动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.06.003

航空发动机叶尖间隙测量技术研究进展

许欧阳，童杏林*

（武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室，武汉 430070）

摘　要： 系统介绍了国内外航空发动机叶尖间隙测量技术的研究进展，分析了这些技术的原理、特点及具体应用，并指出了发展方向。在此基础上，提出了适用于航空发动机高转速叶片在线监测的新方法，并介绍了一种可实现航空发动机叶片故障监测的膜片式高温光纤 F-P 声发射传感测量系统。

关键词： 航空发动机；叶尖间隙；高温光纤；研究进展

中图分类号： TN911.74　**文章编号：** 1001－5868(2020)06－0774－05

Research Progress of Aero-engine Blade Tip Clearance Measurement Technology

XU Ouyang, TONG Xinglin

(National Engineering Laboratory for Optical Fiber Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, CHN)

Abstract: The research progresses of the techniques for measuring the tip clearance of aero-engine are introduced, and their principles, characteristics and specific applications are analyzed, and the development trends are pointed out. Based on this research, a new method for on-line monitoring of high-speed blades of aeroengines is proposed, and a diaphragm-type high-temperature optical fiber F-P acoustic emission sensing measurement system is introduced to achieve aero-engine blade fault monitoring.

Key words: aero-engine; blade tip clearance; high temperature fiber; research progress

0　引言

航空发动机的机械结构十分复杂，其性能的优劣直接影响飞机能否安全稳定运行。叶片是航空发动机的关键组件，当其在超高温、高压、高转速的恶劣环境中长期工作时，会受到自身离合力、空气流或燃气流所产生的气流力的作用，这些作用力会持续不断地影响叶片的运行状态。由于航空发动机工作环境的特殊性，叶片还可能受到其他作用力的影响[1]。高转速叶片容易发生振动，导致叶尖间隙变大，此时叶片会出现不同程度的疲劳状态，可能产生裂纹、折断等严重故障，造成航空发动机机组损坏。根据现有相关文献报道，发动机叶片叶尖间隙每增加叶片长度的 1%，叶片效率会降低 1.5%；然而效率每降低 1%，航空发动机的耗油率会增加 2%[2]。因此，在航空发动机生产以及使用过程中，必须实时监测叶片叶尖间隙，以提前获取叶片运行状态，为航空发动机的安全运行提供强有力的保障。

研究人员提出了多种叶尖间隙测量方法，本文将常见测量方法分为非光学测量法与光学测量法。目前非光学测量法主要包括：探针测量法、电容测量法、涡电流测量法、微波测量法、超声波测量法；光学测量法主要包括：反射强度测量法、干涉强度测量法、激光测量法[3]。其中，不同的测量方法使用的技术原理不同，各有优缺点，需要根据不同的应用场景选取合适的监测方法。本文将介绍几种重要的叶尖间隙测量方法，并对光学检测技术相关原理进行深入分析。

收稿日期：2020－06－15.

基金项目：国家“863”项目(2015AA043505)；湖北省重大技术创新项目(2017ACA167).

* **通信作者：**童杏林

E-mail： tongxinglin@whut.edu.cn

1　非光学测量法

1.1　探针测量法

探针法利用传感探针直流放电原理来实现发动机叶尖间隙测量，检测系统主要由放电探针、驱动器、控制器和信号处理单元组成。早在 1983 德国 Davidson 等[4]提出了该测量技术，在此研究基础上，Sheard 等提出了可用于发动机叶尖间隙测量系统[5]，将放电探针安装于发动机机匣表面，同时通过控制器将探针靠近高转速叶片，直到探针放电。根据探针移动的距离可以检测叶尖间隙。该检测系统在 6 mm 的测量范围内精度可达到 25 μm，可在 1 500 ℃的恶劣环境中使用。英国 ROTADATA 公司 Rotatip 检测系统在最大工作转速 5 000 r/min 的情况下可实现 0.01 mm 的分辨率，重复性误差控制在±0.05 mm。

