

# 定装式炮弹合膛检测系统设计及误差分析\*

吕维涛 孙世正 姚国年

(中国华阴兵器试验中心 华阴 714200)

**摘要:** 针对合膛规制作维护计量成本高、操作危险程度大,且难以满足靶场试验弹药种类增长需求等问题,设计了定装式炮弹合膛检测系统。利用高精度激光测径仪测量炮弹直径和中心位置,采集中心最大偏移量所在纵向截面的二维参数,计算同轴度,建立合膛规数学模型,对比二维轮廓,判定合膛性。分析了检测原理和误差,实践结果表明,该系统具有测量精度高、安全可靠、结果准确、效率高等特点,适用于多口径炮弹,在弹药装配方面有很大实际应用价值。

**关键词:** 合膛检测;最大偏移量;二维轮廓;同轴度;合膛规

中图分类号: TN02 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8030

## Design of correctness detection system for conjoint ammunition and error analysis

Lv Weitao Sun Shizheng Yao Guonian

(Huayin Ordnance Test Center of China, Huayin 714200, China)

**Abstract:** For the high cost of production, maintenance and measurement of the correctness gauge which was difficult to meet the needs of the growing test ammunition in the range, a new correctness detection system for conjoint ammunition was designed. Using high precision laser instrument to measure the diameter and center coordinates of the ammunition, the parameters on the 2D vertical section containing the maximum offset of the center coordinates was collected and the coaxial was calculated, then the mathematical model of correctness gauge was established. The result of correctness detection was judged by comparing the 2D profile. The measurement theory and errors was analyzed, and the practical results show that the system could detect correctness for multiple caliber ammunition due to its high accuracy, secure and reliable, accurate result and high efficiency. It has a great value on practice in charging and assembling in the range.

**Keywords:** correctness detection; maximum offset; 2D profile; coaxial; correctness gauge

## 0 引言

目前,国内弹药总装厂及试验靶场在23~130 mm口径的定装式炮弹装配过程中,均需进行合膛性检验,便于剔除不合格产品,在弹药生产和靶场试验中具有不可替代的作用<sup>[1-2]</sup>。大多数厂家针对一种型号弹药仅配有1~2套合膛规用于检验炮弹是否合膛。

随着武器系统的改进及试验弹药种类的增多,靶场试验中主要存在以下问题:1)合膛规是尺寸介于火炮弹膛与全弹外形的合膛检测量具,精度要求高、装配难度大<sup>[3-4]</sup>,还需要一系列约几十种二次量具来进行检校维护,价格从几万到几十万元,成本高;2)每种炮弹需对应一种合膛规,需按照不同口径不同弹药定制加工,重复使用率低,数量大;

3)合膛规磨损导致精度降低。目前部分学者正在研究通过非接触手段测量同轴度来检验合膛性<sup>[5-7]</sup>。

针对上述存在问题,文中建立了通过二维轮廓判定炮弹合膛性能的评定准则,利用激光测量设备,自主设计研发了合膛性检测系统,通过对炮弹最大偏移量、外径和中心位置的测量,构建外形轮廓,计算弹丸和药筒的轴线夹角(同轴度),形成适用于多口径定装式炮弹的合膛检测能力。

## 1 检测原理及方法

由于合膛规、炮膛及弹药图纸均为二维尺寸,运用二维图形匹配的方式实现合膛过程的模拟与判定。为了得到准确可靠的评判,需要考虑3种极端情况:

