

航空发动机砂尘吸入物静电监测仿真实验

孙见忠¹, 姜 衡², 陈颖达³

- (1. 南京航空航天大学 民航学院 民航飞机健康监测与智能维护重点实验室, 南京 211106;
2. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106;
3. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 提出了航空发动机砂尘吸入物静电监测的仿真实验方法, 实验以软件 ANSYS 电磁场分析模块建立有限元模型为基础, 模拟不同粒径、荷质比、运动速度及质量浓度情况下砂尘吸入物的静电感应信号, 并分别从时域与频域对感应电荷与电压信号进行分析, 研究砂尘吸入物的粒径及其他宏观参数与静电监测信号之间的关系, 建立用以表征砂尘颗粒粒径大小的特征指标。基于 IDMS(进气监测系统)感应电压信号功率谱密度分布建立了特征向量, 并以其曼哈顿距离与欧氏距离作为特征指标表征砂尘颗粒粒径大小。经仿真实验验证: 特征指标与砂尘粒径呈正相关, 且不受砂尘吸入物运动速度及荷质比变化的影响, 但受砂尘吸入物质量浓度影响。进一步研究将利用质量浓度对特征指标进行修正, 并开展验证实验。

关 键 词: 航空发动机; 砂尘环境; 颗粒粒径; 静电监测; 有限元分析; 时频域分析

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Aero engine sand dust ingestion electrostatic monitoring simulation experiment

SUN Jianzhong¹, JIANG Heng², CHEN Yingda³

- (1. Civil Aviation Key Laboratory of Aircraft Health Monitoring and Intelligent Maintenance, College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
3. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A simulation experiment method for electrostatic monitoring of aero engine dust ingestion was proposed. Based on ANSYS electromagnetic field analysis module, a finite element model was established, the electrostatic induction signals of sand dust ingestion under different particle sizes, charge-mass ratios, moving speeds and mass concentrations were simulated experimentally, and the induced charge and voltage signals were analyzed from the time domain and frequency domain, respectively. The relationship between particle size and other macroscopic parameters of sand ingestion and electrostatic monitoring signals was studied to establish a characteristic index used to characterize the particle size of sand dust particles. The eigenvectors were established based on the power spectral density distri-

收稿日期: 2017-11-19

作者简介: 孙见忠(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为航空发动机状态监控与健康。E-mail: sunjianzhong@nuaa.edu.cn

引用格式: 孙见忠, 姜衡, 陈颖达. 航空发动机砂尘吸入物静电监测仿真实验[J]. 航空动力学报, 2018, 33(12): 2913-2923. SUN Jianzhong, JIANG Heng, CHEN Yingda. Aero engine sand dust ingestion electrostatic monitoring simulation experiment [J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12): 2913-2923.

butions of the IDMS (ingested debris monitoring system) induced voltage signals. The Manhattan distance and the Euclidean distance were used as characteristic indicators to characterize the sand particle size. Simulation results showed that the characteristic index was positively correlated with sand dust particle size, and it was not affected by the movement velocity and charge-mass ratio of sand ingestion, but affected by the sand dust ingestion mass concentration. Further studies will use quality concentration to correct the characteristics of the indicators and carry out verification experiments.

Key words: aero engine; sand dust environment; particle diameter; electrostatic monitoring; finite element analysis; time domain analysis and frequency domain analysis

飞机在起飞、着陆、地面试车中,动力装置容易吸入由风或飞机气动诱发扬起的砂粒或灰尘,这些沙尘吸入物将直接影响发动机的可靠性和使用寿命。尤其是常处于砂雾环境之中的直升机发动机,尘砂对发动机的影响尤为明显^[1]。含砂尘或污染严重的大气环境中,砂尘等颗粒物的侵入对航空发动机性能以及可靠性的影响已引起航空业内的高度关注^[2-3]。

针对沙尘吸入物对发动机的影响问题,研究主要涉及整机吞砂实验^[4]、冷却通道沉积堵塞实验^[5]、进气砂尘防护装置设计^[6-7],以及砂尘环境和发动机吞砂实验等相关标准的制定,如美军标 MIL-STD-810、国军标 GJB150. 12^[8-9]等。研究表明,自然界中沙尘主要成分是石英,吸入的大颗粒砂石在撞击高速旋转的压气机叶片时,会造成叶片裂纹或者断裂,小颗粒的尘砂则会对叶片的型面形成磨蚀,使压气机效率降低、耗油增加。发动机压气机的磨损状态及在翼寿命与沙尘吸入物总量具有直接关系^[10],目前实践中多通过发动机地面吞砂实验确定发动机的抗污能力,即在尘砂环境中发动机在达到允许的功率损失极限之前其所能吞咽尘砂污物的总质量,如美军标 MIL-E-5007C 规定的尘砂耐受质量为 21. 8 kg^[11]。微细颗粒还会随冷却空气侵入涡轮叶片冷却结构中形成沉积堵塞,影响冷却效果,导致涡轮叶片超温甚至烧毁。

Barboza 等在实验室条件下验证了基于激光消光法的发动机颗粒吸入物的质量浓度实时监测系统的可行性,为进一步研究适应于机载化的原型系统奠定了基础^[12]。但与多数光学法气固两相流测量系统的问题类似,测量结果对颗粒的粒径依赖性较大,另外光学系统易受污染也是未来机载化应用的难题。另一种被认为具有较大的机载化应用潜力的技术的是基于静电感应原理的监

测系统^[13]。这种方法的基本原理是运动的固体颗粒物会带有一定的静电荷,利用静电传感器配合调理电路对其进行测量可获得颗粒物的质量浓度、尺寸及运动速度等相关信息。公开文献表明发动机气路静电监测系统,包括进气监测系统 IDMS(ingested debris monitoring system)和尾气监测系统 EDMS(engine distress monitoring system)已应用于航空发动机上^[14],IDMS 主要实现对进气道离散大颗粒物(如铆钉、橡胶等)和微小颗粒物团(如砂尘、盐雾等)的等外来物的监测,EDMS 实现对气路典型故障(如叶片碰磨、热端部件烧蚀、燃烧系统故障等)颗粒物的直接监测,综合 IDMS 和 EDMS 信息可以实现对吸入外来物的危害性进行评估以及判断是否影响发动机正常运行。国内在 EDMS 基础理论、传感器系统及实验方面开展了研究,目前已成功开展了 3 个型号的地面台架实验(涡轴^[15-16]、小型涡喷^[17-18]及大型民航涡扇发动机^[19]),为国产航空发动机机载化应用提供了技术储备。相比而言,在 IDMS 理论和应用基础研究方面还存在较大差距,目前主要完成了 IDMS 原型设计及原理实验^[20],特别是针对发动机沙尘吸入物定量监测的一些基础理论问题有待深入研究^[21]。本文在课题组已有研究基础上^[15-21],开展基于 IDMS 的发动机沙尘吸入物监测仿真实验研究,研究沙尘吸入物粒径与 IDMS 静电传感器信号特征值间的关系,为实现基于 IDMS 的沙尘吸入物定量监测与评估提供理论依据。

