

润滑油路静电传感器动态特性仿真与试验

刘若晨^{1,2}, 左洪福¹, 冒慧杰¹, 孙见忠¹

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106;

2. 江苏理工学院 汽车与交通工程学院, 江苏 常州 213001)

摘 要: 针对航空发动机润滑油路磨粒在线监测的静电传感器缺少特性参数与验证方法的问题,根据静电感应基本原理和传感器结构,提出相应的特性参数指标,利用环状探极感应模型进行仿真,并设计和搭建了静电传感器试验系统平台,通过试验对润滑油路静电传感器动态特性进行分析与验证。结果表明:所提特性参数指标可有效反映静电传感器的动态特性;长径比是环状润滑油路静电传感器的重要结构参数,传感器效率随长径比的增大而增大;传感器有效视场也随探极尺寸的增大而增大;所建平台可适用于实物静电传感器动态特性的分析与试验,且具有良好的可重复性。仿真和试验结果对润滑油路静电传感器的设计与应用具有重要的指导意义。

关 键 词: 静电传感器; 动态特性; 参数仿真; 空间灵敏度; 长径比

中图分类号: V233.4; TH73

文献标志码: A

Simulation and experiment of dynamic characteristics for oil-line electrostatic sensor

LIU Ruochen^{1,2}, ZUO Hongfu¹, MAO Huijie¹, SUN Jianzhong¹

(1. College of Civil Aviation,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. School of Automobile and Traffic Engineering,

Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu 213001, China)

Abstract: In order to investigate the lack of characteristic parameters and verification method of the electrostatic sensor for on-line debris monitoring in aero-engine lubricated system, the corresponding characteristic parameters were proposed according to the basic principle of electrostatic induction and the structure of sensor. Sensing model of ring probe was used for simulation, and the rig of electrostatic sensor experiment system was designed and built. Dynamic characteristics of the oil-line electrostatic sensor were analyzed and validated by experiments. Results showed that the proposed parameters can effectively reflect the dynamic characteristics of the electrostatic sensor. The ratio of length to diameter was an important structural parameter of the ring oil-line electrostatic sensor, and the sensor efficiency increased with the increasing ratio of length to diameter. The effective field of view of the sensor also increased with the increasing size of the probe. Furthermore, the experiment rig can be applied to the analysis and experiment of the dynamic characteristic of the actual sensor with good repeatability. The simulation and experimental results have important guiding

收稿日期: 2016-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(60939003,61403198); 江苏省自然科学基金(BK20140827)

作者简介: 刘若晨(1989—),男,博士生,主要从事航空发动机性能状态监测与故障诊断的研究。

引用格式: 刘若晨,左洪福,冒慧杰,等. 润滑油路静电传感器动态特性仿真与试验[J]. 航空动力学报,2017,32(10):2438-2446. LIU Ruochen, ZUO Hongfu, MAO Huijie, et al. Simulation and experiment of dynamic characteristics for oil-line electrostatic sensor[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2438-2446.

significance for the design and application of the oil-line electrostatic sensor.

Key words: electrostatic sensor; dynamic characteristics; parameter simulation; spatial sensitivity; length-diameter ratio

基于静电感应原理的航空发动机性能状态在线监测是航空发动机健康管理系统中的重要部分。该项技术最早由英国 Stewart Hughes 公司开发并成功应用于 F-35 战机的状态监测与故障诊断^[1-2]。国内南京航空航天大学左洪福团队率先从航空发动机气路和润滑油路两个方向对静电监测技术开展研究^[3-6]。

润滑油路磨粒静电在线监测技术是通过静电传感器获取油路中磨粒的带电信息,掌握部件的磨损情况,进而可掌握部件的健康状况并制定出合适的维修计划。英国南安普顿大学对磨粒的荷电机理、油液磨粒的静电监测方法等进行了一系列的研究^[7-11],结果表明,静电感应方法可用于油液磨粒的在线监测,其对早期故障敏感,能够预知早期磨损故障。在国内,陈志雄等通过搭建简易油路模拟试验台,研究了轴承钢磨粒监测的静电信号特点^[12];黄文杰等建立了点电荷感应模型,并通过磨损试验证明所监测静电信号与理论输出的相似性^[13]。张营等针对静电信号易受干扰的问题,提出一种有效去噪的方法^[14]。

可见,前人对润滑油路静电监测技术已经开展了很多研究工作,包括静电感应机理、磨粒荷电特点以及信号去噪方法等。但对于传感器本身特性的研究却很少涉及,而在实际工程应用中,往往需要明确知道所使用传感器的性能、检测范围和影响因素等相关重要特性参数。因此,本文以润滑油路静电传感器自身的动态特性为研究对象,根据静电感应原理和传感器结构特点,提出相应的特性参数指标,利用环状探极感应模型进行仿真,同时设计并搭建了静电传感器验证平台,通过试验对润滑油路静电传感器动态特性进行分析与验证。分析结果对静电传感器的设计与优化以及未来的工程应用具有重要的指导意义。

