

某型地铁车辆运行稳定性研究

黄楨国^{1,2},李子嘉^{1,3},邬平波¹

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031;

2. 龙游县公路港航与运输管理中心,浙江 衢州 324400;3. 中国铁路设计集团有限公司,天津 300308)

摘要:通过对现场实测数据进行统计整理,对某型地铁列车的运行安全性和平稳性进行综合评估。被试车为1节动车与1节拖车,分别在其第一转向架的1轴处安装1条测力轮对来对轮轨之间相互作用力进行数据采集,以便在后期数据处理时计算相应的安全性指标。在车体两个转向架中心左右1 m处安装加速度传感器用以检测列车的振动加速度,用于后期计算车体的运行平稳性指标。通过数据的计算分析得出动车以及拖车在AW0和AW3两种工况下的运行品质。

关键词:地铁;安全性;舒适性;脱轨系数

中图分类号:U261 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)04-0178-04

Research on Operation Stability of Metro Vehicle

HUANG Zhenguo^{1,2}, LI Zijia^{1,3}, WU Pingbo¹

(1. State key laboratory of traction power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Longyou County highway, port, shipping and transportation management center, Quzhou 324400, China;

3. China railway design corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: Comprehensive evaluation on the operation safety and stability of a certain type of metro train is conducted through the statistical analysis of the field measured data. A motor car and a trailer are tested and a force measuring wheelset is installed respectively at one axle of its first bogie to collect the data of interaction force between wheel and rail, thus the corresponding safety index in the later data processing is calculated. An acceleration sensor is attached at 1 m near the center of two bogies of the car body to detect the vibration acceleration of the train and calculate the running stability index of the car body in the later stage. Through the data analysis, the running quality of the vehicle and trailer under AW0 and AW3 conditions is obtained.

Keywords: metro; security; comfort; derailment coefficient

0 引言

随着城市人口的急剧增加,公共交通的发展越来越受到人们的重视。自从1863年伦敦大都会铁路的开通运营将这种快速、安全的交通方式带入人们的视野后,近些年中国的地铁运营里程呈现爆发式地增长,但是一系列问题的出现诸如噪声过大、车体晃动或抖动以及磨损剧烈等问题成为地铁这种新式交通方式发展中的隐患。为此,国内外许多学者针对地铁列车运行安全性和平稳性做了很多研究。曾京等^[1]建立了具有17自由度的车辆系统非线性数学模型,研究了车钩力以及曲线半径对车辆临界速度的影响。石怀龙等^[2]针对高速列车已有的行业标准进行总结和比对,从中得出适用于当下列车的动力学指标评价方法。池茂儒等^[3]通过对存在轮径差的转向架进行受力分析,把轮径差对车辆系统稳定性的影响划分成3个区域分别进行分析。路兵^[4]分析了各个悬挂参数对车辆非线性临界速度的影响,并详述了临界速度的仿真计算方法。

蔡文锋等^[5]建立了考虑悬浮控制系统的车辆动力学模型,对列车在直线段快速运行时的动力学特性进行了分析研究。XING L L等^[6]建立了CRH2C车辆模型并对名义等效锥度和Hopf分叉类型进行分析,得出了轮轨相互作用的非线性特征和列车非线性稳定性之间的关系。GONG C C等^[7]建立一种分析及预测运营车发车密度过高引起的轨道横向劣化的方法,并探讨不同类型车辆、行车速度以及轮轨关系对轨道横向劣化的影响。马卫华等^[8]通过轮轨非对称接触现象,研究其对机车运行平稳性以及曲线通过能力的影响。AUCIELLO J等^[9]提出了一种新型的轮轨接触点检测的半解析方法,可以将复杂的轮轨关系简化为一个标量方程,并可用数值方法求解。POLACH O^[10]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。徐士恒等^[11]针对货运动车组的特点在传统多刚体模型的基础上,考虑集装箱的结构、布置和安装方式,在SIMPACK中建立更近实际的“车-货”耦合动力学仿真模型。

