

doi: 10.7690/bgzdh.2021.09.011

# 弹丸外弹道试验装置运动控制系统

刘东睿<sup>1</sup>, 崔健<sup>2</sup>, 苏伟<sup>1</sup>, 张雷<sup>1</sup>

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能制造事业部, 四川 绵阳 621000;

2. 陆装驻昆明地区防化军代室, 昆明 650000)

**摘要:** 针对线膛火炮旋转弹丸外弹道受力情况试验需求, 设计一种弹丸外弹道试验装置运动控制系统。以倍福 CX5130 运动控制器作为主控制器, 通过控制该试验装置的运动带动弹丸的自转和摆动, 实现旋转弹丸的外弹道运动模拟功能。结果表明: 该系统能达到预期设计目标, 并已在实际使用中得到验证。

**关键词:** 倍福; CX5130; 运动控制系统

**中图分类号:** TJ410 **文献标志码:** A

## Motion Control System of Projectile Exterior Ballistic Test Device

Liu Dongrui<sup>1</sup>, Cui Jian<sup>2</sup>, Su Wei<sup>1</sup>, Zhang Lei<sup>1</sup>(1. Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd.  
of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;

2. NBC Defense Military Representative Office of Army Equipment Department in Kunming, Kunming 650000, China)

**Abstract:** In order to meet the test requirements of the external ballistic force of the spinning projectile, a motion control system of the projectile exterior ballistic test device is designed. Taking Beckhoff CX5130 motion controller as the main controller, by controlling the motion of the test device to drive the projectile rotation and swing, the exterior ballistic motion simulation function of the rotating projectile is realized. The results show that the system can achieve the expected design goals, and has been verified in application.

**Keywords:** Beckhoff; CX5130; motion control system

## 0 引言

在线膛火炮旋转弹丸飞行过程中, 由于发射条件、大气条件和弹丸本身各方面因素的干扰<sup>[1-2]</sup>, 会导致弹道产生系统偏差或散布, 通过弹道计算和编制射表, 可对系统偏差进行修正并减小散布, 提高弹丸射击精度<sup>[3]</sup>。为进行弹道计算和分析形成散布的原因, 需要对弹丸的外弹道受力进行分析。弹丸在外弹道飞行过程中受到的力主要为重力、科氏惯性力和空气阻力。由于火炮射高与射程有限, 重力和科氏惯性力的影响可忽略不计, 主要考虑空气阻力的影响。当弹轴与速度矢量不重合时, 空气对弹丸的作用力和力矩包括切向阻力、升力、静力矩、马格努斯力和马格努斯力矩等<sup>[4]</sup>, 对于已有制式弹丸, 这些力和力矩可根据资料数据求出, 而对于新设计的弹丸, 则必须通过实际试验来确定。

实际试验中, 对旋转弹丸在外弹道中的运动状态和环境状态进行模拟, 通过被测弹丸表面安装的应力应变传感器对弹丸受到的力和力矩进行采集, 从而推算出空气阻力对弹丸的影响。旋转弹丸外弹

道运动包括自转和摆动, 基于线膛火炮旋转弹丸受力情况试验需求, 笔者设计了一种弹丸外弹道试验装置运动控制系统, 将被测弹丸安装在该试验装置支杆前端, 由该试验装置运动控制系统控制支杆的自转和摆动, 从而带动弹丸的自转和摆动, 通过控制该试验装置在特定测试环境中的运动<sup>[5]</sup>, 实现了旋转弹丸的外弹道运动模拟功能。

## 1 系统组成

笔者设计的弹丸外弹道试验装置是以倍福 CX5130 运动控制器为核心的机电一体化设备, 主要由控制机构、执行机构和反馈机构组成<sup>[6]</sup>。

控制机构由一台台式机和倍福 CX5130 运动控制器组成, 台式机为运动控制系统的上位机, 倍福 CX5130 运动控制器为控制主要器件。台式机和运动控制器通过 PROFIBUS-DP 总线进行通讯, 可通过台式机对弹丸的运动参数进行设定, 并将指令下发给运动控制器进行处理。运动控制器可对电机进行控制并将反馈的编码器值和限位开关状态以及系统报警信息传递到上位机进行显示。为方便调试和

收稿日期: 2021-04-20; 修回日期: 2021-06-12

作者简介: 刘东睿(1995—), 男, 四川人, 从事电气自动化研究。E-mail: 1351402027@qq.com。

以后的扩展，在控制机柜中配备了一台 TP-LINK TL-SG1005 工业级 5 口千兆交换机。执行机构由 3 套倍福 AX5000 系列驱动器和倍福 AM8000 系列同步伺服电机组成，执行机构与运动控制器通过 EtherCAT 总线方式进行通讯，并按上位机设定的参数进行动作。反馈机构由电机自带的编码器和欧姆龙 D4C 限位开关组成，编码器可反馈电机实时位置，限位开关可对试验装置的运动范围进行限制。

