

航空发动机气路静电监测传感器特性^{*}

文振华, 左洪福, 王 华, 李耀华

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 分析了发动机气路静电监测的原理, 对监测系统关键器件——静电传感器的灵敏度分布和频率响应特性进行了研究, 通过数值模拟和曲线拟合的方法确定了传感器的灵敏度分布函数, 进而推导了传感器的频率响应函数, 分析了传感器探极半径和对灵敏度分布与频率响应影响, 以及颗粒运动速度对频率响应的影响。理论分析和模拟实验结果表明: 静电传感器在空域和时域内均为低通滤波器, 半径大的传感器灵敏度较高, 空域频谱和时域频谱较宽。颗粒运动速度越快, 传感器输出信号的频带越宽, 但幅值相对越小。

关键词: 航空发动机; 静电传感器; 气路颗粒; 状态监测

中图分类号: V231. 25 文献标识码: A 文章编号: 1000-9787(2008)11-0028-04

Characters of sensor for aero engine gas path electrostatic monitoring^{*}

WEN Zhen-hua, ZUO Hong-fu, WANG Hua, LI Yao-hua

(Civil Aviation College Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The principle of engine gas path electrostatic monitoring technology is analyzed. research on sensitivity distribution and frequency response of key device of the monitoring system—electrostatic sensor is made. Numerical simulation and curve fitting are applied to acquire sensitivity distribution function, then frequency response function is deduced. The effect of various sensor radius and particle moving velocity on sensitivity distribution and frequency response is analyzed. Theoretic analysis and experimental results show the electrostatic sensor acts as a low-pass filter in spatial domain and time domain, and sensor with larger radius has characteristics of higher sensitivity and wider frequency range in spatial domain and time domain. The higher speed of particle moving, the wider frequency bandwidth of signal has.

Key words: aero engine; electrostatic sensor; gas path debris; condition monitoring

0 引 言

常规的气路监测与诊断方法(如, 振动监测^[1]和孔探^[2])都需在故障恶化到一定程度而引起组件几何参数发生变化时才能探测到故障的存在, 难以提供早期的故障预警信息, 而基于颗粒荷电特性的监测方法所监测的对象为故障的直接产物, 通过静电传感器对发动机气路的荷电颗粒进行监测来达到对发动机气路部件的工作状态进行实时监测, 如今, 该技术已经在美国联合式战斗机 F35 上得到了应用^[3-4], 并有效地提高了发动机的 PHM(Prognostics and health management)能力, 静电传感器是监测系统的关键部件, 颗粒上的带电量通过静电传感器进行检测, 由于荷电颗粒的移动, 其在静电传感器周围产生的静电场在不断地变化, 致使静电传感器上产生的感应电荷不断地波动。感应电荷的波动反映了气路总体的静电荷水平的

变化。文献[5]中通过静电监测信号的 2 个主要参数: 活性水平和时间率来对发动机的气路部件工作状态进行评估的。这 2 个关键参数都和传感器的灵敏度和频率响应特性息息相关。因此, 对传感器的灵敏度特性和频率响应特性进行分析研究对静电监测技术的研究具有重要的指导意义。

目前, 针对静电传感器的研究和应用大多是应用于气力输送现场环境中进行固相速度的测量的环状传感器^[6], 由于环状的传感器对中心区域的颗粒不敏感, 只适合于管道口径较小的环境中, 本文针对航空发动机气路的特点, 设计了适合发动机气路工作环境的传感器模型, 建立了基于点电荷的静电传感器分析模型, 获得了静电传感器的灵敏度分布和传感器的频率响应特性, 并对其影响因素进行了分析研究。

1 气路静电监测原理与系统构成

1.1 气路静电监测原理

航空发动机在工作过程中由于燃烧性能衰退或气路部件发生故障时都会产生异常颗粒,由于高温下气体发生化学电离反应产生大量的离子、以及颗粒和随机离子之间的相互作用使得颗粒产生荷电现象。颗粒的荷电量^[7]为

$$q_p = \frac{d_p kT}{2e} \ln\left(1 + \frac{d_p \epsilon \bar{v} N t}{2kt}\right), \quad (1)$$

式中 q_p 为颗粒的带电量; d_p 为颗粒直径; k 为玻尔兹曼常数; T 为温度; e 为电子的电荷量; \bar{v} 为颗粒的平均速度; N 为颗粒浓度; t 为时间。

