

# CRH5 型动车组万向轴不平衡故障的 间接检测方法及判断标准\*

崔利通<sup>1</sup> 曾一鸣<sup>2</sup> 谌亮<sup>1</sup> 李晓峰<sup>1</sup> 宋春元<sup>1</sup> 刘闯<sup>1</sup> 李国栋<sup>1</sup>

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春;

2. 中国国家铁路集团有限公司科技和信息化部, 100844, 北京//第一作者, 高级工程师)

**摘要** CRH5 型动车组万向轴不平衡故障不仅会引起动车组异常振动和噪声,还会降低轴承的使用寿命。对于部分未安装车载万向轴传动系统监控装置的 CRH5 型动车组,基于万向轴振动传递路径,分析了大量实测样本数据,提出利用车体地板垂向振动状态间接判断万向轴不平衡故障的方法,并提出了相应的判断标准。该检测方法以车体地板垂向 40~65 Hz 时域振动加速度滤波信号均方根值和 40~65 Hz 滤波信号在原始信号中的占比作为判断指标。相关测试结果显示,该检测方法能有效判断万向轴不平衡故障。

**关键词** 动车组; 万向轴; 不平衡; 振动测试

**中图分类号** U266.33

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.04.013

## Indirect Test and Evaluation Standard for CRH5 EMU Cardan Shaft Imbalance Fault

CUI Litong, ZENG Yiming, CHEN Liang, LI Xiaofeng, SONG Chunyuan, LIU Chuang, LI Guodong

**Abstract** The cardan shaft imbalance faults of CRH5 EMU (electric multiple unit) not only cause abnormal vibration and noise, but also reduce the service life of bearings. For some CRH5 EMU trains without on-board cardan shaft drive system monitoring device, based on the cardan shaft vibration transmission path, large number of field measured sample data are analyzed and the method for indirect judgement of cardan shaft imbalance fault using carbody floor vertical vibration state is proposed, as well as corresponding judgement standards. The carbody floor vertical 40-65 Hz time-domain vibration acceleration wave filtering signal RMS (root mean square) value and the ratio of 40-65 Hz wave filtering signal in the original signal are used in this method as judgment indicators. Relevant test results show that the test method can effectively judge the cardan shaft imbalance fault.

**Key words** EMU; cardan shaft; imbalance; vibration test

**First-author's address** National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

CRH5 型动车组均配置了万向轴来连接牵引电机和齿轮箱,以传递牵引扭矩和电制动扭矩。万向轴的稳定性直接影响动车组运行状态<sup>[1]</sup>。一旦发生万向轴不平衡故障,不仅会导致齿轮箱端和牵引电机端的振动过大,还会降低轴承的使用寿命,减小牵引电机转矩的传递效率,产生一定的安全隐患。现有万向轴故障的处理方法研究均基于 TDDS (万向轴传动系统监控装置) 的监测数据<sup>[2-5]</sup>,对于未配置 TDDS 的 CRH5 型动车组,需采用其他的万向轴状态监测手段判断万向轴的不平衡故障。本文基于实测振动数据,提出万向轴不平衡故障间接检测方法,并利用统计学方法提出评判标准。

## 1 万向轴不平衡故障

理想的万向轴应具有相对轴中心线对称的几何形状,同时具有均匀的质量分布,能以任意速度平稳旋转。但在实际工程中,万向轴自身材料的质量不均匀、生产制造过程中的加工误差及运动过程中轴承间隙过大等因素都会造成万向轴的初始不平衡。在使用过程中,平衡块丢失、滚针轴承磨损、十字轴颈磨损及磨损垫磨损等均会导致万向轴不平衡量增大,引起传动系统异常振动。此外,万向轴振摆、轴弯曲变形、法兰盘不对中及连接紧固件松动等故障也会对万向轴不平衡量产生不利影响。

