

文章编号: 1674—8247(2023)06—0072—06

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 06. 014

成灌铁路动车组车体异常晃动原因分析及治理

刘 明

(中国铁路成都局集团有限公司, 成都 610000)

摘 要:针对成灌铁路某型动车组服役过程中出现的车体晃动现象问题,对出现晃车区段的钢轨廓形、车轮踏面等进行了全方位的调查,选取固定车号进行了动态跟踪测试,对该型动车组晃车现象进行了全方位的现场试验。研究表明:(1)引起该型动车组车体异常晃动的主要原因为:晃车区段实测钢轨廓形作用边较低,与实测车轮踏面匹配时轮轨匹配等效锥度偏低,激发了车体的下心滚摆模态,导致动车组发生一次蛇形;(2)通过精细化地采集钢轨廓形、针对性地实施钢轨廓形打磨方案、对打磨区段进行全覆盖廓形跟踪验收、对打磨前后动车组进行多次动态添乘测试,消除了成灌铁路动车组车体晃动问题。研究成果对解决城际线路运营动车车体异常晃动问题具有较好的指导意义。

关键词:成灌铁路;车体晃动;钢轨廓形;等效锥度;廓形打磨

中图分类号: U266

文献标志码: A

Analysis and Treatment of Abnormal Wobbling of Car Body of EMU on Chengdu-Dujiangyan Railway

LIU Ming

(China Railway Chengdu Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: In response to the wobbling of car body experienced in a certain type of EMU during operation on Chengdu-Dujiangyan Railway, a comprehensive investigation was conducted on the rail profile and wheel tread of the wobbling sections. Dynamic tracking tests were carried out with a specific trainset, and a full range of field tests was conducted on the wobbling phenomenon of this type of multiple units. The study results show: (1) The main cause of abnormal wobbling of car body of this EMU model is the lower operating side of the surveyed rail profile in the wobbling sections. The low equivalent rail-wheel taper when matched with the surveyed wheel tread stimulates the body's off-center roll mode, leading to snake-shape locomotion of the multiple units. (2) The wobbling in the car bodies of EMU on Chengdu-Dujiangyan Railway was eliminated through precise rail profile collection, implementation of targeted rail profile grinding scheme, full coverage profile tracking acceptance in the grinding sections, and dynamic riding tests of EMU before and after grinding at multiple frequencies. The study results have significant implications for resolving issues of abnormal wobbling of car body of EMU operating on intercity lines.

Key words: Chengdu-Dujiangyan Railway; wobbling of car body; rail profile; equivalent taper; rail profile grinding

我国高速铁路进入了快速发展阶段,列车长期服役过程中的车体异常晃动等问题已成为高速列车运

营品质、轮轨服役寿命的主要制约因素。国内外围绕车体异常晃动的研究多围绕转向架的耦合振动开展。

收稿日期: 2022-11-11

作者简介: 刘明(1980-),男,工程师。

引文格式: 刘明. 成灌铁路动车组车体异常晃动原因分析及治理[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(6): 72-77.

LIU Ming. Analysis and Treatment of Abnormal Wobbling of Car Body of EMU on Chengdu-Dujiangyan Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6): 72-77.

早在1994年日本学者就在新干线高速动车组上捕捉到了车体异常晃动,晃动主频在1.5 Hz^[1];池茂儒^[2]等采用动力学仿真软件详细再现了蛇形运动主频与车体刚体模态耦合共振时的车辆晃车;李然^[3]针对实测轮轨廓形接触时等效锥度与轮轨接触角等参数的对应关系,研究了轮轨接触几何关系线性化的方法;龚继军^[4]等针对广深铁路动车组车体的异常晃车的问题,通过现场测试和仿真分析,发现广深线动车组异常晃动的主要原因为轮轨匹配状态异常,可通过钢轨打磨治理。不少学者从车辆悬挂参数优化^[5-7]、车轮踏面轮廓状态^[8-10]等角度对引起车体异常晃动的因素进行了研究,并提出了相应的优化整治措施。

本文对成灌铁路某型动车组产生异常晃动区段轨道的几何尺寸、钢轨廓形、车轮踏面状态等进行了跟踪测试,采集了晃车时刻动车组车体时频数据,分析了成灌铁路动车组异常晃动的机理,制定实施了相应的整治措施。

