

doi: 10.7690/bgzdh.2014.07.021

小口径炮弹底火自动拧紧专机研究

舒泽胜, 刘锡朋, 赵建抒

(中国兵器工业第五八研究所弹药自动装药研究应用中心, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对目前国内大多数小口径炮弹底火装配存在劳动强度大、机械式找坑划伤底火表面、扭矩难以控制而致底火坑鼓包等现象, 研制一种新的底火自动拧紧专机。以某型号小口径炮弹底火装配为代表, 采用基于图像无损检测底火坑位置, 通过交流伺服电机驱动六工位回转盘和拧紧头实现底火全自动装配。结果表明: 该样机完全达到预期目标、大大提高了底火装配质量与合格率, 将对我国小口径炮弹传统底火装配技术产生积极的影响。

关键词: 小口径炮弹; 底火; 图像无损检测; 自动装配; PLC; 数据采集; 数据处理; 伺服控制

中图分类号: TJ413 **文献标志码:** A

Automated Primer Tightening Machine for Minor-Caliber Shells

Shu Zesheng, Liu Xipeng, Zhao Jianshu

(Research & Application Center for Ammunition Automatic Charging & Assembly,
No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at shortcomings present at today's domestic primer assembly of minor-caliber shells like high labor intensity, scratching in mechanical groove location, and difficult torque control result in primer groove bulge, research on a new automated primer tightening machine, which revolve around primer assembly of a certain caliber shell and adopts technologies including image non-destructive inspection for primer groove location, and realize completely automated primer assembly through tappet head and 6-station turning mechanism driven by AC servo driver. Result shows the model machine could entirely reach the expected goal, thus dramatically advance quality and acceptability of primer assembly, and create a positive effect on China's traditional primer assembly technology of minor-caliber cannonballs.

Keywords: minor-caliber shell; primer; image non-destructive inspection; automated assembly; PLC; data collection; data processing; servo control

0 引言

目前国内小口径炮弹厂在全弹装配底火拧紧工序上还停留在半自动化底火拧紧专机的状态。由于每年生产数量巨大、品种繁多, 底火拧紧是小口径炮弹全弹装配中的关键工序, 该工序生产时具有以下特点: 1) 目前采用半自动设备进行拧紧, 工人劳动强度大。2) 以前研制的自动设备由于机械式找坑而划伤底火表面。3) 不能很好地控制扭矩, 发生过拧而使底火坑边沿鼓包, 拧紧力矩不一致的现象^[1]。

上述缺陷严重制约了产品质量的稳定性, 目前急需解决这一难题^[2], 而国外先进的弹药生产厂商在装备和技术上对我国进行封锁; 因此, 笔者研制一种新的伺服驱动的底火自动拧紧技术, 以提高底火自动化装配质量, 实现小口径炮弹底火自动装配。

1 研究内容

针对小口径炮弹底火拧紧的特点, 笔者以某型号小口径炮弹为代表, 研制一种以图像检测为基础的全自动底火拧紧设备样机。

1.1 装配工艺路线的确定

本底火自动拧紧单元主要完成对基于图像检测

的底火坑(无损)定位、可靠高质量底火拧紧等关键技术的突破、验证和实现。预上底火、上下药筒等工位仍采用人工方式实现, 工艺原理如图1所示。

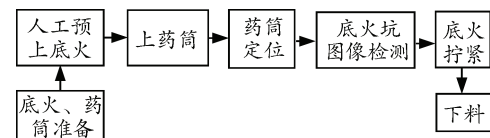


图1 底火自动拧紧单元工艺原理

1.2 主要技术指标

- 1) 节拍: 6 s/发。
- 2) 转盘定位精度: 6'。转盘的工作直径: $\phi 1\ 000$ mm, 采用交流伺服电机驱动。
- 3) 图像处理系统: 检测精度(在半径 7.5 mm 的底火坑中心点的圆弧长偏差)优于 0.15 mm(对应 7.5 mm 半径圆角度值为 1.322°); 检测及数据输出总时间 ≤ 2 s。