该方法的主要优点是测量精度较高，耐温性能较好，检测系统性能可靠。但传感探针和发动机机匣表面污染会导致测量精度降低，并且该方法只能检测最小的叶尖间隙，目前还处于实验室研究阶段，通常用于其他测量系统校准的基准。

1.2　涡电流测量法

涡电流传感器基于电磁感应原理，对传感器施加一个时变磁场，当叶片经过传感器时，叶片会产生一个涡流磁场，该磁场会削弱原磁场[6]。叶片在高速旋转过程中，传感器检测的磁场信号强度会持续变化，通过检测拾取信号的变化量得到叶尖间隙信息，检测原理如图 1 所示。该类传感器主要分为两种类型，即主动式与被动式传感探头，被动式传感器由一个线圈与一个永磁铁构成，主动式传感器由一个或多个线圈构成。

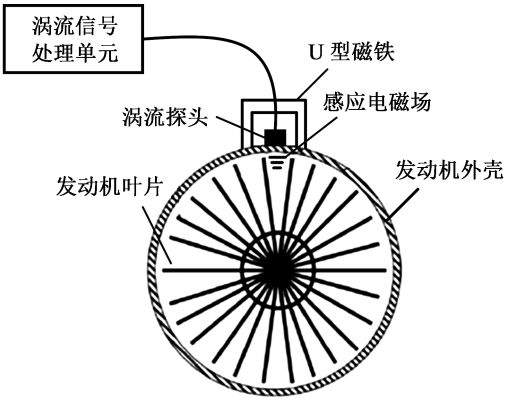


图 1　叶片电磁检测测量原理示意图

该类传感探头相对于其他传感探头的最大优势是能够通过机匣获取叶片检测信号，在污染较为严重的环境中仍可以正常测量，但是实际应用中机匣必须为非磁性材料并且不能太厚。美国 HOOD 公司[7]研制了两种涡电流传感探头，可满足不同环境温度要求，其中普通传感探头可耐 260 ℃，另外一种传感探头装有空冷装置，能耐温 1 000 ℃以上，可用于实际工作环境。爱德森电子公司利用涡流检测原理研制了一套航空发动机叶片监测系统，通过相关处理分析得到叶片转数、损伤等相关信息。

涡电流式传感器的主要优点为：结构简单、体积较小、灵敏度较高、频率响应范围较大等。但是该类型传感器易受到环境温度、叶片振动等影响，在实际应用中需要改进。

1.3　电容测量法

电容式测量技术相对成熟，在涡轮机叶尖间隙监测中应用较多。其基本原理是：将传感器的极芯视为电容一极，叶片端面视为电容另一极，芯极与叶片之间的距离会影响电容值，通过检测电容的变化获取叶片尖端间隙。图 2 为传感器结构示意图[1]。

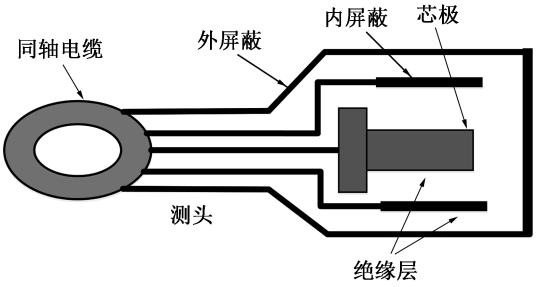


图 2　电容传感器结构示意图

电容式传感器具有较好的耐温性能，法国 FOGLE 和 THERMOCOAX 公司研制的电容传感器最高工作环境温度可达 1 400 ℃，国内天津大学研究团队研制的高温电容传感器可耐 800 ℃高温，并且在烟气轮机等设备上得到了验证。Fabian 等[8]开发了一种电容式传感器，用于小型燃汽轮机间隙控制。该方法将机匣内壁当作电容一极，全部叶片当作电容另一极，检测所有叶片平均间隙，系统检测精度小于 1 μm。Alexander 等[9]研制了一种可用于高温、电离等恶劣环境的叶尖间隙测量电容传感器，该传感器的测量范围在 0.3～1.8 mm，可达到 15 μm 的测量精度。