1 环形传感器理论模型及有限元仿真

1. 1 环形传感器理论模型分析与验证

沙尘吸入物进入航空发动机后不可避免地会产生摩擦,研究表明,砂尘、金属碎片、橡胶等颗粒

会由于碰撞摩擦而携带不同极性与数值的电量,且随气流通过静电传感器探极时会产生明显的静电感应现象^[22-23],本文研究采用环形静电传感器,如图 1 所示。

于管道内表面安装环形 IDMS 传感器,可使颗粒微团的运动不受影响。由库仑定律和高斯定理,可求出当单个带电颗粒 q 处于环形传感器的敏感空间内时,环形传感器上的感应电荷量。将环形中心设为坐标原点,圆柱轴向为 z 轴方向,可求得其具体空间模型为式(1)^[24-25]。其中 R_i 表示等效电阻, Q 为环形传感器上产生的感应电荷量, D 为传感器直径, L 为传感器轴向长度, θ 为空间模型中的角度, y 和 z 分别为点电荷在空间的径

$$Q = -\frac{qD}{4\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{(0.5D - y\cos\theta)}{[y^2 + (0.5D^2) - (Dy\cos\theta)]} \cdot Fd\theta$$
$$F = \frac{(z + 0.5L)}{[y^2 + (0.5L^2) - (Ly\cos\theta) + (z + 0.5L)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{(z - 0.5L)}{[y^2 + (0.5D^2) - (Dy\cos\theta) + (z - 0.5L)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

由式(1)可得感应电荷量 Q 与以下几个要素相关:①单颗粒带电量 q ;②颗粒的空间位置;③传感器尺寸。在不考虑传感器尺寸的条件下,感应电荷量正比于颗粒带电量,其与颗粒空间位置的关系复杂,难以精确定量描述,但仍可得到以下结论:感应电荷量与颗粒的径向坐标数值的绝对值呈正相关,与轴向坐标数值的绝对值呈负相关。为描述传感器敏感区域在空间上的分布规律,引入空间灵敏度的概念^[26]:在某一空间位置上传感器感应电荷量与点电荷电量大小的比值。文献^[24,27]利用静电传感器标定装置,控制单个油滴带电量与处于传感器敏感空间的径向位置,对单点电荷传感器数学模型及传感器特性进行了实验验证,证明了其正确性。目前有关传感器特性的理论和实验研究主要针对单颗粒^[24-27],而在实际监测发动机气路或油路静电时,往往是一定量的带电颗粒形成的颗粒微团位于传感器敏感空间内。由于颗粒间存在相互作用,欲建立数学模型以精确求解具有相当的难度。本文在现有的研究基础之上,建立 ANSYS 有限元仿真模型以研究在颗粒微团处于敏感空间内的情况下 IDMS 静电监测信号与颗粒微团的荷质比、运动速度及质量浓度等宏观参数的相互关系,从而指导砂尘吸入物监测评估的进一步实施。

1.2 有限元仿真模型

1.2.1 有限元法及应用工具

有限元法是工程技术中对连续物理系统进行

向和轴向位置。

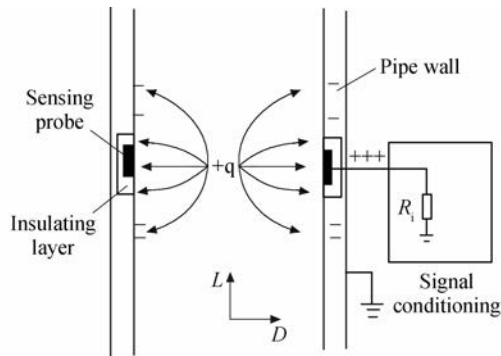


图 1 环形静电传感器安装示意图
Fig. 1 Diagram of annular electrostatic sensor installation

分析、设计、实验的一种高效、常用的数值计算方法。本文使用 ANSYS 电磁学模块进行分析研究,实现问题求解。

1.2.2 有限元仿真数学模型

砂尘吸入物带电颗粒可以等效为点电荷,由静电场的 Poisson 方程与 Dirichlet 边界条件,带电颗粒与传感器的关系可表示为^[22]

$$\begin{cases} \nabla \cdot [\epsilon_0 \nabla \phi(x, y, z)] = -\rho(x, y, z) \\ \phi(x, y, z) |_{(x, y, z) \in \Gamma_p} = 0 \\ \phi(x, y, z) |_{(x, y, z) \in \Gamma_e} = \text{const} \\ E_\infty = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\phi(x, y, z)$ 为场域内的电势分布; ϵ_0 为真空介电常数; $\rho(x, y, z)$ 为场域内的体电荷分布; Γ_p 为管道内壁,因接地,电势为零; Γ_e 为环状电极,因其为等势体,电势为某一确定常数; E_∞ 为无穷远处的场强,其值为零。由静电场理论,在电荷密度分布与边界条件确定的情况下,感应区域内的电场分布 $E(x, y, z)$ 是唯一确定的,由高斯定理,感应电荷量 Q 为

$$Q = \int_S D(x, y, z) dS = \epsilon_0 \int_S E(x, y, z) dS \quad (3)$$

式中 S 为环形传感器的内表面积; $D(x, y, z)$ 为 S 上的电通量分布。上式难以直接运算,因此采用有限元仿真计算环形传感器上产生的感应电荷量。

1.2.3 有限元仿真模型

IDMS 有限元仿真模型主要由以下几个部分

组成:①砂尘颗粒运动所在的进气道空间;②探测由静电感应现象而产生的静电信号的传感器电极;③管道外壁。具体步骤如下:

1) 建立有限元模型。

如图 2 所示,将环形传感器电极中心设为坐标原点,模型轴向为 z 轴方向, x 、 y 轴方向为模型径向,模型长为 300 mm,直径为 100 mm,电极轴向尺寸为 10 mm。为满足计算精度要求,结合模型的实际结构特点,采用 40 节点 3-D 六边形单元 Solid 122,映射网格划分。