1)弹药结合后处于理想状态,属于完全对称的几何体,

仅需测得通过主轴的任一截面上的轮廓尺寸,通过与图纸对比,即可判定其合膛性。

2) 弹药结合后存在一定角度,属于非对称的几何体,只

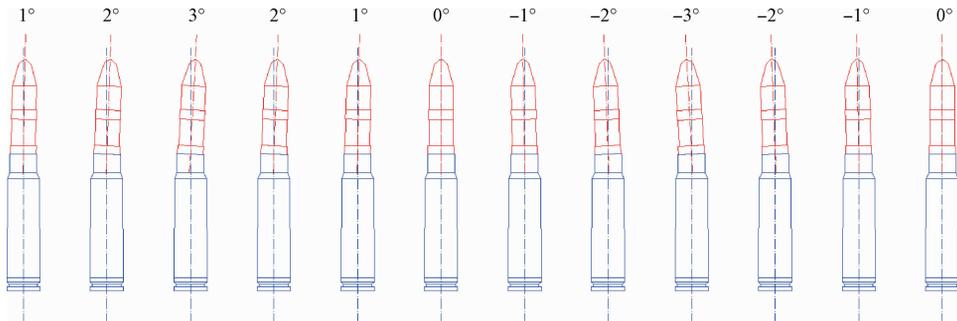


图 1 弹药旋转一周轮廓变化规律示意图

有找到中心最大偏移量所在截面的二维轮廓,才能进一步判定弹药合膛情况。如图 1 所示,弹药旋转一周,其二维轮廓会出现两次最大值。

3) 弹药表面异常点处置。异常点主要是毛刺或者弹药结合时压力过大造成的局部隆起,造成测得数据数据出现异常跳动。通常弹药结合前已经对零部件分别进行检查<sup>[8]</sup>,经验表明,结合后的弹药异常点出现几率非常小,可作为合膛性辅助检查。

通过获取弹药二维轮廓(直径、坐标、中心位置)数据,计算弹药的同轴度,与标准尺寸进行对比;同时通过轮廓数据分析定位异常点,发现瑕疵。具体方法为:

将弹药垂直放置在旋转台上,以定心部水平横向截面为测量面,旋转 1 周,测量中心位置偏移量。若中心位置均相同,则基本判定为同轴;若不一致,则定位到最大偏移量所在的通过中轴的纵向截面,在该纵向截面上沿着纵轴方向选取多个测量点,测量其外径和中心位置,计算对应坐标及在该平面内弹丸轴线和药筒轴线的夹角,建立合膛规数学模型作为标准,比对弹药各测量点的二维参数(直径、坐标及夹角)是否在标准范围内,给出判定结果;对判定过程中出现的不合膛情况进行分析,进行抽检复检。判定流程如图 2 所示。

以某小口径弹药为例,图 3 为其合膛规示意图。图中所示的 6 个关键点 I~VI,以中轴线和底部截面线为基准建立坐标系,对应坐标分别为  $(X_1, Y_1)$  至  $(X_6, Y_6)$ ,其中  $X_i$  表示固定点单侧标准坐标,  $Y_i$  表示距离弹底的高度,通过线性方程计算被测点的标准值,建立合膛规二维分段线性模型。

当  $Y_{i+1} > Y_{测} \geq Y_i$  时,对应标准坐标为:

$$X_{标} = X_{i+1} - \frac{X_{i+1} - X_i}{Y_{i+1} - Y_i} \cdot (Y_{i+1} - Y_{测}) \quad (1)$$

$$Y_{测} = Y_{标} \quad (2)$$

对应标准直径为:

$$D_{标} = 2 | X_{标} | \quad (3)$$

每个测量点的实测值超过对应的标准值时,即为不合膛。

本文中弹药的同轴度用弹体与药筒在最大偏移截面

上的夹角  $\alpha$  表示。

在同一截面上弹体轴线方程:

$$Y_d = K_d \cdot X_{dz} + b \quad (4)$$

药筒的轴线方程:

$$Y_r = K_r \cdot X_{rz} + c \quad (5)$$

其中  $K_r$  和  $K_d$  分别代表二维平面内的轴线斜率。

若  $K_r = K_d$ , 则  $\alpha = 180$ ;