电容式传感器具有测量灵敏度高、体积小、工程安装方便等优点，但是在实际工程应用中，恶劣的环境会影响传感探头性能，两极之间的介质也会改变

检测的电容值,使测量精度降低。

1.4 微波测量法

微波测量法的基本原理是:在发动机机匣表面按一定距离安装若干个微波传感器,保证传感器之间形成特定角度。微波传感器对准叶片端面发射连续微波信号,叶片叶尖反射回来的信号被后端信号处理中心接收,通过比较发射信号与接收信号来分析叶尖间隙等相关信息。

早在 1996 年,Grzybowski 等[10]提出了一种微波尖端间隙检测系统,该微波技术基于共振频率测量得到叶片振动位移等信息。相较于其他测量技术,微波传感器拥有固有的自校准功能,尽管温度变化和旋转叶片可能造成磨损,该传感器仍可进行精确操作。

美国 Glenn 研究所[11]研发了一种高温微波叶尖间隙探针,该探针直径约为 14 mm,长度约为 26 mm,可满足 900 ℃高温环境下工作的需求。目前该类型传感器叶尖振动位移测量精度为 25 mm,传感器性能还在不断提高,目标测量精度达到 25 μm。

北京长城计量研究所研发了一种基于微带贴片原理的微波传感器,该传感器可在污染严重的环境中工作,测量精度较高,稳定性较好。在模拟的 24 GHz 工作环境中,在 0.1～6 mm 测量范围内灵敏度达 0.5(°)/mm[12]。

微波测量技术的优点是耐高温(最高工作温度可达 1 371 ℃)、检测精度较高、发动机燃料等污染对传感器性能影响较小,适合航空航天等特殊应用场合。但是微波传感器造价十分昂贵,具体应用到叶片监测需要进一步研究。

2 光学测量法

2.1 反射强度测量法

随着相关检测技术的发展,研究人员开始将光纤传感器用于叶尖间隙测量。反射强度检测型传感探头通过发射光纤将激光打在叶片端面,检测从叶片端面反射回来的光信号,反射回来的光信号强度能反映叶尖间隙等信息[13]。常见的传感器探头由七根传感光纤组成,其结构如图 3 所示,中心位置光纤为光信号发射光纤,周围 6 根光纤为旋转叶片反射信号接收光纤。

反射式光纤传感器在整个测量系统中起着至关重要的作用,传感器采集信号质量决定该系统的测量精度。在实际工作环境中,传感器需按照一定角度安装在发动机机匣内壁,传感器的数量不定,不同位置的传感器采集叶片在高速旋转的过程中反射回来的脉冲信号。解调系统记录每次采集的脉冲信号,通过比较不同的时间脉冲信号分析出叶片叶尖间隙、振动位移等参数[14]。图 4 给出了叶尖间隙测量系统示意图。

