

文章编号:1671-1637(2016)02-0072-10

齿轮箱滑油系统静电监测

李 鑫, 左洪福, 蔡 景

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211106)

摘 要:利用某新型 3 499.5 kW 齿轮箱试验台搭建了用于齿轮箱地面试车磨损状态监控的滑油静电监测系统,完成了齿轮箱滑油系统全流量磨粒静电监测试验,通过连续加载试验和加速寿命试验采集了原始静电信号,提取时域信号的均方根值作为特征参数,表征滑油中颗粒荷电情况,在 2 个试验阶段分别分析了静电信号的变化趋势,并与 MetalSCAN 在线监测数据和油样光谱离线分析结果进行对比验证。分析结果表明:在连续加载试验阶段,滑油静电信号随着转速变化细微波动;加速寿命试验阶段,齿轮箱单个循环试验的静电信号均与扭矩同步变化;在加速寿命试验第 8 次循环的极限载荷试验阶段监测到 2 号齿轮箱异常磨损,而 1 号齿轮箱正常运行,与 MetalSCAN 和光谱分析结果相符;齿轮箱拆机故障检测发现了 2 号齿轮箱联轴器膜片疲劳裂纹和高速输出轴齿轮齿根点蚀现象。这证明了静电监测方法用于齿轮箱磨损状态监测的可行性和有效性,为进一步实现齿轮箱寿命预测和实际风场装机在线监测奠定了基础。

关键词:齿轮箱;滑油系统;静电监测;特征参数;加速寿命试验

中图分类号:U270.7

文献标志码:A

Electrostatic monitoring of gearbox's lubricating oil system

LI Xin, ZUO Hong-fu, CAI Jing

(School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract: The lubricating oil electrostatic monitoring system that was built by a new type 3 499.5 kW gearbox test rig for the wear condition monitoring of gearbox in ground test, was used to complete the full flow abrasive particle electrostatic monitoring test for the lubricating oil systems of gearboxes. The original electrostatic signals were obtained from continuous loading test and accelerated life test. The root-mean-square values of time-domain signals were extracted as the characteristic parameters to represent the particle charging situation in the lubricating oil. The variation tendency of electrostatic signals were analyzed at two test stages respectively and compared with MetalSCAN online monitoring data and the offline result of oil sample spectrum analysis for validation. Analysis result shows that at the continuous loading test stage, the lubricating oil electrostatic signal fluctuates slightly with the change of rotational speed. At accelerated life test stage, the electrostatic signals of gearboxes synchronously change with the torque in a single cycle test. The abnormal wear of gearbox 2 is detected at the ultimate load test stage of the eighth cycle in accelerated life test, while gearbox 1 operates normally, which is in accord with the results of MetalSCAN monitoring and the spectrum analysis. The fatigue crack of coupling diaphragm and the gear tooth root pitting of high-speed output shaft in gearbox 2 are

收稿日期:2015-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目(60939003,61079013);江苏省自然科学基金项目(BK20110737,BK20140827)

作者简介:李 鑫(1990-),男,河南南阳人,南京航空航天大学工学博士研究生,从事状态监测、故障诊断和维修工程研究。

导师简介:左洪福(1959-),男,湖南茶陵人,南京航空航天大学教授,工学博士。

found in disassemble gearbox fault detection. This proves electrostatic monitoring method is feasible and effective in wear condition monitoring of the gearbox and establishes the foundation for further implement of gearbox life prediction and installed online monitoring of the actual wind field. 1 tab, 22 figs, 26 refs.

Key words: gearbox; lubricating oil system; electrostatic monitoring; characteristic parameter; accelerated life test

Author resumes: LI Xin(1990-), male, doctoral student, +86-25-84895772, lixin1990@nuaa.edu.cn; ZUO Hong-fu(1959-), male, professor, PhD, +86-25-84891097, rms@nuaa.edu.cn.

0 引言

油路静电监测相对其他监测方法具有对细微颗粒较敏感和能监测非金属颗粒等优点,且结构简单可靠,具有巨大发展前景。静电监测技术作为一种新型的在线监测手段,相比传统的振动、温度等监测方法能更早地监测到部件性能的退化,为维修决策的制定提供实时的监测信息。目前用于齿轮箱润滑油系统全流量磨粒在线监测的技术主要有基于电磁感应原理的加拿大 GasTOPS 公司生产的 MetalSCAN 颗粒监测仪^[1]、基于感应式的定量磨屑监测器^[2]和基于静电感应原理的油路静电传感器^[3]。

Powrie 等总结了气路静电监测技术在航空发动机地面模拟试验的应用情况以及该项技术在 F-35 战斗机上的集成情况^[4];Tasbaz 等在销盘摩擦磨损试验机 and 往复式磨损试验台开展润滑油路点接触摩擦磨损试验,发现静电监测方法能在严重磨损之前监测到早期胶合磨损^[5],验证了静电监测方法的可行性;Morris 等对销盘摩擦磨损试验机进行改装,深入研究了静电产生机理^[6];Sun 等应用静电与声发射技术对轴承钢的磨损进行了监测^[7];Harvey 等采用磨损区域静电传感器、振动传感器和温度传感器相结合的方法对锥形滚柱轴承的磨损区域早期故障进行监测^[8-10],同时,将油路静电传感器与 MACOM 公司研制的基于电磁感应技术的 TechAlert™ 10 和 TechAlert™ 20 一起安装在润滑油回路中进行全流量在线监测,结果表明油路静电传感器在轴承完全失效前 4 h 发现其性能退化,并且磨损区域静电传感器和油路静电传感器监测到的静电电荷的变化与振动传感器和温度传感器以及 TechAlert™ 10 和 TechAlert™ 20 监测到的数据变化一致。润滑油路颗粒在线静电监测技术由于被美国列为军方保密技术,因此,公开文献资料仅局限于静电机理与应用报告,至于静电监测技术本身的具体细节尚未见报道。

在国内,南京航空航天大学航空安全与保障技

术研究所开展了静电监测技术研究,文振华等设计了气路静电监测传感器,并用有限元方法对传感器的传感特性进行了分析^[11-13];刘鹏鹏等建立了航空发动机气路仿真试验平台,初步开展了试车台架试验,并在某小型涡喷发动机尾气中监测到滑油泄露故障^[14-15];陈志雄等试探性地开展了油液颗粒静电监测和磨损区域静电监测的研究^[16],初步探索与设计油路静电传感器;黄文杰等通过物理模型的建立与信号采集电路的分析,获得了与实际情况相符合的静电感应数学模型^[17],设计出的静电传感器在滚轮滑轨摩擦磨损试验台^[18]、ABLT-1A 型轴承寿命强化试验机^[19]和轨道交通车辆齿轮箱^[20]上进行了试验验证。

