

光纤动态检测技术的研究与进展*

张小栋^{1,2}, 谢思莹², 牛杭², 张平³, 贾丙辉⁴

(1. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室 西安, 710049)

(2. 西安交通大学机械工程学院 西安, 710049) (3. 西安建筑科技大学机电工程学院 西安, 710055)

(4. 南京工程学院机械工程学院 南京, 211100)

摘要 首先,在论述光纤传感器基本理论和技术的基础上,重点以两类典型的传光型光纤传感器——反射式光纤位移传感器及透射式光纤传感带为对象,讨论了其检测原理和关键技术,以及在大型旋转机械支承——滑动轴承的润滑膜状态信息和转子振动信息、航空发动机涡轮叶尖间隙、燃油流量及人体姿势信息等重要工程参数检测中的应用;其次,分析了两种典型的传感型光纤传感器——光强调制型光纤曲率传感器和 Bragg 光纤光栅传感器的检测原理和关键技术,并介绍了它们分别在机匣变形动态测量和齿轮应力应变动态测量中的应用;最后,基于这两类典型光纤传感器的特点及工程应用,对光纤动态检测技术进行了总结和展望。

关键词 光纤传感器; 动态检测技术; 旋转机械; 工程参数

中图分类号 TN25; TH133.31

引 言

光纤传感器是一种将待测物理量信息转变为可测光信号的新型传感检测装置。自 20 世纪 60 年代光纤问世后,这一新兴传感检测技术便得到了高速发展。各种待测物理量,如位移、压力、速度、流量等都可以对光纤传感器的输入光信号进行调制,进而得到与待测物理量成一定函数关系的输出光信号。因为具有质量轻、体积小、耐高温、抗电磁干扰强、信号衰减程度小等特点,光纤传感器可以用来替代传统机械式、电磁式传感器,克服传统传感器用于狭窄环境测量及恶劣环境测量时所存在的不足。自光纤传感器诞生以来,其种类不断增多,应用领域不断扩展,从反射式光纤位移传感器、透射式光纤传感器等传光型光纤传感器,到 Bragg 光纤光栅传感器等传感型光纤传感器,通过研究不同检测原理和结构的光纤传感器,可以方便地实现对位移、温度、速度、压力、化学组分等各种物理量的检测。近年来,光纤动态检测技术凭借其巨大的优势被广泛应用在石油化工、机械加工、电子电力、生物技术、医药健康、航空、航天、航海等领域,对光纤动态检测技术及其工程应用的深入研究也成为了未来先进检测技术研究的热点和发展趋势。

笔者叙述了光纤动态检测技术的国内外发展历

程,阐述了光纤传感器的基本检测原理,通过对几种典型传光型、传感型光纤传感器的检测原理、关键技术和工程应用的介绍,分析了光纤传感检测技术的发展需求,并对未来光纤传感技术的发展趋势做出了展望。

1 国内外光纤传感检测技术的发展

对光纤动态检测技术的研究起步于 20 世纪 60 年代中后期,科技工作者利用光纤不仅能够传导光波,而且能在传播光波的过程中表征出光波特征参量随外界作用的变化规律这一特点,将待测量与光纤内的光信号传输特性联系起来。Frank^[1]和 Kissinger^[2]先后提出了反射式强度调制型光纤位移传感器,并利用其实现了非接触情况下的位移测量。Reynolds 等^[3]利用反射式光纤传感器研究了血液漫反射系数,实现了光纤传感器在医学领域的应用。Cook 等^[4]对反射式光强调制型光纤传感器进行了系统的研究,并将该传感器用于冲击量的测量,使传光型光纤传感器得到了进一步发展。

1977 年,美国海军研究所开展了光纤传感器系统研究计划(FOSS)^[5],标志着对光纤传感器研究的全面开展。1978 年, Hill 等^[6]在掺锗石英光纤中发现光纤光敏效应,并用驻波写入法制成世界上第 1 只光纤光栅。同年, Butter 等^[7]利用光纤微弯损耗

* 国家自然科学基金资助项目(51405366, 51405222)

收稿日期: 2015-03-01

效应研制出了光纤应变仪,传感型光纤传感器的研究开始兴起。Meltz 等^[8]利用紫外激光干涉法制成 Bragg 光纤光栅,为光纤光栅制造技术带来了重大突破。从此,以光纤光栅等为典型的传感型光纤传感器逐步走向实用化。

随着对光纤动态检测技术的深入研究,可对光信号的强度、相位、频率、偏振态、波长等参数进行调制的光纤传感器达到了近百种。欧美发达国家先后开展了一系列光纤传感研究计划,有 NASA 的光纤陀螺仪研究计划(FOG)^[9]和数字光纤控制系统研究计划(ADOSS)^[10]、飞机发动机监控研究计划(AEM)^[11]等,光纤传感技术开始进入航空航天等高科技尖端领域。与此同时,一系列民用光纤研究计划也得到大力发展。