1 静电感应原理和模型

润滑油路静电传感器安装于系统油路中,为保证监测的有效性和可靠性同时不影响系统油路的正常循环,一般采用环形探极。图 1 所示为传感器结构示意图,图 2 所示为传感器实物图,主要由环形探极、绝缘层、屏蔽层、转接头和微型接触器组成。

当润滑油从由绝缘材料制成的管道中流过时,安装于绝缘管内壁处的环形探极用于感应流体中的静电信号,屏蔽层用于屏蔽外部环境的干扰。为便于安装和固定,传感器的两端与油管采用法兰连接,传感器内径即绝缘管内径与所连接油管内径相同,微型接触器用于静电信号的输出。

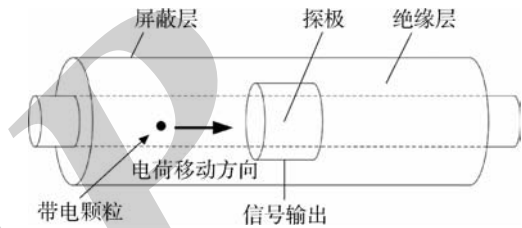


图 1 静电传感器结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of electrostatic sensor structure

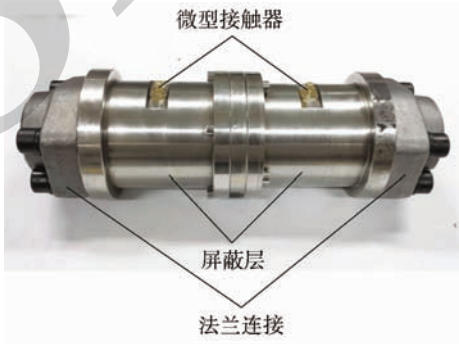


图 2 静电传感器实物图
Fig.2 Physical photo of electrostatic sensor

实际情况中,润滑油里的带电磨粒以单个或多个的形式经过传感器。考虑单个磨粒,可将其视为一个带电量为 q 的等效点电荷,它经管道流经探极时会产生相应的输出信号。根据叠加原理,多个磨粒的情形可以通过单个磨粒的情形获得。因此,本文重点研究单个磨粒下静电传感器的输出特性。

根据静电感应原理,参考黄文杰等^[13]和 Yan 等^[15-16]的点电荷模型,建立环状润滑油路静电传感器数学模型,如图 3 所示。以环形探极中心 O 为原点,探极轴向为 z 轴,探极中间截面为 xOy 平面建立坐标系。由于环形探极具有对称性,因此空间任一点处的感应电荷均可等效转化到 xOz 平面内。设施感点电荷 q 在探极感应区域内 A

点的空间坐标为 $(x, 0, z)$, 则 x 即为 A 点距离探极轴线的距离, 也即为施感点电荷在探极内的径向位置, z 即为施感点电荷相对探极的轴向位置。探极长度为 $2L$, 探极直径为 $2R$ 。 A 点在 xOy 平面内的投影为 A_x , 则其空间坐标为 $(x, 0, 0)$ 。

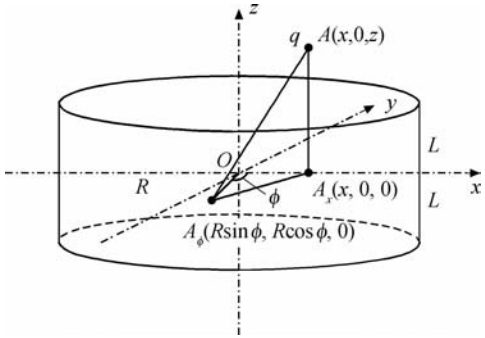


图 3 环状静电传感器数学模型

Fig. 3 Mathematical model of ring electrostatic sensor

应用库伦定理和高斯定理, 得到带电量为 q 的施感点电荷在探极上产生的感应电荷 Q , 见式(1)

$$Q = \frac{Rq}{2\pi} \int_0^\pi \frac{R - x \cos \phi}{R^2 + x^2 - 2Rx \cos \phi} \cdot \left[\frac{z + L}{\sqrt{(z + L)^2 + (R^2 + x^2 - 2Rx \cos \phi)}} - \frac{z - L}{\sqrt{(z - L)^2 + (R^2 + x^2 - 2Rx \cos \phi)}} \right] d\phi \quad (-R < x < R) \quad (1)$$

式中 ϕ 为探极在 xOy 平面上任一点 A_ϕ 与坐标原点 O 的连线和 OA_x 间的夹角。考虑实际情况, 带电磨粒将沿油管在管道内某径向位置 x 以速度 v 通过探极感应区域, 因此 x 的取值范围为 $(-R, R)$, 而 z 的取值则无限制。

2 传感器动态特性参数

2.1 空间灵敏度

由式(1)可知, 影响探极感应电荷量 Q 的主要因素有施感电荷所带电荷量 q 、所处径向位置 x 和轴向位置 z 。说明静电传感器探极中产生的感应电荷随空间位置的不同而动态变化, 为了更加清晰地描述这一空间动态变化规律, 同时消除由于施感电荷所带电量不同对结果产生的影响, 引入空间灵敏度的概念。同时, 根据静电感应原理和电荷守恒定律, 探极上的感应电荷极性与施感电荷相反, 而传感器输出电荷信号极性与施感电

