

基于 LabVIEW 的大望远镜直线位移 传感器测量系统*

李玉霞 张斌 杨晓霞

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要:利用 LabVIEW 软件及采集设备研制了一套基于虚拟仪器技术的大望远镜中直线位移传感器测量系统。对大望远镜主镜位置测量中的直线位移传感器(LVDT)特性进行测量标定,获得直线位移传感器灵敏度、基本误差、线性度、重复性、往返回程误差,以便为下一步大望远镜主镜位置解算提供依据。测试结果表明,搭建的测试系统满足直线位移传感器测试需求,界面操作简单友好,直线位移传感器的精度指标达到位置解算要求,该测试系统具有一定通用性,也可用于测试其他直线位移传感器。

关键词: LabVIEW; 直线位移传感器; 大望远镜; 测量系统

中图分类号: TN721.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Position transducer measuring system of large telescope based on LabVIEW

Li Yuxia Zhang Bin Yang Xiaoxia

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Using LabVIEW software and acquisition equipment, the position transducer (LVDT) measuring system on large telescope based on virtual instrument technique was developed. The position transducer on the large telescope was measured, the sensitivity, fundamental error, linearity, repeatability, reverse running error was obtained, in order to provide foundation for primary mirror position resolving of large telescope next. The result of test indicated that the measurement system satisfied the requirement of position transducer measurement, the interface is friendly, the accuracy of position transducer reached the requirement of position resolving, this measurement system had certain common ability, this system can be used in other position transducer.

Keywords: LabVIEW; linear position transducer; large telescope; measurement system

1 引言

随着深空探测的需求,大望远镜成像质量要求越来越高,大望远镜的主镜是整个主光学系统的装调基准,主镜与四通的位置关系稳定是保证光学质量的前提。而对主镜位置的实时准确监测是控制主镜位置的前提。主镜位置通过 X, Y, Z, R_x, R_y 5 个自由度描述,这 5 个自由度的获得需要通过 6 个绝对式直线位移传感器的实时数据进行解算得出。因此对于绝对式位移传感器的监测是实现主镜位置监控的关键环节与前提。其准确与否直接影响数据有效性及结算出的主镜位置的准确性,进而影响对主镜位置的监控,影响大望远镜的成像质量。

为实现对大望远镜中的直线位移传感器测量,基于虚拟仪器技术,本文利用 LabVIEW 软件研制了一种直线位移传感器动态测量系统^[1-5]。该系统可同时测量两个位移传感器性能,可实现对直线位移传感器的灵敏度、线性度、重复性误差、回程误差进行评价^[3,6-9],可实现对数据的存储与动态显示,操作简单、界面友好。

2 直线位移传感器测试原理

2.1 测量系统原理

直线位移传感器测量采用基准比较法,整体的测量原理如图 1 所示。

收稿日期:2015-10

* 基金项目:中科院第三期创新工程基金项目

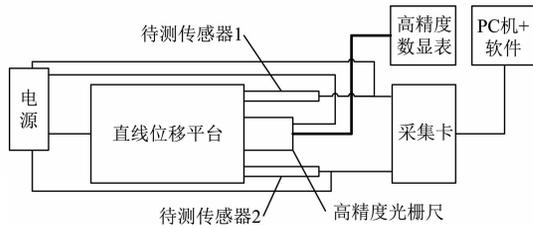


图1 测量系统原理

光栅尺作为基准测量元件,光栅尺的读数杆、两个被测传感器与直线位移平台刚性连接,当直线位移平台移动时,光栅尺、两个待测传感器随之移动同量位移,数据采集卡采集两路待测直线位移传感器,采集数据传送到PC机中。另外光栅尺的数据通过高精度数显表获得,计算机通过比较数显表与传送到计算机中的数据,对所测直线位移传感器的指标进行计算与分析,所获得的数据可以实时动态显示与存储,以便测试后作进一步分析。

2.2 指标分析原理

直线位移传感器测量规范规定对于输出为电信号的直线位移传感器有5个计量特性:灵敏度、基本误差、线性度、回程误差、重复性^[4,7-12]。

这5个指标需要多次重复实验分析得出,具体为在传感器全量程的范围内,均匀分布取若干个,按照顺序读取待测直线位移传感器输出值 y_i 与基准点光栅尺位移输出值 x_i ,往复测量3次,按照相应公式分析出各指标特性^[2,13-15]。

