

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1801986

基于 LabVIEW 的光纤汽轮机振动测量系统研究^{*}

陈向华¹ 杨萍² 杨海马¹ 赵凯² 袁宝龙³ 李筠¹ 刘瑾¹ 严瑾³(1.上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海 200093; 2.上海航天设备制造总厂 上海 200245;
3.上海淮科智能科技有限公司 上海 201900)

摘要:在对汽轮机振动进行测量时,由于传统测量方法中传感头不便安装、且信号易受电磁干扰,很难对微小位移进行高精度测量,光纤位移传感器具有体积小、不受电磁环境干扰等特点,通过光电转换、信号调理放大实现对汽轮机振动信号的在线测量,结合 LabVIEW 软件对噪声信号进行曲线拟合并结合快速傅里叶变换进行幅频特性处理,获得高精度的微位移测量结果。整个测量系统具有抗干扰、测量速度快、数据实时记录等优势,能实现在线测量微位移功能,经实验验证,振动测量范围 1~500 μm 、精度 $\pm 0.5\%$ 、动态范围 $< 1 \text{ kHz}$,可以满足汽轮机振动测试需要。

关键词: 光纤测振;微位移测量;快速傅里叶变换;LabVIEW

中图分类号: TP311.1;TN249 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4025

The optical fiber vibration sensor vibration system based on LabVIEW

Chen Xianghua¹ Yang Ping² Yang Haima¹ Zhao Kai² Yuan Baolong³ Li Jun¹ Liu Jin¹ Yan Jin³(1.School of Optical-Electrical and computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Spaceflight Manufacture (Group) Co., Ltd., Shanghai 200245, China;
3.Shanghai Huaikie Intelligent Technology Co.,Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: When measuring turbine vibration, it is difficult to accurately measure small displacement because the sensor head is inconvenient to install and the signal is vulnerable to electromagnetic interference in traditional measurement methods. Optical fiber displacement sensor has the characteristics of small volume and being not affected by electromagnetic environment. Through the photoelectric conversion and signal conditioning amplifier it realizes online measurement of steam turbine vibration signals, Combined with LabVIEW software to do curves fitting of noise signal and to do with amplitude frequency characteristics with FFT processing, it eventually obtains high precision micro displacement measurement results. The measurement system has the advantages such as anti-interference, fast measuring speed, real-time recording of data, and it can realize the function of online measurement of micro displacement, the experiment suggests the vibration measurement range of 1~500 μm , accuracy of 0.5%, and dynamic range $< 1 \text{ kHz}$, which can meet the needs of the steam turbine vibration test.

Keywords: fiber optic vibration; micro-displacement measurement; fast Fourier transformation; LabVIEW

0 引言

目前国内外针对汽轮机定子绕组的测量方法主要分为两类,一是接触式测量法,作为最早出现的测量方法,在推进振动测量方法研究的同时,也由于其接触式的测量方法使其发展受限,由于需要将应变片等测量装置粘贴到被测部位,这使其易受环境因素影响,难以做到长期监测;二是非接触式光纤测量方法,即测量传感器对于被测部位非直接接触,而是将传感器安装在所测部位周围,近几年来国内

外学者对此方法进行了大量的研究,目前应用较为广泛的方法有叶端定时法和间断相位法等。由于其结构简单、监测范围广、不易受其他环境因素干扰等优点^[1],这种测量方法远比接触式测量法受到青睐。非接触式光纤测振法,凭借其灵敏度高的优点,可以用来对微小振动进行高精度测量,能有效提高对汽轮机定子绕组振动参数的测量精度^[2]。利用非接触式光纤测振传感器灵敏度高、抗电磁干扰、电绝缘,以及测量速度快、信息容量大的优点^[3],结合 LabVIEW 开发平台强大的信号分析和处理能力,设计了一种基于