荷相同。

因此为了保证无量纲的空间灵敏度值始终为正, 以传感器输出端电荷信号为标准, 定义静电传感器空间灵敏度为, 施感点电荷在空间某一位置引起的传感器感应电荷量的相反数与该施感电荷的电荷量的比值, 用公式表示即

$$s = -Q/q \quad (2)$$

式中 s 即为静电传感器的空间灵敏度。

2.2 理论效率

传感器效率是衡量传感器检测能力的重要动态特性参数。由于空间灵敏度随空间位置不断变化, 因此需要确定一个相对传感器探极固定的空间位置, 该特定位置处感应电荷量大小与施感电荷量大小的比值即为静电传感器的效率。同时考虑理论模型与实际监测存在差别, 进一步分为传感器理论效率和工作效率。

定义静电传感器理论效率为: 理论上施感电荷在特定位置处传感器产生感应电荷量的相反数与该施感电荷量的比值乘以 100% , 用公式表示即

$$\eta = -Q_{x_0}/q \times 100\% \quad (3)$$

式中 η 即为静电传感器的理论效率, Q_{x_0} 为施感电荷 q 在空间 x_0 点处时传感器探极上感应电荷量值。实际上, 传感器的理论效率即为传感器在特定位置 x_0 处的空间灵敏度。

2.3 工作效率

以实际传感器的输入与输出的测量值为研究对象, 定义静电传感器工作效率为试验中输入电荷在特定位置处传感器实际输出的感应电荷量与实际输入电荷量的比值乘以 100% , 即

$$\eta' = Q'_{x_0}/q' \times 100\% \quad (4)$$

式中 η' 即为静电传感器的工作效率, q' 为试验中输入电荷量, Q'_{x_0} 为输入电荷 q' 在空间 x_0 点处时传感器实际输出的感应电荷量。由电荷守恒定理可知, 静电传感器的理论效率和工作效率取值均在区间 $(0, 1)$ 内。同时, 由于受到加工工艺、试验环境和误差的影响, 静电传感器的工作效率要低于理论效率。

2.4 有效视场

由于静电传感器本质是感应探极周围空间区域内电荷的变化, 因此借鉴光学中视场的概念, 引入有效视场作为静电传感器的一项重要动态特性参数。定义静电传感器有效视场为空间中当施感电荷通过静电传感器时探极能感应到电荷变化的最大区域。此区域以外的部分则为静电传感器的

“盲区”。有效视场对于描述静电传感器的监测范围和优化设计具有重要作用。

假设施感电荷以速度 v_c 匀速通过环形探极的感应区域,则理论上探极上产生感应电荷随时间的变化如图 4 所示。形成的电荷脉冲起始点为 p_1 ,结束点为 p_2 ,其他时刻稳定在基线位置。假设该脉冲持续时间为 t_p ,则 $t_p = t_{p_2} - t_{p_1}$ 。 $U_{\max}$ 和 $Q_{\max}$ 分别表示为 t_p 时间段内探极感应电压和电荷量的最大值。则环状润滑油路静电传感器在该距离方向上的有效视场为 m_p ,可由式(5)求出。

$$m_p = v_c t_p$$

(5)

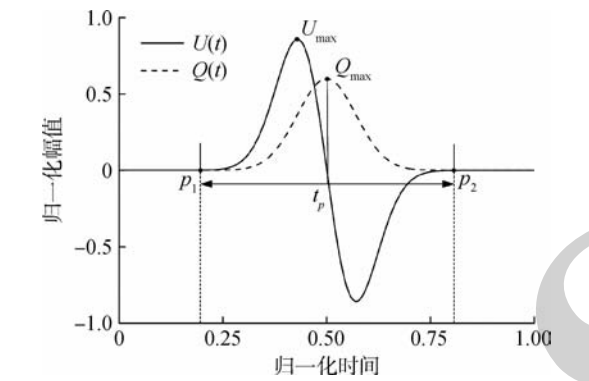


图 4 施感电荷通过探极感应区域示意图
Fig. 4 Schematic of diagram the inducing charge passing through the probe area

实际中静电传感器采集并输出的信号为电压信号,由欧姆定律可得

$$U = R_i \frac{dQ}{dt}$$

(6)

式中 U 即为静电传感器的输出电压, R_i 为传感器的等效电阻。其对应电荷 Q 随时间的变化如图 4 所示。因此 p_1 和 p_2 也即为传感器输出电压波形的起始点和结束点,实际传感器感应的输出电荷量可通过对输出电压进行积分,再除以相应的等效电阻得到。

综合静电传感器在空间各方向上的有效视场,可以求出其对应的总视场范围,实际上由于润滑油路静电传感器采用环形探极、绝缘层和屏蔽层,其在径向的视场范围即为传感器的管道内径,因此静电传感器的视场也即等效为传感器在轴向有效视场的集合。

