

快速地铁车辆气动效应及车辆设计参数分析

唐闻天¹ 王丽丽²

(1. 上海轨道交通检测技术有限公司,200434,上海;2. 中车大连机车车辆有限公司, 116022,大连//第一作者,工程师)

摘要 对快速地铁车辆可能产生的空气动力效应进行了描述,并详细分析了与气动效应相关的车辆设计参数及其变化规律。分析表明,随着车速的提高、车辆断面积的增大,列车空气阻力、压力波幅值、气动噪声等均有不同程度的增大;列车头型长细比越大、车辆表面平顺程度越高,列车空气阻力越小。

关键词 快速地铁车辆;空气动力效应;车辆设计参数

中图分类号 U270.1;U270.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.05.030

Analysis on Aerodynamic Effects and Design Parameters in Rapid Metro Vehicle Design

TANG Wentian, WANG Lili

Abstract Regarding rapid metro vehicle, the possible aerodynamic effects are described, vehicle design parameters related to aerodynamic effect and their change rules are analyzed in detail. The research shows that with the increase of vehicle speed and cross section, the aerodynamic resistance, amplitude of pressure wave and aerodynamic noise will also increase to varying degrees. Besides, the greater increase of vehicle-head slenderness ratio and car-body surface smoothness, the smaller aerodynamic resistance will be.

Key words rapid metro vehicle; aerodynamic effect; vehicle design parameters

First-author's address Shanghai Railway Certification Co., Ltd., 200434, Shanghai, China

目前,伴随我国城镇化水平的提高,以及铁路跨线联运方案的不断提出,部分城市对地铁列车运行速度提出了更高的要求,快速地铁车辆逐渐涌现。尽管地铁列车的速度没有高速铁路那么快,但地铁隧道阻塞比(一般在0.45左右)相对高速铁路却要大很多。从高速铁路隧道空气动力学的研究^[1]来看,快速地铁车辆将会产生比较明显的隧道空气动力学效应。因此,有必要对快速地铁车辆运行时的空气动力效应开展深入研究,分析空气动力效应对地铁车辆设计参数的影响。

1 快速地铁车辆的定义

目前,尚未有对快速地铁车辆的统一定义,我国现行的《地铁设计规范》也仅考虑运行速度不超过100 km/h的地铁车辆。本文参考我国铁路列车速度划分标准,将地铁车辆按如下速度等级划分(见表1)。

表1 地铁车辆速度等级划分

速度等级/(km/h)	车辆定义
≤80	常速地铁车辆
80 < · ≤100	中速地铁车辆
100 < · ≤140	快速地铁车辆

2 快速地铁车辆气动效应分析

地铁列车在区间隧道中运行时,由于空气流动受到隧道及车体的限制以及空气的可压缩性,空气压强骤然增大,从而形成压缩波并向周围传播,引起隧道内部及列车车体表面的压力产生变化,进而压力波动传播到车内。这种压力波的传播可引发如下问题:列车前后的空气压差及空气与车辆表面的摩擦形成空气阻力;隧道压力波动引起车厢内压力突变,导致乘客的不良反应;产生噪声,引起车内乘客耳膜压痛等。

2.1 空气阻力

列车在行驶过程中的阻力分为空气阻力和行驶阻力。当列车低速行驶时,行驶阻力占首要位置,空气阻力对列车行驶的影响不大。但随着列车速度的提高,列车的空气阻力也随之快速增加,根据国外学者研究,当列车速度为160 km/h时,空气阻力占总运行阻力的60%^[2]。列车在隧道内运行时受到的空气阻力比其在明线上运行要大好几倍。隧道内列车空气阻力的主要影响因素包括列车速度、阻塞比、列车长度等。

2.2 压力波动

列车在通过隧道时,由于隧道壁对空气的限制,发生空气动力学现象的强度较明线环境下强烈得多,因此,列车在隧道中行驶就像活塞在气缸中高速运动一样,使列车周围的空气处于瞬变状态。列车车头推开的空气被迫在隧道中高速运动,大量空气被推向前方,少量的空气通过列车与隧道壁的间隙流向列车后方,形成空气压力波^[3-5]。隧道中空气压力波的特性与隧道和列车两方面的因素密切相关,阻塞比及列车运行速度是影响隧道中空气压力波最重要的两个因素。

