

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106099

基于激光三角法的火炮身管内径测量系统设计

崔永俊 张强

(中北大学 仪器与电子学院 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 为了解决目前火炮身管内径测量精度低、内表面形貌还原度差和测量不方便的问题,设计了一种基于激光三角法的火炮身管自动测量系统。该测量系统主要选用激光传感器、单片机和步进电机,设计推进式的机械测量结构,利用几何定心原理,对火炮全身管自动测量;最小测量内径为 60 mm;采用滤波、三次样条插值法对采样数据进行处理,显著减小了测量误差。使用测量系统对不同口径的身管进行测量,测量结果表明,该测量系统能稳定工作,能实现对不同内径的身管进行测量,测量分辨率为 0.001 mm,测量精度为 0.02 mm,测量点准确,上位机各部分功能正常,能对身管内壁磨损缺陷等情况很好地还原。该测量系统测量误差小,测量效率高,测量系统操作简单,实现了高自动化,同样能应用在同类管道测量中。

关键词: 激光三角法;内径测量;内表面轮廓;三次样条插值法;几何定心

中图分类号: TJ306 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Design of gun barrel inner diameter measurement system based on laser triangulation

Cui Yongjun Zhang Qiang

(Key Laboratory of Ministry of Education of Instrument Science and Dynamic Testing, School of Instruments and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to solve the problems of low precision, poor reduction degree of internal surface morphology and inconvenient measurement of gun barrel inner diameter, an automatic measurement system of gun barrel based on laser triangulation is designed. The system mainly uses laser sensor, single chip microcomputer and stepping motor to design the mechanical measurement structure of propulsion type, and uses the principle of geometric centering to measure the whole body of gun automatically. The minimum measuring inner diameter is 60 mm. The sampling data is processed by filtering and cubic spline interpolation, which greatly reduces the measurement error. The measurement system is used to measure the body pipe of different caliber. The measurement results show that the measurement system can work stably and can measure the body pipe with different inner diameter. The measurement resolution is 0.001 mm, the measurement accuracy is 0.02 mm, the measuring point is accurate, the functions of each part of the upper computer are normal, and the wear defects of the inner wall of the body pipe can be restored well. The measurement system has the advantages of small measurement error, high efficiency, simple operation, high automation and can also be used in the same kind of pipe measurement.

Keywords: laser triangulation; inner diameter measurement; inner surface profile; cubic spline interpolation; geometric centering

0 引 言

在火炮使用过程中,需要反复承受高温、高压、弹丸等的影响,会使身管发生变形、膛线磨损甚至断裂可能^[1-3]。为了保证质量,需要在生产与使用过程中对火炮身管进行实时检测。通过检测其关键的参数可以判断加工是否合

格,预估使用寿命^[1]。传统的机械式的测量方法存在着测量不方便,测量误差大,自动化程度低的缺点。随着电子测量技术的发展,对火炮内膛的检测技术也在不断的提高,目前的测量方法归结于两类,一类是接触式的测量,如空气塞规法等,这类方法比较成熟,测量时间短多,主要应用于工厂生产检测。但同样存在精度低的缺点,不能很好地应用

收稿日期:2021-03-23

在高精度的测量环境下。另一类是利用光学的方法测量,如 CCD 检测法、激光干涉法等,这类测量方法以其精度高,适应性强,自动化程度高等优点而成为未来的发展方向^[5-8]。

目前该类方法存在着测量精度低、身管内壁还原效果差、设备笨重等问题。基于此,设计了一种基于激光三角法的火炮身管内径测量系统,该系统能对火炮全身管进行自动测量,通过对各个位置的扫描测量,得到身管内径,还原出内表面形貌,测量结果精度高,对身管的生产、使用和维修提供有效指导。