收稿日期:2018-08-06

^{*} 基金项目:上海航天创新基金(SAST2017-062)、宝山区科技创新专项基金(17-C-21)、上海市自然科学基金(17ZR1443500)项目资助

LabVIEW 的光纤测振系统, 能够有效地完成对汽轮机定子绕组振动参数的测量工作。

1 光纤测振系统构成及原理

反射式光纤位移传感器可以实现对振动频率小于 1 kHz, 振幅为 500 μm 以内的振动进行测量。整个测振系统包括光纤位移传感器、数据采集和上位机, 其中光纤位移传感器包括光源、耦合器、光电转换单元、信号放大电路和光纤探头等, 如图 1 所示。

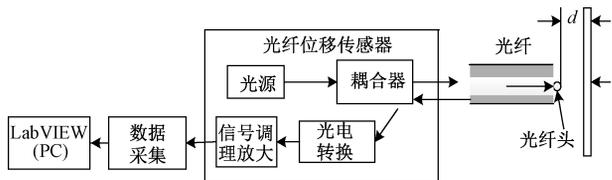


图 1 系统结构

本文光纤传感器探头采用多股单模光纤, 包含发射光纤和接收光纤。测振系统基本工作原理如下: 首先光源发出的光经耦合器进入到光纤中, 之后发射光纤发出光到反射面^[4], 反射面返回的光束由接收光纤经耦合器返回并通过光电转换将光信号转变为电信号, 经由信号处理、数据采集卡, 进入上位机软件处理得到被测量值。当维持光源功率恒定时, 接收到接收光纤的光强强度与反射面和光纤探头之间的距离 d 存在着对应关系, 所以可以改变测量距离 d , 根据物体表面反射并被光纤接收的光强信号变化来检测被测物的振动参数^[5]。

2 测振系统硬件设计

2.1 光纤传感器探头设计

单光纤探头的最大特点是不存在测量死区, 相对于其他光纤传感器其测量范围更大^[6]。为了进行高精度位移测量, 本系统采用多模光纤探头, 入射和反射光纤采用相同光纤 $NA_T = NA_R = NA$, $r_T = r_R = r$ 。光纤传感器探头采用典型的六角形设计, 入射光纤在中心用作光源, 周围六角形排列的 6 根反射光纤用于接收从被测表面返回的光信号强度, 同时入射光纤和反射光纤使用同一根光纤头^[7]。其结构如图 2 所示, 此时光纤束耦合效率最高, 灵敏度提高, 死区最小。

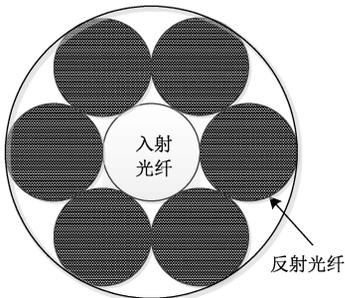


图 2 光纤传感器探头截面

假定单根光纤入射光纤和反射光纤的数值孔径相同, $NA_T = NA_R = NA$, 纤芯半径分别为 r_T 和 r_R , 两光纤的轴之间的距离为 P , 光纤端面与反射面之间的距离为 d , 光耦合的入射光纤的光功率用 P_0 表示, 回光率为 δ ^[8]。在准高斯分布模型的基础上, 光纤端的入射光强的表达式为:

$$I(\rho, d) = \frac{P_0}{\pi q^2(d)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{q^2(d)}\right] \quad (1)$$

式中: $q(d) = \sigma r_T [1 + \zeta (d/r_T)^{3/2} \tan(\arcsin NA)]$ 代表距离 d 处的准高斯光斑的等效半径; σ 为光纤折射率参数; ζ 为光源调和参数, 与光源种类以及光源与光纤的耦合情况有关^[9]。所以光纤端面上的反射光强可表示为:

$$I_R(\rho, d) = \frac{\delta P_0}{\pi q^2(d)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{q^2(d)}\right] \quad (2)$$

反射光纤接受的光功率如下:

$$P_r = \iint_S I_R(\rho, d) dS \quad (3)$$

其中 $S = \pi r_R^2$ 为反射光纤的纤芯面积。

其基本原理如图 3 所示, 基于对单根光纤光强功率的分析^[10], 可得反射光纤接收到的光强功率如下:

$$P_r = P_0 K_i [1 - K_f] \frac{[B - d \tan \alpha]^2}{[B + d \tan \alpha]^2} \quad (4)$$