运动控制系统如图 1 所示。

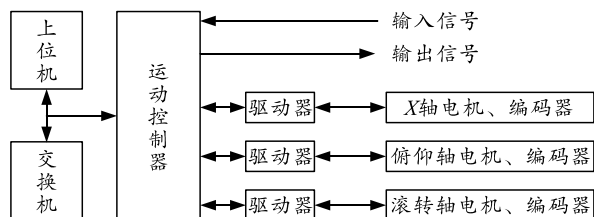


图 1 运动控制系统

## 2 硬件设计

考虑到试验装置运动控制系统必须具备实时性、可靠性和可扩展性，本系统组成如下：

1) 运动控制器采用倍福 CX5130 运动控制器<sup>[7]</sup>，该运动控制器内置微软 Windows Embedded Standard 7 P 64 位操作系统，控制软件采用 TwinCAT 2 NC PTP Runtime，具备千兆以太网和 4 个 USB 2.0 接口。运动控制器与上位机之间使用 PROFIBUS-DP 通信，通信速度可达 20 ms。该运动控制器配备有模拟量输入输出模块、数字量输入输出模块、RS485 模块、EtherCAT 通讯模块和 PROFIBUS-DP 通信模块，方便系统的后续改进，具有很好的实时性和可扩展性。

2) 驱动器及电机采用倍福 AX5000 系列驱动器和倍福 AM8000 系列同步伺服电机，驱动器与运动控制器使用 EtherCAT 总线通信，驱动器控制速度最快可达 62.5  $\mu$ s，驱动器附件包含进线端电抗器、滤波器、出线端电抗器和外置电阻，该驱动器抗干扰性能良好，具备平稳启动、过电压检测、短路保护和缺相监控等功能。AX5000 控制回路和制动回路采用 DC 24 V 供电，分为 2 个不同的通道，使用 2 个独立的 24 V 电源分别供电，以避免电源故障导致的驱动轴飞车。倍福 AM8000 系列同步伺服电机可配备多圈 (OCT) 绝对值编码器，编码器可达 20 位分辨率。通过伺服驱动半闭环控制确保试验装置自转和摆动的运动精度及稳定性，从而保障了系统运行的可靠性。

3) 9 个开关量输入信号接入运动控制器模拟量

输入模块：X 方向+、-限位；Z 方向+、-限位； $\gamma$  方向+、-限位；启动按钮信号；暂停按钮信号；急停开关信号。上述输入信号保障了系统控制的可靠性。

4) 电控柜：门板上配备有启动、暂停按钮和急停开关，系统控制器件装配在柜内安装板上。

该系统的控制原理如图 2 所示，系统工作流程如下：

1) 由 QS 开关控制系统的通断电，合上开关后系统通电，断开开关后系统断电。

2) 在试验中，弹丸的自转和摆动由支杆的自转和摆动来实现。支杆摆动可被分解为水平方向的运动和竖直方向的运动，由 2 台电机分别实现，其中水平方向为 X 方向，竖直方向为 Z 方向；支杆自转由第 3 台电机进行实现，自转方向被称为  $\gamma$  方向。用户根据弹丸测试要求，在上位机中输入弹丸自转和摆动的角度、速度等参数，并通过 PROFIBUS-DP 通信将运动参数和指令发送到运动控制器。

3) 运动控制器通过 EtherCAT 总线控制驱动器并驱动电机运转，M-1 电机控制 X 方向运动，M-2 电机控制 Z 方向运动，M-3 电机控制  $\gamma$  方向运动，该试验装置在 3 个运动方向上均安装有限位开关。

4) 为方便装置使用，设计了启动按钮和暂停按钮，在按下启动按钮后，装置按照上位机设定参数进行运动。在装置运动过程中，当按下暂停按钮后，装置停止在当前位置，必须再按一次启动按钮装置才可恢复运动状态。