本文通过型式试验测得数据并进行处理分析,得到列

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52002341)

第一作者简介:黄楨国(1996—),男,浙江建德人,硕士研究生,研究方向为机车车辆强度及动力学。

车在实际线路上运行时的状态参数。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^[12],蛇行运动稳定性通过构架端部横向加速度数据来判断。优良的曲线通过性能以及直线运行稳定性是轨道车辆动力学发展永恒的目标,故所设置的工况应包括曲线以及直线,以便于对列车进行全方位的研究。

1 研究对象

所研究对象为一列六编组地铁 AH 型车辆,采用四动两拖的编组方式,头尾为拖车,如图 1 所示。该车辆设计最高运营速度 80 km/h,动力学试验车辆为 TC1 车、MP1 车,两车 1 轴各加装 1 条测力轮对来检测轮轨力的数值变化。试验前被试车辆完成了 5 420 km 的运行磨合,以保持最佳的轮轨接触状态。

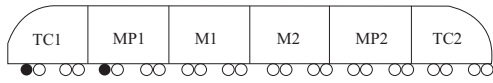


图 1 被测车辆示意图

2 研究内容

2.1 对列车运行安全性进行研究

试验采用测力轮对法获取轮轨横向、垂向力,计算脱轨系数、轮重减载率等并进行脱轨安全性评估。轮轨力信号传输采用集流环装置,实时数据通过线缆传回数据采集器进行储存以便后续进行统计分析。根据 GB5599—1985^[13]规定,相关参数计算采用以下公式。

脱轨系数:

$$Q/P \leq 0.8$$

式中: Q 为轮轨横向力, kN; P 为轮轨垂向力, kN。

轮重减载率:

$$\Delta P/\bar{P} \leq 0.6 \quad (\text{空簧正常})$$

式中: ΔP 为轮重减载量, kg; \bar{P} 为轴平均静载荷, kN。

轮轴横向力:

$$H \leq \alpha(10 + P_0/3), \quad \alpha = 1$$

式中 P_0 为净轴重, kg。

1) 试验结果

表 1、表 2 给出了被试车在空车(AW0)工况下直线和曲线的运行稳定性(安全性)评价指标最大值统计。试验结果表明:被试 TC1 车及 MP1 车的脱轨系数最大值分别为 0.79、0.79;轮重减载率最大值分别为 0.38、0.40;轮轴横向力最大值分别为 22.36 kN、23.14 kN;构架横向加速度最大值分别为 3.05 m/s^2 、 3.22 m/s^2 。

TC1 车与 MP1 车脱轨系数最大值出现在 R525m 曲线、R525m/R300m 曲线;轮重减载率分别出现在 R525m/R300m、R300m 曲线;轮轴横向力最大值均出现在 R300m 曲线;构架横向加速度最大值出现在直线、R300m 曲线,且动车的轮轴横向力以及构架横向加速度明显大于拖车。

表 1 直线工况运行稳定性(安全性)评价指标
(空车(AW0)工况)

被试车	1 轴动力学指标	最大值	速度/kmph
TC1	脱轨系数	0.26	50
	轮重减载率	0.20	90
	轮轴横向力/kN	8.02	90
	构架横向加速度/(m/s^2)	4.32	90
MP1	脱轨系数	0.25	50
	轮重减载率	0.19	90
	轮轴横向力/kN	7.16	90
	构架横向加速度/(m/s^2)	2.68	90

表 2 曲线工况运行稳定性(安全性)评价指标
(空车(AW0)工况)

被试车	1 轴动力学指标	最大值	线况	速度/kmph
TC1	脱轨系数	0.79	R525m	60
	轮重减载率	0.38	R525m	69
	轮轴横向力/kN	22.36	R300m	69
	构架横向加速度/(m/s^2)	3.05	R300m	69
MP1	脱轨系数	0.79	R525m	60
	轮重减载率	0.40	R525m	69
	轮轴横向力/kN	23.14	R300m	69
	构架横向加速度/(m/s^2)	3.22	R300m	69