不平衡量  $U$  一般等效表示为不平衡质量  $m$  与不平衡位置距质心距离  $r$  的乘积,单位为  $g \cdot cm$ ,即:

\* 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题 (K2020J017)

$$U = mr \tag{1}$$

由于  $U$  的存在,万向轴在实际工作中会通过  
对不平衡质量向心加速度的反作用力而产生旋转矢  
量力<sup>[6]</sup>,进而引起振动。有:

$$F = U\omega^2 \tag{2}$$

式中:

$F$ ——动不平衡力;  
 $\omega$ ——角速度。

根据 ISO 21940:2017<sup>[7]</sup>,新造万向轴的初始不  
平衡量应满足 G16 等级要求,使用状态的万向轴应  
满足 G40 等级要求。允许不平衡量  $U_{\text{per}}$  为:

$$U_{\text{per}} = \frac{mG}{2\pi n} \tag{3}$$

式中:

$U_{\text{per}}$ ——允许不平衡量;  
 $G$ ——平衡精度等级对应的精度要求;  
 $n$ ——万向轴转速。

根据 CRH5 型动车组万向轴的基本参数及许用  
转速,得到新造和运用状态下的万向轴  $U_{\text{per}}$ ,如表 1  
所示。

表 1 不同等级要求的  $U_{\text{per}}$

| Tab. 1 $U_{\text{per}}$ required by different levels |      |   |      |
|--|------|---|------|
| 万向轴类型  | 等级要求 | $U_{\text{per}}/(\text{g} \cdot \text{cm})$ |      |
|  |      | 电机侧   | 齿轮箱侧 |
| 新造万向轴  | G16  | 154   | 204  |
| 运用状态的万向轴   | G40  | 512   | 384  |

2 万向轴不平衡故障的间接检测方法

对于未安装 TDDS 的动车组,目前技术人员主  
要通过十字节注油情况及贴片温度变化情况来判  
断万向轴不平衡故障,但无法有效识别早期故障。  
此外,对于因万向轴不平衡产生的振动,主要依靠  
人体感官来判断是否存在异常,故常出现误判和漏  
判。对此,本文基于万向轴不平衡故障振动传递实  
测数据,提出万向轴不平衡故障的间接检测方法。

2.1 万向轴不平衡故障的异常振动传递

根据 CRH5 型动车组传动系统结构特点,万向  
轴一旦发生不平衡故障,就会在齿轮箱端和电机端  
直接出现异常振动。异常振动传递至车体主要有  
以下 2 个传递路径:万向轴→齿轮箱→构架→车  
体地板;万向轴→牵引电机→车体地板。

万向轴自身的不平衡量是不可避免的。在正  
常情况下,万向轴工作时的转动频率会体现在车体

地板垂向振动加速度中,但其能量在悬挂系统的减  
振作用下衰减至较弱。在万向轴不平衡量超标情  
况下,悬挂系统无法有效衰减异常振动,转动频率  
成分将在车体地板垂向振动加速度中体现的非常  
明显。万向轴不平衡状态转动频率对应的振动加  
速度如图 1 所示。因此,可根据车体地板垂向振  
动状态来间接判断万向轴不平衡故障。

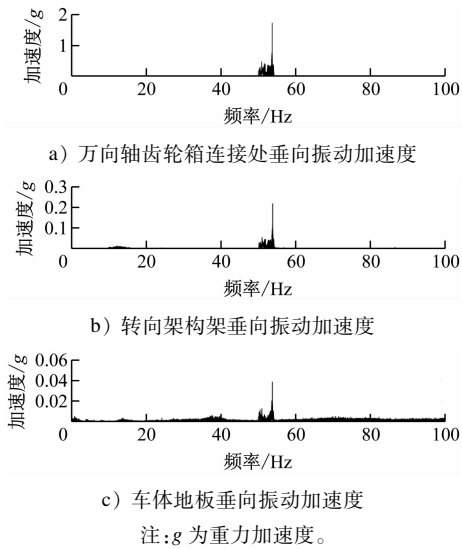


图 1 万向轴不平衡状态转动频率对应的振动加速度  
Fig. 1 Vibration acceleration corresponding to cardan shaft ro-  
tation frequency under imbalanced conditions