在 20 世纪 70 年代,我国开始大力研究光纤动态检测技术,钻研并攻克其中的各种关键问题,取得诸多突破性进展。自 21 世纪起,我国将光纤传感技术列入“八六三”及“九七三”计划的重点课题项目,使得我国自主光纤动态检测技术的研究得到了重点关注和快速发展,并在国内逐步形成了一定规模的技术实力和应用领域,从而使光纤传感器开始在智能结构、工业生产、生物医药、自然保护以及人们日常生活诸领域获得广泛应用。相应地,对光纤动态检测技术的研究,已逐步成为传感检测领域的前沿课题。

2 光纤传感器的检测原理及基本类型

2.1 光纤传感器的检测原理

光信号是光纤传感器的主要信号载体。早在 1985 年,科学家 Maxwell 就证实了光是一种电磁波,将光信号记作矢量 \mathbf{E} ,可表示为如下形式

$$\mathbf{E} = \mathbf{B} \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

光纤传感器的工作主要是检测被待测量调制后的光信号特征,对其研究主要集中在以下 5 种光波参数随待测物理量变化的动态变化规律。

1) 光强 I : 光强信息可由光探测器直接检测,其与矢量 \mathbf{B} 的大小有关。

2) 相位 φ : 一般通过干涉法将相位信息转换成光强来测量。

3) 偏振态: 主要利用光学中的旋光现象和双折射现象等进行检测,其与矢量 \mathbf{B} 的方向有关。

4) 频率 f : 主要利用光纤的受激 Brillouin 散射、Raman 散射等非线性效应或 Doppler 光学效应,检测光信号频率的变化规律,其与角频率 ω 有关($f = \omega / 2\pi$)。

5) 波长 λ : 主要通过检测光谱或 F-P 干涉滤光

方式来检测光信号波长的变化规律。

2.2 光纤传感器的基本类型

根据光纤在传感器中的作用,可将光纤传感器分为传光型和传感型两类光纤传感器。

传光型光纤传感器是一种非功能型光纤传感器,其中光纤只作为传导介质,光信号是在光纤外部被待测量调制的,它的结构简单易实现。例如反射式光强调制型光纤位移传感器、透射式光强调制型光纤位姿传感带、利用黑体辐射现象的光纤温度传感器,以及利用 Doppler 效应的激光速度计等都属于传光型光纤传感器。

传感型光纤传感器是一种功能型光纤传感器,其中的部分光纤本身就是敏感元件,光信号在光纤内部被待测量调制,它的结构紧凑,灵敏度更高。例如,利用光纤弯曲损耗特性制成的曲率传感器、Bragg 光纤光栅应力传感器等都属于传感型光纤传感器。

3 传光型光纤传感器及其工程应用

3.1 传光型光纤传感器的检测原理

如图 1 所示,传光型光纤传感器工作原理如下:光源发出一定功率的光,经过发射光纤到达外部传感环境后,光信号的强度、频率、波长、相位或偏振态被待测量调制。调制完成的光信号,经过接收光纤返回到光探测器内转换成电信号,通过信号解调和数据采集,由上位机对解调后的信号进行运算,便能完成对待测量的检测。在传光型光纤传感器中,强度调制型传感器是最常见的形式。笔者结合自己的科研实践,在此着重对两种典型的强度调制型光纤传感器的检测原理、关键技术以及在工程中的典型应用分别进行分析论述。

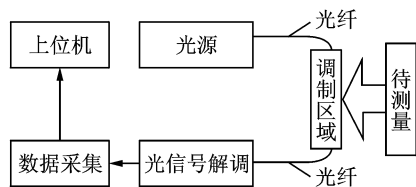


图 1 传光型光纤传感器工作原理

Fig. 1 Operational principle of transmission-type fiber optic sensor

3.2 反射式光纤位移传感器及其工程应用

3.2.1 反射式光纤位移传感器检测原理

反射式光纤位移传感器是出现最早、发展最成

熟的一类光纤传感器^[12]。如图 2 所示,它的工作原理如下:光源发出的光束通过发射光纤照射到待测物体表面后发生反射,反射光部分或全部进入接收光纤,接收光纤被反射光斑覆盖的面积随探头和被测物体的间距变化而改变,即接收反射光总量被待测位移量调制而产生了变化;因此,对接收光信号的强度值进行分析就能得到待测的位移信息。

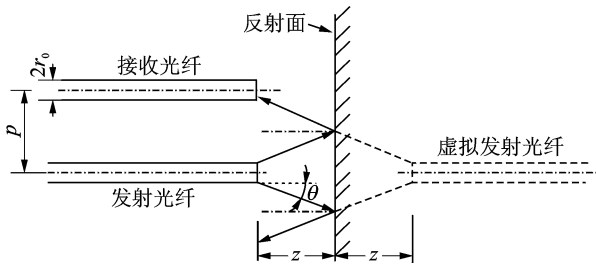


图 2 反射式光纤位移传感器工作原理

Fig. 2 Operational principle of reflective fiber optic displacement sensor

3.2.2 反射式光纤位移传感器中的关键技术

反射式光纤位移传感器的关键技术主要包括探头设计、光路补偿方法、前置处理器设计以及智能化设计中所必须的软件补偿方法等 4 个方面。其中,探头设计需根据待测参数的变化规律和工作环境,综合考虑光纤的纤芯半径、数值孔径、传播介质的折射率