目前,国内外关于润滑油路静电监测的研究主要集中在实验室环境下销盘摩擦磨损试验和滚动轴承性能退化试验等相对简单的系统中,对高速、重载、结构复杂的齿轮箱润滑油路静电监测研究才刚刚开始。本文利用某新型齿轮箱的试车台进行了齿轮箱润滑油系统全流量磨粒在线静电监测研究,验证了自主研发的油路静电传感器及信号处理方法应用于齿轮箱摩擦磨损监测的可行性,并获取了静电信号的一些特性。

1 齿轮箱滑油磨粒静电监测原理

齿轮箱润滑油路磨粒静电监测原理见图 1。齿轮箱润滑油路磨损颗粒荷电机理主要是摩擦荷电、表面荷电、摩擦发射荷电与磨粒形成荷电等^[21-24]。这些带电颗粒经过安装在齿轮箱出油口的油路静电传感器的感应探极区域时,将会在探极上感应出电荷。信号采集设备可以采集相应的信号,信号采集与处理系统完成信号调理并提取故障特征。

2 齿轮箱滑油系统磨粒静电监测试验

2.1 试验方案

整体试验台见图 2。齿轮箱安装固定在试车台

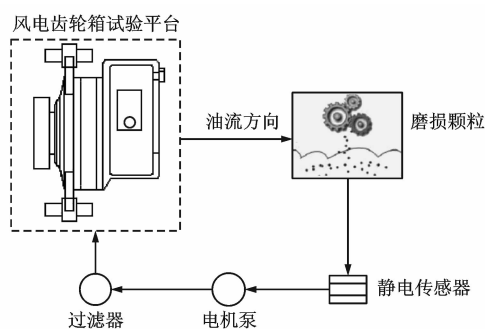


图1 静电监测原理

Fig. 1 Electrostatic monitoring principle



图2 静电监测试验台

Fig. 2 Test bench of electrostatic monitoring

架上,驱动电机和1号齿轮箱高速轴通过1号齿轮箱联轴器连接,1号齿轮箱低速轴与2号齿轮箱低速轴通过中间级联轴器相连,2号齿轮箱高速输出轴与测功电机通过2号齿轮箱联轴器相连。试验过程中,1号齿轮箱反向安装在试验台位,由驱动电机带动1号齿轮箱高速轴运转,1号齿轮箱低速轴通过中间级联轴器与2号齿轮箱低速轴相连,作为2号齿轮箱低速轴输入。通过调节扭矩仪改变齿轮箱所加负载,由测功电机验证齿轮箱的性能。齿轮箱均安装滑油冷却泵,确保滑油温度不超过 85°C 。齿轮箱安装固定在试车台架上,静电传感器安装在出油口处,MetalSCAN颗粒监测仪(用于颗粒计数)安装在静电传感器下游,信号采集系统放置在试验监控室中并通过有屏蔽功能的数据线与静电传感器相连。1号和2号齿轮箱均为两级行星两级平行结构,额定功率为 $3\,499.5\text{ kW}$,传动比为 117.5 ,润滑油标牌为Castrol Optimol Optigear X320,润滑油油量为 425 L ,滑油流量为 $225\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,润滑油管内径为 51 mm ,过滤器精度等级为 $50\text{ }\mu\text{m}$,驱动电机额定功率为 $8\,000\text{ kW}$ 。试验使用的采集设备包括采样精度为 24 bit 的NI WLS-9234数据采集卡、联能YE5854A型电荷放大器、采样频率为 10 kHz 的滑油静电监测系统。

2.2 静电传感器及其安装

静电传感器有环状、棒状等形式,本试验选用环

状静电传感器,相对其他形式传感器具有如下优点。

(1)灵敏度高,测量范围广。

(2)安装在出油口处,不会对齿轮和轴承的运行产生任何影响。

(3)传感器与油管通过SAE标准法兰连接,内径相同,不会对滑油造成压力损失。

(4)不影响齿轮箱体本身结构,而棒状传感器需要在箱体打孔以便固定,这样会影响齿轮箱体的结构强度。

(5)价格便宜,性能稳定,适用于恶劣的工业环境。

环状静电传感器的感应原理见图3,当带电颗粒经过静电传感器的测量空间时,将会在探极上感应出相应的电荷并被采集。

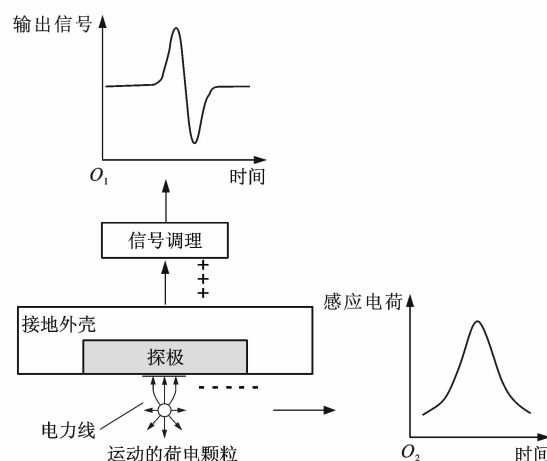


图3 静电传感器感应原理

Fig. 3 Sensing principle of electrostatic sensor

环状油路静电传感器结构见图4。感应探极材料选用导电率较高的紫铜,探极嵌入聚四氟乙烯做成的管壁内,并用电导率极小的环氧树脂密封。传感器外壳为不锈钢屏蔽罩,起电磁屏蔽作用。

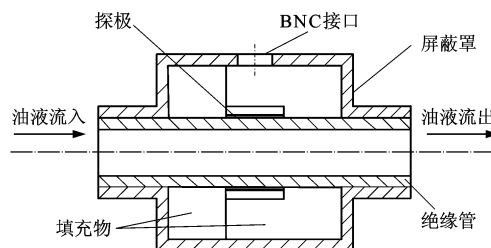


图4 环状油路静电传感器结构

Fig. 4 Structure of annular oil-line electrostatic sensor

静电传感器的等效测量电路见图5,其中: C_1 为放大器的反馈电容; C_2 为测量回路的等效电容; R_1 为放大器的反馈电阻; R_2 为测量回路的等效电阻; Q 为感应电荷; u_1 为放大器的输入电压; u_2 为放大