正常燃烧产生的颗粒粒径分布在 $5 \sim 7 \mu\text{m}$ 和 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 2个区间,而异常颗粒的粒径大多大于 $40 \mu\text{m}$; 由于颗粒粒径的不同,导致颗粒荷电量大小的不同。当健康的航空发动机处于正常工况时候,气路总体静电荷水平保持在一个相对稳定的水平,而当发动机气路部件性能衰退(如燃烧室性能衰退)或发生故障(如叶片碰摩)时,会产生大量的异常颗粒,由于额外的异常颗粒导致气路总体的静电荷水平发生了变化。基于静电感应原理的发动机气路静电监测技术,正是实时监测发动机气路静电荷水平的变化来实现对发动机气路部件进行在线监测。

1.2 监测系统构成

基于静电感应原理的航空发动机气路监测系统由传感器、信号调理箱、采集卡和计算机组成,监测系统示意图如图1所示。其中,最前端元件是静电传感器,传感器的探极由镍基合金做成,探极和传感器外壳之间采用耐高温陶瓷进行隔离,传感器的信号输出采用同轴电缆信号线。传感器安装在发动机尾喷管处,当尾气中含有的荷电颗粒靠近和远离传感器感应探极的过程中,造成了感应探极内电子的定向移动,从而形成感应电流。电荷的变化将通过传感器的感应电流的变化而表现出来,并将感应电流通过变换电路转换为电压信号。

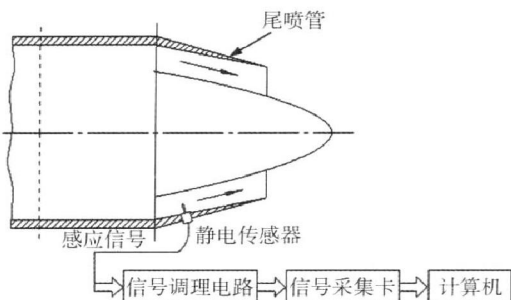


图1 发动机气路静电监测系统

Fig 1 Electrostatic monitoring system of aero engine gas path

2 静电传感器特性分析

2.1 静电传感器理论^[8]

以点电荷 Q 为中心做一个球形高斯面 S 其半径为 r 通过闭合曲面 S 的电场为 \vec{E} 由高斯定理可推得闭合曲面

上的电通量为

$$\oint_S \vec{dS} = 4\pi r^2 E = \frac{Q}{\epsilon}, \quad (2)$$

式中 ϵ 为介质的电容率,在真空中 $\epsilon = \epsilon_0$, 在介质中 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$, ϵ_r 为相对电容率。由于探极的表面积有限, Q 并不能完全被传感器感应,点电荷 Q 发出的电场线只有一部分收敛于传感器表面,所以,静电传感器上的感应电荷 $Q_A < Q$ 沿着传感器表面做一个高斯面,其表面的电通量近似为

$$AE \approx \frac{Q_A}{\epsilon}, \quad (3)$$

式中 A 为传感器的表面积; Q_A 只是 Q 在 A 上的一个感应分量。在靠近静电传感器表面处,电场场强 E 近似相等,所以,由式(2)和式(3)得到

$$Q_A \approx \frac{QA}{4\pi r^2}, \quad (4)$$

式中 r 看成是电荷与传感器表面的距离,忽略附近存在的其他的金属表面对传感器表面的影响之后,式(4)可以作为传感器的一个近似响应。

2.2 静电传感器灵敏度分析

定义传感器的灵敏度为感应电荷与施感电荷的电量绝对值之比,根据公式(4),则传感器的灵敏度为

$$S = \left| \frac{Q_A}{Q} \right| \approx \frac{A}{4\pi r^2}. \quad (5)$$

本文采用 Matlab 工具对传感器的不同位置处的灵敏度进行数值模拟计算。以传感器中心为坐标原点,沿着颗粒运动方向的径向为 x 轴,传感器的截面方向为 y 轴,如图2所示。由于传感器探极为圆柱体,其灵敏度空间分布在 x 轴径向和沿 y 轴径向分布情况相同。接下来的讨论中均为传感器沿颗粒运动方向(x 轴正向)的特性。