灵敏度为直线位移传感器的位移-电压系数,即每伏电压代表多少位移量。根据待测位移传感器的输出值 y_i 和基准位移 x_i ,取不包括上、下限和中间值的3组数据,对其采用最小二乘法对其进行线性拟合计算,如(1)式所示:

$$y_i = ax_i + x_0 \quad (1)$$

得出的拟合曲线和实际特性曲线如图2所示。

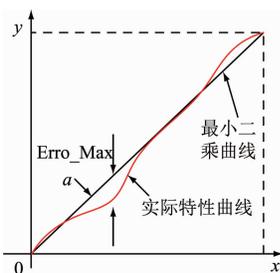


图2 实际曲线与拟合曲线示意

式中 a 为被测直线位移传感器的灵敏度系数, x_0 为截距。具体计算如式(2)和(3)所示。

$$a = \frac{\sum_{i=2}^n x_i y_i - \bar{x} \sum_{i=2}^n y_i}{\sum_{i=2}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=2}^n x_i} \quad (2)$$

$$y_0 = \frac{\bar{y} \sum_{i=2}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=2}^n x_i y_i}{\sum_{i=2}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=2}^n x_i} \quad (3)$$

式中: \bar{x} 为光栅尺位移参考点的平均值, \bar{y} 为待测传感器的位移平均值。 x_i 为第 i 个光栅尺测量输出值, y_i 为第 i 个直线位移传感器输出值。

基本误差是对测量出的实际输出值与拟合曲线理论值的误差表示。取3组包括上下限在内的重复实验往返循环数据,其基本误差 δ_i 由以式(4)获得:

$$\delta_i = \frac{y_i - y_n}{y_{FS}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: y_i 为第 i 个点的直线位移传感器输出值, y_n 是根据获得的拟合公式(1)获得的第 i 个受检点的理论计算值, y_{FS} 为理论输出量程。

可由式(5)、(6)计算得出。

$$y_n = \bar{y}_L + \frac{y_{FS}(i-1)}{n-1} \quad (5)$$

$$y_{FS} = \bar{y}_H - \bar{y}_L \quad (6)$$

式中: \bar{y}_H 为直线位移传感器上限数据的算术平均值, \bar{y}_L 为直线位移传感器下限数据的算术平均值,为所有数据的个数。

线性度评定3次重复测量与理论输出的误差值,由以式(7)计算得出。

$$l_i = \frac{\bar{y}_i - y_n}{y_{FS}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: \bar{y}_i 为直线位移传感器第 i 个测量数据的3组输出值的平均值。

回程误差是对往返重复测量误差的评定。可以由式(8)确定。

$$h_i = \frac{\bar{r}_Z - \bar{r}_F}{y_{FS}} \quad (8)$$

式中: h_i 为每个点的回程误差, \bar{r}_Z 为第 i 个点上3组正向行程输出平均值, \bar{r}_F 为第 i 个点上3组反向行程输出平均值。

重复性描述的是3次往返测量时正反行程最大差值,可以由式(9)确定。

$$r_i = \frac{\Delta_i}{y_{FS}} \times 100\% \quad (9)$$

式中: r_i 为第 i 个点的重复性, Δ_i 为3次测量中传感器正反输出的最大差值。

3 直线位移传感器测试系统

测试系统由测试系统硬件部分和软件部分组成。

3.1 测试系统硬件设计

测试系统硬件由机械结构部分和数据采集与处理系统两部分组成。

机械结构部分由步进电机、滚珠丝杠直线位移平台,光栅尺、专用夹具及电机驱动控制器等组成,该机械部分主要实现精密机械运动,进而带动直线位移传感器的运动。

步进电机与滚珠丝杠直线位移平台组成精密直线位移结构,由电机驱动器驱动电机带动平台进行直线移动,以实现连接在平台端部的直线位移传感器的运动,其精度

影响着最终测量精度。

光栅尺选用海德汉的 MS12. 61-1. 0-CA9, 其分辨率为 $1 \mu\text{m}$, 精度为 $3 \mu\text{m}/\text{m}$, 作为直线位移传感器测量比较的基准, 光栅尺和被测传感器并联安装在精密位移平台上。随着直线位移平台的移动而运动。

