

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

Application Review of Blade Tip Timing Method for Foreign Aero-engine Blade Vibration Measurement

王萍 / 中国航空工业发展研究中心

摘要: 叶尖定时测振方法是一种先进的航空发动机转子叶片振动测量的技术和方法, 在国外已经得到广泛应用。本文主要介绍了叶尖定时测振方法的原理、发展历史、主要类型以及具体应用。

Abstract: Blade tip timing (BTT) is an advanced technology and method for measuring vibrations in aero-engine rotating blade, and has a wide application. This paper discusses the principles, development history, categories and specific application.

关键词: 航空发动机; 转子叶片; 振动; 测量; 叶尖定时

Keywords: aero engine; rotating blade; vibration; measurement; blade tip timing

0 引言

航空发动机是一种具有复杂的气动力、热力和结构动力装置。航空发动机高速旋转转子在工作时, 叶片会与空气流或燃气流相互作用, 由于气流分布不均匀、不稳定及转子不平衡的离心力等会使叶片振动。叶片的振动将会导致高周疲劳(HCF), HCF可能导致叶片失效, 最终降低叶片耐久性和寿命, 甚至产生严重后果。因此, 通过监测叶片振动, 可以尽早检测到降级现象, 从而避免造成系统低效或失效。

转子叶片振动测量技术分为接触式测量和非接触式测量两种。在接触式振动测量中, 传统上常采用接触式电阻应变片、磁电式速度传感器和压电式加速度传感器。但接触式振动测量方法存在许多缺点, 它要求必须把

传感器安装到待测叶片上, 要安装昂贵的引出器, 且只能监测有限数量的叶片。非接触式测振系统相较而言具有很大的优势。用于叶片非接触振动测量的方法包括激光多普勒测振、间断相位法、叶尖定时法等多种方法, 而叶尖定时方法是目前国内外研究的热点领域。

1 基本原理

叶尖定时测量的原理实质上是对叶片的端部相对位移进行间断测量, 根据所测量的断续的数值“还原”为叶片的原始振动过程, 并且对叶片整个振动过程的参数进行分析。因此, 叶尖定时测量法又称为间断测量法。在整个测量过程中, 叶尖定时传感器是测量系统的关键。用叶尖定时传感器对叶片振动进行非接触式测量是将一个

或多个传感器探头沿径向安装在涡轮机械相对静止的壳体上, 利用传感器感受在它前面通过的旋转叶片所产生的脉冲信号。如果叶片发生振动, 叶片的端部相对于转动方向将会向前或向后偏移, 这样就引起脉冲到达时间的改变, 从而计算出叶片振动的振幅, 对叶片振幅序列的时间序列进行变换, 并进行一些必要的数据处理即可确定叶片的实际振动频率。测量原理和信号处理示意图分别如图1和2所示^[1]。

2 发展历史

国外对叶尖定时方法的研究始于20世纪60、70年代, 不同的制造商研制的非接触叶片叶尖定时测量系统有着不同的名称, 如美国空军阿诺德工程研发中心(AEDC)称为非介入式应力测量系统(NSMS, Non-

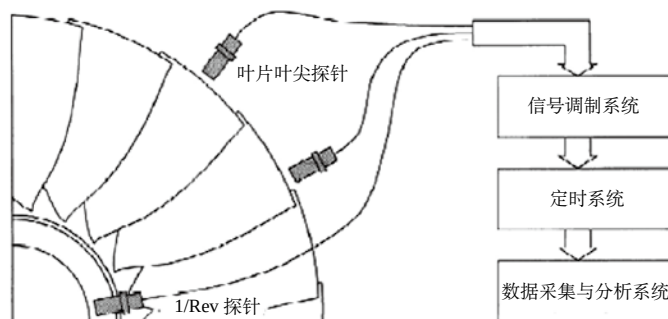
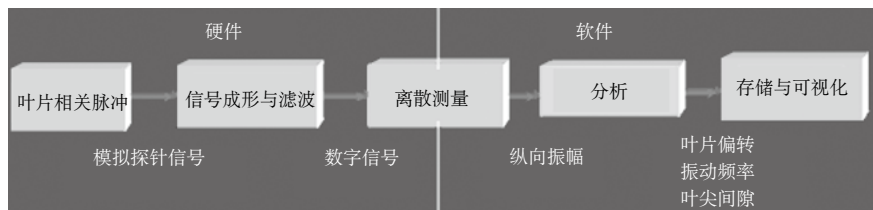


