

文章编号 1004-924X(2007)01-0095-05

用于高速转轴径向振动检测的光纤传感技术

金远强,刘丽华,马惠萍,杨乐民

(哈尔滨工业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:采用光纤测量技术实现航空叶轮泵高速转轴径向振动的检测,对检测系统的工作原理做了详细介绍。设计了新型的光纤测头,提出相应的补偿方案,并对补偿机理进行了详细的分析。对测试系统的特性进行了研究,得出位移特性调制函数表达式,给出了仿真曲线。理论计算和仿真分析表明,该测试系统能有效地消除因光源光强波动、光纤弯曲损耗、表面反射率等因素对输出特性的影响,可以在叶轮泵内部电磁干扰严重和高温等恶劣环境下实现对高速转轴径向振动的检测。实验测试结果表明,随着转轴转速由1 000 r/min提高到10 000 r/min,径向振动幅值单调增加,这与实际情况相符合。

关键词:光纤传感;振动检测;补偿;高速转轴

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A

Fiber sensor used in detecting radial vibration of high rotating speed shaft

JIN Yuan-qiang, LIU Li-hua, MA Hui-ping, YANG Le-min

(School of Mechatronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Optical fiber measuring technique is adopted to detect radial vibration of a high speed rotating shaft in aerial impeller pump and the principle of the detecting system is introduced in detail in this paper. A new type fiber gauge head has been developed, and relevanted compensatory approach is given. Also, the displacement characteristic modulating function is deduced and the emulator curve is provided through studying of the system. Experimental results show that the system can eliminate the infection from light intensity fluctuation, fiber flexural loss and surface reflection index and detect the radial vibration of high speed rotating shaft in aerial impeller pump under the surrounding of strong electromagnetic interference and high temperature. Experiments also show that amplitude of radial vibration increases monotonously with rotation speed of the shaft ranging from 1 000 r/min to 10 000 r/min, it agrees with the physical situation.

Key words: optical fiber sensing; vibration detection; compensating; high rotating speed shaft

收稿日期:2006-03-07;修订日期:2006-09-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50535020)

1 引言

超高速叶轮泵是航天伺服系统液压源的核心动力元件,其工作性能和可靠性对伺服系统在飞行任务中有着至关重要的作用,其中叶轮泵超高速转轴工作时的径向振动量是其工作性能和可靠性的重要指标。由于叶轮泵内部空间狭小,电磁干扰严重,当转轴超高速运转时传统的测量方法很难实现转轴径向振动的精确测量。

光纤是非导体,无电磁干扰问题,适合工况复杂、电磁干扰严重的工作环境^[1];光纤测头使用耐高温石英光纤,去掉涂敷层用耐高温无机胶粘合,非常适合高温条件下工作;光纤体积小,轻便,适合空间狭小的场合^[2]。光纤传感器用于旋转机械的位移检测具有常规检测技术不可比拟的优点^[3],经过近年的发展,光纤位移传感器主要有光强调制式和光干涉式,其中强度调制型传感器结构简单、设计制造方便、工作可靠^[4];干涉型传感器虽然测量精度高,但结构复杂,调整困难^[5]。综合考虑上述因素,为实现恶劣条件下的航空叶轮泵超高速转轴径向振动的检测,本文设计了反射式强度调制型非接触式光纤传感器。

2 工作原理

叶轮泵超高速转轴径向振动检测的原理图如图 1 所示,由半导体激光器发出的光经发射光纤照射到高速转轴的表面,反射回来的光由接收器接收,把光信号转换成电信号。转轴径向振动造成转轴表面与测头之间位移的变化,引起光强信号的变化,根据光强信号的变化便可测出转轴的径向振动量。