专用夹具是为了固定直线位移传感器及光栅尺而设计的, 其结构外形及尺寸由所测位移传感器的外形决定, 夹具的材料要求刚度高、耐磨、稳定。

整个机械结构部分安装在高精度的气浮平台上, 以保证测试系统的稳定及精度。

数据采集与处理系统包括数据采集卡、供电电源、高精度数显表、PC 机组成。数据采集卡选用 NI USB4431 数据采集卡, USB4431 数据采集卡为 24 位的高精度采集模块, USB 供电, 4 通道 A/D 输入, 一通道 D/A 输出, 电压采集量程为 $\pm 10 \text{ V}$, 且内置带有平滑低通模拟滤波器。供电电源负责对 3 个直线位移传感器进行供电。高精度数显表实现对光栅尺信号的高精度测量与显示, 提供直线位移基准。PC 机负责处理、显示及存储数据。

整个测试系统硬件组成与连线如图 3 所示。

3.2 测试系统软件

测试系统的软件部分基于 LabVIEW 软件编写完成, 主要完成对待测直线位移传感器的数据采集、分析与数据处理。整个软件分为数据采集和数据处理两部分。

数据采集部分主要实现对数据采集卡采集通道的硬件配置、采样率、采样模式及采样总数的配置, 也包括对采集数据格式的配置。通过数据采集部分可以实现对数据采集卡 4 个采集通道的数据读取, 以用于后续数据处理部分。

数据处理部分实现对采集数据的数据分析、存储与显示。

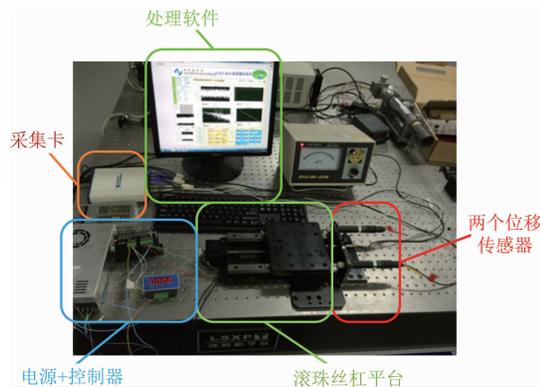


图 3 硬件组成及连接

其中数据分析包括对直线位移原始电压数据的量纲转化及时频域分析。时域分析主要为滤波分析及时域计算, 待数据稳定后, 对每通道采集数据进行均值滤波处理, 每 100 个采样点求取采集数据的算术平均值以作为此位置处的直线位移传感器数据, 同时计算出每个通道每 100 点的均方根值、最大值、最小值以供参考。频域分析可获得各通道的数据实时频谱, 也可对已保存的历史数据和存储数据进行频谱分析, 对测量信号的频率组成进行观测, 以保证测量数据和存储数据的准确性, 其中历史数据是指从点击分析按钮之前的 100 个数据点, 存储数据是指从点击保存后的所有数据。

数据存储可以实现对测试数据的保存, 在用户点击保存按钮后, 可以将之后的数据保存到设定路径和文件名的文件中, 用户点击打开按钮可以实现对保存数据的打开以便查看以往数据。

数据显示部分包括对设置参数的显示, 对两个待测传感器的原始数据波形及数据显示, 分析的时域波形数据及数据显示, 分析的频域波形数据显示等。整个软件的操作与显示界面如图 4 所示。

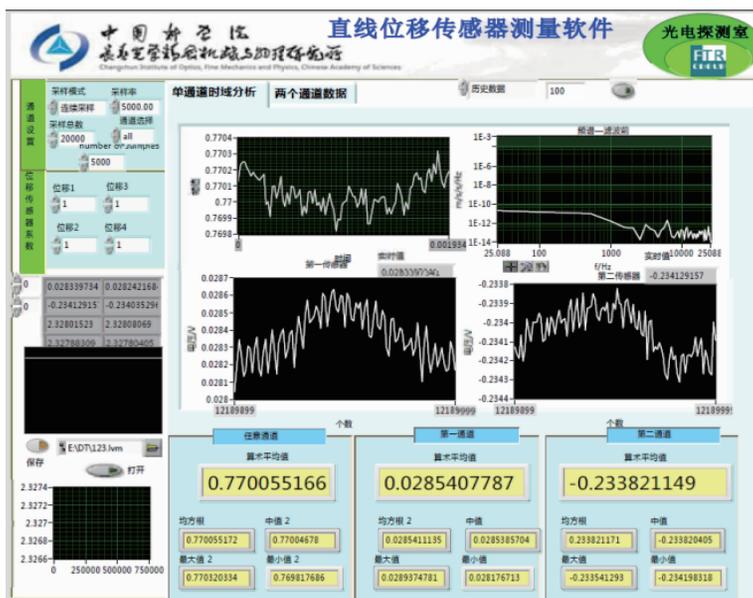


图 4 直线位移传感器测试系统软件界面

4 测量及分析结果

选用的 LVDT 直线位移传感器用于大型望远镜中,线性度为 5%。利用研制的测量系统,获得传感器 1 和传感器 2 的数据,按照上述第 2.1 节指标分析原理中进行分析获得各项指标。