1 问题概况

成灌铁路简称“成灌线”,又称“成灌快铁”,是成都市域铁路的第一条线路,也是成都市轨道交通系统中投入运营的第一条线路,日开行动车组数量较多,车次密集,高峰时刻日开行列车高达59对。中国铁路成都局集团有限公司成都高速铁路工务段于2021年12月添乘成灌铁路时,发现某型动车组运行在郫县西至青城山高速区段出现大面积的晃车现象,连续左右摆车14处,部分里程如表1所示。

表1 成灌铁路晃车区段表

序号	行别	区间	具体里程	问题
1	上行	郫县西—安德	K 30 + 200 ~ K 30 + 500	左右晃车
2	上行	安德—聚源	K 41 + 100 ~ K 41 + 500	左右晃车
14	下行	安德—聚源	K 48 + 500 ~ K 48 + 800	左右晃车

2021年10—12月,成都高速铁路工务段针对成灌铁路上下行K 27 + 187 ~ K 64 + 545区段出现的动车组车体晃动问题进行了现场调查,测试了晃车时刻动车组车体振动、钢轨廓形、钢轨光带及轨面状态、车轮廓形等信息,对该型动车组出现晃车的相关原因进行了分析。

2 现场调查结果

2.1 车体振动测试结果

2021年12月,中国铁路物资股份有限公司使用平稳性测试仪对成灌铁路该型动车组某车号(编号车号1)动车组的车体振动状态进行了跟踪测试,车号1

轮后运行里程5 000 km。
车号1通过成灌铁路上行车体实测振动加速度测量结果、横向平稳性指标计算结果如图1所示,车号1对应动车组横向加速度全程STFT计算结果如图2所示。

