

某型地铁接地线端子开裂故障

李文学¹ 屈 升² 戴鑫亮²

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春; 2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都)

摘 要 [目的] 由于某型地铁列车在运行过程中频繁出现接地端子开裂故障, 因此有必要针对该型地铁列车接地端子开裂的故障原因进行分析。[方法] 在故障路段进行线路试验, 通过采集相关部件的振动加速度及应力信号, 研究不同信号的时频特征, 分析接地端子的开裂原因。通过分析不同支架与不同线缆截面匹配时接地端子的动应力变化情况, 对不同结构线缆支架的适配性进行评估, 分析 3 个不同位置(接地轴端、速度轴端、防滑轴端)的端子支架选取方案。[结果及结论] 在相同外载荷下, 短臂支架应力较小; 新接地端子在结构设计上优于原接地端子; 新接地端子的疲劳寿命高于原接地端子。

关键词 地铁; 接地端子; 线缆支架; 开裂故障

中图分类号 U279

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.054

Cracking Faults in Grounding Terminals of a Specific Metro Train Model

LI Wenxue¹, QU Sheng², DAI Xinliang²

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] Frequent cracking faults are observed in the grounding terminals of a specific metro train model during operation. Therefore, it is essential to analyze the grounding terminal cracking causes of the train in the above case. [Method] Line tests are conducted on faulty sections. Through collecting vibration acceleration and stress signals from relevant components, the time-frequency characteristics of different signals are studied, and the grounding terminal cracking causes are analyzed. Through analyzing the dynamic stress variations of the grounding terminals with different bracket and cable cross-section combinations, the compatibility of various structural cable brackets is evaluated. Terminal bracket selection schemes of three positions (grounding shaft end, speed shaft end, and anti-slip shaft end) are analyzed. [Result & Conclusion] Under identical external loads, the short-arm brackets exhibit lower stress levels. The new grounding terminals demonstrate superior structural design compared to the original grounding terminals, and the fatigue life of the former is

higher than that of the latter.

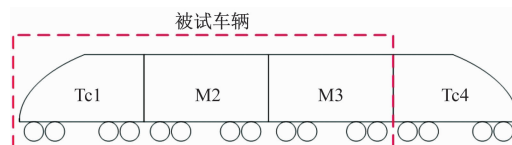
Key words metro; grounding terminal; cable bracket; cracking fault

供电系统作为地铁列车系统的重要组成部分之一,其可靠性对列车正常运行有着重要的影响。接地线性能的好坏取决于端子和导线的连接方式^[1]。由于接地线端子与轴箱相连,在行车过程中会受到轮对振动冲击的影响,其工作环境较为严酷。而线缆支架作为接地装置的组成之一,其结构也会对端子产生影响。南京地铁 S8 号线曾对其线路运营的 26 列列车进行了检测,发现多个线缆支架出现了裂纹^[2]。因此,保证接地端子及线缆支架的结构完整性对于列车安全运行具有重要的意义。

本文主要分析了某型地铁列车接地端子开裂的故障原因,对该地铁列车的轴箱、接地线端子和线缆支架进行了振动分析和动应力测试,通过研究接地线发生断裂的原因,分析端子及支架结构选型的相关问题,并结合实测数据预测接地端子及线缆支架的疲劳寿命。

1 故障调查线路试验

为了获得接地端子动应力及轴箱振动加速度,需进行故障调查线路试验。试验采用 4 节编组 B 型车,地铁列车编组示意图如图 1 所示。试验对象为 Tc1(1 车)、M2(2 车)、M3 车(3 车)。