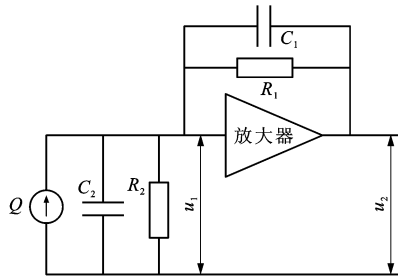


图5 油路静电传感器等效测量电路

Fig. 5 Equivalent measurement circuit of oil-line electrostatic sensor

器的输出电压。 Q 和 u_1 经过拉普拉斯变换后分别为 $Q(t)$ 和 $U(t)$, t 为经过拉普拉斯变换后的时间变量,二者有关系为

$$U(t) = \frac{R_3 t Q(t)}{R_3 C_2 t + 1} \quad (1)$$

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

式中: R_3 为等效阻抗。

静电传感器的输出信号频率很低,满足 $R_3 C_2 s \ll 1$, 因此,信号测量模型等效为

$$u_1 = R_3 \frac{dQ}{dt} \quad (2)$$

那么 t 时刻静电传感器的输出电压为

$$u_2 = \frac{R_3 dqv}{2\pi R_1} \int_0^\pi \left\{ \frac{d - X \cos(\varphi)}{[(\varphi + L)^2 + F^2(X, \varphi)]^{3/2}} - \frac{d - X \cos(\varphi)}{[(\varphi - L)^2 + F^2(X, \varphi)]^{3/2}} \right\} d\varphi \quad (3)$$

式中: q 为磨粒带电量; v 为磨粒运动速度; L 为探极的轴向长度; d 为探极半径; X 为空间带电颗粒在传感器中轴线上的投影距离; φ 为圆周上一点到原点的连线与传感器中轴线的夹角; $F(X, \varphi)$ 为空间带电颗粒在传感器中轴线上的投影点与圆周上一点的距离。

环状油路静电传感器安装在出油口处,其在齿轮箱试车台的实际安装位置见图6。

3 静电信号处理

3.1 原始静电信号

油路静电监测传感器采集的原始信号为电压信号,100%额定扭矩工况下正常运行时无颗粒经过,静电信号监测信号较为平稳(图7),有带电磨损颗粒经过静电传感器时的原始静电信号见图8。

当齿轮箱出现严重或异常磨损时,如图8中在时间为约5 min处和13 min处,磨损产生的颗粒物增加会使静电信号输出值超出正常范围,出现一些

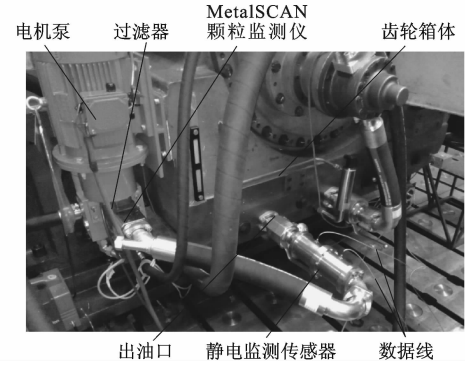


图6 油路静电传感器安装位置

Fig. 6 Installation location of oil-line electrostatic sensor

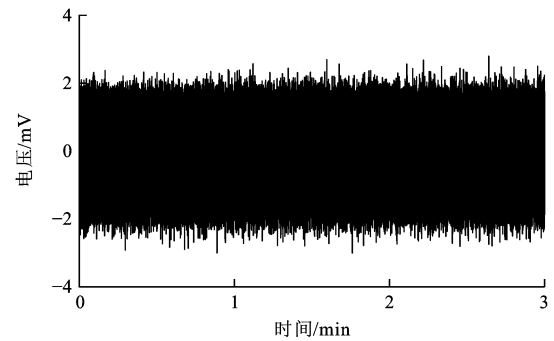


图7 正常运行情况下原始静电信号

Fig. 7 Original electrostatic signal under normal operation circumstances

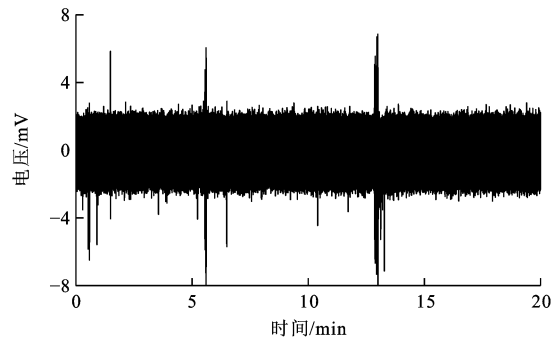


图8 有带电颗粒经过时原始静电信号

Fig. 8 Original electrostatic signal when charged particles are passing

突变脉冲,图8的局部放大分别见图9、10。

3.2 静电信号特征参数

静电信号时域特征提取与振动信号处理方法类似,主要指标包括峰峰值、峭度、均方根 RMS 值等。本文对上述时域特征参数进行分析,发现除 RMS 值之外其他指标均不能很好地描述齿轮箱磨损状态的变化,RMS 值的物理意义可理解为在一定时间间隔内经过传感器感应区域的带电电荷在传感器上响应的感应电荷量的有效值;因此,本文选取 RMS 值 y_{rms} 作为指标对采集的静电信号进行处理,其计算

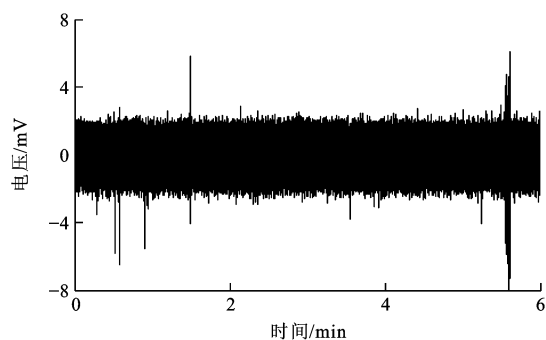


图 9 局部放大 1

Fig. 9 Partial enlargement 1

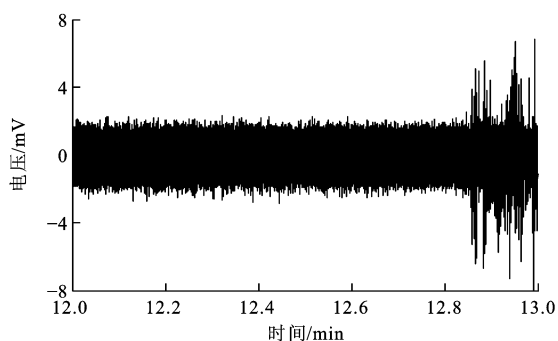


图 10 局部放大 2

Fig. 10 Partial enlargement 2

公式为

$$y_{\text{rms}} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y^2(n)} \quad (4)$$

