DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.02.011
文章编号：1000-128X(2023)02-0097-06

悬挂式单轨列车研制及试验

白永平，彭长福
（中车资阳机车有限公司，四川 资阳 641300）

摘 要：文章以中车资阳机车有限公司参与建设的2条试验线为背景，介绍了悬挂式单轨列车研制过程中的设计原则、总体参数取值依据、总体实施方案以及转向架、电气控制系统、制动系统、救援设备等关键子系统的实施方案。同时，解析了列车运行平稳性、运行姿态、运行噪声等关键性能的试验测试数据，描述了试验过程中出现的具体问题和状态表现，分析了相关问题发生的原因，介绍了逐步优化改进、确定相关设备最佳结构和最优参数的过程。相关经验可为后续类似产品的设计开发提供参考。

关键词：悬挂式单轨列车；选型；研制；试验；城市轨道交通
中图分类号：U232

Development and test of suspended monorail train

BAI Yongping, PENG Changfu

(CRRC Ziyang Locomotive Co., Ltd., Ziyang, Sichuan 641300, China)

Abstract: Based on the two test tracks which CRRC Ziyang Locomotive Co., Ltd. participated in the construction, this paper introduces the design principles, grounds for parameter selection, general implementation plan, and implementation of key subsystems including bogie, electrical control system, braking system, and rescue equipment during the development of the suspended monorail train. In addition, the paper analyzes the test data of key performance such as the smoothness, posture and noise of a running train. The paper also describes the problems occurred during the test and state of train in detail, with the analysis of problem cause and introduction to the process of identifying the optimal structure and parameters of related equipment after step-by-step improvement and optimization. Relevant experience can provide reference for the design and development of similar products in the future.

Keywords: suspended monorail train; type selection; development; test; urban rail transit

0 引言

悬挂式单轨交通是一种车辆悬挂于轨道下方运行的中小运量运输系统，经过一百多年的发展，出现了钢轮钢轨非对称悬挂型、胶轮钢轨非对称悬挂型、“工”字轨道梁悬挂型、胶轮对称式悬挂型（SAFEGE型）4种形式；其中SAFEGE型是最先进、应用最广泛的悬挂形式[1]。悬挂式单轨交通作为一种轻型、中速、中低运量的轨道交通方式，其可与常规公交、轨道交通等错位发展，形成一个由地面、地下和空中组合而成的立体式公共交通网络，是一体化、多模式、立体公交体系的必要组成部分。近年来，为强化城际铁路、城市轨道交通、地面公交等运输系统的有机衔接，国家支持发展个性化、定制化运输服务，因地制宜建设多样化城市客运服务体系。悬挂式单轨系统因其环境适应性好、建设周期短、成本低等一系列优点而受到广泛关注，在国内已完成多条试验线建设。本文将重点介绍中车资阳机车有限公司为四川双流和河南开封2条线试验配套的样车的研制及试验情况。

1 方案介绍

1.1 总体方案

1.1.1 集成原则

车辆设计之初，边界参数的制定以参照相关标准、

基金项目：四川省科技计划项目（2017GZ0081）
通信作者：白永平（1986—），男，高级工程师，主要从事轨道车辆总体性能的研究工作；E-mail: byp524@126.com
引用格式：白永平, 彭长福. 悬挂式单轨列车研制及试验[J]. 机车电传动, 2023(2): 97-102.
Citation：BAI Yongping, PENG Changfu. Development and test of suspended monorail train[J]. Electric Drive for Locomotives,2023(2): 97-102.

