

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0102

基于静电互相关灵敏度加权的气路碎片监测

王超*, 张帅, 李亚东, 贾林

(天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘 要: 由于静电传感器阵列(ESA)安装位置及电极数目受到工作环境限制,导致航空发动机故障预测与健康管理系统(PHM)的线性独立测量信息数较少。针对此问题,提出了一种基于静电互相关(CC)灵敏度加权的气路碎片监测方法。在同一电极数目的条件下利用互相关聚焦原理有效增加了能够表征不同敏感区域的测量信息。在此基础上设计了8电极ESA,建立了不同电极对的互相关灵敏度分布,并以获取的16个相关速度值对其进行加权计算,计算结果反映了带电碎片的速度和位置信息。带式静电实验装置和颗粒落体实验装置的实验结果验证了所提方法的有效性,对单颗粒与多颗粒的监测结果和实际分布的平均相关系数分别达到了0.668与0.652,提高了PHM系统的监测信息量和稳定性。

关键词: 互相关(CC)灵敏度; 静电传感器阵列(ESA); 故障预测与健康管理系统(PHM); 气路碎片监测; 航空发动机

中图分类号: V231.2; O359

文献标志码: A 文章编号: 1001-5965(2020)03-0457-08

随着航空航天技术的发展,航空发动机的故障预测与健康管理系统(Prognostics and Health Management, PHM)被日益关注^[1-3]。由于高温、高压及变速等恶劣工况,叶片及燃油喷嘴等气路部件是航空发动机的主要故障源之一^[4-5]。基于静电感应原理的发动机气路碎片监测方法通过对发动机尾气中颗粒的成分和流动信息来监视发动机的健康状态,是一种新的气路检测方法。与常规的航空发动机诊断监测与诊断方法(如振动法、光学法及热力学模型法等)相比,静电气路监测法具有实时性、低成本和鲁棒性强等优点^[6-7],已在一些先进的战斗机PHM系统中获得应用,如F-35。

静电传感器阵列(Electrostatic Sensor Array, ESA)作为静电气路监测法的重要组成部分,已广泛应用于气固两相流流动参数的监测和获取。20世纪90年代至21世纪初,Fisher^[7-9]和Powrie^[10-12]等就航空航天发动机的静电PHM系统展

开研究,并利用探针电极实现了对发动机故障信息的早期预测。单一探针电极结构简单,有利于工程实现,但其捕获颗粒静电信号的敏感程度受其固有局部敏感特性影响较大。在此基础上,Green等^[13]提出利用静电层析成像(Electrostatic Tomography, EST)技术重构空间电荷分布,Rahmat等^[14-15]对探针电极进行建模分析,并研究了电荷分布与颗粒分布之间的关系。但ESA作为被动式测量方法,其所能获取的独立信息数较少,直接影响到EST成像效果。针对此问题,Machida和Kaminoyama^[16]研究了电极数目对EST测量的影响,电极数目增加能够有效增加独立信息数,但灵敏场强度随之减弱且受到加工精度的限制。Tang等分别引入动态灵敏度^[17-18]和压缩感知技术^[19]来改善PHM系统的测量效果,但异常颗粒数目增多时,PHM系统测量的准确率大幅下降。出于工程实现和系统可靠性考虑,阵列式电极

收稿日期: 2019-03-13; 录用日期: 2019-10-18; 网络出版时间: 2019-11-04 13:02

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20191104.1028.001.html

基金项目: 国家自然科学基金(61673291)

* 通信作者: E-mail: wangchao@tju.edu.cn

引用格式: 王超, 张帅, 李亚东, 等. 基于静电互相关灵敏度加权的气路碎片监测[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(3): 457-464. WANG C, ZHANG S, LI Y D, et al. Electrostatic cross-correlation sensitivity weighting based gas path debris monitoring[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(3): 457-464 (in Chinese).