等几个参数^[13]。同时,为了消除反射面特性及入射光波动等因素的影响,光纤探头常采用双光路补偿结构。例如,笔者设计出了一种双圈同轴的光纤传感探头^[14],可实现对输出光信号的硬件补偿以消除反射面及光纤制造时引入的干扰。接收光信号还要通过合理的光电转换、放大滤波等前置处理电路后,由数据采集系统将检测结果输入至上位机,通过神经网络模型、形态学滤波等软件补偿方式对信号进行补偿^[13,15],并经过时域、频域等运算分析,得到光信号特征参数的变化规律,实现对待测量的检测。

3.2.3 反射式光纤位移传感器在大型旋转机械润滑油膜及转子振动检测中的应用

在液体动压润滑中,润滑油有减轻轴承摩擦和承受载荷的作用,它的动态特性特别是最小油膜厚度值,直接影响着整个机械系统运行的品质。传统测量油膜状态的方法中,电涡流法测量精度低,易受电磁干扰影响;而光干涉法标定困难,安装复杂。因此,笔者基于反射强度调制式光纤位移传感器的工作原理,提出了一种双圈同轴反射式光纤位移传感器的设计理念,开发了相应的用于检测润滑油膜动态信息的两点光纤检测系统^[13,16],如图 3 所示。其工作原理为:采用两路相互垂直的双圈同轴反射式光纤位移传感器测得两路油膜厚度动态值,求出轴

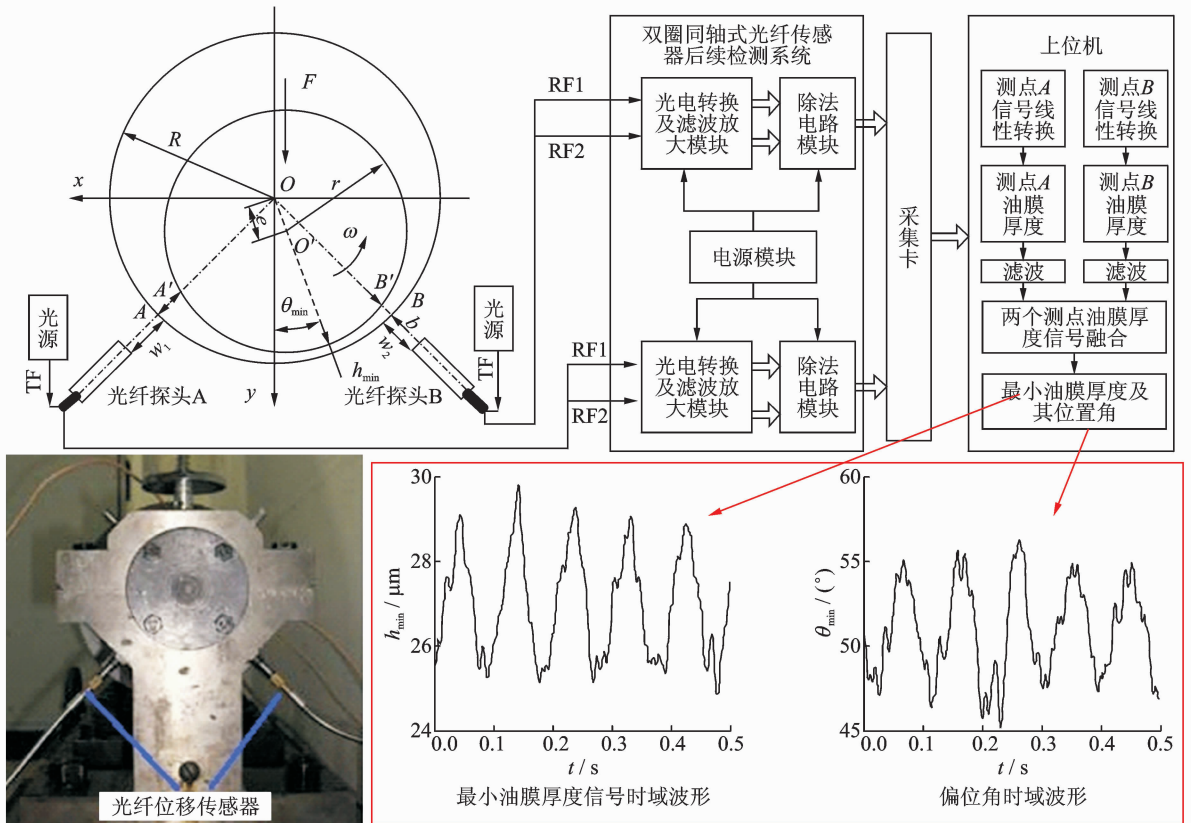


图 3 润滑油膜厚度检测光纤传感系统

Fig. 3 Lubricating oil film measurement system using dual fiber optic sensors

颈动态圆心 O' 的坐标 (x, y) , 从而推知旋转机械支撑的滑动轴承最小润滑油膜厚度动态值及其偏位角。该系统结构简单, 具有较强的抗干扰能力。

针对大型旋转机械中的关键参数——转子振动值, 笔者设计了一种检测转子振动信息的光纤传感器系统^[17], 如图4所示。该传感器能够克服电涡流传感器的局限, 通过 x, y 轴方向的两个双圈同轴光纤位移传感器得到转子振动的轴心轨迹, 并能参考转速传感器信号, 通过前置电路处理和数据采集, 由上位机运算可实现对转子振动信息的动态测量。