3 试验平台与方法

由于摩擦磨损下的磨粒荷电机理复杂,且油路试验中磨粒荷电量大小和运动难以控制,因此根据静电感应原理和传感器动态特性参数,选择

带电油滴作为施感电荷,设计并搭建润滑油路静电传感器试验系统平台,如图 5 所示。

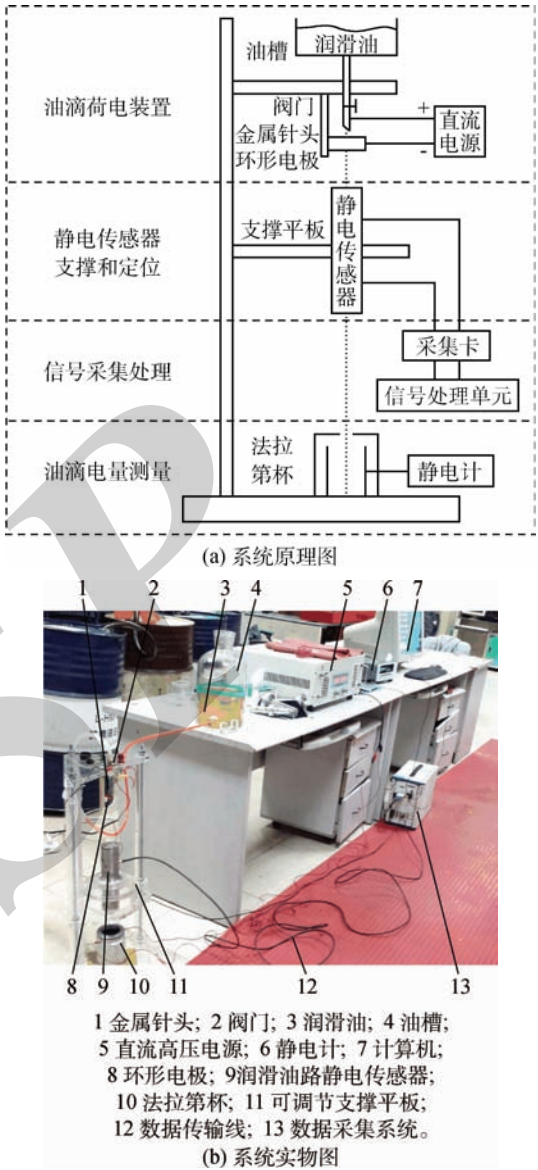


图 5 静电传感器试验平台
Fig. 5 Experiment rig of electrostatic sensor

整个试验平台主要包括 4 个部分:油滴荷电装置、静电传感器支撑和定位、信号采集处理和油滴电量测量。其中油液荷电部分用于产生电量和极性可调的带电油滴作为传感器的输入,主要由较纯净的润滑油、油槽、阀门、金属针头、环形电极和可调高压直流电源组成。环形电极和金属针头分别与直流电源两极相连,接通电源后形成高压电场。试验时打开阀门,油槽中的润滑油进入电场后,经高压电场作用使下落油滴带上相应量的电荷。下落油滴的带电量可通过改变直流电源输出电压即改变两电极间的高压电场来实现。

传感器支撑和定位部分可用于固定待试验静

电传感器并精确调节传感器探极与油滴下落垂线间的距离。由于油滴在重力作用下垂直下落,因此润滑油路静电传感器也垂直摆放,即使其中心轴线与水平面垂直,保证试验时下落的带电油滴可在同一径向位置处顺利通过传感器探极感应区域,最终落入法拉第杯中。电荷测量部分包括用于接收油滴的装置法拉第杯和测量电荷的仪器静电计。由采集处理程序,可以得到传感器输出信号,由静电计可以得到输入油滴的电量,通过该系统试验平台即可对润滑油路静电传感器的动态特性进行试验研究。

4 结果与分析

4.1 空间灵敏度仿真

根据图 3 所建环状静电传感器数学模型,结合式(1)和式(2)可仿真出润滑油路静电传感器的空间灵敏度在空间的分布。由于环形探极具有对称性,因此分别从径向位置固定时空间灵敏度在探极纵截面上的分布和轴向位置固定时空间灵敏度在探极横截面上的分布来进行研究。仿真时,假设探极厚度、绝缘层厚度和金属屏蔽罩尺寸等其他结构参数的变化对施感电荷和探极的影响忽略不计,且如无特殊说明,以下参数的单位均为 mm。

环形探极主要结构参数为轴向长度 H 和径向直径 D ,则由图 3 可知, $H=2L$, $D=2R$ 。当 $H=20\text{ mm}$, $D=20\text{ mm}$ 时,探极空间灵敏度 s 动态变化的仿真结果如图 6 所示。 z 和 x 分别为施感电荷在探极感应区域内所处的轴向位置和径向位置。由图 6 可知,当 x 固定时, s 随 $|z|$ 的减小而增大,当 $z=0\text{ mm}$ 时探极中心横截面 s 最大;各条曲线都相较于 $|z|=10\text{ mm}$ 处即探极轴向长度