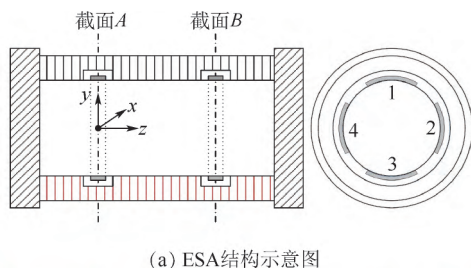
的数目及安装位置受到限制,仅通过增加电极数目来提升测量效果较难实现。Wang等^[20]提出了互相关聚焦法,在不改变电极结构的前提下,通过上下游不同对电极之间互相关灵敏场聚焦区域的不同,有效增加了线性独立信息数。

本文针对航空发动机 PHM 系统对异常颗粒的速度、空间位置实时监测的需求及 ESA 受传感器数目、位置所限导致的独立信息数较少问题,利用互相关聚焦的思想来增加有效信息数,并提出了一种基于互相关灵敏度加权的颗粒速度分布提取方法。由于上下游不同对电极的互相关灵敏度所聚焦的区域不同,其互相关速度表征不同区域的流场信息,因此可以通过互相关速度对互相关灵敏度分布加权提取颗粒的速度分布。

1 传感器结构与灵敏场分布

1.1 ESA 的结构

图1为ESA结构的示意图和实物图,一般包含弧形静电电极阵列、绝缘层、管壁及法兰。本文中所使用的ESA包含8个弧形电极,并分别嵌装在截面A和截面B的管道内壁上。靠近管道顶部、右侧、底部及左侧区域的电极分别被标记为电极1~4。石英管道长为260 mm,内径为50 mm。上下游电极间距,即截面A与截面B的间距为50 mm。铜电极的轴向长度为6 mm,电极覆盖角为60°。



(a) ESA结构示意图



(b) ESA实物图

图1 ESA结构示意图及实物图

Fig.1 Structural diagram and photograph of ESA

1.2 ESA 的空间灵敏场

静电电极的空间灵敏度可由单位点电荷放置在电极感应区以内时,静电电极所相应产生的感应电荷量的绝对值来定义。以图1中的坐标系为

例,空间灵敏度可表示为

$$s(x, y) = \left| \frac{q}{e(x, y)} \right| \quad (1)$$

式中: q 为电极上产生的感应电荷; e 为点电荷; (x, y) 为点电荷的空间坐标。

利用 COMSOL 建立 ESA 的有限元仿真模型并在空间中的不同位置放置点电荷可以计算出式(1)的数值结果,从而获得 ESA 的空间灵敏度分布。图2为截面A内1号电极(以下简称电极A1)的空间灵敏度分布。可以看出,近电极区域具有较强的灵敏度,且灵敏度沿管道径向和周向迅速下降,具有明显的局部敏感特性。

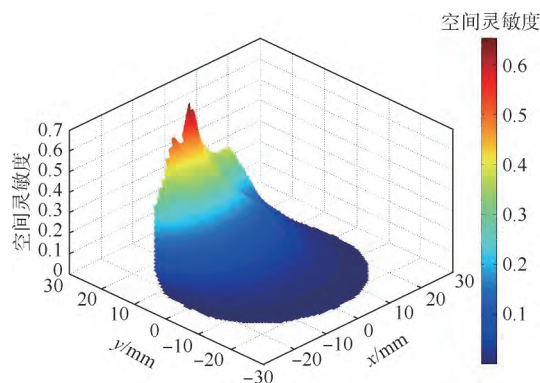


图2 电极A1的空间灵敏度分布

Fig.2 Spatial sensitivity distribution of electrode A1

2 基于互相关灵敏度加权的速度分布提取方法

2.1 互相关技术

相关测速技术的基本思想是:通过对上下游静电感应信号的相似性分析,将流速测量转化为时间间隔的测量。将上游 i 电极处测量出的感应电荷信号 $u_{Ai}(t)$ 与下游 j 电极处测量出的感应电荷信号 $u_{Bj}(t)$ 做互相关运算,则互相关函数 R_{ij} 为

$$R_{ij}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_{Ai}(t) u_{Bj}(t + \tau) dt \quad (2)$$

在满足凝固流型假设的前提下,互相关函数 R_{ij} 峰值位置所对应的时间 τ_{ij} 就是上下游信号间的渡越时间 τ_0 。

上下游感应电荷信号的相关速度可以通过式(3)得出:

$$v_{ij} = \frac{L}{\tau_{ij}} \quad (3)$$

式中: v_{ij} 为上游 i 电极感应电荷信号与下游 j 电极感应电荷信号相关速度; L 为上下游电极间距。

2.2 互相关灵敏度

根据文献[21]中提出的互相关聚焦法,静电传感器的互相关灵敏度 m_{ij} 可通过式(4)求得:

$$m_{ij} = \frac{s_{Ai}s_{Bj}}{\iint s_{Ai}s_{Bj}dxdy} \quad (4)$$

式中: s_{Ai} 和 s_{Bj} 分别为上下游电极在管道横截面的空间灵敏度分布。

由于静电电极的局部敏感特性,上下游不同对电极之间的互相关灵敏度具有不同的聚焦区域。以图1中的静电传感器电极为例,根据式(4)可求得上下游不同对电极间的互相关灵敏度分布。