图1 叶尖定时方法测量原理示意图

图2叶尖定时方法测量信号处理示意图



Intrusive Stress Measurement System), 德国MIU公司称为非接触叶片振动测量系统(BSSM, Berührungslose Schaufelschwingungsmessung, Noncontact Blade Vibration Measurement), 或泛称为叶尖定时系统。由于这些机构和公司独立开展研究, 因此, 其采用的硬件装置、传感器数量和排列以及相应的软件工具都各有不同之处。

其中, 阿诺德工程发展中心(AEDC)开发的NSMS已经有20年研制历史, 主要用于扩充标准应变片、评价旋转部件的振动和周期应力, 其目的是为了实现先进的发动机试验能力, 开发了一组健壮的测量和数据采集系统以及仿真工具, 实现发动机子系统的独立工程评估、性能验证和数据确认以及专业的数据分析能力。NSMS系统测量所有叶片上的应力, 并得到有关叶片振动模式的数据, 与标准应变片相比, 需要更少的设备和更低的维护成本。NSMS系统的通用性已经在2006年初夏得到证实, AEDC的工程师验证了在线NSMS数据分析的实时诊断能力, 经证实NSMS能够通过失效前检测涡轮叶片的损害, 从而降低研制项

目的总体成本。目前的第4代NSMS包括三个截然不同的子系统: 第4代前端(G4F)、第4代监测器(G4M)和第4代处理器(G4P)。其中, G4F包括光电部件(EO)、叶片定时发生器(BTG)和叶片缺陷信号处理器(BDSP)。EO主要用来从发动机接收探针信号, 这些探针可以是光学或电子学原理。EO实施不同的触发技术, 提供低压晶体管到晶体管逻辑(LVTTL)触发输出, 提供有效信号指示叶片何时通过探针。BTG从EO系统接收LVTTL触发输出, 该触发用于锁住BTG中的计数器, 测量叶片到达时间, BTG的输出是在时钟周期计数内的每个探针的叶片到达时间(TOA)。BDSP从BTG采集每个探针的叶片到达时间, 纠正数据并将其转变为缺陷信息。BDSP能够近实时地显示数据, 并在硬盘中保存未纠正的原始数据和纠正后的缺陷数据。

3 分类和应用

非接触式叶片叶尖定时测量系统可以采用几种不同原理的传感器, 如涡流、电容、光学和微波探头等。发动机叶片叶尖速率大约为400m/s, 叶

片叶尖振幅约为0.3mm(压气机系统内), 这意味着测量振动的时间间隔只有1 μ s。为了获得最大的探针敏感性, 应该将检测传感器安装在靠近叶片叶尖的位置, 同时为了保证不受污染, 传感器与机匣内壁之间必须有一定的间隙, 这对传感器提出了很高的要求。下面介绍几种不同传感原理的叶尖定时测振系统。

1) 光学叶尖定时测振系统

为了保证整个叶尖定时测振系统的测量准确度, 传感器必须有很宽的频带和很高的信噪比, 光学传感器在这方面具有很大的优势, 根据对国内外文献的统计, 光学传感器在叶尖定时测振系统中占得比重很大。

光学系统的原理是将一个窄激光束射向通过的叶片叶尖, 当叶片叶尖进入光束路径时, 光线被反射到一个成像传感器。当叶片通过时, 反射光强会迅速提高; 当不存在结构振动时, 某个特定叶片叶尖到达光纤探头的时间(即“叶片到达时间”)仅仅取决于转速。但是, 当叶片存在振动时, 其到达时间就取决于转速和振动带来的位移, 由此可以计算叶片的振动。这种测振系统的耐高温程度是由光学传感器决定的。

早在20世纪70年代, Zablotskiy, I., Ye, Korostelev提出用于叶尖定时测量的激光多普勒方法, 光学中的多普勒现象是指由于观测者和运动目标的相对运动, 使观测者接收到的光波频率发生变化的现象。而激光多普勒测振原理就是基于测量从物体表面微小区域反射回的相干激光光波的多普勒频移, 进而确定该测点的振动速度。该系统将几个光学探针等间距地安装在机匣上, 利用傅里叶变化分析获得振动幅值和频率信息。同类研究表明, 光学

