

三维触发式坐标测量机测头误差分析与性能实验*

丁邦宙 费业泰 夏豪杰 刘芳芳
(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

【摘要】 阐述了基于光纤布拉格光栅原理的三维触发式坐标测量机测头传感系统及控制箱设计方法,从机械结构、传感信号解调系统以及测量过程中逼近速度和逼近距离等几个角度分析了测头误差来源。根据测头的设计参数要求进行了测头的灵敏度、复位性和测力等性能实验,结果表明该测头单方向重复定位精度为 20 nm,灵敏度为 50 nm,测量力小于 5 mN。

关键词: 坐标测量机 光纤布拉格光栅 触发式测头 误差源分析
中图分类号: TB96 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)11-0228-03

Error Analysis and Performance Test of a Three-dimensional CMM
Touch Trigger Probe

Ding Bangzhou Fei Yetai Xia Haojie Liu Fangfang
(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract

A 3-D coordinate measuring machine (CMM) touch trigger probe based on fiber Bragg gratings was developed. The sensing system and the control box of the probe were described respectively. The error of the probe may arise from the mechanical structure, the sensing signal demodulation system, the measuring speed and the approaching distance during the process. Experiments showed that probe positioning accuracy in single direction could reach 20 nm, sensitivity came up to 50 nm and a measuring force was less than 5 mN.

Key words Coordinate measuring machine, Fiber Bragg grating, Touch trigger probe, Error source analysis

引言

测头是坐标测量机的关键部件,其精度影响着测量机的整体测量精度。触发式测头是应用最早、也最为广泛的测头^[1~2]。它具有精度高、价格低的优点,能实现所有的离散点测量要求,是大多数测量机的标准配置,也是绝大多数测量机用户的首选^[3]。早期的电触式开关测头存在较大的预行程变化量误差,为进一步提高测头触发精度和灵敏度,人们进行了新型触测原理测头的研究,如近年来出现的基于压电或应变传感器的触发式测头^[4~7]。

光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating,简称FBG)是均匀短周期光纤光栅,其布拉格谐振波长对

微应变极其敏感。随着光纤光栅的写入技术、信号解调技术和封装技术日趋成熟,使得FBG在传感领域得到了越来越多的应用,如将FBG作为应变敏感元件监测大型建筑结构如桥梁、大坝的健康状况^[8]。本文主要阐述基于光纤光栅的触发式测头传感系统的原理并进行误差源分析。

1 测头传感系统与测头控制箱设计

用ASE宽带光源、7 MHz高灵敏度PIN光电探测器、光分路器,以及NI的PCI6259高速数据采集卡和LabVIEW软件搭建测头的传感系统,并设计了测头控制箱,如图1所示。

通过对测头传感信号处理,实现了如下功能:

收稿日期: 2010-11-15 修回日期: 2010-12-28

* 国家自然科学基金资助项目(50627501)

作者简介: 丁邦宙,博士生,主要从事现代测试技术和仪器精度理论研究,E-mail: bangzhouding@126.com

通讯作者: 费业泰,教授,博士生导师,主要从事仪器精度理论、精密零件热变形等研究,E-mail: ytf@hfut.edu.cn

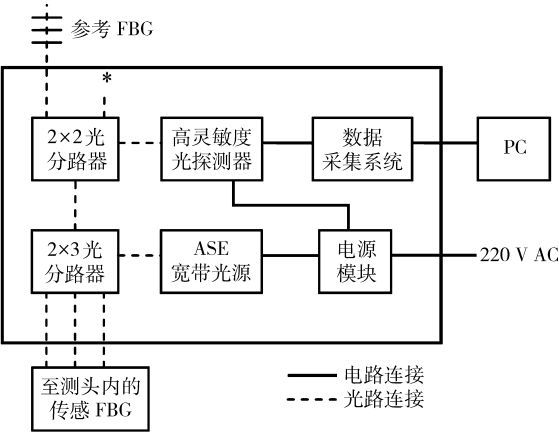


图 1 测头控制箱系统框图

Fig. 1 Frame of the probe control box

①对测头的每一路光信号采样和转换后,把结果送到 LabVIEW 界面上,动态显示每个 FBG 的应变情况。②将模拟电路送来的测头信号加以分析处理,判断是否触发,并给坐标测量机控制系统提供触发信号,记录当前时刻测端球心的坐标值。