式中: $y(t)$ 为经过带通滤波的感应电压信号; T 为时段长度, 一般取为 1 s, 即对所采集的静电信号每 1 s 时段长度计算一个 RMS 值; N 为 $y(t)$ 经离散采样后在时段 T 内总的信号值个数; $y(n)$ 为经过带通滤波并离散采样后第 n 个原始静电信号值。

4 试验结果分析

4.1 不同转速下静电监测试验

连续加载试验测试齿轮箱在运行时的振动是否在正常范围。在加速寿命试验进行之前先进行连续加载试验, 即保持齿轮箱的扭矩达到 100% 额定扭矩, 控制齿轮箱的高速轴转速在不同转速下分别稳定运行, 以测试齿轮箱的性能。转速分别为 1 750、1 775、1 800、1 825、1 850、1 875、1 900 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 试验过程中选取齿轮箱在每个稳定转速下相同时间段的静电信号进行处理, 连续加载试验参数见图 11。图 12 为不同转速下 1 号齿轮箱滑油系统静电监测结果。

从图 12 可以看出, 在转速为 1 750 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的初始阶段, 静电监测信号呈缓慢上升趋势。造成这

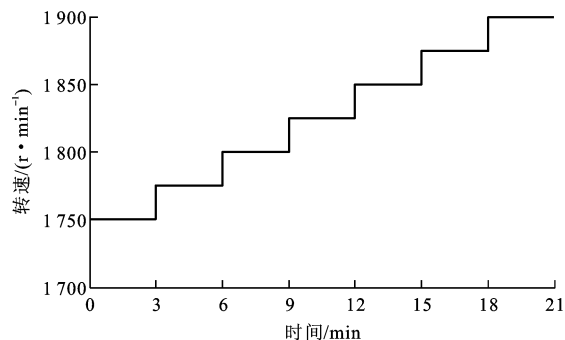


图 11 连续加载试验参数

Fig. 11 Parameters of continuous loading test

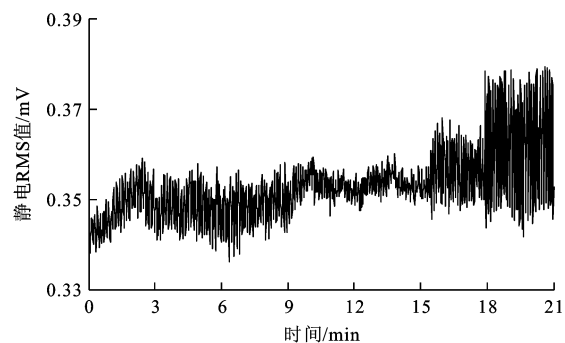


图 12 不同转速下 1 号齿轮箱静电监测 RMS 值

Fig. 12 Electrostatic monitoring RMS values of gearbox 1 at different rotational speeds

一现象的原因可能是齿轮箱刚开始运行稳定, 滑油系统中产生一些微小带电磨损颗粒, 此阶段 RMS 最大值和最小值之差在 0.1 mV 之间, 差别不大。从整体试验静电监测信号可以看出 RMS 值随着齿轮箱转速变化存在着几乎同步变化的趋势, 并且 RMS 值在每个试车阶段都会有轻微波动, 主要原因是齿轮箱内部齿轮和轴承的磨损会受到转速的影响, 从而可以证明 RMS 值主要反映滑油系统中微小磨粒的带电情况以及浓度等, 这与 Bouslimi 等关于静电水平与转速关系的研究结果相近^[25]。2 号齿轮箱静电 RMS 值变化趋势与 1 号齿轮箱相同, 在转速和扭矩均相同的工况下静电监测 RMS 值基本保持在同一水平。

4.2 加速寿命静电监测试验

连续加载试验结束后, 检查齿轮箱无异常状况, 开展齿轮箱加速寿命试验。加速寿命试验用于监测齿轮箱的性能, 验证齿轮箱能否在额定载荷、超载和极限载荷下正常运行。加速寿命试验阶段保持齿轮箱的高速轴和低速轴转速不变, 通过连续加载试验来验证齿轮箱在额定载荷、超载和极限载荷条件下的性能。每一个试验循环持续的时间为 571.0 min, 加速寿命试验参数见图 13(扭矩比为工作扭矩与额定扭

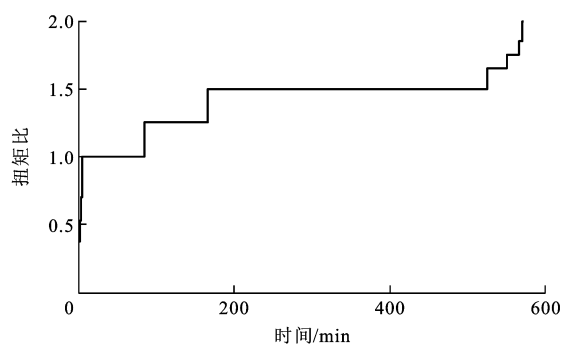


图 13 加速寿命试验参数

Fig. 13 Parameters of accelerated life test

矩的比)。各轴转速和扭矩等具体参数见表 1。每个循环结束后,停机收集 100 mL 滑油油样,以便对油液进行光谱分析。

表 1 具体参数

Tab. 1 Specific parameters

扭矩比	低速轴 转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	低速轴 扭矩/ ($kN \cdot m$)	高速轴 转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	高速轴 扭矩/ ($N \cdot m$)	时间/ min
0.18	14.78	414	1 736.6	3 523.5	0.5
0.29	14.78	667	1 736.6	5 676.8	0.5
0.38	14.78	874	1 736.6	7 438.5	0.5
0.46	14.78	1 058	1 736.6	9 004.5	0.5
0.53	14.78	1 219	1 736.6	10 374.8	1.5
0.60	14.78	1 380	1 736.6	11 745.0	0.5
0.70	14.78	1 610	1 736.6	13 702.5	0.5
0.80	14.78	1 840	1 736.6	15 660.0	0.5
0.90	14.78	2 070	1 736.6	17 617.5	0.5
1.00	14.78	2 300	1 736.6	19 575.0	80.0
1.25	14.78	2 875	1 736.6	24 468.8	80.0
1.50	14.78	3 450	1 736.6	29 362.5	360.0
1.65	14.78	3 795	1 736.6	32 298.8	25.0
1.75	14.78	4 025	1 736.6	34 256.3	15.0
1.85	14.78	4 255	1 736.6	36 213.8	5.0
2.00	14.78	4 600	1 736.6	39 150.1	0.5

