航空发动机尾气颗粒物流动影响因素分析

张　豪，孙振生，胡　宇，张　寅，李　魁，王　广
（火箭军工程大学 导弹工程学院，西安 710025）

摘要：为了获得发动机尾喷管内荷电颗粒的流动特性，利用COMSOL软件建立基于气-固-电三相耦合的荷电颗粒运动模型，以入口压强代表发动机工况，以颗粒直径和荷电量代表故障程度，探寻入口总压、颗粒直径、颗粒种类与颗粒流动的关系，并分析了入口总压对颗粒分布的影响。结果表明：当颗粒直径小于40 μm时，颗粒速度随直径增大有明显减小的趋势，当直径大于40 μm时，颗粒速度逐渐处于平稳状态；对于同一直径的故障颗粒，其分布受发动机工况影响较小，可以忽略在同一故障程度下颗粒分布对静电信号产生的影响；颗粒直径影响颗粒速度，而颗粒速度决定静电信号频率。在下一步研究中可通过异常静电信号频率来判断发动机故障程度。

关键词：静电监测；荷电颗粒；发动机工况；故障程度；颗粒直径；尾喷管；航空发动机
中图分类号：V211.3　　**文献标识码：**A　　doi：10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.S1.008

Analysis on the Influence Factors of Particle Flow in Aeroengine Exhaust

ZHANG Hao，SUN Zhen-sheng，HU Yu，ZHANG Yin，LI Kui，WANG Guang
（School of Missile Engineering，Rcoket Force University of Engineering，Xi'an 710025，China）

Abstract：In order to obtain the flow characteristics of charged particles in the engine nozzle，a motion model of charged particles based on the coupling of gas-solid-electric three-phase was established by COMSOL software. The inlet pressure was used to represent the engine working condition，and the particle diameter and charge were used to represent the fault degree. The relationship between inlet total pressure，particle diameter，particle type and particle flow was explored and the influence of inlet total pressure on particle distribution was analyzed. The results show that when the particle diameter is less than 40 μm，the particle velocity decreases obviously with the increase of the diameter and when the diameter is more than 40 μm，the particle velocity is gradually in a stable state. For the fault particles of the same diameter，the distribution of the particles is less affected by the engine working conditions and the influence of the particle distribution on the electrostatic signal can be ignored under the same fault degree. Particle diameter affects the particle velocity, which determines the electrostatic signal frequency. In the next step，the fault degree of the engine can be judged by the abnormal electrostatic signal frequency.

Key words：electrostatic monitoring；charged particles；engine condition；failure degree；particle diameter；nozzle；aeroengine

0　引言

航空发动机故障在飞机飞行故障中占有相当大的比例。据统计，在中国近10年的飞行事故中，由航空发动机导致的故障占机械和机务故障的60%以上，且常常因发动机故障导致飞行中的安全事故。如果能够及时监测发动机潜在故障，将有效地减小飞机的损失。目前常用的故障监测技术包括基于气路性能参数的状态监测技术[1]、基于内窥分析的孔探测技术[2]、基于润滑油分析的磨损类监控技术[3]等，多应用于地面或者事故后离线分析，难以实现故障实时监测；而基于静电感应的发动机气路故障监测技术[4]是一种新型状态监测技术，具有实时性强、连续性好、可靠性高等特点，可随时获取发动机气路工作状态。该技术通过荷电颗粒在流场中的运动分布规律，建立颗粒分布规律下的静电传感器感应模型，获取、处理反映发动机状态的静电信号，提取发动机性能指标，从

收稿日期：2019-04-19　　**基金项目：**航空科学基金（201605U8002）、陕西省自然科学基础研究计划（2019JM-186）、西安市科技计划（201805048）资助
作者简介：张豪（1995），男，硕士，主要从事飞行器推进系统检测与监控技术研究工作；E-mail：1163434358@qq.com。

引用格式：*张豪，孙振生，胡宇，等. 航空发动机尾气颗粒物流动影响因素分析[J]. 航空发动机，2021，47（增刊1）：46-52. ZHANG Hao，SUN Zhensheng，HU Yu，et al. Analysis on the influence factors of particle flow in aeroengine exhaust[J]. Aeroengine，2021，47（S1）：46-52.*