2.2 可行性分析

为验证万向轴不平衡故障间接判断方法的可行  
性,对配置了不同状态万向轴的动车组进行车体  
地板垂向振动响应测试。相关测试工况见表 2。

表 2 动车组车体地板垂向振动响应测试工况  
Tab. 2 Test working conditions of EMU carbody  
floor vertical vibration response

| 万向轴状态 | 状态说明                       |
|-------|----------------------------|
| 状态 1  | 动车组正常走行 0 万 km(新轴)时,属于正常状态 |
| 状态 2  | 动车组正常走行 30 万 km 时,属于正常状态   |
| 状态 3  | 动车组正常走行 50 万 km 时,属于正常状态   |
| 状态 4  | $U$ 超过使用标准,属于故障状态          |

注:动车组的目标运行速度均为 200 ~ 250 km/h;动车组走行 60 万  
km 为 1 个维护周期。

CRH5 型动车组的目标运行速度一般为 200 ~  
250 km/h,所用车轮直径为 890 ~ 820 mm。万向轴  
转动频率为:

$$f = \frac{v}{\pi D} \tag{4}$$

式中:

$f$ ——万向轴转动频率;

$v$ ——动车组运行速度;

$D$ ——车轮直径。

由式(4)计算可得,万向轴正常工作时的转动频率为 44 ~ 60 Hz。为避免因滤波器在截止频率处的衰减而产生误差,本文针对 40 ~ 65 Hz 频率范围进行数据分析。

对车体地板垂向振动原始信号进行 40 ~ 65 Hz 时域滤波,并以 2 s 为 1 个统计周期计算滤波信号均方根值  $a_{\text{RMS}}$ 。 $a_{\text{RMS}}$  计算结果如图 2 所示。由图 2 可见,在状态 4 下, $a_{\text{RMS}}$  最大值达 0.020 g,远大于万向轴其他状态时的  $a_{\text{RMS}}$ 。

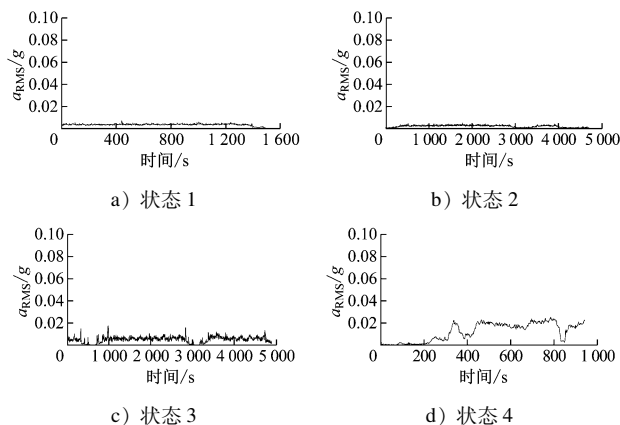


图 2  $a_{\text{RMS}}$  计算结果

Fig. 2 Calculation results of  $a_{\text{RMS}}$

对 40 ~ 65 Hz 滤波信号在原始信号中的占比  $p_{40-65}$  进行计算,结果如图 3 所示。由图 3 可见,在状态 4 下的  $p_{40-65}$  达到 80% 以上,远大于万向轴其他状态时的  $p_{40-65}$ 。

分析图 2 及图 3 可知:万向轴为正常状态时,车体地板垂向振动响应无明显差异;万向轴在故障状态(状态 4)下, $a_{\text{RMS}}$  及  $p_{40-65}$  均表现出明显差异。因此,通过测试车体地板垂向振动来判断万向轴不平衡故障的方案具有可行性。