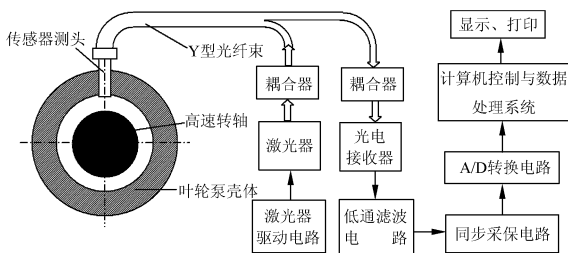


图 1 检测系统原理框图

Fig. 1 Block diagram of detection system

3 光纤传感器的结构设计及补偿原理

本系统用于测试叶轮泵高速转轴的径向振动,传感器测头的工作空间狭小,有强电磁干扰,探测光点所对应的被测点始终在变化,当被测表面受加工和环境的影响使其表面状况不一致时,相当于入射光照射到不同的反射表面,发射表面光学特性的分散性会给测量结果带来误差。另外光源光强波动、光纤微弯损耗等对测量结果也有很大影响^[6]。因此,在采用光强调制传感器时,应考虑补偿措施,以消除这些因素对测量结果的影响。为此,采用发射和接收光纤同轴排布,具有较小数值孔径和芯径的单模光纤作为发射照明光纤,具有较大数值孔径和芯径的多模光纤作为接收光纤,且以两层同心方式排列,如图 2 所示。该结构特点是采用单根单模光纤作为发射光纤,横向分辨率高,采用双层多模光纤作为接收光纤,提高了传感器接收光的能力。把两组接收光纤接收的信号经过适当的处理,即可补偿测点反射能力不同的影响,又可以补偿光源光强变化等其它因素的影响。

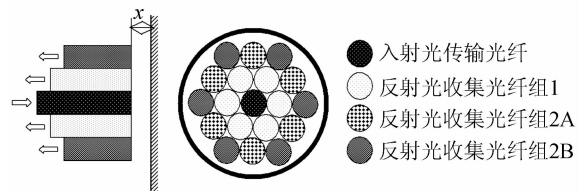


图 2 光纤束测头截面图

Fig. 2 Sectional drawing of optical fiber bundle

如图 2 所示,两组接收光纤接收到的反射光强分别为:

$$I_1 = I_0 K_0 K_1 K_2 K R F_1(x), \quad (1)$$

$$I_2 = I_0 K_0 K_1 K_2 K R F_2(x). \quad (2)$$

式中 I_0 为入射光强, K_0 为光源漂移系数, K_1 为电路漂移系数, K_2 为微弯损耗系数, K 为转换系数, R 代表被测表面反射率不同对测量结果的影响, x 为被测位移, $F(x)$ 为与位移光纤芯径和数值孔径有关的函数。由此可知两接收光纤组所接收的光强之比为

$$Q(x) = \frac{I_1}{I_2} = \frac{F_1(x)}{F_2(x)}, \quad (3)$$

可见用此系统进行测量时,消除了外界环境、

光源光强波动、被测物体表面的反射率、电路的波动和光纤微弯损耗等的影响。此种方法补偿了光源光强波动等各种误差因素对测量结果的影响,提高了光纤位移传感器的测量精度。

4 传感器特性分析

对于单光纤反射式光强调制光纤传感器,接收光纤被反射光斑所覆盖的面积随着反射面相对于光纤测头的位置发生改变而改变,图 3 为收集反射光强的区域。从图中可见,反射光斑覆盖接收光纤纤芯的多少有三种情况:无覆盖、部分覆盖和全部覆盖。

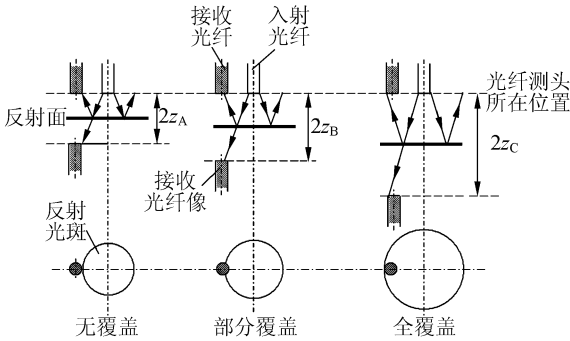


图 3 收集反射光的区域

Fig. 3 Region of collecting reflected light

三种情况下接收光纤接收到的光通量分别为:

$$I_{AFA}(x, y, 2z_A) = 0, \quad (4)$$

$$I_{AFB}(x, y, 2z_B) =$$

$$\int_{-c-b_0}^{c+b_0} \int_{\sqrt{b_0^2-(x-c)^2}}^{\sqrt{b_0^2-(x-c)^2}} \rho I_{TF} dy dx + \int_{-c-b_0}^{c+b_0} \int_{\sqrt{b_0^2-(x-c)^2}}^{\sqrt{(a_0+2z_B \tan(\theta_0))^2 - x^2}} \rho I_{TF} dy dx, \quad (5)$$

$$I_{AFC}(x, y, 2z_C) = \int_{-c-b_0}^{c+b_0} \int_{\sqrt{b_0^2-(x-c)^2}}^{\sqrt{b_0^2-(x-c)^2}} \rho I_{TF} dy dx. \quad (6)$$