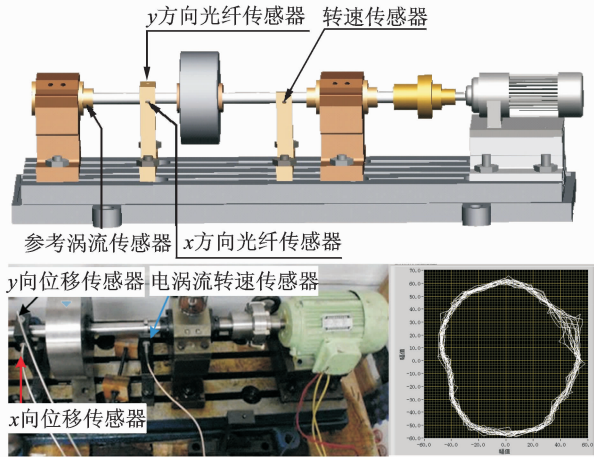


图4 转子振动测量光纤传感器示意图

Fig. 4 Installation diagram of fiber optic measurement system for rotor vibration

3.2.4 反射式光纤位移传感器在航空发动机关键参数检测中的应用

在航空发动机中, 涡轮叶尖间隙值和发动机流量值都是表征发动机运行健康状态的重要参数。其中, 涡轮叶尖间隙过大降低发动机效率, 过小则会导致碰磨引发事故^[18]; 而燃油流量则是评价航空器运行性能的指标。检测这些参数的常用机载传感器多为电磁式传感器, 受航空发动机全工况下气体电离等干扰影响, 检测精度较低。因此, 笔者分别构建了一种基于双圈同轴反射式位移传感器的航空发动机叶尖间隙光纤检测系统, 以及一种航空发动机燃油流量光纤检测系统^[18]。

如图5所示, 航空发动机叶尖间隙光纤动态检测系统的工作原理如下: 将光纤探头安装在叶片顶部的机匣上, 光源发出的光经发射光纤到达涡轮叶片叶尖顶端后被反射, 接收光纤接收到反射光信号并进行处理, 可以得到涡轮叶片的顶部与机匣内表面之间的动态间隙值, 再参考转速传感器的输出就可得到每个叶片的叶尖间隙动态值。这种检测系统或装置不受叶片材料和高温环境的限制, 且便于安装, 不破坏发动机的结构稳定性, 因此具有很好的检测精度和工程适应性。

