

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.04.06

一种圆管类工件直线度激光测量系统

杨凯¹, 李振华¹, 徐胜男², 王明显³

(1. 山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061; 2. 济南幼儿师范高等专科学校, 山东 济南 250307;

3. 山东省黄河计量研究院, 山东 济南 250100)

摘要: 设计了一种圆管类工件直线度激光测量系统, 提出了一整套关于圆管类工件定心、内径获取和直线度计算的方法。研制了高精度的自动定心机构, 采用双锥体同轴定心法实现测量系统在圆管类工件内的高精度自动定心。通过位置敏感探测器(PSD)和准直激光获得圆管各截面中心坐标, 结合旋转扫描机构获得圆管内径测量值, 并采用最小二乘椭圆拟合算法进行定心误差修正, 最后进行数据处理, 计算出工件直线度。实验结果表明, 该系统定心准确度可达 $20\mu\text{m}$, 内径测量准确度可达 $5\mu\text{m}$, 测量重复性稳定在 $7\mu\text{m}$ 以内, 直线度测量准确度在 $40\mu\text{m}$ 以内。

关键词: 圆管类工件; 直线度; 自动定心; 位置敏感探测器(PSD); 激光测量

中图分类号: TB92; TH744.5

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)04-0022-05

A Laser Based Straightness Measurement System for Tube Type Workpieces

YANG Kai¹, LI Zhenhua¹, XU Shengnan², WANG Mingyu³

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Jinan Preschool Education College,

Jinan 250307, China; 3. Shandong Yellow River Institute of Metrology, Jinan 250100, China)

Abstract: A laser based straightness measurement system for tube type workpieces is designed in this paper. The technologies about centering, diameter acquiring and straightness computing are also developed. The self-centering sub-system uses a double cone coaxial centering method to achieve high-precision centering. Center coordinates are obtained by PSD and collimated laser. A rotation scanning sub-system is used to obtain the tube type workpiece's inner radius and angle measurements which are used to rectify the centering error by applying least squares circle fitting algorithm. The straightness of the tube type workpiece to be measured is finally calculated by using the above data obtained. Experimental results show that the system centering accuracy is up to $20\mu\text{m}$, radial measurement accuracy up to $5\mu\text{m}$, measurement repeatability up to $7\mu\text{m}$, and straightness measurement accuracy less than $40\mu\text{m}$.

Key words: tube type workpieces; straightness; self-centering; position sensitive detector(PSD); laser-based measurement

0 引言

在高精度加工制造业和国防工业等领域, 圆管

类工件直线度检测一直是个难题, 国内外研究人员对此作了大量研究^[1-5], 传统的圆管类工件直线度测量一般采用量规检验法、杠杆法和指示器法等, 但是这些方法测量效率低, 可重复性操作差, 稳定性不高, 而且操作过程复杂, 容易受操作人员和测量环境影响, 不满足现代化生产流水线的要求。有人提出激光准直法^[6], 利用激光准直仪发出平行的、能量分布中心对称的激光光束, 并以此作为直线度测量的基准线, 用四象限光电池作为测量元件感知被测截面实际中心位置的变化, 测量信号经处理后, 可获得各被测截面实际的圆心位置, 再经直线度评定, 获得直线度信息。有关资料也提出了一种基于图像处理的圆管轴线直线度测量激光反射法^[7]。该方法通过激光器发出经准直后的激光并射

收稿日期: 2015-07-03

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研计划项目(GKY201201); 国家自然科学基金资助项目(60904097); 中国博士后科学基金项目(2013M541914, 2014T70637); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2011DX018); 山东省科技发展计划项目(2013GG01257); 济高校自主创新计划项目。

作者简介: 杨凯(1990-), 男, 山东青州人, 硕士研究生, 主要研究方向为模式识别、嵌入式系统; 李振华(1976-), 男, 山东宁阳人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为传感器信息融合、图像处理与模式识别、嵌入式系统应用等; 徐胜男(1979-), 女, 山东莱芜人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为信息融合和信号估计; 王明显(1973-), 男, 工程师, 主要研究方向为测量技术。