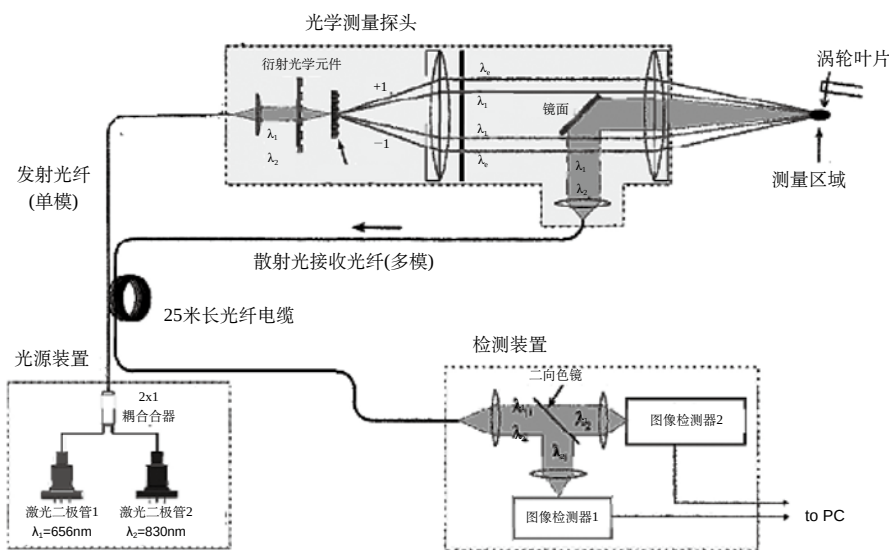


图3 激光多普勒测试系统构成示意图

系统相对电容探针在振幅分辨率上具有优势。因此,在某种程度上而言光学叶尖定时系统能够更准确地检测叶片振动。

在2008年激光技术应用会议上,德国的工程师们又提出了一种用于涡轮叶尖间隙和振动测量的光纤激光多普勒位移传感器(LDDS)^[2],在传统的激光多普勒测速仪(LDV)基础上进行了扩展。激光多普勒测速仪(LDV)是利用激光多普勒效应来测量流体固体运动速度的一种仪器,它利用运动微粒散射光的多普勒频移来获得速度信息。其研究表明,与其他光学传感器相比,LDDS同时具备较高的时间和空间

分辨率。另外,可以实现对快速通过物体的实时测量,因此,LDDS适用于对叶片振动和叶尖间隙的测量。

如图3为该测试系统示意图。其中,光源装置包括两个单端面模式激光二极管(波长分别为660nm和830nm),通过一个2×1光纤耦合器,耦合到一个单模光纤中。光纤测头产生两个扇形干涉条纹系统,光纤测头是被动式的,并装有散热器蛇形管水冷装置,可以排除电子干扰和温度影响。在回路方向被测物体返回的散射光,并通过一个平面镜和一个透镜耦合到一个多模光纤中。检测装置利用一个分光镜将接收到的来自被测物体的散射光分成两个不同的波长,并将其聚焦到两个高带宽图像检测器上。之后,检测信号通过一个14位A/D转换卡输入到一个台标准PC计算机进行后续处理。

该系统在德国宇航中心(DAC)的压气机试验台上进行了验证(见图4),对开车和关车以及最高转速50000r/min(833Hz)(对应叶片频率21.7kHz,叶尖速度586m/s)时分别进行了叶尖间隙和振动测量。所

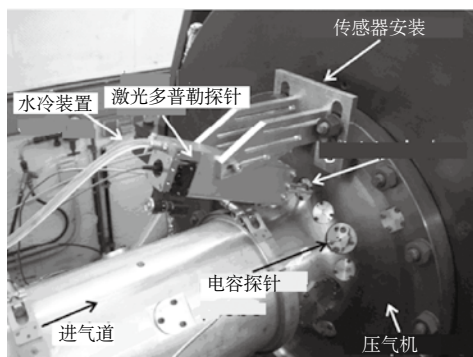


图4 激光多普勒测试系统验证图

有的测量结果都与电容传感器相符合。LDDS的测量不确定度平均仅约为22μm,与传统探针(一般为50~100μm)相比具有绝对优势。另外,LDDS具有较高的时间分辨率,在最大转速时也可以测到单个的转子叶片,因此可以测到轴向转子振动。这种系统在金属和非金属涡轮叶片的高精度原位叶尖间隙和振动测量中具有很大潜力。

