

doi: 10.7690/bgzdh.2024.07.014

基于激光圆周扫描和定心修正的火炮身管内膛检测方法研究

韩超¹, 刘瑞¹, 刘广生¹, 段伟然¹, 闫媛媛¹, 赵会民²

(1. 陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003;

2. 中国人民解放军第三三零二工厂, 石家庄 050003)

摘要: 火炮身管内膛的状态直接影响着火炮的射击精度和安全性, 针对目前激光圆周扫描检测方法存在的定心不准、激光束与管壁垂直度差等现状所导致的检测精度不高的问题, 提出一种基于激光圆周扫描的通用口径火炮身管内膛检测定心修正算法。通过校正管道和装置上的姿态传感器完成检测装置轴线与校正管道轴线的平行。修正装置根据定心修正算法完成激光位移传感器旋转轴线与校正管道轴线的重合以及激光束与管壁的精确垂直, 完成身管内膛深度特征的精确测量。该修正算法及装置对于提高火炮身管检测精度和效率, 研究身管剩余寿命和健康监测有着重要的理论意义和实用价值。

关键词: 火炮身管; 内膛检测; 偏差修正; 管道定心

中图分类号: TJ306 **文献标志码:** A

Research on Detection Method of Gun Barrel Based on Laser Circumferential Scanning and Centering Correction

Han Chao¹, Liu Rui¹, Liu Guangsheng¹, Duan Weiran¹, Yan Yuanyuan¹, Zhao Huimin²

(1. Army Engineering University Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang 050003, China;

2. No. 3302 Factory of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The state of the gun barrel bore directly affects the firing accuracy and safety of the gun. To solve the problem of low detection accuracy caused by inaccurate centering and poor perpendicularity between the laser beam and the barrel wall in the current laser circumferential scanning detection method, a centering correction algorithm for the general caliber gun barrel bore detection based on laser circumferential scanning is proposed. The parallelism of the axis of the detection device and the axis of the calibration pipe is completed by the calibration pipe and the attitude sensor on the device. According to the centering correction algorithm, the correction device completes the coincidence of the rotation axis of the laser displacement sensor and the axis of the correction pipeline and the accurate verticality of the laser beam and the pipe wall, and completes the accurate measurement of the depth characteristics of the inner bore of the barrel. The correction algorithm and device have important theoretical significance and practical value for improving the accuracy and efficiency of gun barrel detection, and studying the residual life and health monitoring of gun barrel.

Keywords: gun barrel; bore detection; deviation correction; pipe centering

0 引言

身管为火炮的关重件, 其内壁烧蚀、磨损以及挂铜等问题^[1-3]直接影响着射击精度和安全性, 有效的身管内膛检测对研究身管剩余寿命, 开展身管健康监测具有重要意义^[4-6]。目前, 激光位移传感器身管内膛检测法使用较为广泛, 激光圆周扫描检测内膛时需定心^[7-9], 一些文献通过算法实现了定心, 但是数据处理会引入误差^[1,4]。针对不同口径身管需使用专门的测量装置, 使用维护不便, 且由于加工等原因, 难以保证定心及激光与身管内壁的精准垂直^[10-11]。针对以上问题, 笔者提出了一种基于激光圆周扫描的多口径火炮身管内膛检测定心修正算法, 设计了一套可适用于多种口径火炮的身管内膛

检测装置, 有助于提升检测精度和效率。

1 偏差分析

激光位移传感器搭载于管道机器人一端, 圆周旋转扫描时, 难以保证旋转轴线与身管轴线完全垂直, 一般存在理想情况、整体倾斜、单偏心、单偏角、偏心+偏角等情况, 如图 1 所示。其中方框为管道机器人, 灰色框为激光位移传感器, 灰色线为身管管壁。