式中 a_0 为入射光纤纤芯半径, b_0 为接收光纤纤芯半径, c 为入射光纤和接收光纤的轴间距, ρ 为被测表面反射率, θ_0 为入射光纤孔径角, I_{TF} 是测头端面所接收到的光强, $2z_A$ 、 $2z_B$ 和 $2z_C$ 分别为反射光斑没有覆盖、部分覆盖和完全覆盖接收光纤纤芯时测头和接收光纤像之间的距离。

对于图 2 所示的传感器测头结构,接收光纤组 1、接收光纤组 2A、接收光纤组 2B 和入射光纤的轴间距分别为 $2b_0$ 、 $4b_0$ 和 $2\sqrt{3}b_0$, 代入式(5)和

(6), 即可计算出三组光纤所收集到的光通量。图 4 为三组接收光纤所收集到的相对光强, 图 5 为内外圈接收光纤所收集到的相对光强。

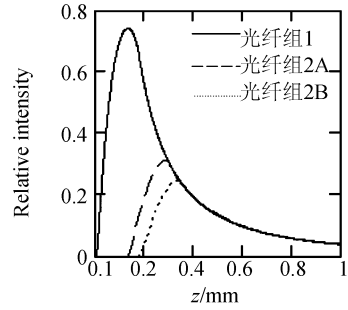


图 4 三组接收光纤所收集到的相对光强

Fig. 4 Relative luminous intensity collected by three groups of receiving optical fiber

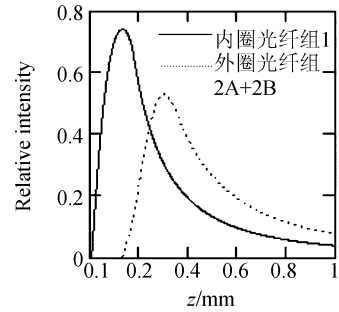


图 5 内外圈接收光纤所收集到的相对光强

Fig. 5 Relative luminous intensity collected by inside or outside receiving optical fiber

最后得到传感器的无量纲输出:

$$M(z) = \frac{I_1}{I_2} = \frac{6I_{10}}{6I_{2A} + 6I_{2B}} = \frac{I_{10}}{I_{2A} + I_{2B}}, \quad (7)$$

式中 I_{10} 、 I_{2A} 和 I_{2B} 分别为反射光收集光纤组 1、反射光收集光纤组 2A 和反射光收集光纤组 2B 中单根光纤所接收到的光通量。图 6 为传感器的输出特性仿真曲线, 横坐标代表光纤测头和被测件的距离。

由图 4 可以看出, 三路接收光纤所接收到的光强随距离的增大而增大, 到达某一距离后开始减小。前坡段可用于线形度和灵敏度较好的微米级测量, 后坡段可用于远距离且灵敏度和精度要求不高的场合, 峰值附近适合表面状态的光学测量。当光源光强、反射率及光纤损耗变化时, 接收光强也会变化, 从而影响测量精度。而采用比值法进行补偿, 将消除这些影响, 输出特性始终为一条曲线, 如图 6 所示。

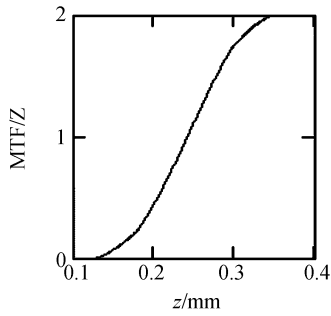


图 6 传感器的输出特性曲线

Fig. 6 Property curve of sensor

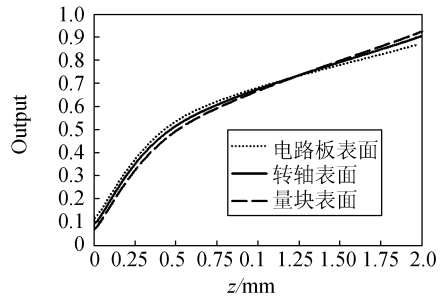


图 8 传感器归一化位移特性曲线

Fig. 8 Normalized displacement characteristic curves

5 实验

在高速传动实验台上,对该系统原理进行了实验,入射光纤纤芯半径 a_0 为 $8 \mu\text{m}$,接收光纤纤芯半径 b_0 为 $140 \mu\text{m}$,激光器选用中心波长为 850 nm 的美国 Honeywell 公司 HFE4383-522 型垂直腔表面激光器,光电接收器选择清华大学研制的 S10E 型 PN-FET,在同一转速下转轴旋转一周内读取 8 次转轴表面与光纤测头的距离,记录其中最大值、最小值及变化量,其变化量即为所研究的径向振动。在具体测试之前,先要进行标定,标定过程如下。