而发现潜在故障。因此,研究荷电颗粒在尾喷管中的运动特性,建立荷电颗粒电场信号与其运动特性的关系,是实现该技术的基础与关键。

对于荷电颗粒流动特性的研究,孙平等[5]利用离散相模型模拟分析荷电颗粒在柴油机微粒捕集器(Diesel Particulate Filter,DPF)孔道内的流动及沉积状况,发现孔道内的颗粒沉积分布及渗流速度趋于平缓;殷鹏飞等[6]通过建立轨道模型,对气流粉碎/静电分散相复合制备超微粉体中粉碎分散仓内颗粒的运动过程进行数值模拟,发现颗粒在不同入射速度及外加电压下出现了层流、均匀流等流态;郭岱昌等[7]模拟分析换热器内颗粒流型演化过程、流动区域分布及速度分布;Sarkar 等[8]从微观尺度分析荷电颗粒在运动中受到的力对其运动的影响;Addabbo 等[9]利用一种基于小阵列静电传感器的测量技术对发动机尾气中荷电颗粒的运动轨迹、速度进行了估计;Gehlot S 等[10]运用最小二乘估计法模拟单个荷电颗粒的运动;Touhami[11]利用数值工具研究荷电颗粒的运动规律。上述对于荷电颗粒流动特性的分析及应用,更多在于环境工程[12-14],而应用在静电监测技术方面较少;而且在静电故障监测的相关文献中只是简单假设颗粒分布可能出现的流态[15],如均匀流态、绳流流态以及描述颗粒运动时颗粒处于低匀速状态[16],并未实际考虑颗粒在尾喷管内的运动规律。因此,通过仿真分析荷电颗粒速度及分布的影响因素,获取荷电颗粒在尾喷管内的流动规律,有利于建立信号特征值与颗粒自身特性之间的关系,从而为试验提供分析依据。

本文针对荷电颗粒在尾喷管内的流动特性,利用 COMSOL 软件进行气相流体-电场-固体颗粒三者之间的耦合运算仿真模拟,获取颗粒在尾喷管内的流动状态,分别分析入口总压、颗粒直径、颗粒种类对颗粒分布、流速的关系,模拟各流态在尾喷管内产生电场分布,为下一步建立颗粒流动特性与静电信号频率之间的关系提供研究基础。

1　数学计算模型的建立

1.1　气相流场控制方程

气流在发动机尾喷管内为可压缩流动,因此需求解 3 维瞬态可压缩流体的控制方程,包括连续方程、动量方程和能量方程。

气相控制方程的通用形式为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho\vec{u}\phi)=\mathrm{div}(\Gamma\,\mathrm{grad}\phi)+S \tag{1}$$

式中:ρ 为气相密度;ϕ 为通用变量,可以代表 u、v、w、T 等求解变量;Γ 为广义扩散系数;S 为广义源项。

气流在尾喷管中为湍流状态,本文选取 $k-w$ 湍流模型进行模拟。通过气相控制方程可以求出任意时刻尾喷管内任意一点流场速度 $\vec{V}$。

1.2　颗粒相控制方程[17]及空间电势方程

颗粒在运动过程中,不仅受到流场对颗粒的拖拽力,而且还受到颗粒之间库仑力的作用。

拖拽力表达式为

$$\vec{F}_p=\frac{\pi}{8}\rho d_p^2 C_{\mathrm{D}}\left(\vec{V}-\vec{V}_p\right)\left|\vec{V}-\vec{V}_p\right| \tag{2}$$

式中:ρ 为某时刻某一位置的气相密度;d_p 为颗粒的直径大小;C_{D} 为拖拽系数;$\vec{V}$ 为流场流速;$\overrightarrow{V_p}$ 为颗粒的速度。

库仑力表达式为

$$\vec{F}_{\mathrm{c}}=\sum\vec{F}_{ip}=\sum\frac{q_i q_p}{4\pi\varepsilon_0 r_{ip}^2} \tag{3}$$

式中:$\vec{F}_{ip}$ 为第 i 个颗粒对 p 颗粒产生的库仑力;r_{ip} 为 i 颗粒与 p 颗粒之间的距离;q_i 为第 i 个颗粒荷电量;q_p 为 p 颗粒荷电量;ε_0 为电介质常数。

固体颗粒速度确定方程为

$$\vec{V}_p=\int_0^t\frac{\left(\vec{F}_p+\vec{F}_{\mathrm{c}}\right)\mathrm{d}t}{m_p} \tag{4}$$

式中:m_p 为颗粒质量。

固体颗粒位置等于颗粒速度与时间的积分,其表达式为

$$\vec{X}_p=\vec{X}_p^0+\int_t^{t+\Delta t}\vec{V}_p\mathrm{d}t \tag{5}$$

式中:$\vec{X}_p^0$ 为固体 p 颗粒在 t 时刻的位置。

尾喷管空间中某一位置的电势是由各荷电颗粒对该位置产生电势的累加,在某 t 时刻,p 颗粒对空间中某点 $\overrightarrow{X_{\mathrm{a}}}$ 的电势为

$$V_{tp}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_p}{\left|\overrightarrow{X_p}-\overrightarrow{X_{\mathrm{a}}}\right|} \tag{6}$$