注: Tc 为拖车; M 为动车。

图 1 地铁列车编组示意图

Fig. 1 Diagram of metro train formation

为采集轴箱支架加速度,布置加速度传感器,部分加速度传感器测点位置照片如图 2 所示。各节试验车的测点位置及方向,如表 1 所示。

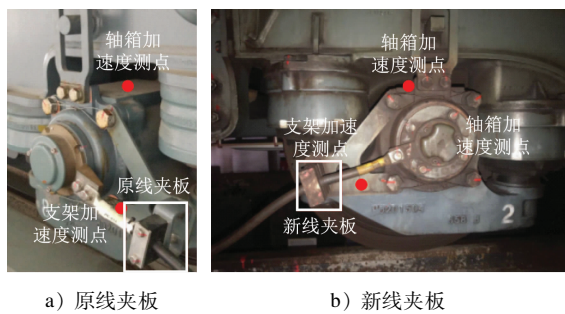


图 2 部分加速度传感器测点位置照片

Fig. 2 Position photos of some acceleration sensor measurement points

表 1 各节试验车的测点位置及方向

Tab. 1 Position and direction of measurement points on each testing vehicle

车号	序号	测点位置	测量方向
Tc1	1	1#轴箱上构架	横向、垂向
	2	1#轴箱体	横向、垂向
	3	1#轴箱线缆支架	横向、垂向
	4	8#轴箱上构架	横向、垂向
	5	8#轴箱体	横向、垂向
	6	8#轴箱线缆支架	横向、垂向
M2	7	1#轴箱上构架	横向、垂向
	8	1#轴箱体	横向、垂向
	9	1#轴箱线缆支架	横向、垂向
	10	3#轴箱体	横向、垂向
	11	3#轴箱线缆支架	横向、垂向
	12	6#轴箱上构架	横向、垂向
M3	13	6#轴箱体	横向、垂向
	14	6#轴箱线缆支架	横向、垂向
	15	8#轴箱体	横向、垂向
	16	8#轴箱线缆支架	横向、垂向
	17	7#轴箱体	横向、垂向
	18	7#轴箱线缆支架	横向、垂向

考虑到动车与拖车的转向架结构有所不同,应力测点位置选取 1 车的 1#、8#接地轴端及 2 车的 1#、3#、6#、8#轴端线缆支架正面(变载面侧)。

2 动应力分析

2 车 3#轴端的接地线端子和线缆支架的应力时频图如图 3 所示。由图 3 可知:接地端子和线缆支架应力的主要频率成分集中于 70 ~ 120 Hz。该频带是固有模态振动,不随速度的变化而变化。

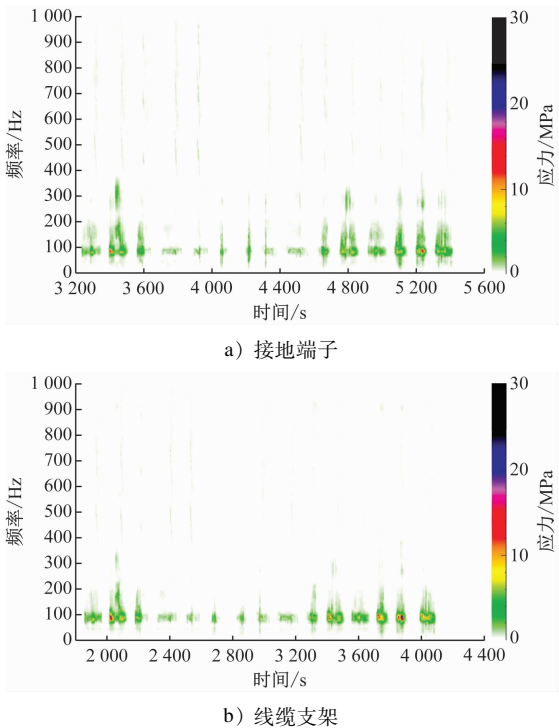
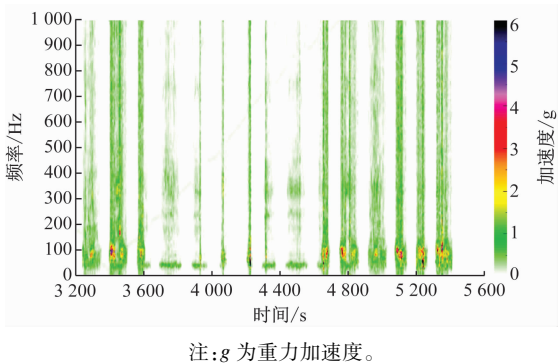


图 3 2 车 3#轴端接地端子及线缆支架应力时频图

Fig. 3 Stress time-frequency diagram of grounding terminals and cable bracket of vehicle 2 terminal 3#

2 车 3#轴端的轴箱加速度时频图如图 4 所示。由图 4 可知:轴箱振动的主要频率成分也集中于 70 ~ 120 Hz,说明接地端子的频率成分主要由轴箱振动传递所致。