1 系统设计方案

系统的组成及总体方案设计如图 1 所示,主要有测量系统、控制系统、机械系统、上位机软件平台。

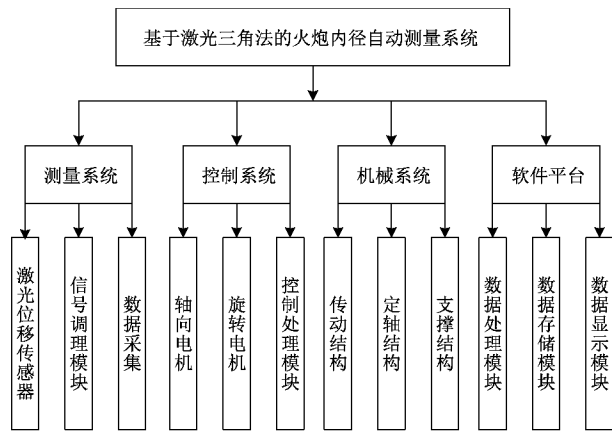


图 1 测量系统结构及设计方案

固定好测量设备后接通电源,上位机发出控制指令给 STM32 控制芯片,STM32 产生相应的控制信号,ADC 芯片启动转换,ADC 芯片将传感器输出的电压信号转化为数字量并传回至 STM32;单片机可将数据进行预处理、存储并上传至上位机,上位机将接受到的数据存储并进行数据处理,然后将实时显示身管内壁形貌;单片机控制旋转电机实现 360°旋转,可以将各个位置上的数据采集;通过驱动电路实现对前进电机的控制,实现轴向前进。

2 系统测量原理与方法

2.1 测量结构设计

测量结构示意图如图 2 所示。

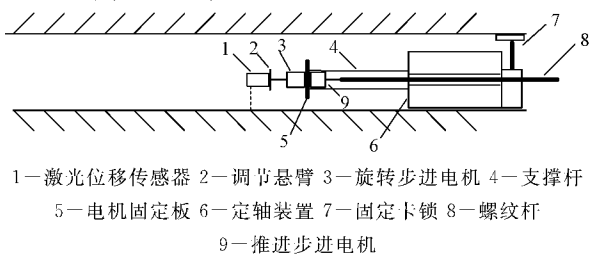


图 2 测量结构示意图

定轴装置用于实现测量装置与身管共轴,以降低测量装置倾斜带来的误差,定轴结构上留有嵌套的凹槽,与调节悬臂配合,实现对大口径的身管的测量,提高测量系统实用性。调节悬臂上有微调旋钮,用于精细调节。固定装置上留有 4 个伸缩承重杆,前端与电机固定板相连,与螺纹杆共同保证前端测量头不发生偏移。固定在板上的推步进电机通过带动螺纹杆转动,推动测量头前进,实现对火炮全身管的测量。通过推进电机旋转角度可以计算出推进距离。在向前推进时,通过螺纹杆的衔接,可以对较长的身管实现全身管测量。卡锁旋钮用来对测量装置进行固定,避免测量过程中发生滑动偏移倾斜等现象。

激光测量部分采用激光位移传感器,利用激光三角法的测量原理。这种方法具有高精度无接触的优点。测量头上的传感器测量范围为 20~50 mm,该测量装置能测到的最小直径为 60 mm,通过螺旋钮调节悬臂的长度,搭配定轴装置,可以实现对 200 mm 的身管内径进行测量,有广泛的适用性。

2.2 测量原理

测量原理如图 3 所示,其中, O_2 是待测身管的轴心, O_1 是电机旋转的轴心, r_1 是传感器测量位置与电机轴心的距离,从调节悬臂上读出, P 为截面上任意一个测量点, m_{i+n} 为对应的测量值, Q 为过 O_1O_2 直径的测量点, θ 为测量点 Q 与 P 转动的角度值, α 为 $\triangle PO_1O_2$ 的内角, m_i 为测出的第 m 个数值。

