

doi: 10.7690/bgzdh.2024.06.004

基于 PSD 的火炮身管膛线精度测量数据补偿方法

郝延辉^{1,2}, 张嘉易^{1,2}, 郝永平^{1,2}, 薛超^{1,2}

(1. 沈阳理工大学机械工程学院, 沈阳 110159; 2. 沈阳理工大学辽宁省先进制造技术与装备重点实验室, 沈阳 110159)

摘要: 针对火炮身管内部膛线测量技术及自动检测问题, 提出一种精度测量数据补偿方法。搭建火炮内膛检测机器人测量系统。采用激光测距仪对火炮身管阴阳线内径进行测量, 使用 PSD 激光位置传感器对火炮身管轴线与测量系统轴线的偏心距离进行测量, 分析检测误差产生的原因, 推导基于矢量三角法的测量数据精度补偿算法和误差补偿计算公式, 通过补偿前后数据的对比分析, 结果表明: 该测量补偿方法是有效的, 能够解决火炮内膛轴线与机器人旋转中心不重合产生误差的问题。

关键词: 火炮身管; PSD 激光位置传感器; 激光测距仪; 补偿算法

中图分类号: TJ30 **文献标志码:** A

Compensation Method for Measurement Data of Rifle Accuracy of Artillery Barrel Based on PSD

Hao Yanhui^{1,2}, Zhang Jiayi^{1,2}, Hao Yongping^{1,2}, Xue Chao^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology and Equipment of Liaoning Province, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: Aiming at the measurement technology and automatic detection of the rifling inside the gun barrel, a method of precision measurement data compensation is proposed. The measurement system of artillery bore inspection robot is set up. The laser range finder was used to measure the inner diameter of the yin-yang line of the gun barrel, and the PSD laser position sensor was used to measure the eccentric distance between the axis of the gun barrel and the axis of the measuring system. The causes of the measurement error were analyzed, and the accuracy compensation algorithm and error compensation formula based on the vector trigonometry method were derived. The results show that the measurement and compensation method is effective, and it solves the problem of the error caused by the misalignment of the gun bore axis and the robot rotation center.

Keywords: gun barrel; PSD laser position sensor; laser range finder; compensation algorithm

0 引言

火炮身管阴阳线是火炮的关键部位, 可以控制火炮打出炮弹的方向, 控制炮弹的速度, 是影响炮弹打得远、打得准的重要因素; 因此, 对炮膛内部阴阳线的尺寸参数严格把关, 对预测炮管的使用寿命有着至关重要的作用。我国国内目前检测手段非常单一, 效率低下且精度不高, 激光检测法是现在普遍的一种检测方式^[1]。激光测距仪不仅可以使检测效率更高, 而且检测的精度也会大大提高, 可以减少检测误差。目前, 国内很多机构和院校都开展了相关研究工作, 其中大多数都是基于激光三角法搭建的检测系统^[2-8], 将激光测距仪安装到设计好的爬行机器人身上, 可以命令机器人行进到相应位置, 然后让激光位移传感器进行扫描, 将扫描好的测量数据传输回电脑, 实现自动检测。基于 PSD 矢量三

角法的基础之上笔者还使用 PSD 激光位置传感器对激光测距仪测量时所产生的误差进行补偿^[9], 由于安装 PSD 激光位置传感器和激光测距仪时, 存在安装误差且国内缺少相关补偿研究, 国内外文献也缺少测量数据补偿的方法研究^[10], 为保证测量数据的准确, 研究相关补偿方法具有重要意义。

综上所述, 笔者针对 PSD 激光位置传感器和激光测距仪在火炮检测机器人中的布局和在测量系统中的具体作用进行介绍, 分析误差产生的原因, 提出矢量三角法对测量数据进行补偿, 推导安装误差参数关系式并计算实际测量值, 利用检测系统和 PSD 等相关传感器, 在矢量三角精度补偿算法的基础上测量出准确的炮膛阴阳线半径值。

