DOI: 10.3901/JME.2020.08.200

高速动车组牵引拉杆载荷特性研究*

杨广雪¹ 李广全² 周君锋² 冯永华²

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044;

2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 青岛 266111)

摘要: 采用准静态载荷标定的方式制作牵引拉杆载荷传感器, 将其安装于某型高速动车组进行线路载荷测试, 得到列车启动牵引、高低速直线运行、通过坡道及制动停车等典型工况下的载荷时间历程及载荷变化特点。在此基础上, 编制不同速度等级下的牵引拉杆载荷谱, 并依据线性累积损伤准则分析结构疲劳损伤分布及运行速度对疲劳损伤的影响规律。研究表明, 与拖车牵引拉杆载荷相比, 动车牵引拉杆载荷幅值变化受电机扭矩载荷的影响较大, 尤其在列车启动、制动阶段, 其趋势载荷变化明显; 随着列车运行速度的增加, 牵引拉杆载荷幅值不断增大, 得到动车牵引拉杆载荷的振动主频与列车运行速度呈正比。定义相对疲劳损伤来表征每级载荷的疲劳损伤贡献程度, 得到结构疲劳损伤与牵引拉杆载荷幅值的对应关系, 获取列车运行速度对结构疲劳累积损伤的影响规律。动车牵引拉杆载荷在列车时速 280 km/h 时产生的结构疲劳累积损伤最小, 而拖车牵引拉杆的疲劳累积损伤值随着运行速度的增大呈现增大的趋势。该研究结果对高速列车转向架结构的优化设计及相关理论研究具有一定的参考价值。

关键词: 高速动车组; 牵引拉杆; 载荷特性; 载荷谱; 疲劳损伤

中图分类号: U270

Study on Traction Rod Load Characteristics of High Speed Train

YANG Guangxue¹ LI Guangquan² ZHOU Junfeng² FENG Yonghua²

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111)

Abstract: A load sensor for traction rod is fabricated by quasi-static load calibration method, which is installed on a certain type of high-speed electronic muti unit(EMU) for line load test. The load time history and load variation characteristics under typical working conditions such as traction during starting, straight line with high and low speed, entry and exit ramp, and braking for stopping are obtained. On this basis, the load spectrum of traction rods at different speed levels are compiled. Based on the linear cumulative damage criterion, the distribution of fatigue damage and the influence of train speed on fatigue damage are analyzed. The results show that, compared with the traction rod load of the trailer bogie, the load amplitude of the traction rod of the motor bogie is greatly affected by the motor torque load, especially in the starting and braking stages of the train, and the trend load changes obviously. With the increase of train speed, the load amplitude of traction rod increases continuously. It is obtained that the main vibration frequency of traction rod load is proportional to the train speed. Relative fatigue damage is defined to represent the contribution of every load grade to fatigue damage. The corresponding relationship between structural fatigue damage and load amplitude of traction rod, and the influence of train speed on cumulative fatigue damage of structure are obtained. The cumulative fatigue damage of the motor bogie traction rod load on structure reaches its smallest value when the train speed is 280 km/h. However, the cumulative fatigue damage value of the trailer bogie traction rod load on structure increases with the train speed. The research results have certain significance for the optimization design of high-speed train bogie and related theoretical research.

Key words: high-speed EMU; traction rod; load characteristics; load spectrum; fatigue damage

0 前言

近年来, 随着高速铁路事业的快速发展, 列车

运行速度的大幅度提高, 动车组的运行安全性、可靠性、舒适性等问题得到了广泛关注^[1-2]。车辆构架是高速列车运行过程中重要的结构部件, 对其载荷进行准确测试和结构疲劳损伤评估至关重要。疲劳损伤评估是以数据处理以及数据统计方法为基础, 对构架载荷特性进行有效的统计分析使结构疲劳寿

* 国家重点研发计划课题(2018YFB1201704-04)和国家自然科学基金(11790281)资助项目。20190101 收到初稿, 20191001 收到修改稿