注:g 为重力加速度。

图 4 2 车 3#轴端轴箱振动加速度时频图

Fig. 4 Vibration acceleration time-frequency diagram of axlebox at vehicle 2 terminal 3#

根据接地端子与轴箱的连接情况,其振动传递可以分为两条路径。路径 1:轴箱→接地端子。路径 2:轴箱→线缆支架→线夹板→线缆→接地端子。

为分析路径 1 和路径 2 对接地端子动应力的影响,本文进行了线缆及台架扫频试验,对线缆在有线缆支架和无线缆支架固定情况下的应力进行对

比试验。在普通道床线路常见的 70 ~ 120 Hz 的激励范围内,对比分析接地端子的应力响应情况。

试验结果表明:当采用线缆固定支架、激励频率为 70 ~ 120 Hz 时,接地端子应力为 34.82 MPa;当无线缆支架固定、激励频率为 70 ~ 120 Hz 时,接地端子应力为 13.95 MPa。由此可知,接地端子的应力主要受到线缆支架的振动传递影响,即路径 2 的影响。当线缆被支架固定、激励频率为 70 ~ 120 Hz 时,应力幅值明显增大,说明由线缆、夹线板和线缆支架组成的系统在激励频率为 80 ~ 95 Hz 范围内存在固有模态。

当列车在普通道床上运行时,轴箱存在 70 ~ 120 Hz 的外部激励,该频带与接地系统 90 Hz 左右的固有模态发生了共振,导致接地端子断裂。影响接地端子应力的是轴箱激励频率为 70 ~ 120 Hz 的振动,为了对比动车和拖车的轴箱振动加速度差异,对轴箱的振动加速度数据进行激励频率为 70 ~ 120 Hz 的带通滤波,滤波后计算其均方根,对比分析各轴端振动加速度的最大均方根及最大均方根平均值,如表 2 所示。动车轴箱在 70 ~ 120 Hz 范围内的振动大于拖车的轴相振动,这是由于动车接地端子断裂,而拖车接地端子暂未发生断裂导致的。在动车测试的 4 个轴端中,2 车 8#轴端的振动最大。

表 2 各轴端振动加速度的最大均方根及最大均方根平均值
Tab.2 Maximum mean square and maximum mean square average of vibration acceleration at each terminal

轴端位置	最大均方根/g	最大均方根平均值/g
1 车 1#轴箱	0.90	0.51
1 车 8#轴箱	1.10	0.53
2 车 1#轴箱	1.31	0.66
2 车 3#轴箱	1.38	0.63
2 车 6#轴箱	1.25	0.59
2 车 8#轴箱	1.54	0.87

3 部件适配性分析

线缆支架结构会对接地端子的动应力产生影响,通过研究不同支架与不同线缆截面匹配时接地端子的动应力变化情况,对不同结构线缆支架的适配性进行评估。

3.1 不同类型支架

为降低接地端子在服役期间出现开裂的概率,

本文分析了 6 种不同线缆支架搭配不同线缆及接地端子的工作应力。不同结构的线缆支架照片如图 5 所示。

通过扫频试验观察接地端子在 70 ~ 120 Hz 激励下的应力响应。线缆支架通过工装连接在转向架轴端,由多边形驱动轮提供正弦激励。不同结构线缆支架在不同线缆截面积下的接地端子应力幅值如图 6 所示。

原型 6 mm 厚支架的最大应力幅值约为变截面支架最大应力幅值的 4 ~ 5 倍,原型 6 mm 厚支架的最大应力幅值约为短悬臂支架最大应力幅值的 10 倍,短悬臂支架在减小应力方面效果更明显。

3.2 不同接地端子应力

不同线缆截面积的新接地端子和原接地端子照片如图 7 所示。新接地端子和原接地端子在 70 ~ 120 Hz 激励下的应力幅值如表 3 所示。新接地端子的应力水平远小于原接地端子的应力水平,这主要是由于①新接地端子为圆弧过渡,极大地缓解了原接地端子的应力集中问题;②新接地端子的刚度远大于原接地端子的刚度,在振动时,新接地端子的结构变形较小。

表 3 新接地端子和原接地端子在 70 ~ 120 Hz 激励下的应力幅值

Tab.3 Stress amplitudes of new and original grounding terminals under excitation of 70 to 120 Hz