表 1 中,在 18%~90%和 165%~200%额定扭矩下总试验时间相对较短,为方便起见,并结合试验具体参数,将单个试验循环划分为 5 个小阶段,将 0.18~0.90、1.00、1.25、1.50、1.65~2.00 的额定扭矩对应的阶段分别记为不超载、额定载荷、超载一、超载二、极限载荷阶段。

以单个正常运行试验循环为例,1 号齿轮箱整个试验循环的静电信号变化趋势见图 14。由于加速寿命各试验阶段转速不变,因此,不考虑转速对静电信号的影响。图 14 中 0~5.5 min 为不超载试验

阶段,5.5~85.5 min 为额定载荷试验阶段,85.5~165.5、165.5~525.5 min 分别为超载一、超载二试验阶段,525.5~571.0 min 为极限载荷试验阶段。2 号齿轮箱整个试验循环的静电信号变化趋势见图 15。图 16 为 2 号齿轮箱极限载荷试验阶段的静电信号变化趋势。

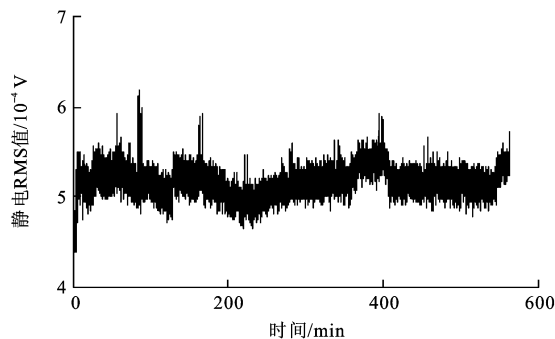


图 14 加速寿命试验单个循环中 1 号齿轮箱静电监测 RMS 值

Fig. 14 Electrostatic monitoring RMS values of gearbox 1 in a single cycle of accelerated life test

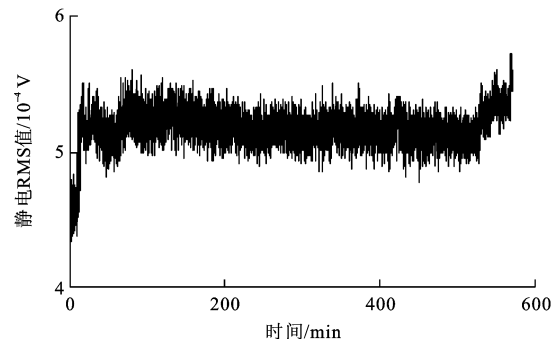


图 15 加速寿命试验单个循环中 2 号齿轮箱静电监测 RMS 值

Fig. 15 Electrostatic monitoring RMS values of gearbox 2 in a single cycle of accelerated life test

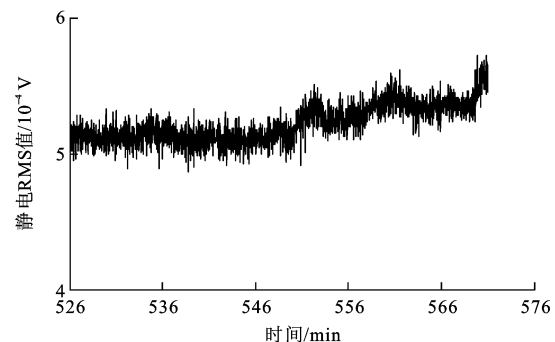


图 16 极限载荷试验中 2 号齿轮箱静电监测 RMS 值

Fig. 16 Electrostatic monitoring RMS values of gearbox 2 in limit load test

由图 14、15 可以看出:在不超载阶段滑油静电监测信号随着扭矩的不断增加呈现连续上升的趋势,虽然持续时间较短,但也反映了连续加载试验阶段滑油系统中微小颗粒的生成情况;额定载荷阶段

的滑油系统静电监测值初始时较高,随后呈略微下降趋势,最终缓慢增加并稳定在一定水平;超载一试验阶段的静电监测信号趋于稳定,但整体水平要高于额定载荷试验阶段;超载二试验阶段时间最长,360.0 min 内齿轮箱工况没有发生变化,齿轮箱始终处于稳定磨损状态,滑油静电监测值也保持稳定;在极限载荷试验阶段的静电监测信号随着扭矩的增加也呈现连续上升的趋势,这与不超载阶段的分析结果一致,但整体静电水平要远高于不超载阶段;极限载荷试验阶段扭矩远高于额定载荷阶段,齿轮箱内部的齿轮和轴承超负荷运行,虽然持续时间较短,但静电监测信号表明伴随着载荷的增加,齿轮箱内部摩擦副表面产生的静电电荷也随之增加,从而滑油系统中的静电传感器感应到的感应电荷也持续增加。这与 Harvey 关于油液润滑条件下摩擦副颗粒带电电荷与载荷关系的理论分析一致,从而验证了油路静电传感器用于齿轮箱磨损状态在线监测的可行性。

4.3 静电信号整体趋势分析

在加速寿命试验阶段共获取了 9 次试验循环的静电监测数据,获得了静电检测值在大时间尺度上随试车循环的变化趋势。得到的 1 号齿轮箱静电监测结果见图 17,2 号齿轮箱静电监测结果见图 18。

从图 17、18 可以看出:1 号齿轮箱和 2 号齿轮箱静电监测 RMS 值在每次加速寿命试验循环阶段都会有波动,主要原因是滑油系统中的静电信号会受到扭矩的影响,每次试车循环都包含了不同的扭矩工况,因此,RMS 值出现轻微波动。1 号齿轮箱第 1~7 次循环静电 RMS 趋于平稳,各循环整体 RMS 值相差不大,只在第 2 次循环、第 3 次循环和第 5 次循环出现了少量的大幅值 RMS 值,而大幅值点与油液中颗粒的荷电量密切相关。假设颗粒饱