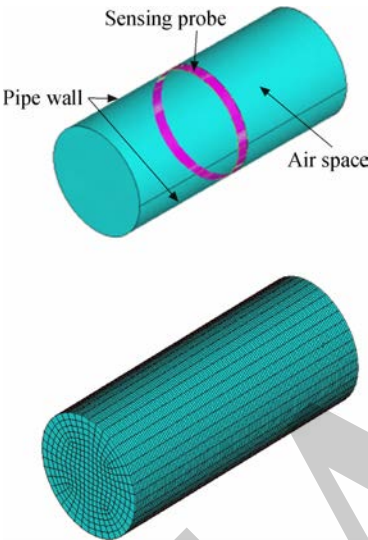


图 2 IDMS 系统三维仿真模型及网格划分示意图
Fig. 2 Diagram of IDMS 3D simulation model and mesh generation

2) 施加载荷并求解。施加载荷是将实际条件下的作用函数与边界条件等效施加于模型的过程。对本模型而言,有以下几处需要施加载荷:因管壁接地,需施加电压边界条件零电位约束;环形传感器电极为等势体,需将各节点设为同一电位值。且因将带电颗粒视为点电荷,需结合颗粒粒径与数量的情况,从而改变点电荷对模型施加的载荷密度与位置。ANSYS 电磁场模块得到的基本解是各节点电位值,还需使用通用后处理器处理所得结果,从而获得场强值,进一步结合高斯定理计算得到最终的感应电荷量。

根据目前已有的理论分析和实验研究结论^[24-27],对已建立的 IDMS 有限元模型进行了验证。模拟不同电量点电荷于不同径向位置通过模型传感器敏感空间,对产生的感应电荷进行仿真求解,可得到感应电荷量随颗粒带电量、径向位置的变化规律及传感器的空间灵敏度分布(图 3),

其中 R 表示颗粒的径向位置坐标。

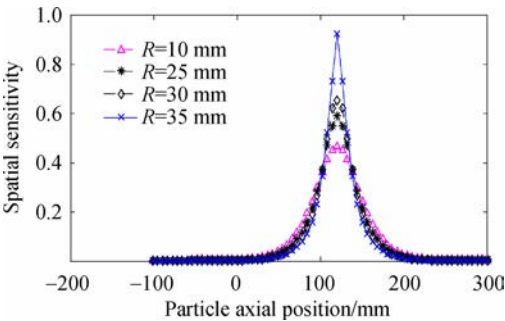


图 3 IDMS 传感器空间灵敏度
Fig. 3 IDMS sensor spatial sensitivity

2 砂尘吸入物静电感应信号仿真流程

现有的实验装置难以精确控制砂尘颗粒的尺寸分布及荷电等参量,而建立有限元仿真模型并在此基础上开展仿真实验,可以有效模拟不同尺寸分布、荷电量及质量浓度的砂尘颗粒,并通过分析由砂尘颗粒运动而产生的静电感应信号的特征值与砂尘颗粒粒径大小的关系,最终实现以传感器采集的静电监测信号判断进入进气道的砂尘颗粒粒径大小的目标。

砂尘吸入物静电监测信号仿真主要分为两个方面:仿真颗粒微团的产生与颗粒微团在管道内的运动而产生的静电感应现象。仿真颗粒微团的产生在 Matlab 程序中完成,其具体步骤如下:

- 1) 由砂尘颗粒质量浓度结合模型空间体积与颗粒尺寸分布,确定各尺寸等级颗粒的总质量;
- 2) 进而由质量浓度确定各尺寸等级颗粒的总体积与数量;
- 3) 再由颗粒荷质比确定模型空间体积内颗粒总带电量;
- 4) 由砂尘颗粒的总数量与总带电量,得各尺寸等级颗粒的带电量;
- 5) 将砂尘颗粒随机分布至其所在空间区域,各尺寸等级颗粒携带相应的电荷量,完成颗粒微团的产生。

颗粒微团在管道内的运动而产生的静电感应现象模拟在 ANSYS 程序中完成,其具体步骤如下:

- 1) 在 ANSYS 环境下,已知各个颗粒粒径和带电量数值,所有砂尘颗粒由初始位置沿模型轴向,也即 z 轴正方向,作直线运动,每步移动一个网格距离,各颗粒每步的空间位置均有记录,并判

断位于传感器敏感空间内的砂尘颗粒集;

2) 对任意一步,根据敏感空间内颗粒带电量及其空间位置,对仿真模型施加电荷载荷,计算电极上的感应电荷量并记录;

3) 颗粒微团继续直线运动,如此重复,直至程序给定的步数为止。

2.1 颗粒微团的产生

所建管道模型为深度为 300 mm,直径为 100 mm 的圆柱筒,笛卡儿坐标系 z 方向为圆柱轴向, x 方向为圆柱径向。

在创建颗粒微团前,如图 4 中的红色轮廓圆面所示,先创建若干与圆柱端面平行的假想圆形平面,并以此为基准,令一定数目的颗粒点随机分布在各圆形平面上,各平面相距 3 mm,与步长数值相等。

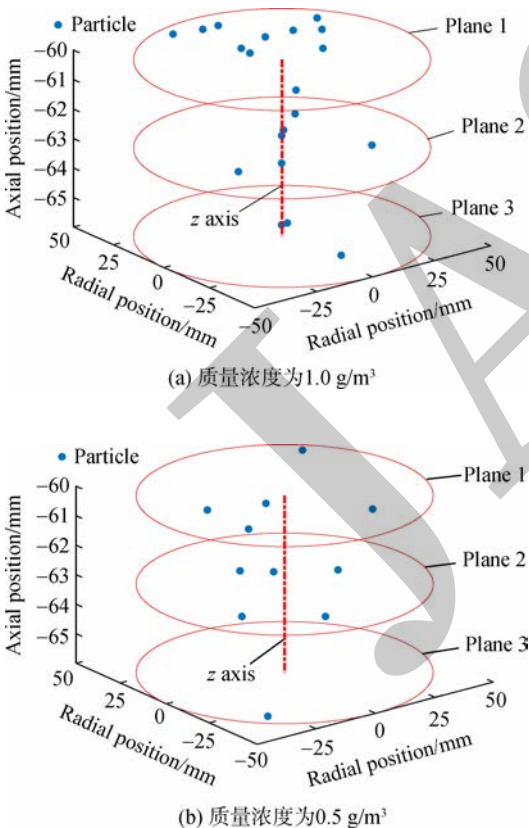


图 4 颗粒微团产生示意图

Fig. 4 Diagram of creation of particles

随机产生的颗粒微团示意图如图 4 所示,其中颗粒质量浓度存在 2 倍的关系,因而颗粒数量大致为 2 倍关系,作为示意,图 4 只展现了 3 个假想平面。

进行颗粒分布之前,先确定有颗粒分布的平面数量,即并非所有平面都有颗粒分布,且各平面

的颗粒数目未必相等。确认有颗粒分布的平面上的颗粒点数目不能超过该平面的节点个数,而所有平面颗粒数之和要与理论上基于质量浓度的计算结果相符,分布完成后,将全部颗粒的初始 x 、 y 、 z 坐标分别保存于 3 个数据文件。