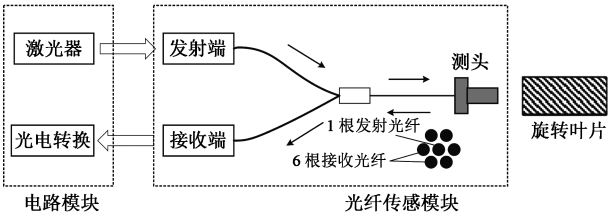


图 3 反射式光纤传感器示意图

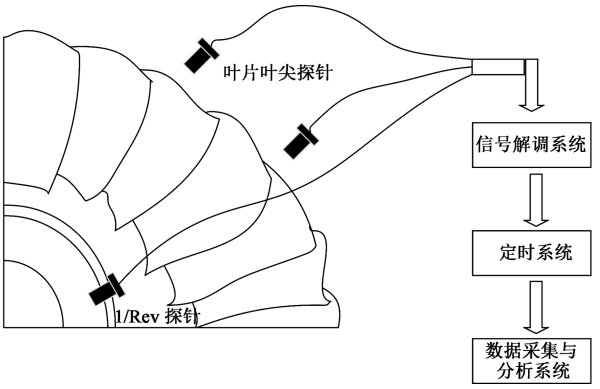


图 4 叶尖间隙测量系统示意图

Garcia 等[15]提出了利用两根传感探头测量叶尖反射的强度信号,将两根探测输出电压之比作为叶尖间隙分析信号,此方法可以降低叶片尖端反射率不同对检测精度的影响。中国电科集团[16]介绍了一种光纤振动传感探头制作的新工艺,能实现所有旋转叶片振动幅值的动态监测。天津大学研究团队[17]提出了一种适用于非对称尖端定时信号的校准方法,硬件电路采用自动增益控制电路实现信号稳定,可通过该技术提高叶尖检测的测量精度。当叶片的转速为 0～12 000 r/min 时,系统检测范围为 0～3 mm,检测精度为 25 μm。

该方法具有测量灵敏度高、传感探头体积小、抗电磁干扰能力强、可靠性高等优点,能在恶劣的环境中工作。但是传感器的对光过程较为困难,探头容易受到环境污染,导致测量精度降低。

2.2 干涉信号测量法

干涉信号测量法基于干涉测距技术,使用的检测系统是共路径干涉仪,其原理如图 5 所示。相较于传统的迈克尔逊干涉仪,该结构不需要单独的参

考镜，由探头光纤尖端的光学窗口外表面充当参考镜，样品光束与参考光束通过相同的光路。该结构的干涉仪更加稳定，易于光路对准，提供了自动的色散补偿，也会降低机械结构的振动影响。

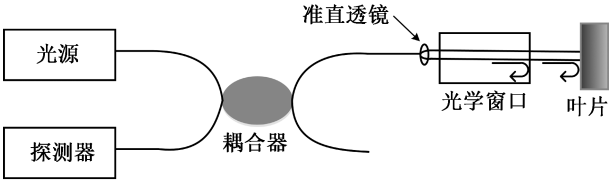


图 5　共路径干涉仪原理示意图

干涉信号检测型传感探头结构如图 6 所示，该类型传感器将蓝宝石窗口的前表面用作公共路径干涉仪的参考镜，光纤振动位移传感器拾取旋转叶片表面反射的光信号，与蓝宝石窗口反射的光信号发生干涉。当旋转叶片振动位移发生改变时，干涉信号会产生变化，利用傅里叶逆变换将干涉图谱条纹的频率转化为光学窗口外表面与叶片反射面之间的距离，实现叶尖间隙参量检测。

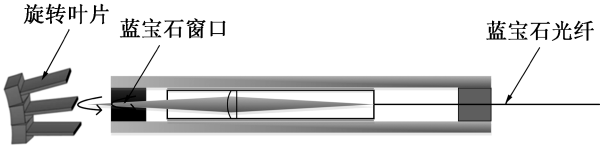


图 6　干涉式光纤传感器示意图

2017 年，西南科技公司[18]提出了一种基于干涉的测距技术——光频域反射叶尖间隙检测技术。检测系统包括高温传感探头、蓝宝石光纤和共径干涉仪，传感器的空间分辨率达到 10 μm，测量精度达 4 μm。该方法尚处于实验室研究阶段，将其应用于实际环境中的测量效果未知。

2.3　激光探针测量法

激光探针测量法的基本原理是将激光束投射到叶片尖端，反射回来的光信号由光电检测单元接收，当叶尖间隙发生变化时，光电检测单元接收到的光点信号位置发生变化，通过计算变化量确定叶尖间隙[19]。早期的测量系统不能对单个叶片的叶尖间隙进行测量，美国 P&W 公司针对此问题提出了一种新型激光探针叶尖间隙测量系统，可用于单个转子叶片和整个转子叶片叶尖间隙测量。