1.3 主要功能

- 1) 该自动装配机用于以某型号小口径炮弹底火的自动装配, 完成包括药筒自动定位、底火坑自动寻找与检测、合格底火自动拧紧等, 产品的合格

收稿日期: 2014-02-17; 修回日期: 2014-03-19

作者简介: 舒泽胜(1963—), 男, 重庆人, 工学学士, 工程师, 从事自动化研究。

率 > 98%，废品率 < 0.1%；

- 2) 能够设置拧紧扭矩、底火拧入深度等参数^[3]；
- 3) 能够防止拧紧扭矩过冲使底火坑鼓包、避免拧紧爪在底火表面机械式直接找坑而划伤底火；
- 4) 具有剔除不合格底火的功能，以保护拧紧专机以及底火不至于被划伤；
- 5) 具有单机调试、单元试运行、单元运行功能；
- 6) 具有安全自锁、互锁、故障报警和停车功能；

7) 系统有故障自诊断功能，能显示设备各机构故障位置及相应代码。

2 专机的组成

2.1 机械本体的组成

主要由电动六工位回转台、药筒定位夹紧机构、底火坑图像检测系统、底火拧紧专机以及控制器(含手控盒)等组成，如图 2 所示。

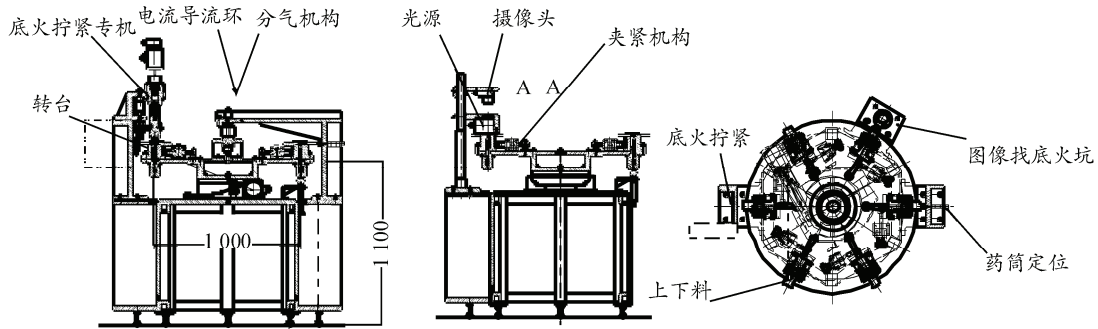


图 2 底火拧紧单元组成

2.2 控制系统的组成

该控制系统采用 PLC、触摸屏、图像处理系统、伺服系统和其他现场检测和执行器件构成应用、控制和执行 3 层结构^[4]，如图 3 所示。

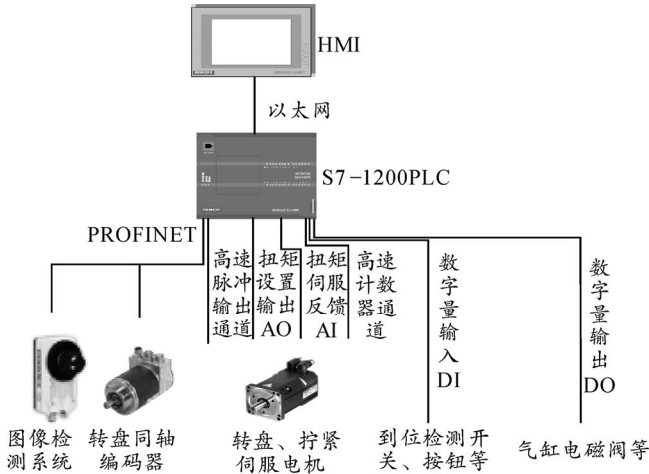


图 3 控制系统框图

操作面板如图 4 所示。

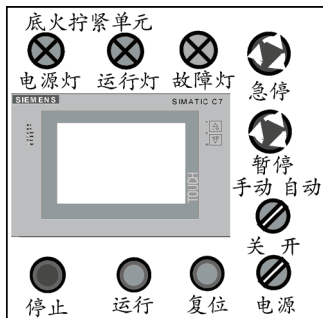


图 4 底火拧紧单元操作面板

3 关键技术设备的设计选型

3.1 伺服驱动回转台的六工位定位

转盘的定位通过伺服电机准确驱动、回转工作台精确传动和转盘高精度同轴由绝对值编码器反馈保证^[5]。

3.1.1 转盘同轴编码器设计选型

转盘的同轴编码器是转盘转动精度的最终保证，为保证 500 mm 半径圆上 0.1 mm 的弧长设计偏差，根据单圆周上单圈码值与圆周弧长的对应关系，有单圈绝对值编码器的最小码值计算公式：

$$\frac{1}{C_{\min}} = \frac{0.1 \text{ mm}}{2\pi r} = \frac{0.1 \text{ mm}}{2 \times \pi \times 500 \text{ mm}} \quad (1)$$