做好需求调研和融合最新技术为总体指导思想。通过解读提及了悬挂式单轨系统相关内容的标准[2-4]，结合市场需求调研，制定了以下边界参数：

① 按远期小时发车量 30 对计算车辆额定载客量时，断面客运量不小于（0.40~1.25）万人/小时。

②从系统经济性考虑，最大编组不超过 6 辆，车站长度不长于 100 m，以 60~80 m 为宜。

③ 车辆适应的轨道梁横截面净空尺寸参照德国 H-Bahn 悬挂式单轨系统，尺寸（宽×高）为：780 mm×1 100 mm [5]。

④供电方式考虑第三轨和储能装置 2 种方式，主传动系统为交流传动。

⑤转向架的走行轮和导向轮为实心橡胶轮。

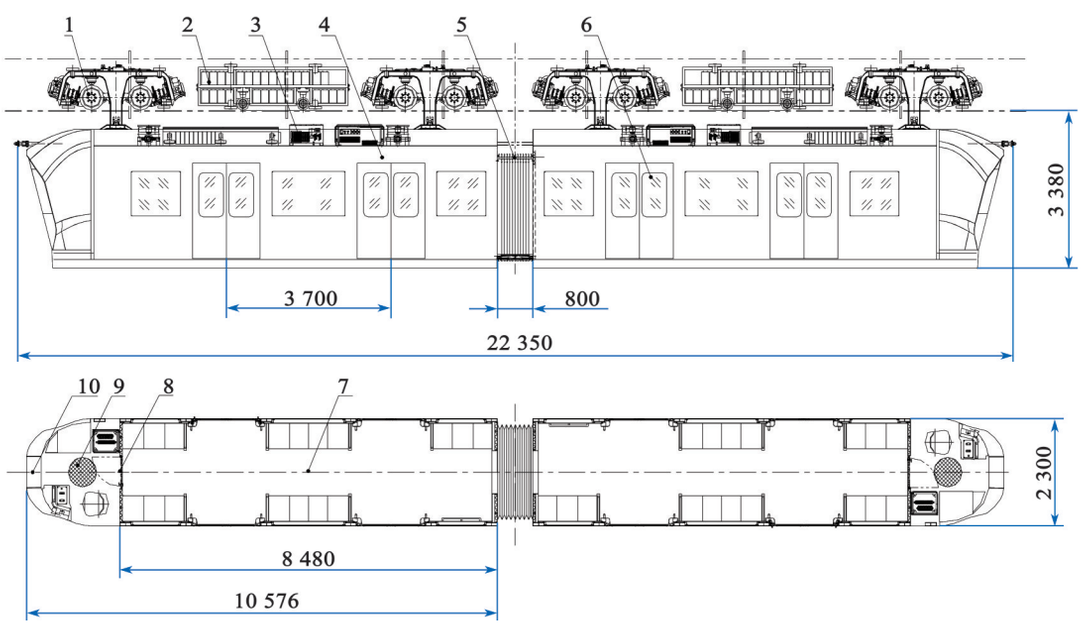
⑥车辆轴重不大于 5 t。

1.1.2 列车方案

样车由两节带司机室的动力车辆编组而成，具有扩编及 3 列重联功能。主传动系统为直-交传动，动力供给具有第三轨受流装置和动力蓄电池供电 2 种方式；第三轨受流装置位于转向架一侧或两侧；由动力电池供电时，每节车辆配备一个动力蓄电池包，电池包成组安装在一个不带动力的电池小车上，小车位于两转向架之间，拖动随行。列车转向架采用全动轴布置，采用实心橡胶走行轮，永磁牵引电机通过具有差速功能的主减速器驱动。车辆设一系、二系 2 级减振，一系为锥形橡胶弹簧，二系为沙漏橡胶弹簧；铝合金车体通过二系悬挂装置吊挂于 2 个转向架下方。制动系统为电、液混合制动。列车总体方案见图 1。

1.1.3 技术参数

样车主要技术参数见表 1。



1—转向架；2—动力蓄电池；3—车辆设备；4—铝合金车体；5—连结装置；6—客室侧门；7—客室；8—司机室-客室隔门；9—垂向逃生通道；10—纵向救援门。

图 1 列车总体方案图

Fig. 1 General layout diagram of train

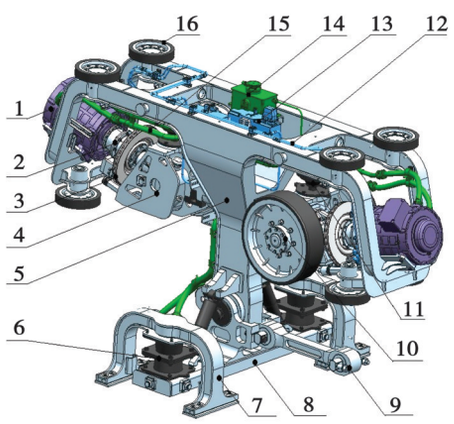
表 1 悬挂式单轨列车样车主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of suspension monorail prototype vehicle