传统的相关测速仅对同侧电极的信号进行相关性计算,其互相关灵敏度分布如图3(a)所示,聚焦在近电极区域,且由于静电电极具有局部敏感特性,其只能表征近电极区域的带电颗粒信息,难以测量管道中心区域的流场信息。上下游不同对电极的互相关灵敏度分布,如邻侧电极(见图3(b))和对侧电极(见图3(c)),分别为上游1号电极

(电极A1)与下游2号电极(电极B2)和3号电极(电极B3)的互相关灵敏度分布。可以看出,不同对电极的互相关灵敏度分布聚焦于不同区域,其测量信号表征不同区域的带电颗粒信息。

2.3 颗粒速度分布提取

利用COMSOL对图1中所示的ESA建立有限元仿真模型。当带电量为1C的颗粒以图4(a)中的空间位置(14,14)mm沿轴向以1m/s的速度经过ESA上下游的电极时,电极上会产生相应的感应电荷信号。考虑到实际测量环境,在仿真模型所获得的信号中加入1%的高斯噪声。图4(b)为根据式(3)所求得的上游任意对电极间的互相关速度。由于带电颗粒位于1号电极与2号电极的互相关聚焦区域中,因此互相关速度 v_{11} 、 v_{12} 、 v_{21} 及 v_{22} 更能有效表征颗粒的流动参数。