命的评估结果更为准确^[3-5], 这对构架的优化设计和轻量化设计具有重要的工程意义。

获取结构所载荷的方法包含数值仿真法、载荷识别法和直接测试法。数值仿真法是根据线路条件、运行工况等建立车辆模型来获取载荷时间历程, 由于结构参数的差异性, 该方法不能真实有效地反映结构的实际受载情况; 载荷识别法具有各种各样的理论, 但实际效果并不十分明显^[6-8]; 直接测试法是目前获取结构载荷特性最为理想、直接和准确的方法^[9]。基于此, 采用直接测试法获取高速列车牵引拉杆的载荷时间历程, 结合车载 GPS 信号分析了启动牵引、高低速直线、进出坡道、制动停车等典型工况下牵引拉杆载荷的时域变化规律。采用雨流计数法对载荷数据进行处理分析, 并编制了一维载荷谱^[10]。根据损伤一致性准则分析了各级载荷对结构疲劳损伤的比重分布特点, 最后得到了列车运行速度对结构疲劳累积损伤的影响规律。

1 载荷测试方案

为了直接获得牵引拉杆的载荷时间历程, 通过专业的力传感器制作工序如应变片组桥、绝缘、温控、封装、信号放大以及加载测试试验等, 将牵引拉杆做成力传感器元件, 如图 1 所示。由于该“力传感器”能够连续记录任意时刻载荷变化, 因此该方法实现了对牵引拉杆载荷的连续测试。另外, 为确保测试结果的准确性, 每个牵引拉杆上均有两个载荷测试通道。

图 1 牵引拉杆测力传感器示意图

利用载荷标定的方法获取应变与牵引拉杆载荷的对应关系, 试验标定过程中采用预载荷 1 kN 和 3 kN 进行调平, 此时对应的应变值为 0, 以有效地消除牵引拉杆与加载设备之间接触间隙的影响, 试验结果如图 2 所示。可见, 载荷与应变之间具有较高的线性关系, 通过数据线性拟合得到载荷与应变的传递系数为 $6.05 \mu\epsilon/\text{kN}$ 。

为全面掌握列车牵引拉杆的载荷特性, 将标定完毕的测力传感器安装于高速列车动力和非动力转

图 2 载荷标定

向架。在整个测试过程中, 各种干扰信号不可避免进入数据采集系统对测试信号产生干扰, 因此采用专用数据处理软件, 对实测信号进行去除零漂、小波处理, 提高信噪比并将应变值转换为载荷, 以获得有效的测试结果。

2 典型工况分析

在动车组实际往返运营中, 测试了牵引拉杆载荷。测试里程长、工况齐全、数据量大, 分析几种典型工况可较为全面地反映高速列车牵引拉杆载荷的分布特性。这些典型工况主要包括启动牵引、高低速直线、通过坡道及制动停车等(牵引拉杆载荷为正时表示拉力, 为负时表示压力)。

2.1 启动加速

由高速列车牵引特性可知, 在启动牵引阶段, 电机输出转矩载荷最大, 随着列车运行速度的增加, 电机由恒转矩输出进而转为恒功率输出。图 3 给出列车启动阶段, 电机输出转矩与运行速度的对应关系。由图可知, 在列车启动加速初始阶段时, 电机输出转矩突然增大至 $3\,000 \text{ N}\cdot\text{m}$, 随着运行速度的增加, 电机转矩出现波动变化, 这应与线路条件有关。在 $100\sim 120 \text{ s}$ 内列车处于恒转矩加速阶段, 运行速度由 50 km/h 增加至 85 km/h , 由速度与时间的关系可推算得到列车启动加速阶段的加速度值约为 0.56 m/s^2 。

