

光纤光栅接触式检测旋转叶片的发展

The Development of Contact Detection for Rotating Blades Based on Fiber Bragg Grating Sensors

曹华晨 吕冰 李成贵 魏鹏 / 北京航空航天大学

旋转叶片参数动态检测是科学和工程领域的长期研究热点,光纤光栅传感器本身在体积、质量和组网上的优势,为解决这一问题提供了新的思路。光纤光栅接触式检测有良好的工程前景,但同时也伴随着新的工程问题和器件需求。

航空发动机压气机、涡轮等叶片类旋转机械以高转速、重载荷、高效能和高可靠性为目标不断提高性能。作为核心部件的叶片,在每分钟上万转的旋转过程中承受巨大应力,极易出现故障,因此叶片的旋转状态参数检测一直是研究热点。

旋转叶片动态检测方法的发展

旋转叶片动态检测的方法主要有接触式和非接触式测量两大类。最先使用的是接触式测量法,即传感器直接测量叶片。早在20世纪30年代,美国西屋(Westhouse)公司采用在叶片顶部粘贴反射镜的方法对涡轮机叶片工作中的振动进行测量,然而这种方法只应用了20年。到了20世纪50年代,该公司开始使用应变片法,通过电阻应变片监测叶片的应力状态来获知其工作状态,并使用了集流环系统和无线电遥测系统用于信号传递。应变片法已经成为目前叶片状态监测的主流手段,但是应变片法的安全性及信号引出的可靠性依然有待改进,因此其应用存在局限性。

20世纪60年代开始,非接触式检测迅速发展起来。非接触式检测有脉冲调制法、声响应法、叶尖定时法等间接测量方法。脉冲调制法是在工作轮正上方安装传感器,当旋转叶片通过传感器时能产生出电脉冲,旋转叶片发生振动时,脉冲的重复周期性遭到破坏,脉冲将按相位而调制,其缺点是振动频率检测的范围非常有限。声响应法是通过测量叶片动态旋转过程中因振动产生的声音,该方法的关键环节是对背景噪声的分辨及滤除,但实践中往往做不到完全滤除。叶尖定时法将激光光纤传感器安装在正对旋转叶片叶尖的静止机匣上,感知叶尖到达传感器的时刻,如果叶片发生振动,叶片到达时间可能提前或延后,通过分析实际时刻与无振动时理论到达时刻的差异,根据当前转速计算叶尖振动位移,最后由算法辨识获得振幅、频率等参数。

相比于上述传统的旋转叶片检测技术,光纤光栅检测方法使用质量轻、体积小、抗电磁干扰能力强、能够多点式测量的光纤光栅传感器,适用于旋转叶片工作的狭小空间、极端环境,并在数据传输的过程中

使用光纤滑环辅助传感信号在旋转叶片和解调装置间的传输。光纤光栅检测技术能更好地在极端环境工作,组网布局更容易,并且对叶片旋转几乎不造成影响,在旋转叶片动态参数检测领域具有极大的工程潜力和应用前景。

光纤光栅检测系统概述

光纤光栅检测系统主要由上位机、解调仪、光纤滑环和光纤光栅传感器组成,整体结构如图1所示。光纤光栅接触式检测中的重要部分是由于检测信号的传感器和辅助信号传输的光纤滑环。在工程中,需要检测人员对传感器和光纤滑环进行选择,搭建检测系统。

光纤光栅的核心是沿纤芯轴向的产生周期性折射率变化的部分,即光纤光栅的栅区,如图2所示。光纤光栅本质上是一个滤波器,当宽带光源入射进光纤栅区时,包含待测信息的一束特定波长的窄带光被反射回光源入射端,其余的光沿光纤继续前进。这个特定波长与栅区的有效折射率和周期有关,当外界的应变和温度发生改变,用于检测的光栅的有效折射率和周期随之发

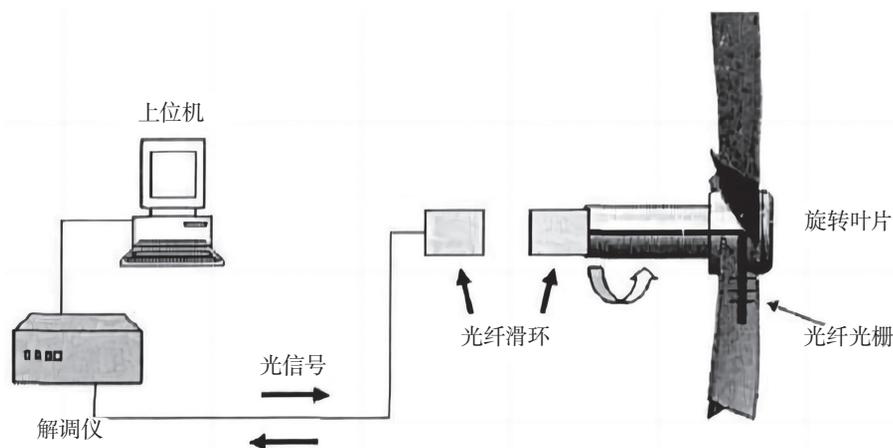


图1 旋转叶片的光纤光栅接触式检测系统

生改变，进而引起反射光波长改变，实现反射光信号对外界应变温度的传感。实际上，光纤光栅只能直接检测应变和温度；对速度、压力、振动等其他物理量检测时，需通过使用相应的质量块、弹簧等辅助设备转换应变、温度数据，实现光纤光栅检测。

