

地铁车辆噪声控制策略探索

陈金龙

重庆轨道交通运营有限公司, 重庆 401120

[摘要]地铁车辆噪声直接影响乘客乘坐舒适度,也能反映车辆品质的重要指标。随着地铁车辆的快速发展,乘客对地铁的舒适性提出了更高要求。地铁车辆运营阶段的噪声问题成为目前广泛关注的重点。通过控制车内噪声,可满足乘客对舒适度的要求。基于此,文章阐述地铁车辆噪声源的种类、分析地铁车辆噪声的影响因素,重点探究地铁车辆噪声的核心技术控制策略,旨在为地铁车辆噪声治理提供理论支撑与实践参考,推动轨道交通行业的绿色、舒适发展。

[关键词]地铁车辆;噪声控制;对策分析

DOI: 10.33142/ec.v9i5.19656

中图分类号: U270.16

文献标识码: A

Exploration on Noise Control Strategies for Subway Vehicles

CHEN Jinlong

Chongqing Rail Transit Operation Co., Ltd., Chongqing, 401120, China

Abstract: The noise of subway vehicles directly affects passenger comfort and can also reflect important indicators of vehicle quality. With the rapid development of subway vehicles, passengers have put forward higher requirements for the comfort of the subway. The noise problem during the operation phase of subway vehicles has become a widely concerned focus. By controlling the noise inside the car, passengers' comfort requirements can be met. Based on this, the article elaborates on the types of noise sources in subway vehicles, analyzes the influencing factors of subway vehicle noise, and focuses on exploring the core technical control strategies for subway vehicle noise. The aim is to provide theoretical support and practical reference for the control of subway vehicle noise, and promote the green and comfortable development of the rail transit industry.

Keywords: subway vehicles; noise control; countermeasure analysis

引言

地铁交通作为现代化城市的公共运输形式,给居民的出行带来了方便与快捷,是解决城市交通拥堵的可行方案。地铁交通高速发展的同时,车辆振动与噪声的研究成为学者广泛关注的对象。近年来,随着城市车辆运行速度的提升,轮轨噪声、设备振动噪声等声源强度显著增加,导致车内噪声水平提升,传统噪声控制方案难以满足公众对舒适度的要求^[1]。如何降低车内噪声、提高车辆运行品质,成为当下需要解决的问题。

1 地铁车辆噪声源的种类

地铁车辆运行过程中产生的噪声主要包含四点。第一,轮轨噪声,这是主要的噪音源。车轮在钢轨上滚动时,即使轨道表面的不平整程度仅为0.1毫米,也会产生振动声和摩擦声^[2]。列车在转弯过程中,钢轨侧面与轮缘发生剧烈摩擦,会产生高频刺耳的尖啸声。车轮驶过钢轨接缝、轨道表面或道岔时发生撞击,会产生高频的噪声与冲击振

动声音。钢轨的磨耗也会产生类似口哨的声音。第二,车辆设备噪声。地铁车辆上有各种机械设备,牵引电机、压缩机、齿轮箱在高速运转时会产生呜呜的机械噪声。车顶的散热风扇、空调系统、制动系统工作时均会出现机械振动与气流噪声^[3]。接触网与受电弓在摩擦时会产生电弧噪声,车窗与车门的振动也会产生辐射声音。第三,空气动力噪声。地铁车辆在隧道中高速行驶时,会挤压前方的空气,形成强烈的气流噪声。如果列车驶入隧道环境内,在狭长、封闭的隧道内,会加剧噪声程度,甚至出现刺耳与轰鸣的声音。列车行驶速度越快,噪声越明显。第四,其他噪声。轮轨振动通过道床、轨道传递到隧道与建筑结构后,再由结构辐射出来,形成低频的轰响声。通风系统也会产生机械与气流噪声。轮轨噪声属于主要的噪声类型,占比在45%左右,车辆设备产生的噪声占比为25%左右,空气动力噪声占比为20%左右,其他噪声约占比为5%。

2 地铁车辆噪声的影响因素

2.1 车体因素

由于建造成本等因素的限制,当下地铁列车关键部件的隔声量低于国内高速动车组,所以空气传声路径对地铁列车车内噪声的影响尤为显著。如表 1 所示,为车体关键部位隔声性能。