图 3 电机输出转矩与运行速度的变化关系

图4为列车启动加速时动车、拖车转向架牵引拉杆载荷的时间历程曲线。由图4可知,动车、拖车牵引拉杆载荷与电机转矩的变化规律相吻合,但两载荷的变化趋势相反,其原因列车正向运行时,动车牵引拉杆驱动车体运行,图中载荷趋势值为正,表明牵引拉杆处于拉伸状态,此时拖车转向架作为列车负载,其牵引拉杆载荷趋势值为负,处于压缩状态。对比恒转矩牵引阶段两载荷变化曲线可知,动车、拖车牵引拉杆趋势载荷值分别11.0 kN和1.2 kN附近波动,动态载荷幅值随着列车运行速度的增大而逐渐增大,表明牵引拉杆动态载荷对列车运行速度较为敏感。在列车惰性运行阶段,动车、拖车牵引拉杆趋势载荷值均在0值附近波动,其动态载荷幅值明显小于列车恒转矩加速阶段,这与橡胶节点的非线性刚度有关^[1]。

图4 牵引拉杆载荷时间历程曲线

2.2 高低速直线

图5给出列车以350 km/h高速运行和240 km/h低速运行时牵引拉杆载荷的时间历程曲线。由图5可知,列车高速运行时,动车、拖车牵引拉杆趋势载荷(载荷均值)分别保持在2 kN和-1 kN附近,最大动态载荷幅值分别为7.24 kN和3.61 kN;列车低速运行时,动车、拖车牵引拉杆趋势载荷(载荷均值)分别保持在1 kN和-0.5 kN附近,最大动态载荷幅值分别为3.56 kN和1.52 kN,由此推断列车高速运行时电机输出转矩约为低速运行时的2倍。对比高低速时牵引拉杆动态载荷幅值可知,高速阶段牵引拉杆动态载荷幅值水平明显高于低速阶段,且动车牵引拉杆动态载荷高于拖车。由图5a可看出,牵引拉杆动态载荷每隔13 s出现一次高幅值波动,图5b中拖车牵引拉杆载荷也呈现出类似规律性变化。根据运行速度 v 、时间 t 及运行距离 l 三者之间关系的式(1),通过计算分析知该测试区段内有周期性、间距约为1 300 m的载荷冲击。

$$l = v \times t \quad (1)$$

图5 高低速直线

图5从载荷信号的时域特性进行了分析,为得到其动态载荷的频域特性,对高速、低速阶段牵引拉杆载荷时域信号进行傅里叶变换,结果如图6所示。由图6a可知,列车高速、低速运行时动车牵引

图6 牵引拉杆载荷频率分布

拉杆载荷的振动主频分别在 166 Hz 和 116 Hz 附近波动, 根据列车运行速度与频率的关系可知动车牵引拉杆载荷的振动主频与列车运行速度呈正比, 该频率值在拖车牵引拉杆频率分布中不明显, 由此可推断该振动主频可能与牵引电机转速有关。由图 6b 可知, 列车高速、低速运行时拖车牵引拉杆载荷的频率分布特点具有一定的相似性, 尤其在 0~40 Hz 范围内。

2.3 通过坡道

高速列车通过下坡道时, 由于整个列车受到自身重力分量的加速作用, 会使列车运行速度增大, 为保证运行安全和维持速度恒定, 需要调整电机输出转矩。若坡道的坡度较大, 列车运行速度超过设定运行速度, 则电机将进入再生制动状态以维持列车运行速度的恒定。反之, 列车通过上坡道时, 电机输出转矩增大, 增大范围与坡道的坡度有关。图 7 给出了列车高速通过坡道时的牵引拉杆载荷时间历程曲线, 由图 7a 可见, 高速列车上坡时动车牵引拉杆趋势载荷达到 4 kN 附近, 进入直线阶段, 其值恢复到 2 kN; 图 7b 给出了连续通过下坡道和上坡道时的载荷变化特点, 列车由高速直线进入下坡道后, 动车牵引拉杆趋势载荷由 2 kN 转变为 -1 kN, 随着时间的推移, 列车进入上坡道, 最后保持在 4 kN 附近, 与拖车相比, 动车牵引拉杆趋势载荷受电机输出的转矩影响更为明显一些。由此可知, 列车高速经过该线路区段时, 其运行状态的变化为电机牵引-再生制动-电机牵引。