选取不同试件进行了测量系统的位移标定实验。用 HP5528A(双频激光干涉装置)测得的位移值作为位移基准值,图 7、图 8 给出了具有不同反射率和材质的工件表面位移特性曲线。实际传感器的单路位移特性是指光纤组 1 的输出(见图 8),归一化处理是指两路输出之比,即公式(7)所给出的结果。

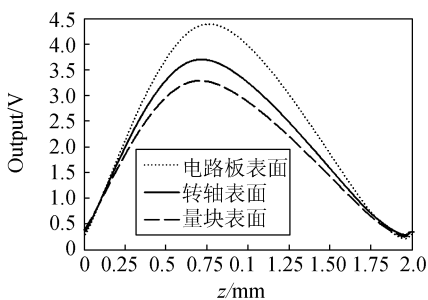


图 7 传感器单路位移特性曲线

Fig. 7 Single-channel displacement characteristic curves

从图中可见,光纤传感器的单路测量信号受工件表面性质的影响较大,但经过归一化处理后,特性曲线基本一致。其中转轴表面即是以上所研究的钢质高速轴表面在静止条件下经多点标定后的平均值。以这一标定曲线为依据,在不同转速下测量该转轴的径向振动,测试结果如表 1 所示。可见,随着转速提高,转轴振动加大。

表 1 不同转速下的实验数据

Tab. 1 Experiment data of different rotatory speeds

转轴转速 (r/min)	最大距离 (mm)	最小距离 (mm)	变化量 (mm)
1 000	1.202	1.150	0.052
2 000	1.183	1.100	0.083
3 000	1.161	1.049	0.112
4 000	1.145	0.968	0.177
5 000	1.137	0.852	0.285
6 000	1.131	0.804	0.327
7 000	1.129	0.751	0.378
8 000	1.127	0.694	0.433
9 000	1.125	0.600	0.525
10 000	1.122	0.460	0.662

6 结论

本文设计了一种用于航空叶轮泵超高速转轴径向振动检测的光强调制型非接触式光纤传感器,该传感器的发射光纤为单模光纤,接收光纤为多模光纤,且采用双层同心排列。内外层接收光纤组接收的光纤经过处理,可以补偿由于光强大小及波动、被测物体表面反射率不同等因素对测量结果的影响。理论计算和仿真分析表明,此测试系统可以实现对航空叶轮泵高速转轴径向振动的高精度测量。表 1 中的实验数据表明,随着转速的提高,所检测到的变化量(径向振动)单调增

加,说明振动加大,这与实际情况是相符合的。至于相符合的程度,则需要找到另外一种较为精密

的测试手段与之相比较,这需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] YAMAGISHI K, YAGI H, MORITA H, *et al.*. Development of the CFRP stator vane for gas-turbine[C]. *International SAMPR Technical Conference*, 1998, 30: 607-615.
- [2] SU G F, SHIMAMOTO A, TANAKA K. Development of a differential optical-fiber displacement sensor [J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38: 1103-1109.
- [3] YUAN L B. The analysis of the compensation mechanism of a fiber-optic displacement sensor [J]. *Sensors and Actuators*, A, 1993, 36(3): 177-182.
- [4] 马惠萍, 刘丽华, 杨乐民, 等. 平行光束反射光强调制型光纤位移传感器研究[J]. *光学学报*, 2002, 23(2): 176-181. MA H P, LIU L H, YANG L M, *et al.*. Fiber optic displacement sensors based on the principle of collimated beam reflective intensity modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 23(2): 176-181. (in Chinese)
- [5] 刘丽华, 车仁生, 李建新, 等. 三层反射式同轴光纤束位移传感器设计[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(增): 25-29. LIU L H, CHE R SH, LI J X, *et al.*. Design of reflective fiber displacement sensor with three-layer coaxial fiber bundle[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 25-29. (in Chinese)
- [6] 杨华勇, 吕海宝. 反射面形状对反射式光纤位移传感器理论特性的影响[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(4): 379-382. YANG H Y, LU H B. Influence on the intensity modulation of a reflective fiberoptic displacement sensor induced by reflector shape[J]. *Opt. Precision Eng.* 2002, 10(4): 379-382. (in Chinese)

作者简介:金远强(1966—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士生,主要从事激光光纤测量及其应用方面的研究。E-mail: j_jyq@126.com

(本栏目编辑 李树军)