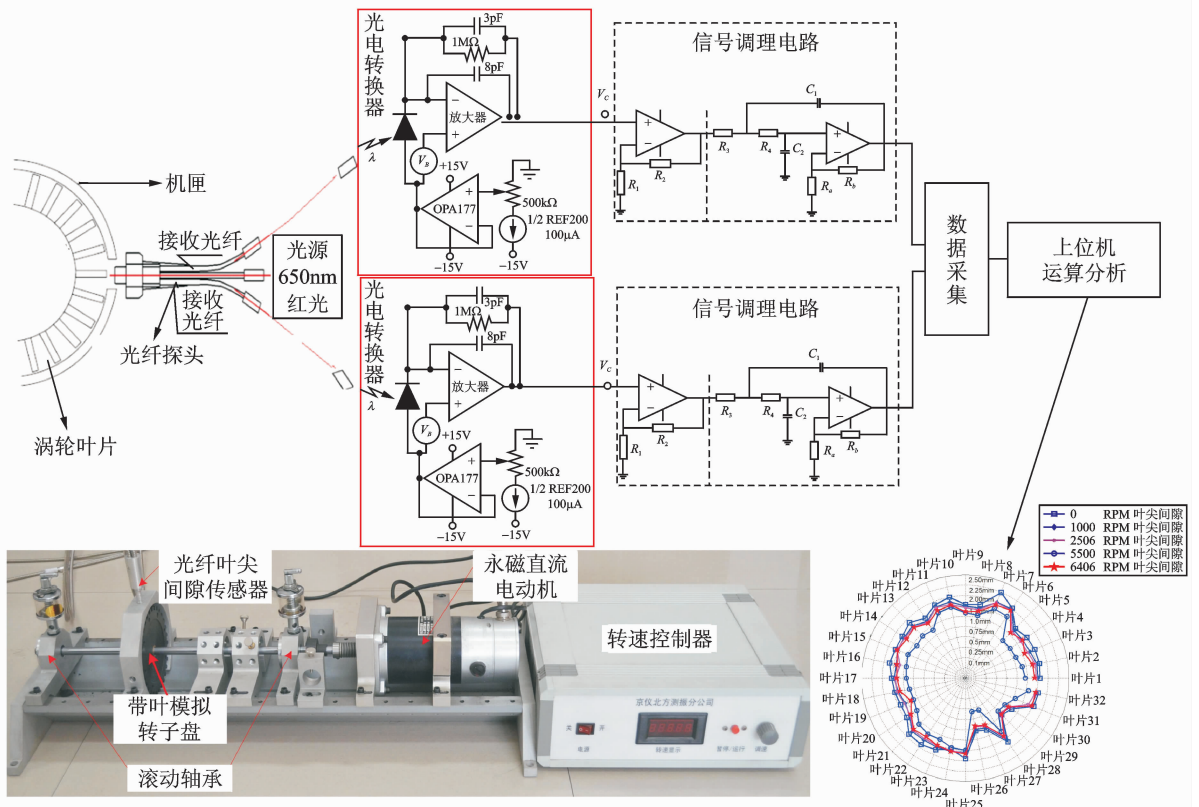


图5 航空发动机叶尖间隙光纤动态检测系统原理图

Fig. 5 Operational principle of optical fiber measurement system for blade tip clearance in aircraft engine

如图 6 所示,航空发动机内燃油流量检测的工作原理如下:基于涡轮流量计,将发射光纤经由导流架安装在涡轮流量计内部,当燃油流体驱动流量计内部涡轮旋转时,涡轮叶片周期性地反射光波,使接收光纤接收到的反射光脉冲频率与涡轮的转速成正比。通过前置电路处理、数据采集和上位机运算可以得到与流量成正比的脉冲信号,进而得到航空发动机燃油流量的动态信息,这种新开发的装置可以称其为光纤涡轮流量计。它与常规的电磁涡轮流量计相比,在线性度、重复性、稳定性、抗电磁干扰能力及量程比等方面具有明显的优势。

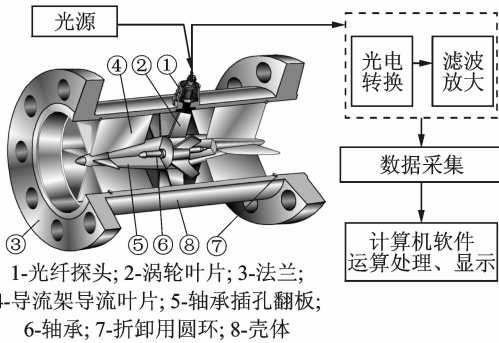


图 6 航空发动机燃油流量检测光纤传感系统原理图
Fig. 6 Operational principle of optical fiber measurement system for fluid-flow in aero-engine

3.3 透射式光纤位姿传感带及其应用

3.3.1 透射式光强调制光纤传感带检测原理

如图 7 所示,透射式光纤位移传感器的工作原理如下:将靠近光源一侧的固定光纤作为光源光纤,并将另一端可动光纤作为接收光纤布置在待测物体上,光源发出光信号沿光源光纤传播后,入射到两个光纤之间的传播介质中,其中一部分光信号透射进接收光纤,通过检测接收光纤的输出光功率就可以确定这部分透射光的强度值,并计算出光源光纤与接收光纤的相对位移、角位移等多维动态信息,从而得到待测物物理量信息。

一般地,基于工程实用考虑,利用这种透射式光纤位移传感器的工作原理,可以制做成光纤传感带结构,由并排的 16 组光纤单元组成,每组单元包含一根光源光纤和两根接收光纤,光纤单元的接续处则等距地分布在光纤带上用于布置在待测物体区域。通过检测 16 组光纤单元的输出光强度信号,并求出输出光导率的变化就可以计算出光纤带的弯曲量和扭转量,从而得到被测物体三维角度、运动方向等信息。

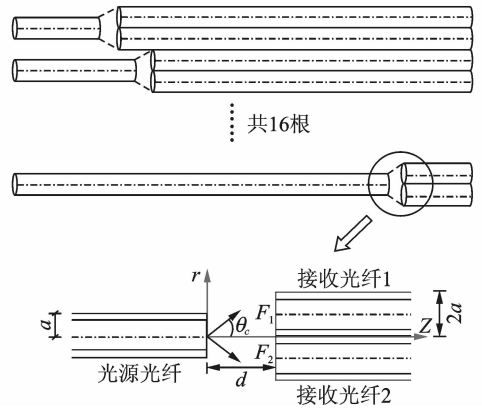


图 7 光纤传感带组成结构
Fig. 7 Structure of optical fiber ribbon

3.3.2 透射式光强调制型光纤带检测关键技术

透射式光强调制光纤带检测关键技术主要包括光纤带弯敏、抗噪设计、后续处理的软、硬件设计等。其中,设计透射式光强调制光纤带的探头部分时,主要通过光纤带的非接续处的硬壳保护套来确保光纤带的弯曲只发生在接续处。同时,接收光纤采用两根光纤的差分形式提高信噪比。接收光信号经过前置调理电路,经由数据采集器送入上位机后,可通过仿真软件如 Motion Builder, Quest3D 和 Virtools 等将光纤带平面转动信号变化转换为三维模拟图像显示。

3.3.3 透射式光强调制光纤传感带在外骨骼机器人的人体下肢动作检测中的应用

外骨骼机器人是一种穿戴在人体上,协助人体承担负重的机器结构^[19],在军队、医疗以及紧急救护中应用广泛,其关键环节就是通过传感器捕捉人体运动意图或行为作为控制信号作用在外骨骼上。

