

文章编号:1000-8055(2012)05-1096-09

轴承钢摩擦副全流量在线磨粒静电监测方法

陈志雄^{1,2}, 左洪福¹, 詹志娟¹, 张 营¹, 孙见忠¹, 蔡 景¹

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016;

2. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 南昌 330063)

摘 要: 为满足滑油系统零部件衰退早期征兆监测要求, 采用自制的全流量在线磨粒静电传感器对润滑条件下轴承钢滑动摩擦副开展实时在线磨损状态监测研究. 研究了润滑条件下金属磨粒荷电机理和设计了静电监测系统, 开展了不同载荷和滑动速度时的磨损实验, 对摩擦系数、静电感应信号、静电信号均方根值(RMS)进行相关性分析. 研究结果显示: ①全流量在线磨粒静电监测方法与摩擦系数均能监测到粘着的发生, 具有一致性; ②静电监测方法在粘着发生前监测到异常; ③在稳定磨损阶段, 摩擦系数随载荷的增大而减小, 随滑动速度的升高而降低; ④在剧烈磨损阶段, 静电信号中脉冲尖峰的 RMS 值随载荷增加时先增加后减小, 随滑动速度的升高而减小.

关 键 词: 发动机状态监测; GCr15 轴承钢; 全流量; 荷电磨粒; 静电; 磨损**中图分类号:** V233.4; V216.8**文献标志码:** A

Method for oil-line debris electrostatic monitoring of bearing steel sliding friction pairs

CHEN Zhi-xiong^{1,2}, ZUO Hong-fu¹, ZHAN Zhi-juan¹,
ZHANG Ying¹, SUN Jian-zhong¹, CAI Jing¹

(1. College of Civil Aviation,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Aeronautics Manufacture Technology,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In order to meet the requirements of condition monitoring of oil system component deterioration at an early stage, an oil-line debris electrostatic sensor has been used to investigate real time and in-line wear monitoring in oil lubricated sliding contacts of bearing steel. The charging mechanism of oil lubricated metallic debris was researched and electrostatic monitoring system was designed. The wear experiments were divided into different loads and speeds, and then the friction coefficient, oil-line debris electrostatic signal, and electrostatic signal root mean square (RMS) were obtained and correlatively analyzed. The results show: (1) the oil-line debris electrostatic method and friction coefficient can consistently detect adhesive wear; (2) the electrostatic monitoring method can detect the abnormal signal before adhesion; (3) in the normal wear stage, the friction coefficient increases with the load reduction, and reduces with the speed increase; (4) in the severe wear stage, the RMS of electrostatic signal pulse peak first increase, and then reduces with the load in-

收稿日期: 2011-12-20; **网络出版地址:** www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120525.1516.201205.1096_020.html**基金项目:** 国家自然科学基金与中国民航联合基金重点项目(60939003);

南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(NS2010171); 国家自然科学基金(61079013)

作者简介: 陈志雄(1977—), 男, 江西新干人, 讲师, 博士生, 主要从事发动机状态监测与故障预测研究. E-mail: chenxz@nchu.edu.cn

crease, and reduces with the speed increase.

Key words: engine condition monitoring; GCr15 bearing steel; oil-line; charging debris; electrostatics; wear

现代航空发动机的主轴承、直升机齿轮箱,在重载、高速、高温条件下运行,这些零部件从初始剥落到零部件失效发展很快,往往仅几个小时时间,对这些零部件状态的实时、在线监测,并提供零部件衰退的早期征兆的预警具有非常重要意义。

磨粒是零部件磨损状态的重要信息元,对其进行监测可以了解摩擦表面发生的磨损状态的严重程度,及失效形式的重要依据。目前航空发动机滑油系统磨粒监测主要采用离线方法(如铁谱分析、光谱油样分析^[1]、滑油滤磨屑图像^[2])和在线方法(如电感式传感器^[3]、磁塞传感器^[4])。现有的离线方法采用离线取样,分析周期长,检测结果滞后于实际运行状态;在线方法将传感器安装在油路上,可以实时在线监测,这些传感器能监测大于 $125\mu\text{m}$ 铁磁性金属颗粒及大于 $250\mu\text{m}$ 非铁磁性金属颗粒^[5-7]。Powrie 等在 F100-PW-100 喷气发动机采用静电油路传感器 oil-line sensor (OLS) 监测滑油系统中磨粒,能监测金属、非金属材料,其监测的最小磨粒尺寸达 $20\mu\text{m}$ ^[8-9]。油路静电监测技术的监测对象为磨损故障本身产生的磨粒,而不是其二次效应,相比于振动监测、温度监测等能对零件衰退早期症状(磨损初期产生的大量微细磨粒)更敏感,同时提供实时监测信息^[4,10],这与发动机的预测与健康管理目标一致。油路静电监测技术已纳入联合战斗机 F-35 资助计划,该技术已被美国列为军方保密技术,限制出口。