那么,该时刻空间某点处总电势为

$$V_t=\sum V_{tp} \tag{7}$$

电势大小反映了颗粒在此处产生的电场强度的大小。

2 网格化分及网格无关性验证

2.1 尾喷管模型

在进行仿真时，选取JetCat系列P80型无人机尾喷管进行建模仿真，尾喷管长85 mm，导流锥长53 mm、半径为30 mm，导流锥壁面为曲面，采取数值拟合的方式构建导流锥面；尾喷管入口中心到外壁面距离为54 mm，尾喷管出口半径为31 mm。其3维几何结构的截面如图1所示。

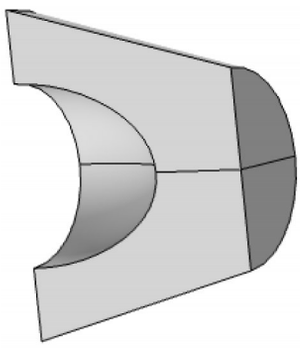

图1 JetCat系列P80型无人机尾喷管3维结构

通过COMSOL软件进行网格划分时，网格设置序列类型选定物理场控制网格，为验证COM-SOL软件网格划分模块对模型计算结果无相关性，选取4种不同单元大小的网格进行划分，计算结果对比见表1。

表1 网格划分对比

网格划分	域单元	边界元	边单元
1	9003	1754	156
2	41440	4788	250
3	107401	9064	339
4	1376420	58480	864

2.2 计算条件的设置

2.2.1 气相场设置

P80发动机推力为3～97 N，尾气最大平均速度为396 m/s，尾气温度为785～975 K。尾喷管壁面为无滑移壁面；入口设置为压力入口，总压设置最大值为0.2 MPa，温度为875 K；出口为压力出口。

2.2.2 颗粒相设置

发动机尾气内的固体颗粒分为2类。一类是发动机正常工作时，其尾气中产生的以小直径碳烟颗粒为主的固相颗粒；另一类是由于烧蚀、碰摩、燃烧室故障等原因产生的较大直径的金属颗粒或碳烟颗粒。在发动机正常工作时，产生的固体颗粒直径约为0.1 μm；如发动机发生故障，则会产生大直径的异常颗粒。一般认为，发动机处于潜在故障时，其粒径为20～40 μm；发动机发生故障时，其粒径将大于40 μm[18]。因此，本文以固相颗粒直径代表发动机故障程度，对不同直径颗粒进行数值模拟。颗粒入口设置为速度入口；其注入方式为面均匀注入。

2.3 网格划分无关性验证

选取尾喷管出口处某半径上的气相流场速度分布，对比4种网格划分下的速度差异。尾喷管入口总压为0.2 MPa。4种网格情况下的气相流场在出口速度的分布如图2所示。随着网格密度增大，出口速度逐渐稳定收敛，表明网格密度达到一定程度后，其流场分布不再与网格划分相关。本文选取第3种网格划分作为以下仿真计算的网格。

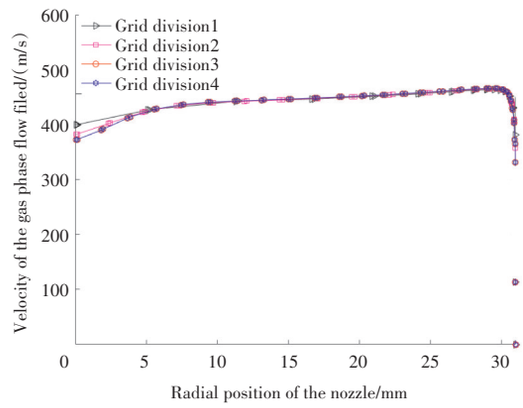

图2 尾喷管出口气相流场速度分布

3 仿真分析

文献[19]建立的基于颗粒质量分数分布的静电感应模型指出，颗粒的流速对信号的相对幅值、频率均有显著影响，但并未进一步分析颗粒速度的影响因素。因此，分析各类直径的颗粒在流场中的速度分布情况，有利于建立静电感应模型，获取可靠的仿真信号，从而寻找出能够有效评价发动机性能的指标，并为试验分析提供理论基础。本章以入口总压代表发动机工况，以颗粒直径代表故障程度，从入口总压、颗粒直径、颗粒种类3方面分析颗粒速度变化情况以及分析不同入口总压对颗粒分布的影响。