表 3 和表 4 分别给出了被试车超员(AW3)工况下直线和曲线的运行稳定性(安全性)评价指标最大值统计。试验结果表明:被试 TC1 车及 MP1 车在空气弹簧正常工况的脱轨系数最大值分别为 0.65、0.70;轮重减载率最大值分别为 0.38、0.35;轮轴横向力最大值分别为 26.47 kN、29.19 kN;构架横向加速度最大值分别为 3.86 m/s^2 、 3.81 m/s^2 。

TC1 与 MP1 车脱轨系数最大值均出现在 R300m 曲线;轮重减载率最大值均出现在 R300m 曲线;轮轴横向力最大值均出现在 R300m 曲线;构架横向加速度最大值分别出现在直线和 R525m 曲线。

表 3 直线工况运行稳定性(安全性)评价指标
(重车(AW3)工况)

被试车	1 轴动力学指标	最大值	速度/kmph
TC1	脱轨系数	0.20	50
	轮重减载率	0.20	90
	轮轴横向力/kN	10.12	50
	构架横向加速度/(m/s^2)	3.86	90
MP1	脱轨系数	0.21	50
	轮重减载率	0.17	90
	轮轴横向力/kN	10.34	50
	构架横向加速度/(m/s^2)	3.02	90

表4 曲线工况运行稳定性(安全性)评价指标
(重车(AW3)工况)

被试车	1轴动力学指标	最大值	线况	速度/kmph
TC1	脱轨系数	0.65	R300m	40
	轮重减载率	0.38	R300m	69
	轮轴横向力/kN	26.47	R300m	69
	构架横向加速度/(m/s ²)	3.42	R300m	69
MP1	脱轨系数	0.70	R300m	40
	轮重减载率	0.35	R300m	69
	轮轴横向力/kN	29.19	R300m	69
	构架横向加速度/(m/s ²)	3.81	R300m	69

2) 脱轨系数速度级分析

对比AW0以及AW3两种工况可得,列车在空车通过曲线时的脱轨系数数值最大,处于危险区域,故对该工况(曲线半径300m)进行相应的速度级分析,可以得出图2。

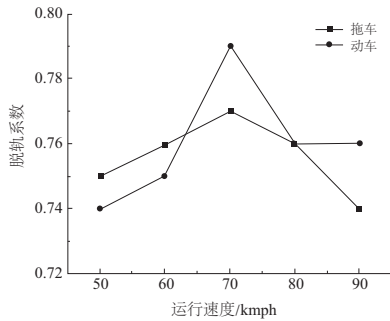


图2 不同速度级下脱轨系数变化图(AW0)

由图2可知,各个速度级下的脱轨系数接近于上限0.8,较为危险。这种情况较容易出现在客流量较少的站间区段内。由曲线可以看出在速度低于60kmph时,拖车的脱轨系数要大于动车的;在70kmph时脱轨系数达到顶峰;随着速度的继续提高,脱轨系数又呈下降趋势。总体上来说,在高速区段,动车的脱轨系数要高于拖车的。

结合实际情况分析,列车在客流量较多的区间运行时,运行工况可以达到AW2甚至AW3,那么就有必要对AW3情况下列车通过小曲线(曲线半径300m)的工况进行速度级的分析,得到折线图如图3所示。

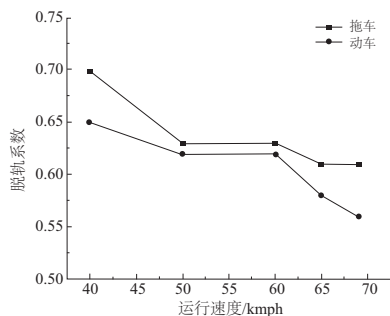


图3 不同速度级下脱轨系数变化图(AW3)

由图3可得,两种车型的脱轨系数随着速度的增加是在递减的。整体上看,在此种工况下动车的脱轨系数数值大于拖车的。在列车以低于50kmph的速度运行时,脱轨系数数值处在一个较高的范围之内,最高达到了0.7,距离0.8