轴承失效是大多数旋转机械设备(如航空发动机)发生故障的主要问题,从而引起对轴承状态监测的广泛关注。最常见的失效原因是接触区的高接触应力导致的疲劳裂纹,进一步在滚动表面产生局部损伤,如裂纹、点蚀、剥落。为模拟航空发动机在低载荷和正常工作环境中起动时的接触副主要以滑动摩擦副为主,所以在实验室条件下通常选择在销盘实验机上开展模拟监测实验研究^[11]。Morris 等人^[12]在干摩擦时进行粘着磨损监测,实验结果表明,摩擦系数与磨损区域产生的静电荷幅值具有相关性。文献^[13-14]在油润滑条件下开展胶合磨损监测,结果显示静电监测技术能监测到磨合磨损和粘着磨损。润滑条件下滑动摩擦时,摩擦系数、油路静电感应信号与磨损状态的相关关系研究目前还未见报道。

文献^[15]探索了全流量在线磨粒静电监测技术的可行性,特别研究了润滑条件下聚合物与轴承钢构成摩擦副的监测实验。本文是上述工作的延续,旨在研究航空用轴承材料 GCr15 所组成的滑动摩擦副在航空液压油润滑条件下摩擦磨损监测,采用自制的全流量在线磨粒静电传感器安装在销盘摩擦副下游的便携式滑油系统主油路上以监测磨粒通过传感器的信号,同时监测摩擦力矩信号,实验结果表明油路静电监测方法能监测到磨损状态。

1 实验装置及方案

1.1 润滑条件下销盘滑动摩擦磨损实验装置

实验装置如图 1 所示,装置是基于 MMW-1A 型万能摩擦磨损实验机的销盘摩擦副进行设计和改装而成。盘试件(1)通过螺栓安装在旋转盘(10)底部实现旋转运动,球试件(2)通过支撑杆固定在下油槽(5)内由底部弹簧装置向上施加垂直载荷,旋转盘试件(1)和固定球试件(2)构成滑动摩擦副,整个摩擦副由上油槽(4)和下油槽(5)封闭,外接便携式滑油系统(9),全流量在线磨粒静电传感器(6)安装在紧靠摩擦副下游的主回路上,摩擦力矩传感器(7)、力传感器(8)分别用于测量摩擦副的摩擦力矩和载荷。润滑油(3)采用航空用液压油 L-HM46。

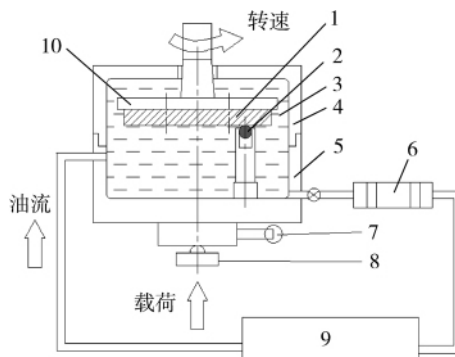


图 1 实验装置

Fig. 1 Experiment setup

将摩擦力矩按 $\mu = M/(R \times P)$ 转换为摩擦系数 μ , 式中 M 为摩擦力矩, 单位为 $\text{N} \cdot \text{mm}$, R 为球试件与盘试件旋转轴的垂直距离, 单位为

mm, P 为载荷, 单位为 N.

1.2 润滑条件下销盘滑动摩擦磨损实验方案

航空发动机滑油系统: 压力 $p < 0.6$ MPa, 体积流量 $q_v < 20$ L/min, 温度 t 为 $20 \sim 60$ °C 或 $60 \sim 140$ °C. 本实验条件下, 待滑油系统稳定运行后, $p = 0.3$ MPa, $q_v = 15$ L/min, 油管内径为 10 mm, 全流量在线磨粒静电传感器的进出油管段为 500 mm 不锈钢直管, 计算得到雷诺数 $Re = 759.7$, 润滑油流速 $v_l = 3.183$ m/s, 小于金属管壁临界雷诺数 2300, 表明其流动为层流. 表 1 为摩擦磨损实验采用的球试件、盘试件参数, 表 2 为摩擦磨损实验参数.

表 1 球试件、盘试件参数
Table 1 Parameters of pin and disc

摩擦副	材料	成分	尺寸/ mm	R_a / μm	硬度/ HRC
球试件	GCr15	1.01% C; 1.50% Cr; 0.30% Mn; 0.25% Si; $\leq 0.02\%$ S; $\leq 0.027\%$ P	$\phi 6$	0.04	60
		1.01% C; 1.50% Cr; 0.30% Mn; 0.25% Si; $\leq 0.02\%$ S; $\leq 0.027\%$ P			
盘试件	GCr15	1.01% C; 1.50% Cr; 0.30% Mn; 0.25% Si; $\leq 0.02\%$ S; $\leq 0.027\%$ P	$\phi 80 \times 8$	0.4	10
		1.01% C; 1.50% Cr; 0.30% Mn; 0.25% Si; $\leq 0.02\%$ S; $\leq 0.027\%$ P			

注: R_a 为表面粗糙度.

表 2 实验参数
Table 2 Experiment parameters

实验组	P /N	v /(m/s)
实验 1	40, 60, 80, 100	3
实验 2	100	2, 2.5, 3

注: v 为滑动线速度; $P = 100$ N, $v = 3$ m/s 实验分别属于实验 1 和实验 2.

实验前对 GCr15 盘试件用 800 目氧化铝水砂纸粗磨, 然后用 1600 目金相砂纸精磨, 丙酮超声清洗 30 min, 在 90 °C 的干燥箱中干燥 60 min, 同时对 GCr15 球试件用同样方法清洗、干燥备用. 实验时, 先后动齿轮泵, 滑油系统运行 10 min 待油液平稳流动后开始滑动摩擦磨损实验, 同时开始数据采集. 实验结束后对球试件和盘试件采用

丙酮超声清洗 30 min 后烘干, 采用江南牌 SZ6100 平行光体显微镜对球试件和盘试件进行摩擦表面微观分析.