文献[20]中提到，Barromger 等将激光探针叶尖间隙测量系统应用于 JT9D 和 F100/F410 系列发动机单个叶片和平均间隙的检测，转子模拟的速度达到 6 000 r/min，该系统的测量范围为 0～3.05 mm，检测误差小于 0.025 mm，分辨率小于 0.05 mm，可工作于 1 300 K 的高温环境中，并且发动机振动对测量信号影响较小，可靠性较高。

该测量方法的主要特点为：待检测转子叶片的材料不会影响系统的测量精度，传感器的响应速度快、成本较低、可靠性高，可在恶劣高温高压环境中使用。但是环境污渍会污染探头，导致测量精度降低，同时叶片端面的反射率差也会影响检测信号的强度，在实际应用中需要将传感探头进行特殊结构封装，防止传感探头被破坏，以提高检测精度。目前，国内外真正将此系统应用于航空发动机叶尖间隙测量的较少。

2.4　膜片式光纤 F-P 声发射传感测量系统

目前武汉理工大学童杏林团队研制了一种高温光纤 F-P 声发射传感系统，已应用于结构材料的健康检测。针对航空发动机叶片监测的需求，提出了一种膜片式高温 F-P 声发射传感器，该结构 F-P 传感器体积小、耐腐蚀，可安装于发动机机匣内壁，以用于拾取叶片的声波信号，结构如图 7 所示。



图 7　传感器结构示意图

膜片式高温光纤 F-P 传感器的传感部件是蓝宝石膜片，蓝宝石膜片的平整内表面与光纤端面间构成 F-P 腔。传感探头拾取外界的声波信号，当检测信号发生变化时，会引起传感器输出光信号的强度发生改变，不同检测信号对应叶片不同的工作状态。通过高温光纤 F-P 声发射传感检测系统对高转速叶片发射源信息进行分析与处理，得到旋转叶片工作状态，判断叶片是否出现裂纹故障。

3　结束语

我国航空航天事业发展迅速，实时在线监测航空发动机叶片的运行状态是保证飞机安全运行的关键。本文详细介绍了航空发动机叶尖间隙测量的技术手段，分析了各种测量技术的原理、可靠性和优缺点。相较于其他类型的传感器，光纤传感器有着无可比拟的优势，因此可作为航空发动机叶片监测技术的发展方向。目前，国内外相关研究机构对叶尖间隙测量系统进行了大量的实验验证和研究，针对

航空机载高温高压应用环境的需求，如何提高传感器的可靠性和使用寿命，是需要研究的重点。最后，提出了一种膜片式 F-P 声发射传感系统，可用于叶片裂纹检测，为航空发动机叶片运行状态监测研究提供了新思路。

参考文献：

[1] 欧阳涛. 基于叶尖定时的旋转叶片振动检测及参数辨识技术[D]. 天津：天津大学，2011：1-18.
OuYang Tao. Vibration detection and parameter identification of rotating blades based on tip timing[D]. Tianjin：Tianjin University，2011：1-18.

[2] 侯宽新. 涡轮叶尖间隙泄漏流动控制研究进展[J]. 飞航导弹，2014(1)：85-90.
Hou Kuanxin. Research progress of turbine tip clearance leakage flow control[J]. Flying Missile，2014(1)：85-90.

[3] 毕 超，孙建华，徐昌语，等. 航空发动机叶尖间隙测量技术的研究与应用[C]// 第七届中国航空学会青年科技论坛文集，2016：122-130.
Bi Chao，Sun Jianhua，Xu Changyu，et al. Study and application of tip clearance measurement technologies of aero engine[C]// Proc. of the 7th Aviation Society of China Youth Science and Technology Forum，2016：122-130.

[4] Davidson D P，Derose R D，Wennerstrom A J. The measurement of turbomachinery stator-to-drum running clearances[C]// Proc. of ASME 1983 Inter. Gas Turbine Conference and Exhibit，1983.

[5] Sheard A G，Turner S R. Electromechanical measurement of turbomachinery blade tip-to-casting running clearance[C]// Proc. of 37th Inter. Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition，1992.