式中: K_i 代表反射面的反射系数; K_f 代表光纤探头端面的反射系数(常数); P_0 为入射光强功率的光源^[11], 可视为常量; 对于确定的光纤, B 和 $\tan \alpha$ 都是确定的常数, 所以 P_r 只是与光纤探头与反射面之间的距离 d 的函数^[12]。

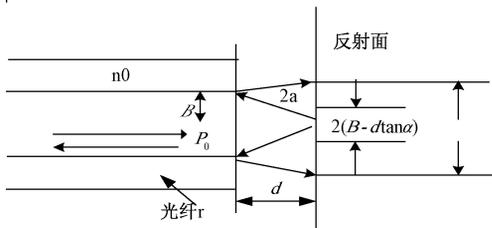


图 3 光纤探头反射原理

2.2 数据采集电路

数据采集电路采用的是安富莱的 AD7606, AD7606 数据采集系统的优点主要是采集速度高速、低功耗, 以及对 8 个模拟输入通道进行同步采样^[13]。使用 AD7606 系统能够高效快速、准确采集到数字信号, 并通过信号放大电路、光电转换电路对信号进行采集。

3 测振系统软件设计

3.1 最小二乘法

设 $y = f(x)$ 的一组观测数据用 $(x_i, f(x_i)), i = 1, 2, \dots, m$ 表示, 要寻求一个函数 $\phi(x)$ 为 $y = f(x)$ 的近似函数, 使得二者在 x_i 上的残差^[14]为:

$$\delta_i = \phi(x_i) - f(x_i), i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

即:

$$\|\delta\|^2 = \sum_{i=0}^m \delta_i^2 = \sum_{i=0}^m [\phi(x_i) - f(x_i)]^2 \quad (6)$$

若式(6)为最小,曲线拟合的最小二乘法就是使得实际数据和求得的数据的误差平方和最小,求得最佳函数,匹配优化参数^[15]。

3.2 LabVIEW 的信号拟合处理

使用 $Y(i)$ 表示所采集的第 i 个离散点的值,采集的点数目用 n 表示。设将要还原的理想正弦信号 Y 满足式(7)。

$$g(t_i) = A_0(\omega t_i + \varphi_0) \quad (7)$$

可知, $Y(0)$ 至 $Y(n-1)$ 之间 n 个采集点围绕函数 $g(t_i)$ 上下波动。主程序框图如图 4 所示。

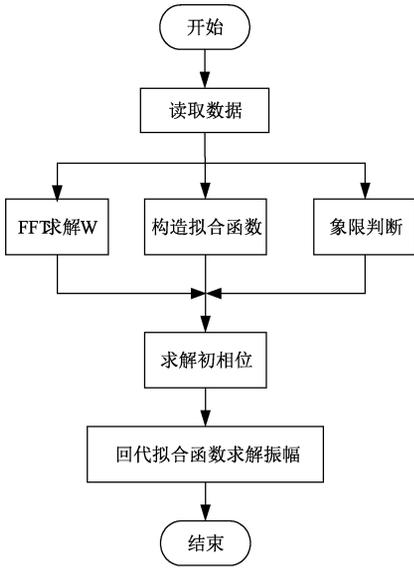


图 4 主程序框图

利用 LabVIEW 中的 FFT 法对所测数据进行幅频特性处理。根据最小二乘法的原理:有且仅有一组使得 $Y(i)$ 与 $g(t_i)$ 的数值距离之差的平方和最小,而被确定的 (A, φ) 就是 $g(t_i)$ 中的参数 (A_0, φ_0) 。要求最大振幅值 F 时,即是求理想的参数 A_0 和 φ_0 。对式(8)中的 A, ϕ 分别求偏导,并令偏导方程等于 0,求解方程即可得到最佳参数。代入式(7)即可得关于振幅 F 的表达式。

$$F = \sum_{i=0}^n [Y(i) - g(t_i)]^2 \quad (8)$$

4 系统性能测试分析

由光纤测振传感器探头测量采集得到带环境噪声的电机信号,如图 5 所示。

令采集得到的离散信号 $Y(i)$ 作为纵坐标参数,一定范围内的补偿作为横坐标参数进行曲线拟合,得到理想的正弦波形信号,所得到的曲线拟合公式如式(9)所示。

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos(xw) + b_1 \sin(xw) + a_2 \cos(2xw) + b_2 \sin(2xw) \quad (9)$$