的上限很近,比较危险。当速度处在50~60kmph时,脱轨系数达到了稳定,基本不随着速度的改变而发生明显的变化;在高于60kmph时,脱轨系数继续下降,拖车的下降速度较动车来说更为剧烈一些。

综合以上观点可以得出结论,地铁运营公司在试运行期间应做好市场调研,对不同的人流量的站间区段进行划分,在客流量较少的区段,可以采取以60kmph的最高运行时速来运行,在客流量较大的区域,则可以达到70kmph,这样设计不仅可以降低列车脱轨风险,还可以在在一定程度上降低运营成本。

2.2 对列车运行平稳性进行研究

运行平稳性测试在车体地板的振动加速度。参照执行标准分别计算横、垂平稳性指标。车体振动加速度采用加速度传感器测定,测点位于TC1与MP1车前后转向架中心上方左侧/右侧1m处车体地板。表5为平稳性指标等级表。

表5 平稳性指标等级表

平稳性等级	客车平稳性指标	评定
1级	<2.5	优
2级	2.5~2.75	良
3级	2.75~3.0	合格

1) 列车运行平稳性试验结果

表6和表7分别给出了被试车在空车(AW0)工况下直线和曲线的运行平稳性指标最大值统计。试验结果表明:被试TC1车及MP1车在正常工况横向平稳性指标最大值分别为2.43、2.48,均出现在R525m曲线中;垂向平稳性指标最大值分别为2.22、2.26,均出现在直线中。

表6 直线工况下运行平稳性试验结果

被试车	速度/kmph	动力学指标	数值
TC1	80	1位横向平稳性最大值	2.28
	80	1位垂向平稳性最大值	2.22
	80	2位横向平稳性最大值	2.05
	80	2位垂向平稳性最大值	2.18
MP1	80	1位横向平稳性最大值	2.36
	80	1位垂向平稳性最大值	2.09
	80	2位横向平稳性最大值	2.24
	80	2位垂向平稳性最大值	2.26

表7 曲线工况下运行平稳性试验结果

被试车	速度/kmph	线况	动力学指标	数值
TC1	80	R525m	1位横向平稳性最大值	2.43
	80	R525m	1位垂向平稳性最大值	2.17
	69	R300m	2位横向平稳性最大值	2.27
	80	R525m	2位垂向平稳性最大值	2.12
MP1	80	R525m	1位横向平稳性最大值	2.48
	80	R525m	1位垂向平稳性最大值	2.04
	69	R300m	2位横向平稳性最大值	2.43
	80	R525m	2位垂向平稳性最大值	2.12

表8和表9分别给出了被试车在超员(AW3)工况下

直线和曲线的运行平稳性指标最大值统计。试验结果表明:被试 TC1 车及 MP1 车在正常工况横向平稳性指标最大值分别为 2.31、2.28,均出现在 R525m 曲线中;垂向平稳性指标最大值分别为 2.16、2.13,垂向平稳性指标最大值出现在直线、直线/R525m 曲线中。

表 8 直线工况运行平稳性指标

被试车	速度/kmph	动力学指标	数值
TC1	80	1 位横向平稳性最大值	2.23
	80	1 位垂向平稳性最大值	2.09
	80	2 位横向平稳性最大值	2.00
	80	2 位垂向平稳性最大值	2.09
MP1	80	1 位横向平稳性最大值	2.14
	80	1 位垂向平稳性最大值	2.13
	80	2 位横向平稳性最大值	2.03
	80	2 位垂向平稳性最大值	2.09

表 9 曲线工况运行平稳性指标

被试车	速度/kmph	线况	动力学指标	数值
TC1	80	R525m	一位端横向平稳性	2.31
	80	R525m	一位端垂向平稳性	2.16
	80	R525m	二位端横向平稳性	1.96
	80	R525m	二位端垂向平稳性	2.10
MP1	80	R525m	一位端横向平稳性	2.28
	80	R525m	一位端垂向平稳性	2.13
	80	R525m	二位端横向平稳性	2.03
	80	R525m	二位端垂向平稳性	2.10