由上式得该绝对值编码器最小单圈码值为 31 416，选用 16 位单圈码值 65 536 的绝对值编码器，能保证 0.1 mm 弧长上有 2 个以上码值，以 0.05 mm 的检测精度，能满足转盘 0.1 mm 弧长的定位精度要求。

3.1.2 转盘伺服电机设计选型

1) 编码器精度计算。

作为转盘定位的执行机构，转盘伺服电机的精度直接影响转盘的定位精度和快速性。为满足转盘 0.1 mm 的最终定位精度，转盘伺服的单位输入脉冲当量取转盘位置检测精度的 1/4 倍，又因转盘伺服电机与转盘之间的传动系数为 1:90，则驱动转盘旋转 1 圈对应的转盘伺服电机编码器单圈最小码值数为：

$$C = \frac{65\,536 \times 4}{90} = 2\,912.7 \quad (2)$$

选择 12 位，即 4 096 码值或以上的编码器，就能满足转盘定位对伺服电机驱动精度的要求。由于选型限制，选择 20 位的编码器完全满足精度要求。

2) 电机转速计算。

已知(设定)转盘转动 1/6 圈时间为 1.5 s，由于转盘伺服电机与转盘之间有 1: 90 的传动系数，则有电机平均 1 圈转动时间 t ：

$$t = \frac{1.5 \times 6}{90} = 0.1 \text{ s}$$

电机平均转速为：

$$n = \frac{1}{t} = 10 \text{ r/s}$$

合计 600 r/min。选用额定转速 1 000 r/min 或以上电机即可完全满足电机转动快速性的要求^[6]。

3.2 防鼓包的底火拧紧技术

3.2.1 问题根源分析

首先，从拧紧对象的特性上讲，在拧紧过程的第 3 阶段，继续拧入产生的反作用力剧增，导致从底火拧到位的 t_2 时刻到扭力超过底火鼓包值的 t_3 时刻之间的时间 Δt 非常短。如果拧紧控制系统的响应时间(包括扭矩传感器检测时间、控制器响应时间和电机响应时间)大于 Δt ，而拧入扭矩大于鼓包扭矩值，就会产生鼓包现象。

其次，之前的底火拧紧机设备在拧紧过程中，采用普通三相异步电机或步进电机进行扭矩驱动的方式，并以远大于拧紧过程所需扭矩值进行拧紧，通过扭矩限制器保护或扭矩传感器反馈使电机停转的方式拧紧。根据以往的调试经验，在该方式下，由于扭矩限制器、控制器和电机响应不及时，导致拧紧电机带动拧紧头过冲，造成拧鼓包和跳坑。底火拧鼓包过程拧紧头输出扭矩情况见图 5。

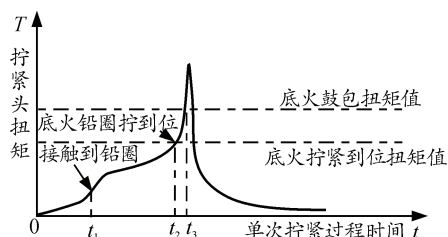


图 5 底火拧鼓包过程拧紧头扭矩

3.2.2 解决措施

采用基于伺服驱动器的快速扭矩控制方式对底火拧紧过程进行控制。通过将拧紧过程输出扭矩控制值设定在拧鼓包最小扭矩值和可靠拧紧最大扭矩值之间，如图 6 所示，基于伺服驱动器几十微秒级