2 润滑条件下金属摩擦副荷电磨粒的产生机理

工程中有近 70% 的磨损是粘着磨损和磨粒磨损^[16]. 本文实验条件下, GCr15 球试件对旋转 GCr15 盘试件向上施加载荷形成滑动摩擦副, 磨损产生的磨粒由于重力及循环油液冲击作用, 导致摩擦接触区的磨粒会被及时冲走. 球试件与盘试件在载荷作用下发生微凸体接触, 同时有实验研究表明在任意大小的载荷时无论有无润滑, 其实际接触面积的大小是相同的^[17], 仅占名义接触面积的 1% 左右, 高的接触应力导致粘结点很高的粘结强度, 同时由于同种金属材料组成的摩擦副, 引起粘结点附近的材料塑性变形和冷作硬化程度相同, 导致粘结点的剪切破坏发生在很深的表层, 形成粘着磨损. 当滑动时, 粘结点发生塑性流动而剪切断裂, 被剪切的材料脱落形成磨粒, 或由一个表面迁移到另一表面, 当转移的材料在反复的加载和卸载的疲劳作用下, 这些转移的碎屑也将发生断裂, 从而形成游离的磨屑^[16,18]. Rabinowicz^[19] 在钢摩擦实验中观察到脱离前磨屑的临界尺寸是 $120 \mu\text{m}$. 由于磨粒在强烈的塑性变形过程中形成, 同时伴有大量原子键的断裂, 引起在基体材料表面和磨粒产生净电荷, 磨粒同基体材料分离得越快, 磨粒荷电量越多. 如图 2 所示. 基体材料表面电荷的重新分布依赖于摩擦副材料物理特性, 同时, 磨粒在形成过程中, 由于表面氧化层具有绝缘性质; 磨粒电荷分布依赖于润滑油介质特性, 如润滑油的绝缘特性从而阻止电荷泄露, 同时也是磨粒几何(即尺寸和形状)的函数.

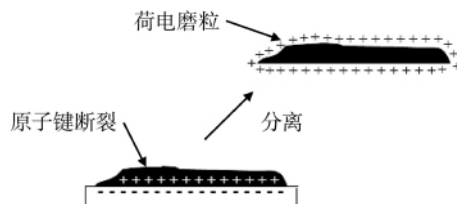


图 2 荷电磨粒形成原理图

Fig. 2 Principle of charged wear debris formed

航空用液压油 L-HM46 属于基础油中加入添加剂的矿物油, 当荷电磨粒悬浮在液压油中, 油液流动携带荷电磨粒经过传感器探极过程中, 荷电磨粒与油液相界面间自然形成双电层, 它们间

相对运动发生双电层剪切,由于液压油中基础油是惰性基质,其中添加剂、磨损产生磨粒、氧化物等杂质组成的荷电物种的存在,液压油流过固体表面时,由于流动油液对双电层的剪切作用产生带电现象,使磨粒荷电量发生变化.同时磨粒在流动过程中,磨粒之间、磨粒与管壁之间的碰撞、摩擦、分离,引起电荷的转移,导致磨粒累积静电荷.磨粒荷电源如图3所示.



图3 磨粒荷电源

Fig. 3 Wear debris charging sources

3 全流量在线磨粒静电监测系统

文献[15]详细描述了全流量在线磨粒静电监测原理.全流量在线磨粒静电监测系统如图4所示,各组成部分的功能如下:

1) 全流量在线磨粒静电传感器:把润滑油中所含荷电磨粒在传感器探极表面产生感应电荷,感应电荷量变化形成感应电流信号.传感器由两个间隔一定距离的探极组成,荷电磨粒依次经过两个传感器探极时,产生时间延迟.传感器实物如图5所示.

目前主要的全流量在线磨粒监测传感器, MetalSCAN 设计成3种规格形式:用于一般机械系统(如齿轮箱)的孔径为7.6 mm,用于航空发动机的滑油系统的孔径为16.0 mm,用于大型机械设备的孔径为26.9 mm,它们所能监测的最小铁磁性颗粒尺寸分别为100, 200 μm 和 290 μm [20]. 英国 Kittiwake 公司的 metallic particle sensor (MPS),传感器管道内径为10 mm 时能检测尺寸大于40 μm 的铁磁性金属颗粒,对 MPS 测试表明,当内径为50 mm 时,其对铁磁性金属颗粒几乎不敏感,而当内径为2 mm 时,油液流动性很差,但颗粒灵敏度很高[21]. 从上述两种传感器可以看到:孔径小时,其传感器灵敏度高;相反,孔径大时,其传感器灵敏度明显下降.所以需综合考虑灵敏度和传感器能方便安装在主循环回路.本文中滑油系统磨粒静电传感器设计管道内径为10 mm.