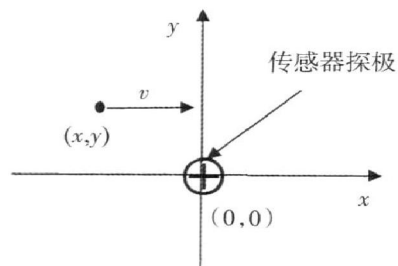


图2 颗粒运动示意图

Fig 2 Schematic diagram of Particle moving

假设颗粒在距离传感器表面 15 mm 的高度处沿着 x 轴径向运动,根据式(5)可近似地计算出传感器沿着 x 轴径向不同位置的灵敏度,在这里分别模拟计算了5个不同半径的传感器沿着 x 轴径向的灵敏度,如图3所示。从5组对不同半径的传感器的灵敏度随径向位置变化的曲线中可以看出:在传感器的正上方即离传感器表面距离最近的地方,其灵敏度最高,随着径向距离的增加,其灵敏度迅速降低;传感器的灵敏度随半径的不同,其分布也不一样,在其敏感

空间内传感器的半径越大,其灵敏度越高。

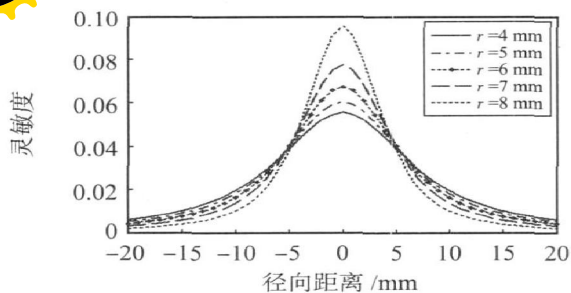


图 3 不同半径传感器灵敏度分布

Fig 3 Sensitivity distribution of electrostatic sensor with different radius

2.3 静电传感器空域谱分析

获得静电传感器的空间灵敏度分布函数是对静电传感器敏感特性分析的基础,从图 3和图 4可以看出:传感器的灵敏度曲线和高斯脉冲函数形状非常相似,因此,采用高斯脉冲函数对传感器的灵敏度曲线进行拟合。Matlab软件提供的 Curve Fitting Tool能够很方便地进行曲线拟合。可以选择不同函数形式和不同的拟合算法进行曲线拟合,从多个拟合结果来看,采用高斯函数的个数越多,拟合精度也越高,但拟合运算所需的时间也越长。图 4为采用单个高斯函数和 2个高斯函数对灵敏度曲线拟合的效果图,其中,采用单个高斯函数和 2个高斯函数进行拟合时,均方根误差分别为 0.003 15和 0.000 239 7。

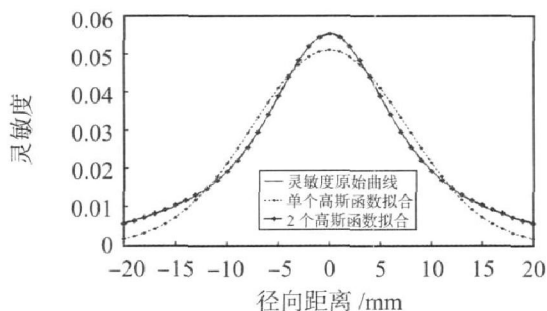


图 4 拟合效果比较

Fig 4 Comparison of fitting effect

图 5中列出了不同半径的传感器的空间频谱分布图,从静电传感器的空域频谱图来看,静电传感器的探极在空间上为一个低通滤波器,意味着只有空间上的低频信号才能通过;半径大的传感器其空间频谱相对较宽。

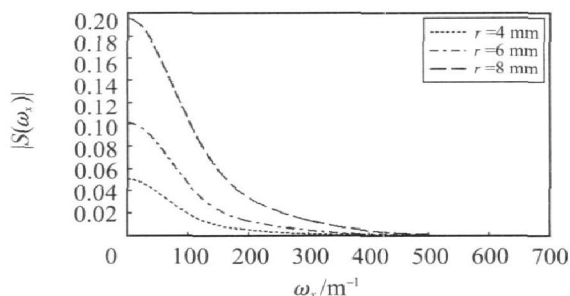


图 5 不同半径传感器的空间频谱变化

Fig 5 Spatial frequency spectrum of sensor with different radius

2.4 静电传感器的频率响应分析

对静电传感器的频率响应特性分析是对确定前置放大电路、信号调理和数据采集等相关电路技术指标的前提。这里,将运动的电荷颗粒视为点电荷,经过传感器时的输入信号表示为 $\delta(x+vt)$,则有传感器探极的输出感应电量 $Q(t)$ 亦为静电传感器的冲激响应 $h(t)$,即

$$Q(t) = h(t) = \int \delta(x+vt) S(x) dx.$$

根据冲激函数的性质 $\int f(t) \delta(t-t_1) dt = f(t_1)$,则可以

得出冲激响应为

$$h(t) = S(-vt).$$

因此,可以求出传感器的频率响应为

$$H(f) = Q(f) = \frac{1}{v} S\left(-\frac{f}{v}\right) = \frac{a_1 c_1}{v} \sqrt{\pi} \frac{\pi^2 q^2}{e} e^{\frac{2\pi b_1 q f}{v}} + \frac{a_2 c_2}{v} \sqrt{\pi} e^{\frac{\pi^2 q^2}{e}} e^{\frac{2\pi b_2 q f}{v}}. \quad (6)$$