此外,美国HOOD技术公司在叶片振动测量领域也有较长的研究历史,该公司从1999年开始设计并研制叶片叶尖定时系统^[3],并支持开展了200多次试验(范围覆盖5cm直径的涡轮增压器到4m直径的蒸汽涡轮)。HOOD技术公司的振动测量系统如图5所示,当叶片通过时,传感器产生模拟脉冲,一个前置放大器放置在靠近被测转子的地方并同传感器相连(对于光学传感器而言,前置放大器中还包括一个激光器和光电二极管)。前置放大器将缓冲信号经过一个很长的电缆传送到该公司的叶片振动传感器接口(BVSI)装置,BVSI触发每个叶片脉冲,生成一个精确定时的数字信号。HOOD技术公司的“叶片数据采集软件”使用户能够简便地配置每个传感器信号的状态和触发参数,查看叶片振动、间隙,并设置可视和声音告警。利用叶片振动分析软件可以进行更为详细的离线分析并生成报告。HOOD技术公司叶片测振系统一般采用涡流传感器和光学传感器两种。该公司还研发了几种不同的光纤传感器,在加冷却的条件下,最高可耐1100℃高温。

2) 电涡流叶尖定时测振系统

涡流传感器的工作原理是,对传感器施加一个时变磁场,当叶片经过

时,叶片表面会产生一个涡流及诱生磁场,这个诱生磁场会削弱传感器的原磁场。通过检测这种变化,可以监测叶片振动、叶尖间隙、弯曲叶片、叶尖碰损、颤振等各种参数。用于测振系统的电涡流传感器通常有两种原理,一种是被动式,一种是主动式。被动式涡流传感器采用一个永久磁铁产生磁通量,并利用一个线圈测量涡流产生的电压。主动探针可以包括一个或多个线圈,最简单的形式是利用一个线圈产生磁通量并测量涡流产生的电压。目前有多种形状、尺寸的货架涡流传

感器产品用于位置测量。

涡流传感器用于叶片测量,与其他类型探针相比,最大优势是能够通过机匣获得叶片通过数据,Roeseler和Flotow两位工程师已经利用一个被动涡流传感器对此已经进行了验证,但其测量结果与机匣厚度和材料有很大关系。

图6所示,奎奈蒂克公司(QinetiQ)在一台斯贝(Spey)RB168-101发动机上验证了其涡流传感器,并与光学探针进行了对比,在实验过程中,该公司将7个涡轮传感器和4个光学传感器安

装在第一级和二级风扇转子上,获得叶片通过数据(到达时间)。试验结果表明,涡流传感器可以通过1.5mm厚的机匣获得叶片通过数据,并且其测试结果与光学传感器的数据相同。奎奈蒂克公司的涡流传感器还在AE3007和JSF LiftFan®系统中做过全尺寸验证,能够检测振幅小于0.1mm的叶尖振动^[4]。

3) 电容叶尖定时测量系统

目前,国外许多制造商开始热衷于电容叶尖定时测量系统的研究,如德国MTU的非接触叶片振动测量系统(BSSM)最早采用光学探针,但由于一方面光学探针耐污染能力差,另一方面高温高压光学探针的研制成本相对较高,目前该公司已经转向采用电容传感器实现测量。

图7所示,利用电容传感器同时实现叶尖间隙和叶片振动的测量无疑是节约成本的一个好办法。BSSM系统一般将4~6个传感器安装在机匣上,其信号输入到触发模块(TSG),产生精确的定时触发脉冲,并输送到时间测量系统(TDC),TDC的数字时间数据通过一个数字接口传送给PC机分析。由于直流电荷放大器对传感器区域的静电比较敏感,MTU公司近期正在研究采用调频驱动模块,并利用软件触