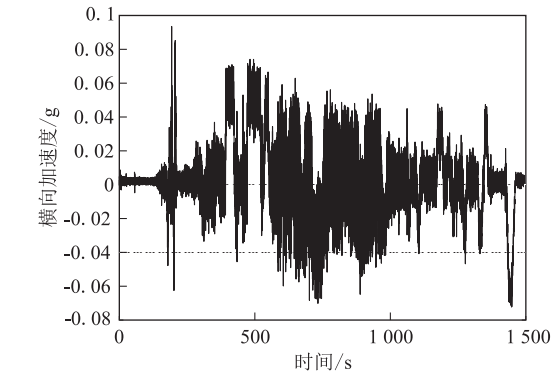


图1 车号1车体横向振动加速度及平稳性指标图

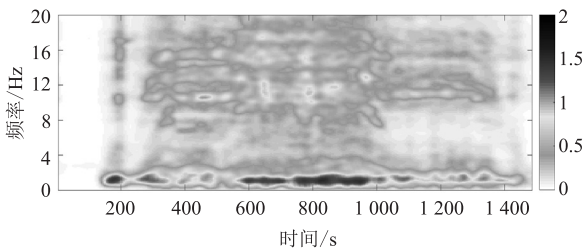


图2 车号1车体横向振动加速度STFT结果图

由图2可知,晃车时刻车辆横向振动存在较为明显的主频(颜色较深区域),主频约为1 Hz。

车号1对应动车组晃车时刻实测振动加速度局部放大结果如图3所示,车号1对应动车组横车号1车体晃车时刻横向振动傅里叶变换结果如图4所示。

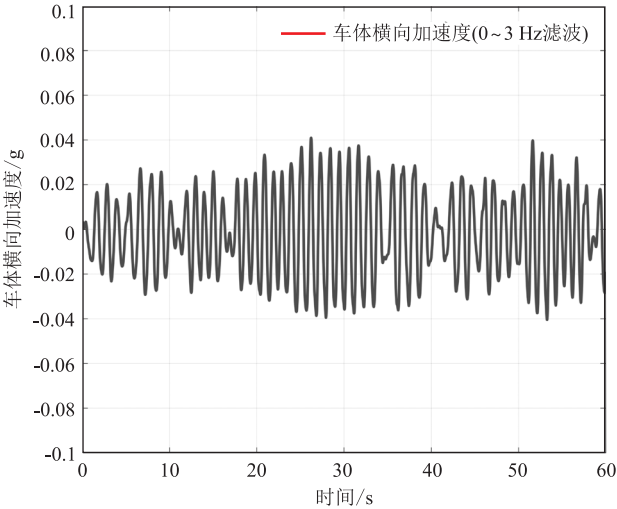


图3 异常晃动区段车体横向加速度局部放大图

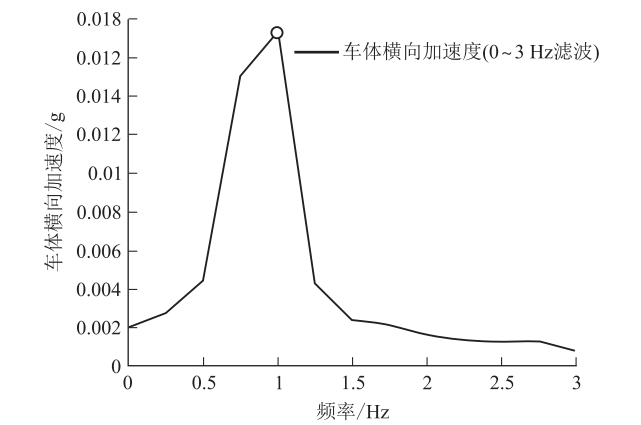


图4 异常晃动区段车体横向加速度 FFT 变换结果图

由图3可知,晃车时刻车体横向振动存在明显的谐波,表明此刻车体正发生晃动。由图4可知,晃车时刻车辆横向振动在1 Hz附近存在较为明显的主频。

GB/T 5599 – 2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》规定:动车组车辆平稳性指标小于2.5为优,ISO2631 标准规定舒适度值小于0.315 m/s²为非常舒适。经过多次添乘发现,现场实测动车组横向平稳性超过1.8,横向舒适度超过0.12 m/s²时,人体就能感觉到车体左右晃动;横向平稳性超过2,横向舒适度超过0.15 m/s²时,人工添乘时会明显感受到车体晃动剧烈。因此,本文将横向舒适度指标作为判定车辆晃动的指标。

车号1动车组通过成灌铁路时车辆的平稳性、舒适度指标计算结果如图5所示。

车号1动车组通过成灌铁路时车辆的平稳性、舒适度指标计算结果如表2。

序号	线路	行别	车号	横向平稳性		横向舒适度	
				≥1.8	≥2.0	≥0.12	≥0.15
1	成灌铁路	上行	车号1	91	17	32	11
2		下行	车号1	83	12	28	22

由表2可知,成灌铁路运行的动车组横向平稳性超过1.8、横向舒适度超过0.12 m/s²较多,超限位置主要存在于成灌铁路上下行K7+187~64+545(郫县西—都江堰)区段,与现场反映晃车区段位置较为吻合。