2) 信号调理电路:信号调理电路在监测系统中具有重要的作用,由于摩擦磨损过程中磨粒荷

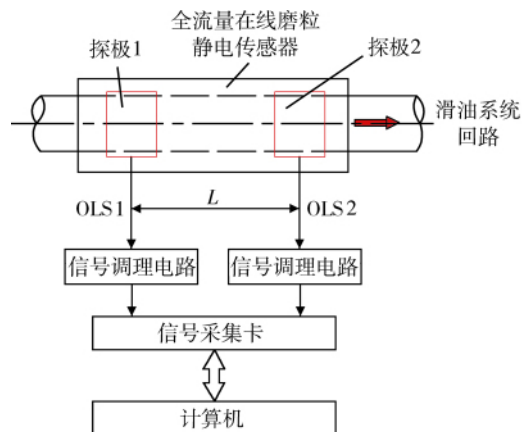


图4 全流量在线磨粒静电监测系统

Fig. 4 System of oil-line wear debris electrostatic monitoring

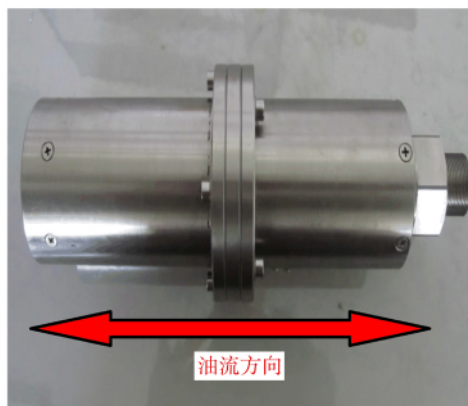


图5 全流量在线磨粒静电传感器

Fig. 5 Oil-line debris electrostatic monitoring sensor

电量微小,相应传感器感应电荷量也微小,需要经由串联的电荷放大器进行放大.采用 SINOCERA 牌高精度低噪声电荷放大器 YE5854A,增益100 mV/pC,带通滤波频率设为1~3 000 Hz,响应时间小于1 ms,测量精度为 $\pm 0.5\%$.

3) 信号采集卡:对感应电流转换为感应电压,并进行连续采集.实验中采用4通道 NI-WLS9234 信号采集卡进行静电感应信号的采集,采样精度为24 bit.

4) 计算机:使用 NI LabVIEW 编译的信号采集程序,其采样频率为1 000 Hz 对感应电压信号记录、存储并处理信号数据.

4 静电感应信号特征参数

静电感应信号均方根值(RMS)反映信号的能量大小:

$$R_{rmsi}(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N O_{olsi}(n)^2}$$

式中 rms_i 取值为 1 和 2, 分别表示为静电传感器第 1 个和第 2 个探极; N 为经带通滤波的感应信号经离散采样后在所取时间长度内的采样点数, 通常取为 0.1 s, 即每 0.1 s 长度计算 1 个 RMS 值; $O_{olsi}(n)$ 为经带通滤波并离散采样后第 1 路静电传感器 (OLS 1) 和第 2 路静电传感器 (OLS 2) 的感应电压信号^[15].

5 实验结果及分析

5.1 静电信号与摩擦系数比较分析

实验 1 滑动速度 $v=3$ m/s, 载荷分别为 $P=40, 60, 80, 100$ N.

图 6 为 GCr15 球试件与 GCr15 盘试件在滑动速度 $v=3$ m/s, 载荷 $P=40$ N 构成滑动摩擦副所监测到的摩擦系数、OLS 1 和 OLS 2 静电感应信号、感应信号 RMS 值. 从图 6(a) 看到, 摩擦系数急剧上升到 0.5 发生粘着时停止实验, 总实验时间为 742 s; 由于磨粒经过静电传感器时形成的脉冲尖峰^[15], 所以在分析静电感应信号时, 采用脉冲尖峰来直接描述由于磨损产生的磨粒, 图 6(b) 看到, 静电信号幅值在第 730.5 s 出现很强的脉冲尖峰, 提前 11.5 s 监测到故障征兆. 图 6(a) 出现摩擦系数开始为 0.5 左右, 随后下降到约 0.22 稳定一段时间, 接着缓慢增大到 0.35 左右, 最后急剧增大到 0.5, 反映了磨损过程经历磨合磨损阶段、第一稳定磨损阶段、第二稳定磨损阶段和剧烈磨损阶段, 具有明显的 S 形曲线, 与文献^[16]规律相符; 图 6(b) 显示, 在磨合磨损阶段由于高的微凸体接触、摩擦、随后剥落, 形成荷电磨粒, 这些磨粒悬浮在绝缘油中, 荷电磨粒同油液的摩擦荷电和接触荷电, 使荷电磨粒的电荷量进一步发生变化, 当这些磨粒经过静电传感器探极时引起 OLS 1 和 OLS 2 感应信号值较大, 随后摩擦副表面形成新表面膜, 进入第一稳定磨损阶段后磨损率基本保持不变, 静电感应信号稳定, 随后接触界面变的粗糙, 引起粘着磨损量缓慢增加, 进入第二稳定磨损阶段, 看到 OLS 1 和 OLS 2 晚于摩擦系数缓慢增加起始时间点约 45 s.