2.3 气动噪声

地铁列车气动噪声主要是因为地铁列车车体表面出现空气流中断所产生的涡流导致。根据其性质不同,可以把噪声源分为两类:结构体表面流体产生的噪声;紊流产生的噪声^[6]。气动噪声与列车的行驶速度、车体表面的粗糙程度,以及车体前端是否流线化等因素有关。气动噪声不仅会引起环境污染,还会造成结构疲劳和破坏。由于受到较小且连续隧道断面封闭空间的影响,地铁列车噪声的传递、衰减机理与铁路列车存在很大差异。

3 快速地铁车辆气动设计参数分析

3.1 车体断面面积

3.1.1 车体断面面积与空气阻力的关系

列车的空气阻力与车体断面面积近似成线性增大关系,如图1所示。车体断面设计过程中,在保证乘坐空间及设备安装要求的前提下,应尽量控制车体断面面积,以便尽可能降低列车空气阻力。

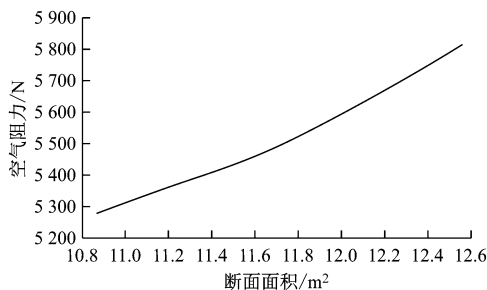


图1 车体断面面积与空气阻力的关系

3.1.2 车体断面面积与车内压力的关系

列车的空气压力波幅值与车体断面面积成 1.3 ± 0.25 次方关系增加,如图2所示。列车运行速度越高,车体断面面积对压力波幅值的影响越为显著。在车体断面轮廓设计过程中,在车顶和侧顶采

用圆弧优化,并采用鼓形侧墙,有利于降低压力波,提升横风气动性能。

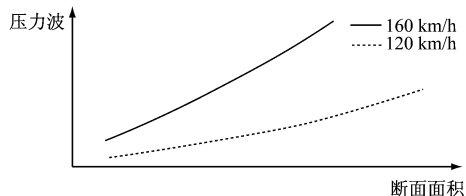


图2 车体断面面积与空气压力波的关系

3.1.3 车体断面面积与气动噪声的关系

随着车体断面面积增加,车身表面气动噪声源面积增大,进而导致列车气动噪声增加,如图3所示。但列车气动噪声与车体断面面积之间的具体关系,还需进一步研究。在车体断面设计过程中,应使断面轮廓具有尽可能高的流线化程度,这样可使得气流流动更为平顺,有利于降低气动噪声。

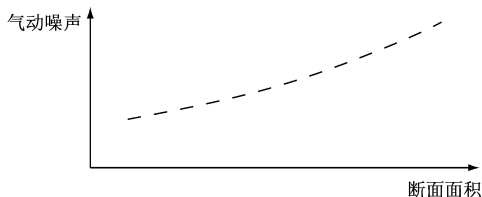


图3 车体断面面积与气动噪声的关系

3.2 列车速度

3.2.1 列车速度与空气阻力的关系

列车速度与空气阻力的拟合曲线呈现出二次抛物线形状,即空气阻力与车速的平方成正比^[7](如图4所示)。当运行速度达到140 km/h时,列车的空气阻力将是运行速度为80 km/h时的3倍多。因此,车辆设计时需采取必要的措施,以降低列车的空气阻力。