图 6为在颗粒速度一定的情况下不同半径的传感器的频率响应图,从图中可以看出:在时域上传感器的频率特性和空域上的频率特性非常类似,传感器在时域时也为一个低通滤波器,且半径大的传感器,其频带较宽。

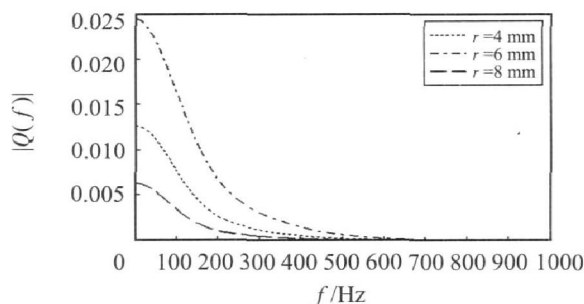


图 6 半径对频率响应的影响

Fig 6 Effect of radius on frequency response

从传感器的时域频率响应特性表达式可以看出:其频率特性和颗粒的运动速度有关,颗粒的运动速度越快,其产生的感应信号的频带越宽,但幅值越小,图 7为不同速度下的传感器的时域频率响应比较图。

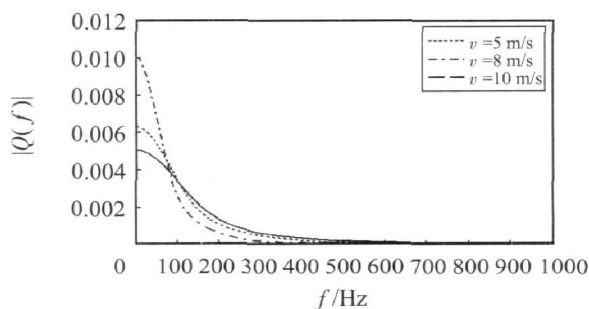


图 7 对不同速度颗粒的频率响应

Fig 7 Frequency response to particle with various velocity

3 实验

为了模拟航空发动机尾喷管进行尾气排放环境,构建了如图 8所示的实验系统。该实验系统采用燃油燃烧器、

风机、不锈钢管道、压缩机等模拟发动机燃烧产生的尾气与颗粒。燃油燃烧器采用航空煤油作为燃料,通过调节风门可以控制进入管道内的空气量大小,用来模拟不完全燃烧产生的碳烟颗粒。采用静电喷粉器来模拟发动机气路环境中产生的异常荷电颗粒物,它由压缩机、高压电发生装置、喷枪、粉桶这四部分组成,喷枪出口处有一电晕,通过高压使得周围空气电离,当喷射出的颗粒物通过该区域后而荷电,其颗粒浓度和电压均可调节。

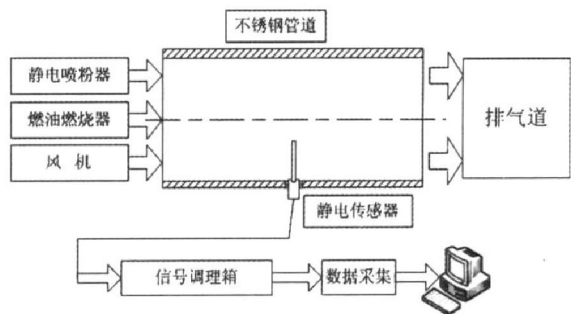


图8 模拟实验系统

Fig 8 Simulated experimental system

为了对比不同半径探极的传感器灵敏度差异,在该模拟实验系统中进行对比实验,在向管中喷入铁粉颗粒以模拟发动机发生碰磨故障时产生的荷电颗粒,分别用4 mm和6 mm的2只传感器进行监测,2只传感器输出的信号如图9所示。可以看出:半径为6 mm的传感器所产生的感应信号幅度要大于半径为4 mm的传感器的感应信号。

