

基于激光位移传感器的非接触三坐标测量机的设计

王琦楠¹,赵丽琴¹,崔健²,王彪¹,马清艳¹,卢倩³,杨永强³

(1. 中北大学 机械工程学院,山西 太原 030051;

2. 中国兵器工业集团航空弹药研究院有限公司,黑龙江 哈尔滨 150036;

3. 陆军装备部驻北京地区军事代表局驻秦皇岛地区军事代表室,河北 秦皇岛 066000)

摘 要:针对采用接触测头进行测量的三坐标测量机的测量效率低、不能对易变形物体进行测量等问题,设计了一种基于激光位移传感器的非接触三坐标测量系统,以 PLC 和工控机为主控,通过运动模组带动激光位移传感器定位,实现对工件表面特征点尺寸和数据的快速测量,且用户可通过触摸显示屏对设备进行操作。通过对待测工件进行实测表明,该设备能满足生产测量需求,具有实用性和有效性。

关键词:激光位移传感器;非接触;三坐标测量机;设计

中图分类号:TP271+.4 **文献标识码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)01-0220-04

Design of Contactless CMM Based on Laser Displacement Sensor

WANG Qinan¹, ZHAO Liqin¹, CUI Jian², WANG Biao¹, MA Qingyan¹, LU Qian³, YANG Yongqiang³

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Industries Group Aviation Ammunition Institute, Harbin 150000, China;

3. Qinhuangdao Office, Beijing Bureau of Army Equipment Department, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: As to the problems of low measurement efficiency on three coordinate measuring machine by existing contact probe and difficult deformation measurement, a non-contact three-dimensional measuring system was designed based on laser displacement sensor. The system, with PLC and industrial PC as main control and by movement module driving the laser displacement sensor, is able to fix localizations and undertake rapid measuring on the dimension of feature points on workpiece surface and data as well. It also enables users to operate equipments by screen touch. The test results show that the equipment can meet the requirements of production measurement by movement module driving laser displacement sensor with practicality and effectiveness.

Keywords: laser displacement sensor; non-contact; CMM; design

0 引言

随着现代工业的不断发展,对自由曲面零件的质量要求也越来越高。目前,对高精度自由曲面的检测,主要依靠三坐标测量机进行测量^[1]。采用接触法的三坐标测量机具有测量精度高、通用性强、自动化程度高等优点^[2],但在实际使用过程中,传统的三坐标测量机对环境温度、湿度、气源气压有一定要求^[3-4],且测量效率低,无法满足流水线高速生产的需求^[5]。在对易变形工件测量时,测头的接触可能导致工件变形使得测量结果不准确;对于尺寸较小的零件,接触式测头由于本身的半径问题也会影响测量结果^[6]。

由于传统三坐标测量仪接触式测量方法存在以上诸多不足,限制了其应用范围,非接触测量因其高效、无磨损、采样快、无半径补偿等诸多优势而受到越来越多的重视和青睐^[7]。三坐标的发展促进了新型测头的研制,测头由接触式逐渐向非接触式测头的改变使得三坐标测量

机的应用更加广泛。随着现代测量技术要求的不断提高,又要求不断推出各种新型非接触测头。激光位移传感器是在激光技术和 CCD 技术迅速发展的前提下应运而生的一种高精度位移传感器,具有非接触、效率高、轻巧简便等优点^[8]。刘其广等人利用激光三角测量原理在数控机床的基础上,进行了激光非接触测量大型复杂曲面透明件的实践探究^[9];周叶等人使用激光位移传感器实现了对椭圆弧齿线圆柱齿轮的非接触测量^[10];史一露等人提出了一种基于激光位移传感器的轮对尺寸在线检测方法。实现了轮缘高、轮缘厚和车轮直径的自动测量,具有准确、稳定、结构简易等优点,能够满足城轨车辆轮对测量及维修的需要,应用广泛。

本文在满足实际需求的前提下,设计开发了一种基于激光位移传感器的非接触三坐标测量系统,能够对工件表面特征点的尺寸和数据快速测量及处理,自动生成表格输出。该系统不仅效率高,精度高,还具有理论指导意义和实用价值。

