

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.05.008

# 长光栅传感器动态特性试验台的设计\*

王 敏, 王笑一

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

**摘要:** 针对目前长光栅动态特性试验缺乏必要手段的问题,采用比对测量原理,以激光干涉仪为基准,提出了一种长光栅动态特性检测和可靠性试验方案,通过实验法研究了速度与加速度对长光栅测量精度的影响;基于精密气浮导轨、激光干涉仪和数控技术,研制出了长光栅动态特性试验系统。该试验台采用卧式结构,主要由机械系统、伺服系统、数据采集处理系统和软件系统组成,具有精度检测、动态性能测试和寿命试验的功能。精度分析结果表明:该试验系统的综合不确定度为 $0.124\ \mu\text{m}$ ,即满足试验台对精度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的光栅进行检测的精度要求。

**关键词:** 光栅传感器; 动态特性; 试验系统; 气浮导轨

**中图分类号:** TH74; TP212.1; TH39

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2013)05-0549-03

## Design of dynamic performance detector system for linear grating sensor

WANG Min, WANG Xiao-yi

(College of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of lacking the necessary means for linear grating dynamic characteristics test, currently, comparison measurement principle was adopted, laser interferometer was used as measurement reference, a linear grating dynamic characteristics detection and reliability test program was proposed, the influence of speed and acceleration to linear grating measurement accuracy was studied through experimental method. Based on precision aerostatic guideway, laser interferometer and CNC technology, a linear grating dynamic characteristics test system was developed. The test bench adopted horizontal structure, mainly composed of mechanical system, servo system, data acquisition and processing system, and software system, with precision testing, dynamic performance testing and life testing function. The results of accuracy analysis indicate that, the uncertainty of the test system is  $0.124\ \mu\text{m}$ , and that meets the accuracy requirements for detecting linear grating with accuracy of  $0.5\ \mu\text{m}$ .

**Key words:** grating sensor; dynamic performance; detector system; aerostatic guideway

## 0 引 言

长光栅传感器作为一种精密测量元件,已广泛应用于各种装备的位置检测和位移测量中。长光栅的性能直接影响各种装备的性能,要提高装备的可靠性,必须对长光栅的动态特性和可靠性进行检测<sup>[1]</sup>。

迄今为止长光栅的静态检测技术已较为成熟,但动态特性检测方面的研究还很少。静态检测偏重于光

栅测试系统的准确度和分辨率测量,不考虑光栅测量系统的动态运行模式<sup>[2-3]</sup>;实际应用中,光栅测量是一种动态测量,测量精度还受测量系统的速度、加速度和频带宽度(截止频率)的影响<sup>[4-5]</sup>,而且随着使用时间的增加,光栅测量系统的可靠性将降低,直至失效。

本研究研制出长光栅动态特性试验台,通过实验法来研究速度和加速度对长光栅测量精度的影响,并检测出光栅的最大有效测量速度、加速度以及封闭式

收稿日期: 2013-01-10

基金项目: 北京市科技计划资助项目(Z121100001612009)

作者简介: 王 敏(1987-),男,湖北十堰人,主要从事仪器科学与技术方面的研究. E-mail:wlm1016830@163.com

长光栅测量系统的有效工作次数。通过对测试和试验的结果进行分析,给出光栅设计和加工的改进措施。

## 1 试验原理

### 1.1 长光栅动态特性检测原理

光栅通常分为开启式光栅和密封式光栅。长光栅测量系统通常由长光栅副及其信号处理单元组成<sup>[6]</sup>。长光栅动态特性试验台是针对长光栅测量系统的动态特性测试及密封式光栅的寿命试验而设计的,同时还具备长光栅精度的检测功能。

长光栅动态特性检测原理如图1所示。检测长光栅测量系统的动态特性时,本研究采用激光干涉仪作为测长基准。光栅读数头和干涉仪靶镜安装在精密气浮导轨的滑块上并随滑块一起移动。系统利用同步数据采集卡以相同频率同时开始采集激光干涉仪和光栅尺的测量数据。设在 $t_1$ 时刻长光栅测得的位移值为 $G(t_1)$ ,干涉仪测得的位移值为 $L(t_1)$ ,对两组数据进行比较,得出光栅此刻的误差值为:

$$E_1 = G(t_1) - L(t_1)$$

(1) 测量长光栅的全长,可得到长光栅的误差集 $\{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ <sup>[7]</sup>,通过数据处理可得到长光栅的各项精度指标;

(2) 改变光栅读数头的移动速度,可以得到速度对测量精度的影响,并可测出长光栅的最大有效测量速度;