2 结构设计

装置总体结构分为行走装置、变径装置以及激光扫描检测修正装置 3 部分, 结构如图 2 所示。变径装置中撑开电机带动丝杠转动, 进而使活动座轴

收稿日期: 2024-03-15; 修回日期: 2024-04-18

第一作者: 韩超(1992—), 男, 河北人, 硕士。

向运动，支撑臂与活动座和支腿铰接控制支腿开合，以适应不同口径火炮身管。装置后部安装有姿态传感器，在进行偏差修正时分别调整前后撑开电

机，使得装置后端的姿态传感器倾角与校正管道上的倾角一致，此时可认为装置轴线与校正管道轴线平行。

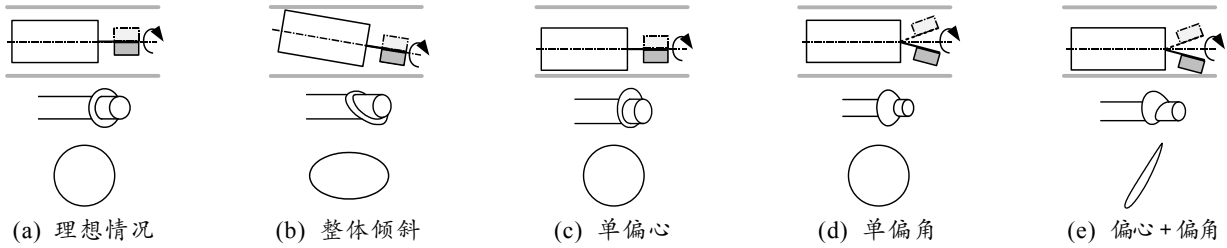


图 1 检测装置位置偏差

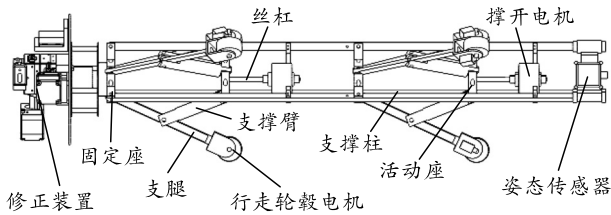


图 2 检测装置结构

修正装置结构如图 3 所示，激光测距仪用于测量装置距离前方的距离。激光位移传感器安装于舵机上，舵机用于调整激光位移传感器的摆动姿态。驱动电机 1 和驱动电机 2 分别用于驱动修正平台在 2 个相互垂直的方向上移动使传感器回转中心与身管内膛轴线重合，基座转动由基座转动电机驱动。

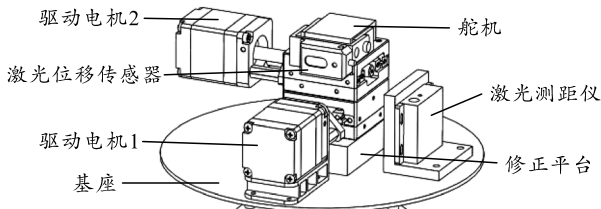


图 3 修正装置结构

3 激光圆周扫描修正算法

测量时，先将激光圆周扫描装置放入校正管道中，校正管道为内径是 R 的管道。激光圆周扫描装置按固定方向匀速旋转一周，采集 N 个内径测距值 a_i 。当检测装置中既存在偏心距和偏心角 2 种情况时，扫描情况如图 4 所示。

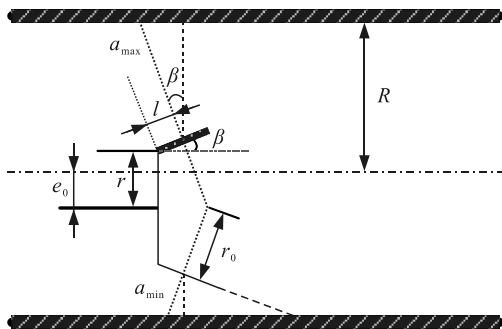


图 4 激光圆周扫描检测同时存在偏心距偏心角

将激光圆周扫描装置放入标准件中，采集到 N 个内径测距值 a_i ，内径测距值 a_i 最大值为 a_{max} ，即 $a_{max} = \max(a_i)$ ，内径测距值 a_i 最小值为 a_{min} ，即 $a_{min} = \min(a_i)$ 。当 $|a_{min} + a_{max} + 2r - 2R| \geq a_e$ ，且测距值标准差大于等于 a_σ ，且对数据进行排序，将 a_{min} 定为序号 1，其余数据依次补齐，同时满足 $|a_{N-i} - a_i| < \Delta a$ 时，可判定为偏心距和偏心角同时存在。激光束扫描路径轮廓如图 5 所示。

