

某新型低地板有轨电车运行稳定性的研究

李子嘉,黄桢国,戴焕云

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:通过对现场实测数据进行统计整理,对某型有轨电车的运行安全性和平稳性进行综合评估。试验车四节车厢转向架上均加装轮轨力检测设备,用以检测列车的安全性指标,车体上加装振动加速度传感器,检测列车运行平稳性。构架端部加装振动加速度传感器,用以检测列车运行稳定性。通过数据统计计算,发现在不同工况下以及处于不同位置的车体的运行稳定性指标略有差异,整体来说,动车的运行品质取决于拖车,中间车运行品质取决于两端的车。

关键词:有轨电车;脱轨系数;运行稳定性;综合评估

中图分类号:U261 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)05-0199-04

Research on Operation Stability of a New Low Floor Tram

LI Zijia, HUANG Zhenguo, DAI Huanyun

(State key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The comprehensive evaluation on the operation safety and stability of a certain type of tram is conducted through the statistical analysis of field measured data. Four car bogies of the test vehicle are equipped with wheel rail force detection equipment to detect the safety index of the train, and the vehicle body is installed with vibration acceleration sensor for detecting the running stability of the train. The vibration acceleration sensor is retrofitted at the end of the frame to check the stability of train operation. Through the calculation by statistical data, it is found that the operation stability indexes of the train body differentiate slightly under different working conditions and in different locations. As a whole, the operation quality of bullet train depends on traller, while the operation quality of intermediate train lies on cars at both ends.

Keywords: tram; derailment coefficient; operation stability; comprehensive evaluation

0 引言

近几年随着中国经济飞速发展,人们的出行方式变得多种多样。有轨电车自1879年诞生之日起便倍受人类青睐,近些年更是发展迅猛,在某些政府财政不足以支持地铁发展的地区,成为了城市公共交通的主力军。有轨电车虽然具有低投入、大运力、无排放等诸多优势,但是由于其运行区域大多处于人流密集区域的马路中央,与公路交通不可避免会产生干扰,一旦出现问题,会给公共交通带来很大的危害,故国内外学者对其运行安全性和平稳性进行了研究。贾璐等^[1]采用极限环法、构架加速度幅值法以及构架和轮对加速度方均根值法对轨道车辆系统的横向运动稳定性进行了评判。李玉青^[2]基于simpack软件,着重研究了悬挂参数对100%低地板有轨电车的运动稳定性以及曲线通过性能的影响。曹志礼^[3]总结分析了我国铁道车辆振动性能评定方法,指出了“平均最大加速度评定法”是一种能定量评定车辆最大振动的简单而可行的方法,并以此为基础提出了自动数据处理方法。徐士恒等^[4]针对货运动车组的特点,在传统多刚体仿真模型的基础上,综合考虑集装箱的结构、布置和安装方式,研究

运行速度250 km/h以上货运动车组的动力学性能以及对所运送货物的完整性、安全性进行评估时需要考虑车体和集装箱的耦合关系。MA Y W等^[5]采用显式有限元模型研究了车轮在钢轨上滚动时的“接触稳定性”现象。POLACH O^[6]论证了接触非线性对铁路车辆稳定极限性能的影响,并用两个参数描述了轮轨接触几何关系。WILSON N等^[7]研究车辆悬架参数和车体惯性参数加上不良的轮轨接触模式,对车辆横向稳定性性能的影响。周劲松等^[8]将最优化理论运用于铁道车辆蛇行运动稳定性研究领域,建立了转向架轴箱定位参数最优化设计的数学模型。KO E S等^[9]在Saemaul-ho研究经验的基础上,利用相似律对KTX-Sancheon的1/5小型转向架设计进行了研究,并对1/5小型转向架的运行稳定性进行了试验。

不同于独立路权的轨道交通体系,有轨电车运行在人流车流密集的公共区域,通过平交道口、小曲线半径较多,故对其安全性和平稳性要求更为严苛。本文通过型式试验的数据进行处理分析后得到列车运行时的安全性指标包括脱轨系数、轮重减载率以及轮轴横向力等,舒适性指标即车体sperling平稳性指数^[10],从而对车辆的运行品质进行全面的评估。

基金项目:中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(P2019J008)