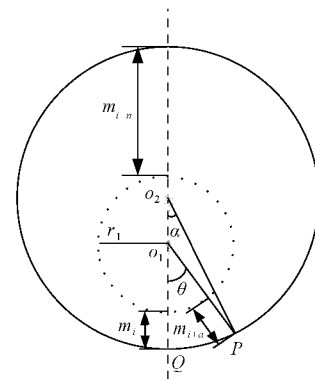


图 3 截面圆直径测量原理

假设测量一圈共有 $2n$ 个测量点,则第 i 个测量点与第 $i+n$ 个测量点连线为过 O_1 的弦,那么任意一条弦长为:

$$l_i = m_i + m_{i+n} + 2r_1 \tag{1}$$

将所有弦长进行比较,其中最长的当为直径 D_1 ,半径为 d_1 ;求得半径后,对于任意一个测量点 P , $\theta = \pi/n * a$, 则:

$$O_2P^2 = O_1O_2^2 + O_1P^2 + 2O_1O_2 \cdot O_1P \cdot \cos |\pi - \theta| \tag{2}$$

其中, $O_2O_1 = |m_i + r_1 - d_1|$ 。

求得 O_2P 的长度,再根据图中的几何关系,可以求得 α 的,然后以 O_2 为圆心,求得任意一个测量点 P 的坐标,将

这些点相连就可以得到身管内径的测量图。此方法相较于定心的方法来说,可以大大地降低操作的难度,降低机械定心不准带来的误差,只需保证测量系统轴线与待测身管的轴线调节至平行即可。

3 硬件设计

硬件设计主要包括电源模块、数据采集模块、控制处理模块、串口通信模块、电机驱动模块。硬件系统设计如图 4 所示。

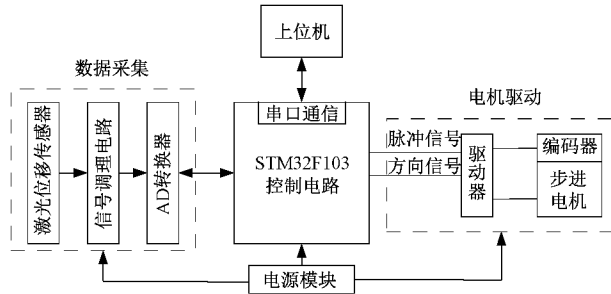


图 4 硬件系统设计

3.1 控制处理模块

测量系统的控制处理单元选用意法半导体的高性能处理器 STM32F103ZET6,它具有丰富的片上资源与较多的 I/O 口,内部自带 8 个定时器,有众多的接口供用户选择,方便后续的扩展^[9]。开始测量时,执行上位机下发的命令,控制 ADC 模块转换并将接收到的数据处理、存储、打包发送至上位机,同时,驱动推步进电机与旋转步进电机。

3.2 电流转电压模块

由于传感器的输出为 4~20 mA 的电流,所以需将其转化为电压,并将它调整至 ADC 芯片能够采集的范围。根据需求,为了提高转换精度与稳定性,选用了精度较高的 OP07 运算放大器和高性能的稳压电路 TL431。

4 系统软件设计

4.1 上位机设计

LabVIEW 与其他上位机开发设计软件最大的不同之处是,LabVIEW 采用的是图形编辑,并且有丰富的库函数与多种调试方式。丰富的库函数可以方便的对数据进行采集、处理、存储、显示等,可以通过串口等与下位机进行交互。图形化的源代码比起 C 语言之类的文本编程更加直观,学习起来更加容易^[10-11]。该系统的工作流程如下。

固定好测量设备后,将系测量统初始化,设置好采样点数与行进步长,点击开始采样,将按照预设的采样点数与频率进行采样,当达到采样值后,进行数据处理并保存数据,在坐标系中将截面圆显示出来并按照编号保存。判断是否继续采样,是则继续采样,否则就退出采样,结束测量。

4.2 数值处理算法

在实际的测量中,由于电机旋转角度不可能做到无限的细分,测量点不一定能准确落在最大值处,造成测量的直径值会小于实际的直径值。而测量理论上是认为测量值等于实际值,这样会造成测试结果不准确。为了使测量更准确,对数据做如下处理。在测量数据之间采用插值方法,对比几种常用的插值方法,发现 3 次样条插值法得到的更加光滑。在最大值左右各选 3 个点,用 3 次样条插值法对采样数据进行扩充,求得极大值^[12-15]。