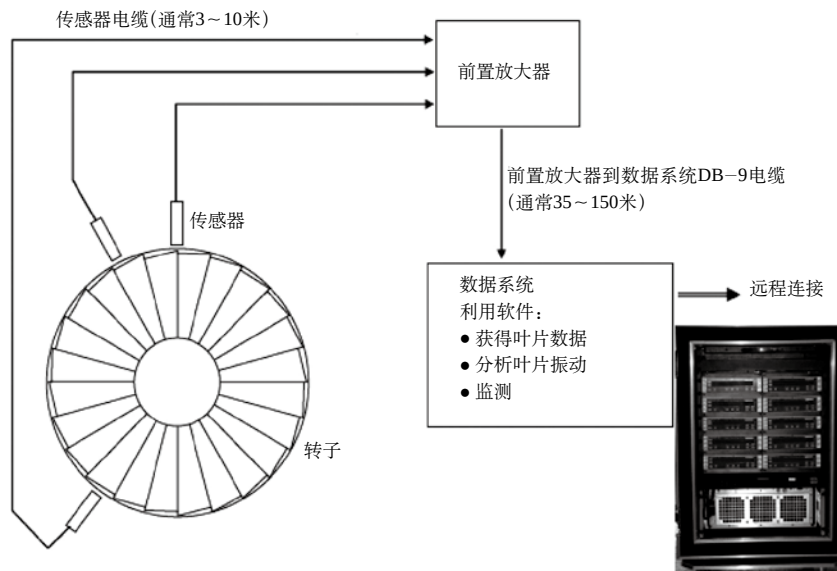


图5 HOOD技术公司叶片振动监测系统构成示意图

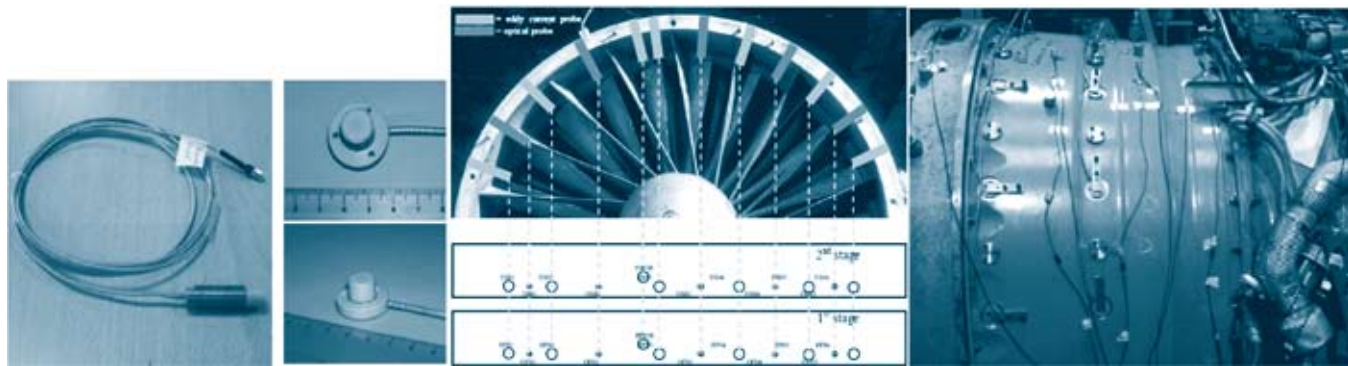
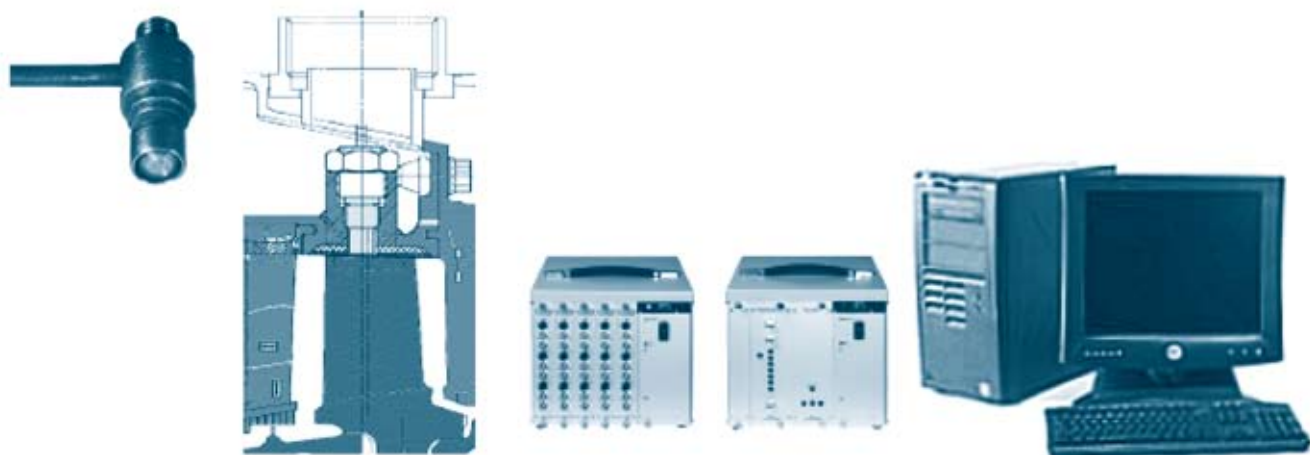