常用的机械力传感器会因为外骨骼服错位引起误差,因此,笔者选型设计了一种基于透射式光纤传感器的光纤位姿带,用于实时检测人体下肢的运动意图,如图 8 所示。其工作原理如下:将光纤带固定在人体下肢并使接续处位于关节处,拾取到的弯曲和扭转信息在计算机内部进行处理后可得到 6 维运动特征值^[20];这些信号通过模式识别,最终能得到人体的运动意图(走、跑、上斜坡、下斜坡、蹲、起)信息;再把这些信息作为输入控制信号,就能实现外骨骼与人体的协调运动。

光纤位姿带用于检测人体下肢运动具有结构简单、穿戴容易、抗干扰力强的优点,结合上位机软件编程,还可以形成可视化的输出效果,使测量和控制过程更为直观。



图 8 检测人体下肢运动意图的光纤带系统图

Fig. 8 Fiber belt system for measuring lower limb movement of human body

4 传感型光纤传感器及其工程应用

4.1 传感型光纤传感器的检测原理

在传感型光纤传感器中,光纤不仅是导光媒介,而且也是敏感元件,光在光纤内受被测量调制。与传光型光纤传感器相比,传感型光纤传感器具有结构紧凑、灵敏度高等优点,是目前的研究热点。如图 9 所示,传感型光纤传感器的工作原理如下:光纤本身作为敏感元件,在被测量的作用下,光纤的折射率、损耗、结构等参数中的一个或多个会发生变化,导致光纤内光信号的强度、相位、偏振态或频率等参数被调制。对调制后的光信号进行解调处理,并对解调后的信号进行分析后可得到被检测的物理量。

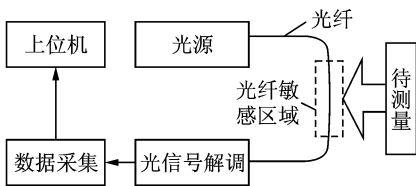


图 9 传感型光纤传感器工作原理

Fig. 9 Operational principle of functional-type fiber optic sensor

笔者结合近年来对传感型光纤传感器及其应用的研究,着重分析讨论强度调制型光纤曲率传感器和光纤光栅应变传感器的检测原理、关键技术及其在航空发动机机匣变形检测、行星轮系齿轮弯曲应力检测中的应用^[19-21]。

4.2 光纤曲率传感器及其工程应用

4.2.1 光纤曲率传感器测量原理

如图 10 所示,基于光纤弯曲损耗效应的强度调

制型光纤曲率传感器的工作原理如下:在多模光纤的一侧采用精密磨削、飞刀铣削或刻蚀等方法将纤芯的一部分去除,形成深度为 h 的矩形槽,槽截面与中轴线垂直,槽的长度为 L_1 ,每个槽之间间隔长度为 L_2 ,共有面积相等的 N 个槽($S_1 = S_2 = \dots = S_N$),形成光强调制区。光源发出的光从光纤一端入射,当光纤的光调制区向未开槽一侧弯曲时,光经过调制区时就会有更多一部分照射到槽端面 S_i 上并透射出去,光纤另一端输出的光强 P_{out} 会变小;同理,当光纤的光强调制区向开槽一侧弯曲时,光纤另一端输出的光强 P_{out} 就会变大。通过实验可得到光强与待测物变形曲率的特性曲线^[21]。

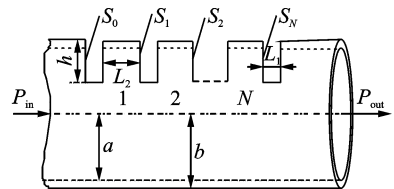


图 10 光纤曲率传感器探头的光强调制区结构

Fig. 10 Structure of light intensity modulation area in optical fiber sensor

4.2.2 光纤曲率传感器的关键技术

光纤曲率传感器的关键技术主要包括传感器探头的增敏技术和后续处理的滤波技术。其中,对于强度调制型光纤曲率传感器,通常将多模光纤进行增敏处理,在所开槽的表面涂一层吸光物质如石墨、AgCl,完全吸收掉从敏感区泄露出来的光线,同时减少外界杂光的影响。另外,为提高输出光信号的信噪比,多采用一级陡度较大的巴特沃斯滤波器滤除信号中的噪声。

4.2.3 光纤曲率传感器在航空发动机机匣变形检测中的应用

机匣是航空发动机的主要承力零部件之一,当其上承受载荷过大时引起的机匣变形会使转子弯曲,给飞行带来安全隐患^[21]。常见的检测机匣变形的手段中,金属应变片灵敏度低,滞后性大,易受温漂影响;半导体应变片受温度影响大,线性度低,均不适合在实际航空发动机中应用;已有的光纤测量手段采用干涉法,组成结构复杂,需借助昂贵的光谱分析仪,才能完成检测。针对此问题,笔者利用前述光纤曲率传感器设计了一种航空发动机机匣变形光纤传感系统^[21],如图 11 所示。其工作原理如下:将光纤的光强调制区粘贴于发动机机匣表面,其余前置器和光源等部件则布置在外部承力机匣上。光源发射的光从发射光纤进入机匣表面处的光强调制区