1 整体系统设计

1.1 系统组成

本文设计的基于激光位移传感器的三坐标测量系统组成如图1所示。

系统有机械系统、控制系统两个部分。PLC主要负责底层逻辑控制,控制伺服电机驱动器驱动伺服电机,带动直线模组。直线模组带有磁栅尺,磁栅尺信号通过RS485接口回传至PLC形成全闭环系统,保证模组运动精度。在模组装配的末端安装激光位移传感器,实现对工件表面尺寸的测量。激光位移传感器通过信号转换器由RS485转为USB直接连接到工控机上实现控制。工控机主要负责设备整体运行过程控制,用户可以通过交互界面对设备运行情况进行监控和操作。工控机与PLC之间通过MODBUS TCP协议进行通信。

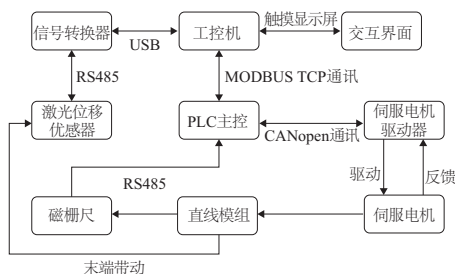


图1 三坐标测量系统的组成

1.2 系统工作流程

设备整体工作流程如图2所示。开机后,系统开始自检。自检通过后,系统进行回零,用户需要设计检测的坐标点并规划路径。完成后用户通过扫码枪输入待测件批次号即可开始测试。在测试过程中,软件自动进行数据处理,存储数据库,测试完成后打印测试报告,一个工作流程即完成。

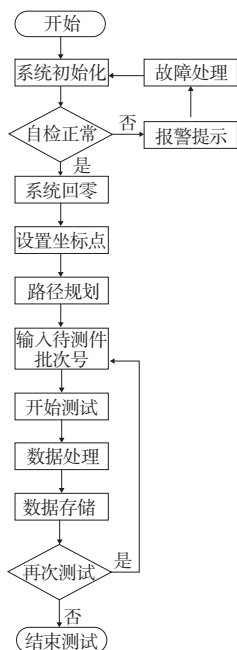


图2 系统工作流程图

2 机械结构总体方案

设备整体机械结构主要分为外框架、测量平台、模组运动平台三部分,如图3所示。外框架采用工业铝型材搭建。工业铝型材规格多样,连接件繁多,通过模块化设计组装,搭建方便快捷,且不易变形,力学性质稳定。测量平台为大理石平台。大理石平台在常温下也能保持测量精度,不磁化,测量时能平滑移动,无滞涩感,不受潮湿影响。同时由于外框架底座装配的安装精度要求不高,方便设备整体装配。模组装配整体安装在测量平台上,由XYZ模组组成龙门式结构,末端带动激光位移传感器实现测量。模组选用SATA直线定位滑台的F特殊防尘系列,其中 x 轴行程为1800mm, y 轴行程为1200mm, z 轴行程为150mm。