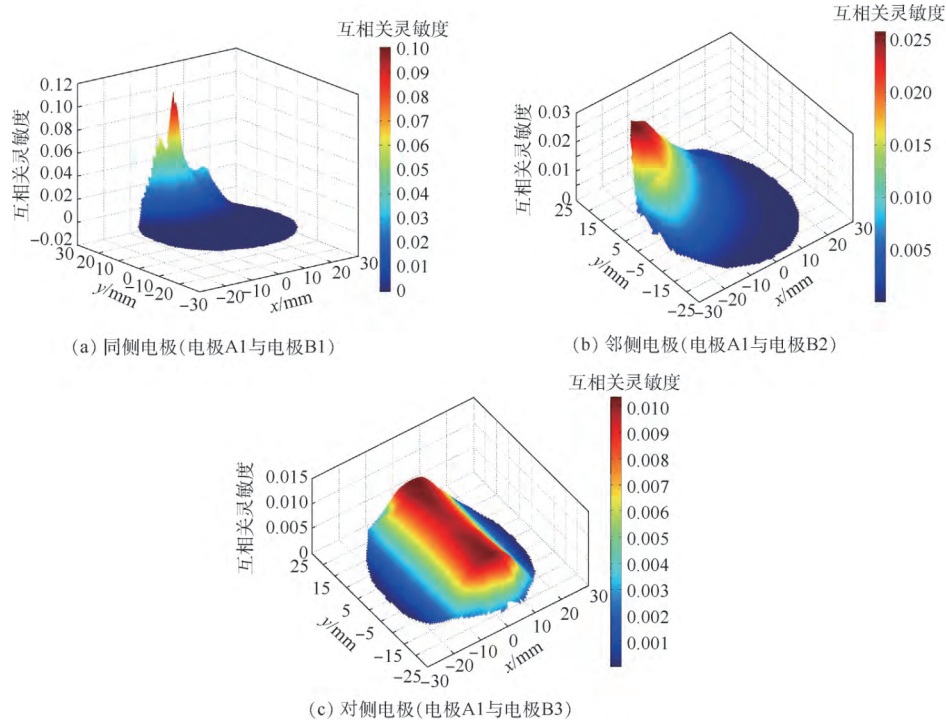


图3 互相关灵敏度分布

Fig. 3 Cross-correlation sensitivity distribution

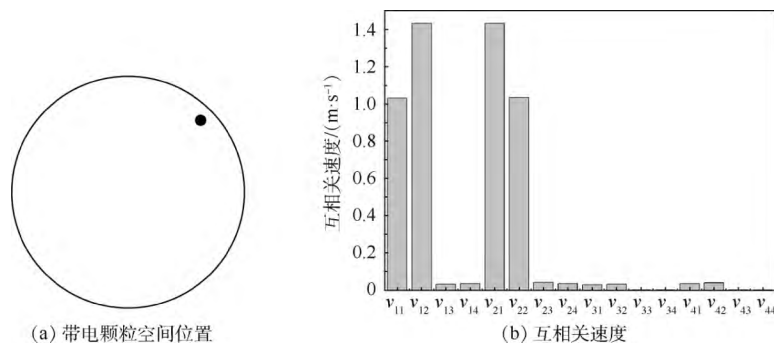


图4 上下游各电极对单个带电颗粒的互相关速度

Fig. 4 Cross-correlation speeds between upstream and downstream arbitrary pairs of electrodes to a single charged particle