的扭矩控制周期，将拧紧头的扭矩输出值限制在鼓包扭矩之下，并稳定地大于可靠拧紧所需扭矩值，实现底火的防鼓包和跳坑的可靠拧紧。

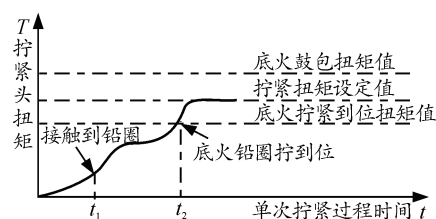


图 6 基于扭矩控制的拧紧过程扭矩输出

已知极限拧紧力矩为 35 N·m，作为额定拧紧扭矩。

则在采用 1:10 减速机进行扭矩增大，并留有 20% 的余量后，所需伺服电机最小额定输出扭矩为：

$$T = \frac{35 \text{ N}\cdot\text{m} \times 1.2}{10} = 4.2 \text{ N}\cdot\text{m}$$

选用额定转矩 4.2 N·m 的伺服电机满足力矩要求。

3.3 视觉检测系统设计选型

根据误差分配，视觉检测系统在底火 7.5 mm 半径圆弧长偏差允许值为 0.1 mm。

根据圆弧长与角度的对应关系，可得对应的角度误差 α_s 计算公式为：

$$\frac{\alpha_s}{360^\circ} = \frac{0.1 \text{ mm}}{2 \times \pi \times 7.5 \text{ mm}}$$

求得 $\alpha_s \approx 0.764^\circ$ 。

3.3.1 视觉系统选型

1) 相机设计选型。

已知检测精度要求为 0.1 mm，底火外径约为 19 mm，视野范围取 20 mm。

依据相机分辨率计算公式：分辨率 = $\frac{\text{视野}}{\text{短边像素值}}$

得到，

$$\text{短边像素值} = \frac{\text{视野}}{\text{短边像素值}} = \frac{20 \text{ mm}}{0.1 \text{ mm}} \approx 200$$

检测精度验证试验使用的 CCD 短边 480 像素的 640×480 像素的数字相机，精度是要求值 200 的 2.4 倍，已能够满足测量精度要求。为提高图像检测精度，采用更高档的 1 600×1 200 像素，CCD 尺寸为 1/1.8 inch (7.2 mm×5.3 mm) 的数字相机 IS5403，完全满足检测精度要求。

2) 镜头选型计算。

已知视野范围取 20 mm，物距取 300 mm。

根据光学公式：

$$\frac{FOV}{CCD} = \frac{U}{V}$$

式中：FOV 表示视野；CCD 表示 CCD 尺寸，求得：

$$V = \frac{U \times CCD}{FOV} = \frac{300 \text{ mm} \times 5.3 \text{ mm}}{20 \text{ mm}} = 79.5 \text{ mm}$$

根据光学公式，得到焦距：

$$F = \frac{U \times V}{U + V} = \frac{300 \text{ mm} \times 79.5 \text{ mm}}{300 \text{ mm} + 79.5 \text{ mm}} = 62.8 \text{ mm}$$

选用焦距 F 为 50 的镜头配合垫圈等辅助措施可以满足要求。

3) 光源选择。

根据经验，为在金属检测面上尽量突出要检测的凹坑和背景的区别，有利于软件对凹坑的识别、检测和定位，选用同轴光源。

3.3.2 视觉系统需满足检测精度要求

基于简单特征提取和几何计算方式实现，例如首先检测提取出斑点和圆环等特征，然后对中心点和圆心等特征进行计算。采用该方式的图像传感器包括康耐视公司的 INSIGHT 传感器等。如图 7 所示，首先将 3 个拧紧坑作为斑点(类似缺陷)提取出来，以及底火台内边圆；之后计算出拧紧坑的几何中心点和内边圆心，分别作为小坑中心点和底火中心点，并通过计算找出面积最小的拧紧坑作为角度定位特征点。该检测方式从原理上避免了拧紧坑形状一致性差的问题，实现了特征点的唯一性。