进行调制,被机匣弯曲变形量调制后的光信号通过前置器、数据采集器后在上位机内完成运算分析得到机匣变形量。为了提高测量精度,通常在机匣一周布置 5 个以上的光纤传感器,这不仅克服了应变片的滞后缺陷,也较之干涉仪更加简单可行。

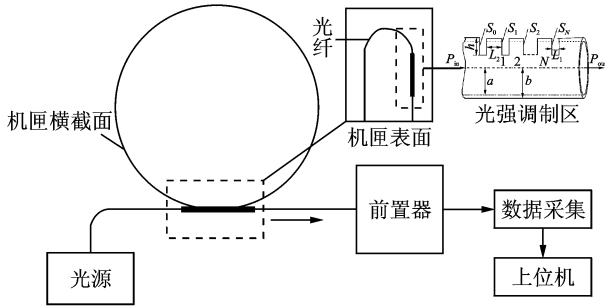


图 11 机匣变形光纤检测系统原理图

Fig. 11 Optical fiber measurement system for deformation of casing

4.3 光纤光栅应变传感器及其工程应用

4.3.1 光纤 Bragg 光栅应变检测原理

光纤由纤芯和包层构成,光纤光栅是纤芯折射率发生周期性变化的一段光纤,其波导结构如图 12 所示。

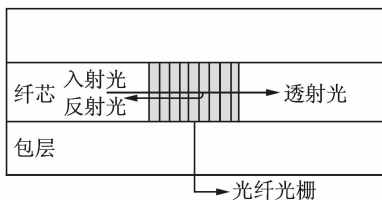


图 12 光纤光栅结构示意图

Fig. 12 Diagram of fiber grating

通常把光栅周期小于 $1 \mu\text{m}$ 的光纤光栅称为光纤 Bragg 光栅(FBG)。当宽带光入射到 FBG 中时,中心波长满足一定条件的入射光会发生反射,反射光的中心波长 λ_B 为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (2)$$

其中: n_{eff} 为光纤纤芯有效折射率; Λ 为 FBG 周期。

当 FBG 发生轴向应变时, λ_B 会发生偏移,其偏移量 $\Delta\lambda_B$ 为

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon\lambda_B \quad (3)$$

其中: P_e 为有效弹光系数,由光纤参数确定; ϵ 为 FBG 的轴向应变。

式(3)为 FBG 的应变传感模型,反映了 FBG 轴向应变与 FBG 反射波长偏移量的关系。

4.3.2 光纤 Bragg 光栅应变检测关键技术

利用 FBG 进行应变检测时,光纤光栅探头设计和波长解调技术是检测系统构建、应用中的关键技术。首先,应根据被测构件的结构特点、应变分布与变化规律,并结合模式耦合理论,优化探头参数,确定探头的安装方式;其次,对传感信号的解调研究,需要设计一种低成本的解调装置来实现高速、高精度的传感检测。通过理论分析可以发现,对光源高速扫描的可调谐 F-P 腔解调法是解决这一问题的一种有效途径。

4.3.3 光纤光栅应变传感器在齿轮齿根弯曲应力检测中的应用

齿轮在传动过程中,由于制造误差、轮齿和轴等零件的弹性变形、振动等原因,齿轮齿根会产生较大的附加弯曲动应力,从而容易导致出现有害的振动、噪音,甚至出现轮齿折断的严重现象。为此,对齿轮齿根弯曲应力进行动态检测是优化齿轮的设计过程的必要环节。

传统的齿轮齿根弯曲应力测量方法中,光弹性法的制作和安装较为复杂,测量周期长;而电测法在进行多点测量时,采用的线束较多,抗电磁干扰能力差。对此,笔者设计了一种行星轮系固定中心齿轮齿根弯曲应力的光纤光栅动态测量系统,如图 13 所示。该系统包括高速扫描光源、光电转换模块、放大滤波模块、数据采集模块、计算机等。它的工作原理如下:将写有多个 FBG 的探头粘贴在行星轮系固定中心齿轮齿根的安全区域内可实现分布式测量,由高速扫描光源在锯齿波电压的驱动下,发出中心波长周期性变化的窄带光信号,通过光耦合器到达齿轮齿根处的 FBG 光栅处,反射回来的光信号通过光电转换、放大滤波、数据采集进入上位机,由寻峰算法实现对 FBG 反射波长的检测。通过 FBG 反射波长的变化,根据 FBG 应变传感模型和标定数据可得到测点处的应变值,进而可求得齿轮齿根的弯曲应力。这种测量方法结构简单,安装方便,适于多点测量和工程应用,并可有效防止电磁干扰。