环形传感器的敏感空间是图 5 所示的椭球体空间区域。传感器产生感应电荷是颗粒在其敏感空间内运动的结果,即对于任意一步来说,处于敏感空间内的颗粒使传感器探极产生感应电荷,而敏感空间之外的颗粒在探极上产生的静电感应电荷非常微弱,为计算方便可以忽略。

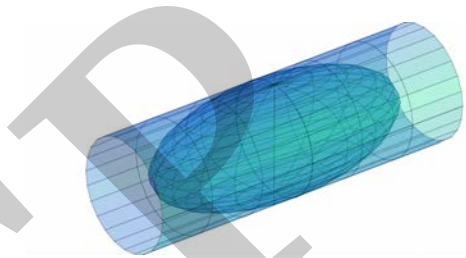


图 5 环形传感器敏感空间示意图

Fig. 5 Diagram of sensitivity spatial of annular sensor

2.2 颗粒微团的运动及感应电荷求解

ANSYS 程序采用命令流的形式,分为以下几个步骤:

1) 定义程序运行所需的常数、变量及数组,包括模型尺寸的参数、记录场强的变量、储存颗粒空间位置的数组、传感器节点数组、储存感应电荷结果的数组等;

2) 定义材料,建立模型,划分网格,并施加边界条件准备求解;

3) 导入数据文件,获取颗粒微团的初始位置信息及粒径尺寸带电量等信息;

4) 判断敏感空间内颗粒集,并根据 x 、 y 方向场强投影得到法向场强,在法向由高斯定理计算出传感器的感应电荷量并保存,令颗粒微团前进一个网格距离,进行下一步计算,重复步骤 4),直至程序给定的步数为止。

3 仿真实验结果及信号分析

3.1 仿真实验

本文重点分析静电传感器上产生的感应静电信号特征值与砂尘吸入物颗粒粒径大小的关系,仿真实验共选取 8 组不同粒径 d 的砂尘微团开展了仿真实验,如表 1 所示。

仿真实验结果主要有以下几部分:

1) 8 组 2000 步单一粒径基准信号。颗粒质量浓度与荷质比均为基准数值, 每组内所有颗粒粒径均相同, 对上述 8 种粒径, 每种粒径对应有一组 2000 步的仿真信号。

2) 3 组 2000 步混合粒径基准信号。颗粒质量浓度与荷质比均为基准数值, 大、中、小混合粒径各一组, 大粒径为 $142.5\text{ }\mu\text{m}$ 与 $127.5\text{ }\mu\text{m}$, 各以 50% 质量分数混合而成; 中粒径为 $97.5\text{ }\mu\text{m}$ 与 $82.5\text{ }\mu\text{m}$, 各以 50% 质量分数混合而成; 小粒径为 $52.5\text{ }\mu\text{m}$ 与 $37.5\text{ }\mu\text{m}$, 各以 50% 质量分数混合而成, 每组生成 2000 步仿真信号。

3) 13 组 2000 步单一粒径变质量浓度信号。颗粒荷质比仍为基准数值, 与(1)不同的是变化其颗粒质量浓度, 共计 13 组, 涉及 $67.5\sim142.5\text{ }\mu\text{m}$ 共 6 种粒径, 包括基准质量浓度的 1 倍、2 倍、3 倍、4 倍, 每组产生 2000 步仿真信号。

表 1 砂尘颗粒粒径

Table 1 Diameters of sand dust particles

组别	粒径/ μm	组别	粒径/ μm
1	37.5	5	97.5
2	52.5	6	112.5
3	67.5	7	127.5
4	82.5	8	142.5

3.2 砂尘吸入物静电监测仿真信号

图 6 所示为相同质量浓度、相同荷质比、不同粒径的砂尘颗粒产生的感应电荷信号, 由传感器理论模型分析可知, 感应电荷大小会受砂尘质量浓度、荷质比等多种因素影响。图 6 所示结果表明, 当砂尘吸入物颗粒满足相同质量浓度与荷质比时, 颗粒微团整体带电量相等, 而小粒径颗粒数

量更大, 空间分布更均匀, 因而通过环形传感器探测时产生的感应电荷的波动性更小。

传感器输出的感应电压信号, 与传感器感应电荷量 Q 的关系为^[28]

$$U(t) = R_0 Q'(t) = R_0 \frac{dQ}{dt} \tag{4}$$

其中 R_0 为测量电路的等效电阻。由式(4)可见, 传感器输出的电压信号的幅值(或能量)与带电颗粒的带电量成正比, 同时也与带电颗粒的运动速度有关。ANSYS 程序是以网格距离作为信号仿真步长的, 后续仿真数据分析中可假设沙尘颗粒随气流的运动速度, 将速度值除以单位网格距离即可得到信号的采样频率。图 7 所示为运动速度为 15 m/s 、粒径分别为 $37.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $142.5\text{ }\mu\text{m}$ 的沙尘吸入物产生的静电感应电压信号。

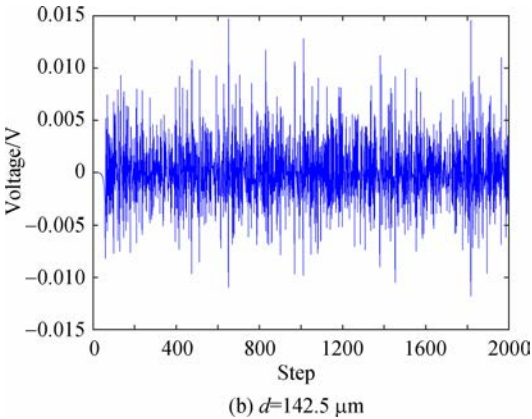
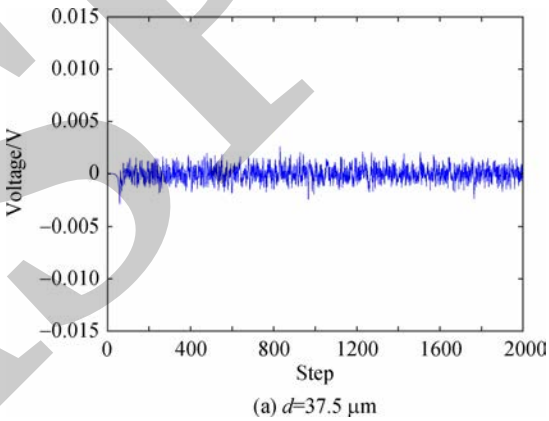