3.1 入口总压、颗粒直径、颗粒种类对颗粒平均速度的影响

3.1.1 入口总压对颗粒平均速度的影响

以入口总压代表发动机工况，入口总压依次为0.13、0.16、0.18、0.19、0.20 MPa；以碳颗粒进行分析，密度设置为1.4 g/cm^3，颗粒直径分别为0.5、1、2、5、10、20、30、40、60、80、100、140 μm；颗粒注入方式为面注入。为分析总压输入对颗粒速度的影响，颗粒面均匀注入1次，获取颗粒到达出口时的平均速度。各

直径的颗粒在不同的入口总压下的速度变化情况如图3所示。从图中可见,直径小于1 μm的颗粒,随着直径增大,速度变化幅度不明显,这是由于颗粒直径较小,其惯性相对偏小,流场对颗粒的作用程度差异较小使得速度变化在小直径时处于收敛状态。在颗粒直径小于10 μm时,随着入口总压的增大,颗粒速度变化显著,这是由于颗粒直径小,惯性小,流场对颗粒的作用明显;当颗粒直径逐渐增大时,其速度变化程度逐渐变缓,流场对颗粒的作用减弱;颗粒直径大于20 μm时,随尾喷管入口总压的升高,颗粒在出口处的平均速度增加幅度降低,颗粒速度几乎处于平稳状态。

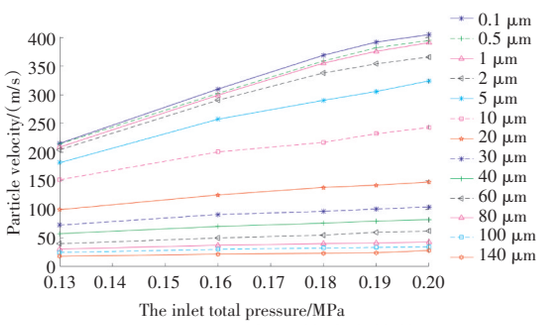

图3　入口总压与颗粒速度的关系

3.1.2　颗粒直径对颗粒平均速度的影响

在入口总压不变的条件下,各直径的颗粒在出口的平均速度分布情况如图4所示。随着颗粒直径增大,其在出口时的平均速度减小趋势呈先急剧后缓慢的变化。当颗粒直径小于20 μm时,随着颗粒直径增大,发动机尾喷管内颗粒速度明显减小,速度与直径呈近似线性关系;当颗粒直径在20~40 μm时,颗粒速度变化略为减慢;颗粒直径大于40 μm时,其速度为30~70 m/s,基本保持平稳。