表 1 车体关键部位隔声性能

车体关键部位	顶板	地板	侧墙	车门	车窗
计权隔声量 (dB)	41	37	37	27	35

列车在运行时,车内噪声对车门隔声的灵敏度最大,其次是侧墙与地板。根据地铁车内噪声与车体部件隔声增量变化的相关规律,分析车体隔声参数影响的曲线拟合结果。如表 2 所示:

表 2 车体隔声参数影响的曲线拟合结果

	地板	侧墙	顶板	车窗	车门
a	0.0143	0.0151	0.0042	0.0016	0.0266
b	-0.1587	-0.1692	-0.0421	-0.0015	-0.4786
c	0.0007	-0.0006	-0.0009	-0.0004	0.0042
R2	0.9988	0.998	0.9972	0.9967	0.9998

根据上述数据得出拟合结果公式: $Y=aX^2+bX+c$, 公式中的 X 表示车体各关键部件隔声变化量, y 表示车内声压级变化量, a、b、c 属于相应系数。当地板隔声频谱整体升高时,对车内客室端部噪声几乎在全频段存在一定影响,地板对车内噪声的灵敏度较高。当侧墙隔声频谱降低或者提高时,车内客室端部噪声主要在 400~1250Hz 的 1/3 倍频带变化较为明显。当车门隔声频谱整体降低或者升高时,车内客室端部噪声主要在 500~3150Hz 的 1/3 倍频带变化相对明显。列车在明线区域行驶时,地板与车门区域是噪声的主要来源。当列车行驶到隧道时,中高频噪声主要通过隔声较为薄弱的车门区域进入车内。地铁列车在明线行驶时,车底区域的轮轨噪声、辅助噪声、车顶区域的空调机组噪声为主要噪声来源,需要针对地板与顶板对车体板件的隔声进行优化,其他部件的隔声性能会相对减弱。列车在隧道运行时,车外声源容易从隔声较为薄弱的区域进入车内,对车体各个部位进行设计,是降低隧道内列车噪声的方法之一。

2.2 车体振动

车体板件的振动可向车内辐射噪声,地铁在运行时,车内客室端部噪声与车体各部件振动存在关系。列车在隧道行驶时,车内噪声对车体板件振动的灵敏度较小,车内噪声对侧墙振动的灵敏度最大,车内噪声对地板与顶板的

灵敏度中等。列车在明线行驶时,车内噪声对侧墙的灵敏度最小,对地板振动的灵敏度最大,对顶板的灵敏度一般。根据地铁车内噪声与车体部件振动增量变化规律,采用抛物线拟合,结果如表 3 所示:

表 3 结构振源激励影响的曲线拟合结果

	地板	侧墙	顶板
a	0.0052	0.0097	0.0026
b	0.0511	0.098	0.024
c	-0.0011	-0.0013	-0.0006
R2	0.9973	0.9981	0.9968

当地板振动频谱降低或者提高时,对车内可视端部噪声在全频段均产生影响,隧道区间车内噪声比明线区间灵敏度较低。当侧墙振动频谱整体降低或者提高时,全频带内对车内噪声的影响较小,隧道区间会导致车内噪声灵敏度增加。顶板振动频谱整体降低或者提高时,车内客室端部噪声在 100~200Hz 的 1/3 倍频带变化相对明显。

2.3 车内吸声

地铁列车车厢内部类似于长方形的封闭空间,车内噪声一方面由车外噪声源经空气传导和结构传声两条路径传到车内,另一方面为车体内壁板之间的反射产生的混响声。所以为降低车内噪声,可优化各板件的隔声,也可提高车体内板件的吸声性能。车体内板件平均吸声系数与车体内声腔子系统的阻尼损耗因子之间的关系式为: $\bar{\alpha}=\eta(4V\omega/Ac_0)$ 。 $\bar{\alpha}$ 表示声腔子系统的平均吸声系数, V 表示声腔体积, η 表示声腔阻尼损耗因子, ω 表示角频率, c_0 表示声速。将声腔的长宽高分别取 17m、2.4m、2.4m,在车内原有吸声的基础上,分别将车内平均吸声系数整体增加 0.02、0.04、0.06、0.08 和 0.1。通过预测结果发现车内客室端部噪声随着车内吸声系数的增加而下降,无论在隧道运行或者在明线运行,对吸声系数的敏感度差异不大。当车内吸声系数整体提高时,车内噪声在全频段会有所降低,但需要注意,一般吸声材料在中频和低频才具有较高的吸声系数,对于低噪声,一般不能用吸声材料处理。