图 7 电压信号图

Fig. 7 Diagrams of voltage signals

图 8 所示结果表明, 砂尘质量浓度与荷质比一定的情况下, 电压信号幅值随砂尘吸入物颗粒粒径增大而增大, 其原因为电荷信号的波动性差异, 小粒径颗粒空间分布更均匀, 因而通过环形传感器探测时产生的感应电荷的波动性(dQ/dt)更小。在砂尘颗粒运动速度及测量电路等效电阻不

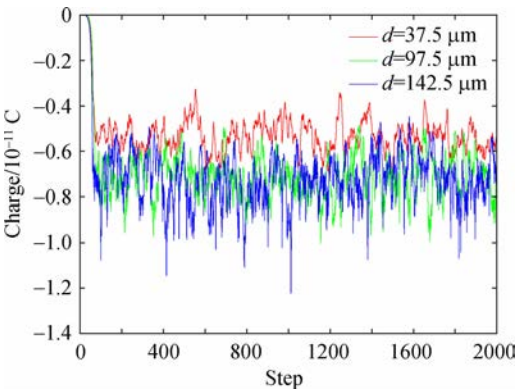


图 6 电荷信号图

Fig. 6 Diagram of charge signals

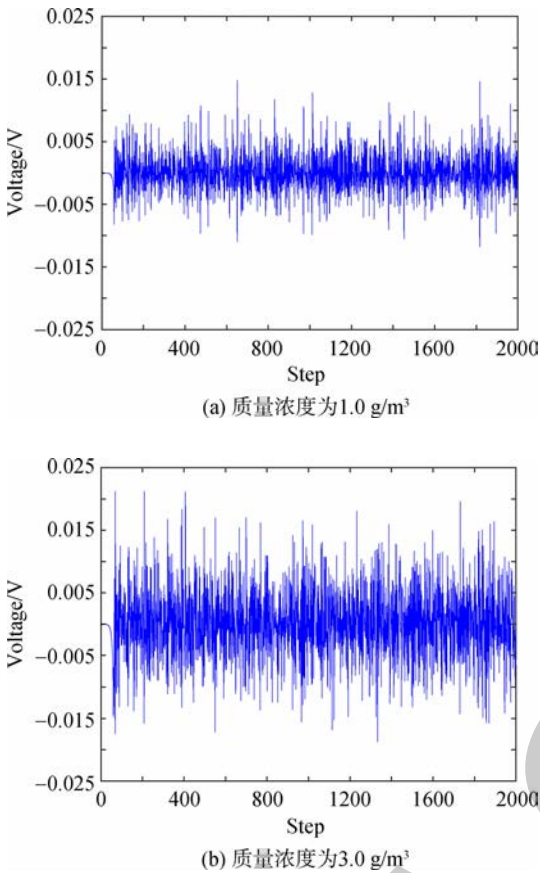


图 8 不同质量浓度颗粒电压信号图($d=142.5\mu\text{m}$)
Fig. 8 Particle voltage signals of different mass concentrations ($d=142.5\mu\text{m}$)

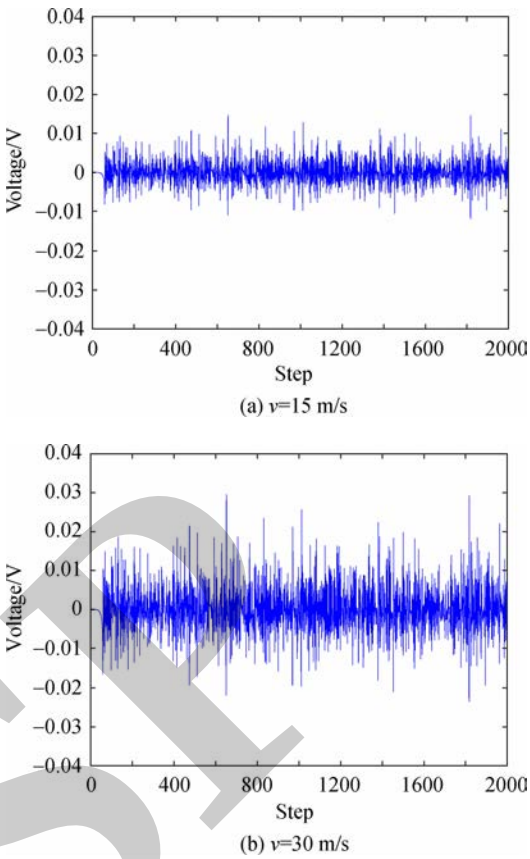


图 9 不同运动速度颗粒电压信号图($d=142.5\mu\text{m}$)
Fig. 9 Particle voltage signals of different speeds of movement ($d=142.5\mu\text{m}$)

变的情况下,电压信号与电荷信号的变化率即 dQ/dt 成正比,因此,电压信号幅值随砂尘吸入物颗粒粒径增大而增大。

图 8 所示为相同粒径、速度、荷质比,质量浓度分别为 1.0 g/m^3 和 3.0 g/m^3 的砂尘吸入物产生的静电感应电压信号。显然,电压信号幅值随砂尘吸入物颗粒质量浓度增大而增大。这主要是由于砂尘吸入物颗粒的质量浓度增加,产生的感应电荷量 Q 总体水平上升,在颗粒运动速度不变的情况下, dQ/dt 上升,所以感应电压信号幅值增加。

图 9 所示为相同粒径、荷质比、质量浓度,运动速度 v 分别为 15 m/s 和 30 m/s 的砂尘吸入物产生的静电感应电压信号。同样,由于颗粒运动速度的上升, dQ/dt 上升,所以电压信号幅值随运动速度增大而增大。

综合图 7~图 9,静电传感器感应电荷信号受砂尘吸入物粒径、质量浓度及荷质比影响,而感应电压信号除上述影响因素外,还与颗粒物运动速度相关。因此,单从砂尘吸入物颗粒静电感应电

荷或电压原始信号难以有效识别,砂尘吸入物颗粒粒径大小相关信息需进一步分析其时频特征,提取合适的特征参数以表征砂尘吸入物颗粒粒径大小。

3.3 静电信号的功率谱分析

3.3.1 功率谱分析

功率谱表征了信号功率在频率轴上的分布情况。本文采用功率谱分析中的 Welch 方法,对数据进行加窗处理,先分段求功率谱,再做平均。

3.3.2 功率谱分析实例

图 10 和图 11 分别为质量浓度为 1.0 g/m^3 、荷质比为 $-100\mu\text{C/kg}$ 、运动速度为 15 m/s 、等效采样频率为 5000 Hz 、颗粒粒径不同的砂尘吸入物产生的静电感应电荷与电压信号功率谱分析结果。