向分光镜,部分反射后射向测量元件。测量元件在圆管内移动并感知圆管实际轴线位置的变化。激光经反射后透射过分光镜到光靶上,CCD 摄像机获得光靶上被测截面的图像。经过图像处理及数据处理得出对应被测截面图像中的激光束中心,按照角度积累的公式计算出轴线直线度误差。

本文基于激光非接触测量技术,从提高定心精度和椭圆拟合精度两个角度出发,旨在研究一种既能快速得出圆管类工件直线度参数,又能对工件内径参数进行综合测量的系统。

1 系统介绍

直线度激光测量系统工作原理图如图 1 所示,主要包括驱动机构、定心机构和扫描机构 3 部分。开始测量后,测量系统进入被测圆管类工件内部,当测量系统到达目标位置后,定心机构开始工作,双锥体在驱动电机带动下胀开,完成截面定心。准直激光源提供基准轴线,位置敏感探测器 (Position Sensitive Detector, PSD)^[8] 获得截面测量中心坐标,倾角传感器获得初始旋转角度,然后扫描机构由驱动电机带动绕测量中心旋转,开始逐点采样,由激光位移传感器和绝对式光电编码器同步获得径向距离和角度^[9-10]。旋转一周,采样 500~1000 次,然后对采样数据进行椭圆拟合,获得所测截面的圆心坐标和内径参数^[11]。当前截面数据采集完成后,测量系统在驱动机构带动下移至下一采样截面,获取采样点数据。如此多次,获得多组截面圆心坐标和内径,最后进行直线度评定,获得圆管类工件的直线度。

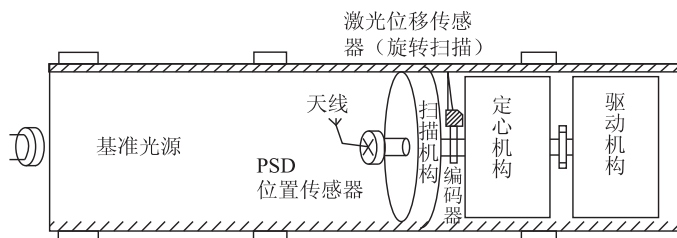


图1 测量系统工作原理图

2 系统的硬件构架

测量系统使用 Altium Designer13 设计硬件电路。主要包括对 K60 最小系统、PSD 处理电路、倾角传感器采集电路、激光位移传感器、光电编码器处理电路以及其他相关电路的设计。

K60 芯片采用的是飞思卡尔公司的 Kinetis 系列的

MK60N512ZVLL10,该芯片具有超低功耗,主频最高可达 150 MHz,含有丰富的外设接口,并包含强大的逻辑、通信能力,完全满足本系统功耗低,采集数据量大,通讯复杂,响应速度快的要求。

PSD 位置感探测器使用的是 SiTek 公司的 2L20_CP7,该 PSD 是一款 2 维四边形位置敏感探测器,有效光敏面积为 20 mm × 20 mm,分辨力 0.1 μm,反向偏置电压 ±15 V,电极输出信号电压不超过 ±12 V。当外部准直激光打到 PSD 上时,PSD 四个象限会产生不同的电流信号,电流大小与坐标位置线性相关,对电流信号进行处理,就能得出准确的激光光点的位置。如图 2 所示为 PSD 的工作原理图。