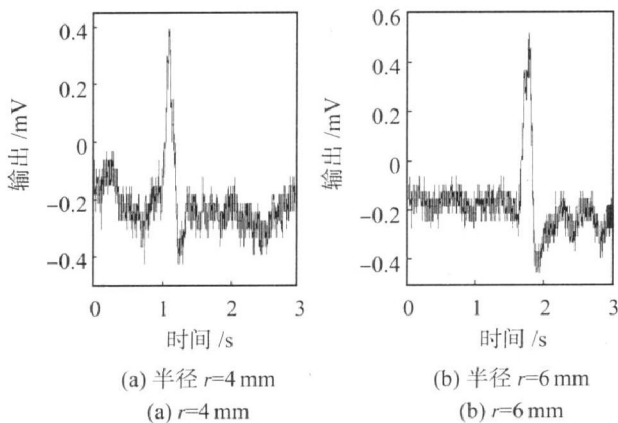


图9 不同半径传感器输出信号

Fig 9 Signal of sensor with various radius

为了对比不同速度的荷电颗粒产生信号的差异,采用荷电小球构成一单摆系统,保证小球经过传感器的敏感空间时候,与其表面的距离保持不变。当小球运动到最低位置时候,此时的运动速度方向为水平方向。

实验前通过摩擦让小球荷电,然后,让荷电的小球从不同的高度落下(分别距离最低点为 $h_1 = 300 \text{ mm}$ 和 $h_2 = 1300 \text{ mm}$),使得荷电小球以不同的速度经过传感器的敏感空间,最后对输出信号做频谱分析,结果如图10所示。由于每次小球的荷电量有差异,所以,对频谱数据进行了归一化处理,从图中可以看出:从1300 mm处落下是产生的信号

频谱要宽,也就是说,小球的运动速度越快,幅频特性中最大值对应的频率也越高,传感器输出信号的频带越宽。

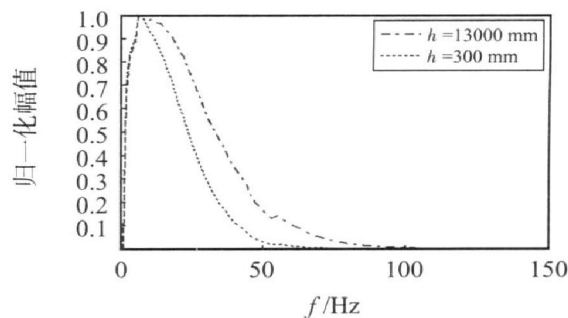


图10 速度对输出信号频谱的影响

Fig 10 Effect of various velocity on frequency spectrum

4 结 论

综合以上分析和实验结果可以看出:静电传感器的灵敏度分布空间与随着半径的增加而加大;静电传感器在空域和时域上均为一个低通滤波器,空域频谱和时域频谱均随半径的增加而增加;传感器的时域频率响应不仅和传感器的半径有关,还和颗粒的速度有关,颗粒运动速度越快传感器的输出信号频率越宽,这对后续的静电监测系统设计如前置放大电路设计提供了指导,同时,也为通过静电监测信号对颗粒的特性进行分析提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 利凤祥,李越森,周为民.某典型振动条件下发动机点火试验研究[J].航空动力学报,2002,17(5):641-644.
- [2] 张勇,刘冠军,邱静.基于图像自动测量的航空发动机故障检测技术研究[J].机械科学与技术,2008,27(2):176-179.
- [3] Honor Powrie, Ari Novis. Gas path debris monitoring for F35 joint strike fighter propulsion system PHM[C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Montana, USA, IEEE 2006, 1-8.
- [4] Ari Novis, Honor Powrie. PHM sensor Implementation in the real world: a status report[C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference, USA, IEEE 2006, 1-9.
- [5] Powrie H E G, McNicholas K. Gas path condition monitoring during accelerated mission testing of a demonstrator engine[C]//The 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Seattle WA, USA, AIAA 1997, 2904.
- [6] 许传龙,汤光华,黄健,等.基于静电传感器空间滤波效应的颗粒速度测量[J].化工学报,2007,58(1):67-74.
- [7] 任俊,沈健,卢寿慈.颗粒分散科学与技术[M].北京:化学工业出版社,2005:25-28.
- [8] Powrie H E G. Electrostatic charge generation associated with machinery component Generation[C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Montana, USA, IEEE 2002, 2927-2934.

作者简介:

文振华(1976—),男,湖北天门人,博士研究生,研究方向为航空发动机状态监测与故障诊断。