由图 10 和图 11 可得不同粒径的砂尘吸入物颗粒产生的静电感应电荷信号经功率谱分析后其图像峰值有差异。静电感应电压信号的功率谱分析结果则有明显区别,由图 11 结果可见小粒径颗粒的功率主要集中在低频段,大粒径颗粒的功率

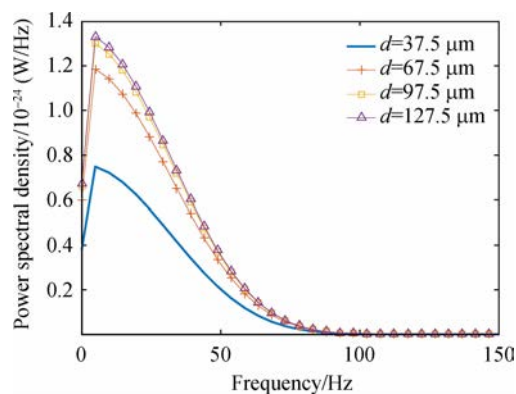


图 10 电荷信号功率谱分析图

Fig. 10 Spectrum analysis diagram of charge signals

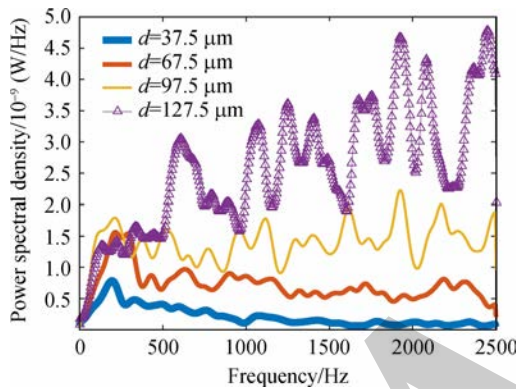


图 11 电压信号功率谱分析图

Fig. 11 Spectrum analysis diagram of voltage signals

主要集中在高频段,且随砂尘吸入物粒径增大功率谱能量逐渐由低频区向高频区转移。因此,后续分析中将对电压信号功率谱做进一步分析,建立合理的特征指标,用以表征砂尘吸入物的颗粒粒径大小相关信息。

图 12 所示为粒径为 $142.5\text{ }\mu\text{m}$ 、荷质比为 $-100\text{ }\mu\text{C/kg}$ 、质量浓度为 1.0 g/m^3 、运动速度分别为 15 m/s 与 30 m/s 的颗粒产生的静电感应电压信号功率谱分析结果。结果表明,功率谱密度

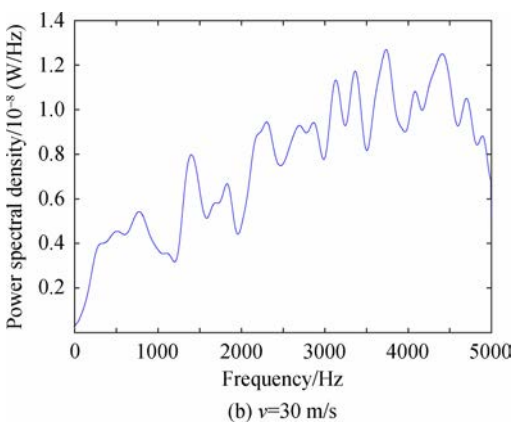
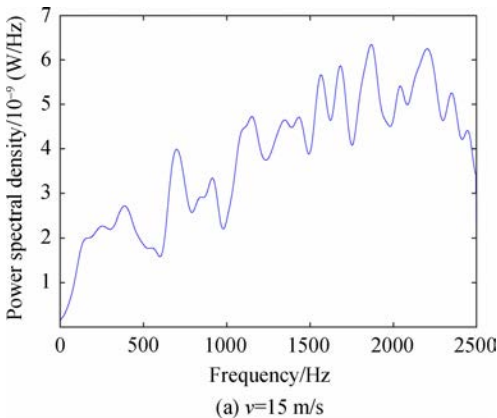


图 12 颗粒运动速度影响对比图($d=142.5\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 12 Comparison diagram of the effect of different particle speeds ($d=142.5\text{ }\mu\text{m}$)

与颗粒运动速度成正比。这是因为颗粒运动速度的变化不影响电荷信号,而在电荷信号不变的情况下,感应电压正比于颗粒运动速度,功率包含电荷与电压乘积因子,因此功率谱密度也正比于颗粒运动速度。因采用单边谱分析,图中频率最大值即为等效采样频率的 $1/2$ 。

图 13 所示为粒径为 $142.5\text{ }\mu\text{m}$ 、质量浓度为 1.0 g/m^3 、运动速度为 15 m/s 、荷质比分别为 $-100\text{ }\mu\text{C/kg}$ 与 $-200\text{ }\mu\text{C/kg}$ 的颗粒产生的静电感应电压信号功率谱分析结果,其中 q/m 表示荷质比。结果表明,功率谱密度与荷质比的平方成正比。这是因为电荷信号与荷质比成正比,由式 (4) 可得,电压信号与荷质比成正比,功率包含电荷与电压乘积因子,因此功率谱密度与荷质比的平方成正比。

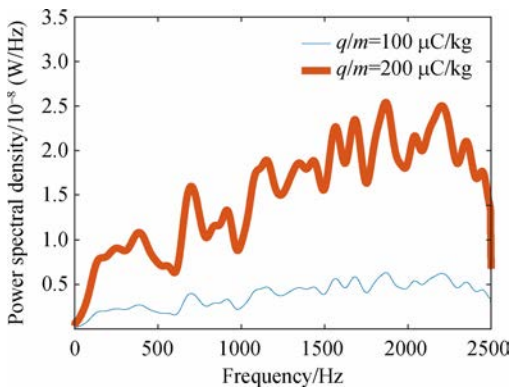


图 13 颗粒荷质比影响图($d=142.5\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 13 Diagram of the effect of charge-mass ratio ($d=142.5\text{ }\mu\text{m}$)

图 14 所示为粒径为 $142.5\text{ }\mu\text{m}$ 、运动速度为 15 m/s 、荷质比为 $-100\text{ }\mu\text{C/kg}$ 、质量浓度 ρ_p 分别