2) 速度级分析

结合表 5 到表 8 的内容可以发现,在通过曲线工况下一位端处横向平稳性是最差的,最高达到了 2.48,故对其空、重车两种工况进行速度级分析,得到结果如图 4、图 5 所示。

由图 4-图 5 可知,无论车体载质量如何,一位端横向平稳性指标都是随着速度的增加而逐渐变大的,可以说速度越高,带来的必然结果就是平稳性的降低。但是不同载重下,动车和拖车的表现却存在明显的差异。在空车情况下动车的平稳性始终大于拖车,重车情况下结果却恰好相反。从数值上来讲,重车的平稳性要好于空车,所以在客流量较少的区域,列车运行要综合考虑确定运行速度,以保证列车运行平稳舒适。

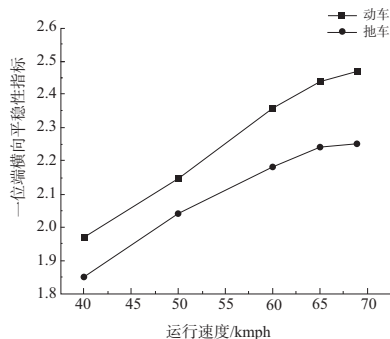


图 4 一位端横向平稳性指标随速度变化图 (AW0)

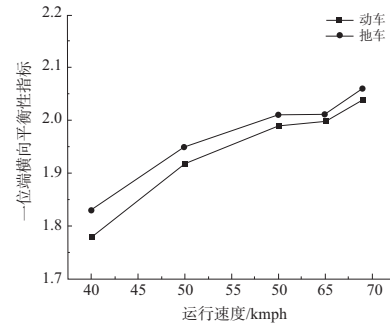


图 5 一位端横向平稳性指标随速度变化图 (AW3)

3 结语

安全性评估和平稳性评估决定着列车的运行质量。在空车(AW0)工况下通过小曲线时,列车的脱轨系数较大,处在限值边缘,这种情况在动车上表现尤其明显。运行平稳性方面,空车通过小曲线时的平稳性指标较大一些,这种情况出现在拖车上,重车工况时反而比动车的平稳性恶劣一些。地铁公司为了给旅客提供舒适的服务,要综合考虑客流因素,合理地确定列车运行时速,将旅客安全平稳地送往目的地。

参考文献:

- [1] 曾京,郭平波. 高速列车稳定性问题的研究[C]//中国铁道学会车辆委员会 2004 年度铁路机车车辆动态仿真学术会议论文集. 峨眉:2004:112-117.
- [2] 石怀龙,罗仁,曾京. 国内外高速列车动力学评价标准综述[J]. 交通运输工程学报,2021,21(1):36-58.
- [3] 池茂儒,张卫华,曾京,等. 轮径差对行车安全性的影响[J]. 交通运输工程学报,2008,8(5):19-22.
- [4] 路兵. 铁道车辆动力学特性分析[D]. 兰州:兰州交通大学,2016.
- [5] 蔡文锋,徐银光,赵春发,等. 新型悬浮架结构中低速磁浮列车提速运行稳定性研究[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(9):32-36.
- [6] XING L L, WANG Y M, DONG X Q. Effect of the wheel/rail contact geometry on the stability of railway vehicle [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 392:062134.
- [7] GONG C C, IWICKI S, BEZIN Y. The effect of railway vehicle dynamics on the lateral alignment of track [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(1):258-270.
- [8] 马卫华,高定刚,宋荣荣,等. 轮轨非对称接触及其对车辆动力学性能的影响[J]. 电力机车与城轨车辆,2009,32(5):1-4.
- [9] AUCIELLO J, MELI E, FALOMI S, et al. Dynamic simulation of railway vehicles; wheel/rail contact analysis [J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(7):867-899.
- [10] POLACH O. Characteristic parameters of nonlinear wheel/rail contact geometry [J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(suppl 1):19-36.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] GB5599—1985 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范[S].

收稿日期:2021-04-14