第一作者简介:李子嘉(1997—),男,山西阳泉人,硕士研究生,研究方向为车辆系统动力学。

1 研究对象

研究对象为一组新型低地板有轨电车,包含有3台动力转向架和1台拖车转向架,车辆编组依次为Mc1—T—M—Mc2,列车最高试验速度选取为70 km/h。本次试验选取整列车,在车体和转向架上布置测点进行动力学测试。车辆的示意图如图1所示。

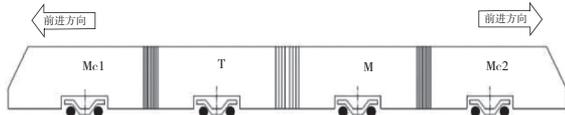


图1 被测列车示意图

2 研究内容

2.1 对列车安全性的研究方法

试验采用了轮轨作用力间接测量方法进行轮轨力测试,轮轨力间接测量方法旨在基于轮对受力状态,建立轮对力和力矩平衡方程,通过轮对惯性力和悬挂受力,可间接求得轮轴横向力和两侧轮轨垂向力,而惯性力和悬挂力可结合轮对固有参数和实测振动信号确定。其中悬挂受力计算时对其进行线性化处理,利用位移传感器测得悬挂件行程乘以刚度可得悬挂力大小,惯性力计算时利用车箱处采得振动加速度进行处理后与质量相乘可得。

根据 GB5599—1985^[11] 以及 UIC518—2009^[12] 规定,各指标的具体要求如下。

脱轨系数 $Y/Q \leq 1.2$ 。试验过程中,当 Y/Q 达到 1.2 时停止提速。

轮轴横向力 $H \leq 0.85 \times (10 + P_0/3)$, 其中 P_0 为左右车轮静载荷之和,单位为 kN。

轮重减载率 $\Delta P/P \leq 0.65$ 。

倾覆系数 $D = P_d/P_{st} < 0.8$ 。其中: P_d 为车辆或转向架同一侧车轮的动载荷; P_{st} 为相应车轮静载荷。

2.2 列车安全性试验结果

表1、表2分别为AW0(空车)以及AW3(重车)载重下各转向架运行安全性指标试验结果。在R40m、R50m和R180m等多个典型曲线线路下,Mc1车(动力转向架)和T车(拖车转向架)的轮轴横向力、轮重减载率和脱轨系数最大值均小于对应的限值,满足标准规定的要求;表3、表4分别是AW0(空车)以及AW3(重车)载重工况,各类线路下Mc1车、T车、M车、Mc2车和整车倾覆系数的试验结果,结果表明车辆的倾覆系数小于相应限值,满足标准要求。

表1 转向架运行安全性指标最大值(AW0)

车辆	轮轴横向力/kN	脱轨系数	轮重减载率
Mc1车	26.490	0.897	0.325
T车	20.906	0.828	0.251

表2 转向架运行安全性指标最大值(AW3)

车辆	轮轴横向力/kN	脱轨系数	轮重减载率
Mc1车	28.506	0.749	0.233
T车	26.751	0.705	0.202

表3 车辆倾覆系数最大值(AW0)

Mc1车	T车	M车	Mc2车	整车
0.223	0.192	0.199	0.218	0.173

表4 车辆倾覆系数最大值(AW3)

Mc1车	T车	M车	Mc2车	整车
0.167	0.149	0.145	0.163	0.107

由此可见,在空车工况下,动车转向架的各项参数均大于拖车,而且头尾车的指标要大于中间车。对比列车在AW0和AW3两种工况下的安全性指标可以发现,除了轮轴横向力之外,其他安全性指标在载重增大后均有所降低,也就是说列车整体的安全性较空车时有了很大的提升。

2.3 对列车运行平稳性的研究方法

在对列车运行平稳性研究时,着重关注车体的运行质量,故在两个转向架中心上方车体地板附近1 m处布置加速度传感器用来检测车体地板的振动加速度,后期由此计算车体的横向平稳性指标即sperling指数。具体的限制要求如表5所示。