2 LabVIEW 程序设计

LabVIEW 是图形化的编程语言,集成了与数据采集卡通讯的功能,并被视为一个标准的数据采集和仪器控制软件^[9]。在本测头系统中用虚拟仪器软件 LabVIEW 编写的程序功能是实现探测器输出端电压信号实时采集,根据设定的触发电压阈值给出触发信号。

采集系统主要包括:数据采集、频谱分析、幅值和电平测量(均值),电压比较、发讯、数据保存。该程序的特点是:调用 LabVIEW 自带的 VI,通过简单的连线和添加逻辑判断,就可以实现以上功能,编程简单,操作方便。

LabVIEW 程序的实施步骤如下:①设置相关参数,包括:采样通道、采样数量、采样速率、采样电压范围等。②开始采集信号,首先读取采样点,计算均值,送入暂存器;其次,计算下一组均值与之比较。③若差值超过设定的阈值,即输入光电探测器的光能量有显著变化,测头系统通过数采卡的输出口给出触发信号。图 2 为 LabVIEW 解调程序流程图。

3 测头误差分析

测头系统的误差主要包括测头机械结构部分误差、传感信号解调系统的误差以及测量过程中因逼近速度和逼近距离不同带来的动态误差。

3.1 测头机械结构误差

测头机械结构误差包括:机械零件的制造误差

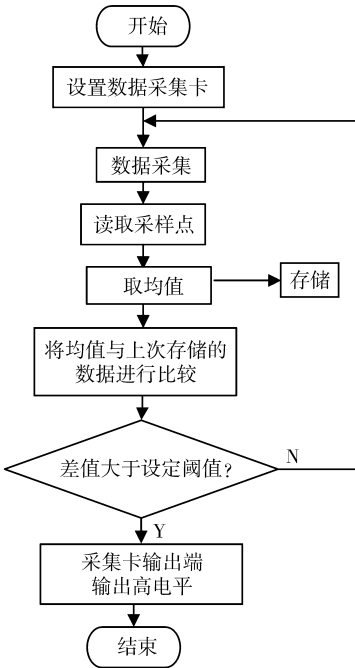


图 2 LabVIEW 解调程序流程图

Fig. 2 Flow diagram of a demodulation program in LabVIEW

和装配误差;测量过程中的原理误差。包括以下几项:

(1)测力引起的测杆及支架的变形误差

尽管触发式探针不需很大测量力,但对于高精度测量来说,测量时测杆挠曲变形带来的误差不容忽视。挠曲变形受测力以及测杆长度、粗细、材质及接触形式等诸多因素影响。

FBG 三维测头的触发力较小,但测杆和支架也会发生一定的挠曲变形。经过仿真分析计算,在测杆上端部固定的情况下,给下端施加 5 mN 触发力,测杆下端为变形最大处,最大变形量为 0.152 μm。当测杆上端随支架一起绕柔性悬挂系统偏摆时,测杆下端最大变形量约为 15 nm。在测量过程中所需的触发力远小于 5 mN,因此测杆末端的最大变形量还会低于这一数值。

(2)FBG 粘接连接方式造成的迟滞误差

用来粘结 FBG 的胶粘剂在固化以后形成过渡层,使得支架发生偏摆时,因过渡层存在蠕动,FBG 上不会立即产生应变。

(3)各向异性带来的预行程变化量误差

测头结构的特点决定了测头在各个方向的预行程大小不同,这会给测头带来预行程变化量误差。这也是接触触发式测头本身所固有的误差类型。

3.2 传感信号解调系统的误差

以 FBG 作为传感器的系统,其信号解调精度决定了 FBG 传感器的精度。有些解调方式比如干涉解调法可以达到 1 nε 的解调精度,色散解调法的精度相对较低,只能达到 0.2 με。本测头也存在同样

的问题,不同的解调方案选择决定了不同的解调精度。本测头采用匹配光栅滤波的方式解调。因为 FBG 对温度变化非常敏感,常温下达到 $1.2\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$ 以上,当匹配光栅与传感光栅不在同一个温度场中时,就不能忽略温度和应变对测量的交叉影响。