为 1.0 g/m^3 与 3.0 g/m^3 的颗粒产生的静电感应电压信号功率谱分析结果。质量浓度的改变涉及砂尘吸入物颗粒在 IDMS 模型中的空间分布变化,具有一定的随机性,因此质量浓度对功率谱分析结果的影响难以定量描述,仅能定性描述为功率谱密度与质量浓度正相关。

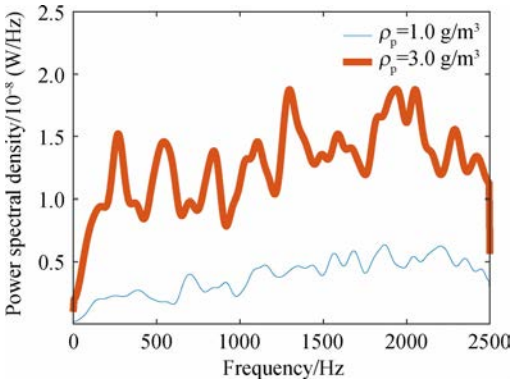


图 14 颗粒质量浓度影响图
Fig. 14 Diagram of the effect of particle mass concentration

进一步,对电压信号功率谱分析的数据进行粗粒化操作,即将功率谱密度分布按频率范围分成 50 等份,每份求功率谱密度均值,对所得 50 个元素按照式(5)进行线性归一化,可得到表征功率谱密度分布的特征向量 $\mathbf{P}$

$$\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_{50}]$$

其中

$$p_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

本文提出功率谱密度分布的特征向量与原点的曼哈顿距离(D_M)和欧式距离(D_E)分别为表征砂尘吸入物颗粒大小的特征指标

$$\begin{cases} D_M = \sum_{i=1}^n |p_i| & (n = 50) \\ D_E = \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i^2} & (n = 50) \end{cases} \quad (6)$$

经仿真实验验证,提出的 D_M 和 D_E 两种指标均不受砂尘吸入物颗粒运动速度与荷质比变化的影响。由图 12 和图 13 结果可见,颗粒运动速度与荷质比对功率谱密度分布的影响表现为按比例缩放 x 轴(图 12)或 y 轴(图 12 与图 13),进一步将频率范围划分成 50 等份求均值可消除图像横向尺寸变化的影响,线性归一化则可消除图像纵向尺寸变化的影响,因此,两种特征指标均对颗粒运动速度与荷质比的变化不敏感。但是质量浓度

的改变会对特征指标产生一定的影响,后续研究将着重探究砂尘吸入物的质量浓度对特征指标的影响,以对指标进行修正。

图 15 所示分别为 D_M 和 D_E 指标随砂尘吸入物颗粒粒径变化的趋势。结果表明,特征指标与砂尘粒径呈正相关,因砂尘吸入物颗粒产生过程中空间分布随机性引起局部偏差。两种距离特征指标的有效性取决于电压功率谱分析图像趋势特点与线性归一化性质的共同作用。如图 11 所示,小粒径颗粒的功率谱密度先随频率增大急剧增大,快速达到峰值后急剧减小,随后保持在较低的功率谱密度,进而线性归一化后的特征向量中数值较小的元素占较大比例,因此特征指标值就偏小;大粒径颗粒的功率谱密度在频率较低时,其功率谱密度数值较小,达到某一频率后,功率谱密度跃升至较大值,其后,功率谱密度随频率增大在较大值附近波动。因此,线性归一化后的特征向量中数值较大的元素占较大比例,特征指标值相比小粒径颗粒更大。

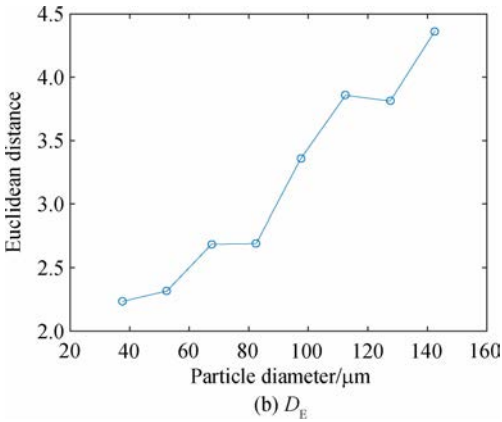
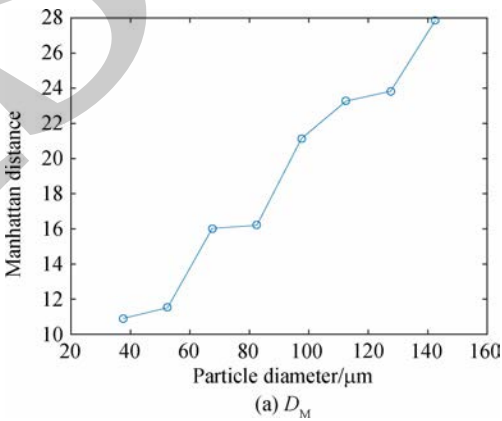


图 15 特征指标随颗粒粒径变化趋势
Fig. 15 Diagram of variation trend of feature indexes with the particle diameter

4 结 论

本文建立了 IDMS 有限元仿真模型,模拟荷电砂尘吸入物通过 IDMS 仿真模型,计算环形传感器产生的静电感应电荷,得到环形传感器的空间灵敏度分布。仿真实验所得结果与前期研究的理论结果一致,证明了仿真模型的正确性,同时也为后续研究砂尘吸入物静电监测提供了一种仿真实验手段。

为研究 IDMS 静电监测信号与砂尘吸入物颗粒粒径的关系,本文开展了不同粒径、荷质比、运动速度及不同质量浓度情况下砂尘吸入物静电感应信号的仿真,分别从时域和频域对感应电荷和感应电压信号进行了分析。得到如下结论:

1) 感应电荷和感应电压时域信号影响因素复杂,感应电荷信号受砂尘吸入物粒径、质量浓度及荷质比影响,而感应电压信号除上述影响因素外,还与颗粒物运动速度相关。

2) 小粒径颗粒的功率主要集中在低频段,大粒径颗粒的功率主要集中在高频段,且随砂尘吸入物粒径增大功率谱能量逐渐由低频区向高频区转移。

3) 电压信号功率谱密度与运动速度成正比,与荷质比的平方成正比。

4) 基于上述结论,提出了表征功率谱密度分布的特征向量,并以特征向量的曼哈顿距离与欧氏距离作为表征砂尘粒径大小的特征指标。

经仿真实验验证,特征指标与砂尘粒径呈正相关,且对砂尘吸入物运动速度及荷质比的变化不敏感,但受砂尘吸入物的质量浓度影响。未来拟进一步研究质量浓度变化与特征指标的量化关系,以对特征指标进行修正,并搭建实验台开展砂尘吸入物静电监测的实验验证。

参考文献:

- [1] 章伟,郭微.浅谈灰尘对直升机动力装置性能和可靠性的影响[C]//湖南国防科技论坛论文集.长沙:湖南省兵工学会,2009:451-454.
- [2] HAMED A, TABAKOFF W C, WENGLARZ R V. Erosion and deposition in turbomachinery[J]. Journal of Propulsion and Power, 2014, 22(2): 350-360.
- [3] CLARKSON R J, MAJEWICZ E J, MACK P. A re-evaluation of the 2010 quantitative understanding of the effects volcanic ash has on gas turbine engines[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2016, 230(12): 2274-2291.
- [4] DUNN M G, PADOVA C, MOLLER J E, et al. Performance deterioration of a turbofan and a turbojet engine upon

exposure to a dust environment[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1987, 109(3): 336-343.