(3) 改变光栅读数头的移动加速度,可以得到加速度对测量精度的影响,并可测出长光栅的最大有效测量加速度。

检测精度是依靠高精度的激光干涉仪来保证的,激光干涉仪的精度为20 nm,分辨率为1.24 nm,测量范围为0~2 000 mm,最大测量速度为600 mm/s。

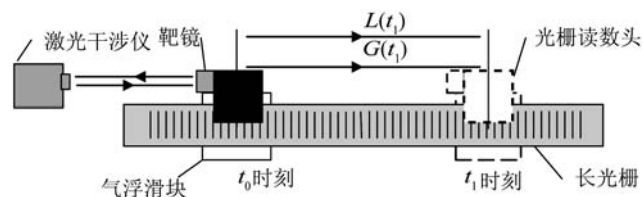


图1 长光栅动态特性检测原理

### 1.2 可靠性试验

光栅可靠性试验对光栅位移传感器在规定的时间内和给定的条件下完成规定功能的能力进行试验,通过可靠度、无故障率、失效率三个指标度量光栅传感器的可靠性。特别是长光栅线位移传感器的寿命试验技术。试验结果直接反映了光栅传感器各组成部件的质量好坏<sup>[8]</sup>。

对于封闭式光栅,由于读数头和光栅盒存在机械接触,接触部分的受力变形和磨损会影响光栅测量系

统的寿命,甚至使光栅失效。进行寿命试验的目的就是要检测出封闭式长光栅测量系统中各个运动部件的有效工作时间。

进行寿命试验时,本研究使光栅读数头在正常工作速度下连续运行,利用计数器记录读数头的正常工作次数,读数头每运动一个行程计数器计一次,实时比较长光栅和干涉仪的测量值,并得到误差值,当光栅尺的测量误差超出允许的误差值时计数器停止计数。研究者通过计算便可得到封闭式长光栅测量系统的有效工作次数。

## 2 试验台构成

试验台由机械主机、伺服系统、数据采集单元、测量系统、软件系统构成。试验台主机采用卧式结构,主要包括:基座、花岗岩平板、气浮导轨副、同步带传动系统、长光栅安装架等。长光栅安装在光栅安装架上并与导轨平行。试验台的主要运动形式为直线运动,采用同步带传动系统将电机的旋转运动转换为滑块沿导轨方向的直线运动。

试验台的主要技术指标和参数为:①测量对象:开启式/封闭式长光栅;②测量范围:有效行程50 mm~500 mm;③检测项目:动态示值误差、全长累计误差和重复性;④精度指标:精度低于0.5  $\mu\text{m}$ 的光栅。

## 3 试验台关键部件的设计

### 3.1 气浮导轨的设计

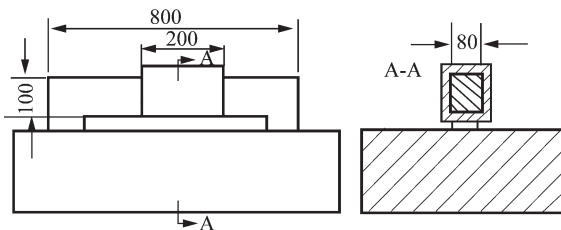


图2 导轨副主要尺寸图

封闭式静压气浮导轨在直线度、偏摆、俯仰、旋转等几何精度很高,刚度好,普遍应用于各种精密仪器中<sup>[9]</sup>。本研究设计的封闭式气浮导轨副的主要尺寸如图2所示。滑块通过压缩气体产生气膜并浮于导轨上,气膜厚度(气浮间隙)一般为6  $\mu\text{m}$ ~10  $\mu\text{m}$ ,形成封闭式气体静压导轨,方向相反的压缩气体气压形成平衡,维持滑块与导轨的固定间隙,以保证导轨的导向精度。

### 3.2 同步带传动系统的设计

同步带传动具有适应高速度、传动比准确、跨距大、噪音小等优点<sup>[10]</sup>。该设计中采用一对齿数和模数相等的同步轮,以实现等比传动(同步带传动系统如图3所示)。主动轮固定在带轮支架上,从动轮和支架

侧板之间的距离是可调的,通过调节侧板上的张紧螺栓可以实现对同步带的张紧,以避免打滑现象的发生。由于本研究采用的是敞开式同步带,需要一对带扣来压紧同步带。内侧带扣和转接件均采用T形结构,并通过螺栓连接在一起,以实现运动的传递。

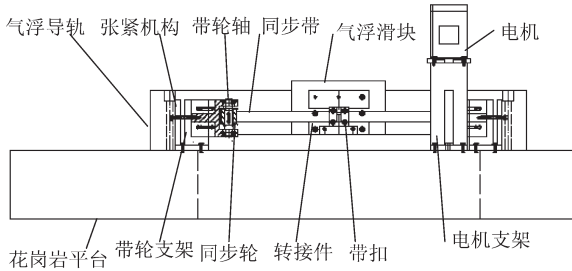


图3 同步带传动系统

### 4 测控系统的设计

根据检测原理,仪器需要高速同步采集两路信号,这对数据采集的同步性和实时性有较高要求,而市场上普通的数据采集卡不能满足要求,然而符合要求的专用产品价格昂贵,所以本研究自主研发了数据采集卡和相应的测量软件。