序号	参数项目	参数值	序号	参数项目	参数值
1	最高运行速度/(km·h^{-1})	60	11	车辆自重/t	10.8
2	通过最小曲线半径/m	30[6]	12	车辆定距/m	7 050
3	最大通行坡度/‰	100[6]	13	轴距/m	1 100
4	额定载客量/人	75×2（6 人/m^2）	14	走行轮直径/m	540
5	启动加速度/(km·s^{-2})	1（恒转矩段）	15	导向轮直径/m	280
6	紧急制动减速度/(km·s^{-2})	1.4	16	每侧车门数/对	2
7	供电电压/V	DC 750	17	车门有效开度/mm	1 300
8	动力电池容量/(kW·h)	143×2	18	地板面距轨面高度/mm	3 120
9	电机额定功率/kW	45×8	19	走行轮宽度/mm	150
10	轴重/t	4.2	20	走行轮内侧距/mm	360

1.2　转向架

转向架设有一系悬挂和二系悬挂，采用一系悬挂可减少簧下质量，降低动载荷导致的振动及噪声；一系悬挂减振弹簧为锥形橡胶弹簧，具有结构简单、免维护的优点；二系悬挂主要衰减转向架向车体的振动传递。减振弹簧为非线性沙漏橡胶弹簧，能够完全适应车辆在不同线路运行时，转向架与车辆之间的位移、水平转动和侧滚运动。每架设 2 台水冷永磁牵引电机，与车轴呈 90°对称布置，与水平方向成 15°夹角，通过鼓型齿式联轴节与轮对驱动装置相连，以适应由于一系悬挂弹性变形导致的安装在构架上的电机相对驱动装置产生的位移。转向架结构见图 2。



1—牵引电机；2—鼓形齿式联轴节；3—基础制动装置；4—减速箱；5—构架；6—二系悬挂装置；7—承载梁；8—枕梁；9—牵引拉杆；10—走行轮；11— 一系悬挂装置；12—液压管路；13—液压控制单元；14—膨胀水箱；15—水管路；16—导向和稳定轮（上稳定下导向）。

图 2　转向架结构

Fig. 2　Bogie structure

1.3　电气控制系统

图 3 为电气控制系统原理框图，车辆主传动系统为永磁电机驱动的直-交传动，结构设计可满足动力蓄电池供电或第三轨供电 2 种供电方式下的运行需求。辅助用电有三相 AC 380 V 设备用电(包括单相 AC 220 V 生活用电)和 DC 24 V 控制用电 2 种等级。车辆微机接收司机控制器或自动驾驶系统的行车信号，根据给出的加速度要求，结合车辆的实际重量，输出相应的牵引力，从而实现恒加速度控制，以提高乘坐舒适性。

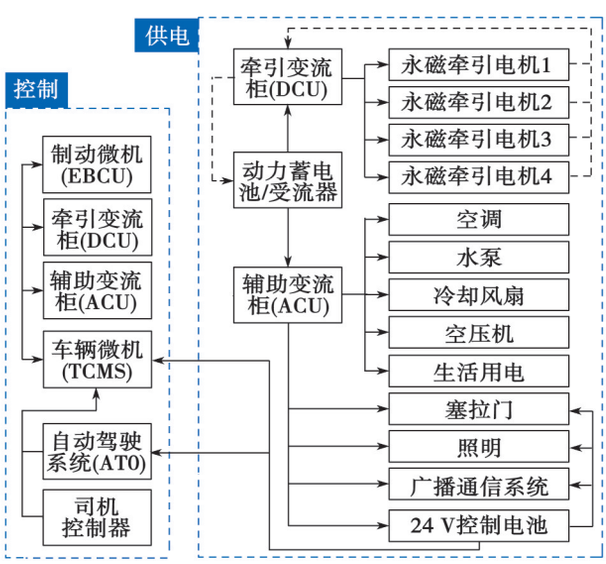


图 3　电气控制系统原理框图

Fig. 3　Schematic block diagram of electrical control system

1.4　制动系统

制动系统包括电制动和电控液压制动（摩擦制动）2 种方式，2 种制动方式共同构成一套高应答性、高可靠性的电气指令式制动系统。具有常用制动、快速制动、保持制动、安全制动、停放制动 5 种制动工况。常用制动和快速制动工况下，车辆微机在接收司机控制器或自动驾驶系统制动指令后，根据给定的减速度要求和行车前采集的车辆重量信息计算所需制动力，并优先电制动力输出，电制动力不足时，由制动微机控制液压制动系统进行补充，保证车辆以恒减速度制动。电制动能量可被动力蓄电池回收或回馈电网。制动施加原理框图如 4 所示。