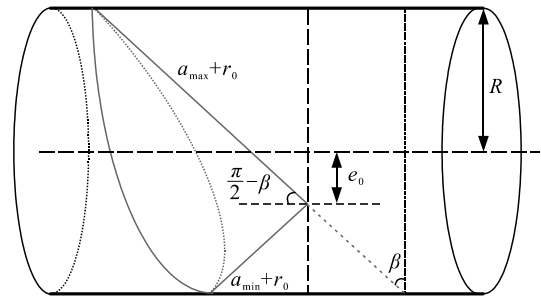


图 5 激光束扫描路径轮廓

将 a_{max} 线延长至下方管壁，则线段总长为 $a_{max} + a_{min} + 2r_0$ ， a_{max} 延长线与 $2R$ 夹角即为 β ，夹角的余弦值如下式：

$$2R / (a_{max} + a_{min} + 2r_0) = \cos\beta \quad (1)$$

此外，在计算偏心距上有：

$$a_{max} \cos\beta - a_{min} \cos\beta = 2e_0 \quad (2)$$

由式(1)和(2)可得偏心距 e_0 和偏心角 β ，偏心角 β 的调整通过舵机完成。偏心距 e_0 的调整方法如下：根据测量出的数据值，获取结束位置 a_{end} 与 a_{min} 所处位置间的夹角 $\Delta\theta$ 。消除偏心距的过程是将激光位移传感器的旋转中心 O 通过 2 个驱动电机移动至真实的管道中心 O' 处。管道真实的管径中心 O' 在坐标 xoy 中的坐标为 $(0, e_0)$ ，通过坐标变换可知，管道真实的管径中心 O' 在坐标 $x'oy'$ 中的坐标为 $(e_0 \cdot \sin(\Delta\theta), e_0 \cdot \cos(\Delta\theta))$ ，则此时在结束位置 a_{end} 处，需要驱动 2 个电机分别运动 $e_0 \cdot \sin(\Delta\theta)$ 和 $e_0 \cdot \cos(\Delta\theta)$ 距离即可将激光位移传感器旋转中心移动至真实的

管道中心，如图 6 所示。

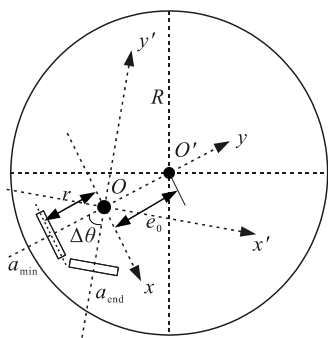


图 6 驱动电机定心

从校正管道中取出激光圆周扫描装置，放入待测身管内，从身管最低处开始测量，激光圆周扫描装置按固定方向匀速旋转一周，采集 N 个内径测距值 a_i ，待测第 i 个内径值 $R'_i = r + a_i$ 。

激光位移传感器采集 N 个探测点的距离信息集合为 $\{R'_1, R'_2, \dots, R'_{N-1}, R'_N\}$ ；以内膛轴线为中心建立坐标系，如图 7 所示，根据式(3)确定探测点的坐标：

$$(x_i, y_i) = \left[R'_i \cdot \sin\left(\frac{i \cdot 2\pi}{N}\right), -R'_i \cdot \cos\left(\frac{i \cdot 2\pi}{N}\right) \right] \quad (3)$$