传感器由于需要在高温环境下工作，通常采用飞秒光纤光栅传感器。飞秒光纤光栅传感器是由飞秒脉冲激光刻写得到的，基于制备方法分为两大类：相位模板辅助刻写的光纤光栅通常用于光纤激光器；飞秒激光直写技术需要比较严格的对准，但刻写方式相对灵活，能够比较方便的制作光栅阵列，应用到准分布式传感中，逐点刻写的Ⅱ型光栅能够承受高温，适用于超高温传感^[1]。

飞秒激光逐点刻写通过将飞秒激光脉冲聚焦到纤芯内，沿光纤轴向移动光纤，在纤芯上产生具有周期折射率调制的点，形成光纤光栅。飞秒激光逐线刻写的不同之处在于将飞秒脉冲激光聚焦后，首先沿垂直光纤轴的方向移动聚焦点，形成

预期长度的线型光栅，再沿光纤轴向移动到下一线型光栅起点。飞秒激光逐面刻写改进性地使用聚焦的激光脉冲在纤芯上形成周期性的二维平面，避免了采用逐点和逐线刻写法制备过程中光纤纤芯很难对准的问题，且使用逐面刻写法可以控

制纤芯和包层的覆盖面积，从而减少偏振损耗。

对旋转叶片进行动态检测时，光纤滑环是必不可少的信号传输辅助设备。光纤光栅检测系统中使用的是无源光纤滑环，更符合旋转叶片检测环境。无源光纤滑环的核心部件是光纤准直器，作用是将光纤内传输的光变为准直光，或将外部平行的光耦合进入光纤。滑环外部分为转动端和静止端，实现光信号在待测旋转叶片与解调设备间的传输。

无源光纤滑环根据光纤传输通道数目分成两类，单通道无源光纤滑环和多通道无源光纤滑环^[2]。理论上，单通道无源光纤滑环采用最简单的纯光纤直接耦合方式，但是这种耦合在实际中很难实现，需要加入辅助器件来帮助耦合光信号，如图3所示。单通道光纤滑环结构紧