图 7 通过坡道工况

2.4 制动停车

当高速列车进站停车时, 需要采取制动减速措施, 目前动车组的制动系统主要采用电控空气制动和牵引电机的再生制动, 在一般情况下列车采用联合制动, 以再生制动为主。图 8a 给出了列车进站停车时电机再生制动和空气制动载荷时间历程曲线, 由图可见, 在进站停车时, 列车主要以牵引电机再生制动为主, 其制动载荷呈现阶梯型变化, 表明制动停车时列车采用分级制动模式。当列车速度降到一定值时, 列车进入空气制动阶段。图 8b 为列车制动停车时牵引拉杆载荷的变化曲线, 由图可知, 牵引拉杆载荷的变化趋势与制动载荷的变化特点相吻合; 当列车进行空气制动时, 动车、拖车牵引拉杆载荷分别达到 3.88 kN 和 6.03 kN, 两载荷存在一定的差异, 其原因与制动盘数目有关, 动车采用轮盘制动, 每轴安装 2 对制动盘, 而拖车采用轴盘制动, 每轴安装 3 对制动盘。

图 8 制动停车

3 疲劳损伤评估

3.1 载荷谱编制

为进一步研究高速列车牵引拉杆载荷的变化特点, 对全程试验数据进行统计分析并编制牵引拉杆载荷谱。载荷谱不仅反映载荷幅值大小, 还反映载

荷的作用频次,因而能够更为全面和准确地反映载
荷的本质。在编制一维载荷谱时,先对数据进行扫
描,找出载荷幅值的最大值和最小值,再按照式(2)
进行分组处理^[10-11]

$$D = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{n} \quad (2)$$

式中, D 为组间距; $F_{\max}$ 和 $F_{\min}$ 分别为载荷幅值最
大值和最小值; n 为载荷幅值组级数,通常取 8 级。

载荷幅值组的上限值 D_{iup} 和下限值 D_{idown} 可以
分别按式(3)和(4)计算

$$D_{\text{iup}} = F_{\min} + iD \quad (3)$$

$$D_{\text{idown}} = F_{\min} + (i-1)D \quad (4)$$

式中, i 为载荷谱级数,其最大值为 n 。

图 9 给出了列车在高速运行牵引拉杆载荷
谱,由图可知,动车牵引拉杆同级载荷幅值明显高
于拖车,高速阶段的载荷谱最大幅值分别为 18.03
kN、8.41 kN,低速阶段的载荷谱最大幅值分别为
17.39 kN、7.05 kN;随着动载荷幅值的不断减小,
其作用频次不断增大,表明在列车服役过程中牵引
拉杆动载荷主要以低幅值载荷为主;对比高、低速
工况下牵引拉杆的载荷分布可知,在高幅值区域,
高速运行时的载荷循环次数高于低速阶段,拖车牵
引拉杆载荷谱受速度影响更为明显一些。

图 9 牵引拉杆载荷谱

3.2 疲劳损伤分布

根据 Miner 线性累积损伤准则可知,载荷谱中
第 i 级载荷 F_i 循环作用 N_i 次后所造成的疲劳损伤
 D_i ^[12],其表达式为

$$D_i = \frac{N_i (F_i / k)^m}{C} \quad (5)$$

式中, k 为载荷与应力之间的对应系数; C 、 m 为与
结构疲劳相关的材料系数,对于构架结构, m 的取
值为 3.5(焊缝)和 5.0(母材)。

由式(5)可知,造成结构疲劳损伤的主要因素为
载荷幅值大小及其作用频次^[13-15],为评定每级载
荷幅值水平对结构疲劳损伤的影响,定义相对疲劳损
伤来表征,其公式为

$$d_i = \frac{D_i}{D} = \frac{F_i^m N_i}{\sum_{i=1}^n F_i^m N_i} \quad (6)$$

式中, D 为各级载荷造成的总累积损伤值。

分别对动车、拖车牵引拉杆各级载荷进行分析,
图 10 给出了各级载荷对结构疲劳损伤的比重分布
情况。从中可以看出,低幅值载荷对结构所造成的
疲劳损伤明显高于高幅值载荷,动车相对疲劳损伤
受列车运行速度更为明显一些。