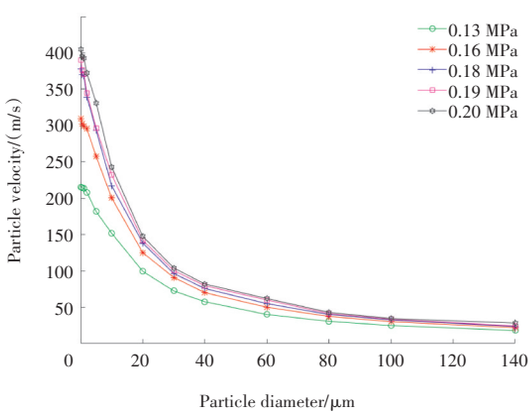

图4　颗粒直径与颗粒速度的关系

为建立入口总压、颗粒直径与颗粒速度之间的关系,运用MATLAB软件进行拟合运算,如图5所示。可以获取给定直径的颗粒在任一入口总压下的速度大小。

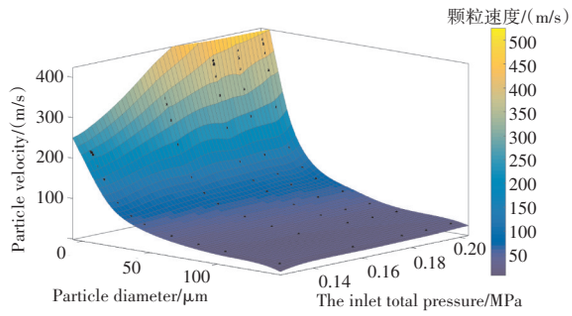

图5　颗粒速度与颗粒直径、入口总压的关系

3.1.3　颗粒种类对颗粒平均速度的影响

不同种类的固体颗粒的材料属性有明显区别,尤其是颗粒的密度,部分材料的密度范围见表2。各类材料密度差别大,需要进一步分析颗粒种类对颗粒速度的影响。

表2　各类材料密度　　g/cm³

颗粒材料	碳	氧化铝	铁的氧化物	镍
密度	<2	3.6~4.0	5.1~5.3	8.9
仿真模拟密度	1.4	3.8	5.2	8.9

尾喷管入口总压为0.2 MPa,颗粒直径依次为0.5、2、5、10、20、40、60、80、100、140 μm;在同一入口总压下,各类颗粒的速度与其直径的关系如图6所示。从图中可见,颗粒直径较小,气相流场对颗粒的作用程度一致,可以忽略颗粒密度的影响,当颗粒直径小于2 μm时,颗粒的速度变化曲线基本重合,其在出口处的平均速度相近;但随着颗粒直径增大,颗粒自身的密度属性对颗粒速度影响显著,密度越大,速度降低越快;当颗粒直径大于40 μm时,颗粒速度受

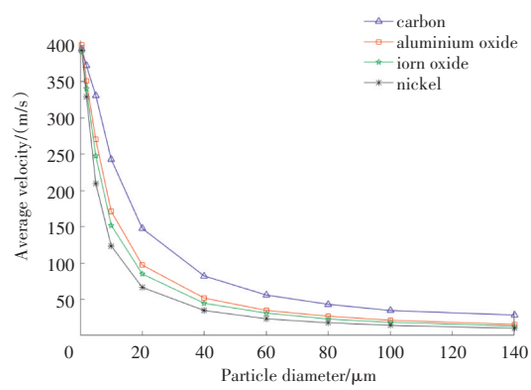

图6　同一压强、不同种类颗粒速度与其直径的关系

颗粒直径影响程度明显减小，速度变化平缓，且当颗粒处于较大直径时，各类颗粒速度相差较小。

3.2 荷电颗粒分布规律分析

3.2.1 颗粒直径对颗粒分布的影响

发动机内产生的固体颗粒，其荷电量与发动机故障程度具有一定的相关性。颗粒荷电量的多少决定了粒子之间的库仑力相互作用的大小，从而影响颗粒的分布。文献[20]给出了碳烟颗粒在燃烧室内荷电量的公式，并指出颗粒在一般情况下最多的荷电量为5~6个元电荷；文献[21]指出颗粒荷电与其直径呈线性关系。本文以此为基础，对仿真颗粒赋予电荷。

以碳颗粒的大小表示发动机的工况，正常工作时其直径小于0.1 μm，荷电量为6个元电荷，元电荷的带电量为$1.6\times10^{-19}C$，带负电。当燃烧室内部发生故障时，如航空煤油处于富油燃烧，碳颗粒的直径、荷电量将会明显提高。

入口总压为0.2 MPa时，直径为0.1、1、10、80 μm的颗粒在尾喷管内的分布状态如图7所示，从图中可见，同一直径的颗粒是否带有电荷对其在尾喷管内的分布影响较小。颗粒直径较小时，其分布较为分散均匀；随着颗粒直径的增大，颗粒分布逐渐集中；在靠近壁面的区域，颗粒浓度明显增大。

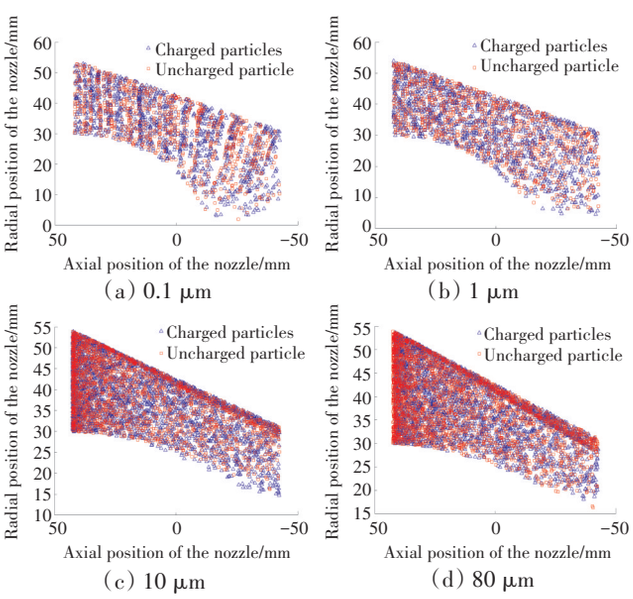

图7 各直径碳颗粒荷电分布

在0.2 MPa入口总压下，颗粒在尾喷管出口，其径向分布长度随颗粒直径的变化关系如图8所示。从图中可见，随着颗粒直径增大，颗粒在尾喷管出口处分布逐渐达到稳定；当颗粒直径大于60 μm时，颗粒分布不再发生变化，即当发动机故障达到一定程度时产生的颗粒，其分布规律及分布区域保持稳定。