线缆截面积/mm ²	接地端子结构	应力幅值/MPa
120	原接地端子	34.82
120	新接地端子	3.73
150	原接地端子	32.76
150	新接地端子	3.40

4 支架选取方案

本文主要分析 3 个不同位置(接地轴端、速度轴端、防滑轴端)的端子支架选取方案。采用新接地端子条件下,3 种支架选取方案如表 4 所示。3 种方案下,动车和拖车接地端子的应力时域图如图 8 ~ 10 所示。无论是动车还是拖车,方案 2 和方案 3 的应力水平明显低于方案 1。

5 线缆支架及端子疲劳寿命评估

对于线缆支架的疲劳寿命评估主要基于其 $S-N$ (应力-寿命) 曲线进行分析。接地端子材质为 T2 铜,目前没有相关标准给出 T2 铜的 $S-N$ 曲线。因



图 5 不同结构的线缆支架照片

Fig. 5 Photos of different structural cable brackets

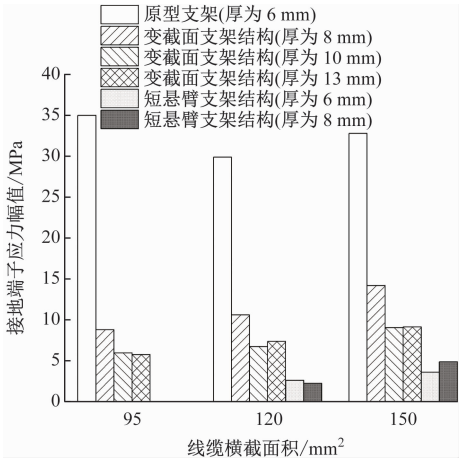


图 6 不同结构线缆支架在不同线缆截面积下的接地端子应力幅值

Fig. 6 Grounding terminal stress amplitude of different structural cable brackets with different cable cross-section areas

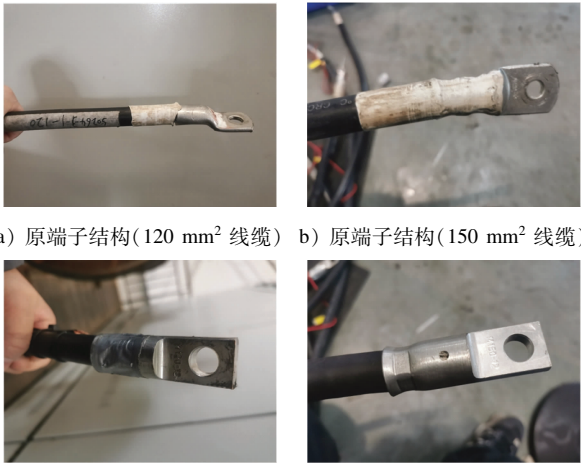


图 7 不同线缆截面积的新接地端子和原接地端子照片

Fig. 7 Photos of new and original grounding terminals with different cable cross-section areas

表 4 3 种支架选取方案

Tab.4 Three bracket selection schemes

方案	接地轴端 支架选型	防滑轴端 支架选型	速度轴端 支架选型
1	原型支架 (厚为 6 mm)	原型支架 (厚为 6 mm)	原型支架 (厚为 6 mm)
2	短悬臂支架结构 (厚为 6 mm)	变截面支架结构 (厚为 8 mm)	变截面支架结构 (厚为 8 mm)
3	短悬臂支架结构 (厚为 8 mm)	变截面支架结构 (厚为 10 mm)	变截面支架结构 (厚为 10 mm)

此,接地线端子寿命采用文献[3-4]提出的方法进行疲劳寿命评估。

根据 Miner 损伤理论^[4],疲劳损伤 D 可以表示为:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_{\sigma_i}}{N_{\sigma_i}} \quad (1)$$

式中:

n_{σ_i} ——第 i 个应力变程 σ_i 下的循环次数;

N_{σ_i} ——第 i 个应力变程 σ_i 下的平均循环次数。

本文采用时域分析法对部件的疲劳寿命进行计算。通过雨流计数法^[5]对时域载荷进行载荷谱编制,通过计算得到 3 种方案下,接地轴端、防滑轴端、速度轴端线缆支架的最短疲劳寿命分别为 32 万