处但不为 0,说明空间灵敏度在探极几何空间内外部均有分布;且当 z 固定时,内部 s 随 $|x|$ 的增大而增大,当 $x=0\text{ mm}$ 时即探极中心轴线处 s 最小,而外部 s 随 $|x|$ 的减小而增大,当 $x=0\text{ mm}$ 时 s 最大。

改变探极尺寸后空间灵敏度在轴向和径向的分布也有相同规律,说明环形润滑油路静电传感器的空间灵敏度分布存在这一规律,且该变化规律也符合静电感应的基本物理原理,即当施感电荷越靠近探极感应面,探极中产生的感应电荷量也越大。

但改变探极尺寸后,对应位置处的空间灵敏度值会发生变化,因此以探极轴向长度和径向直径作为变量,研究探极尺寸变化对空间灵敏度的影响。固定探极径向直径 $D=20\text{ mm}$,改变轴向长度 H ,则空间灵敏度在轴向的分布变化如图 7 所示。由图 7 可知,同一径向位置处, s 在轴向的分布随探极长度的增大而增大。说明,当传感器探极的径向直径固定时,增大轴向长度可以增大传感器的空间灵敏度。

再固定探极轴向长度 H ,改变径向直径 D ,则空间灵敏度在轴向的分布变化如图 8 所示。由于探极直径改变使径向位置的取值范围改变,因此只对各探极均具有的径向位置 $x=0\text{ mm}$ 处进行仿真。由图 8 可知, s 在轴向的变化分为两部分,探极内部 s 随 D 的增大而减小,而探极外部 s 随 D 的增大而增大。由于对于润滑油路静电传感器,需要增加的是探极内部感应区域的空间灵敏度,而外部空间灵敏度的增加反而会增大噪声干扰,降低传感器感应的准确性。因此以探极内部变化为基准,当传感器探极的轴向长度固定时,减小径向直径可以增大传感器的空间灵敏度。

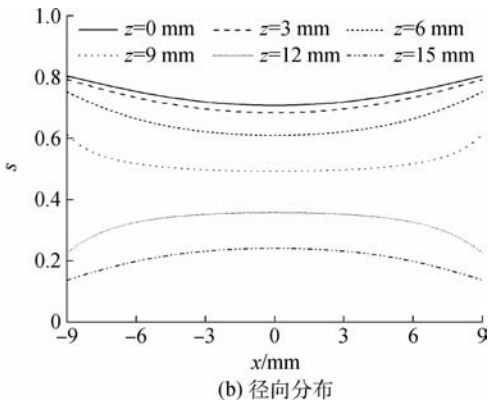
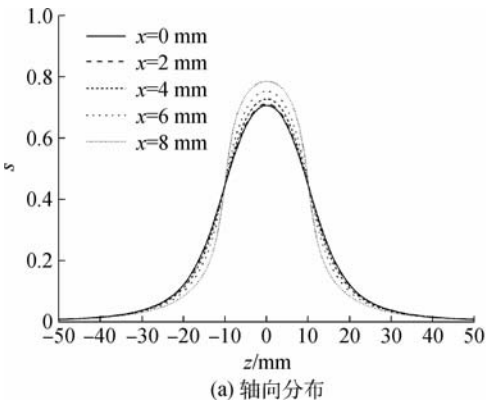


图 6 $H=20\text{ mm}$, $D=20\text{ mm}$ 探极的空间灵敏度分布

Fig. 6 Spatial sensitivity distribution of probe $H=20\text{ mm}$, $D=20\text{ mm}$

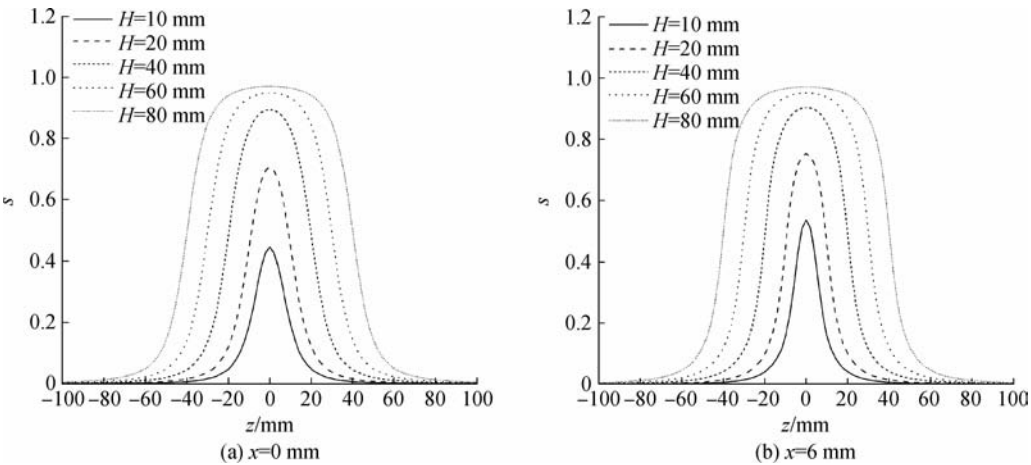


图 7 探极 $D=20\text{ mm}$ 不同 H , 的空间灵敏度在轴向的分布

Fig. 7 Spatial sensitivity distribution in axial of probe $D=20\text{ mm}$ with different H