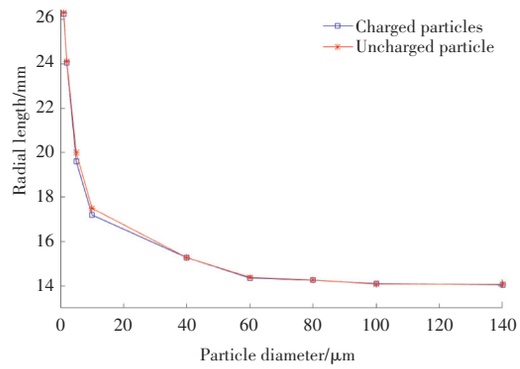

图8 颗粒荷电径向分布

3.2.2 入口总压对颗粒分布的影响

不同的总压输入导致尾喷管内产生的流场大小不同，流场对颗粒的作用也存在差异。在尾喷管入口处以面均匀方式注入1、2、、5、10、40、60、80、100、140 μm的碳颗粒，入口总压依次为0.13、0.15、0.16、0.17、0.18、0.20 MPa，对应的颗粒径向分布长度如图9所示。

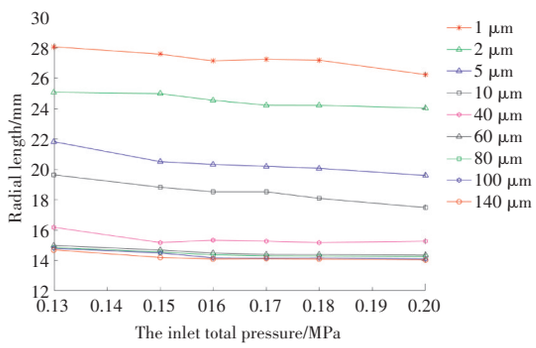

图9 颗粒径向分布长度随入口总压的变化

对比发现，对于同一直径的颗粒，在不同入口总压的影响下，其在尾喷管出口处的分布范围呈现线性递减变化；随着颗粒直径的增大，颗粒分布受入口总压影响逐渐减小，即对同一程度故障，发动机不同工况对颗粒分布影响颗粒可以忽略。当颗粒直径大于40 μm时，颗粒分布不再受发动机工况影响；颗粒直径大于60 μm时，其在尾喷管内的分布趋近于收敛。

为方便描述颗粒分布与入口总压、颗粒直径的关系，采用MATLAB进行拟合，如图10所示。从图中可以获得任一直径颗粒在给定入口总压下的出口分布情况。

3.3 静电场仿真

根据式(6)、(7)可以获得尾喷管内静电场分布。

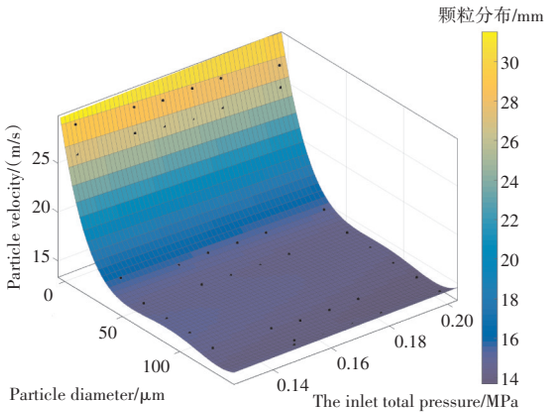

图 10　颗粒分布与颗粒直径、入口总压关系

连续注入直径为 0.1 μm、荷电量为 6 个元电荷、带负电的颗粒时,其静电场分布如图 11 所示。从图中可见,在尾喷管出口处,电势绝对值明显较高。

以 10 μm 颗粒作为异常颗粒注入 1 次,某时刻尾喷管内电场分布如图 12 所示。从图中可见,当有异常颗粒产生时,电势分布发生了明显变化,电势较高的位置处于异常颗粒周围。