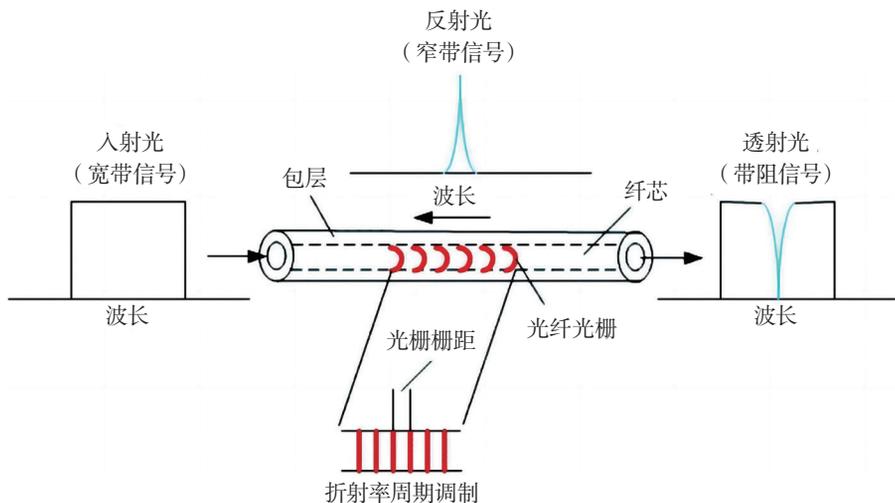


图2 光纤光栅传感器原理

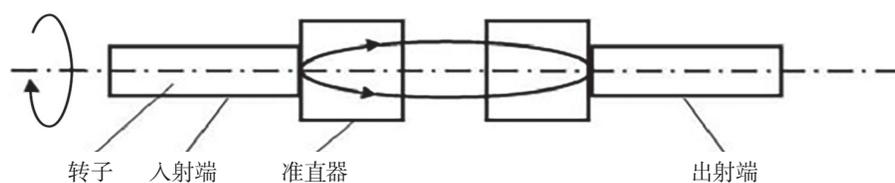


图3 带辅助器件的单通道光纤滑环

凑、易于加工制作，无需复杂的机械结构，光插入损耗较低；缺点是不能双向传输光信号，传输的光信号的数量和种类有限。多通道无源光纤滑环的设计目的在于解决不同种光信号同时传输和双向传输问题，其中使用道威棱镜的光纤滑环利用棱镜的转像原理来耦合多束光信号，缺点是不同波长的光信号很难同步传输，而且插入损耗大，器件的成本高。波分复用光纤滑环，利用波分复用技术把多路光信号合成单路信号耦合通过旋转面，在另一面复原，需要一对准直器来传输光信号，所以准直器之间的耦合效率关乎整个系统的性能。反射镜消旋光纤滑环利用反射面对光线的反射来实现消旋，光线全部通过反射来传输，所以光的损耗和色散极小，可以传输大功率光学信号。

光纤光栅检测旋转叶片的现状

国内针对光纤光栅接触式检测旋转叶片的研究断断续续。在工程应用领域，非接触振动测量的叶尖定时法是最广泛使用光纤传感技术检测旋转叶片的方法，使用光纤传感技术接触式检测发动机、压气机这类旋转叶片的参考资料更是屈指可数。在光纤光栅接触式检测旋转叶片这一研究方向上，武汉理工大学团队进行了长期并卓有成效的工作。

针对叶轮机同级旋转叶片振动情况，蒋熙馨等建立了旋转叶片三维有限元模型，对叶片振动特性、应力应变的分布进行仿真分析，并进行现场试验，使用6个光纤光栅传感器对叶轮机旋转叶片动态下的应力应变进行分布式检测，最后对试

验叶片的离心应力进行了计算^[3]。李正光从有限元分析和光纤光栅检测两个方面针对叶片高速转动时的应力分布、疲劳寿命和裂纹拓展进行了研究，试验数据证明了光栅测量旋转叶片这一方法的有效性和可行性，为后续的光纤光栅检测其他参数提供了实际参考。

徐刚等开展了将光纤传感技术应用在线检测旋转叶片运行状态和诊断裂纹故障方法的研究^[4]，在旋转叶片状态检测中，主动在叶片上制作不同类型的微裂纹，用于模拟故障叶片，并进行仿真和现场试验探究裂纹叶片的应变和频率特性。孙亮志等使用光纤光栅传感器、电阻应变片和加速度传感器对压气机叶片进行振动测量的对比试验，验证了光纤光栅检测振动的可行性和准确性，并在一定程度上说明了光纤光栅的检测效果更具有优势^[5]。蒋熙馨等针对旋转叶片的工作载荷和其应变响应的获取这一关键问题展开研究^[6]，从等截面悬臂梁扩展至真实的旋转叶片上，提出通过测量旋转叶片动应变估计旋转叶片振动的方法，并在1根光纤上针对航空发动机2个二级动叶片上的8个测点进行了动应变测试。

彭冰洁等通过光纤光栅传感器与希尔伯特变换相结合，对旋转叶片进行动应变信号频谱分析，数据分析结果表明，用光纤光栅传感器监控复杂机械系统，特别是在旋转机械上是可行且有效^[7]。

喻劲森等针对蒸汽轮机转子叶片的应变检测和损伤识别进行研究^[8]，对转子叶片模型进行了仿真模态分析，利用光纤光栅传感技术和应变片电测技术，获取了叶片动态应变

数据进行对比，结果基本一致，并且和仿真的结论也比较吻合。在叶片损伤试验中，从时域和频域两方面都提取出了损伤信息，从而实现了基于光纤光栅传感的对叶片动应变的分布式检测，以及对损伤叶片的识别，同时证明了光纤光栅应用于叶片动应变检测和损伤识别的精确可靠性。

李恒春等以燃气轮机、航空发动机中的高温涡轮叶片作为主要研究对象，对光纤光栅传感技术进行分析，解决了在高温涡轮叶片结构上，光纤光栅传感器的组网、布点及温度补偿的问题^[9]。该研究搭建了高温涡轮叶片应变检测的试验系统，对常温和500℃温度下涡轮叶片静态与动态环境下的应变进行采集，并将检测结果与仿真结果相对比，证明了该检测方法的有效性。

光纤光栅检测难点和未来研究方向

与其他旋转叶片测量方法相比，光纤光栅检测作为接触式检测方法，使用的光纤光栅传感器质量轻、耐高温且便于组网，可以作为深入研究和发展的检测技术。针对目前及未来的叶片类机械的动态监测，光纤光栅检测仍存在以下问题，需要进一步的攻关。

光纤光栅的技术挑战

光纤光栅传感器能够实现分布式测量，有利于单个叶片上的多点信号采集或者多级叶片上的数据获取。然而单根光纤上的栅区数量是有限的，对此起到限制作用的就是光纤光栅解调设备。光纤光栅解调设备中，首先要考虑的是解调模块，不同的解调模块有着不同的解调波