表5 评定标准及项目

标准	项目	AW0 / AW3
GB5599	垂向平稳性	W<2.5
GB5599	横向平稳性	
UIC 518	车体垂向加速度最大值/(m/s ²)	≤2.50
UIC 518	车体横向加速度最大值/(m/s ²)	≤2.50
UIC 518	车体垂向加速度方均根值/(m/s ²)	0.75
UIC 518	车体横向加速度方均根值/(m/s ²)	0.50

2.4 列车运行平稳性研究结果

1) AW0 工况下平稳性试验结果

如图2所示,随着速度的提高,列车车体的横向平稳性指标是不断上升的,也就是车体的横向稳定性逐渐变差。其中Mc2车的变化较为明显,在45 km/h的速度之后,Mc2车的横向平稳性指标是最高的,几乎呈线性增长,其次是T车。T车在高速区段的平稳性略好于Mc2车,但相对于其他两节车要差一些。从中可见,同属中间车辆,在AW0条件下的T车稳定性要差于M车,所以电机以及齿轮箱产生的转矩对中间车运行稳定性的提升有所帮助。头尾车的变化较为复杂,在不同的速度范围内接近两个极端表现,在45 km/h以下的速度运行时Mc2车的稳定性是最差的,在45 km/h往上的区域则刚好相反。列车垂向

平稳性指标有着和横向类似的变化规律,随着列车运行速度的提升而近乎于线性增长,如图3所示。综合考虑两个方向的平稳性指标以及运营成本的因素,确定列车在人流量少地区的运营速度。

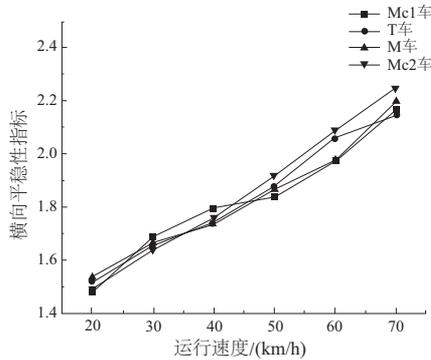


图2 列车运行横向平稳性指标(AW0)

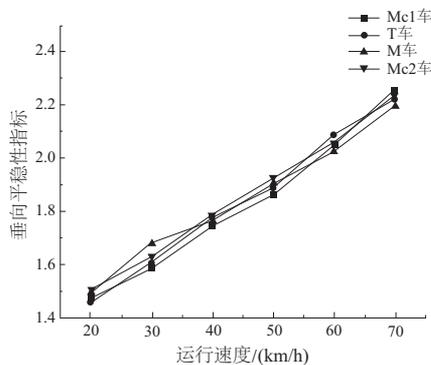


图3 列车运行垂向平稳性指标(AW0)

2)AW3 工况下平稳性试验结果

如图4所示,列车在AW3工况下的横向平稳性指标随着车速的提高一直上升。此处T车的变化较为明显,全速度段内保持较高的横向平稳性指标,这和AW0时的表现有所不同。虽说相比空车时,车辆的稳定性有所提升,但是T车的变化显然没有其他M车大,也就是说,对工况变化的不敏感使得T车在满载情况下的运行稳定性较其他车差。头尾两个Mc车还保持着分速度区间的变化规律,但是在高速区域内Mc2车平稳性差一些。从图5可以看出,T车的垂向平稳性在全速度段都保持着较低值,Mc2车的垂向平稳性较差。

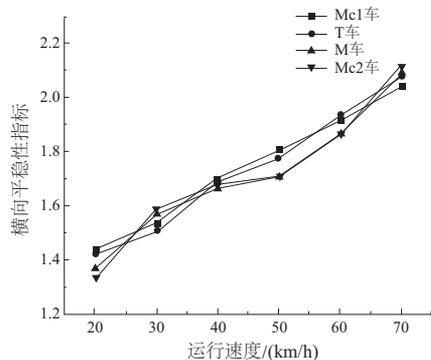


图4 列车运行横向平稳性指标(AW3)