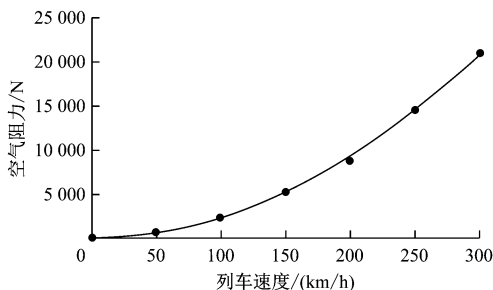


图4 列车速度与空气阻力的关系

3.2.2 列车速度与车外压力幅值的关系

在相同阻塞比的条件下,车体表面压力幅值与列车速度的平方近似成线性关系^[8],如图5所示。当地铁列车的运行速度达到140 km/h时,车外压力

波幅值可达 4 400 Pa。

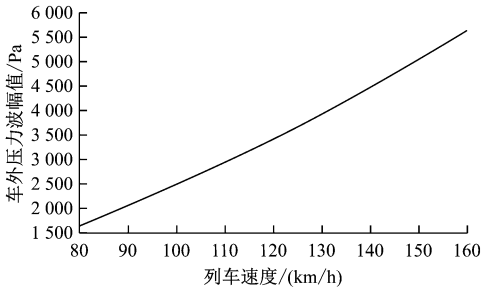


图 5 不同速度下车外压力幅值变化曲线

车外压力波幅值还受阻塞比的影响。随着阻塞比的增加,车外压力波幅值也随之增大,如图 6 所示。当阻塞比达到 0.45 时,100 km/h 的地铁列车车外压力波幅值可达 2 200 Pa。

3.2.3 列车速度与车内压力幅值的关系

隧道内产生的瞬变压力向车辆传递的规律主要取决于车辆密封性和车体刚度两个因素。当列车完全不密封,则车内外压力相同;当列车完全密封,且车体的刚度又比较大时,则车外的空气压力

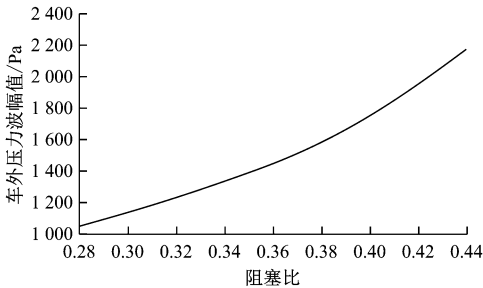


图 6 不同阻塞比下车外压力幅值变化曲线

瞬变对车内几乎没有影响。目前,国内外常用密封指数 τ 来表征车辆密封性能。参考国外对列车密封性的研究成果,对于不密封车辆, τ 为 0.4 ~ 0.8 s;稍加密封的车辆, τ 为 1.5 s 或 3 s;密封性能好的车辆, $\tau \geq 5$ s;对于密封空调车, $\tau \geq 7$ s。

相关学者对地铁车辆以不同速度通过不同阻塞比隧道时的气动压力波情况展开了分析研究^[9-12],结合推荐的车内压力限值^[13],可得到不同列车速度下的车内压力变化幅值和变化率,以及车内压力舒适性,如表 2 所示。

表 2 不同列车速度和不同阻塞比下的车内压力变化及舒适性情况

列车速度/ (km/h)	密封指数/ s	阻塞比	压力变化 幅值	压力变化率/ (Pa/s)	压力舒适性
100	5.0	0.45	462 Pa/3 s		满足压力控制标准
		0.38	1 151 Pa/3 s		均不能满足压力控制标准
		0.33	883 Pa/3 s		
120	0.7	0.46		573	阻塞比为 0.46 时,不能满足压力控制标准; 阻塞比为 0.40 和 0.35 时,均能满足压力控制标准
		0.40		335	
		0.35		319	
	3.0	0.48	850 Pa/1.7 s	510	阻塞比为 0.48 时,不能满足压力控制标准; 阻塞比为 0.39 和 0.36 时,均能满足压力控制标准
		0.39	520 Pa/1.7 s	310	
		0.36	480 Pa/1.7 s	290	
140	3.0	0.48	1 170 Pa/1.7 s	680	阻塞比为 0.48 时,不能满足压力控制标准; 阻塞比为 0.39 时,车内压力波动数值超出控制标准, 但幅度不大; 阻塞比为 0.31 时,能满足压力控制标准,且有较大的 富余空间
		0.39	760 Pa/1.7 s	440	
		0.31	540 Pa/1.7 s	310	

由表 2 可知,列车在不同隧道断面中运行时,车辆的密封性越好,车内压力环境越舒适。但是,考虑到制造成本和制造工艺,车辆密封性并非越高越好。表 3 为不同列车速度、不同阻塞比条件下推荐的车辆密封指数。

3.2.4 列车速度与噪声的关系

随着列车运行速度的增加,列车与空气之间的相互作用变得越来越显著,速度的提升对列车的气

表 3 不同列车速度、不同阻塞比条件下的车辆密封指数

列车速度/(km/h)	阻塞比	推荐密封指数/s
100	0.45	3.0 ~ 5.0
	0.46	1.5 ~ 3.0
120	0.40	0.7 ~ 1.5
	0.35	0.7 ~ 1.5
	0.48	3.0 ~ 5.0
140	0.39	3.0 ~ 5.0
	0.31	1.5 ~ 3.0