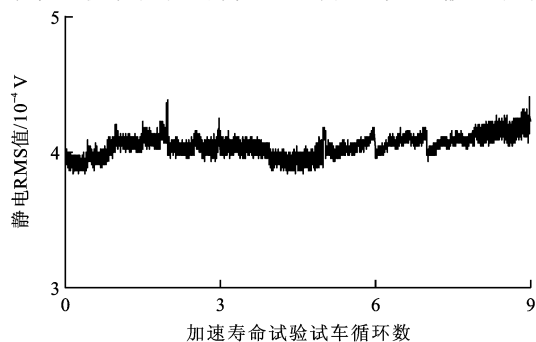


图 17 第 1~9 次试车循环中 1 号齿轮箱静电 RMS 变化趋势
Fig. 17 Electrostatic RMS variation tendency of gearbox 1 in 1-9 test cycles

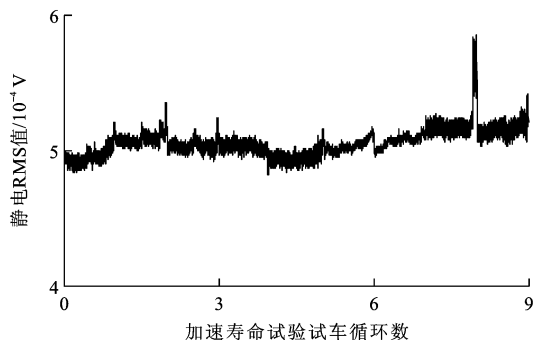


图 18 第 1~9 次试车循环中 2 号齿轮箱静电 RMS 变化趋势
Fig. 18 Electrostatic RMS variation tendency of gearbox 2 in 1-9 test cycles

和带电,那么荷电量越大,颗粒的等效直径就越大^[26];2 号齿轮箱第 8 次循环中最后 15.0 min 内 RMS 值明显高于之前循环的整体水平,有大量的异常大幅值点出现,说明此时间段内滑油系统中有大量较大直径的颗粒流经静电传感器,安装在油路静电传感器下游的 MetalSCAN 监测数据也证明了这一点,第 8 次循环结束后,2 号齿轮箱停机检查,排除故障后继续试验,第 9 次试验循环静电 RMS 值恢复正常水平。

4.4 静电监测对比验证

油液颗粒计数和油液光谱分析是齿轮箱状态监测的常用方法。为验证油路静电监测的有效性,将本次试验中 MetalSCAN 数据、油液光谱分析数据与静电监测数据进行对比分析。本次试验使用的 MetalSCAN 内径为 2 英寸,能识别等效直径大于 1 mm 的大颗粒,试验过程中分别记录每次试验循环 5 个小阶段的总颗粒数,1 号齿轮箱和 2 号齿轮箱全部 9 次循环的 MetalSCAN 监测数据见图 19。

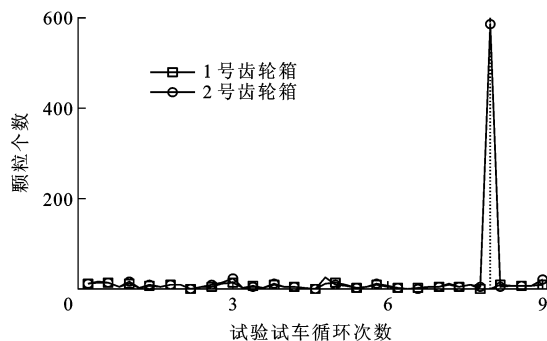


图 19 加速寿命试验中 MetalSCAN 监测数据
Fig. 19 MetalSCAN monitor data in accelerated life test

从图 19 可以看出:1 号齿轮箱和 2 号齿轮箱在第 1~7 次循环各试验阶段颗粒数比较少,说明齿轮箱整体运行平稳,而在第 8 次循环的极限载荷阶段 2 号齿轮箱颗粒数突然增加至 584 个,表示此阶段

出现了异常磨损,第9次循环各小阶段颗粒数又恢复到正常水平,而1号齿轮箱第8、9次循环均有较少颗粒通过,这与对油路静电分析的结果完全一致,从而验证了静电监测的正确性。但是大尺寸的MetalSCAN只是进行颗粒计数,只对大颗粒敏感,而静电传感器对微小颗粒的浓度也比较敏感,可以反映齿轮箱工况的变化。就该角度而言,静电传感器相对MetalSCAN具有优势。

每个加速寿命试验循环结束后停机采油样,本次试验共获得了9次循环的油瓶样本,使用美国BAIRD公司生产的MOA型油料分析光谱仪来测量油样中元素的含量,元素浓度单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。光谱仪可测量油液中20余种元素的浓度,其中含量较高的元素如B、Ba、Na、P等属于润滑油添加剂类元素,经过分析后发现这些元素的浓度变化不大,其他金属类元素如Al、Mg等浓度变化较小,而主要的磨损类元素如Fe、Cu更能反映磨损状态,本次试验测得的9个油液样本中Fe、Cu的含量见图20。

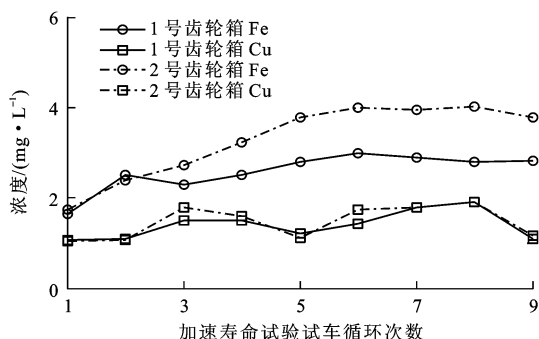


图20 油液光谱分析结果

Fig. 20 Result of oil spectrum analysis

从图20可以看出:1号和2号齿轮箱油样中Cu元素浓度基本维持在 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,变化较不明显。Cu元素的主要来源是含铜类摩擦副,如轴承、铜止推环等,因此,可初步判断齿轮箱中轴承运行状况良好;2号齿轮箱Fe元素浓度在第1~6次循环中持续上升,随后在第7~9次循环中基本维持在 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,而Fe元素的主要来源是钢铁类摩擦副,如齿轮等,可认为随着试验的进行,齿轮磨损产生的颗粒物逐渐增加,铁元素的浓度呈缓慢上升趋势,与静电监测值总体趋势一致,但是油液抽样属于离线分析,且由于取样的随机性,不能实时反映磨损状况,就该角度而言,可体现静电监测和MetalSCAN监测相对油液光谱分析的优越性。