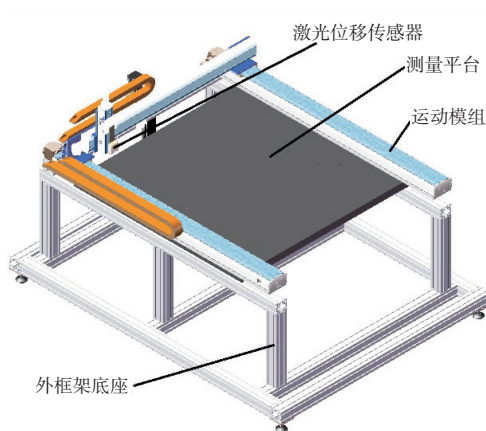


图3 设备整体机械结构三维造型图

3 控制系统设计

3.1 控制系统组成

控制系统包括空气开关、继电器、伺服电机驱动器、伺服电机、开关电源、PLC、激光位移传感器和工控机等。其中PLC主要实现底层运动控制和逻辑,其接线图如图4所示。

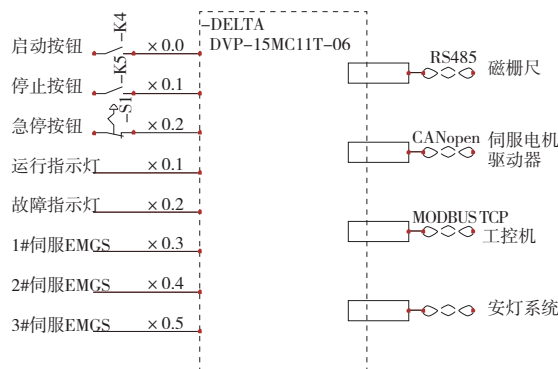


图4 PLC模块接线图

PLC选用台达DVP15MC11T-06。DVP-15MC系列运动控制器是台达自主研发的基于CANopen现场总线的多轴运动控制器,它遵循CANopen DS301基本通讯协议和

DSP402 运动控制协议。PLC 通过 CANopen 对伺服电机驱动器实现控制,通过 RS485 接口读取磁栅尺数据,实现运动模组全闭环控制,模组有效精度 0.03 mm。伺服驱动器选用台达 ASDA-A2 系列。

上位机交互界面采用 C# 开发。软件通过 USB 接口经信号转换器实现对激光位移传感器的信号控制与读取。对 PLC 的读写通过网络 MODBUS TCP 协议实现。

3.2 系统惯量匹配

惯量匹配是指电机的转子惯量和负载惯量的匹配。通过计算系统负载惯量来选取合适惯量大小的电机,有利于提高伺服精度和瞬态响应特性。

对于 x 轴直线模组,其系统惯量为

$$J_{Lx} = 2J_{\text{丝杠}x} + 2J_{\text{传动杆}x} + J_{\text{负载}x} \quad (1)$$

x 轴丝杠、传动杆转动惯量与负载惯量分别为:

$$J_{\text{丝杠}x} = \frac{\pi}{32} \rho L_{\text{丝杠}x} D_{\text{丝杠}x}^4 \quad (2)$$

$$J_{\text{传动杆}x} = \frac{\pi}{32} \rho L_{\text{传动杆}x} D_{\text{传动杆}x}^4 \quad (3)$$

$$J_{\text{负载}x} = M_{\text{负载}x} \left(\frac{P_{bx}}{2\pi} \right)^2 \quad (4)$$

其中: $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$; x 轴丝杠长度 $L_{\text{丝杠}x} = 2068 \text{ mm}$; 丝杠直径 $D_{\text{丝杠}x} = 25 \text{ mm}$; 传动杆长度 $L_{\text{传动杆}x} = 555 \text{ mm}$; 传动杆直径 $D_{\text{传动杆}x} = 30 \text{ mm}$; x 轴滑台负载 $M_{\text{负载}x}$ 包括滑台本身质量、Y 模组质量、Z 模组质量与末端负载以及各连接板质量。 x 轴丝杠导程 $P_{bx} = 10 \text{ mm}$ 。

综上,

$$J_{Lx} = 2J_{\text{丝杠}x} + 2J_{\text{传动杆}x} + J_{\text{负载}x} = 20.4786 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (5)$$

同理可得:

$$J_{Ly} = J_{\text{丝杠}y} + J_{\text{负载}y} = 2.1738 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (6)$$

$$J_{Lz} = J_{\text{丝杠}z} + J_{\text{负载}z} = 0.1917 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (7)$$

3.3 系统转矩计算

为保证伺服电机正常工作,需计算系统整体转矩。伺服电机的最大输出转矩必须大于负载转矩与加速转矩之和,保证伺服系统的工作稳定性。

以 X 模组为例,其转矩

$$T_{Lx} = T_{\text{加速}x} + T_{\text{负载}x} \quad (8)$$

x 轴加速转矩与负载转矩分别为:

$$T_{\text{加速}x} = \frac{2\pi n_x J_{Lx}}{t} \quad (9)$$

$$T_{\text{负载}x} = \frac{\mu M_{\text{负载}x} g P_{bx}}{2\pi} \quad (10)$$

式中: x 轴丝杠导程 $P_{bx} = 10 \text{ mm}$, 其推荐转速(取决于丝杠长度和材料) $n_x = 10 \frac{r}{s}$, 加速时间设定 $t = 0.3 \text{ s}$ 。