2.2 钢轨廓形

2021年10—12月,成都高速铁路工务段对成灌铁路晃车地段的钢轨廓形进行了详细调查。

下行37+980、38+000、38+020 同一股钢轨3个位置对应实测廓形与标准60轨廓形进行对比,对齐

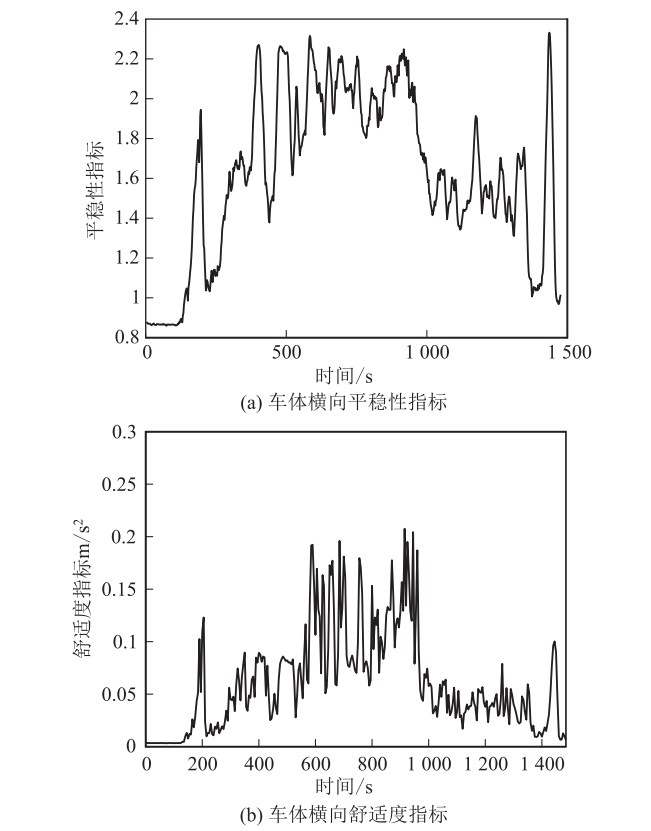


图5 车号1车体横向舒适度指标结果图

方式统一为内侧16 mm和轨顶对齐。

对比结果显示,同一股20 m范围内,钢轨廓形内侧距轨顶15 mm内侧最大偏差达到了0.8 mm,且38+000处钢轨廓形明显低于其他实测廓形,且伴随侧磨。

下行38+000 同一股钢轨左右实测廓形与标准60廓形对比如图6所示,廓形对齐方式统一为内侧16 mm和轨顶对齐。

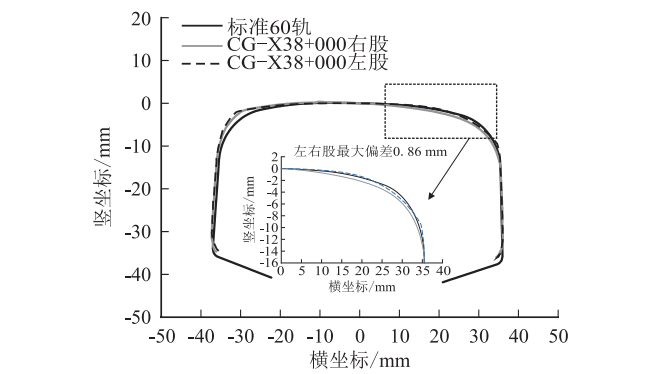


图6 同一测点左右股实测廓形标准60轨廓形对比图

由图6可知,同一测点廓形相差较大,钢轨廓形内侧距轨顶15 mm最大偏差达到0.86 mm。

2.3 轨面状态

调查发现成灌铁路上下行 K 7 + 187 ~ 64 + 545 频繁晃车区段现场钢轨轨面出现了交替侧磨, 轨距角有磨痕。这表明动车组运行到该区段时车辆有明显蛇形运动, 导致动车组通过该区段时发生了异常晃动。

2.4 车轮廓形

2021 年 10 月, 对成灌铁路发生异常晃动的车号踏面进行测试, 共测试了 32 组共计 64 个车轮踏面数据。

车号 1 典型实测车轮廓形测量结果如图 7 所示。通过车轮廓形磨耗位置可以看出, 发生晃车的车轮名义滚动圆外侧 20 ~ 50 mm 区域未见磨耗异常, 实测踏面主要磨耗位置位于名义滚动圆, 车轮状态未见异常, 不会存在由于踏面斜率太低导致动车组异常晃动的现象。

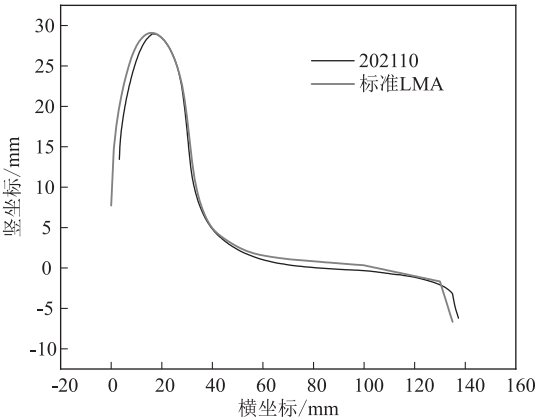


图 7 车号 1 典型实测车轮廓形测量结果图

3 原因分析

铁道车辆轮对在沿钢轨滚动时, 会产生一种既横向移动、又绕铅垂轴转动的特有的耦合运动, 称为轮对的蛇行运动。蛇行运动是铁道车辆的固有属性, 伴随着车辆运行一直存在, 一般在受到扰动后能很快收敛到平衡位置。然而, 当轮轨匹配较差或者车辆状态不好时, 蛇行运动收敛较慢, 或者发生周期性蛇行运动, 严重影响到车辆动力学性能。当等效锥度较小, 车辆运行速度较低的时候, 低频蛇行运动频率与车体悬挂自振频率比较接近, 进而引起一种低频失稳形式, 很容易出现车体晃车。

蛇行运动频率随速度和轮轨等效锥度的增大而增大, 动车组车体固有频率相对较低, 且稳定不变。因此, 只要动车组从静止开始运行, 蛇行频率与车体固有频率重合几乎不可避免, 车体共振必然会发生。

若动车组在高速运行区段蛇形运动频率与车体固有频率耦合时, 会导致车辆平稳性和舒适性严重恶化, 产生车体异常晃动现象。

3.1 车体悬挂模态计算结果

建立该型动车组动力学模型计算该型动车组车辆系统的自振频率和阻尼比, 如表 3 所示。车体上心滚摆频率在 1.016 Hz, 该频率与动车组发生晃动时刻振动主频比较接近。