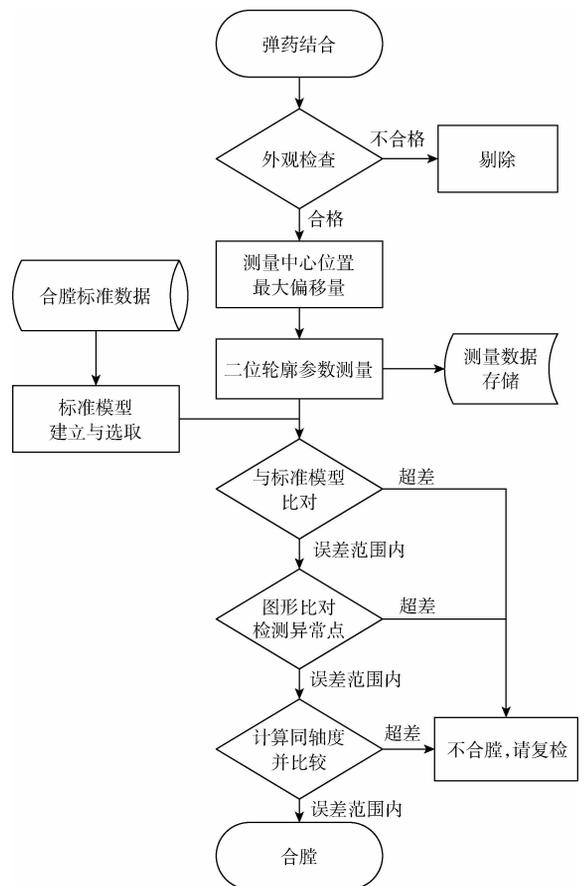


图 2 二维轮廓检测判定流程

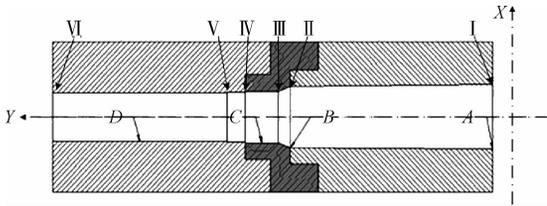


图3 合膛规示意图

若  $K_r \neq K_d$ , 则

$$\alpha = 180 - \arctan\left(\left|\frac{K_d - K_r}{1 + K_d K_r}\right|\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (6)$$

$180^\circ \geq \alpha \geq 175^\circ$  且  $\leq 180^\circ$  时即认为近似同轴; 否则, 即为不同轴。

通过实测值绘制二维轮廓图形, 与标准图形进行匹配, 可以更加直观的查找异常, 进一步测量分析, 使判定结论更加准确。

## 2 系统组成

定装式炮弹合膛性检测系统结构示意图如图4所示。

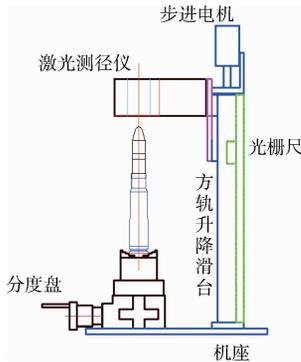


图4 系统结构示意图

硬件部分主要由机座、方轨升降滑台、激光测径仪、步进电机(包括驱动器和控制器)、分度盘、光栅尺以及控制系统组成, 如图5所示。

机座是整机的支撑, 其他机械部件均直接或间接与机座连接。

方轨升降滑台, 连接激光测径仪、步进电机和光栅尺测量头, 带动激光测径仪和光栅尺测量头上下移动, 完成炮弹轴线方向上的连续测量, 实时显示测量高度。

激光测径仪, 用于测量在某一纵向位置下的炮弹外径及中心位置。

步进电机及驱动器和控制器, 用于控制方轨升降滑台的上下运动的速度和位移量等。

分度盘, 主要用于炮弹的夹持和旋转, 并且能够提供炮弹的旋转位置。

光栅尺及数显表可以将数据传输到计算机, 用于精确提供测径仪的轴向位置。



图5 检测系统硬件结构

软件部分主要包括数据通讯、存储、合膛规数学模型建立、数据计算分析比对以及结果判定等, 其测量界面如图6所示。



图6 软件测量系统界面

## 3 误差分析

系统在检测时的误差主要来源于分度盘底座中心平移、侧倾、最大偏移量圆周测量周期过快及激光测径仪自身偏差等<sup>[9-11]</sup>。由于合膛规尺寸公差要求控制在微米级, 因此以下几个因素造成的误差不能忽略。

### 3.1 底座中心平移引起的误差

底座发生平移必然导致中心位置发生变化  $\Delta X'$ , 影响二维轮廓两侧对应坐标参数的计算和图形的绘制。因此每次测量任务开始前, 需用直径已知的标准样柱进行标定, 在后续计算中抵消  $\Delta X'$ 。