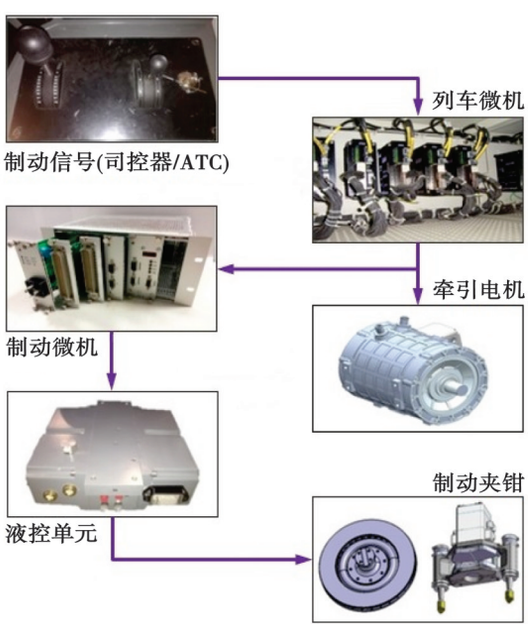


图 4　制动系统原理框图

Fig. 4　Schematic block diagram of brake system

液压制动具有相对独立的制动能力，可独立实施保持制动、安全制动和停放制动，被动式夹钳结构即使在牵引供电中断或电制动故障情况下，也能保证摩擦制动发挥作用，使列车安全停车。

1.5　救援设备

车辆除了配备灭火器等必须的消防设备外，每节车均具有独立的故障救援结构与应急逃生系统。故障救援是指车辆出现故障无法运行但不危及乘客安全时，通过救援车辆进行人员疏散；应急逃生系统是指当车上发生火灾及发生其他危及乘客安全的事件时，乘客自行逃生的疏散方式。试验样车设置了如图 5 所示纵

向、横向、垂向和顶部共4种故障救援或应急逃生方式。其中纵向利用端部救援门加渡板的形式，用于单线运行时的故障救援；垂向利用建筑火灾逃生滑道结构[7]，用于应急逃生；横向用于双线运行时通过救援车辆故障救援或通过轨道梁立柱间的救援平台应急逃生；以上3种结构均在试验线进行了测试，功能可行；同时，针对垂向逃生时，同一线路不同位置存在的车底到地面垂向距离不同的问题，将逃生筒长度按最大垂向距离设计，并在侧面设置拉链，逃生人员可在任意高度通过拉链口逃生。车顶逃生窗一般用于应急逃生，但需要在轨道梁上增加逃生平台，由于试验线均为单线运行且缺少顶部逃生平台，横向救援和顶部逃生没完成测试。



图 5　逃生及救援方式示意

Fig. 5　Schematic diagram of evacuation and rescue method

2　试验及改进

2.1　运行平稳性优化

由于车辆减振系统刚度过大、车轮失圆、轨道梁的限位及挠度变形、接缝处走行面高度突变等多方面原因，样车上线运行后，平稳性与动力学计算结果差异较大。按照GB 5599—85的评定进行测试，车辆垂向平稳性指标大于3，属不合格。通过表2[8]的振动测试结果可见，振动衰减主要靠二系沙漏橡胶弹簧。

表 2　车辆不同位置振动加速度

Table 2　Vibration acceleration at different positions of vehicle

m/s^2

位置	AW0（空车）	AW3（满载）
减速箱	19.345	13.416
构架横梁	4.912	4.958
枕梁	3.122	2.882
承载梁	0.391	0.605
车体地板	0.245	0.329