3.3 探测速度和逼近距离带来的动态误差

当测头与被测工件表面接触后,测杆偏摆引起 FBG 产生应变,数据采集和处理系统根据探测器的输出变化而发送触发脉冲。

测头向控制系统发出一个触发信号后,控制系统就向 CPU 发出一个中断请求,要求 CPU 立即响应,并将测端球心的空间坐标值锁存。但由于 CPU 在执行完当前指令后才能响应中断,必然会带来时间随机误差 t_r ,同时在中断服务程序中不可缺少的现场保护会产生时间滞后,从而带来系统误差 t_s 。因此从测头发出的采样信号到 CPU 响应中断并锁存数据,存在系统时间延时 $t_r + t_s$ 。若测头与工件接触时的探测速度为 v ,则空间坐标的采样误差

$$\Delta l = v(t_r + t_s)$$

由此可见,若测量机的探测速度大,信号处理及传输的时间长,带来的测量误差也就越大。

在使用过程中,常常给测量设定一个逼近距离,在逼近距离内,降低测头的运行速度,以慢速去触碰工件。采用这样的方式可以相应减小由于发讯迟滞带来的误差。

4 测头性能实验

用 PI 微动台和 SIOS 激光干涉仪进行测头的一些关键性能实验。实验中,用微动台触碰测球测杆末端使其产生微位移,采集测头系统的输出信号,经过 LabVIEW 程序处理,把采集到的信号电压保存,用多次测量的结果来评判测头性能。

4.1 测头灵敏度实验

PI 微动台具有 1 nm 的分辨力,采用闭环按步驱动可以获得最小单步位移为 3.5 nm 。实验中,分别在多个方向给测杆以不同的驱动量,获得的结果绘成极坐标图,如图 3 所示。在水平触测时某个方向上,测头的灵敏度可以达到 50 nm 。垂直方向的灵敏度可以达到 80 nm 。

4.2 测头复位性实验

在测杆末端粘贴一小块反射镜,利用激光干涉仪测量测杆末端微动前后的位移量,将记录的实验数据绘成极坐标图,如图 4 所示,测头的单向重复定位精度可达 20 nm 。

4.3 测头测力实验

测头测量力的实验方法为:在水平方向给测球

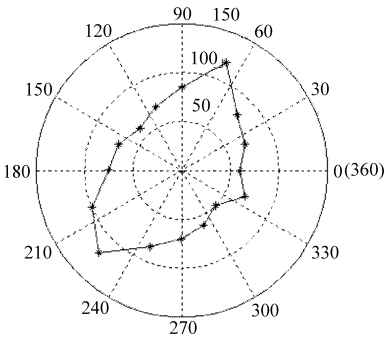


图 3 测头水平方向灵敏度实验结果
Fig. 3 Horizontal sensitivity experiment of the probe

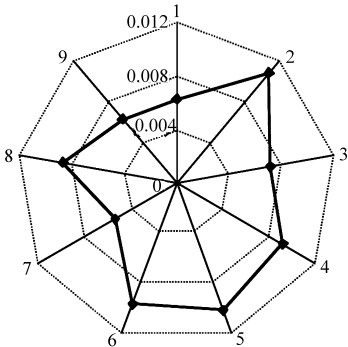


图 4 测头各向复位性实验结果
Fig. 4 Repeatability experiments of the probe

测杆末端施加 5 mN 拉力,并记录其微位移。图 5 是测力为 5 mN 时,测杆末端的偏摆量。测杆在各个方向上的偏移量基本一致,且测杆偏移量达 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。从测头灵敏度实验可知,当测头偏摆达到亚微米级时即可触发,说明测头触发所需的测量力远小于 5 mN 。

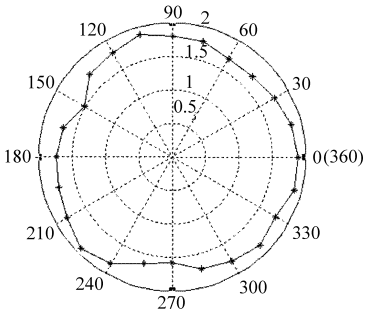


图 5 测杆在 5 mN 作用力下的偏移结果
Fig. 5 Probe deflection under 5 mN triggering force

5 结论

- (1) 搭建了测头传感系统,并利用数据采集卡和虚拟仪器软件实现了光电信号的后期处理。
- (2) 通过部分性能实验,表明 FBG 三维触发式测头具有较高的灵敏度,复位性能良好,且测量力小。
- (3) 分析表明测头误差主要来自机械机构、传感信号解调系统以及测量过程中的动态误差。