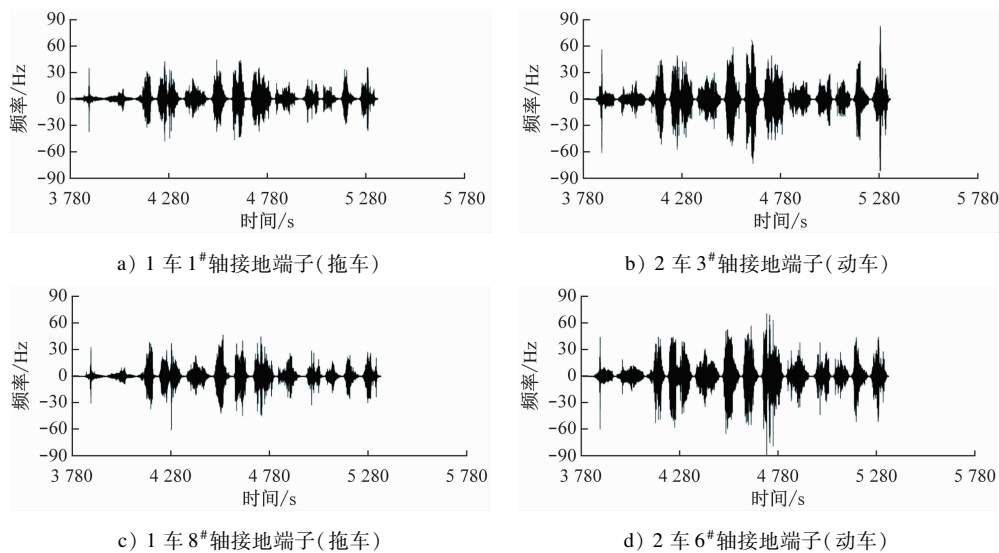


图 8 方案 1 的动车和拖车接地端子应力时域图

Fig. 8 Grounding terminal stress time-domain diagram of leading and trailing vehicles in Scheme 1

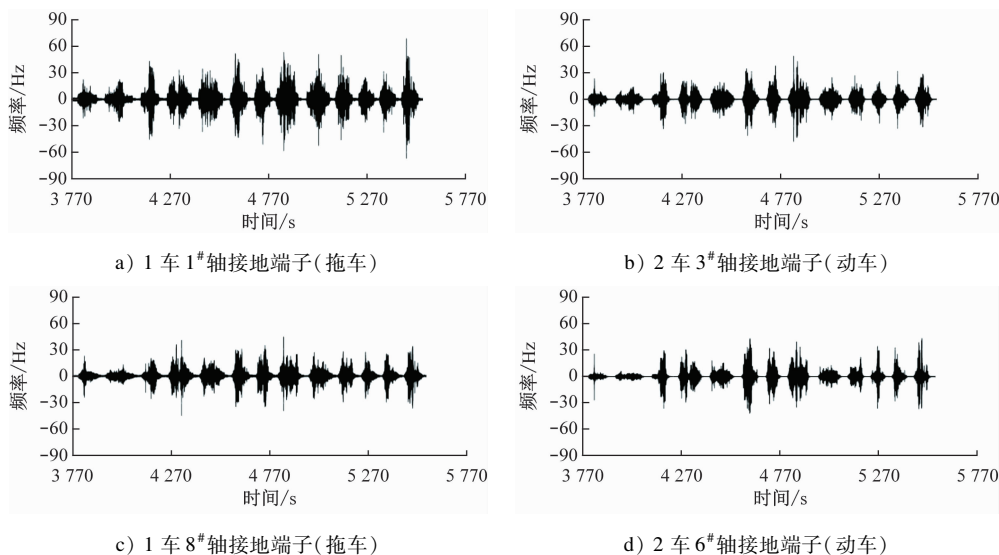


图 9 方案 2 的动车和拖车接地端子应力时域图

Fig. 9 Grounding terminal stress time-domain diagram of leading and trailing vehicles in Scheme 2