### 3.2 激光测径仪本身造成的系统误差

实际测量发现, 本文所用激光测径仪所测数据呈现出随着被测物直径的增大而误差  $\Delta X''$  逐渐增大的变化趋势。误差曲线如图7所示。

实践证明, 根据误差曲线进行逆向修正后, 所得直径测量精度可达 0.001 mm。

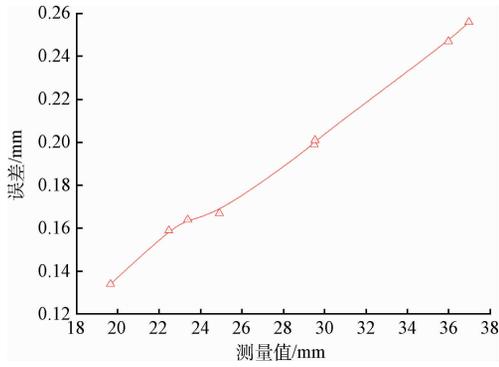


图 7 测径仪误差曲线

3.3 结构不平度引起的系统误差

系统经过长期使用、挪动或工装加工装配等原因造成弹药与测径仪之间发生侧倾,导致直径测量值偏大,产生  $\Delta X''$ 。1)通过在系统硬件设备上加装水平仪进行调整,2)在标定过程中连续测量样柱不同高度中心位置的偏移量,计算侧倾角度  $\theta$ ,完成数据修正。如图 8 所示。

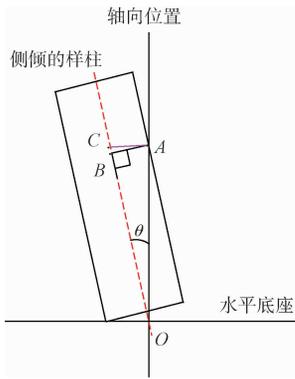


图 8 结构不平修正示意图

当测径仪显示直径测量值为  $2l_{AC}$  时,则

$$\Delta X'' = 2l_{AB} - 2l_{AC} \cos\theta \tag{7}$$

该误差在直径比对和绘制二维轮廓图形时需进行参数修正,避免图形失真,但不影响同轴度的计算。

3.4 采样周期不足引起的误差

中心最大偏移量是炮弹旋转一周时中心位置偏离系统原点的最大值。激光测径仪每秒发送数据 33 次,若测量位置周长为  $l$ ,旋转一周耗时为  $T$ ,则对应测量精度误差  $\mu$  满足:

$$\mu \geq \frac{l}{33T} \tag{8}$$

由式(8)可知,当  $l$  一定时,旋转越快,测量精度越差。同时为避免因旋转过慢而导致检测效率降低的情况,当  $\mu$  已知时,通常选择与被测炮弹口径相适应的最大周长  $l_{max}$  计算最小旋转周期  $T_{min}$ ,既可以满足精度要求,又不影响检测效率。

4 试验结果验证

在靶场试验中,随机抽取某型小口径榴弹进行合膛性检验,采用 LDM-50 激光测径仪,其测量范围 0.2 ~ 45 mm,精度  $\pm 0.002$  mm,重复性  $0.5 \mu\text{m}$ 。转台旋转速率为每分钟  $12^\circ$ 。测量数据如表 1 所示。

表 1 中显示测量位置 148.824 mm 和 174.538 mm 两处数据偏离总体趋势,是由于测量点正好位于炮弹结合压痕和弹带斜面处。由式(6)可以算出  $\alpha \approx 179.813$ ,近似同轴,各测量点直径和坐标均在标准范围内,判定该发弹药合膛性符合要求。验证试验中随机抽取的两种不同的小口径炮弹各 10 发,检测结果与传统合膛规的结果完全一致,外径数据与千分尺测得结果一致。

表 1 某型小口径榴弹实际测量数据

合膛规图纸数据 (高度,直径)	测量位置 (高度)	标准直径 mm	实测直径 mm	中心位置 mm	备注
I 位置(40.077,27.035)	27.446	40.070	39.172	0.128	
	60.834	39.478	38.713	0.129	
	135.015	38.162	36.965	0.131	
II 位置(38.152,135.59)	138.514	36.039	34.732	0.132	
	142.694	33.020	31.825	0.207	
III 位置(32.250,143.76)	148.824	32.250	31.121	0.247	结合压痕
	163.374	32.250	31.458	0.202	
IV 位置(32.250,167.83)	168.109	32.207	30.85	0.205	
	174.538	31.230	29.338	0.210	弹带斜面
	186.935	29.971	29.67	0.211	
V 位置(29.971,182.83)	207.699	29.971	29.652	0.215	
	230.69	29.971	25.978	0.217	
VI 位置(29.971,240.00)	—	—	—	—	