根据齿轮箱故障检测报告,在静电监测和

MetalSCAN监测的2号齿轮箱第8次循环极限载荷阶段出现异常磨损的原因是高速输出轴联轴器膜片产生疲劳裂纹,导致高速轴偏心运转,且高速轴齿轮齿根也出现点蚀,造成磨粒数量增加,进一步验证了油路静电监测的有效性。膜片疲劳裂纹和齿根点蚀情况见图21、22。

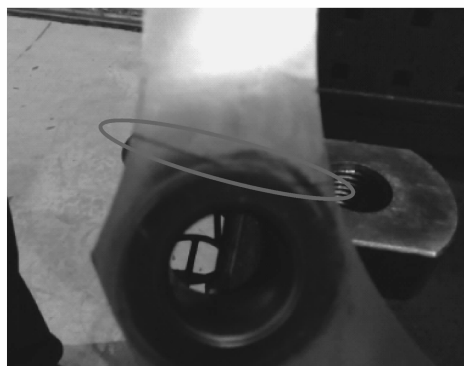


图21 膜片疲劳裂纹

Fig. 21 Diaphragm fatigue crack



图22 齿根点蚀

Fig. 22 Tooth root pitting

5 结 语

(1)根据某新型齿轮箱的寿命试验试车条件与滑油系统静电监测原理搭建了可用于齿轮箱地面试车磨损状态监控的滑油静电监测系统,设计的系统得到了齿轮箱实际试验应用环境的有效验证。

(2)对采集的静电信号进行处理,提取均方根值作为静电信号时域特征参数,以1号齿轮箱和2号齿轮箱的连续加载试验和加速寿命试验单个循环静电信号作为典型信号,发现静电RMS值随着齿轮箱转速和扭矩的变化存在着几乎同步变化的趋势,表明齿轮箱转速和扭矩是影响RMS值变化的主要因素,也证明了RMS值主要反映滑油中细微颗粒的带电情况、浓度等。

(3)加速寿命试验阶段第8次循环2号齿轮箱

的极限载荷阶段静电 RMS 值出现了异常大幅值的增加,说明此时间段内润滑油路中有大量等效直径较大的颗粒经过,而 1 号齿轮箱静电 RMS 值较为稳定。后续的齿轮箱故障检测发现的 2 号齿轮箱联轴器膜片疲劳裂纹和高速输出轴齿轮齿根点蚀现象可验证静电监测的正确性。

(4)将静电监测结果与 MetalSCAN 监测数据、油液光谱分析进行对比,进一步验证了静电监测方法的正确性,同时体现了静电监测具有实时监测、对细微颗粒和齿轮箱工况较为敏感等优点,为仪器实现产品化和实际风场装机监测奠定了基础。

参 考 文 献 :

References :

- [1] MILLER J L, KITALJEVICH D. In-line oil debris monitor for aircraft engine condition assessment [C] // IEEE. Proceedings of 2000 IEEE Aerospace Conference. New York: IEEE, 2000: 49-56.
- [2] BYINGTON C S, SCHALCOSKY D C. Advances in real time oil analysis[J]. Practicing Oil Analysis Magazine, 2000, 11(2): 28-34.
- [3] POWRIE H. Use of electrostatic technology for aero engine oil system monitoring[C]//IEEE. Proceedings of 2000 IEEE Aerospace Conference. New York: IEEE, 2000: 57-71.
- [4] POWRIE H E G, FISHER C E. Engine health monitoring: towards total prognostics[C]//IEEE. Proceedings of 1999 IEEE Aerospace Conference. New York: IEEE, 1999: 11-20.
- [5] TASBAZ O D, WOOD R J K, BROWNE M, et al. Electrostatic monitoring of oil lubricated sliding point contacts for early detection of scuffing[J]. Wear, 1999, 230(1): 86-87.
- [6] MORRIS S, WOOD R J K, HARVEY T J, et al. Use of electrostatic charge monitoring for early detection of adhesive wear in oil lubricated contacts[J]. Journal of Tribology, 2002, 124(2): 288-296.
- [7] SUN J, WOOD R J K, WANG L, et al. Wear monitoring of bearing steel using electrostatic and acoustic emission techniques[J]. Wear, 2005, 259(7-12): 1482-1489.
- [8] HARVEY T J, WOOD R J K, POWRIE H E G, et al. Charging ability of pure hydrocarbons and lubricating oils[J]. Tribology Transactions, 2004, 47(2): 263-271.
- [9] HARVEY T J, MORRIS S, WANG L, et al. Real-time monitoring of wear debris using electrostatic sensing techniques[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2007, 221(1): 27-40.
- [10] HARVEY T J, WOOD R J K, POWRIE H E G. Electrostatic wear monitoring of rolling element bearings[J]. Wear, 2007, 263(7-12): 1492-1501.
- [11] 文振华,左洪福,李耀华.气路颗粒静电监测技术及实验[J].航空动力学报,2008,23(12):2321-2326.
- WEN Zhen-hua, ZUO Hong-fu, LI Yao-hua. Gas path debris electrostatic monitoring technology and experiment[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(12): 2321-2326. (in Chinese)
- [12] 李耀华,左洪福,文振华.航空发动机气路颗粒静电监测技术模拟实验[J].航空学报,2009,30(4):604-608.
LI Yao-hua, ZUO Hong-fu, WEN Zhen-hua. Simulated experiment of aircraft engine gas path debris monitoring technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(4): 604-608. (in Chinese)
- [13] 文振华,左洪福,李耀华.一种新的航空发动机气路监测方法[J].南京航空航天大学学报,2009,41(2):248-252.
WEN Zhen-hua, ZUO Hong-fu, LI Yao-hua. New method for aero engine gas path monitoring[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 41(2): 248-252. (in Chinese)
- [14] 刘鹏鹏,左洪福,孙见忠,等.涡喷发动机气路滑油泄漏故障在线监测研究[J].仪器仪表学报,2012,33(11):2601-2607.
LIU Peng-peng, ZUO Hong-fu, SUN Jian-zhong, et al. Study of on-line monitoring of lubricating oil leakage in turbojet engine gas path[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(11): 2601-2607. (in Chinese)
- [15] 刘鹏鹏,左洪福,付 宇,等.涡喷发动机尾气静电监测及气路故障特征[J].航空动力学报,2013,28(2):473-480.
LIU Peng-peng, ZUO Hong-fu, FU Yu, et al. Exhaust gas electrostatic monitoring and gas path fault feature for turbojet engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(2): 473-480. (in Chinese)
- [16] 陈志雄,左洪福,詹志娟,等.滑油系统全流量在线磨粒静电监测技术研究[J].航空学报,2012,33(3):446-452.
CHEN Zhi-xiong, ZUO Hong-fu, ZHAN Zhi-juan, et al. Study of oil system oil-line debris electrostatic monitoring technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(3): 446-452. (in Chinese)
- [17] 黄文杰,左洪福.滑油系统全流量磨粒在线监测静电传感技术研究[J].航空学报,2013,34(8):1786-1794.
HUANG Wen-jie, ZUO Hong-fu. Research on electrostatic sensing for in-line abrasive monitoring in full flow oil system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(8): 1786-1794. (in Chinese)
- [18] 徐一鸣,左洪福,詹志娟,等.基于灵敏度分析的静电传感器优化设计[J].仪器仪表学报,2012,33(5):1084-1089.
XU Yi-ming, ZUO Hong-fu, ZHAN Zhi-juan, et al. Optimal design of electrostatic sensor based on sensitivity analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(5): 1084-1089. (in Chinese)
- [19] 刘若晨,左洪福.变工况下滚动轴承故障注入静电监测方法研究[J].仪器仪表学报,2014,35(10):2348-2355.
LIU Ruo-chen, ZUO Hong-fu. Research on electrostatic monitoring method of rolling bearings with injected fault under variable operating conditions[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(10): 2348-2355. (in Chinese)
- [20] 刘若晨,左洪福,孙见忠,等.车辆齿轮箱静电监测[J].交通运