从图 6 进一步看到, 当磨损从第一稳定磨损阶段缓慢过渡到第二稳定磨损阶段过程中, 由于摩擦加剧产生较多的荷电磨粒进入油液中, 从而引起传感器输出的 OLS 1, OLS 2 感应信号幅值增大及感应信号 RMS (均方根) 值升高. 图 6(d) 为对静电感应信号每 1 s 长度计算一个 RMS 值,

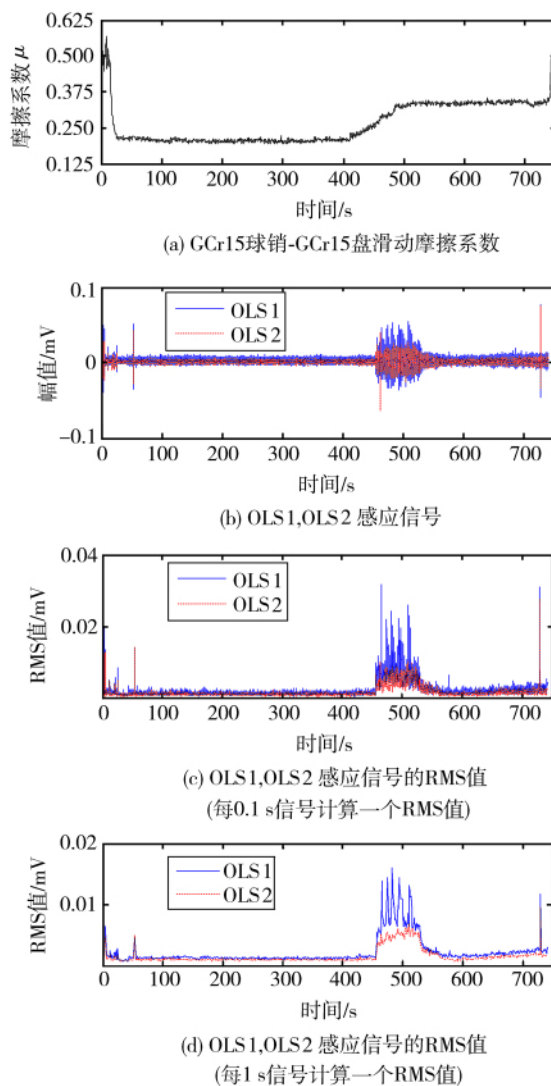


图 6 40 N, 3 m/s 销盘滑动摩擦监测摩擦系数与静电信号

Fig. 6 Electrostatic signal, coefficient of friction at a sliding speed of 3 m/s, 40 N load

从图中看到, 第二稳定磨损阶段比第一稳定磨损阶段的 RMS 值整体上升. 这进一步表明静电信号的 RMS 值可以用来反映磨损状态, 同文献^[15, 22-23]的结论一致.

由于静电感应信号的 RMS 值能反映 OLS 1 和 OLS 2 感应信号特征, 所以以下分析中仅采用感应信号的 RMS 值来描述滑油系统中油路静电感应信号. 图 7、图 8 和图 9 分别为滑动速度 $v=3$ m/s, 载荷 $P=60, 80, 100$ N 时的摩擦系数、感应信号 RMS 值. 图 7 中看到, 摩擦系数急剧上升到约 0.6 发生粘着时停止实验, RMS 值比摩擦系数提前 6.1 s. 在图 8 中, 当摩擦系数急剧上升到 0.216, 此时停机, 按摩擦系数的上升趋势会进一步上升, RMS 值比摩擦系数提前 2.8 s. 从图 9

中看到,当摩擦系数急剧上升达到 0.53 停机, RMS 值出现明显尖峰信号的时间比摩擦系数提前约 1 s.

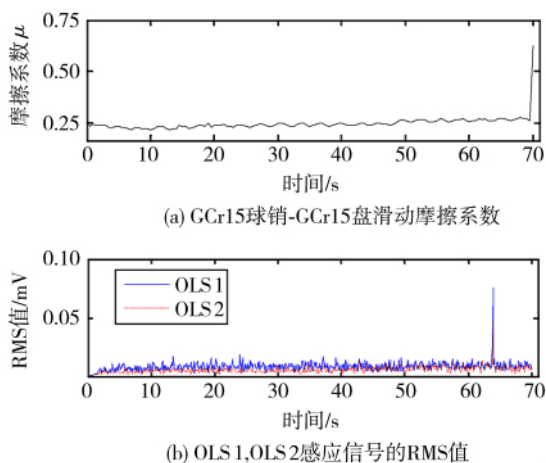


图 7 60 N, 3 m/s 销盘滑动摩擦监测摩擦系数与静电感应信号 RMS 值

Fig. 7 Electrostatic signal RMS, coefficient of friction at a sliding speed of 3 m/s, 60 N load

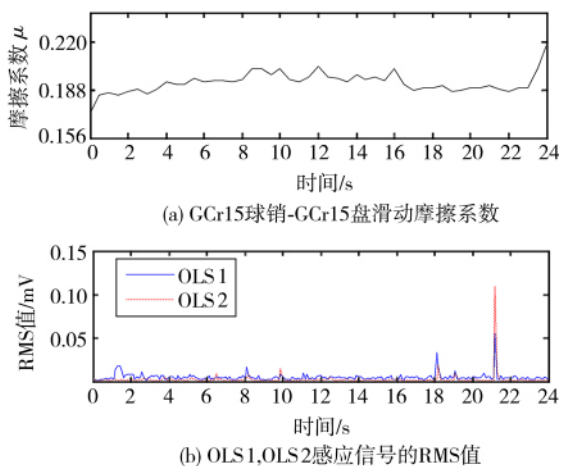


图 8 80 N, 3 m/s 销盘滑动摩擦监测摩擦系数与静电感应信号 RMS 值

Fig. 8 Electrostatic signal RMS, coefficient of friction at a sliding speed of 3 m/s, 80 N load

实验 2 载荷 $P=100\text{ N}$, 滑动速度分别为 $v=2, 2.5\text{ m/s}$.