#### 4.1 双通道同步数据采集卡的设计

本研究所设计的双通道同步数据采集系统,以Altera公司的FLEX10K10系列的FPGA为控制核心,把系统控制模块和数据输入/输出模块全部集成在FPGA中,使系统硬件得到简化,同时也提高了数据采集速度和可靠性;由2片A/D芯片(美国AD公司的AD1674)采集数据,实现16路信号输入;由多路开关实现通道切换功能,每个通道采用1片八选一多路模拟开关和1片A/D转换芯片来实现<sup>[11-12]</sup>。

硬件部分主要包括:数据采集模块、通道切换模块、FPGA控制模块、电源模块等,硬件结构如图4所示。该系统实现了对光栅输出信号和激光干涉仪输出信号的同步采集。与普通数据采集卡相比,本研究所设计的双通道同步数据采集卡在准确性、实时性和稳定性等方面均得到较大改善。

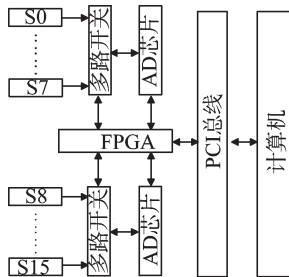


图4 双通道同步数据采集系统硬件结构

#### 4.2 测量软件的设计

软件部分主要包括:窗口界面模块、硬件设置模块、

数据采集模块、数据处理模块、误差评定显示模块、报表打印模块、文件保存模块等,程序流程图如图5所示。

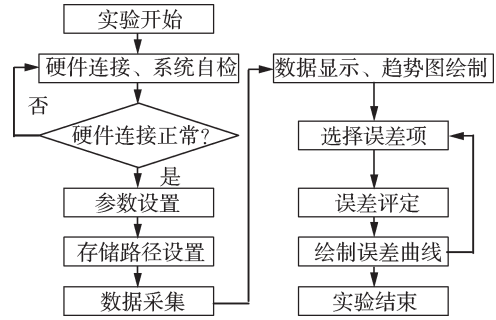


图5 主程序流程图

### 5 精度分析

本研究分析了产生试验台测量误差的4个主要因素:标准量误差、阿贝臂误差、同步误差和随机误差。

(1)标准量误差(激光干涉仪系统误差)。试验中是以激光干涉仪的读数作为标准值,所以激光干涉仪的精度将直接影响测量结果的准确度。激光干涉仪测量误差为20 nm,激光波长稳定性为20 nm,则标准量误差为:

$$\delta_1 = \sqrt{20^2 + 20^2} = 28.28 \text{ nm} \quad (1)$$

(2)阿贝臂误差。阿贝臂误差是由光栅读数头和干涉仪靶镜之间的距离引起的。光栅读数头和干涉仪靶镜之间的距离为50 mm,靶镜最大允许角度误差为0.4",则阿贝臂误差为:

$$\delta_2 = L \tan \theta \approx L\theta = 96.98 \text{ nm} \quad (2)$$

(3)同步误差。同步误差是由采样时间的不同步引起的,数据采集卡的时间延迟为100 ns,读数头移动速度为400 mm/s,则同步误差为:

$$\delta_3 = vt = 40 \text{ nm} \quad (3)$$

(4)其他随机误差。其他误差主要包括死程误差、空气折射率误差、温度误差以及其他未知误差。这些误差可能难以修正,分配该项不确定度分量时宜预留较大空间,其他随机误差为:

$$\delta_4 = 60 \text{ nm} \quad (4)$$

故试验台综合不确定度为:

$$\sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} = \quad (5)$$

$$\sqrt{28.28^2 + 96.98^2 + 40^2 + 60^2} = 124.12 \text{ nm}$$

综合以上各项误差而得,试验台的测量误差对光栅动态精度的影响值为0.124 μm,即满足试验台对精度为0.5 μm的光栅进行检测的精度要求。

(下转第561页)

图6 计算结果对话框

本研究用极值法求得槽底面到 $\varnothing 15H8$ 圆孔中心线的尺寸误差为0.030 5,两种方法计算的定位误差值都小于加工要求的公差值(0.4 mm)的1/3~1/5。槽侧面与 $\varnothing 15H8$ 孔轴线的垂直度误差为0.013 63,两种方法计算的定位误差值都小于加工要求的公差值(0.08 mm)的1/3~1/5。实验结果说明该定位方案可以满足加工要求。