表 3 动车组自振频率及阻尼比计算结果表

模态类别	模态	频率/Hz	阻尼比
车体悬挂	下心滚摆	0.602	0.120
	上心滚摆	1.016	0.380
	浮沉	0.872	0.127
	点头	0.968	0.212
	摇头	0.955	0.822

3.2 踏面形状

我国车辆常见的踏面形状主要有 LMA 与 LM 和 S1002CN, 对比结果如图 8 所示。成灌铁路运行动车组主要采用 LMA 踏面。

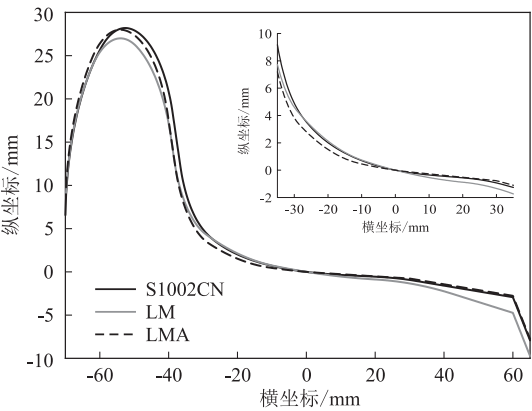


图 8 常见车轮踏面廓形对比图

由图 8 可知, LM 踏面端部斜度比 S1002CN 大, 即使接触到该区域也不易产生异常小锥度; LMA 踏面端部最为平缓, 一旦接触到该区域就容易产生小锥度。装有 LMA 踏面的动车组与钢轨廓形打磨或者内侧较低廓形匹配时很容易产生异常小锥度, 容易引起晃车。因此, LMA 踏面也是成灌铁路动车组车体晃动的诱因。

3.3 轮轨接触关系

等效锥度能较好的反应轮轨接触状态。实测踏面与标准 60 轨、60N 廓形以及典型问题区段实测钢轨廓形匹配时的等效锥度曲线计算如图 9 所示。

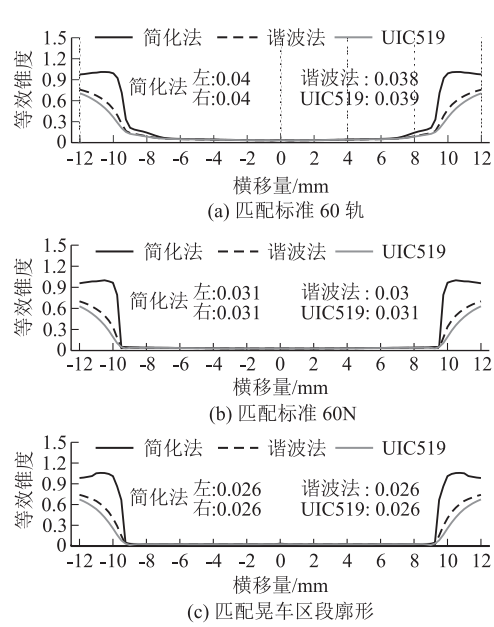


图9 车号1典型踏面等效锥度计算结果图

由图9可知,标准 LMA 踏面与标准 60 轨匹配时等效锥度理论计算值约为 0.039,与标准 60N 轨匹配时约为 0.03,与发生晃车区段的钢轨廓形匹配时约为 0.026。晃车区段钢轨廓形与标准 LMA 踏面匹配时,较匹配标准 60 轨理论计算值减小了 33.3%,较标准 60N 理论计算值减小了 13.3%。

实测 32 组车轮踏面匹配标准 60 轨、标准 60N、晃车区段钢轨廓形匹配时等效锥度计算结果如图 10 所示不同廓形匹配实测踏面等效锥度(UIC519)分布如图 11 所示。

由图 10、图 11 可知,实测 32 组车轮踏面与标准 60 轨匹配时等效锥度平均值 0.133,与标准 60N 廓形匹配时等效锥度平均值 0.084,与晃车区段典型廓形匹配时等效锥度平均值降低值 0.06。晃车区段钢轨廓形与实测踏面匹配时等效锥度平均值较匹配标准 60 轨减小了 54.9%,较匹配标准 60N 廓形减小了 23.8%。