图 10 和图 11 分别为载荷 $P=100\text{ N}$, 滑动速度 $v=2.5$ 和 2 m/s 时的摩擦系数、感应信号 RMS 值. 图 10 中看到, 摩擦系数从 0.250 缓慢上升到 0.375, 发生粘着时停止实验, RMS 值比摩擦系数缓慢增加提前约 1 s. 图 11 显示, 摩擦系数从稳定摩擦系数 0.25 迅速上升到约为 0.6 后, 停止实验, RMS 值在摩擦系数迅速增加前出现的明显尖峰信号时间比摩擦系数迅速变化提前约 1 s. 图

11 进一步看到在摩擦开始时, RMS 值出现明显的脉冲尖峰, 而此时摩擦系数并未出现变化, 进一步说明静电信号 RMS 值具有能够反映摩擦副磨损状态.

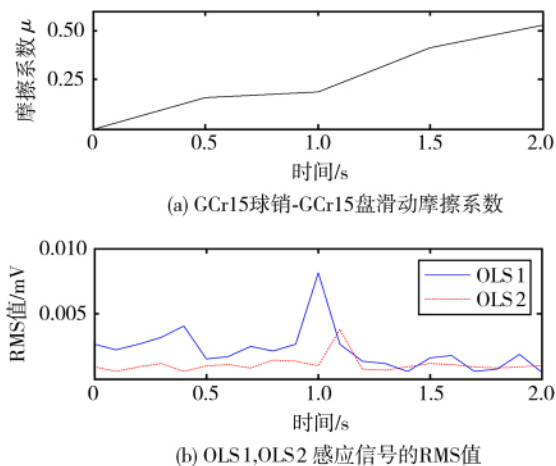


图 9 100 N, 3 m/s 销盘滑动摩擦监测摩擦系数与静电感应信号 RMS 值

Fig. 9 Electrostatic signal RMS, coefficient of friction at a sliding speed of 3 m/s, 100 N load

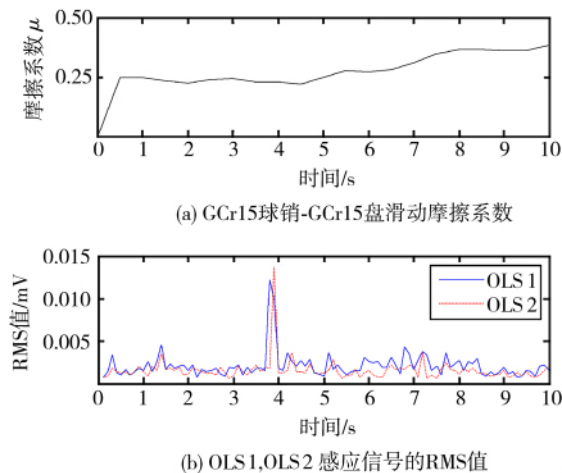


图 10 100 N, 2.5 m/s 销盘滑动摩擦监测摩擦系数与静电感应信号 RMS 值

Fig. 10 Electrostatic signal RMS, coefficient of friction at a sliding speed of 2.5 m/s, 100 N load

5.2 载荷、滑动速度对静电信号、摩擦系数影响

在所开展的监测实验看到, 载荷 $P=40\text{ N}$ 、滑动速度 $v=3\text{ m/s}$ 与载荷 $P=100\text{ N}$ 、滑动速度 $v=2\text{ m/s}$ 的两个实验中, 静电感应信号在磨合磨损阶段有明显变化, 有意思的是, 在上一实验中摩擦系数并未出现变化.

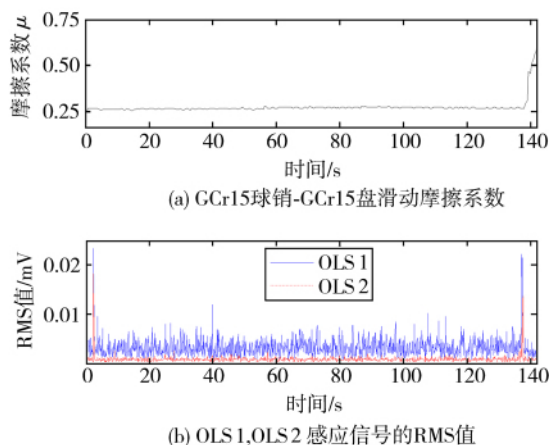


图 11 100 N, 2 m/s 销盘滑动摩擦监测摩擦系数与静电感应信号 RMS 值

Fig. 11 Electrostatic signal RMS, coefficient of friction at a sliding speed of 2 m/s, 100 N load

对本实验条件下, GCr15-GCr15 摩擦副进行赫兹接触应力计算, 80 N 时为 2.845 GPa, 100 N 时是 3.06 GPa, 而钢-钢胶合磨损的胶合载荷值 2.96 GPa^[18] 正好处在这区间内. 通常航空发动机轴承接触应力为 2.8 GPa^[24], 所以本文实验条件能模拟航空发动机摩擦副的接触状态.