动特性产生显著的影响。图 7 给出了列车速度与噪声之间的关系,列车的气动噪声与其运行速度的 6 次方成正比。

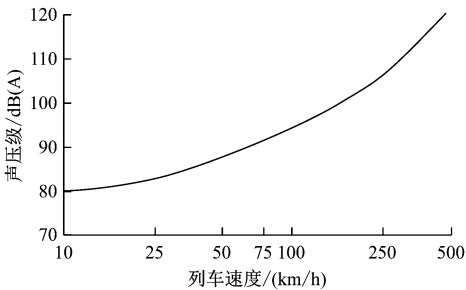
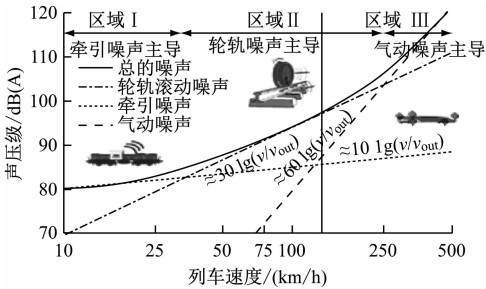


图 7 列车速度与气动噪声的关系

随着列车运行速度的变化,车外主要噪声源也发生变化,如图 8 所示。列车速度提升,轮轨噪声和气动噪声显著增大,并呈指数增长。其中,气动噪声大约以 $60 \lg v$ 的速率增长,轮轨噪声大约以 $30 \lg v$

的速率增长。列车速度为 140 km/h 时,噪声源分布为轮轨噪声 > 气动噪声 > 牵引噪声。



注： v_{out} 为计算参考速度
图 8 列车速度与车外噪声源的关系

根据文献[14]中的经验公式,可大致推算出快速地铁列车以 140 km/h 运行时,车外辐射噪声限值为 88 dB(A)。因此,需采取必要措施对车辆进行隔声降噪处理。参照既有地铁列车和城际列车的噪声水平,快速地铁列车的车内噪声推荐值见表 4。

表 4 不同速度条件下车内噪声指标推荐值					dB(A)	
速度/(km/h)	运行噪声				静止噪声	
	客室中部	客室端部	司机室	贯通道	客室	空调回风口下方
60(常速地铁列车)	70~73	70~73	71	72~73	67~69	71
140(城际列车)	65~67	69	63		68	
140(快速地铁列车)	70	70	68	70	63	65

3.3 列车头型长细比

由于地铁列车运行速度一般不高于 80 km/h,钝头头型列车产生的气动阻力在整车阻力中的比重较小,所以地铁列车通常采用钝头头型。但是,随着列车运行速度的增加,钝头头型列车产生的气动阻力将快速增大,以致在整车阻力中占据主导地位。研究表明,列车的气动阻力随着头型长细比的增加而减小^[15],如图 9 所示。由于钝头头型的长细比小,因此钝头头型列车的气动阻力较流线型头型列车的气动阻力增加得更快。也就是说,列车运行速度越高,流线型列车的减阻效果越明显,为此,在快速地铁列车的气动设计过程中,头型长细比也是需要予以考虑的重要指标。

3.4 车体表面平顺性

通过开展车体表面平顺化设计,可以有效降低列车的空气阻力。采用全包围式车下设备舱能够有效降低列车空气阻力,但增加设备舱将使得列车质量增加,进而使得列车的滚动机械阻力变大,因

此,需要平衡机械阻力和空气阻力的关系。车体表面平顺化及车下全包设备舱设计方案如图 10 所示。车体表面平顺化减阻效果见表 5。

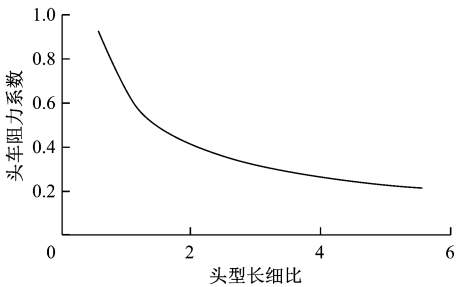


图 9 列车头型长细比与空气阻力的关系

由图 10 和表 5 可知,通过车体表面平顺化设计,列车空气阻力可减少约 13%;采用全包围式设备舱设计,列车空气阻力可减少 20%,效果明显。但是,采用设备舱会使得车身质量增大,进而导致列车机械阻力增加(具体数据与设备舱方案有关),因此,采用全包设备舱的最终气动减阻率约为 15%。