图 10 相对疲劳损伤分布

根据图 10 可得到高、低幅值载荷对结构的疲劳
损伤比重情况,如表 1 所示。对于不同的结构形式,

在同一速度等级下, 动车高幅值载荷对结构母材所造成的疲劳损伤比重高于结构焊缝部位, 这与拖车疲劳损伤比重分布规律一致。

表 1 相对疲劳损伤比重

类型	载荷级数	低速(%)		高速(%)	
		焊缝	母材	焊缝	母材
动车	1~4	98.8	92.7	97.9	90.6
	5~8	1.2	7.3	2.1	9.4
拖车	1~4	98.5	94.4	98.6	94.8
	5~8	1.5	5.6	1.4	5.2

高速列车以不同速度运行时, 构架各载荷对结构疲劳损伤的贡献均有不同, 为研究列车运行速度对牵引拉杆载荷的影响, 统计分析了高速列车在不同速度等级下牵引拉杆载荷导致疲劳损伤的分布情况, 归一化处理结果如图 11 所示。由图 11 可知, 动车牵引拉杆载荷引起结构疲劳累积损伤值明显高于拖车, 其中焊缝和母材结构的疲劳损伤最大差值分别发生在速度 240 km/h 和 360 km/h; 随着列车运行速度的增大, 动车结构的疲劳损伤值先减小后增大, 在速度 280 km/h 时疲劳损伤达到最小值; 拖车结构疲劳损伤随着列车运行速度的增大而呈现出增大的趋势。分析其可能原因为列车低速运行时, 为维持列车匀速运行, 电机输出转矩不断变化, 牵引

拉杆趋势载荷次数增多, 导致动车结构在低速时疲劳损伤值较大; 随着运行速度的增大, 趋势载荷出现频次降低, 动车结构的疲劳损伤值减小; 运行速度继续增加时, 动态载荷幅值增大, 动车结构疲劳损伤值呈现增大的趋势。

4 结论

以某型高速动车组牵引拉杆载荷为研究对象, 通过载荷标定的方法制作测力传感器, 结合线路试验, 分析了牵引拉杆载荷在不同工况条件下的变化规律, 利用雨流计数法进行循环计数并编制牵引拉杆载荷谱, 在此基础上研究了结构疲劳损伤的分布特性, 该研究可为转向架构架的优化设计提供一定的理论参考。

(1) 对牵引拉杆进行准静态线性标定, 其标定系数为 $6.05 \mu\epsilon/kN$ 。

(2) 分析了启动加速、高低速直线、通过坡道、制动停车等典型工况下牵引拉杆载荷的变化特点, 获得了列车牵引电机对牵引拉杆载荷的影响规律, 其中动车牵引拉杆载荷对电机转矩变化较为敏感。

(3) 采用雨流计数法对全程数据进行分析, 并编制了动、拖车牵引拉杆载荷谱。定义相对疲劳损伤来表征每级载荷的疲劳损伤贡献率, 得到了相对疲劳损伤的分布规律。

(4) 得到了列车运行速度对结构疲劳损伤的影响规律, 动车牵引拉杆载荷在列车速度 280 km/h 时产生的结构疲劳损伤最小, 拖车结构的疲劳损伤值随着运行速度的增大呈现增大的趋势。

参 考 文 献

- [1] 王文静, 惠晓龙, 马纪军. 高速列车设备舱支架疲劳裂纹机理研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(6): 142-147.
WANG Wenjing, HUI Xiaolong, MA Jijun. Fatigue crack mechanism research on high speed train equipment cabin frame[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(6): 142-147.
- [2] 李广全, 刘志明, 王文静, 等. 高速动车组齿轮箱疲劳裂纹机理分析研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(2): 99-105.
LI Guangquan, LIU Zhiming, WANG Wenjing, et al. Fatigue crack mechanism study on high-speed EMU gearbox[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 99-105.
- [3] 李凡松, 邬平波, 曾京. 基于核密度估计法的载荷历程外推研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(7): 25-31.
LI Fansong, WU Pingbo, ZENG Jing. Extrapolation of