优化改进时首先对车轮打磨修圆，将车轮圆跳度控制在0.2 mm以内，然后通过改变二系减振弹簧的刚度与型式，完成了3次试验测试，结果如表3所示。

表 3　二系减振弹簧优化效果对比

Table 3　Comparison of optimization effect of secondary damping spring

版本	弹簧形式	静刚度	平稳性
原始设计	沙漏橡胶弹簧	b	不合格
第1次优化	沙漏橡胶弹簧	2b/3	合格，明显提升
第2次优化	沙漏橡胶弹簧	b/3	合格，但与第二次改进后没有明显差别
第3次优化	空气弹簧	b/6	优秀，明显提升

第一次优化后，平稳性的提升归功于车轮修圆与降低弹簧刚度2个方面。第2次改进后，沙漏橡胶弹簧静刚度达到了保证不失稳的前提下能达到的最小值，但由于橡胶弹簧本身的特性限制，动、静刚度差异较大；尤其是在高速区段，动刚度近似于速度的二次方增长，相对第2次改进后减振效果不明显。证明了橡胶沙漏弹簧有减振但不能使车辆实现较高的运行平稳性。第3次改进将二系减振橡胶弹簧更换为空气弹簧，测得空车时车辆平稳性指标为2.32，重车时车辆平稳性指标为2.26，达到了优秀级别[8]。

2.2　运行姿态测试

运行姿态测试主要针对车辆运行中，弹性件变形导致的车辆各部分的相对位移及最终反应在车体上的位移进行测试。最终结果所有部件位移均在合理范围内，车体最宽处最大位移如表4所示。由于悬挂式单轨车辆重力对车体侧滚有抑制作用，车体侧滚角不会随速度的增加而持续增加，而是当侧滚角达到一定的数值时就开始减小。试验测试在无侧风时进行，测试结果与理论计算值基本吻合，可推断极限情况下车体最大侧滚角不大于6.5°。

表 4　车辆曲线运行最大侧滚位移[8]

Table 4　Maximum rolling displacement of vehicle operating on curves

速度(km·h^{-1})	最大位移/mm		折合侧滚角/°	
	R=170 m	R=30 m	R=170 m	R=30 m
15		179.7		3.96
20		196.9		4.35
25		175.0		3.87
30	185.3		4.09	
35	199.5		4.40	
40	188.1		4.15	
45	178.1		3.94	
50	165.1		3.65	

2.3　驱动系统可靠性优化

样车驱动系统结构如图6所示，起始设计时，减速

箱选用成熟的汽车产品，没考虑到汽车减速箱为单方向受力方式，反转工况的受力不是主要因素。内部螺旋圆锥齿轮、车轴轴承等结构均不能适应长期的高速反转工况，对于双向运行的悬挂式单轨列车，由于每台转向架上驱动装置对称布置，始终有50%减速箱是反转工况，直接选用汽车用减速箱经过长期运行后，出现内部齿轮卡死，可靠性较差。

同时，由于制动盘安装在减速箱输入轴上，最大工作转速达3 600 r/min，基础制动工况时冲击振动完全由减速箱承受，特别是在制动加载过程中的冲击，改变了减速箱螺旋锥齿轮的啮合状态，是导致减速箱可靠性差的另一主要因素。

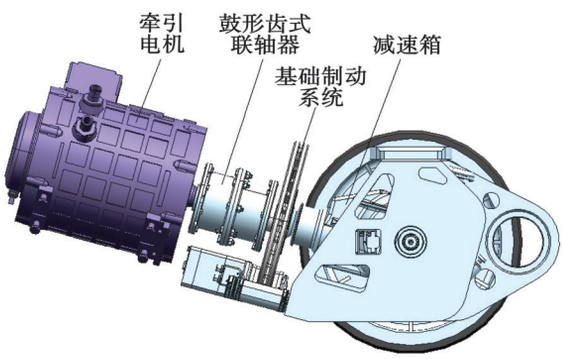


图 6　驱动系统及基础制动

Fig. 6　Driving system and foundation braking

针对以上问题，样机试验改进中，对减速箱和液压制动系统都进行了重新设计，减速箱满足双向运转要求，液压制动装置安装在减速箱输出轴上。改进后的结构完成了各种极限工况下的试验考核及10 000 km运用考核，各方面性能稳定。