互相关灵敏度表征互相关速度对不同区域内颗粒速度的敏感程度。由于不同对电极之间的互相关灵敏度分布具有不同的聚焦区域,可以利用

互相关速度对互相关灵敏度分布加权来提取带电颗粒的速度分布。图5为互相关速度加权后的互相关灵敏度分布,即上下游不同对电极所分别表

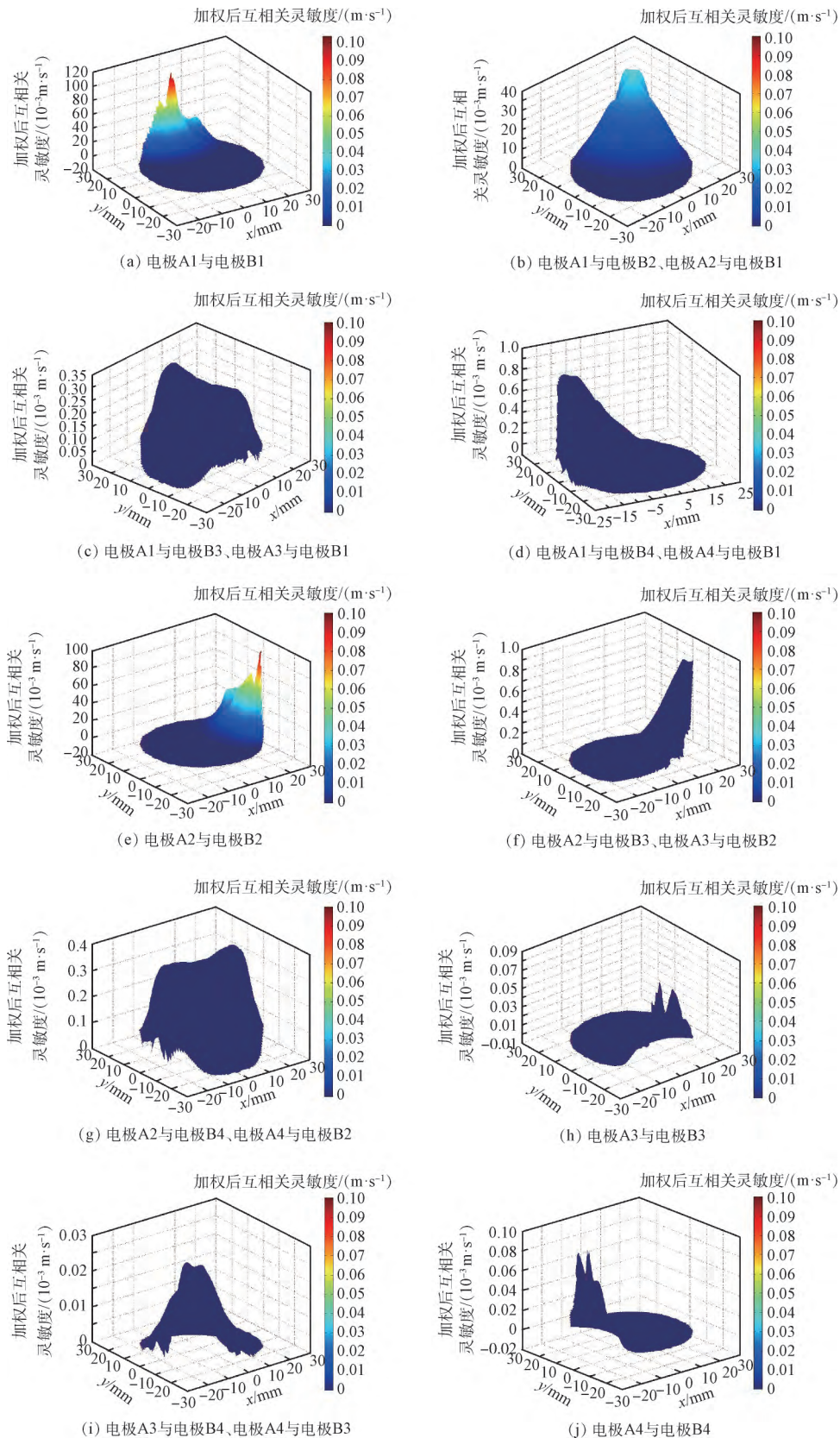


图5 经互相关速度加权后的任意对电极间互相关灵敏度分布

Fig. 5 Cross-correlation velocity weighted cross-correlation sensitivity distributions between arbitrary pairs of electrodes

征的速度分量。

通过叠加不同互相关灵敏度聚焦区域所表征的速度分量,如图6所示的带电颗粒速度分布 V 可以由式(5)计算求得:

$$V = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N v_{ij} m_{ij} \quad (5)$$

式中: N 为ESA电极数目。

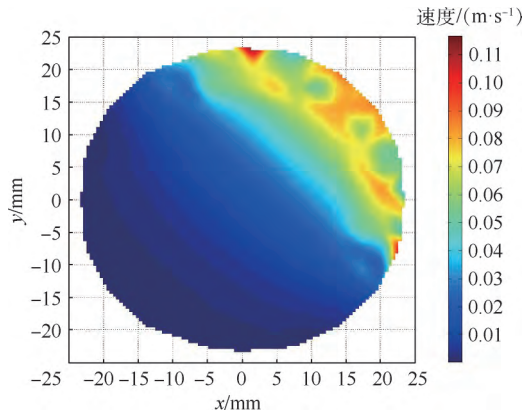


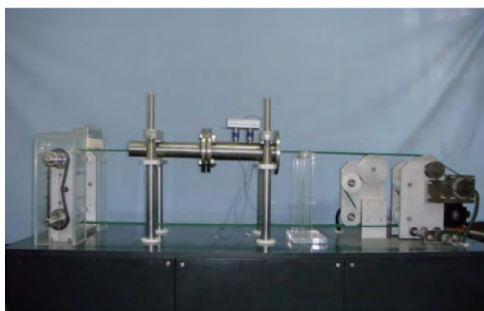
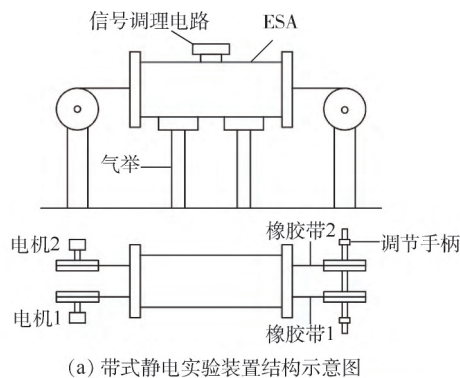
图6 互相关灵敏度分布加权叠加后的速度分布

Fig. 6 Velocity distribution after superposition of weighted cross-correlation sensitivity distributions

3 实验验证

3.1 带式静电实验装置

带式静电实验装置原理图及实物图如图7所示。



(b) 带式静电实验装置实物图

图7 带式静电实验装置结构示意图及实物图

Fig. 7 Structural diagram and photograph of belt electrostatic experimental device

示。内嵌式静电电极安装在水平管道中,同时2条橡胶带水平安装在2组滑轮上,滑轮由直流电机驱动,从而带动橡胶带运动,速度调节范围为2~25m/s。运动的橡胶带与毛刷摩擦产生静电,因此2条橡胶带可看作是移动的点电荷,用以模拟离散的带电颗粒。

静电传感器电极所检测到的信号经过调理电路的转换、滤波及放大后,通过数据采集卡JY 62022进行采集,采样频率为20 kHz。单次互相关运算的积分时间设置为0.25 s,在验证实验中,每种实验条件下采样60 s,即240个测量点,以其平均值作为测量结果进行速度提取。

橡胶带的空间位置如图8所示,2条橡胶带的直径为4 mm,空间位置分别为 $(-17.5 \mu)\text{ mm}$ 及 $(17.5 \mu)\text{ mm}$ 。电机的转速与橡胶带的换算速度如表1所示。