表 3 对各次实验结果进行汇总, 结果显示滑动速度相同情况下, 载荷增加时, 摩擦系数呈下降趋势, 这与文献^[16, 18]中规律一致, 总实验时间从 40 N 时的 742 s 减少到 100 N 时的 2 s, 提前时间也从最大的 11.5 s 下降到最小的 1 s, 这是因为 100 N 已超过胶合载荷, 从而引起胶合的发生时间很短; 同时在载荷一定情况下, 滑动速度增加时, 摩擦系数也下降, 主要是因为摩擦接触区温度升高, 形成了具有减摩作用的表面膜^[16, 18], 总实验时间从最大的 142 s 下降到 2 s, 而此时的提前时间基本保持不变, 均为 1 s, 是因为胶合载荷值随滑动速度增加而降低^[18], 从而引起在速度高时更易发生胶合. 表 3 中结果进一步发现, 滑动速度相同情况下, 伴随载荷不断增加, 静电信号 RMS 值先增大后减小, 从 0.030 mV 先增大到 0.082 mV, 后减小到 0.006 mV. 所以当载荷从 40 N 增大到 80 N 阶段, 接触表面发生弹塑性变形, 磨粒数量增加, 从而引起 RMS 值增大, 而 RMS 值下降原因可能是当载荷达到胶合载荷后磨损突然加剧, 而这时金属磨粒并未充分荷电; 载荷保持 100 N 恒定, 滑动速度从 2 m/s 增大到 3 m/s 时, RMS 值呈单调下降趋势, 100 N 时的 RMS 值均小于其他载荷时的 RMS 值, 这主要是因为由于

胶合载荷值随滑动速度增加而降低, 导致滑动速度高时更易发生胶合, 而胶合引起磨损突然加剧, 使金属磨粒荷电不充分.

表 3 各次实验的实验数据

Table 3 The experiments data

P/N	$v/(m/s)$	μ	T/s	T_1/s	R_{rms1}/mV	R_{rms2}/mV	R_{rms}/mV
40	3.0	0.272	742	11.5	0.031	0.028	0.030
60	3.0	0.250	70	6.1	0.076	0.048	0.062
80	3.0	0.191	24	2.8	0.055	0.109	0.082
100	3.0	0.175	2	1.0	0.008	0.004	0.006
100	2.5	0.183	10	1.0	0.012	0.014	0.013
100	2.0	0.271	142	1.0	0.022	0.015	0.019

注: μ 为稳定滑动时的平均摩擦系数; T 为每次实验的总实验时间; T_1 为静电感应信号脉冲尖峰比摩擦系数产生明显升高出现的提前时间; R_{rms1} 和 R_{rms2} 分别为探极 1 和探极 2 在摩擦副发生粘着磨损时的脉冲尖峰 RMS 值, R_{rms} 为 R_{rms1} 与 R_{rms2} 的平均值.

5.3 表面形貌分析

实验结束后对试件表面清洗、干燥处理, 在体视显微镜下观察盘试件和球试件磨损表面形貌, 图 12 和图 13 分别为 $P=80\text{ N}$, $v=3\text{ m/s}$ 实验条件

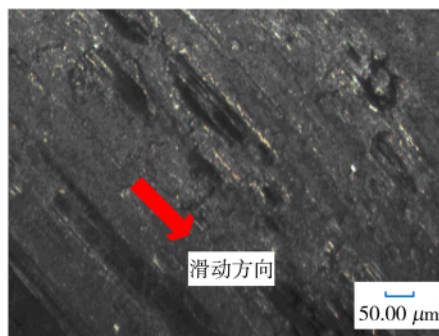


图 12 盘试件表面显微图像

Fig. 12 Micrograph of the disc worn surface

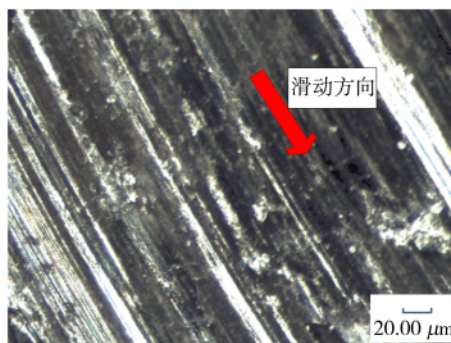


图 13 球试件表面显微图像

Fig. 13 Micrograph of the pin worn surface

下的盘试件和球试件显微图像。从图 12 中看到有明显的粘着凹坑,并在滑动方向上出现较浅的划痕和挤压变形;图 13 显示摩擦副表面在滑动方向上有明显的沟槽和出现材料堆积,说明粘着磨损和磨粒磨损并存。

6 结 论

在静电监测系统上,采用自制的全流量在线磨粒静电传感器,实施滑油系统的 GCr15-GCr15 滑动摩擦副全流量磨粒静电监测实验,得到如下结论:

1) 通过不同工况磨损实验,当粘着发生时,静电信号与摩擦系数幅值均发生突变,具有一致性,全流量在线磨粒静电监测方法在监测金属摩擦副的磨损是可行的。

2) 静电信号比摩擦系数发生突变时间提前,表明全流量在线磨粒静电监测方法具有监测故障先兆的潜力。

3) 在稳定磨损阶段,摩擦系数随载荷的增大而减小,随滑动速度的升高而降低;在剧烈磨损阶段,静电信号中脉冲尖峰 RMS 值随载荷增加时先增加后减小,随滑动速度的升高而减小。