长范围, 试验中动态检测获得的波长数据只有在这个波长范围内, 解调设备才会接收和记录, 因此需要确定试验中可能变化的最大波长。除此之外, 光纤光栅本质上是滤波器, 解调设备读取栅区反射的光信号进行解调, 栅区数量越多会导致传输到距离解调设备越远栅区的光强大幅度衰减, 解调模块对于反射光的识别是存在阈值的, 反射光能量一旦低于阈值就不会被识别。因此, 在实际工程应用中, 在分布式检测时, 确定单根光纤光栅栅区个数是需要重点考虑的问题。

光纤光栅的另一个参数就是栅区间距。在进行实际检测前, 检测者会先对旋转叶片进行数据仿真分析, 通过仿真结果确定试验中光纤光栅栅区的检测点, 进一步确定整个光纤光栅的布线方式。需要注意的是, 光纤光栅由于本身材质为二氧化硅, 在布线过程中应避免过小的转弯半径, 因此, 在决定布线方案、确定栅区之间的距离时, 应对这一情况加以重视。

飞秒光纤光栅有良好的耐高温能力, 不仅因为飞秒激光的永久性折射率变化调制, 同时也有涂覆层的保护作用, 在一些超高温的环境中, 其涂覆层往往是由贵金属制作得到的, 因此提高了飞秒光纤光栅的制作成本, 并且制作时间长, 国内的制作厂家数量较少, 这一情况限制了该技术的推广。

综上所述, 飞秒光纤光栅传感器在设计定制时需要考虑多种因素, 制作的时间和成本都不容忽视。因此, 高效精准地设计光纤光栅是准备工作的一大难点。

此外, 在使用过程中光纤光栅

会受到应力和温度的同时作用, 这一点难以通过算法进行数据分离, 对于这一交叉敏感问题, 已经有了许多解决方案。但是这些解决方案如何在工程应用中发挥出作用还不得而知。从这个角度来说, 需要研究人员投入更多的精力去钻研光纤光栅测量技术在实际工程的应用。

光纤滑环的技术挑战

光纤滑环作为整个检测系统中数据传输的重要设备, 其本身具有一定的质量和长度。在叶片类机械的光纤光栅接触式检测设备安装时, 光纤滑环的安装位置是需要考虑的问题。当光纤滑环需要固定在旋转机械上时, 光纤滑环与光纤光栅的连接通常要进行熔接或使用连接器, 在旋转过程中很有可能发生断裂, 失去信号, 如何减少光纤滑环对于机械旋转的影响和怎样合理的对光纤滑环进行安装, 是需要研究的问题。

光纤滑环的最高转速是设备选择中的一个重要参数。当前水平的光纤滑环只能满足部分旋转叶片的动态检测。其他高速旋转叶片在这种情况下检测所获得的数据, 难以满足工程需要。如何在实现结构轻巧简便的同时达到更高的转速, 是光纤滑环的一个突破方向, 也是关系光纤光栅检测技术得到推广应用的重要因素。

结束语

光纤光栅检测方法已经被试验证明其有效性和可靠性, 能够成为一种旋转叶片动态检测的接触式检测方法, 为叶片类机械的健康监测和故障诊断提供数据支持。然而与工程应用上的其他检测方法相比, 光纤光栅检测技术仍有许多需要解决的难点。解决

上述难题, 使光纤光栅检测技术适应当前及未来高转速的旋转叶片工况, 从而发挥出其在工程领域中的潜力, 是当前的首要问题。

航空动力

(曹华晨, 北京航空航天大学, 硕士研究生, 主要从事光纤传感技术研究)

参考文献

- [1] 李宏业, 饶斌裕, 赵晓帆, 等. 基于飞秒激光刻写光纤光栅的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 264-281.
- [2] 贺正权, 李育林, 胡宝文, 等. 光纤旋转连接器的最新发展及其应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 70-74.
- [3] 蒋熙馨. 基于光纤 brag 光栅的叶轮机振动检测及压力检测 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [4] 徐刚. 基于光纤传感的机械设备动态监测关键技术研究与应用 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [5] 孙亮志. 基于光纤光栅传感的旋转叶片振动测试与分析 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [6] 蒋熙馨. 旋转叶片动应变 FBG 分布式检测及振动估计研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [7] XIN J S, PENG J B, LIU Q, et al. Spectrum analysis on rotating blades based on FBG and hilbert transform [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2594(373-375): 84-89.
- [8] 喻劲森. 基于 FBG 的汽轮机旋转叶片动应变检测和损伤识别 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [9] 李恒春. 基于光纤光栅的高温涡轮叶片变形重构研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.