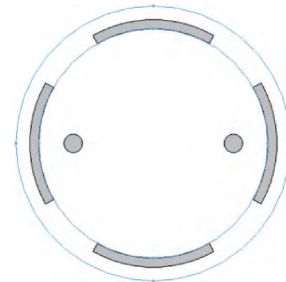


图8 验证实验ESA及橡胶带位置示意图

Fig. 8 Location schematic diagram of ESA and rubber belt in validation experiment

表1 电机转速与橡胶带的换算速度

Table 1 Motor rotation speed and corresponding rubber belt velocity

电机转速/($r \cdot \min^{-1}$)	橡胶带速度/($m \cdot s^{-1}$)
500	2.0944
750	3.1416
1000	4.1888
1250	5.2360
1500	6.2832

3.2 互相关灵敏度加权方法不同速度分布的测量效果

由验证实验结果可知(见图9),由基于互相关灵敏度加权的速度提取方法所得到的测量结果均出现向近电极区域偏移的现象,这是由ESA固有的局部敏感特性导致的。由于静电电极的空间灵敏场具有明显的局部敏感特性,近电极区域的灵敏度较强且沿径向和周向迅速下降,导致ESA的互相关灵敏度分布对近管壁区域的监测能力更强。

当橡胶带速度较高时,所测量到的速度分布在橡胶带两侧出现较多伪影,这种现象的产生一

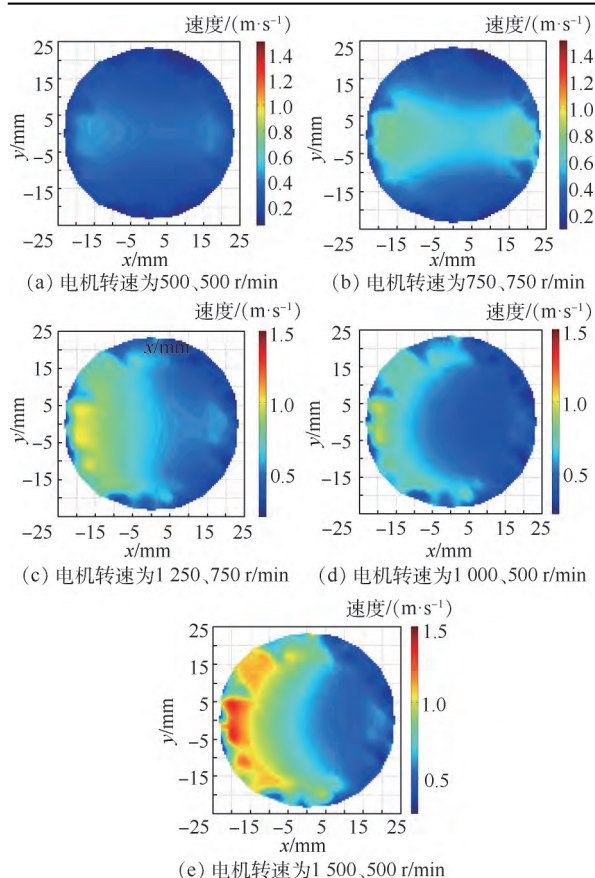


图9 不同电机转速所对应的速度分布测量结果

Fig. 9 Velocity distribution measurement results corresponding to different motor rotation speeds

方面是因为电极数目较少,互相关灵敏度的聚焦区域数目有限,邻侧电极与同侧电极的互相关灵敏度聚焦区域出现大量重叠,导致邻侧电极的互相关信号也随橡胶带速度的提高而增强,造成两侧的伪影;另一方面是因为橡胶带速度提升后震动幅度增大,电极邻侧相关信息增强,伪影现象加剧。

3.3 颗粒落体实验装置

由于互相关灵敏度加权速度提取方法通过重构异常颗粒的速度分布信息以监测航空发动机的工作状态,因此需要条件可控且能够获得真实分布信息的实验装置进行验证^[21],故简化航空发动机测试条件并搭建如图10所示的颗粒落体实验



图10 颗粒落体实验装置实物图

Fig. 10 Photograph of vertical gravity experimental device

装置进行验证。

以不同口径的玻璃管约束颗粒的运动轨迹,通过改变玻璃管的空间位置模拟不同颗粒空间分布情况,单颗粒实验条件下,颗粒沿玻璃管中心轴线运动,多颗粒实验条件下,颗粒在玻璃管内均匀分布。实验中所用玻璃管高度为1 000 mm,口径为15 mm和25 mm,颗粒为聚丙烯材质,粒径为3 mm。数据采集及处理方式与带式静电实验相同。