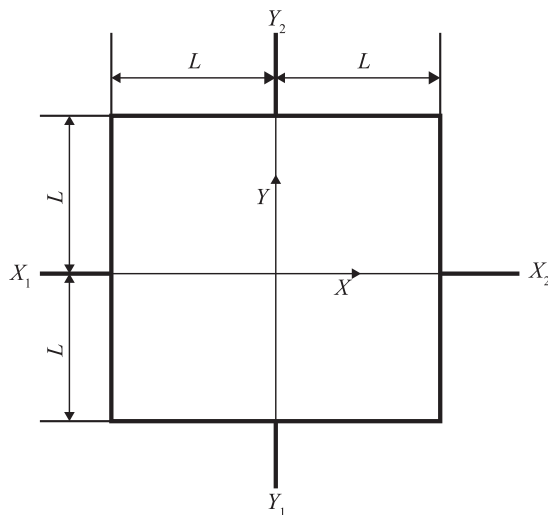


图2 PSD 工作原理图

坐标公式为

$$\frac{X_2 - X_1}{X_2 + X_1} = \frac{x}{L} \quad (1)$$

$$\frac{Y_2 - Y_1}{Y_2 + Y_1} = \frac{y}{L} \quad (2)$$

式中: X_1, X_2, Y_1, Y_2 为 PSD 电流输出; (x, y) 为激光光点相对于 PSD 中心的坐标位置。

倾角传感器使用的是上海直川电子科技有限公司的 ZCT2 系列倾角传感器。该倾角传感器的测量范围为 ±60°,而当测量范围为 ±30°时,分辨力为 0.003°,能准确得出测量系统的初始测量角度,采用 RS232 串口进行数据传输,波特率 9600 bit/s。将倾角传感器固定到测量系统上,用来测量待测圆管截面坐标系与参考坐标系的夹角。倾角传感器测量的夹角值用来将每个截面的测量结果转换到同一坐标系内。原理如图 3 所示。图 3 中, $\Delta\theta_i$ 是第 i 个截面坐标系 $X_iO_iY_i$ 与参考坐标系 XOY 的夹角。

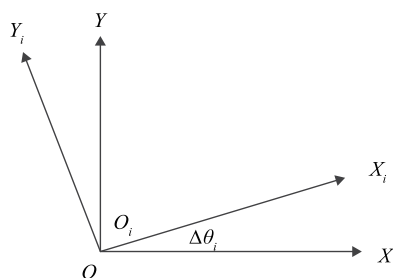


图3 倾角传感器原理

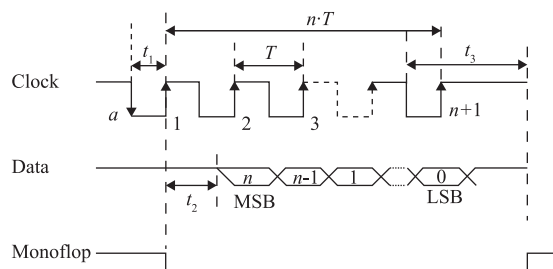


图4 SSI 信号传输示意图

光电编码器为 Netzer 公司的 DS-37，它是一款绝对式旋转编码器，为 17 位分辨力，厚度仅有 8 mm，外径尺寸 37 mm，具有超小体积和高精度的特点，信号传输采用 SSI 同步串行信号，位置输出传输速率高达 30 kHz，测量精度远远超过传统的编码器。绝对式光电编码器使用 SSI 信号进行数据传输。SSI 信号如图 4 所示，仅由时钟信号和数据输出信号组成，每个时钟上升沿，编码器都向外发送一位数据，在信号传输时，时钟信号和数据输出信号设计为两路 422 差分信号。由于普通的 MCU 不提供 SSI 接口，因此使用两片 max422 芯片与 MCU 连接，将差分信号转换为 TTL 电平信号，从而实现对光电编码器信号的读取。经验证，采用 max422 芯片转换的信号能实现数据稳定读取。

激光位移传感器选择 OPTEX 公司的 CD22-15-485-

M12，这款传感器的体积仅为 18 mm × 31 mm × 44 mm，分辨力为 1 μm，而且使用 RS485 信号传输，相对于 AD 模拟信号，RS485 数字信号传输速度更快，信号更稳定，可实现对半径高效率高精度测量，保证采样数据足够充分，从而使拟合的工件截面的圆心坐标和半径更准确。

系统采用蓝牙和 WIFI 进行测量系统各模块间通讯和与上位机通讯。圆管类工件内径测量的特殊性要求各个模块结构必须非常紧凑，而且还要保证为蓝牙和 WIFI 提供充足的空间。基于上述要求，选择的蓝牙模块为 BMX-03，WIFI 模块为济南有人科技有限公司的 USR-WIFI232。两种小模块均具有超小体积，能在超过 115200 bit/s 的波特率下高速传输，确保各个数据采集板和上位机之间及时通讯，保证各机构动作协调一致。系统的硬件设计原理图如图 5 所示。