经过分析可知,成灌铁路晃车区段实测廓形与标准车轮踏面和实测车轮踏面的轮轨匹配等效锥度均偏小,是引起动车组车体晃动的主要原因。

4 整治效果

2022 年 2—3 月,成都高速铁路工务段安排 Harsco96 头钢轨打磨车对问题区段的钢轨廓形进行了打磨。钢轨打磨后,动态跟踪了车体平稳性指标、分析轮轨接触关系、跟踪观测钢轨轨面状态,结果表明钢轨打磨后成灌铁路动车组车体异常晃动问题得

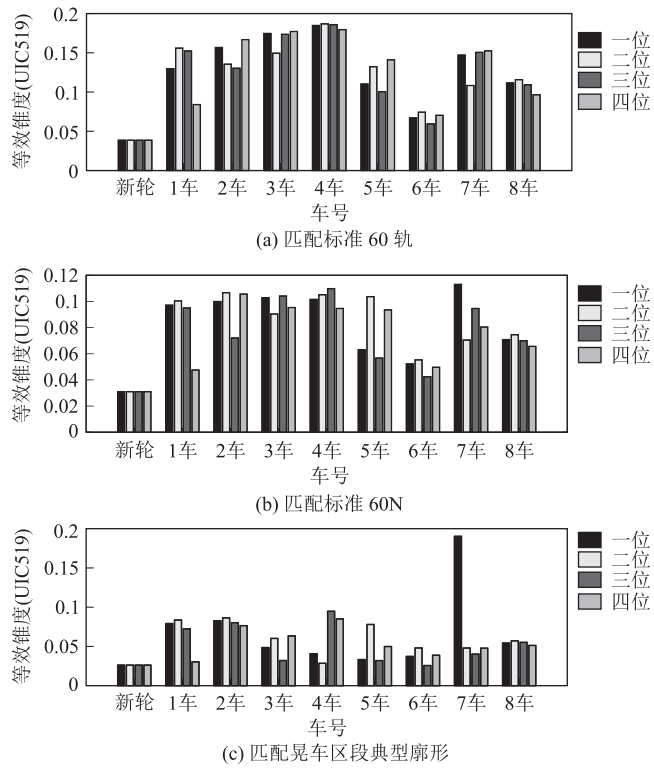


图10 不同廓形匹配实测踏面等效锥度图

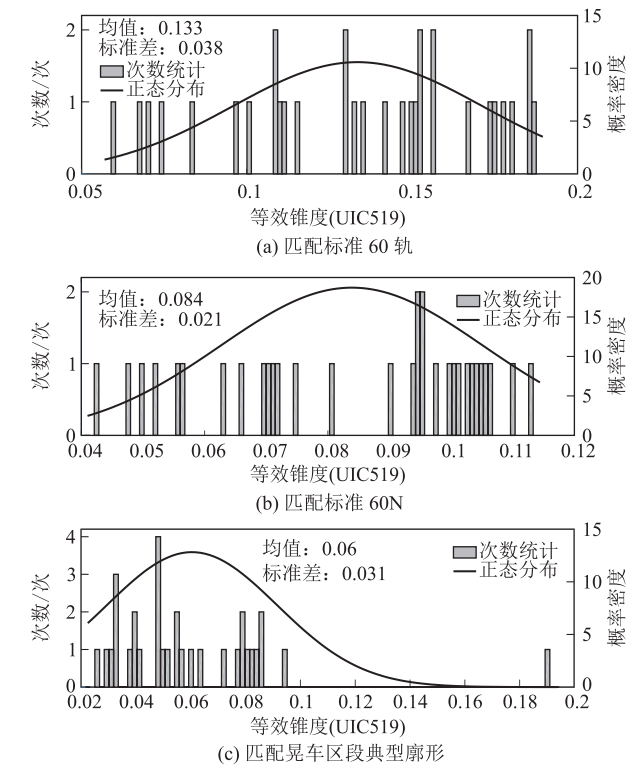


图11 不同廓形匹配实测踏面等效锥度(UIC519)分布图

到较好解决。
打磨后横向舒适度指标、平稳性指标均得到明显改善,横向舒适度无超过 0.12 的情况出现,人体体感

改善明显;同一股20 m范围内,钢轨廓形轨头关键区域横向距离距轨顶内侧15 mm范围内最大偏差减小至0.2 mm,且轨头关键接触区域一致性较好,钢轨前后廓形一致性得到较好的提升;同一测点廓形差异得到明显改善,钢轨廓形轨头关键区域横向距离距轨顶内侧15 mm范围内最大偏差减小至0.18 mm,轮轨关键接触区域较为贴合;实测钢轨廓形匹配实测32组车轮踏面等效锥度平均值提升至0.105,较打磨前的0.06提升了75.0%;轮轨接触光带宽度适中,位置正常,并且钢轨轨距角内侧未出现轨侧接触现象,表明轮轨接触状态恢复正常。