图6 奎奈蒂克公司涡流测振传感器产品外观及验证示意图



(a)同时实现叶尖间隙和振动测量的电容传感器

(b)BSSM系统的硬件:直流电和放大器、触发电路(TSG)和定时系统(TDC)、计算机

图7 BSSM非接触叶片振动测量系统

发和定时取代硬件TSG和TDC模块,这一举措将提高振幅分辨率并减少硬件成本。在沿转子周围排列传感器时,需要考虑几个方面的因素。对于振动测量而言,传感器的圆周位置将影响振动频率的确定,而径向位置则对于能够捕获到的振动模式数至关重要。此外,还要考虑机匣空间情况等。目前,MTU公司还在探索将BSSM系统用于转子叶片的裂纹检测中,预防叶片裂开以及产生严重的二级损伤。

此外,英国克兰菲尔德大学工程学院的教授们也通过试验验证了将商用电容叶尖间隙传感器用于叶片振动测量的可行性。他们试验中所采用的为英国Rotadata公司制造的RotaCap测量系统,其构成包括矿物质绝缘电容探针、振荡器、解调控制系统和连接电缆。该探头同一个半刚性不锈钢三轴电缆连接,探头涂有粉状矿物质绝缘层。该电缆连接振荡器模块,后者能够为整个系统提供10MHz频率,并通过一个内接电缆连接解调装置。在试验的过程中对电容传感器测量的结果与应变片和光学传感器进行了对

比,取得了较好的效果。

4 结束语

总的来说,就叶片振动测量系统而言,叶尖定时方法作为一种先进非接触式测量方法得到越来越多的关注。叶尖定时测振系统可以采用不同原理的传感器,如光学、涡流、电容等。这些传感器具有各自的优缺点,光学传感器具有高带宽、高信噪比、高分辨率等优点,但其耐污染能力差、成本相对较高;涡流传感器和电容传感器具有灵敏度高、对环境影响不敏感、线性度好等特点,但其耐高温程度相对较低,且对被测物体的材料比较敏感。通过对国外相关技术的跟踪可以看出,国外相关研究人员正在不断推动不同传感原理的叶尖振动测量系统的研究工作,特别是具备叶片振动和叶尖间隙综合测量能力的低成本、耐高温、耐油污传感器是未来的发展方向。

AST

参考文献

[1] Michael Zielinski and Gerhard

Ziller, Noncontact Blade Vibration Measurement System for Aero Engine Application[R], ISABE-2005-1220.

[2] Thorsten Pfister, etc. Fiber optic laser Doppler distance sensor for in-situ tip clearance and vibration monitoring of turbo machines[C]. 14th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon, Portugal, 07-10 July, 2008.

[3] Hood Technology Corporation. Overview of Blade Vibration Monitoring Capabilities[R]. 29 June 2010.

[4] D N Cardwell & K S Chana. THE USE OF EDDY CURRENT SENSORS FOR THE MEASUREMENT OF ROTOR BLADE TIP TIMING - SENSOR DEVELOPMENT AND ENGINE TESTING[S]. GT2008-50792.

作者简介

王萍,工学硕士,副研究员,主要从事国外军工试验测试技术发展研究。