[6] 林俊明，李寒林，戴永红. 航空发动机叶片动态监测技术[J]. 无损检测，2019，41(11)：26-29.
Lin Junming，Li Hanlin，Dai Yonghong. Dynamic monitoring technology of aero-engine blades[J]. Nondestructive Testing，2019，41(11)：26-29.

[7] Kam C，Donald L. Turbo-machinery tip-timing comes of age[J]. Maintenance & Asset Management，2009，24(1)：34-40.

[8] Fabian T， Prinz F. Capacitive blade tip clearance measurements for a micro gas turbine[C]// Proc. of IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conf.，2009.

[9] Alexander S. Techniques for blade tip clearance measurement with capacitive probes [J]. Measurement Science and Technol.，2000，11：865-869.

[10] Grzybowski R，Knoell H，Foyt G，et al. Microwave blade tip clearance measurement system[C]// Proc. of Inter. Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition，1996.

[11] Woike M R，Roeder J W，Hughes C E，et al. Testing of a microwave blade tip clearance sensor at the NASA Glenn research center[C]// Proc. of 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting，2009.

[12] 谢兴娟，吴亚辉，朱振宇. 航空发动机叶尖间隙测试微波传感器设计与计算[J]. 传感器与微系统，2015，34(5)：63-65.
Xie Xingjuan，Wu Yahui，Zhu Zhenyu. Design and calculation of microwave sensor for tip clearance measurement on aircraft engine[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2015，34(5)：63-65.

[13] 王 萍. 叶尖定时方法在国外航空发动机叶片振动测量中的应用综述[J]. 航空科学技术，2013，(6)：5-9.
Wang Ping. Application review of blade tip timing method for foreign aero-engine blade vibration measurement [J]. Aeronautical Science and Technol.，2013，(6)：5-9.

[14] 张玉贵. 烟气轮机叶片振动的非接触式在线监测关键技术研究[D]. 天津：天津大学，2008：1-40.
Zhang Yugui. Research on the key technology of contactless on-line monitoring of blade vibration in a gas turbine[D]. Tianjin：Tianjin University，2008：1-40.

[15] Garcia I，Beloki J，Zubia J，et al. An optical fiber bundle sensor for tip clearance and tip timing measurements in a turbine rig[J]. Sensors，2013，13(6)：7385-7398.

[16] 张 承，周 雷，胡 伟. 航空发动机用光纤叶片振动传感探头的研制[J]. 中国电子科学研究院学报，2011，6(2)：217-220.
Zhang Cheng，Zhou Lei，Hu Wei. Development of the optical fiber blade vibration sensing probe for aero-engine[J]. J. of China Academy of Electronics and Information Technol.，2011，6(2)：217-220.

[17] Duan F，Zhang J，Jiang J，et al. Method to improve the blade tip-timing accuracy of fiber bundle sensor under varying tip clearance[J]. Optical Engin.，2016，55(1)：014106.

[18] Jia Binghui，He Lei. An optical fiber measurement system for blade tip clearance of engine[J]. Inter. J. of Aerospace Engin.，2017(5)：1-9.

[19] 邱立新，王振华. 航空发动机叶尖间隙测量研究[J]. 航空发动机，2001(4)：26-29.
Qiu Lixin，Wang Zhenhua. Study on tip clearance measurement of aeroengine[J]. Aeroengine，2001(4)：26-29.

[20] 张 娜，黄春峰. 航空发动机叶尖间隙测量技术[J]. 航空制造技术，2010(13)：41-45.
Zhang Na，Huang Chunfeng. Measuring technology of blade tip clearance of aeroengine [J]. Aeronautical Manufacturing Technol.，2010(13)：41-45.

作者简介：

童杏林(1964—)，男，湖北武汉人，博士，教授，博士生导师，主要从事光纤传感技术、新型光电子器件的研究与开发；

许欧阳(1996—)，男，湖北武汉人，硕士，主要从事光纤传感等领域研究。