式中： x_i 为第 i 个探测点的横坐标； y_i 为第 i 个探测点的纵坐标。将每个点画出，可生成内膛的截面图，再用截面图对内膛情况进行准确计算。

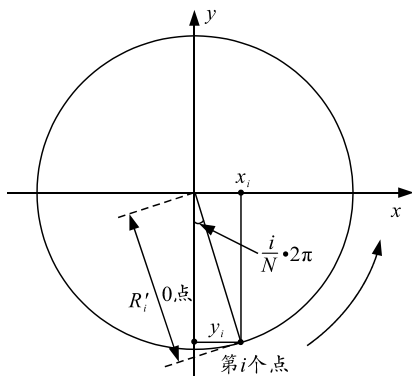


图 7 圆周扫描

4 修正措施

使用前在标准模拟身管中依次完成上述调整即可完成检测装置偏差修正。将获取的激光圆周扫描数据画成 2 维图，获取待测身管内膛截面图中的疵病特征的 2 个目标特征点的像素坐标，根据以下公式确定 2 个目标特征点的像素距离信息 D_x ：

$$D_x = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (4)$$

式中： (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 分别为 2 个特征点的像素坐标，根据以下公式将所述像素距离信息 D_x 转换为实际距离信息 D_s ：

$$D_s = D_x / \varepsilon \quad (5)$$

式中： ε 为像素距离信息与实际距离信息的转换系数，根据实际距离信息 D_s 确定疵病的深度信息。

为方便观察检测过程，使用同口径亚克力管模拟火炮身管进行验证，如图 8 所示。模拟管道内壁粘贴多种形状的条状物体，个别条状物体上刻有凹槽，如图 8(a)所示。图 8(b)为截面检测图，右下方圈住部分为凹坑部位检测图。将模拟管道内壁圆在图上标出，如图 8(c)所示。使用测距工具测量凹坑最低处与内壁圆之间的间距，而后使用条状物厚度减去此间距就是凹坑的深度，如图 8(d)所示。经过检测，此凹坑最深距离为 3.005 61 mm，条状物中凹坑深度实际测量值为 3 mm，两者相差 0.005 61 mm，检测精度较高。

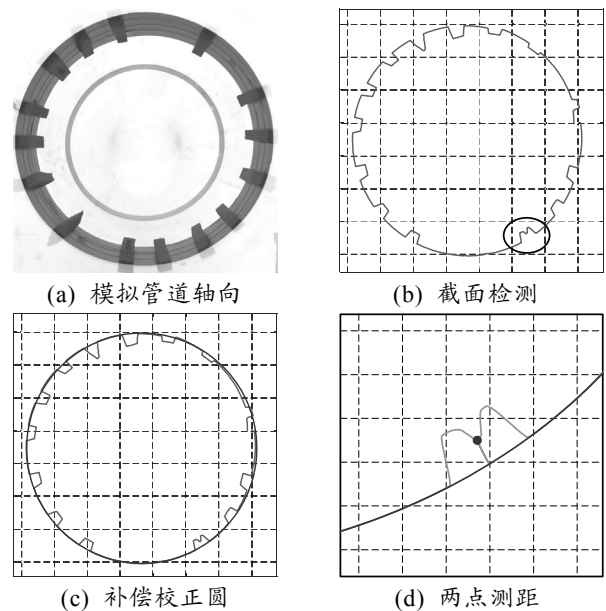


图 8 模拟管道检测

5 结束语

针对激光圆周扫描装置定心难的问题，笔者提出了一种基于激光圆周扫描的通用口径火炮身管内膛检测定心修正算法，通过校正管道和装置上的姿态传感器完成检测装置轴线与校正管道轴线的平行。修正装置根据定心修正算法完成激光位移传感器旋转轴线与校正管道轴线的重合以及激光束与管壁的精确垂直。该装置可适用于多种口径火炮的身管内膛检测装置，通用性强，有助于提升检测效率和精度。

参考文献：

[1] 徐润东, 汪伟, 寇勃晨, 等. 基于激光传感器的滑膛炮身管内径测量算法优化[J]. 兵器装备工程学报, 2019,

40(1): 34-38.

[2] 薛超. 膛内检测机器人控制系统及偏差分析研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.

[3] 郝延辉. 可变径身管内膛检测机器人及测量方法研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.

[4] 于杨, 郑立评, 胡备, 等. 火炮身管内径激光测量系统设计[J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40(4): 81-84.

[5] 张喜发, 卢兴华. 火炮烧蚀内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

[6] 路卓. 身管内膛表面疵病检测系统的设计及实现[D]. 南京: 南京理工大学.