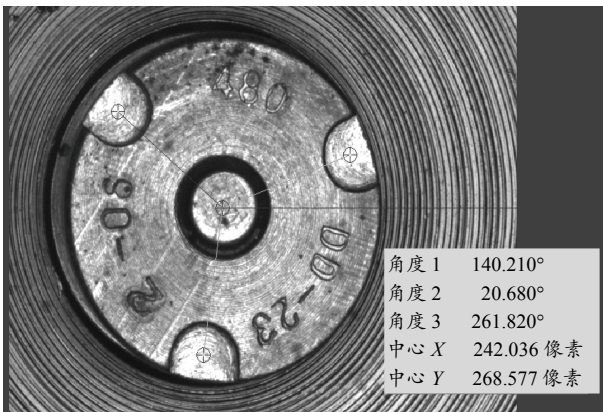


图 7 采用几何计算方式的特征点检测方式

从 2 个层次对检测系统的定位精度进行确认：

1) 能准确捕捉到包括 3 个定位坑(含定位坑的中心点)和中心点定位圆等特征点，采用对抓取图片目测方式判断。

2) 能对拧紧坑的角度值参数进行精确检测。要求检测精度(底火坑中心点在 7.5 mm 半径圆弧长偏差)优于 0.1 mm(对应 7.5 mm 半径圆角度 0.764°)。

测试验证数据如表 1。

表 1 测试验证数据

序号	视觉测量数据		实际转角		偏差	
	转角/(°)	原始数据	角度/(°)	转角/(°)		
1	—	123.52	138.17	—	—	
第一组数据	2	0.28	123.239	138.50	0.33	0.05
	3	0.57	122.672	139.00	0.50	-0.07
	4	2.98	119.694	142.00	3.00	0.02
	5	1.99	117.709	144.00	2.00	0.02
	6	38.03	79.676	182.00	38.00	-0.03
	7	1.83	77.845	184.00	2.00	0.17
	8	0.15	77.691	184.17	0.17	0.01
	9	0.70	76.995	184.83	0.67	-0.03
	10	36.03	40.965	220.35	35.52	-0.51
	第二组数据	1	—	261.603	0.67	—
2		2.85	258.757	3.83	3.17	0.32
3		8.15	250.612	12.33	8.50	0.35
4		8.71	241.902	20.67	8.33	-0.38
5		13.08	228.824	34.17	13.50	0.42
6		5.74	223.089	40.37	6.20	0.46
7		12.25	210.835	51.93	11.57	-0.69
8		9.14	201.691	61.07	9.13	-0.01
9		-6.42	195.269	67.37	6.30	-0.12
10		-7.71	187.560	75.70	8.33	0.62

3.4 拧紧专机伺服驱动设计

3.4.1 伺服驱动的误差控制

根据误差分配，要求该机构总误差，即单次底火拧紧动作过程中拧紧伺服电机和减速机误差之和为 0.02 mm(底火 7.5 mm 半径圆弧长偏差)。在单次底火拧紧动作过程中包括了拧紧和原点复位 2 个动作，可能包括正、反 2 个方向的运动而导致减速机间隙误差的累积，所以该机构最大总误差应该为减速机间隙误差的 2 倍与伺服电机误差之和。

选用 1:10 减速机间隙误差为 3'，对应底火 7.5 mm 半径圆弧长偏差为：

$$3' \times \frac{2 \times \pi \times 7.5 \text{ mm}}{360 \times 60'} \approx 0.0065 \text{ mm}$$

则有拧紧伺服电机(在拧紧爪)执行误差(底火 7.5 mm 半径圆弧长偏差)为：

$$\frac{0.02 \text{ mm} - 0.0075 \text{ mm} \times 2}{2} \approx 0.0035 \text{ mm}$$

设该电机编码器码值为 C_2 ，另由于采用了 1:10 的减速机，则有公式：

$$\frac{0.0035 \text{ mm}}{2 \times \pi \times 7.5 \text{ mm}} \approx \frac{1}{10 \times C_2}$$

求得 C_2 为 1 346，选用 11 位或以上编码器即可以满足精度要求。由于选型限制，选用 20 位的编码器，完全满足精度要求。

3.4.2 拧紧速度设计

拧紧全过程包括气缸下行、气缸上行、拧紧和复位过程，全过程时间为 4.5 s，分配为气缸下行时间：0.3 s；气缸上行时间：0.2 s；拧紧过程时间：3.7 s；拧紧头复位时间：0.3 s。