2.4　列车运行噪声优化

试验样车上线运行以后，噪声问题表现比较突出，主要原因有以下2个方面：

① 基础制动制动盘安装在主减速器输入端，为了保证制动盘高速转动工况下的制动散热，制动盘设计成了风轮形式，但在高速旋转时，会出现啸叫，产生很大的噪声。同时，基础制动装置倾斜15°安装，由于重力作用浮动式夹钳有一工作面始终与制动盘贴合，当组装过程制动盘工作面与闸片平面稍有不平，制动盘高速旋转时，会导致浮动式夹钳来回晃动，敲击制动盘，产生噪声。试验时，制动盘转速为3 000 r/min时，距驱动系统2 m处的噪声达98 dB(A)，以上问题随着驱动系统结构的优化而解决。

② 车体顶部没有采取有效的隔音措施，铝合金型材具有大量空腔，对安装在其上的各设备产生的噪声具有一定“共鸣腔”作用，导致车内噪声较车外噪声没有减小，还有增大趋势。在第二列样机新造时，在型材内部填充了隔音棉，在内壁喷涂阻尼浆，并对噪声源进行了适当抑制后，最高运行速度60 km/h时客室内噪声从71.3 dB(A)[9]降到了67.8 dB(A)。

3　结语

从2016年起，中车资阳机车有限公先后参与了国内2条悬挂式单轨系统试验线的建设，完成了2列分别以动力蓄电池供电和第三轨受流装置供电的悬挂式单轨列车的试制及改进，参与了国内相关标准编制；目前，2列样车均完成了10 000 km的线路运用考核，车辆各方面性能稳定。对于国内尚在起步阶段的这一全新轨道交通制式，行业内目前仍没有形成完整的技术体系框架，本文基于2个实体项目的开发过程，总结了从设计到试验运用过程中的经验，可为国内后续悬挂式单轨项目实施过程中车辆研发提供一定的参考。

参考文献：

[1] 李芾, 许文超, 安琪. 悬挂式单轨车的发展及其现状[J]. 机车电传动, 2014(2): 16-20.
LI Fu, XU Wenchao, AN Qi. Development and current status of suspended monorail vehicle[J]. Electric Drive for Locomotives, 2014(2): 16-20.

[2] 城市建设研究院. 城市公共交通分类标准: CJJ/T 114—2007[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
Urban Construction Design & Research Institute. Standard for classification of urban public transportation: CJJ/T 114—2007[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.

[3] 北京城建设计研究总院有限责任公司. 城市轨道交通工程项目建设标准: 建标 104—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
Beijing Urban Construction Design and Research Institute Co., Ltd. Construction standard of urban rail transit project: Building standard 104—2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通技术规范: GB 50490—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical code of urban rail transit: GB 50490—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

[5] 周美艳. 悬挂式空中列车的应用发展[J]. 国外铁道车辆, 2014, 51(2): 10-14.
ZHOU Meiyan. Application and development of the suspension type sky train[J]. Foreign Rolling Stock, 2014, 51(2): 10-14.

[6] 李梁, 刘亚宁, 扶巧梅. 悬挂式单轨车辆的特点及应用[J]. 技术与市场, 2017, 24(12): 20-22.
LI Liang, LIU Yaning, FU Qiaomei. Features and applica-

tions of suspension monorail[J]. Technology and Market, 2017, 24(12): 20-22.

[7] 全国消防标准化委员会消防器具配件分技术委员会(SAC/TC 113/SC 5). 建筑火灾逃生避难器材 第4部分: 逃生滑道: GB 21976.4—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
National Fire Standardization Committee Fire Equipment Accessories Sub Technical Committee (SAC/TC 113/SC 5). Escape apparatus for building fire—Part 4: Escape slide: GB 21976.4—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.

[8] 汪群生 . 新能源空铁车辆动力学试验报告[Z]. 成都: 西南交通大学牵引动力国家重点试验室, 2018.
WANG Qunsheng. Dynamic test report of new energy sky train[Z]. Chengdu: State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 2018.

[9] 肖鹏, 尤雅清 . 新能源空铁噪声测试报告[Z]. 资阳: 中车资阳机车有限公司检测中心, 2018.
XIAO Peng, YOU Yaqing. New energy sky train noise test report[Z]. Ziyang: Testing Center of CRRC Ziyang Locomotive Co., Ltd., 2018.

收稿日期：2022-09-30
修回日期：2023-02-27