采样数据满足 3 次样条插值法的使用条件,设在定义区间 $[a, b]$ 上,有 n 个数据节点,可以表示为 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)\}$,求得步长 p_i 为:

$$p_i = x_i - x_{i-1}, i = 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

样条曲线 $S(x)$ 表示为:

$$S_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i \quad (4)$$

式中: a_i, b_i, c_i, d_i 表示未知系数。

在区间上 $S(x), S(x)', S(x)''$ 都是连续的。

$$S(x)' = 3a_i(x - x_i)^2 + 2b_i(x - x_i) + c_i, S(x)'' = 6a_i(x - x_i) + 2b_i \quad (5)$$

已知 $S(x_{i+1}) = y_{i+1}$,由微分连续性可知: $S(x_i)' = S(x_{i+1})', S(x_i)'' = S(x_{i+1})''$,其中, $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$ 。

将上述表达式代入式(4)可得 a_i, b_i, c_i, d_i 的关系式。

根据端点处的特性(自由边界,固定边界,非节点边界),将定点代入方程,可求得未知系数的值,即求出样条曲线的表达式。在每个子区间 $[x_i, x_{i+1}] (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 内,建立新的方程:

$$T_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i \quad (6)$$

求得插值后的数据的极大值即可。

5 测量结果与分析

5.1 测量结果

使用该测量系统分别对 $\Phi 100$ mm、 $\Phi 125$ mm 的工件进行测量,采样点数为 400 个,测量步长为 0.02 mm,上位机中能实时显示各个测量点的内径值和身管内壁形貌,测量的数据可以通过回放再现。上位机的测量界面如图 5 所示。

在身管内壁上固定障碍物,测量系统完全能检测到,并能很好的将障碍物进行还原,还原图如图 6 所示。

自动测量结束后,将各个位置保存的测量数据进行整合,使用 MATLAB 对测量后的数据进行处理,生成三维轮廓图,通过三维轮廓图能对被测量身管有一个直观的感受。整体轮廓如图 7 所示。

对 $\Phi 125$ mm 的测量结果如表 1 所示,取单次测量值与多次测量值做对比。通过测量结果,可以分析出该系能的测量分辨率到达了预期的 0.001 mm,单次测量的结果与多次测量后取平均值得到的结果差值不超过 0.01 mm。