综上,

$$T_{Lx} = T_{\text{加速}x} + T_{\text{负载}x} = 0.5041 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (11)$$

同理可得:

$$T_{Ly} = T_{\text{加速}y} + T_{\text{负载}y} = 0.1038 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (12)$$

$$T_{Lz} = T_{\text{加速}z} + T_{\text{负载}z} = 0.0216 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (13)$$

3.4 伺服电机选型与参数设定

根据计算所得的负载惯量与负载转矩选取电机,各轴伺服电机型号及参数如表 1 所示。

表 1 各轴伺服电机型号及参数

类别	型号	转子惯量/ ($\times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)	额定转矩/ ($\text{N} \cdot \text{m}$)	最大转矩/ ($\text{N} \cdot \text{m}$)
x 轴电机	ECMA-C10907RS	1.930	2.39	7.14
y 轴电机	ECMA-C10604RS	0.277	1.27	3.82
z 轴电机	ECMA-C10401SS	0.037	0.32	0.96

其中 x 轴 $J_{Lx} = 20.4786 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 远大于普通伺服电机转子惯量, 考虑增加减速机, 其最佳减速比为

$$i = \sqrt{\frac{J_{Lx}}{J_{Mx}}} = 3.257 \quad (14)$$

实际选取减速机 $i = 5$ 。故:

$$\frac{J_{Lx}}{i^2 \cdot J_{Mx}} = 0.42 \quad (15)$$

$$\frac{J_{Ly}}{J_{My}} = 7.85 \quad (16)$$

$$\frac{J_{Lz}}{J_{Mz}} = 5.18 \quad (17)$$

表 2 列出了常用传动机构示意惯量比推荐范围。

表 2 常用传动机构示意惯量比推荐范围

传动机构类型	惯量比推荐值范围
滚珠丝杠	$\leq (2 \sim 10)$ (与丝杠长度有关)
谐波齿轮	$\leq (3 \sim 10)$
行星齿轮	$\leq (4 \sim 10)$
齿轮齿条	$\leq (1 \sim 8)$
同步带轮	$\leq (1 \sim 8)$ (取决于皮带的类型、张力、长度等)

所以,选取伺服电机满足工作条件, x 、 y 、 z 轴电机对应驱动器负载惯量比设置分别为 1、8、6。

4 软件数据处理算法

为了提高测量效率,测量系统为用户提供了动态测量的选项。激光位移传感器在动态测量中,由于外界震动导致传感器回传数据发生震荡,使得设备在动态测量中的数据可信度降低,重复性差。为此,在对信号原始数据的采集基础上,系统中使用了移动均值法对数据曲线进行平滑,再使用傅里叶曲线拟合出数据曲线,以提高设备的动态测量性能。其中移动均值法公式如式(18)所示。

$$F_t = (A_{t-1} + A_{t-2} + A_{t-3} + \cdots + A_{t-n}) / n \quad (18)$$

式中: F_t 表示对下一期的预测值; n 表示移动平均的时期个数; A_{t-n} 表示前 n 期的实际值。

对于傅里叶曲线拟合,其表达式如式(19)所示。

$$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^m [a_i \cdot \cos(x \times w) + b_i \times \sin(x \times w)] \quad (19)$$