1 检测系统组成与检测方法

如图 1 所示, 检测系统主要包括变径爬行机构、

收稿日期: 2024-02-23; 修回日期: 2024-03-25

基金项目: 国防技术基础科研资助项目; 辽宁省自然科学基金(20180550714)

第一作者: 郝延辉(1996—), 男, 黑龙江人, 硕士。

通信作者: 张嘉易(1968—), 男, 辽宁人, 博士。

树莓派 4b、ardninio 板等。树莓派 4b、ardninio 主要负责控制爬行和运算传输数据等功能。

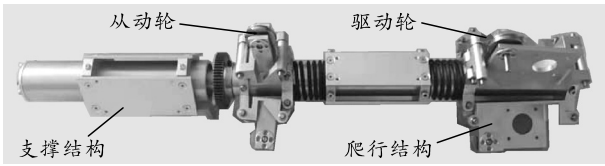


图 1 检测系统

通过树莓派作为主要控制系统搭载 arduino 开发板进行爬行控制，PSD 激光位置传感器和激光测距仪将采集的数据转移到 ad7606 采集卡并进行运算最后将数据传回树莓派。该机构搭载 2 种电机，包括上部回转电机和下部驱动电机，上部回转电机的作用是旋转时带着 PSD 激光位置传感器和激光测距仪一起旋转采集数据，下部驱动电机负责让机构前后沿着管道阴阳线爬行。旋转电机是由树莓派直接控制，驱动电机则是由 arduino 间接控制。

该机构进行测量的运动过程是先将机构安装进入管道后，树莓派给 arduino 发送指令控制驱动电机让机器人行进到需要检测的表面，然后树莓派再次控制上部回转电机使其旋转，PSD 激光位置传感器和激光测距仪就搭载着回转电机进行旋转测量。测量完毕后将测量数据传输回树莓派运算处理，再次重复以上检测过程测量下一个检测面。检测流程如图 2 所示。

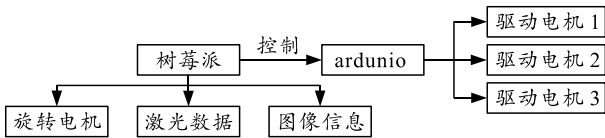


图 2 检测流程

2 火炮身管膛线检测原理与方法

2.1 激光测距检测原理

激光测距仪是用来检测测量平面到激光测距仪的距离值，这种激光测距仪给检测带来极大便利，根据火炮特有的阴阳线结构，在测量短距离时精度较高，本机构使用的是型号为 H-cg1030 激光测距仪，该传感器检测的距离为 50±15 mm。如图 3 所示，激光线照射到测量面的距离就是激光测距仪所测量出的距离值。

2.2 PSD 检测原理与方法

由于火炮检测机器人实现的功能是检测火炮身管阴阳线的半径值，需将火炮检测机器人自身的旋转中心与被测量管道的轴心重合，所以该火炮检测机器人采用 PSD 激光位置传感器，将其安装在机器

人前端上，通过外部激光器照射到 PSD 激光位置传感器表面，如图 4 所示。

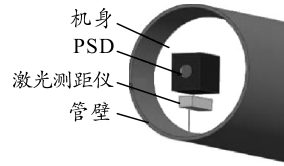


图 3 激光测距原理

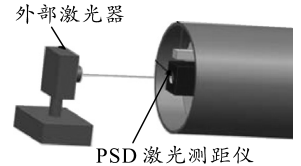


图 4 PSD 检测方法

外部激光器的光束经过调整之后与炮膛的轴心相重合，其光束落在 PSD 激光位置传感器上会形成光点，PSD 位置传感器是通过激光光束照射到 PSD 面上对其光点位置进行反馈的一种器件，当一束激光落在 PSD 上，相应于光能量的电荷在入射点产生，电荷通过 p 型电阻被电极收集，通过数据反馈可对激光光束的具体位置进行准确反馈。其原理如图 5 所示。