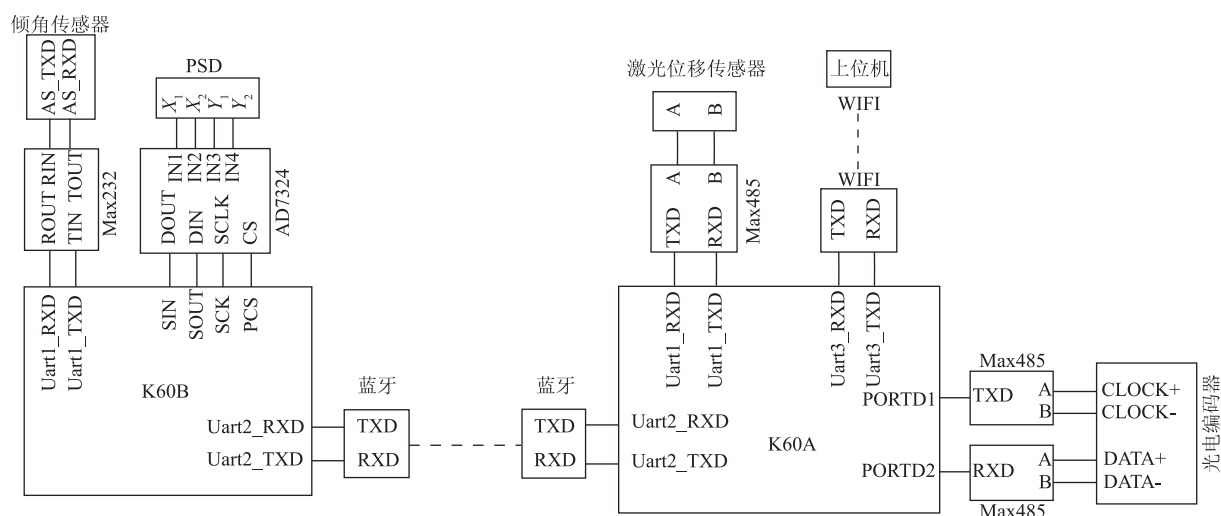


图5 K60 硬件设计原理图

3 系统软件设计

3.1 软件设计流程图

如图6所示为系统设计流程图,上位机通过WIFI向测量系统发送启动命令,测量系统接收上位机的命令后,在工件内移动到指定位置,定心机构定心,定心完成后,获取此时PSD测得的测量中心坐标和倾角传感器测得的偏转角度,然后通过蓝牙发命令给电机控制器控制电机转动,扫描机构采集圆管截面的径向长度和角度,旋转一周后,测量系统获得多组采样点数据;之后,经WIFI将数据发送到上位机中,上位机对数据进行拟合运算,得出工件截面圆心坐标和半径。如此反复多次,得到整个圆管多组截面圆心坐标和半径,经直线度评定,得出圆管直线度。

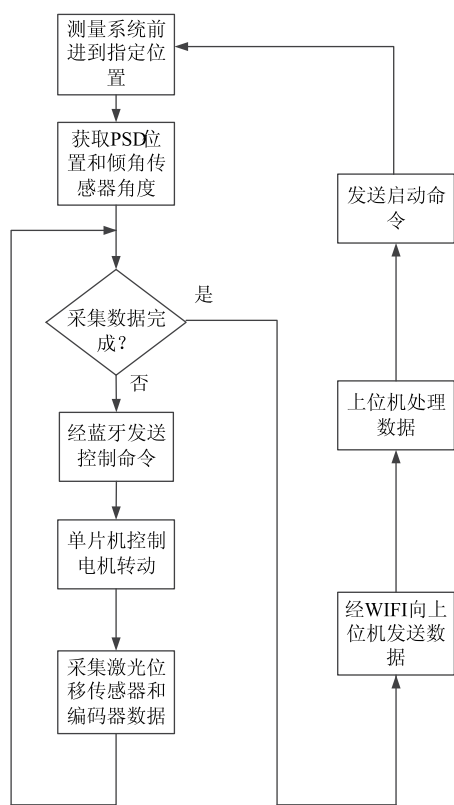


图6 系统设计流程图

3.2 程序实现

直线度测量系统的程序是通过IAR6.3编辑实现的。IAR6.3灵活多变,界面简单,编程和调试方便,完美支持K60芯片编程和在线调试,因此选择IAR6.3作为程序调试工具。IAR6.3需要对测量系统进行相关功能模块配置和C程序编写,编写的程序编译没有问题后,下载到K60芯片内运行调试。