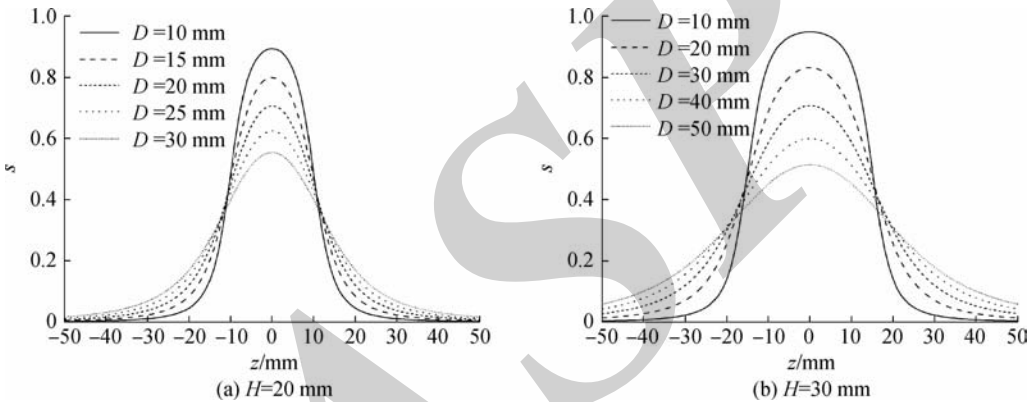


图 8 探极固定 H , 不同 D 的空间灵敏度在轴向的分布

Fig. 8 Spatial sensitivity distribution in axial of probe fixed H with different D

4.2 传感器效率变化趋势

结合以上两种情形下的变化规律,可进一步理解为探极轴向长度与径向直径的比值越大,则探极内空间灵敏度越大。该比值是影响传感器空间灵敏度和效率的重要参数,因此定义环状润滑油路静电传感器探极的重要参数长径比 λ 为探极轴向长度与径向直径的比值,用公式表示即

$$\lambda = H/D \tag{7}$$

同时由上述空间灵敏度分布规律可知,探极的几何中心 O 点,即所建坐标系原点是探极感应区域内最为特殊的一点。该点处空间灵敏度的变化与探极内其他各点处变化趋势相一致,同时相同径向位置有最大值,相同轴向位置有最小值,具有很好的代表性。因此将该点作为研究环状润滑油路静电传感器效率的参考点,即 O 点处空间灵敏度乘以100%即为环状润滑油路静电传感器理论效率值。

固定长径比 λ ,改变轴向长度 H ,探极在 $x=0\text{ mm}$ 处空间灵敏度在轴向上的分布如图9所示。发现,当 λ 相同时,只有 O 点处空间灵敏度保持

不变,其他轴向位置则随探极长度的增大而增大;当 λ 改变时, O 点处空间灵敏度才改变。可见探极中心 O 点确实是最为特殊的一点,且最有效的反应传感器空间灵敏度和效率。

进一步以探极轴向长度 H 作为变量,得到不同长径比下探极 O 点处空间灵敏度随 H 的变化趋势,如图10所示。发现,无论参数 H (或 D)取何值,只要探极长径比相同,则 O 点处空间灵敏度也相同,即润滑油路静电传感器的理论效率相同,不同长径比则不同。该结论进一步证明了长径比是影响环形探极空间灵敏度和传感器效率的直接因素。

由此得到探极中心 O 点处空间灵敏度随长径比的变化趋势,即传感器理论效率曲线,如图11所示。同时通过文中第3节中搭建的试验平台,对已完成加工制造的多个不同长径比的润滑油路静电传感器进行油液荷电试验,可以求出各传感器的实际工作效率,如图11所示。图中菱形实心点为对应长径比的传感器通过多次试验后测量结果的中位数,其上下两条横线分别为试验中

测量结果的最大值和最小值。

由图 11 可知,试验得到的润滑油路静电传感器的工作效率值与仿真的理论效率值基本吻合。由于环境干扰和试验误差等影响因素的存在,测量结果会产生一定的波动,但传感器工作效率的变化趋势与理论效率曲线基本一致,都随探极长径比的增大而增大,充分证明了润滑油路静电传感器理论效率曲线的正确性。同时说明在实际工程应用中,要提高润滑油路静电传感器的工作效率,可以通过增加探极的长径比实现。