3 地铁车辆噪声的核心技术控制策略

3.1 轮轨系统的减振降噪技术优化

第一,控制轮轨表面粗糙度,轮轨表面粗糙度是轮轨系统振动噪声的主要激励源,可通过定期对车轮与钢轨进行打磨实现减振降噪^[4]。车轮与钢轨表面的粗糙度不同,会引起轮轨组合谱的变化,导致振动噪声水平受到影响,通过打磨可降低钢轨表面与车轮的粗糙度,减少因表面不平引起的噪声和振动声音。对于钢轨粗糙度和车轮表面产生的振动噪声结果,其中车辆的制动系统与车轮的粗糙度

关联密切,轨顶部分为钢轨粗糙度的主要问题。在钢轨打磨上可以分为两种,修复性打磨与预防性打磨。轮轨接触面的磨损导致轮轨力发生变化,通过对轮轨表面状况进行优化,能减少轮轨之间的噪声与振动。第二,控制轨道噪声。列车在运行过程中的噪声过大,主要由车轮轨道波浪形与表面粗糙所致,或者轨道表面出现局部划痕等引起,对列车运行的舒适性产生严重影响。因此在实际应用中,需要定期检查与养护轨道,保证车辆运行的安全性。通过制定科学的打磨时间,与噪声检测手段相结合,可精准确定打磨时机,避免出现打磨不足和过度打磨等情况。利用钢轨动力吸振器。钢轨动力吸振器基于动力吸振原理,由阻尼材料与质量块制成,选择合适的参数,将其安置到轨腰两侧,可以更好地吸收振动能量,从而降低振动能量,减少噪声水平。

3.2 空调系统的减振降噪优化技巧

地铁空调系统的振动比较明显,因此对空调系统进行减振,需考虑合适的吸振器,控制低频振动^[5]。风机噪声是最大的设备噪音,包括通风机与冷凝风机。风机噪声控制措施如下:采用变频风机技术,根据车内温度调节风机转速,避免风机高速运行产生的高噪声;在保证空调通风量的前提下,最大限度地选择转速低、叶片小的风机,同时让工作点接近风机的最高效率点运行;正确选择风扇直径、叶数与风扇形状,减少风扇的涡流,降低气流噪声;改变风机叶片尾端,使气流的流速与压力发生变化;在保证空调通风量的前提下,降低风机内空气流速,适当增加送风温差。对于空压机、冷却风扇等其他附属设备,采用隔声罩进行包裹,隔声罩内部粘贴吸声材料,外部采用隔声板材,可有效降低设备噪声的向外辐射。(1)压缩机产生的振动是空调系统产生噪声的来源之一,从减振角度分析,根据空调系统的振动情况,需选择合适的减振垫,控制空调系统低频振动。(2)对制冷压缩机采用隔声减振。在车体之间与空调机组之间安装减震垫,在机组壳体与制冷压缩机之间也安装减震垫,将橡胶、弹簧等阻性材料安装在外壳部位,使刚性连结变成弹性支撑,吸收振动能量,以此隔离减振。提高各个机械部件的配合精度。(3)控制管道噪声。管道噪声的控制需根据频谱特性,可在主风道内表面与静压箱隔板两侧表面粘贴声阻尼材料,将隔音板安装在主风道外侧,并使用固件紧固。所选材料需结合吸声系数的差异,尽量选择结实、安全性更好与轻便的材料。选择低频效果好的消声器放在管道噪声明显部位,也可利用复合消声器消除各段噪声的影响。所选消声器要保证气流重量轻、气流流速符合标准、安装便捷。