程序主要分为三大部分:K60初始化、信号采集

模块初始化和数据处理。其中K60初始化主要是对时钟和引脚相关功能配置,比如系统时钟,各功能模块时钟。因为K60芯片的引脚复用功能较为复杂,所以在配置为相应功能引脚时,必须通过设置控制寄存器来实现。虽然在一定程度上增加了入门使用难度,但是极大丰富了芯片资源,在处理复杂逻辑系统时,使用更方便。信号采集模块初始化包括对UART功能、同步串行通信SPI模块、周期定时中断PIT模块、脉宽调制PWM模块以及SSI信号模拟功能模块等相关模块进行配置。数据处理包括数据采集策略以及最小二乘法算法程序等。

4 算法处理

由于所测圆管类工件内径在110~130mm,为保证测量精度,采用的激光位移传感器测量范围为 (15 ± 5) mm。为满足测量范围的要求,系统采用相对测量方法,即利用标定好尺寸的圆盘和高精度激光位移传感器组合测量。系统的测量原理模型如图7所示。

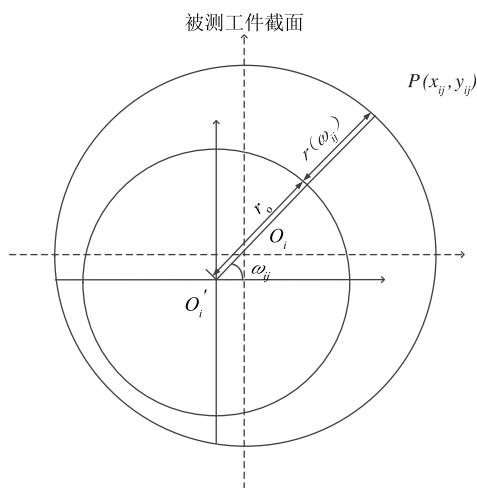


图7 测量原理模型

图7中, $P(x_{ij}, y_{ij})$ 表示第*i*个截面,第*j*个采样点, O'_i 为截面测量中心, O_i 表示截面圆心, r_o 表示标定好尺寸的圆盘的长度, $r(\omega_{ij})$ 表示相对测量长度,即激光位移传感器读数, ω_{ij} 表示采样点的极坐标角度,由绝对式光电编码器给出和倾角传感器给出,其中绝对式光电编码器角度为 θ_{ij} ,倾角传感器角度为 $\Delta\theta_i$,且

$$\omega_{ij} = \theta_{ij} + \Delta\theta_i \quad (3)$$

采样点 $P(x_{ij}, y_{ij})$ 的测量半径 $R(\omega_{ij})$ 可表示为

$$R(\omega_{ij}) = r_o + r(\omega_{ij}) \quad (4)$$

将测量数据进行坐标转换,由极坐标系转换为直角坐标系,则点 $P(x_{ij}, y_{ij})$ 的坐标可表示为

$$x_{ij} = R(\omega_{ij}) \cos(\omega_{ij}) \quad (5)$$

$$y_{ij} = R(\omega_{ij}) \sin(\omega_{ij}) \quad (6)$$

则工件第 i 个截面圆心坐标 $O_i(x_i, y_i)$ 和半径 r_i 可由以下方法得出:

假设第 i 个截面为椭圆, 设椭圆隐式方程为

$$F(x, y) = x^2 + Ax y + B y^2 + C x + D y + E \quad (7)$$

已知 $P(x_{ij}, y_{ij}) (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N)$ 为工件第 i 个截面上的 N 个测量点 ($N \geq 500$), 目标函数为

$$F(A, B, C, D, E) = \sum_{j=1}^N (x_{ij}^2 + A x_{ij} y_{ij} + B y_{ij}^2 + C x_{ij} + D y_{ij} + E)^2 \quad (8)$$

则最小二乘法拟合公式为

$$\sum_{j=1}^N (x_{ij}^2 + A x_{ij} y_{ij} + B y_{ij}^2 + C x_{ij} + D y_{ij} + E)^2 = \min \quad (9)$$