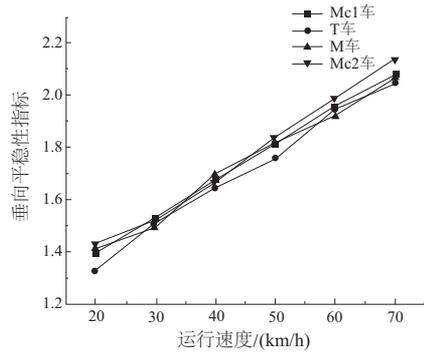
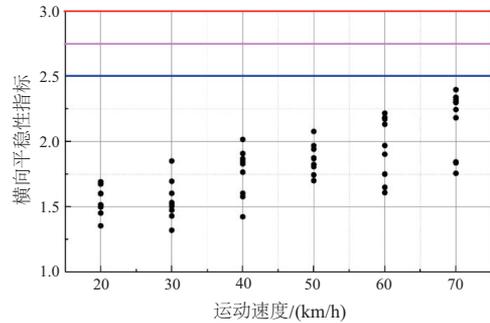
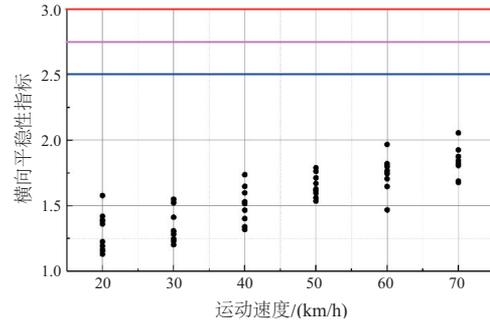


图5 列车运行垂向平稳性指标(AW3)

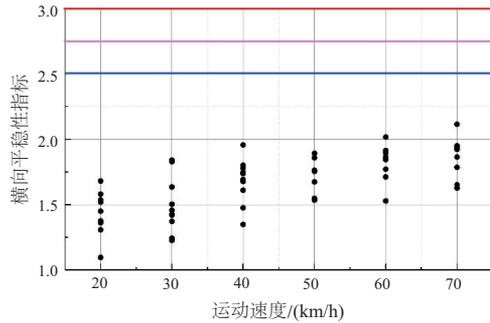
由于Mc1车属于头车,而且变化规律较为明显,故将其前中后拆开分析。由图6可知,该车前端的平稳性指标较大,后端次之,中段最小,故司机室位置以及靠近风挡较接处的平稳性较差,后期新车设计要考虑司机室稳定性的控制,保障列车安全运行。



(a) 前段



(b) 中段



(c) 后段

图6 Mc1运行平稳性指标

2.5 列车运动稳定性的研究

图7-图8为被试车辆在AW0以及AW3载重条件下

车辆的运动稳定性。对转向架的构架端部测点数据进行 0.5 Hz~10 Hz 带通滤波,可以得到以下结果:Mc1 车和 T 车在最高试验速度 70 km/h 下,构架横向振动加速度幅值小于标准规定的限值,转向架未出现失稳现象,满足标准要求。

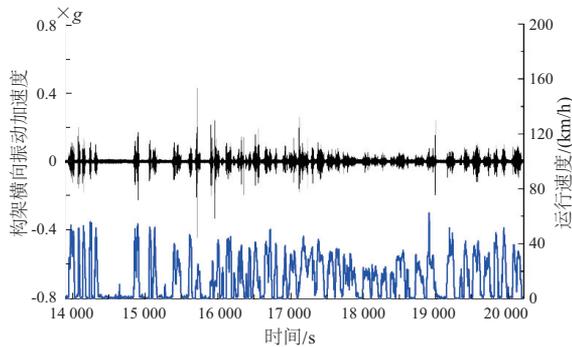


图7 转向架的构架端部振动加速度(AW0)

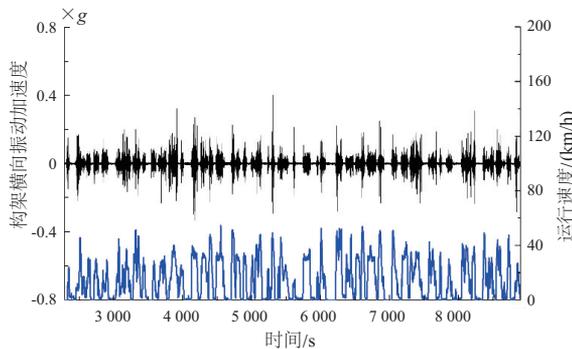


图8 转向架的构架端部振动加速度(AW3)