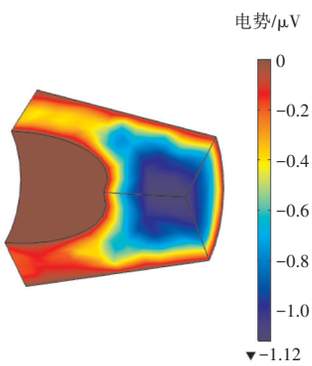

图 11　0.1 μm 颗粒电势

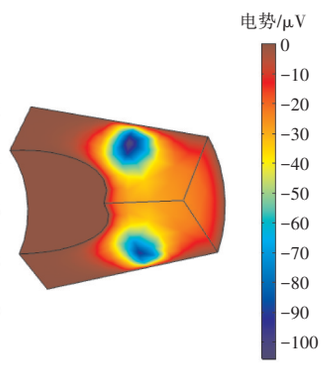

图 12　注入异常颗粒的某时刻电势

选取尾喷管中心作为监测点,对比 5 μm 和 40 μm 颗粒在运动过程中产生的静电信号,如图 13 所示。5 μm 颗粒产生的异常静电信号时间明显小于 40 μm 颗粒的,从信号频率的角度看,直径小的颗粒速度大,产生的静电信号频率高。验证了颗粒直径可通过信号频率来判断这一结论。

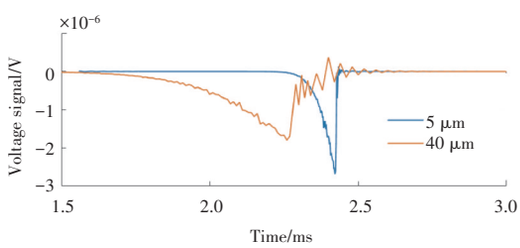

图 13　5 μm 和与 40 μm 颗粒信号

4　结论

本文通过建立基于气-固-电三相耦合的发动机尾喷管内荷电颗粒运动模型,从发动机尾喷管内故障颗粒的直径、种类、荷电量以及发动机工况(即入口总压)等方面分析了荷电颗粒在尾喷管内的运动分布特性,得到以下结论:

(1)当颗粒直径小于 20 μm,即发动机处于正常工况时,颗粒速度受入口总压、颗粒种类影响明显,随着影响因素增大,速度明显减小;当颗粒直径为 20~40 μm,即发动机存在潜在故障时,颗粒速度减小速率减缓;当颗粒直径大于 40 μm 时,颗粒速度基本不再受入口总压、颗粒种类的影响,速度处于平稳状态。

(2)颗粒荷电量的多少对颗粒分布的影响可以忽略;颗粒在尾喷管中的分布随着颗粒直径的增大而逐渐减小;当颗粒直径大于 40 μm 时,颗粒分布趋于稳定,并随着颗粒直径的增大,颗粒分布趋向于收敛。

(3)通过对不同直径颗粒电场的仿真,验证了直径越小的颗粒产生的静电信号频率越高这一关系。

异常颗粒直径大小反映了故障严重程度,而不同颗粒直径对应不同速度,速度的大小决定了异常信号的频率大小,通过分析异常信号频率特性来判断发动机故障程度是可行的。在下一步工作中,就需采集各情况下静电信号,寻找能够提取信号频率特性的方法,建立颗粒直径与异常信号频率关系模型,从而对故障程度进行评判。

参考文献:

[1] 朱大明. 航空发动机整机试验性能故障诊断系统设计[J]. 航空发动机,2011,37(4):43-47.
ZHU Daming. Design of fault diagnosis system for aeroengine engine test performance [J]. Aeroengine,2011,37(4):43-47. (in Chinese)

[2] 赵静. 飞机油箱内窥形貌建模与特征分析[D]. 天津:中国民航大学,2017.
ZHAO Jing. Modeling and feature analysis of aircraft fuel tank endoscopic shape[D]. Tianjin:Civil Aviation University of China, 2017. (in Chinese)

[3] 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. Study on online monitoring electrostatic sensing technology for full-flow abrasive particles in lubricating oil system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34 (8) : 1786-1794. (in Chinese)

[4] 刘远航,王铁楠,郑丽. 航空发动机故障在线监测系统的研究[J]. 中

国新技术新产品，2018，375(17)：54-55.
LIU Yuanhang，WANG Tienan，ZHENG Li. Research on on-line monitoring system for aeroengine faults[J]. China New Technology and New Products，2018，375(17)：54-55.（in Chinese）

[5] 孙平，万垚峰，孟建，等.荷电颗粒在DPF孔道内的流动及沉积特性[J].江苏大学学报(自然科学版)，2018，39(5)：512-516，522.
SUN Ping，WAN Yaofeng，MENG Jian，et al. The flow and deposition characteristics of charged particles in DPF channels[J].Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition)，2018，39(5)：512- 516，522.（in Chinese）