### 3 万向轴不平衡故障间接检测评判标准

#### 3.1 标准阈值

本研究通过对 CRH5 型动车组万向轴的普查性测试,共积累了 52 个样本数据,其中有 25 个故障数据和 27 个无故障数据。利用分位数、最大平均值等统计方法对测试结果进行统计分析。

对  $a_{\text{RMS}}$  进行统计分析,结果如图 4 所示。由统

计结果可知,在故障状态(状态 4)下, $a_{\text{RMS}}$  的第 90 百分位数和最大 10% 平均值均在 0.015 g 以上。

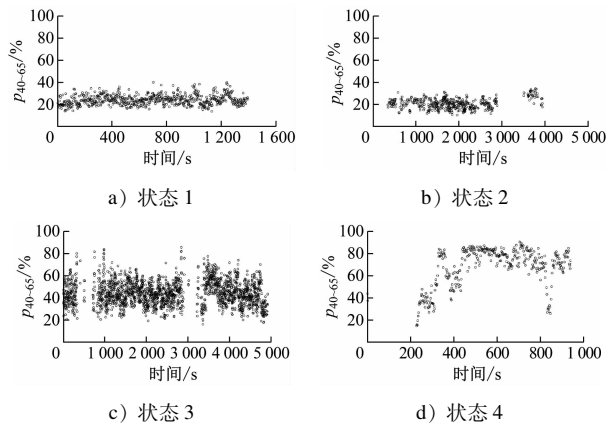


图 3  $p_{40-65}$  计算结果

Fig. 3 Calculation results of  $p_{40-65}$

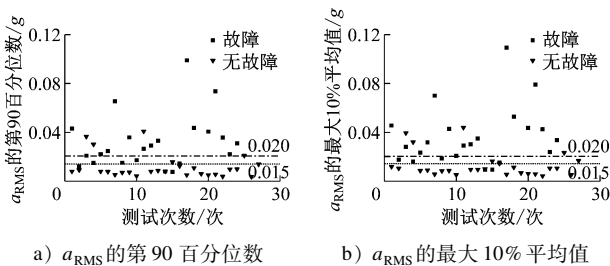


图 4  $a_{\text{RMS}}$  统计结果

Fig. 4 Statistical results of  $a_{\text{RMS}}$

对  $p_{40-65}$  进行统计,结果如图 5 所示。由图 5 可见,在故障状态(状态 4)下, $p_{40-65}$  的第 90 百分位数基本在 75% 以上, $p_{40-65}$  的最大 10% 平均值基本在 80% 以上。

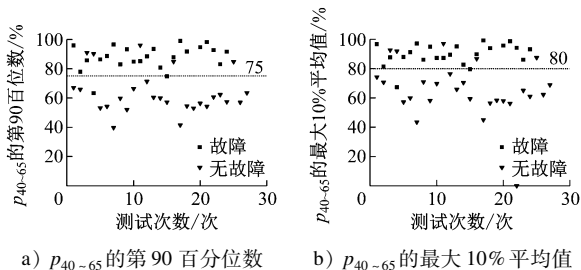
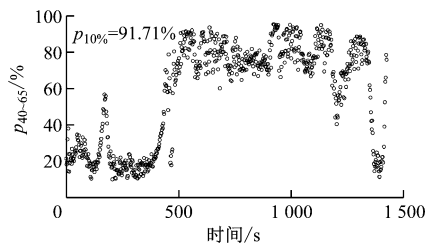


图 5  $p_{40-65}$  统计结果

Fig. 5 Statistical results of  $p_{40-65}$

由以上分析可知:第 90 百分位数和最大 10% 平均值均能够在一定程度上反映万向轴不平衡振动故障。由于第 90 百分位数仅为单一数据点,而最大 10% 平均值为多个较大值的平均值,考虑到以单一数据进行故障评价更易发生误报和漏报现象,后者相对更稳定,因此,本研究采用最大 10% 平均值