- 输工程学报, 2015, 15(1): 50-57, 73.
- LIU Ruo-chen, ZUO Hong-fu, SUN Jian-zhong, et al. Electrostatic monitoring of vehicle gearbox[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(1): 50-57, 73. (in Chinese)
- [21] PARASONS R. Electrical double layer: recent experimental and theoretical developments[J]. Chemical Reviews, 1990, 90(5): 813-826.
- [22] EBERSBACH S, PENG Z, KESSISSOGLOU N J. The investigation of the condition and faults of a spur gearbox using vibration and wear debris analysis techniques[J]. Wear, 2006, 260(1/2): 16-24.
- [23] 张 营, 左洪福, 陈志雄, 等. 轴承钢早期胶合故障静电在线监测方法及试验[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(5): 507-515.
- ZHANG Ying, ZUO Hong-fu, CHEN Zhi-xiong, et al. Electrostatic monitoring of oil lubricated sliding bearing steel with point contacts for detection of initial stage of scuffing[J]. Tribology, 2012, 32(5): 507-515. (in Chinese)
- [24] ZHANG Ying, ZUO Hong-fu, BAI Fang. Feature extraction for rolling bearing fault diagnosis by electrostatic monitoring sensors[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(10): 1887-1903.
- [25] BOUSLIMI Y, FOFANA I, HEMMATJOU H, et al. Static electrification assessment of transformer oils in the spinning disc system[C]//IEEE. 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application. New York: IEEE, 2010: 337-340.
- [26] ROSSNER M, SINGER H. Measurement of micrometer particles by means of induced charges[C]//IEEE. 1989 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. New York: IEEE, 1989: 2233-2238.
-
- (上接第 71 页)
- Southwest Jiaotong University, 2013, 48(2): 199-204. (in Chinese)
- [12] CROSSLAND B. Effect of large hydrostatic pressure on the torsional fatigue strength of an alloy steel[C]//Institution of Mechanical Engineers. Proceedings of the International Conference on Fatigue of Metals. London: Institution of Mechanical Engineers, 1956: 138-149.
- [13] European Rail Research Institute. Programme of tests to be carried out on wagons with steel underframe and body structure (suitable for being fitted with the automatic buffing and draw coupler) and on their cast steel frame bogies[R]. Utrecht: European Rail Research Institute, 1997.
- [14] JEON K W, SHIN K B, KIM J S. A study on evaluation of fatigue strength of a GFRP composite bogie frame for urban subway vehicles[J]. Advanced Composite Materials, 2013, 22(4): 213-225.
- [15] DEMILLY F, OWEN C, BRUNEL J F, et al. FEA and methodology of design optimization of wheel-rail interface for heavy haul wagon wheels[C]//International Heavy Haul Association. Proceedings of the 9th International Heavy Haul Conference. Beijing: China Railway Publishing House, 2009: 426-432.
- [16] SUN Shu-lei, ZHOU Zhang-yi, LI Fu, et al. Fatigue strength analysis of 160 km/h high speed freight car wheel web[C]//PENG Qi-yuan, KELVIN C P, QIU Yan-jun, et al. Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation Engineering. Reston: ASCE, 2011: 2550-2555.
- [17] KIM C S, KANG G H, JANG S H. A study on the development of the Korean gauge-adjustable wheelset system for freight train[J]. Advanced Materials Research, 2011, 199-200: 337-340.
- [18] 卢 杰, 米彩盈, 刘亚军, 等. 基于 ANSYS 的车轮参数化设计与疲劳后处理研究[J]. 机车电传动, 2013(6): 32-35.
- LU Jie, MI Cai-ying, LIU Ya-jun, et al. Research on wheel parametric design based on ANSYS and fatigue post-processing system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(6): 32-35. (in Chinese)
- [19] YANG Bing, ZHAO Yong-xiang. Experimental research on dominant effective short fatigue crack behavior for railway LZ50 axle steel[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 35(1): 71-78.
- [20] JUN H K, JUNG H S, LEE D H, et al. Fatigue crack evaluation on the underframe of EMU carbody[J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 893-900.
- [21] 杨 冰, 赵永翔. PW200 转向架的疲劳可靠性分析[J]. 中国机械工程, 2005, 16(13): 1193-1197.
- YANG Bing, ZHAO Yong-xiang. Fatigue reliability analysis of PW200 bogie[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(13): 1193-1197. (in Chinese)
- [22] 肖守讷, 杨 冰, 曲天威, 等. EN 13749 标准在机车轴箱体强度分析中的推演应用[J]. 机车电传动, 2013(2): 38-41.
- XIAO Shou-ne, YANG Bing, QU Tian-wei, et al. Extrapolation and application of standard EN 13749 in strength analysis of locomotive axle-box body[J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(2): 38-41. (in Chinese)