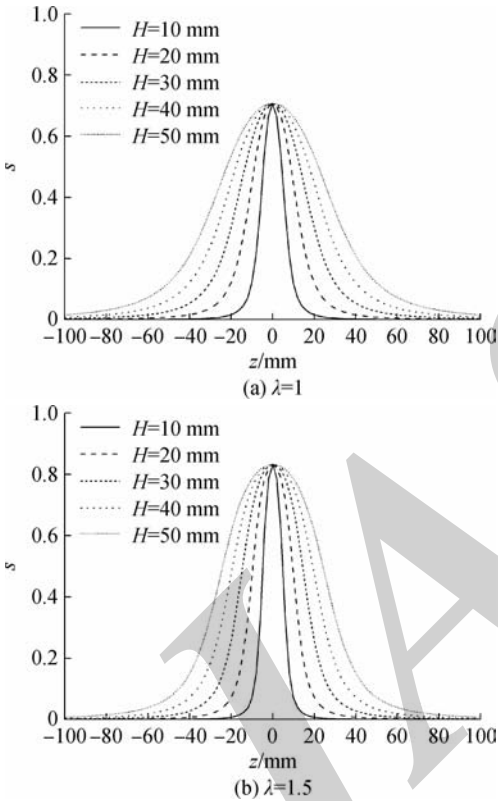


图 9 探极固定 λ , 不同 H 的空间灵敏度在轴向上的分布
Fig. 9 Spatial sensitivity distribution in axial of probe fixed λ with different H

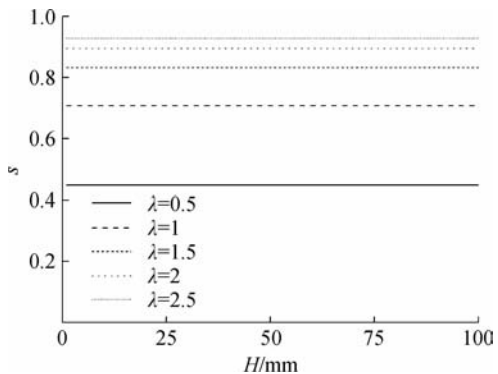


图 10 不同 λ 探极 O 点处空间灵敏度随 H 的变化趋势
Fig. 10 Variational trend of spatial sensitivity at O point with H in different λ of probe

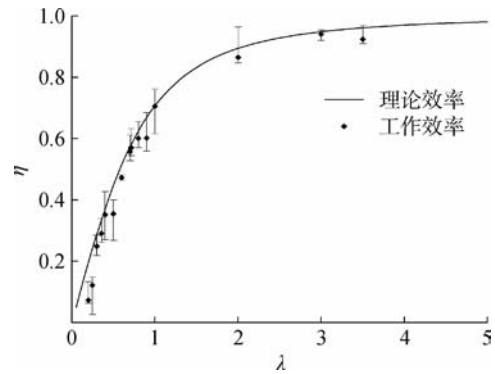


图 11 传感器效率变化趋势
Fig. 11 Variational trend of sensor efficiency

4.3 视场计算

由文中第 2.4 节中有效视场的定义和式(5)可知,求传感器的有效视场需要知道带电油滴通过探极感应区域时的速度。当传感器固定于平台上,探极到油滴下落起点即金属针头最下端的距离可以测得。以探极中心所在水平截面为参考平面,油滴下落的轨迹与该水平面的交点计为点 c ,点 c 与油滴下落起点间的高度差为 h_c ,则下落油滴在 c 点处速度为

$$v_c = \sqrt{2gh_c} \tag{8}$$

式中 g 为重力加速度。由于静电传感器探极尺寸远小于油滴下落的高度,可忽略不计,因此等效假设油滴在通过传感器时速度保持不变即为 v_c ,则由式(8)代入式(5)可以求出静电传感器在对应径向位置处的有效视场。

取 4 个不同探极尺寸的润滑油路静电传感器进行试验。探极参数和试验结果如表 1 所示。由于不同探极尺寸的径向范围不同,为了便于分析和比较,将各传感器的探极径向位置进行归一化处理,可表示为

$$\rho_{\text{nor}} = (D - 2x)/D \tag{9}$$

式中 ρ_{nor} 即为归一化的径向位置, D 为探极直径, x 为探极径向位置。试验得到各传感器在各径向位置处的有效视场如图 12 所示。由于探极上下对称,因此图中只给出一侧的视场范围即实际视场总长的一半。图中各点为多次测量结果的平均值,其上下两条横线分别表示在对应位置处测量结果的最大值和最小值。

由表 1 和图 12 可知,当静电传感器探极直径相同时,探极长度越长则视场越大;当探极长度相同时,探极直径越大则视场越大;即传感器探极尺寸越大,其有效感应区域的视场越大,且视场范围均大于探极轴向长度。因此为了降低干扰,润

表 1 试验传感器结构和性能参数

Table 1 Structure and performance parameters of experiment sensors

参数	润滑油路 试验静电传感器编号			
	1#	2#	3#	4#
探极轴向长度 H/mm	20	10	10	28
探极径向直径 D/mm	28	28	14	40
探极长径比 λ	0.714	0.357	0.714	0.700
工作效率 $\eta'/\%$	57.5	30.2	58.9	60.1
轴线有效视场 m_p/mm	49.7	33.3	24.9	70.2