测量直线位移传感器全量程的所有输出值,通过最小二乘拟合获得理论拟合曲线,传感器 1 和传感器 2 的实际输出和拟合曲线如图 5 和图 7 所示,所得到的理论曲线为:

$$y_{1f} = 4.4306x_{1f} - 5.233$$

$$y_{2f} = 4.4091x_{2f} - 4.941$$

由拟合曲线和实际测量之差获得基本误差曲线如图 7 和图 8 所示。

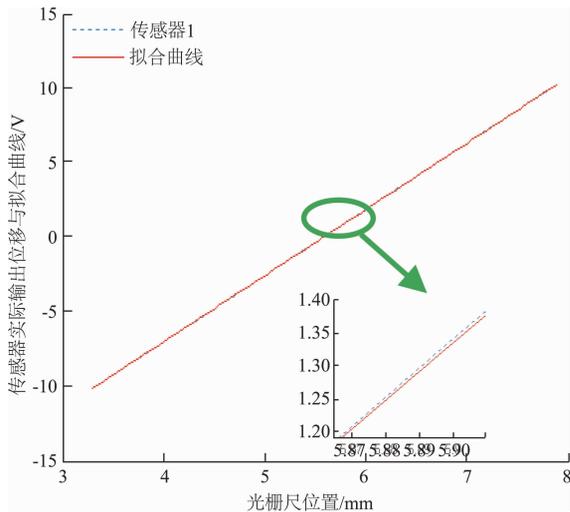


图 5 传感器 1 实际输出与拟合曲线

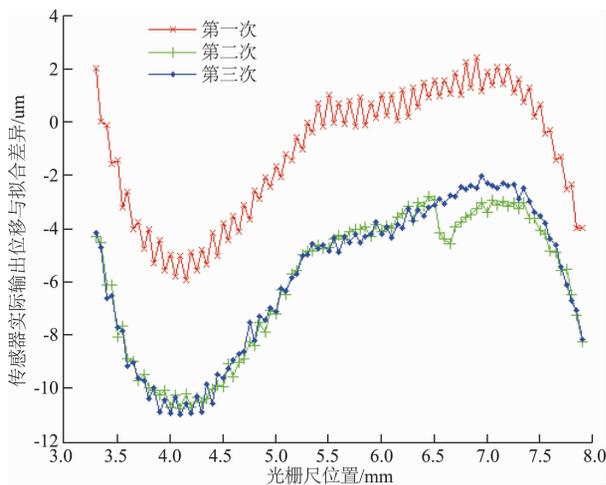


图 6 拟合曲线与实际差异差值

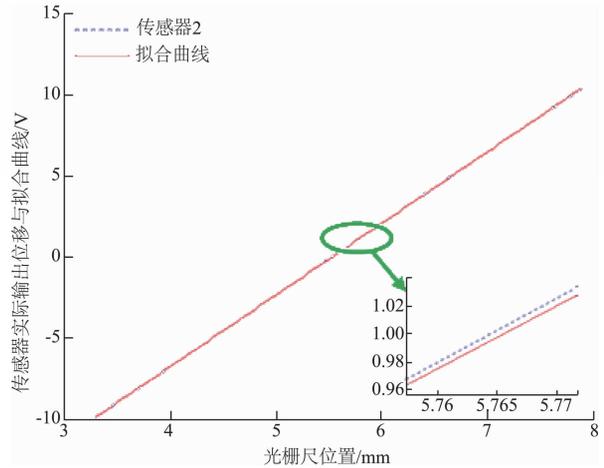


图 7 传感器 2 实际输出与拟合曲线

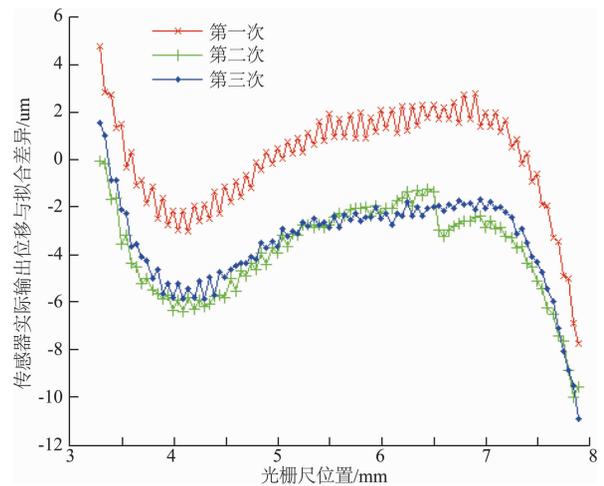


图 8 传感器 2 拟合曲线与实际差异差值

由图 5 和图 6 可知,传感器 1 的在整个量程范围内电压位移特性呈线性关系,3 次测量的基本误差在 $-11 \sim 2 \mu\text{m}$,在中间基本误差较为稳定,在上、下限位置附近变化较大。由图 7 和图 8 可知,传感器在整个量程内也呈线性关系,3 次测量的基本误差在 $-11 \sim 5 \mu\text{m}$ 之间,在中间表现也比较稳定,在上、下限位置变化较大。

根据所测量数据进行分析最后获得各项指标如表 1 所示。由表可知,传感器 1 和传感器 2 的 5 个基本指标在所需范围内。

表 1 传感器 1 和传感器 2 的各项指标

传感器号	灵敏度	线性度	最大基本误差/ μm	回程误差/ μm	重复性
1	4.4306	0.14%	11	4	0.14%
2	4.4091	0.17%	11	6	0.19%

5 结 论

基于虚拟仪器技术,利用 LabVIEW 软件研制的大望远镜直线位移传感器测量系统,操作简单、使用方便,可将测量数据分析、显示与存储,进而获得直线位移传感器的灵敏度、线性度及回程误差等指标参数。对大型望远镜的位置解算提供了前提与技术铺垫,具有重要的意义。之后可以将光栅的数据也利用采集卡采集到计算机中,利用两块数据采集卡完成对光栅尺数据的在线采集与6个直线位移传感器指标的实时处理,以实现大型望远镜的实时解算。另外,该测试系统具有一定的通用性,可以用于测试其他类型直线位移传感器。实现了测量自动化,提高了工作效率。