- [5] CARDWELL N D, THOLE K A, BURD S W. Investigation of sand blocking within impingement and film-cooling holes[J]. Journal of Turbomachinery, 2010, 132(2): 021020. 1-021020. 10.
- [6] 曾平君,孙姝,黄河峡,等.直升机/粒子分离器一体化流场特性:第1部分 前进比的影响[J].航空动力学报,2014,29(4):858-866.
ZENG Pingjun, SUN Shu, HUANG Hexia, et al. Integrated flow field characteristics of helicopter/particle separator: Part 1 influence of advance ratio[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(4): 858-866. (in Chinese)
- [7] HIGGINS T J. Adaptive inertial particle separator: EP1908939[P]. 2008-04-09.
- [8] 国防科学技术工业委员会.航空涡轮风扇发动机吞砂试验要求:GJB2046-94[S].北京:中国航空综合技术研究所,1994:1-6.
- [9] 中国人民解放军总装备部.军用装备实验室环境试验方法:第12部分 砂尘试验:GJB150. 12A-2009[S].北京:总装备部军标出版发行部,2009:1-10.
- [10] 马志宏,苏兴荣.砂尘环境对军用装备磨损和腐蚀的影响[J].兵工学报,2005,26(4):553-556.
MA Zhihong, SU Xingrong. Abrasion and corrosion on military equipment by sand and dust[J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(4): 553-556. (in Chinese)
- [11] 付焱晶.直升机发动机进气防护装置研究[D].沈阳:东北大学,2011.
FU Yanjing. Research on helicopter engine air intake protection device[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011. (in Chinese)
- [12] BARBOZA K, EKKAD S, NG W, et al. A diagnostic technique for particle characterization using laser light extinction[R]. ASME Paper GT2015-43347, 2015.
- [13] SCALA S M, KONRAD M, MASON R B, et al. Sensor requirements to monitor the real time performance of a gas turbine engine undergoing compressor blade erosion[R]. AIAA-2004-3548, 2004.
- [14] POWRIE H E G, FISHER C E. Engine health monitoring: towards total prognostics[R]. Aspen: IEEE Aerospace Conference, 1999.
- [15] 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)
- [16] SUN Jianzhong, ZUO Hongfu, LIU Pengpeng, et al. Experimental study on engine gas-path components fault monitoring using exhaust gas electrostatic signal[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(12): 125107. 1-125107. 8.

[17] LIU Pengpeng, ZUO Hongfu, SUN Jianzhong. The electrostatic sensor applied to the online monitoring experiments of combustor carbon deposition fault in aero-engine [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(3): 686-694.

[18] SUN Jianzhong, LIU Pengpeng, YIN Yibing, et al. Symbolic time-series analysis of gas turbine gas path electrostatic monitoring data [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2017, 139(10): 1-7.

[19] 殷逸冰, 左洪福, 付宇, 等. 某型航空涡扇发动机静电传感器机载化监测实验 [J]. 航空动力学报, 2016, 31(12): 3054-3063.

YIN Yibing, ZUO Hongfu, FU Yu, et al. Experiment on electrostatic sensors airborne monitoring of a turbofan aero-engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(12): 3054-3063. (in Chinese)

[20] 左洪福, 付宇, 刘鹏鹏, 等. 航空发动机吸入物在线静电监测系统的模拟实验装置: CN103063437A [P]. 2013-04-24.

[21] 孙见忠, 刘信超, 刘若晨, 等. 基于 IDMS 的航空发动机砂尘吸入物定量监测仿真研究 [J]. 航空学报, 2017, 38(8): 182-192.

SUN Jianzhong, LIU Xinzhaoh, LIU Ruochen, et al. IDMS based method for quantitative monitoring of aero-engine ingested airborne sands [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(8): 182-192. (in Chinese)

[22] 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 Zhenhua, ZUO Hongfu, LI Yaohua. Gas path debris electrostatic monitoring technology and experiment. [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(12): 2321-2326. (in Chinese)

[23] 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 Yaohua, ZUO Hongfu, WEN Zhenhua. Simulated experiment of aircraft engine gas path debris monitoring technology [J]. Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(4): 604-608. (in Chinese)

[24] 殷逸冰, 左洪福, 文振华, 等. 航空发动机吸入颗粒物静电感应特性的模拟实验及分析 [J]. 航空学报, 2015, 36(2): 691-702.

YIN Yibing, ZUO Hongfu, WEN Zhenhua, et al. Electrostatic induction characteristics of aeroengine inhaled particles: simulated experiment and analysis [J]. Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(2): 691-702. (in Chinese)

[25] LIU Ruochen, ZUO Hongfu, SUN Jianzhong, et al. Simulation of electrostatic oil line sensing and validation using experimental results [J]. Tribology International, 2017, 105(1): 15-26.

[26] 冒慧杰, 左洪福, 黄文杰, 等. 航空新型静电传感器建模与标定实验 [J]. 航空学报, 2016, 37(7): 2242-2250.

MAO Huijie, ZUO Hongfu, HUANG Wenjie, et al. Mathematical modeling and calibration experiment of new electrostatic sensor in aviation [J]. Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(7): 2242-2250. (in Chinese)

[27] 殷逸冰, 左洪福, 冒慧杰, 等. 航空发动机进气道静电传感器空间模型解析及感应信号影响因素实验分析 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 795-803.

YIN Yibing, ZUO Hongfu, MAO Huijie, et al. Spatial analysis of inlet electrostatic sensor and experimental study on influence factors of charge-induced signal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4): 795-803. (in Chinese)

[28] 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 factors influencing the exhaust gas electrostatic monitoring signals of a turbo-shaft engine [J]. Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(3): 412-420. (in Chinese)

(编辑: 王碧珺)