3 结语

该型有轨电车在运行时头尾车和中间车的动力学指标是存在差异的,即中间车的运行品质高于头尾车。在中

间车当中,动车的运行品质优于拖车。加载之后,车辆的稳定性得到明显的提升,除轮轴横向力有所上升外,其他指标均下降,车辆运行更加安全稳定。Mc1 车前端以及后端稳定性较差,中段车体较为稳定。新车设计时虽然要考虑车体轻量化,但不可使车体过轻造成相应动力学指征恶化,影响行车品质。

参考文献:

- [1] 贾璐,曾京,池茂儒. 车辆系统横向运动稳定性评判的数值仿真研究[J]. 铁道车辆,2011,49(9):1-7.
- [2] 李玉青. 100%低地板轻轨车辆动力学性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [3] 曹志礼. 铁道车辆振动性能评定方法与自动数据处理[J]. 铁道车辆,1981,19(3):10-18.
- [4] 徐士恒,王勇,石俊杰.“车-货”耦合的高速货运动车组动力学性能分析[J]. 机械制造与自动化,2021,50(2):22-24,28.
- [5] MA Y W, MARKINE V L, MASHAL AA, et al. Effect of wheel-rail interface parameters on contact stability in explicit finite element analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F, Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(6):1879-1894.
- [6] POLACH O. Characteristic parameters of nonlinear wheel/rail contact geometry [J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(Suppl.1):19-36.
- [7] WILSON N, WU H M, TOURNAYH, et al. Effects of wheel/rail contact patterns and vehicle parameters on lateral stability [J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(suppl.1):487-503.
- [8] 周劲松,赵洪伦,王福天. 铁道车辆蛇行运动稳定性最优化研究[J]. 铁道车辆,1995(1):3-9.
- [9] KO E S, NOH I C, LEE H S. A critical speed test of high speed train by small - scaled derailment simulator [J]. International Journal of Advanced Railway, 2015, 3(1):193-199.
- [10] 罗仁,石怀龙. 铁道车辆系统动力学及应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2018.
- [11] GB 5599—1985 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范[S].
- [12] UIC518—2009 铁路车辆动态性能角度对铁路车辆的测试和验收、安全性、轨道疲劳、运行性能[S].

收稿日期:2021-05-17

(上接第181页)

- [10] 南虎,麻晓晶,赵海博,等. 基于YOLOv3框架的高分辨率电镜图像原子峰位置检测[J]. 物理学报,2021,70(7):076803.
- [11] 王宸,张秀峰,刘超,等. 改进YOLOv3的轮毂焊缝缺陷检测[J]. 光学精密工程,2021,29(8):1942-1954.
- [12] JU M, LUO H, WANG Z, et al. The application of improved YOLO V₃ in multi-scale target detection[J]. Applied Sciences, 2019,9(18):3775.
- [13] XU Y M, ZHANG K, WANG L. Metal surface defect detection using modified YOLO[J]. Algorithms, 2021, 14(9):257.
- [14] NING Z, MI Z W. Research on surface defect detection algorithm of strip steel based on improved YOLO V₃ [J]. Journal of Physics:Conference Series, 2021, 1907(1):012015.
- [15] KUMAR K, LI J P, ZAIN-UL-ABIDIN, et al. Content based image retrieval using gray scale weighted average method [J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2016, 7(1):1-6.
- [16] FAN L W, ZHANG F, FAN H, et al. Brief review of image

denoising techniques [J]. Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art, 2019, 2(1):7.

- [17] MOESLUND T B. BLOB analysis [M]//Undergraduate Topics in Computer Science. London, Springer London; 2012:103-115.
- [18] CHANG Y L, ANAGAW A, CHANG L N, et al. Ship detection based on YOLOv2 for SAR imagery [J]. Remote Sensing, 2019, 11(7):786.
- [19] SOLAK S, ALTINIUK U. A new method for classifying nuts using image processing and k-means++ clustering [J]. Journal of Food Process Engineering, 2018, 41(7):12859.
- [20] AHMED M, SERAJ R, ISLAM S M S. The k-means algorithm: a comprehensive survey and performance evaluation [J]. Electronics, 2020, 9(8):1295.
- [21] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition [C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2016:770-778.

收稿日期:2022-05-11