPa。测得的 529 Pa/3 s 的压力变化远小于 800 Pa/3 s 的舒适度评判标准,客室空气压力波动的控制效果良好。东莞轨道交通 2 号线从 2016 年 5 月开通至今,未收到乘客耳膜不适的反映。

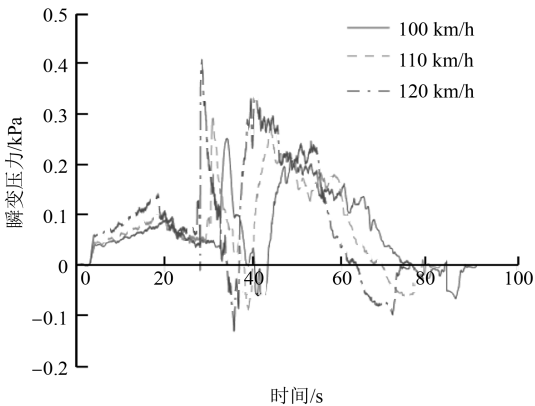


图 11 列车客室空气压力波曲线

表 1 列车车内外压力波测试数据记录

车速/ (km/h)	车内瞬变压力			车外瞬变压力		
	峰值 最大值/ kPa	变化率 最大值/ (kPa/s)	3 s 极值 最大值/ kPa	峰值 最大值/ kPa	变化率 最大值/ (kPa/s)	3 s 极值 最大值/ kPa
100	0.392 8	0.253 4	0.350 5	1.104 7	0.714 2	1.096 6
110	0.439 8	0.355 2	0.436 5	1.479 1	1.019 9	1.391 6
120	0.579 1	0.463 0	0.528 7	1.860 3	1.446 4	1.774 6

5 结语

对于设计速度为 100~120 km/h 的地铁快线,列车客室空气压力波动引起的乘客耳膜舒适度问题不能忽视,作为建设单位需高度重视,在线路设计初期就应考虑采取相关应对措施。对于列车本身而言,优化列车造型及提升气密性至关重要。

参考文献

[1] 东莞市轨道交通有限公司.东莞市城市快速轨道交通线网建设规划车辆选型专题研究最终报告[R].东莞:东莞市轨道交通有限公司,2010.

[2] 胡佳乔,王维.120 km/h 速度等级快速地铁车辆的研制[J].电力机车与城轨车辆,2017(2):15.

[3] 中国铁道科学研究院铁道技术研究所.东莞市城市轨道交通 2 号线压力波测试报告[R].北京:中国铁道科学研究院铁道技术研究所,2016.

[4] 成都西南交大技术转移中心有限公司.东莞 R2 线 120 km/h 地铁车辆隧道空气动力学分析结题报告[R].成都:西南交大技术转移中心有限公司,2016.

(收稿日期:2018-08-28)