## 4 结束语

根据包含工序系统全部尺寸、误差信息的等价机构模型,本研究提出了一种利用机构杆组分析求解定位误差的方法,在人机交互生成等价机构过程中,调用位置计算子程序,从而计算出由于机构原动件的位置、角度等随机误差变量所引起的目标构件位置变化量的方法。通过样本统计分析,以确定目标构件的位置变化量,即夹具定位误差。

研究表明,利用杆组分析法求解定位误差,其计算精度有所提高。且该方法中的原动件范围容易确定,且子机构之间的输入、输出关系明确,通过函数重载实现位置计算子程序的组合,可以很方便地计算出由于夹具定位所引起的误差。

(上接第551页)

## 6 结束语

针对长光栅动态特性试验缺乏必要手段问题,本研究采用比对测量原理,以精度为20 nm的激光干涉仪为基准,进行了长光栅动态特性检测方案的设计,研制出了长光栅传感器动态特性试验台。精度分析结果表明:试验系统的综合不确定度为0.124  $\mu\text{m}$ ,即满足对精度为0.5  $\mu\text{m}$ 的光栅进行检测的精度要求。

该设计的创新之处在于采用气浮导轨以及双通道同步数据采集技术,实现了对长光栅动态特性的检测,为长光栅动态检测提供了新的途径。

### 参考文献:

- [1] 高潮,杨世雄,顾庆祥. 高精度长光栅动态检测的新方法[J]. 重庆大学学报:自然科学版,1995,18(3): 101-105.
- [2] 费斌,徐文雄,蒋庄德,等. 计量圆光栅动态精度的检测技术[J]. 仪器仪表学报,1996,17(5): 525-529.
- [3] 吴元艳. 精密传动链动态精度检测与分析系统的研制[D]. 南京:南京理工大学电光学院,2008.

下一步笔者将根据夹具与工件的三维夹具装配模型参数信息实现工件—夹具系统等价机构的自动生成,以及子机构位置计算子程序的通用化。

### 参考文献:

- [1] 马成习. 微分法在定位误差计算中的应用[J]. 工艺与检测,2008(4):130-132
- [2] 杨一帆,庄仲禹. 应用尺寸链原理计算夹具定位误差[J]. 机械研究与应用,1994(4):16-19
- [3] WU Y, RONG Y, MA W, et al. Automated modular fixture planning: accuracy, clamping, and accessibility analysis. [J]. **Robotics & Computer-Integrated Manufacturing**, 1998,14(1):16-26.
- [4] 秦国华,吴竹溪,张卫红. 夹具定位方案的数学建模及其优化设计[J]. 中国机械工程,2006,17(23):2425-2429.
- [5] 刘让贤,郭紫贵,凡进军. 基于图形法的机床夹具定位误差计算[J]. 装备制造技术,2007(5):34-35.
- [6] 郭春生,张树人. 夹具定位误差分析的概率法[J]. 长春光学精密机械学院学报,1985(2):81-86.
- [7] 吴玉光,李春光. 夹具定位误差分析的机构学建模方法[J]. 中国机械工程,2011,22(13):1513-1518.
- [8] 徐钟济. 蒙特卡罗方法[M]. 上海:上海科学技术出版社,1985.
- [9] 宁龙,吴玉光. 基于ADAMS的夹具定位误差分析方法[J]. 制造业自动化,2012,34(1):86-89.
- [10] 高占习,荆瑞,武吉梅. 基于Pro/E的切纸机推纸部件运动仿真与分析[J]. 轻工机械,2011,29(2):41-44.
- [11] Parametric Technology Corporation. Pro / TOOLKIT User'S Guide[K]. Parametric Technology Corporation,2001.

[编辑:张翔]

- [4] 李庆祥,王东升,李玉和. 高现代精密仪器设计[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2004.
- [5] 黄小明. 基于误差分解与溯源的动态精度实验、系统设计[D]. 合肥:合肥工业大学仪器科学与光电工程学院,2009.
- [6] 曹向群,黄维实,金彤. 光栅计量技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,1992.
- [7] 吴玉斌,朱勤. 基于虚拟仪器的光栅尺误差动态检测[J]. 光电技术应用,2005,20(4):35-37.
- [8] 祝耀昌. 可靠性试验及其发展综述[J]. 航天器环境工程,2007,24(5):261-269.
- [9] 张斌. 精密工程中免形状测量的关键技术研究[D]. 北京:北京工业大学机械工程与应用电子技术学院,1999.
- [10] 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津:天津大学出版社,2004.
- [11] 朱高峰,张艳蕾. 基于FPGA的可重构数控系统[J]. 轻工机械,2011,29(1):40-42.
- [12] 陈烛夜. 双通道并行多路数据采集卡的研究[D]. 苏州:苏州大学物理科学与技术学院,2007.

[编辑:张翔]