参 考 文 献

- [1] 姚晓宁,石炳存.基于虚拟仪器的位移传感器在线标定[J].装备制造技术,2008(6):37-38.
- [2] 陈自然,刘小康,郑永,等.精密位移动态测量信号特征辨识及细分新方法研究[J].仪器仪表学报,2015,36(10):2224-2230.
- [3] 罗幼果,李醒飞.基于AD598的位移传感器的误差研究[J].电子测量技术,2007,30(7):189-191.
- [4] 张宇鹏,徐钰蕾,王昱棠.高精度电容式角位移传感器测量方法[J].仪器仪表学报,2014,36(增刊1):147-150.
- [5] 王伯海,刘建胜,张建松.光纤位移测量系统设计[J].电子测量技术,2006,29(4):163-165.
- [6] 韩清华,王海英,董延军.线位移传感器校准的一种新装置[J].新技术新仪器,2008,28(5):20-22.
- [7] 王德兵.直线位移传感器的校准与数据分析[C].航空试验测试技术学术交流会,2009:251-257.
- [8] 姚玉婷,韩敏.一种大量程直流位移传感器校准方法研究[J].航空试验测试技术学术交流会,2011:430-433.
- [9] 崔建军,高思田.线位移传感器的校准及不确定度分析[J].计量学报,2010,31(12):1-6.
- [10] 葛川,李朋志,徐立松,等.电阻应变式位移传感器电路设计与实现[J].国外电子测量技术,2015,34(6):58-61.
- [11] 沈竟,吴舒辞,吴谨绎.振弦式传感器压力测量系统的优化设计[J].电子测量技术,2014,37(11):80-85.
- [12] 马春庭,谭业双,李江波,等.基于LVDT传感器的测径仪研究[J].国外电子测量技术,2014,10(10):72-75.
- [13] 张德福,葛川,李显凌,等.高精度位移传感器线性度标定方法研究[J].仪器仪表学报,2015,36(5):982-988.
- [14] 吴鸿,陈冲,李超,等.一种基于PSD的转速测量新方法[J].电子测量与仪器学报,2014,28(9):1033-1039.
- [15] 张维光,张东平,张磊,等.基于位移传感器的圆弧形面参数测量装置[J].电子测量技术,2015,38(3):100-103.

作 者 简 介

李玉霞(通讯作者),女,1987年出生工学硕士,研究实习员,主要研究方向为大望远镜精密跟踪及自动控制等。
E-mail:lyx26691023@163.com