3.4 不同空间分布的单颗粒及多颗粒监测效果

静电法航空发动机PHM系统中对单颗粒及多颗粒的测量方法与监测效果直接受到电极数目的影响。电极数目较多时,往往采用成像类方法重构空间内的颗粒分布信息^[17-19],电极数目较少时,只能对单个电极的静电信号特征进行分析^[9-12]或通过同侧相关法对各个近电极区域内的带电颗粒信息进行监测,无法获得整个空间内的颗粒分布信息。而互相关灵敏度加权法在电极数目受限的条件下能够提取带电颗粒的速度分布信息。

表2为互相关灵敏度加权速度提取方法对不同空间分布单颗粒及多颗粒的速度分布提取效果,与真实颗粒分布间的相关系数分别为0.668和0.652。可以看出,互相关灵敏度加权速度提取方法能够有效地对电极间隔区域及管道中心

表2 互相关灵敏度加权速度提取方法对不同空间分布的单颗粒及多颗粒速度测量结果

Table 2 Velocity measurement results of single particle and multiple particles with different spatial distributions by cross-correlation sensitivity weighting method

颗粒空间分布	多颗粒监测	单颗粒监测

区域的带电颗粒进行监测,改善了ESA电极的局部敏感特性,且对单个颗粒也具有较好的监测能力。

4 结 论

1) 基于互相关灵敏度加权的速度提取方法,通过互相关速度对互相关灵敏度分布进行加权,不同电极对的互相关灵敏度聚焦于不同区域的流场信息。与同侧相关法相比,克服了其只能监测近电极区域内颗粒信息的局限,对带电颗粒的空间位置和速度分布进行重构。

2) 由于ESA的局部敏感特性,其互相关灵敏度分布更多地聚焦于近电极区域,对管道中心区域的流场信息表征能力较弱,导致测量的速度分布向近电极区域偏移。

3) 互相关灵敏度加权速度提取方法对ESA电极数目要求较低,且直接对速度分布进行重构,其稳定性和实时性更强,适宜应用在航空发动机的在线监测系统中。

4) 互相关技术本身具有抗噪效果,在计算互相关速度时可以对环境噪声起到抑制作用,能够适应恶劣的工况。

5) 基于互相关灵敏度加权的速度提取结果依赖于互相关灵敏度分布,而互相关灵敏度由ESA的结构决定,可根据实际气路口径对ESA的电极数目及结构参数进行优化,进一步改善测量效果。

参考文献 (References)