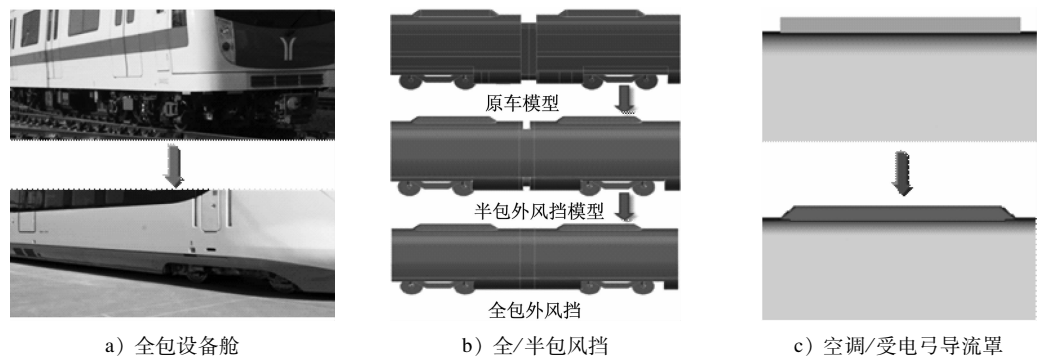


图 10 车体表面平顺化及车下全包设备舱设计方案

表 5 车体表面平顺化减阻效果

车体表面平顺化措施	减阻率/%
半包风挡	6
半包风挡 + 空调(受电弓)导流罩	10
全包风挡	8
全包风挡 + 空调(受电弓)导流罩	13
全包设备舱	20

4 结语

本文对快速地铁车辆可能产生的气动问题进行了描述,并从工程实践的角度,简要分析了与气动效应相关的车辆设计参数及其变化规律,以便为快速地铁车辆的设计提供参考。下一步,将结合具体项目,深入研究车辆设计参数(如车体断面面积)与气动噪声的关系,并提出气动激励噪声源和对应噪声控制策略,因为这是影响地铁列车进一步提速的主要瓶颈。

参考文献

[1] 梅元贵,周朝晖,许建林. 高速铁路隧道空气动力学[M]. 北京:科学出版社,2009:10.
[2] 黎南洋,徐文兰. 高速旅客列车的空气压力波[J]. 铁道劳动安全卫生与环保,1995,22(4):289.

[3] 张海天,陈健. 深圳地铁 11 号线隧道空气压力波研究[J]. 都市轨道交通,2011,24(5):62.
[4] 琚娟,高波. 高速铁路隧道内空气流场的流动显示[J]. 铁道建筑,2003(10):50.
[5] 王英学,高波. 高速列车进出隧道空气动力学研究的新进展[J]. 中国铁道科学,2003,24(2):83.
[6] 孙艳军,夏娟,梅元贵. 高速列车气动噪声及减噪措施介绍[J]. 铁道机车车辆,2009,29(3):25.
[7] 陈南翼,张健. 高速列车空气阻力的研究[J]. 中国铁路,1998(2):43.
[8] 王英学,高波,杨奎,等. 隧道阻塞比对列车进入隧道产生的气动效应的影响[J]. 实验流体力学,2006(4):30.
[9] 陈鹏飞. 地铁隧道空气动力学特性及最大运行速度研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
[10] 徐世南,张继业,熊骏,等. 地铁列车通过隧道时的气动性能研究[J]. 城市轨道交通研究,2016(9):99.
[11] 祝岚,张东,孙旭振,等. 基于乘客舒适性的快速地铁隧道压力波分析[J]. 都市轨道交通,2015,28(1):87.
[12] 陈雅莉,翁运飞. 高速地铁隧道压力波分析与隧道断面选取[J]. 铁道勘察,2016(4):91.
[13] 何德华. 高速列车车内空气压力舒适度标准的研究[J]. 铁道机车车辆,2016,36(3):1.
[14] 程雄,郭立平,文秧林. 基于 TSI 体系的轨道交通车辆噪声测量方法研究[J]. 技术与市场,2014,21(10):1.
[15] 梁习锋,田红旗. 列车气动性能评估参数研究[J]. 中国铁道科学,2003,24(1):38.

(收稿日期:2017-06-25)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com