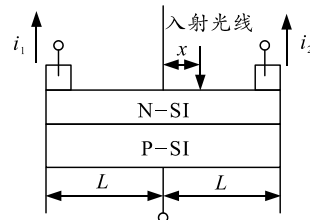


图 5 PSD 位置传感器原理

由于激光照射到 PSD 的光点位置不同，针对不同位置的坐标计算其转换公式如下：

$$((X_2 + Y_1) - (X_1 + Y_2)) / (X_1 + X_2 + Y_1 + Y_2) = 2x/L; \quad (1)$$

$$((X_2 + Y_2) - (X_1 + Y_1)) / (X_1 + X_2 + Y_1 + Y_2) = 2y/L. \quad (2)$$

式中： X_1, Y_1, X_2, Y_2 为每一电极输出信号（光电流）； x, y 为光点位置坐标； L 为光敏面的边长，本实验采用 10*10 的光敏面 PSD 激光位置传感器。PSD 几何结构如图 6 所示。

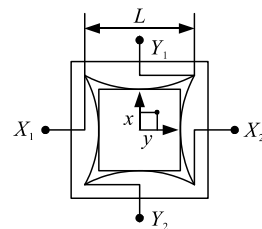


图 6 PSD 几何结构

通过 PSD 激光位置传感器所采集的光束具体位置就能将被测管道轴心与机器人的旋转中心对正。

3 测量系统的误差分析与补偿方法

3.1 误差分析

由于被测管道存在自身的一个轴心，机器人本

身也存在一个旋转中心，PSD 存在自身的几何中心；因此，在实验之前需将三者坐标系的中心确定好才可进行测量实验。PSD 激光位置传感器是安装在火炮检测机器人的头部，如图 3 所示，需将 PSD 激光位置传感器安装在火炮检测机器人的旋转中心上，让 PSD 几何坐标系中心与机器人本身的旋转中心重合。理论上，该机器人检测的是管道轴心到管壁的半径值，由于存在误差安装时导致 PSD 几何中心与机器人旋转轴心存在偏差，所以当机器人进行检测运动时，外部激光器照射到 PSD 板块上，在 PSD 激光位置传感器就形成了图 7 中右侧偏心圆，该偏心圆的圆心就是检测机器人的旋转中心。

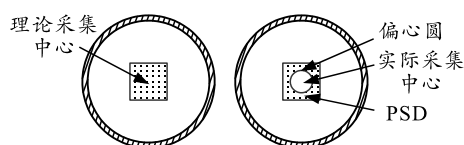


图 7 理想采集与实际采集

此外在同一截面内安装激光测距仪和 PSD 时，安装激光测距仪可能出现如图 8 所示的情况。



图 8 激光测距仪与 PSD 位置偏差

激光测距仪不能被准确地安装到 PSD 坐标系的 x 、 y 轴上，导致在 x 、 y 轴方向存在 y_1 、 ΔX 的误差距离值。为保证该机器人的检测精度，该机器人经过专业的标定测量中心标定，并给出以下标定参数，如图 9 所示，偏角 δ 是激光测距仪与 PSD 之间的偏角， ΔX 则是竖直方向上的误差值， y_1 是激光测距仪与 PSD 中心的水平距离，经过精确标定之后给出 $\delta=0.318^\circ$ ， $\Delta X=0.2$ mm， $y_1=21.8$ mm。

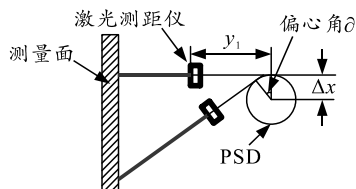


图 9 位置偏差标定

3.2 测量误差补偿算法

激光测距仪所测量出来的距离 R 是通过激光测距仪采集的电压值 V 计算而来，激光测距仪所采集的范围是 50 ± 15 mm，需要将激光测距仪采集的数值加上 y_1 ，再通过式(3)计算 R 真实值：