图8 异常动车组的  $p_{40-65}$ Fig.8  $p_{40-65}$  of abnormal EMU

## 4 结语

万向轴不平衡故障的影响因素较多。不平衡量过大不仅会导致齿轮箱端和牵引电机端出现异常振动,还会降低轴承的使用寿命。基于对万向轴振动传递路径分析及相关的动车组振动测试,本文提出可利用车体地板垂向振动状态来间接判断万向轴不平衡故障。

基于实测样本数据,提出万向轴不平衡故障间接检测的评判标准,以  $a_{10\%}$  和  $p_{10\%}$  作为判断指标,并确定了相应阈值  $a_{A1}$ 、 $a_{A2}$  及  $p_B$ ,进而能客观判断万向轴不平衡故障,实现量化评判。

## 参考文献

- [1] 李秋泽. CRH5 型动车驱动系统万向轴失效机理及对策研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.  
LI Qiuzhe. Study on failure mechanism and countermeasure of CRH5 drive system universal shaft[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

- [2] 张英春. CRH5 型动车组万向轴传动系统监控装置研制[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(2): 17.  
ZHANG Yingchun. On the manufacture of monitoring equipment for CRH5 EMU cardan shaft traction system[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(2): 17.
- [3] 李奕璠, 刘建新, 林建辉. 基于变尺度形态滤波的高速列车万向轴故障辨识研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 278.  
LI Yifan, LIU Jianxin, LIN Jianhui. High speed train cardan shaft fault detection based on time-varying scale morphology filter[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 278.
- [4] 龙莹, 苏燕辰, 李艳萍, 等. EWT-SVD 在高速列车万向轴动不平衡检测中的应用[J]. 中国测试, 2018, 44(5): 24.  
LONG Ying, SU Yanchen, LI Yanping, et al. Application of EWT-SVD in detection of the dynamic imbalance of cardan shaft in high-speed train[J]. China Measurement & Test, 2018, 44(5): 24.
- [5] 李倩. CRH5 型动车组万向轴动不平衡故障检测方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.  
LI Qian. Research on dynamic imbalance detection method of the cardan shaft in CRH5[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [6] 谭祥军. 从这里学 NVH: 噪声、振动、模态分析的入门与进阶[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.  
TAN Xiangjun. Learn NVH from here: introduction and advance of noise, vibration and modal analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [7] ISO. Mechanical vibration—rotor balancing—part 11: procedures and tolerances for rotors with rigid behaviour: ISO 21940-11:2017[S]. Geneva: ISO, 2017.

(收稿日期: 2022-07-30)

## 两会声音: 建议超特大城市建设市域铁路环线

全国政协委员、北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室首席教授钟章队在今年两会上提交了《关于我国加快实施轨道交通现代化的提案》。针对超特大城市如北京、上海等的多高铁车站、多机场间高效换乘需求,探索发展郊区市域铁路环线,充分利用郊区高铁站,形成与高速铁路、城际铁路、高速公路的有效衔接,缓解终到站压力,满足大型远郊住宅区、卫星城、商圈等生活、通勤、上学客流需求。

从国际经验来看,大型城市应建立放射状的轨道交通网,环线的作用是将放射状网络衔接起来。近年来,国家层面也在积极推进市域铁路建设。2020年12月,国家发展改革委等单位联合发布《关于推动都市圈市域(郊)铁路加快发展意见的通知》(以下简称《通知》)。《通知》中指出,发展市域(郊)铁路,对优化城市功能布局、促进大中小城市和小城镇协调发展、扩大有效投资等具有一举多得之效。《通知》提出,在充分利用既有资源的基础上,重点支持京津冀、粤港澳大湾区、长三角、成渝、长江中游等财力有支撑、客流有基础、发展有需求的地区规划建设都市圈市域(郊)铁路。

(来源:央广网)