[6] 殷鹏飞，张蓉，李银冰，等.气流粉碎/静电分散中粉体颗粒运动规律的数值模拟研究[J]. 稀有金属材料与工程，2014，43(12)：3052-3057.
YIN Pengfei，ZHANG Rong，LI Yinbing，et al. Numerical simulation of powder particle movement in air jet/electrostatic dispersion[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2014，43(12)：3052-3057.（in Chinese）

[7] 郭岱昌，郑斌，梁浩天，等.内设横管束型换热器内大粒径颗粒流动分析[J].广西大学学报(自然科学版)，2018，43(5)：1713-1722.
GUO Daichang，ZHENG Bin，LIANG Haotian，et al. Analysis of large particle size flow in a horizontal tube bundle heat exchanger[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition)，2018，43(5)：1713-1722.（in Chinese）

[8] Sarkar T，Mitra N，Kemp B A. Nonlinear electrostatic behavior of multiple charged particles in electrostatically inverted systems[J]. Southeast Press 2018：50-60.

[9] Addabbo T，Fort A，Mugnaini M ，et al. Multisensor electrostatic detection of moving charged particles [C]//2016 IEEE Sensors Applications Symposium(SAS)，2016：76-86.

[10] Gehlot S K，Singh R. Trajectory estimation of a moving charged particle：an application of least square estimation（LSE）approach[C]// International Conference on Medical Imaging. IEEE,2014：52-62.

[11] Touhami S，Aksa W，Medles K，et al. Numerical simulation of the trajectories of insulating particles in a tribo-aero-electrostatic separator [J]. IEEE Transactions on Industry Applications，2015，51(5)：4151-4158.

[12] 李敬波.高频交变电场中荷电细颗粒物凝聚的实验及模拟研究[D].北京：北京建筑大学，2017.
LI Jingbo. Experimental and simulation study of charged fine particle agglomeration in high frequency alternating electric field[D]. Beijing：Beijing Jianzhu University，2017.（in Chinese）

[13] 张雪梅.颗粒荷电对绝缘子积污特性影响的数值模拟研究[D].北京：华北电力大学，2017.
ZHANG Xuemei. Numerical simulation of the effect of particle charging on the fouling characteristics of insulators[D]. Beijing：North China Electric Power University，2017.（in Chinese）

[14] 李海英，张春奇，刘东.细颗粒物PM_(2.5)团聚除尘技术的研究进展[J]. 环境工程，2018，36(9)：98-103，148.
LI Haiying，ZHANG Chunqi，LIU Dong. Research progress of fine particle PM_(2.5) agglomeration dust removal technology[J]. Environmental Engineering，2018，36(9)：98-103，148.（in Chinese）

[15] 阚哲.基于静电传感器气/固两相流参数测量方法的研究[D]. 沈阳：东北大学，2010.
KAN Zhe. Research on gas/solid two-phase flow parameter measurement method based on electrostatic sensor [D]. Shenyang：Northeastern University，2010.（in Chinese）

[16] 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. Simulation experiment of electrostatic monitoring of aerobic engine sand dust inhalation[J]. Journal of Aerospace Power，2018，33(12)：2913-2923.（in Chinese）

[17] 徐兴平，张孝春，刘宝.加力燃烧室三维两相化学反应流数值模拟[J]. 航空发动机，2009，35(5)：15-18.
XU Xingping，ZHANG Xiaochun，LIU Bao. Numerical simulation of three-dimensional two-phase chemical reaction flow in afterburner [J]. Aeroengine，2009，35(5)：15-18.（in Chinese）

[18] 刘鹏鹏.航空发动机气路故障静电监测方法及系统研究[D].南京：南京航空航天大学，2013.
LIU Pengpeng. Research on static monitoring method and system of aeroengine gas path fault [D]. Nanjing：Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，2013.（in Chinese）

[19] 许传龙.气固两相流颗粒荷电及流动参数检测方法研究[D]. 南京：东南大学，2006.
XU Chuanlong. Study on gas-solid two-phase flow particle charging and flow parameter detection method[D]. Nanjing：Southeast University，2006.（in Chinese）

[20] 任俊，沈健，卢寿慈.颗粒分散科学与技术[M]. 北京：化学工业出版社材料科学与工程出版中心，2005：25-27.
REN Jun，SHEN Jian，LU Shouci. Particle dispersion science and technology [M]. Chemical Industry Press，Materials Science and Engineering Publishing Center，2005：25-27.（in Chinese）

[21] 胡文杰.航空发动机滑油颗粒荷电及其注入装置研究[D]. 南昌：南昌航空大学，2017.
HU Wenjie. Research on aero engine oil particle charging and its injection device[D]. Nanchang：Nanchang Aviation University，2017.（in Chinese）

（编辑：刘 亮）