5 建议

轮轨关系不良引起动车组发生异常振动的现象时有发生,后续可以从以下几个方面加强对轮轨关系的研究:

(1) 钢轨廓形优化。成灌铁路等市域铁路线路曲线半径较小,轮轨磨耗较快,易引起轮轨匹配不良。轮轨关系匹配不良会导致轮轨间动态作用力激增,轮轨服役环境更加恶劣,导致轮轨关系进一步恶化,严重影响了列车运行的平稳性,增加了养护成本。为适应既有的动车组的车轮踏面,可适当提升钢轨廓形内侧弧度,提高轮轨匹配等效锥度,匹配既有车轮踏面状态。

(2) 车轮踏面优化。可以配合钢轨打磨技术,建议车辆部门对成灌铁路该型动车组踏面定期进行镟轮,累计数据,进一步优化改良设计车轮踏面,例如适当提高车轮踏面端部的廓形斜率、尝试采用LM踏面等手段,通过改善车轮踏面来适应钢轨的廓形偏差。

(3) 开展等效锥度动态管理。日常持续加强对管内动车组运行状态的监控,对车轮、钢轨廓形进行周期性测试,开展等效锥度动态管理,掌握不同动车组车轮踏面与不同里程线路实测钢轨廓形的匹配状态,提前对车轮踏面、线路钢轨廓形服役状态进行监测,避免出现由于轮轨关系不良出现的轮轨匹配状态异常现象,确保列车的运行安全和旅客的乘坐舒适度。

(4) 修正动车组异常晃动评价指标。发生晃车现象时动车组的横向平稳性指标、舒适度指标均未超过现有动车组运用限值,说明现有的平稳性、舒适度指标计算结果与现场人体体感存在较大的差异。后续可以针对国内乘客对不同频段的敏感程度和我国动车组实际的服役运用环境,修正平稳性指标计算方法。

6 结论

通过详细的现场调查和数据收集,发现成灌铁路该型动车组车体异常晃动的原因,随后在现场进行了充分的实践论证,得到主要结论如下:

(1) 晃车区段线路实测钢轨廓形差异较大。现场实测左右股不对称廓形和同一股钢轨廓形差异较大,与LMA车轮踏面匹配时等效锥度偏小是引起动车组车体发生晃动的主要原因。

(2) 晃车区段线路实测钢轨廓形打磨后与实测车轮踏面匹配等效锥度平均值提升了75%,轮轨接触关系大幅改善,钢轨表面光带分布合理,内侧无轮轨接触痕迹,舒适度指标大幅降低。

(3) 通过钢轨廓形打磨,修正钢轨轨头廓形,提升线路实测钢轨廓形与车轮踏面匹配的等效锥度,较好地解决了成灌铁路动车组车体晃动的问题。

(4) 后续可从钢轨廓形优化、车轮踏面优化、等效锥度动态管理、动车组异常晃动评价指标修正等方面对轮轨关系不良引起的异常振动进行研究。

参考文献:

- [1] Kohama Y. Wake Characteristics of a High Speed Train in Relation to Tail Coach Oscillations [J]. Special Publication of National Aerospace Laboratory Sp, 1994, 25.
- [2] 池茂儒,张卫华,曾京,等. 蛇行运动对铁道车辆平稳性的影响[J]. 振动工程学报, 2008, 21(6): 639-643.
CHI Maoru, ZHANG Weihua, ZENG Jing, et al. Influence of Hunting Motion on Ride Quality of Railway Vehicle [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(6): 639-643.
- [3] 李然. 高速列车蛇行运动特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
LI Ran. Study on Hunting Characteristics of High-speed Train [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [4] 龚继军,侯博,王军平,等. 钢轨打磨对动车组运行性能的影响[J]. 铁道建筑, 2019, 59(5): 145-149.
GONG Jijun, HOU Bo, WANG Junping, et al. Influence of Rail Profile Grinding on Running Performance of EMU [J]. Railway Engineering, 2019, 59(5): 145-149.
- [5] 崔利通,李国栋,宋春元,等. 高速动车组悬挂参数优化研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(4): 42-50.
CUI Litong, LI Guodong, SONG Chunyuan, et al. Study on Optimization of Suspension Parameters of High-speed EMU Trains [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(4): 42-50.
- [6] 黄彩虹,宋春元,范军,等. 电机弹性架悬高速转向架蛇行频率跳变现象分析[J]. 铁道学报, 2021, 43(10): 20-28.
HUANG Caihong, SONG Chunyuan, FAN Jun, et al. Analysis on