$$R = -6(5.0V/32768) + 86.8. \quad (3)$$

激光测距仪与 PSD 位置传感器所形成的圆形截面图像是通过外部激光器在 PSD 位置传感器上打出激光点拟合形成，无论是 PSD 位置传感器采集到的激光点数据，还是激光测距仪采集的数据，二者所采集的数据均是圆周 740 个点数据，采集的点数可通过调整控制采集程序进行变更。由于激光测距仪采集数据的能力有限，根据采集情况设定圆周采集 740 个点的的数据，为保证数据点的对应性，设置 PSD 激光位置传感器圆周所采集的点数据也是 740 个，而且在旋转采集的运动过程中需要保证激光测距仪和 PSD 激光位置传感器二者同时采集，二者所采集的 740 个点在相同角度上都是一一对应，所以在数据采集方面使用的是 pwm 控制方法。该方法是只有经过 pwm 方波的上升沿时才会采集数据并存储下降沿的时候不进行采集数据，将 pwm 的占空比设置成 50%，就保证了时间和角度的同步性。

管道内壁采集的点与 PSD 位置传感器采集的偏心圆上的点与火炮身管自身轴心点三者形成一个矢量三角形。激光测距仪所采集的数据坐标计算通过以下公式：

$$x = R \cos(2n\pi/740); \quad (4)$$

$$y = R \sin(2n\pi/740). \quad (5)$$

式中： x 为光测距仪采集拟合圆上点的横坐标； y 为纵坐标值 R 的激光测距仪采集距离值； n 为 740 个点中第 n 个点。

已知 PSD 位置传感器上面各个点的数据，PSD 激光位置传感器采集点集数据是电压值需由式(6)和(7)计算成横纵坐标值，再由式(12)计算 2 维坐标下的半径值， V_X 、 V_Y 与 V_C 是 PSD 位置传感器所采集的三路电压值， R_{PSD} 是经过计算后 PSD 位置传感器所采集的圆形半径值， X_{PSD} 、 Y_{PSD} 是 PSD 采集的偏心圆上的点的横坐标与纵坐标，计算公式如下：

$$X_{PSD} = 5.0V_X/V_C; \quad (6)$$

$$Y_{PSD} = 5.0V_Y/V_C; \quad (7)$$

$$R_{PSD} = \sqrt{X_{PSD}^2 + Y_{PSD}^2}. \quad (8)$$

通过上式可计算出矢量三角形的边长，假设激光测距仪所采集的点坐标为 (x, y) ，PSD 位置传感器所采集的点的坐标为 (m, n) ，于是两点之间的距离值 L 为：

$$L = \sqrt{(x-m)^2 + (y-n)^2}. \quad (9)$$

如图 10 所示，需要求出真实的半径值 b ，可以根据式(10)计算。

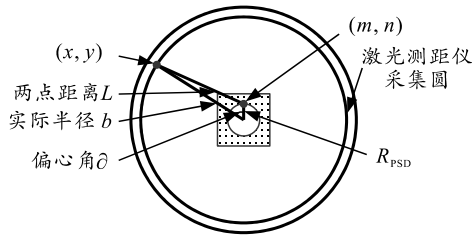


图 10 补偿算法原理

$$\cos \theta = \frac{b^2 + R_{PSD}^2 - L^2}{2bR_{PSD}} \quad (10)$$

这里偏角 θ 与图 8 偏角相等, 可通过多个点的数据值对真实半径值 b 进行求解计算并得出真实半径值 b 。

4 测量数据分析

实验采用内径 160 标准气缸管进行实验, 使用 160 标准气缸管作为检测对象的目的是其本身内径值比较精确, 使用它作为检测对象方便对比出检测机器人检测数据是否准确, 方便进行数据对比以及截面图像还原工作, 使用检测机器人对管道进行检测得出部分实验数据如表 1 和 2 所示。

表 1 PSD 位置传感器采集数据

PSD ₁	PSD ₂	PSD ₃	测量电压值/V
292	342	9 088	7 290
296	190	9 064	7 116
118	543	9 156	6 702
160	778	9 188	6 584
712	992	9 142	6 438
540	236	9 168	7 064
906	102	9 130	6 476
280	546	9 096	6 422
278	634	9 140	6 452
626	865	9 136	6 434
478	53	9 158	6 982
690	3 756	9 324	9 202
1 138	2 882	9 338	8 406
858	3 664	9 322	9 120
940	3 472	9 312	8 772