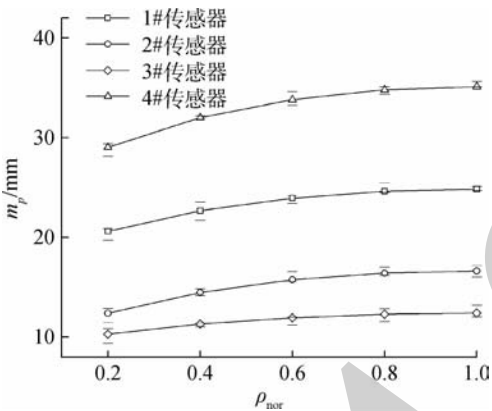


图 12 不同尺寸传感器视场范围

Fig. 12 Range of view field with different sizes of sensor

油路静电传感器在设计时,其整体尺寸尤其是屏蔽层在轴向的长度应大于探极的有效视场。

综上,在实际工程应用中,当所要监测的系统滑油回路管径固定时,选取探极长径比较大的传感器虽然可以增大工作效率,但也会使传感器的视场增大而造成传感器整体尺寸的增大,给传感器的实际安装和固定带来更大的问题。因此,润滑油路静电传感器的选择需要结合具体滑油回路和安装环境,综合考虑传感器的效率和视场,在保证视场处于传感器内部的同时尽可能的提高传感器的效率。

5 结 论

本文主要研究了环状润滑油路静电传感器动态特性的变化规律,根据所提参数指标,分别通过仿真和试验,得到以下结论:

1) 传感器探极感应区域内,径向位置相同,空间灵敏度随轴向位置的减小而增大;轴向位置相同,探极内部空间灵敏度随径向位置的增大而增大,探极外部空间灵敏度随径向位置的增大而

减小;试验结果与理论仿真结果相一致。

2) 传感器探极长径比是影响传感器效率的重要结构参数,静电传感器理论效率和工作效率都随探极长径比的增大而增大;探极长径比相同的不同尺寸传感器具有相同的理论效率。

3) 通过试验发现,增大传感器探极的轴向长度和径向直径都会使传感器的有效视场增大;实际工程应用中,应综合考虑传感器的效率和视场,在保证视场处于传感器内部的同时尽可能的提高传感器的效率。

参考文献:

[1] POWRIE H,NOVIS A. Gas path debris monitoring for F-35 joint strike fighter propulsion system PHM[R]. Big Sky,MT;IEEE Aerospace Conference,2006.

[2] POWRIE H. Use of electrostatic technology for aero engine oil system monitoring[R]. Big Sky,MT;IEEE Aerospace Conference,2000.

[3] 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 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):446-452. (in Chinese)

[4] 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 Pengpeng,ZUO Hongfu,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)

[5] 孙见忠,左洪福,刘鹏鹏,等. 航空发动机尾气静电信号基线模型分析及应用[J]. 航空动力学报,2013,28(3):531-540. SUN Jianzhong,ZUO Hongfu,LIU Pengpeng,et al. Analysis and application of baseline model of aero-engine exhaust gas electrostatic monitoring signals[J]. Journal of Aerospace Power,2013,28(3):531-540. (in Chinese)

[6] 刘若晨,左洪福,张营,等. 滚动轴承性能退化静电监测方法及试验[J]. 机械工程学报,2014,50(23):75-81. LIU Ruochen,ZUO Hongfu,ZHANG Ying,et al. Electrostatic monitoring of oil lubricated rolling bearing performance degradation and experiment[J]. Journal of Mechanical engineering,2014,50(23):75-81. (in Chinese)

[7] 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.

[8] WANG L,WOOD R J K,HARVEY T J,et al. Wear performance of oil lubricated silicon nitride sliding against various bearing steels[J]. Wear,2003,255(1):657-668.

[9] HARVEY T J,MORRIS S,WANG L,et al. Real-time mo-

nitroing 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):1492-1501.

[11] BOOTH J E,HARVEY T J,WOOD R J K,et al. Scuffing detection of TU3 cam-follower contacts by electrostatic charge condition monitoring[J]. Tribology International, 2010,43(1):113-128.

[12] 陈志雄,左洪福,詹志娟,等. 轴承钢摩擦副全流量在线磨粒静电监测方法[J]. 航空动力学报,2012,27(5):1096-1104. CHEN Zhixiong, ZUO Hongfu, ZHAN Zhijuan, et al. Method for oil-line debris electrostatic monitoring of bearing steel sliding friction pairs[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(5):1096-1104. (in Chinese)

[13] 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 Wenjie, ZUO Hongfu. 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)

[14] 张营,左洪福,佟佩声,等. 基于谱插值和奇异值差分谱的滚动轴承静电监测信号去噪方法[J]. 航空动力学报, 2014,29(8):1996-2002. ZHANG Ying, ZUO Hongfu, TONG Peisheng, et al. De-noising method for electrostatic monitoring signal of roller bearing based on spectrum interpolation and difference spectrum of singular value[J]. Journal of Aerospace Power,2014,29(8):1996-2002. (in Chinese)

[15] YAN Y,BYRNE B,WOODHEAD S,et al. Velocity measurement of pneumatically conveyed solids using electrodynamic sensors[J]. Measurement Science and Technology, 1995,6(5):515-537.

[16] WANG L, YAN Y. Mathematical modelling and experimental validation of electrostatic sensors for rotational speed measurement[J]. Measurement Science and Technology,2014,25(11):115101. 1-115102. 12.

(编辑:王碧琚)