图 11 疲劳损伤分布

- load histories based on kernel density method[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(7): 25-31.
- [4] 严隽毫, 傅茂海. 车辆工程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- YAN Junmao, FU Maohai. Vehicle engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.
- [5] 邹骅, 李强, 孙守光. 基于载荷标定的城际列车转向架载荷及应力分布特征研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(10): 27-33.
- ZOU Hua, LI Qiang, SUN Shouguang. Study on intercity train load spectrum distribution estimation and calibration methods based load demarcation[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(10): 27-33.
- [6] 王济江, 盛美萍, 刘彦森, 等. 基于统计能量分析理论的结构载荷识别研究[J]. 电声技术, 2008, 32(8): 77-80.
- WANG Jijiang, SHENG Meiping, LIU Yansen, et al. Application research on loading identification of structure by statistical energy analysis method[J]. Journal of Electronics & Sound Technology, 2008, 32(8): 77-80.
- [7] 文祥荣, 缪龙秀. 由实测应变响应识别结构动态载荷[J]. 铁道学报, 2000, 22(6): 36-39.
- WEN Xiangrong, MIAO Longxiu. Identification of structural dynamic load from measured strain response[J]. Journal of the China Railway Society, 2000, 22(6): 36-39.
- [8] 秦远田, 陈国平, 余岭, 等. 复杂结构移动载荷识别的有限元法[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 42(2): 174-179.
- QIN Yuantian, CHEN Guoping, YU Ling, et al. Moving load identification using finite element method for complex structure[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 42(2): 174-179.
- [9] 任尊松, 孙守光, 李强. 高速动车组轴箱弹簧载荷动态特性[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 109-114.
- REN Zunsong, SUN Shouguang, LI Qiang. Axle spring load test and dynamic characteristics analysis of high speed EMU[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 109-114.
- [10] 高镇同. 载荷谱的编制[J]. 航空学报, 1980, 2(2): 36-37.
- GAO Zhentong. Load spectrum establishment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1980, 2(2): 36-37.
- [11] 李广全, 王文静, 杨广雪. 高速列车齿轮箱载荷特性分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 270-277.
- LI Guangquan, WANG Wenjing, YANG Guangxue. Analysis on load characteristics of high-speed train gearbox[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 270-277.
- [12] 薛海, 李强, 胡伟钢. 1 万 t 重载货车车钩载荷分布特性研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(9): 48-52.
- XUE Hai, LI Qiang, HU Weigang. Research on coupler load distribution characteristics of 10 000 t heavy haul train[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(9): 48-52.
- [13] YIMIM S, JING L, CHRIS K M. Drive axle housing failure analysis of a mining dump truck based on the load spectrum[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(3): 1049-1057.
- [14] 李广全, 刘志明, 吴如兵, 等. 高速列车齿轮箱应力响应与疲劳损伤评估[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(1): 79-88.
- LI Guangquan, LIU Zhiming, GUO Rubing, et al. Stress response and fatigue damage assessment of high-speed train gearbox[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(1): 79-88.
- [15] 王萌, 李强, 孙守光. 耦合作用下各载荷对结构疲劳损伤影响程度的评估方法[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(3): 94-99.
- WANG Meng, LI Qiang, SUN Shouguang. Evaluation method for influence degree of each load on fatigue damage of mechanical structure under coupling effect[J]. China Railway Science, 2015, 36(3): 94-99.

作者简介: 杨广雪(通信作者), 男, 1982 年出生, 副教授。主要研究方向为结构疲劳强度、载荷谱。

E-mail: gxyang@bjtu.edu.cn