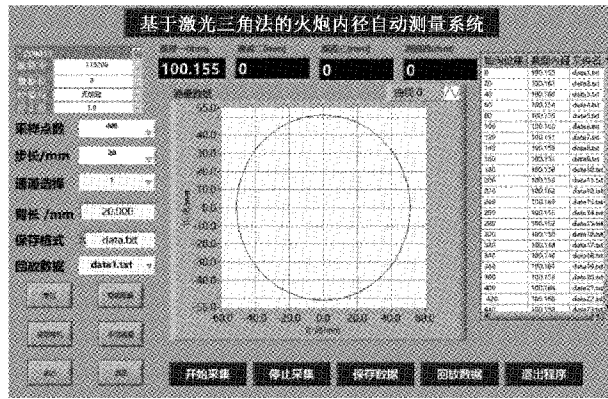


图5 测量界面图

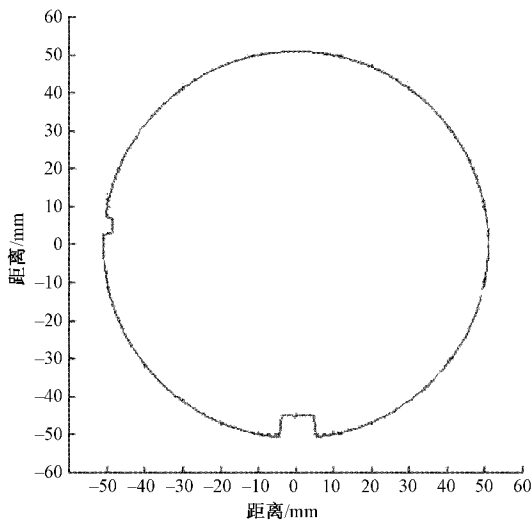


图6 带障碍物还原图

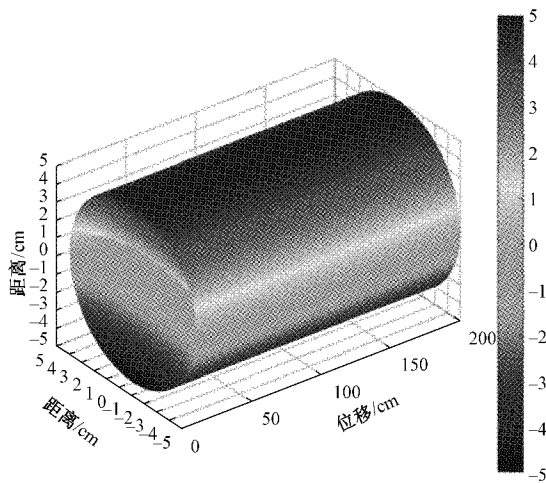


图7 整体轮廓图

5.2 误差分析

1) 测量误差定性分析

所有的测量都会带有测量误差,通过对测量误差进行

表1 $\Phi 125$ mm 单次与多次测量结果

测点/cm	内径/mm	均值/mm	差值/mm
0	125.272	125.270	0.002
20	125.271	125.269	0.002
40	125.273	125.268	0.005
60	125.277	125.269	0.008
80	125.274	125.268	0.006
100	125.270	125.272	-0.002
120	125.271	125.275	-0.004
140	125.269	125.273	-0.004
160	125.268	125.275	-0.007
180	125.272	125.264	0.008
200	125.275	125.269	0.006
220	125.273	125.274	-0.001
240	125.275	125.278	-0.003
260	125.272	125.268	0.004
280	125.274	125.265	0.009
300	125.278	125.268	0.010

定性分析,并采用恰当的方法来减小误差,有助于提高测量精度。针对该测量系统的误差进行分析^[16],从如下几点考虑。

(1) 装置的误差

主要来源为仪器误差、测量结构误差、模具误差。传感器本身的精度,分辨率等带来的误差属于系统误差。这部分误差只能通过更换更精细的传感器来降低。支撑杆、螺纹杆、定轴装置的加工制造、装配误差与测量过程中杆磨损后造成误差;支撑杆与螺纹杆在伸长过程中会发生轻微的形变,会造成测量头的偏移带来测量误差;传感器安装误差与悬臂调节误差;这些都属于系统误差,这个误差通过精密定量测量后加以补偿即可。

定轴装置安装偏差带来误差;测量系统工作一段时间后,会有松动、磨损等原因造成测量系统误差,这些误差需要在测量前对测量系统调试,校准。此外,在材料选择上,选用耐磨、承重性能好的合金材料,定轴装置的材料选用密度比较大的材料,来减小这部分误差。

(2) 环境误差

在测量过程中,温度变化会引起器件的工作特性变化,对测量结果带来误差;测量系统抖动带来的误差,属于随机误差,减小测量时温度的变化与振动能显著减小随机误差。

测量时,电磁干扰也可能引入随机误差。为了避免与减小这部分误差,测试时要远离强电流与磁场,信号线越短越好,走线时添加电磁屏蔽。

2) 测量不确定度分析

由于测量误差的随机性与不确定性,准确计算出测量误差是比较困难的,工程上用测量不确定度来评定测量系统的优劣。

测量不确定度表征测量数据的分散性的一个参数,它包含于测量结果中。不确定度按照评定方法不同分为 A 类不确定度和 B 类不确定度。A 类不确定度是统计方法算出的分量,用 u_A 表示,有平均实验的标准差及其自由度表征。由于测量真值在用标准差表示的区间内的概率仅为 68%,而对于一些高精度的测量场合,需要的置信概率较大,所以需要将不确定度扩展为标准不确定度。用标准差的倍数来表示扩展不确定度,用 U 来表示,扩展不确定度表明了具有较大置信概率区间的半宽度。

本系统测量结果符合 A 类不确定度,将测量结果按照贝塞尔公式计算不确定度。

对被测量对象在重复性条件下进行的 n 次独立重复观测,观测值为 x_i 。算术平均值 \bar{x} 为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

由贝塞尔公式计算得到单次测量的实验标准差为:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \stackrel{def}{\Leftrightarrow} \sigma_x \quad (8)$$