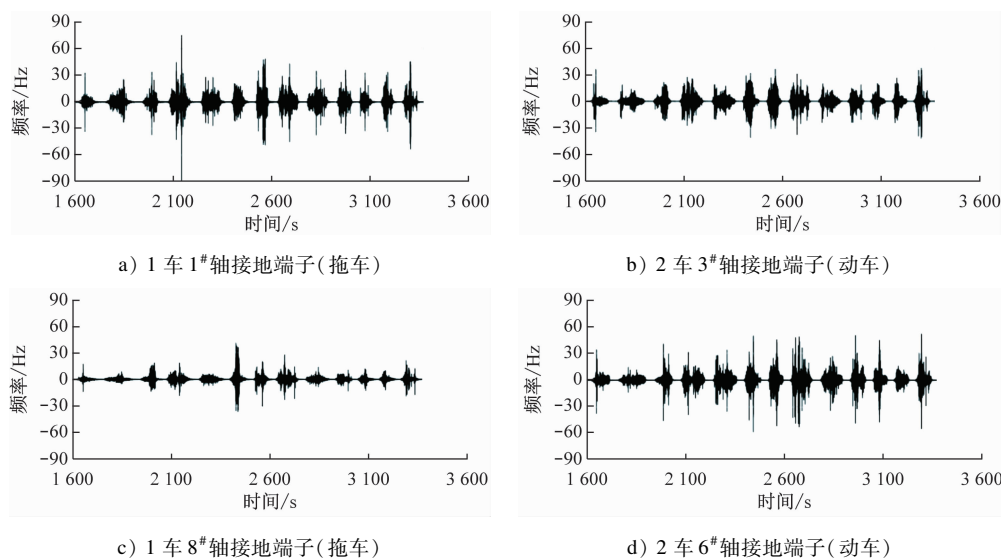


图 10 方案 3 的动车和拖车接地端子应力时域图

Fig. 10 Grounding terminal stress time-domain diagram of leading and trailing vehicles in Scheme 3

km、825 万 km 和 192 万 km。

6 结语

1) 当列车在普通道床上运行时,轴箱在激励频率为 70 ~ 120 Hz 下会发生振动,该频带会与接地系统(由支架、线夹板、线缆、接地端子组成)90 Hz 左右的固有模态发生共振,最终导致接地端子断裂。

2) 动车轴箱在激励频率为 70 ~ 120 Hz 内的振动大于拖车轴箱在该范围内的振动,这是由于动车接地端子断裂,而拖车接地端子暂未发生断裂导致的。

3) 方案 2 和方案 3 的应力水平明显低于方案 1 的应力水平。

此外,由于线缆支架是悬臂结构,在钢轨接头等冲击下会产生自身的固有模态振动,应力最高可达 50 MPa。若采用方案 2 或方案 3 中的线缆支架,需关注车轮擦伤情况,避免出现车轮在擦伤情况下运行的情况。在列车运行过程中,及时对轨道进行维护,避免轮轨冲击引发方案 2 或方案 3 中线缆支架的模态振动。

参考文献

- [1] 许娟红. 地铁车辆接地线端子压接质量控制分析[J]. 江苏交通科技, 2018(1): 26.
XU Juanhong. Analysis of ground wire terminal crimping quality

control for metro vehicles[J]. Jiangsu Transportation Research, 2018(1): 26.

- [2] 张晓明. 南京地铁 S8 号线转向架线缆支架断裂原因分析[J]. 科学与技术, 2019(2): 33.
ZHANG Xiaoming. Analysis of the causes of breakage of the bogie cable bracket of Nanjing Metro Line S8[J]. Science and Technology, 2019(2): 33.
- [3] STANZL-TSCHEGG S E. Influence of material properties and testing frequency on VHCF and HCF lives of polycrystalline copper[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 105: 86.
- [4] 徐杰, 肖守讷, 阳光武. 动车组天线梁随机振动疲劳寿命评估[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(6): 57.
XU Jie, XIAO Shoune, YANG Guangwu. Evaluation of the random vibration fatigue life for bullet train antenna beam[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(6): 57.
- [5] 李斌潮, 唐靖, 殷之平. 基于频率雨流计数法的发动机振动疲劳载荷谱编制[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1): 24.
LI Binchao, TANG Jing, YIN Zhiping. The load spectrum compilation of engine vibration fatigue based on frequency rain-flow counting method[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1): 24.

· 收稿日期:2022-10-18 修回日期:2022-11-18 出版日期:2024-12-10
Received:2022-10-18 Revised:2022-11-18 Published:2024-12-10
· 第一作者:李文学,正高级工程师,liwenxue@cccar.com.cn
通信作者:戴鑫亮,博士研究生,dxl@my.swjtu.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license