求解 A, B, C, D, E 的最优值, 就可以得出工件第 i 截面相对圆心坐标 (x_{i0}, y_{i0}) , 长轴为 a , 短轴为 b , 则短轴 b 即为拟合半径, $2b$ 为测量的内径值。

又因为由 PSD 可得测量中心 O_i 偏离基准轴线的坐标为 (x, y) , 因此可得出第 i 截面圆心 O_i 偏离基准轴线的坐标 $O_i(x_i, y_i)$, 有

$$x_i = x + x_{i0} \quad (10)$$

$$y_i = y + y_{i0} \quad (11)$$

将所得数据经直线度评定, 可得出工件直线度。

5 系统评估

为保证数据准确, 测量系统采用双锥体同轴定心法确定测量中心, 保证定心机构稳定准确。安装在定心机构前端的 PSD 获取定心后测量中心坐标, 其测量分辨力为 $1 \mu\text{m}$; 扫描机构使用游隙为 C2 级的精密轴承支撑, 扰动误差最大不超过 $7 \mu\text{m}$; 扫描机构上安装的激光位移传感器测量分辨力为 $1 \mu\text{m}$, 绝对式光电编码器为 17 位分辨力, 为最小二乘圆拟合法提供准确的数据保证测量系统的准确度符合测量要求。

系统验证: 该圆管类工件激光式非接触测量系统对内径 110 mm、长度 1 m 的标准圆管的直线度进行实际测评, 共进行 10 组采样, 每组选取采样点 500 个, 步长 0.1 m, 然后对采样数据进行数据拟合, 获取采样

截面圆心。实验结果显示, 该测量系统最终直线度测量误差在 $40 \mu\text{m}$ 以内, 达到设计任务规定的技术指标。

6 结束语

在工件加工质量要求越来越高的今天, 提高测量精度成为保证产出高质量产品的一种有效手段。本文在研究前人内径和直线度测量方法的基础上, 提出了采用 PSD 定位、激光非接触测量半径。最小二乘法纠正圆心的直线度测量方法, 并且搭建出硬件平台, 进行软件编程验证。通过实际结果证明了该方法在计算圆管直线度方面准确可靠, 是对现有测量技术的突破。但是依靠 PSD 定位后的旋转测量, 其精度受旋转轴承的游隙扰动影响较大, 造成整体测量系统精度略微降低。如果能够减小轴承游隙扰动, 提高旋转时的稳定性, 测量精度还有进步空间。

参 考 文 献

- [1] Weck W, Sdhmidt M. A new method for determining geometric accuracy in the axis of movement of machine tools[J]. Precision Engineering, 1986, 8(2): 97-103.
- [2] HAO Qun. Straightness Measurement Using Laser Diode and CCD Camera[J]. Lasers, 1999, 8(3): 215-220.
- [3] Garner J M, Marrs T. Off the shelf technology for gun barrel straightness measurement[C]// 10th U. S. Army Gun Dynamics Symposium. Austin, Texas: Advanced Launch Corporation, 2001.
- [4] 赵辉, 罗鑫, 包建东. 火炮身管内径测试系统研究[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2010, 9(1): 35-38.
- [5] 刘琪芳. 基于激光位移传感器的光电非接触圆度测量[J]. 电子设计工程, 2011, 19(1): 106-108.
- [6] 匡萃方, 冯其波, 陈士谦等. 基于激光准直直线度测量方法的研究[J]. 光学技术, 2003, 29(6): 699-701.
- [7] 季立江, 廖俊必, 史伟. 基于图像处理的圆管轴线直线度检测方法[J]. 兵工自动化, 2002, 21(6): 29-32.
- [8] 张敏, 梁雁冰. 二维四边形位置敏感探测器实验研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 459-464.
- [9] 朱万彬. 激光位移传感器在物体表面形状测量中的应用[J]. 光机电信息, 2010, 27(10): 70-72.
- [10] 刘泉, 卢新然. 轻量化绝对式多圈光电编码器研究[J]. 半导体光电, 2013, 34(4): 588-590.
- [11] 戴丽, 顾建刚. 最小二乘圆法及其在原木定心中的应用[J]. 木材加工机械, 2002(2): 16-18.