且平均值的实验标准差为:

$$s(x) = \frac{s(x_i) \stackrel{def}{\Leftrightarrow} \sigma_x}{\sqrt{n}} = 0.005 \text{ mm} \quad (9)$$

以实验结果的平均值的实验标准差不确定度 $s(x)$ 作为测量结果的标准不确定度 u_A 。

扩展不确定度的 U 计算公式为:

$$U = ku \quad (10)$$

k 为置信因子,通过查阅表来获得。对于正态分布的测量结果,置信概率 $P=95\%$ 时, $k=2$; $P=99\%$ 时, $k=3$ 。将 $k=3$ 代入上式得, $U=0.015 \text{ mm}$ 。

尽管误差与不确定度是两个不同的概念,但两者还是有着内在的联系,测量值的不确定度蕴含着测量值的可能误差的含义,换句话说,蕴含着真值所在的可能区域的含义。

6 结 论

由上述分析可知,该火炮身管内径自动测量系统有测量分辨率高,测量精度高,测量范围宽,操作简单,能自动进行全身管测量,能展现内壁缺陷等形貌的特点,完全适用于身管内径测量。对于测量结果误差进行了分析并提出了改进方案。该自动测量系统的应用场景不仅仅局限于火炮身管的测量,还可以应用在各种测量管道内径,显示内壁形貌等场所。

参考文献

[1] 王小娟. 火炮身管内径自动测量系统研究[D]. 包头:内

蒙古科技大学,2012.

- [2] 许春飞. 火炮身管内膛检测装置优化设计研究[D]. 南京:南京大学,2016.
- [3] 李自平. 小口径管道内膛参数测量系统研究[D]. 南京:南京理工大学,2009.
- [4] 祁春阳. 火炮身管内径磨损量检测系统研究[D]. 石家庄:军械工程学院,2011.
- [5] 朱建杰. 基于激光三角法的火炮身管内径测量技术研究[D]. 石家庄:陆军工程大学,2017.
- [6] 孟翔飞,王昌明,何博侠,等. 火炮身管静态多参数测量系统的研究[J]. 南京理工大学学报,2013,37(1): 117-121,132.
- [7] 王正家,盛文婷,解家月,等. 基于线性激光三角法的圆柱对象定位测量研究[J]. 激光技术,2019,43(4): 28-34.
- [8] 蔡雯,陈培锋,王英,等. 基于激光散射的表面粗糙度测量系统研究[J]. 激光技术,2020,44(5):611-615.
- [9] 张秀艳,崔永俊,刘坤. 基于微波透射技术的卷烟包含水率在线测试仪设计[J]. 电子器件,2020,43(2): 445-451.
- [10] 武文凯,李明辉,巩强令. 基于 S7-1200 PLC 与 LabVIEW 的泵轮检测设备控制系统[J]. 仪表技术与传感器,2020(12):82-85.
- [11] 吴聪,高云鹏,张韵琦,等. 基于改进能量算子和 K-RV 互卷积窗的闪变参数检测[J]. 仪器仪表学报,2019,40(4):69-76.
- [12] 胡备,郑立评,徐润东. 一种火炮身管内径测量算法的优化方法[J]. 火炮发射与控制学报,2020,41(2):73-76,86.
- [13] 张福民,曲兴华,刘红轩. 激光内径测量系统参数校正及算法优化[J]. 纳米技术与精密工程,2011,9(5): 459-463.
- [14] 李长春,李元金. 基于多阈值分割和 B 样条插值的 CT 图像金属伪影去除方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(7):128-132.
- [15] 谭延峥,李舜酩,江星星. 复杂曲线图像的数据提取方法[J]. 电子测量技术,2016,39(12):159-163.
- [16] 吴宇,吴丹. 风速变送器校准及示值误差测量不确定度评定[J]. 国外电子测量技术,2020,39(7):11-16.

作者简介

崔永俊,博士,副教授,主要研究方向为纳米测试技术及仪器。

E-mail:annayucyj@nuc.edu.cn

张强,硕士研究生,主要研究方向为电路与系统。

E-mail:qiangnuc@163.com