3.3 车体结构的隔声减振设计技巧

车体是噪声传播的主要载体,通过选择合适材料,优化车体结构,有利于提高减振降噪效果。从车体材料方面分析,可选择组合结构,铝合金型材+阻尼复合板的结构。铝合金材料能保证车体的结构强度与车体轻量化,阻尼复合板具有吸收振动能量效果,对车体结构起到抑制效果。与传统碳钢车体比较,阻尼复合结构可降低车内噪声。在墙板内部填充、车体地板的材料选择上,可选择超细玻璃棉、聚氨酯泡沫等吸声材料。为阻断空气传声,可提高车体密封性,在设计车门、车窗结构时,可采用双层密封胶条进行设计,消除车体缝隙,减少噪声传入车体。针对车体的空调出风口以及通风口等部位,在保证通风的同时,可添加消声格栅,对外部噪声与气流噪声进行消声处理^[6]。从车体结构方面分析,采用整体式焊接工艺,减少车体焊接缝隙,提高车体的整体刚度。采用浮置地板技术,将车体底架与地板分离,将弹性隔离层设置在转向架与车体的连接部位,浮置地板可降低噪声,是控制噪声的有效策略之一。

3.4 车内声学环境的隔声减振设计技巧

车内声学环境的设计,是隔声减振的最后环节,通过降噪音、吸声等技术,让车内的噪声分布得到优化,提高乘客的舒适度。车内吸声可在车厢顶部、侧壁与座椅靠椅等部位添加吸声装置,选择吸声性能良好的材料,如聚酯纤维等,重点吸收中频噪声与高频噪声,减少车内的声反射,降低车内混响时间,提高乘客的良好听觉体验。对于车内局部区域存在的噪声问题,可采用针对性的消声方案。在车门等噪声泄漏的部位,添加局部消声器。车内噪声控制可采用有源降噪技术,在地铁车厢内布置麦克风与扬声器,麦克风能采集车厢内的噪声信号,控制系统生成与噪声相反的声波,通过利用扬声器可抵消原有噪声。此外,结合车内空间布局,优化座椅、扶手的设计,减少车内气流的湍流,降低局部区域的空气动力噪声,实现车内声学环境的均匀化。如今人工智能技术发展迅速,可将此技术应用与噪声控制领域,让人工智能技术预测不同运行过程的噪声值,提前制定管控措施,可根据车内噪声的实时变化,自动调整降噪参数,提高降噪效果。在噪声控制过程中,需要兼顾节能环保要求,提高设备使用寿命,但应减少钢材消耗与碳排放,实现绿色环保与噪声控制的协同发展。也可研发高性能减振降噪材料,实现对噪声的精准阻断。加快新型降噪技术的工程化应用,不断提升地铁车辆噪声控制的技术水平。

4 结语

综上所述,城市轨道交通的快速发展,对城市轨道交通

通车辆的需求量日益增长。地铁作为城市轨道交通的重要组成部分，地铁车辆噪声导致乘客的舒适感体验极大降低。通过分析研究车内噪声，对车内噪声进行控制，从轮轨系统、车体结构、空调系统、车内声学环境等方面分析，优化减振降噪策略，降低车辆噪声，让旅客的乘坐舒适度得到提升，为城市轨道交通的可持续发展奠定坚实基础。

[参考文献]

[1]张佳聶,孙文静,王嘉豪,等.牵引传动系统对地铁车辆车内噪声影响研究[J].华东交通大学学报,2024,41(5):84-93.
[2]张大鑫,李莉,张云飞.基于地铁车内噪声控制的钢轨打磨限值研究[J].城市轨道交通研究,2023,26(3):160-165.

[3]杨光,姚云鹏,孙庆.地铁车内噪声-平稳性监测系统的应用研究[J].综合运输,2025(7):113-118.

[4]任国庆,蒋蔚,涂一麟.成都地铁 18 号线钢轨波磨对车内噪声的影响及打磨策略[J].轻工科技,2025,41(6):68-71.

[5]付国平,邢海福,郭正海,等.地铁车辆曲线运行车内噪声影响因素的试验分析[J].城市轨道交通研究,2024,27(10):170-176.

[6]徐天尧,阳光武,肖守讷,等.地铁车辆低频结构噪声问题诊断与优化[J].噪声与振动控制,2025,45(5):184-189.

作者简介：陈金龙（1985—），男，西南交通大学电气工程及其自动化专业毕业，高级工程师，现就职于重庆轨道交通运营有限公司，任车间副主任。