造与隧道伴行或小角度相交时,应增加物探横剖面。

(2) 浅埋段宜按钻孔深度控制浅孔间距,孔间距不宜大于相邻钻孔深度。

(3) 深孔布置应结合物探成果与地质调绘成果综合确定,同时不能忽视在隧道最深处布置深孔;深孔的类型也应根据地层产状综合确定,尽量减少钻探进尺与预算;针对艰险山区断层产状变化大可能导致钻孔未能揭示断层的问题,深孔布置应综合考虑断层的产状变化,并适当增大钻孔与断层的夹角。

(4) 加强勘察成果的综合分析,需要根据物探成果综合调整、加密深孔的布置,并结合物探与钻探成果指导未布置钻孔的段落围岩划分。

参考文献:

- [1] 刘佩,赵东. “十四五”时期铁路高质量发展内涵、特征及实施路径[J]. 铁道经济研究, 2021(6): 1-3.
- LIU Pei, ZHAO Dong. The Connotation, Characteristics and Implementation Path of the High-quality Development of Railway during the 14th Five-Year Plan Period [J]. Railway Economics Research, 2021(6): 1-3.
- [2] 杜宇本,蒋良文,陈明浩,等. 中国铁路隧道勘察技术的发展与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1943-1952.
- DU Yuben, JIANG Liangwen, CHEN Minghao, et al. Development and Prospect of Geological Surveying Technology for Railway Tunnels in China [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1943-1952.
- [3] 谢毅,徐正宣,陈明浩,等. 山区铁路隧道超长定向钻探关键技术研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(8): 1-5, 11.
- XIE Yi, XU Zhengxuan, CHEN Minghao, et al. Research on the Key Technology of Ultra Long Directional Drilling in Railway Tunnel in Mountainous Area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(8): 1-5, 11.
- [4] 尹小康,王安平,赵思为,等. 音频大地电磁法在铁路隧道勘察中的应用[J]. 科技通报, 2023, 39(3): 32-37, 51.
- YIN Xiaokang, WANG Anping, ZHAO Siwei, et al. Application of Audio Frequency Magnetotelluric Method in Tunnel Investigation [J]. Bulletin of Science and Technology, 2023, 39(3): 32-37, 51.
- [5] 蔡盛,陈洪杰. 综合物探技术在深埋隧道勘探中的应用[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(S1): 127-130.
- CAI Sheng, CHEN Hongjie. The Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Technique in Deep Tunnel Survey [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(S1): 127-130.
- [6] 王进华. 滇藏铁路主要工程地质问题及地质选线原则研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(7): 7-13.
- WANG Jinhua. Research on Main Engineering Geological Problems and Principles of Geological Route Selection for Yunnan-Tibet Railway [J]. Railway Standard Design, 2021, 65(7): 7-13.
- [7] TB 10012-2019 铁路工程地质勘察规范[S].
- TB 10012-2019 Code for Geological Survey of Railway Engineering [S].
- [8] 铁道部第一勘测设计院. 铁路工程地质手册[M]. 2版. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- The First Survey and Design Institute of the Ministry of Railways. Handbook of Railway Engineering Geology [M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 1999.
- [9] 成棣,孙琛,胡晓依,等. 面向低锥度晃车的CRH3平台动车组车轮型面优化[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(6): 135-144.
- CHENG Di, SUN Chen, HU Xiaoyi, et al. Wheel Profile Optimization of CRH3 EMU Oriented to Carbody Shaking Caused by Low Equivalent Conicity [J]. China Railway Science, 2020, 41(6): 135-144.
- [10] 李晓峰,李国栋,宋春元,等. 基于实测钢轨廓形的高速动车组车轮踏面外形优化研究[J]. 铁道车辆, 2019, 57(8): 11-12, 24, 4.
- LI Xiaofeng, LI Guodong, SONG Chunyuan, et al. Research on Optimization of Contour of Wheel Tread for High Speed Multiple Units Based Upon Actually Measured Rail Profile [J]. Rolling Stock, 2019, 57(8): 11-12, 24, 4.