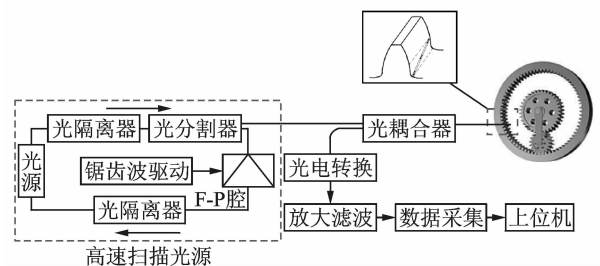


图 13 齿轮齿根弯曲应力测量系统原理图

Fig. 13 Measurement system for bending stress of the gear

5 结束语

光纤传感器作为一种迅速发展的新型检测工具,和传统的机械电子传感器相比,可完成强干扰及狭小环境下的测量任务,但光纤动态检测技术仍然存在许多需要深入研究的关键技术。首先,应优化光纤传感探头设计,进一步提高光纤探头的灵敏度,消除检测死区;其次,需要完善光纤动态检测装置中的补偿技术,实现检测系统的在线、动态软件-硬件补偿,以进一步提高其检测精度;最后,要探索光纤动态检测系统多传感器融合技术及云检测技术,以实现光纤动态检测的网络化和入云化。随着现代光纤检测技术的不断完善,光纤测量技术必将会更加深入地应用到国民经济发展和人类日常生活中的各个领域的测量环境中,为工业现场、生活实际和科研场所提供更优良的检测手段。

参 考 文 献

[1] Frank W E. Detection and measurement device having a small flexible fiber transmission line; U. S. , 3273447 [P]. 1966-11-20.

[2] Kissinger C D. Fiber optic proximity probe; U. S. , 3327584 [P]. 1967-06-27.

[3] Reynolds L, Johnson C, Ishimaru A. Diffuse reflectance from a finite blood medium; applications to the modeling of fiber optic catheters[J]. Applied Optics, 1976, 15(9): 2059-2067.

[4] Cook R, Hamm C. Fiber optic lever displacement transducer[J]. Applied Optics, 1979, 18 (19): 3230-3241.

[5] Raimundo Jr I M, Narayanaswamy R. Simultaneous determination of relative humidity and ammonia in air employing an optical fibre sensor and artificial neural network[J]. Sensors and Actuators B, 2001, 74(1-3):60-68.

[6] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides; application filter fabrication[J]. Applied Physics Letter, 1978 (32): 647-649.

[7] Butter C D, Hocker G P. Fiber optics strain gauge [J]. Applied Optics, 1978, 17: 2867-2869.

[8] Meltz G, Morey M M, Glenn W H. Bragg gratings in optical fiber by a transfers holographic method [J]. Optics Letters, 1989(14):823-825.

[9] Jerebets S A. Gyro evaluation for the mission to Jupiter[C] // Big Sky. Montana, USA; IEEE Aerospace Conference, 2007:1-9.

[10] Meller S A, Jones M E, Wavering T A, et al. Development of fiber optic sensors for advanced aircraft testing and controls[J]. SPIE, 1998, 3541: 134-139.

[11] Naka R, Watanabe K, Kawarabayashi J, et al. Radiation distribution sensing with normal optical fiber[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, 48(6): 2348-2351.

[12] Culshaw B, Dakin J. 光纤传感器[M]. 李少慧, 宁雅农, 译. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997:444-445.

[13] 张平. 滑动轴承润滑油膜厚度光纤动态检测技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2013.

[14] 杨亮, 张小栋. 双圈同轴光纤束位移传感器研究[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29 (2):192-196. Yang Liang, Zhang Xiaodong. Research on displacement sensor of two-circle reflective coaxial fiber bundle [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis. 2009, 29 (2):192-196. (in Chinese)

[15] 吕海宝, 冯勤群, 周卫红, 等. 强度型光纤传感检测中的强度补偿技术[J]. 激光技术, 1999, 23 (2): 91-94. Lü Haibao, Feng Qinqun, Zhou Weihong, et al. Intensity compensation techniques for sensing measuring using intensity type optical fiber[J]. Laser Technology, 1999, 23(2):91-94. (in Chinese)

[16] 张平, 张小栋, 刘春翔. 光纤传感器多点测量润滑油膜厚度方法[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(5): 618-621. Zhang Ping, Zhang Xiaodong, Liu Chunxiang. Multi-point measurement of bearing oil film based on fiber-optical sensor[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2011, 31(5): 618-621. (in Chinese)

[17] 李程启. 旋转机械转轴振动光纤动态测试技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2012.

[18] 贾丙辉, 张小栋, 彭凯. 机动飞行下的涡轮叶尖间隙动态变化规律[J]. 航空动力学报, 2011, 26 (12): 2757-2767. Jia Binghui, Zhang Xiaodong, Peng Kai. Dynamic changes rule of aero-engine turbine tip clearance in maneuver flight[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12):2757-2767. (in Chinese)

[19] 张振海, 张小栋, 侯育军. 用于人体关节角度捕捉的光纤角度传感器的研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 3 (12): 535-538. Zhang Zhenhai, Zhang Xiaodong, Hou Yujun. Research on fiber-optic angle sensor with capturing human joint angles[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 3(12): 535-538. (in Chinese)

[20] 孟亮. 用于外骨骼机器人控制的人体下肢运动光纤带感知方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.

[21] 张振海. 发动机薄壁机匣变形光纤测量技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2012.



第一作者简介: 张小栋, 男, 1967年4月生, 博士、教授。主要研究方向为智能检测、诊断与控制及智能机器人。曾发表《脑控技术的研究与展望》《《振动、测试与诊断》2014年第34卷第2期》等论文。E-mail: xdzhang@mail. xjtu. edu. cn