测量系统产生的一组原始数据如图 5 所示。

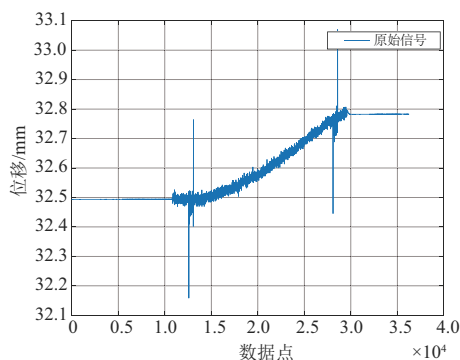


图5 激光位移传感器原始信号

由图5可以看出,传感器在静态测量时,数据基本没有跳动。在伺服系统运动时,回传数据发生了不规则震荡。同时可以看到,在伺服启动和停止瞬间,数据出现了明显波动。

在软件数据处理上,首先使用了移动均值法对数据曲线进行平滑,再对平滑后的数据进行傅里叶拟合。拟合结果如图6所示(因本刊黑白印刷,如有疑问可咨询作者)。

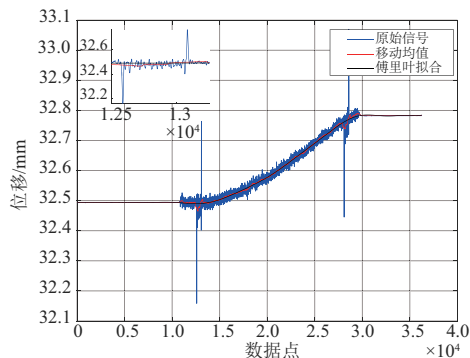


图6 激光位移传感器回传数据处理前后对比

从图6中可以看出,经过数据处理后,明显消除了运动中测量数据的震荡和运动机构启动及停止瞬间的数据跳变,提高了测量的效率和测量结果的稳定性。

测量结果如表3、表4所示。与三坐标测量机测量结果比较,对硬质工件测量时,两者测量结果基本一致;在易变形工件的测量时,测量结果重复性明显优于三坐标测量机;而且克服了传统三坐标测量机不能测量软质物体的缺点,具有实用性和便利性。

表3 硬质工件测量结果比较 单位:mm

序号	三坐标测量	本设备测量结果
1	3.332 5	3.337 9
2	3.333 1	3.339 6
3	3.332 8	3.334 2

表4 易变形工件(某型号弹翼翼尖)测量结果比较

单位:mm

序号	三坐标测量	本设备测量结果
1	43.332 0	43.322 6
2	43.376 2	43.320 6
3	43.320 5	43.329 1

5 结语

本文所述的测量系统整体机械结构合理,安装快捷;伺服系统运转正常,能够达到预期精度要求和响应速度。

基于激光位移传感器的非接触式三坐标测量机工作环境要求低,检测效率高。 x 向行程1800 mm, y 向行程1200 mm, z 向行程150 mm,定位精度0.03 mm,激光位移传感器重复测量误差0.002 mm,绝对误差0.04 mm。可适用于精度要求一般的流水线产品尺寸的快速测量。

参考文献:

- [1] 王帆,吕彦明,刘泽涛. 基于激光位移传感器的航空叶片测量技术研究[J]. 工具技术,2019,53(6):104-107.
- [2] 金美付,杨勇,李晓林,等. 基于立体视觉技术的三坐标测量机的智能化改造[J]. 高校实验室工作研究,2017(4):138-140.
- [3] 罗霆. 三坐标测量机测量结果的影响因素探讨[J]. 南方农机,2020,51(1):142.
- [4] STRBAC B, ACKO B, HAVRLISAN S, et al. Investigation of the effect of temperature and other significant factors on systematic error and measurement uncertainty in CMM measurements by applying design of experiments[J]. Measurement, 2020, 158:107692.
- [5] 李智鹏. 基于激光位移传感器的自动化高度尺寸测量系统研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
- [6] 陈宁. 三坐标测量机测量误差及处理探析[J]. 仪器仪表标准化与计量,2019(4):42-43.
- [7] 田原. 非接触测量技术在截割滚筒外形测量中的应用[J]. 煤矿机械,2019,40(9):130-132.
- [8] 廖金团,王莉莉,覃京翎,等. 基于激光位移传感器的乘用车前悬外倾角在线检测系统的研究设计[J]. 通信电源技术,2020,37(1):107-108.
- [9] 刘其广,徐飞飞,赵吉斌,等. 大型复杂曲面透明件非接触在线测量与建模方法[J]. 机械科学与技术,2020,39(11):1728-1732.
- [10] 周叶,宋爱平,赵昆鹏,等. 椭圆弧齿线圆柱齿轮激光非接触测量方法[J]. 机械传动,2020,44(2):138-143.

收稿日期:2020-07-14