参 考 文 献

- 1 高峰. 机构学研究现状与发展趋势的思考[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 3 ~ 17.
Gao Feng. Reflection on the current status and development strategy of mechanism research [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 3 ~ 17. (in Chinese)
- 2 邹慧君, 高峰. 现代机构学进展 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- 3 Wang Xiaoyun, James K M. Dynamic modeling of flexible-link planar parallel platform using a sub-structuring approach [J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(6): 671 ~ 687.
- 4 Zhang Xianmin, Liu Jike, Shen Yunwen. A high efficient frequency analysis method for closed flexible mechanism systems [J]. Mechanism and Machine Theory, 1998, 33(8): 117 ~ 125.
- 5 Zhang Xianmin, Liu Hongzhao, Shen Yunwen. Finite dynamic element analysis for high-speed flexible linkage mechanisms [J]. Computers & Structures, 1996, 60(5): 787 ~ 796.
- 6 Zhang Xuping, James K M. Dynamic modeling and experimental validation of a 3-PRR parallel manipulator with flexible intermediate links[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2007, 50(4): 323 ~ 340.
- 7 贾晓辉, 田延岭, 张大卫. 3-PRR 柔性并联机构动力学分析 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 199 ~ 203.
Jia Xiaohui, Tian Yanling, Zhang Dawei. Dynamics analysis of 3-PRR compliant parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 199 ~ 203. (in Chinese)
- 8 鲁开讲, 师俊平, 高秀兰, 等. 平面柔性并联机构弹性动力学研究 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 208 ~ 215.
Lu Kaijiang, Shi Junping, Gao Xiulan, et al. Elastic-dynamics of planar flexible parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 208 ~ 215. (in Chinese)
- 9 张策, 黄永强, 王子良, 等. 弹性连杆机构的分析与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- 10 张宪民, 袁剑锋. 一种二维平动两自由度平面并联的机器人机构: 中国, CN1903521 [P]. 2008-06-18.
Zhang Xianmin, Yuan Jianfeng. A two-dimensional translational 2-DOF parallel robot mechanism: China, CN1903521 [P]. 2008-06-18. (in Chinese)
- 11 Hu Junfeng, Zhang Xianmin, Zhan Jinqing. Trajectory planning of a novel 2-DOF high-speed planar parallel manipulator [C]//Proceedings of 1st International Conference on Intelligent Robotics and Applications, ICIRA 2008. Wuhan, China, 2008: 199 ~ 207.

(上接第 230 页)

参 考 文 献

- 1 石照耀, 韦志会. 精密测头的演变与发展趋势[J]. 工具技术, 2007, 41(2): 3 ~ 8.
Shi Zhaoyao, Wei Zhihui. Evolution and some trends in precision probe technology[J]. Tool Engineering, 2007, 41(2): 3 ~ 8. (in Chinese)
- 2 肖贵福. 对发展坐标测量机测头的新思考[J]. 现代计量测试, 1995(4): 4 ~ 6.
Xiao Guifu. New thinking on development of probe heads of coordinate measuring machines[J]. Modern Measurement and Test, 1995(4): 4 ~ 6. (in Chinese)
- 3 诸锡荆, 王晋. 坐标测头技术及应用[J]. 中国计量, 2004(2): 10 ~ 11.
- 4 Patrick M Flanagan. Piezoelectric touch probe: US, 6708420 B1 [P]. 2004-03-23.
- 5 Weckenmann A, Peggs G, Hoffmann J. Probing systems for dimensional micro-and nano-metrology[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(3): 504 ~ 531.
- 6 Weckenmann A, Estler T, Peggs G, et al. Probing system in dimensional metrology[J]. Annals of CIRP, 2004, 53(2): 657 ~ 684.
- 7 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999.
- 8 陈晓梅. FBG 传感器在微尺度计量中应用的前景[J]. 航空计测技术, 2004, 24(2): 1 ~ 3.
Chen Xiaomei. The prospect of applying FBG sensor in micro-metrology[J]. Aviation Metrology & Measurement Technology, 2004, 24(2): 1 ~ 3. (in Chinese)
- 9 齐龙, 马旭, 周海波. 基于虚拟仪器技术的田间多光谱系统视觉设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 157 ~ 161.
Qi Long, Ma Xu, Zhou Haibo. In-field multi-spectral computer vision system design based on virtual instrument technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 157 ~ 161. (in Chinese)