拟合系数为:

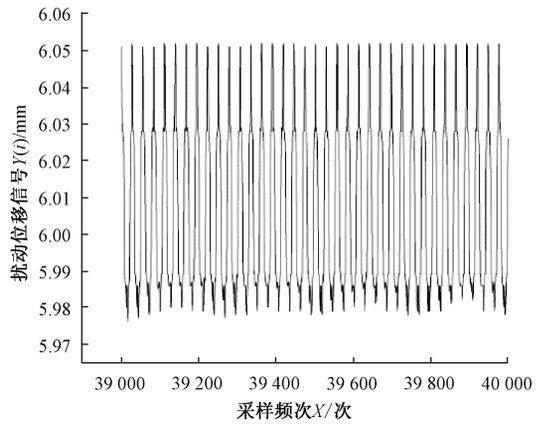


图 5 电机噪声信号

$$\begin{aligned} a_0 &= 6.007 (6.006, 6.008) \\ a_1 &= -0.1027 (-0.9527, 0.7473) \\ b_1 &= 0.009915 (-8.795, 8.815) \\ a_2 &= -0.02826 (-0.4162, 0.4105) \\ b_2 &= -0.002411 (-0.487, 0.4822) \end{aligned}$$

曲线拟合的程序如图 6 所示。

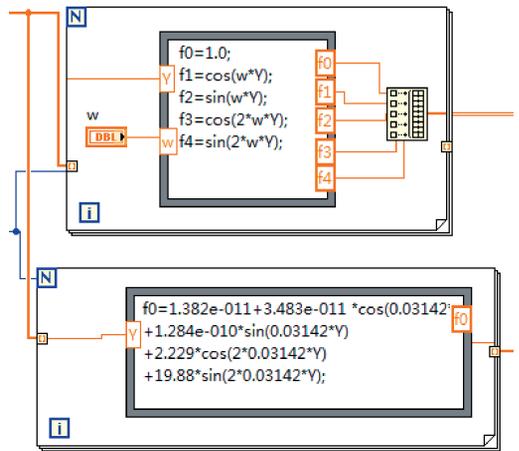


图 6 曲线拟合程序

经过拟合公式,得到拟合后的正弦信号波形,如图 7 所示。

对得到的振动信号利用 FFT 变换处理幅频,则找到的最大幅值为所求。经过实验测量,本系统的稳定性较好,如图 8 所示,经过对采样所得数值和实际振动值进行比较计算,得出幅度误差范围在 -0.5% 和 0.5% 之间。

从图 8 中可以看出,在对 $0 \sim 500 \mu\text{m}$ 级的微位移进行测试时,一定数目的采样之后,采样数值基本都保持在 $0 \sim 500$,可以保持稳定的波动,以采样 1 000 次计算方差算,方差范围保持在 $0.15 \sim 0.25$,波动较为稳定,所测数值在实际值上下波动。