- [1] 洪杰, 张大钧, 韩继斌. 航空发动机关键件使用寿命监视系统设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(1): 45-48.
HONG J, ZHANG D J, HAN J B. Design of life usage monitoring system of aeroengine critical part [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(1): 45-48 (in Chinese).
- [2] 李长有, 马齐爽, 姚红宇. 基于小波变换的孔探图像边缘粗糙度分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(6): 705-708.
LI C Y, MA Q S, YAO H Y. Analysis of coarseness of edges extracted from borescope images based on wavelet transform [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(6): 705-708 (in Chinese).
- [3] 王大伟, 马艳红, 洪杰. 基于危害度航空发动机可靠性评估模型及应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(8): 883-886.
WANG D W, MA Y H, HONG J. Reliability assessment model and application for aero-engine based on criticality method [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(8): 883-886 (in Chinese).
- [4] FU Y, ZUO H, WANG R, et al. A monitoring experiment for gas path electrostatic probe-type sensor on turbojet engine [J]. Information Technology Journal, 2013, 12(2): 331-337.
- [5] SUN J, ZUO H, LIU P, et al. Experimental study on engine gas-path component fault monitoring using exhaust gas electrostatic signal [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(12): 125107.
- [6] 秦海勤, 徐可君, 欧建平. 基于盲源分离技术的航空发动机振动信号分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(11): 1307-1310.
QIN H Q, XU K J, OU J P. Analysis of aero-engine vibration signal based on blind source separation technology [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(11): 1307-1310 (in Chinese).
- [7] POWRIE H, FISHER C E. Engine health monitoring: Towards total prognostics [C] // Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1999, 3: 11-20.
- [8] FISHER C E. Gas path debris monitoring-A 21st century PHM tool [C] // Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000: 441-448.
- [9] FISHER C E. Data and information fusion for gas path debris monitoring [C] // Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001: 3017-3022.
- [10] POWRIE H, WOOD R, HARVEY T, et al. Electrostatic charge generation associated with machinery component deterioration [C] // Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2002: 2927-2934.
- [11] NOVIS A, POWRIE H. PHM sensor implementation in the real world-A status report [C] // Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006, 3: 1-9.
- [12] POWRIE H, NOVIS A. Gas path debris monitoring for F-35 joint strike fighter propulsion system PHM [C] // Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006, 2: 1-8.
- [13] GREEN R G, RAHMAT M F, EVANS K, et al. Concentration profiles of dry powders in a gravity conveyor using an electrodynamic tomography system [J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(2): 192.
- [14] RAHMAT M F, ISA M D, JUSUFF K, et al. Image reconstruction algorithm for electrical charge tomography system [J]. American Journal of Applied Sciences, 2010, 7(9): 1254-1263.
- [15] THUKU I T, RAHMAT M F, WAHAB N A, et al. 2-D finite-element modeling of electrostatic sensor for tomography system [J]. Sensor Review, 2013, 33(2): 104-113.
- [16] MACHIDA M, KAMINOYAMA M. Sensor design for development of tribo-electric tomography system with increased number of sensors [J]. Journal of Visualization, 2008, 11(4): 375-385.
- [17] TANG X, HU Z, CHEN Z S, et al. Investigation into spatial sensitivity of probe-type electrostatic sensors for on-line condition monitoring of heat engines [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 437(10): 817-822.
- [18] TANG X, LI Y, CHEN Z S, et al. An exhaust debris monitoring method for gas turbine PHM by using a planar array of hemisphere-shaped electrostatic sensors [C] // Prognostics and Sys-

- tem Health Management Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press 2017: 1-7.
- [19] TANG X, LI Y, CHEN Z S, et al. A compressive sensing-based coping mechanism against sensing unit failure of hemisphere-shaped electrostatic sensors' circular array [C] // Prognostics and System Health Management Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press 2017: 1-6.
- [20] WANG C, ZHANG J, GAO W, et al. Cross-correlation focus method with an electrostatic sensor array for local particle velocity measurement in dilute gas-solid two-phase flow [J]. Measurement Science and Technology 2015 26(11) : 115301.
- [21] TANG X, CHEN Z S, LI Y, et al. Compressive sensing-based electrostatic sensor array signal processing and exhausted abnormal debris detecting [J]. Mechanical Systems and Signal Processing 2018 105: 404-426.

作者简介:

王超 男 博士 教授 博士生导师。主要研究方向: 单相流与多相流参数检测、电学层析成像技术、流体能源检测与控制。

张帅 男 硕士研究生。主要研究方向: 静电法稀相气固两相流参数检测。

Electrostatic cross-correlation sensitivity weighting based gas path debris monitoring

WANG Chao^{*}, ZHANG Shuai, LI Yadong, JIA Lin

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Due to the limit of the installation location and the electrode number of the electrostatic sensor array (ESA), the linear independent measurement information of the aeroengine fault prognostics and health management (PHM) system is rare. Aimed at this problem, this paper proposes an electrostatic cross-correlation (CC) sensitivity weighting based exhaust debris monitoring method. With the same electrode number, the CC focus method is applied to effectively enhance the number of measurement information that can characterize different sensitive regions. On this basis, the 8-electrode ESA is designed, and the CC sensitivity distribution of different electrode pairs is established and weighted by 16 correlation velocities. The results can reflect the velocity and location information of charged debris. The effectiveness of the method is validated by experiment results of the belt-style electrostatic induction experimental facility and the vertical gravity experimental device. The average correlation coefficients between the monitoring results of single particles and multiple particles and the actual distribution reached 0.668 and 0.652, respectively, which enhanced monitor information and stability of PHM system.

Keywords: cross-correlation (CC) sensitivity; electrostatic sensor array (ESA); fault prognostics and health management (PHM); gas path debris monitoring; aeroengine

Received: 2019-03-13; **Accepted:** 2019-10-18; **Published online:** 2019-11-04 13:02

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20191104.1028.001.html

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61673291)

*** Corresponding author.** E-mail: wangchao@tju.edu.cn