致 谢

美国杰比科技有限公司北京代表处陶增羽工程师提供 MPS 传感器试用及技术指导,本实验室李梦莹、徐君军和王瑞凯硕士为本文工作提供帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 陈果,左洪福.基于知识规则的发动机磨损故障诊断专家系统[J].航空动力学报,2004,19(1):23-29.
CHEN Guo,ZUO Hongfu. Expert systems of engine wear fault diagnosis based on knowledge rule[J]. Journal of Aerospace Power,2004,19(1):23-29. (in Chinese)
- [2] 陈立波,陈果,宋科,等.基于图像的发动机滑油滤磨屑定量分析技术[J].航空学报,2011,32(2):368-376.
CHEN Libo,CHEN Guo,SONG Ke, et al. Image-based quantitative analysis technique of aero-engine filter debris [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2011,32(2): 368-376. (in Chinese)
- [3] Simon D L, Garg S, Hunter G W, et al. Sensor needs for control and health management of intelligent aircraft engines[R]. NASA/TM-2004-213202,2004.
- [4] Jaw L C. Recent advancements in aircraft engine health management (EHM) technologies and recommendations for the next step[R]. ASME GT2005-68625,2005.
- [5] Lewicki D G, Dempsey P J, Heath G F, et al. Gear fault detection effectiveness as applied to tooth surface pitting fa-

tigue damage[R]. NASA/TM-2009-215667,2009.

- [6] Dubowski D, Witwer D. Application of MetalSCAN oil debris monitor to a fleet of sea king helicopters[C]//Proceedings of the American Helicopter Society 60th Annual Forum, Baltimore, MD, USA; American Helicopter Society International, Incorporated, 2004:2217-2225.
- [7] Higgins P D, Crow J T. Advances in commercial engine lube debris monitoring[R]. SAE Technical Paper 972603,1997.
- [8] Powrie H E G. Use of electrostatic technology for aero engine oil system monitoring[C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana, USA; IEEE, 2000, 3:57-71.
- [9] Powrie H E G, Wood R J K, Harvey T J, et al. Electrostatic charge generation associated with machinery component deterioration[C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana, USA; IEEE, 2002(6):2927-2934.
- [10] Powrie H E G, Fisher C E. Engine health monitoring: towards total prognostics[C]//Proceedings of IEEE Aerospace Applications. CA, USA; IEEE, 1999(3):11-20.
- [11] Wang L, Wood R J K, Powrie H E G, et al. Performance evaluation of hybrid (ceramic on steel) bearings with advanced aircraft engine oils for lubrication [R]. ASME GT2004-53418,2004.
- [12] Morris S, Wood R J K, Harvey T J, et al. Electrostatic charge monitoring of unlubricated sliding wear of a bearing steel[J]. Wear,2003,255(1-6):430-443.
- [13] Tasbaz O D, Powrie H E G, Wood R J K. Electrostatic monitoring of oil lubricated sliding point contacts for early detection of scuffing[J]. Wear,1999,230 (1):86-97.
- [14] Wood R J K, Browne M, Thew M T. Electrostatic charging precursor to scuffing in lubricated contacts[C]//Proceedings of 1st World Tribology Congress. London, UK: IMechE,1997:102.
- [15] 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):436-442.
CHEN Zhixiong, ZUO Hongfu, ZHAN Zhijuan, et al. Study of oil system oil-line debris electrostatic monitoring technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012,33(3):436-442. (in Chinese)
- [16] Bhushan B. 摩擦学导论[M].葛世荣,译.北京:机械工业出版社,2006.
- [17] Sarkar A D. 金属磨损原理[M].邵荷生,译.北京:煤炭工业出版社,1980.
- [18] 温诗铸,黄平.摩擦学原理[M].3版.北京:清华大学出版社,2008.
- [19] Rabinowicz E. Friction and wear of materials[M]. 2nd ed. New York, USA: Wiley & Sons Incorporated,1995.
- [20] GasTOPS Limited. Industrial metal SCAN specifications [EB/OL]. [2012-03-01]. Http://www.gastops.com/pdf/Industrial-Metal SCAN-Specifications.pdf.
- [21] Kittiwake Developments Limited. Metallic wear debris sensor[EB/OL]. [2012-03-01]. http://www.kittiwake.com/webshare/instruction __pdfs/Obsolete/MA-K17511-

- KW. pdf.
- [22] 孙见忠,左洪福,詹志娟,等. 涡轴发动机尾气静电信号影响因素分析[J]. 航空学报, 2012, 33(3): 412-420.
SUN Jianzhong, ZUO Hongfu, ZHAN Zhijuan, et al. Analysis of the influencing factors on the exhaust gas electrostatic monitoring signal of a turbo-shaft engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(3): 412-420.
- (in Chinese)
- [23] 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.
- [24] Mitchell D J, Mecholsky J J, Jr, Adair J H. All-steel and Si_3N_4 -steel hybrid rolling contact fatigue under contaminated conditions[J]. Wear, 2000, 239(2): 176-188.