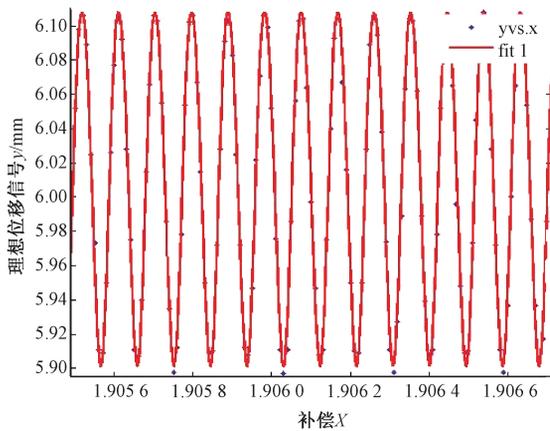


图 7 拟合后信号波形

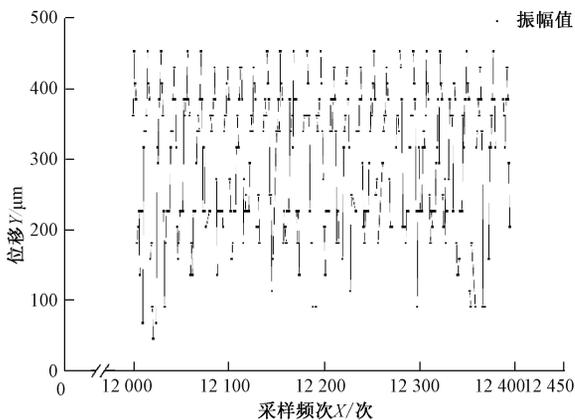


图 8 振幅误差

$$\sigma = \frac{\sum_{x=1}^{1000} (x_n - \bar{x})^2}{1000} \quad (11)$$

对以 100、200、300、400、500 μm 作实际振幅值进行测试时,得到所测数值与实际值得误差在 -0.5% 和 $+0.5\%$ 之间。这保证了整个系统的测试精度处于较高水平。系统所测定子绕组振动频率处于一定范围,因此,系统对频率的要求比较高。

5 结 论

本系统以光纤振动传感器、数据采集卡等作为位移采集装置,采用 LabVIEW 语言作为上位机软件开发了汽轮发电机组振动位移测量系统,不仅能实现传统振动信号的位移测量的功能,而且具有反应速度快、高精度的优点,同时克服了传统测振系统电磁抗干扰能力差,不适合恶劣环境中使用的缺点,在实现传统汽轮机监测功能的同时,实现

了在线微小位移振动的实时测量功能。

参考文献

- [1] 范凡.基于激光反射法的叶片振动测量技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- [2] 廖海黔.基于 LabVIEW 信号发生器控制界面软件设计[J].电子科技,2014,27(7):148-150.
- [3] 李奇磊,刘一,杨明,等.基于 LabVIEW 的微幅低频振动测量[J].仪表技术与传感器,2015(6):118-120.
- [4] 陈玉,王幼民,许德章.光纤位移传感器的研制与应用[J].仪表技术与传感器,2007(9):1-3.
- [5] 庄建红,陈鑫.基于 LabVIEW 的最小二乘法校正控制在控制中的应用[J].沈阳师范大学学报(自然科学版),2014,32(2):178-181.
- [6] 王超,吴自新.基于 LabVIEW 的噪声产生技术研究[J].电子测量技术,2015,38(4):88-91.
- [7] 马伟,张洪浩,董鹏举.基于 LabVIEW 的电动汽车电池检测预警系统[J].电子科技,2015,28(9):115-119.
- [8] 杨俊.基于 LabVIEW 的电机噪声振动测试分析系统[D].杭州:浙江大学,2007.
- [9] 王超,吴自新.基于 LabVIEW 的噪声产生技术研究[J].电子测量技术,2015,38(4):88-91.
- [10] 师雄伟,张乾坤.基于 FPGA 的实时数字化光纤传输系统[J].电子科技,2012,25(2):26-29,53.
- [11] 崔正刚,陈忧先.基于 LabVIEW 的曲线拟合技术的实现[J].仪表技术,2006(4):46-47.
- [12] 韦春玲,黄承义,冯杰.反射式光纤位移传感器的研究[J].国网技术学院学报,2014,17(2):19-23.
- [13] 庄建红,陈鑫.基于 LabVIEW 的最小二乘法校正控制在控制中的应用[J].沈阳师范大学学报(自然科学版),2014,32(2):178-181.
- [14] 张雷.基于虚拟仪器技术的光纤加速度计的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.
- [15] 王时春.基于 LabVIEW 的讯号拟合算法研究[D].济南:济南大学,2007.

作者简介

陈向华,1993 年出生,硕士研究生,主要研究方向为信息获取与处理、智能光电仪器设计、STM32 开发设计。

E-mail:1770345761@qq.com

杨萍,1991 年出生,助理工程师、硕士研究生,主要从事机电一体化设备的设计与研究。

E-mail:15077878802@163.com

杨海马(通信作者),1979 年出生,博士、副教授,主要研究方向为智能光电仪器设计,目标识别和信息处理。

E-mail:snowyhm@sina.com