表 2 测量数据对比结果

PSD 坐标	r_0/mm	r_1/mm	r_2/mm
(0.160 793, 0.188 326)	81.077	80.025	80.023
(0.163 283, 0.104 810)	81.936	80.031	80.025
(0.064 439, 0.296 527)	81.315	80.012	80.015
(0.087 070, 0.423 378)	80.423	80.091	80.088
(0.389 412, 0.542 551)	80.557	80.089	80.085
(0.294 503, 0.128 709)	80.984	80.005	80.003
(0.496 166, 0.055 860)	80.563	80.023	80.025
(0.153 914, 0.300 132)	79.552	80.015	80.011
(0.152 079, 0.347 921)	79.585	80.025	80.020
(0.342 601, 0.473 402)	79.524	79.996	79.994
(0.260 974, 0.028 936)	79.559	79.996	79.997
(0.370 013, 2.014 157)	78.564	79.995	79.995
(0.609 338, 1.543 157)	78.058	79.995	79.993
(0.460 202, 1.965 244)	78.102	79.990	79.992
(0.504 725, 1.864 261)	78.496	79.991	79.990

表 2 中: r_0 为数据补偿前的半径值; r_1 为补偿

后的半径值; r_2 为千分尺测量出来的半径值, 用来与补偿后的半径进行对比验证准确性。

PSD 激光位置传感器如图 11 所示, 近似一个圆的形状。

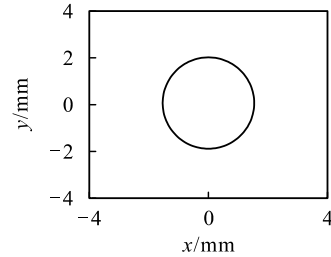


图 11 PSD 采集图像

补偿前后气缸管半径尺寸对比如图 12 所示。

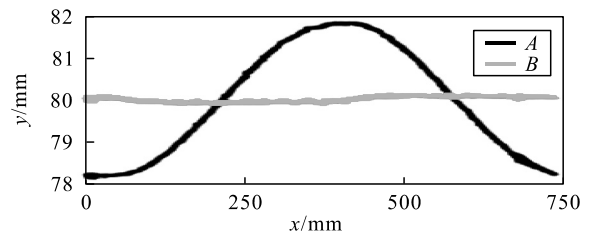


图 12 补偿前后半径值对比

从上图可明显看出, 与补偿前 A 相比, 补偿后 B 的半径更加趋于一条直线, 与实际气缸的半径值相符, 更加合理。

对口径为 155 mm 的磨损废弃炮管进行测量, 补偿前后膛线截面的还原图如图 13 所示。

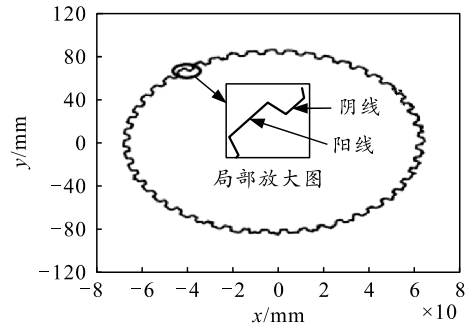


图 13 补偿前炮管膛线截面

补偿后炮管截面如图 14 所示。

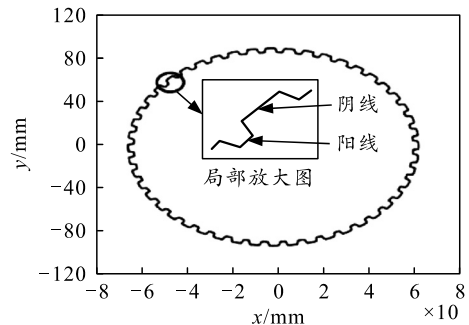


图 14 补偿后炮管膛线截面