[7] 路卓, 江剑. 火炮身管内膛表面疵病检测系统的设计与研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(3): 112-118.

[8] 邵新杰, 李晓磊, 宋彬, 等. 火炮身管结构光检测系统标定方法研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(12): 1450-1455.

[9] 丁鹤荣. 火炮身管内径测量系统设计[D]. 天津: 天津大学, 2020.

[10] 陈颖. 基于模式识别技术的炮管内膛表面疵病检测系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.

[11] 赵媛媛, 于洵, 李敏, 等. 炮管内壁疵病信息检测系统设计[J]. 光学与光电技术, 2024, 22(1): 52-59.

(上接第 47 页)

10) 调整阀门开关时间。通过调节蝶阀液压系统回油节流和控制系统逻辑, 使该阀具备应急快关和常规开关 2 种操作模式, 将常规模式开启时间由 3 s 延长到 6 s, 关闭时间 1 s 延长到 3 s^[6], 有效减小冲击载荷。

11) 将前端电动蝶阀更换为闸板阀, 消除闸板尾流影响。

4.2 使用维护要点

- 1) 加强定期检查, 做好维护保养工作。
- 2) 在开启蝶阀前, 必须先开启旁路阀, 待两端压力平衡后再开启蝶阀。
- 3) 一般情况下, 严禁蝶阀采用应急快速关闭操作模式。
- 4) 必须经常检查蝶阀执行机构的连接情况, 发现连接松动及时处理。
- 5) 定期测量阀磨损情况, 并进行修复。

5 维修后效果

2011 年维修后, 快速阀经过 11 年使用未出现阀杆断裂、密封面漏气、启闭不到位等问题, 支撑轴承磨损问题得到解决, 轴承使用寿命得到大幅提

升。提高了该设备的稳定性, 在后续的使用中, 未因该设备故障导致风洞试验中断, 为科研试验的顺利进行提供了有力保障。

6 结束语

高速风洞大口径蝶阀制造、安装工艺复杂, 必须了解阀门的性能。在日常使用中, 合理优化阀门使用工况, 在维修时注意阀门的各种安装配合要求, 并做到定期检查维护, 才能提高阀门使用寿命和降低设备使用风险。

参考文献:

[1] 孙德利. 三偏心蝶阀及其应用[J]. 石油化工自动化, 2008, 44(1): 82-83.

[2] 杨恒虎. 新偏心蝶阀结构设计及参数优化[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2016.

[3] 彭廷红. 三偏心蝶阀密封结构启闭性能分析[J]. 阀门, 2003(1): 1-3, 13.

[4] 万敬搏. 三偏心蝶阀的流量特性和双向密封性能分析[J]. 化学工程与装备, 2019(6): 223-228.

[5] 刘阳阳. 大型蝶阀产品的结构有限元分析及优化研究[D]. 河北: 河北科技大学, 2016.

[6] 陈林. 阀门故障诊断技术综述[J]. 流体机械, 2015(9): 36-42.

(上接第 64 页)

[6] ZAAL P M T, POOL D M, MULDER M. Multimodal Pilot Model Identification in Real Flight[C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. AIAA, 2009.

[7] 黄耀, 王新民, 姚从潮, 等. 侧杆负载特性及人机闭环模型研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(1): 76-80.

[8] LEE B, RODCHENKO V, ZAICHIK L. An Approach to Feel System Characteristics Selection[C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit.

AIAA, 2004: 2004-5362.

[9] RODCHENKO V, ZAICHIKL E, YASHINY P. Similarity Criteria for Manipulator Loading and Control Sensitivity Characteristics[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1998, 21(2): 307-313.

[10] 刘振钦. C*准则在大型运输机飞行品质评估中的应用研究[C]//2010 中国制导、导航与控制学术会议论文集. 中国航空学会, 2010: 481-483.

[11] 黄飞飞, 高莘青, 王东辉. 基于 H_∞控制算法的 ACAH 响应类型设计[J]. 兵工自动化, 2021, 40(9): 39-43, 58.