测量过程中,每个测量段上必须有两个以上测量点,实际测量点越密集,检测精度越高,对毛刺等异常点的排除效果越好,首次判定结果的可信度越高。

## 5 结 论

本文建立了通过测量手段检测弹药合膛性能的评定准则,设计研制了定装式炮弹合膛检测系统。实现对多口径定装式弹药的直径、平面坐标、弹丸与药筒的偏角进行测量与数据存储,通过比对标准判定是否合膛等功能。该系统具有非接触、自动化、数字化等优点,在工程应用中进一步验证了基于测量技术的炮弹合膛检测系统的可行性。下一步将通过提升系统硬件水平,优化软件算法和误差处理算法等手段持续提高系统自动化程度和检测效率。

## 参考文献

- [1] 史慧芳,胡翔,杨大瑜. 大口径炮弹自动合膛技术在自动装配中的应用[J]. 兵工自动化, 2010, 29(8): 77-78.
- [2] 高丰,董宏州,刘桂林. 基于 MasterCAM 的枪弹合膛模 CAD/CAM/DNC 一体化技术[J]. 兵工自动化, 2010, 29(7):25-27.
- [3] 周建民,李水利,焦翠萍. 胀缩法装配全形规的研究[J]. 机械研究与应用, 2015(5):53-55.
- [4] 岳超,徐志刚,曹田野. 基于浮动装置的弹药合膛自动检测系统设计[J]. 工具技术, 2016, 50(5): 90-92.

- [5] 郭金辉. 药型罩同轴度参数检测方法研究[D]. 长春理工大学, 2008: 4-12.
- [6] 唐勇,朱占刚. 基于图像处理的定装式炮弹合膛检测方法[J]. 红外与激光工程, 2007(6):270-273.
- [7] 权贵泰,郝瑞鑫,于洵. 一种室内标定激光测距准确度方法的研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(9): 42-45.
- [8] 帅明友,戴正国,王永刚,等. 常规兵器试验弹药准备规程[S]. 2011, 3-8.
- [9] 费业泰. 误差理论与数据处理(第6版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [10] 张家田,王飞,严正国. 非接触式距离测量系统[J]. 电子测量技术, 2012, 35(9):10-14.
- [11] 孙长库. 激光测量技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001.

## 作者简介

吕维涛, 硕士, 工程师, 主要研究方向为弹药装药装配、常规准备与测量。

E-mail: weitaolv@stu. xjtu. edu. cn

孙世正, 本科, 工程师, 主要研究方向为弹药装药装配、常规准备与测量。

姚国年, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为弹药结构特征量测量。

(上接第78页)

- [6] PONMANI C, RAJARAM M. Compensation strategy of matrix converter fed induction motor drive under input voltage and load disturbances using internal model control [J]. International Journal of Elect-rical Power & Energy Systems, 2013, 44 (1):43-51.
- [7] 张磊,徐进,王佑民. 矩阵变换器电路拓扑结构研究综述[J]. 电源技术, 2014, 138(9):1774-1776.
- [8] RMILI L, RAHMANI S, VAHEEDI H, et al. Comprehensive analysis of Matrix converters: Indirect topology [C]. IEEE Conference Publications of 15th International Conference on Sciences and Techniques, 2014:679-684.
- [9] 王建华,高海生. 矩阵变换器研究综述[J]. 科技广场, 2006(2):4-6.
- [10] 周兰,庄圣贤. 矩阵变换器安全换流策略综述[J]. 变频器世界, 2010(8): 59-62.
- [11] 方永利,唐轶,马星河,等. 矩阵变换器四步换流策略的优化方法研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006,

35(5):663-666.

- [12] 吴炳娇. 矩阵式变换器四步换流策略的实现及其 MATLAB 仿真[J]. 变频器世界, 2011(10):79-81.
- [13] 刘复玉,李林,陈璨,等. 一种新型能源并网发电实验平台设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(8): 47-51.
- [14] 褚恩辉,刘秀翀,于万森,等. 基于无源辅助谐振换流的软开关变换器[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11):2347-2353.
- [15] 李黎,黄鑫,黄金波,等. 一种新颖的三相高频链矩阵逆变器的控制方法研究[J]. 电源学报, 2013, 11(5):75-80.

## 作者简介

冯高明, 副教授, 主要研究方向为电力电子与电气传动、控制理论与控制工程等。

E-mail: 499051650@qq. com

何艳杰, 硕士研究生, 主要研究方向为运动驱动与控制。

E-mail: 528412729@qq. com