5) 当运动过程中出现紧急情况时，用户可立即拍下急停按钮，此时机构运动受限，待人工确认后解除报警，机构运动状态恢复正常。

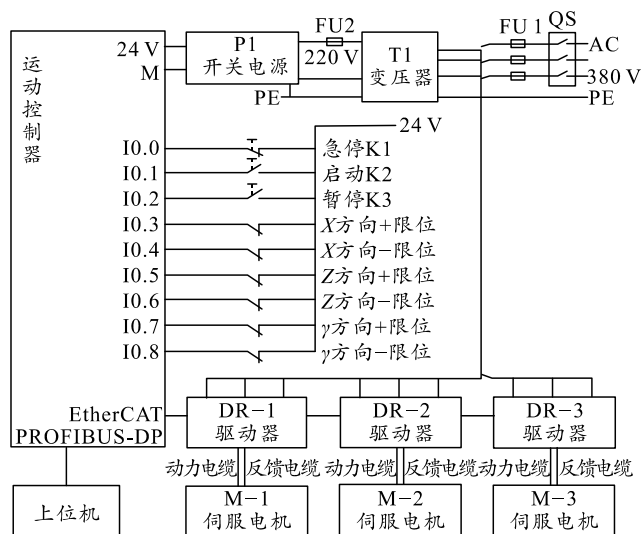


图 2 系统控制原理

### 3 软件设计

弹丸外弹道试验装置运动控制系统的软件分为上位机软件和运动控制器软件 2 部分。

#### 3.1 上位机软件

上位机软件的作用是设置电机运动参数并直观显示出电机的位置。如图 3 所示，上位机软件具有用户登录、设置、操作日志、急停和复位等功能。设置分为电机设置和用户设置，在电机设置中，运动模式包括点动、单次运动和往复运动 3 种模式，运动参数包括速度、加速度、单次运动终点、往复运动次数、往复运动起点和往复运动终点等参数，可满足各种试验需求。

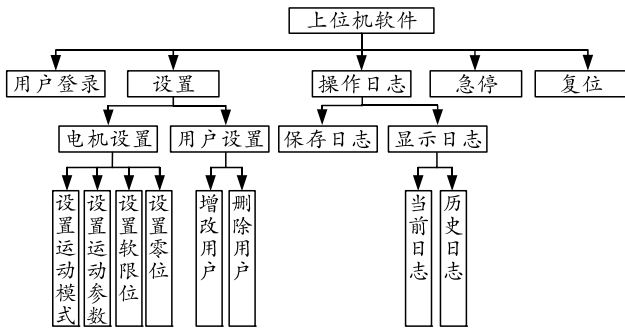


图 3 上位机软件功能

为保证试验装置的安全性，防止发生误操作等问题，对相应的画面和控制按钮进行用户等级设置，可分为普通用户、管理员和专家 3 个等级<sup>[8]</sup>。软件用户等级默认为普通用户等级，可通过输入用户名和密码进入管理员或专家等级，当用户在管理员或专家等级下待机超过 3 min，软件自动切换至普通用户等级。普通用户仅具备基本的操作权限，可控制电机单点或连续运动；管理员持有报警信息处理权限，可对报警状态进行解除；专家拥有最高权限，除可进行电机运动操作和报警处理外，还可对装置零位、软限位等重要参数进行设置，具备用户管理和查看操作日志等权限。

#### 3.2 运动控制器软件

倍福运动控制器是一台带有运动控制功能和软 PLC 功能的 IPC，运动控制程序采用倍福 TwinCAT 2 NC PTP Runtime 软件进行编写。CX5130 运动控制器运动控制和逻辑控制之间的数据交换直接通过软件进行交互，同时 CX5130 运动控制器内置 WIN7P 操作系统，可根据不同的硬件接口需求编写 C#通信程序并将程序放置在 WIN7P 操作系统内。在运动控制器开机时自动运行通信程序，通过 ADS

通信方式实现运动控制器软件与上位机软件的通信。为方便扩展和数据监控，该通信程序采用模块化设计，程序中包含倍福运动控制器数据采集代码和其他各种接口通信的代码，可根据实际需要代码进行修改和调用。

每次开机时，运动控制器会自动与上位机连接，若与上位机连接失败，系统会自动弹出报警信息，待连接成功后解除。在开始运动前，运动控制器会对上位机设定的运动模式进行判断，并根据设定的位置、速度、加速度等参数，通过控制驱动器来控制 3 台电机的运动。运动控制器软件工作流程如图 4 所示。

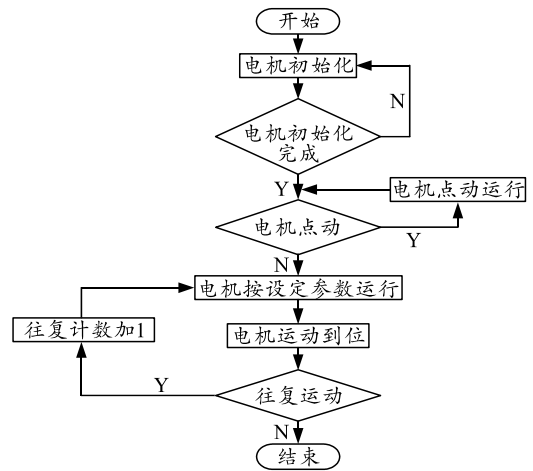


图 4 运动控制器软件工作流程

系统运动控制通过 TwinCAT 2 软件 MC 库中的功能块进行编程，可实现电机匀速运动、绝对定位、相对定位和点动功能。通过 TwinCAT 2 软件逻辑编程可对各输入信号和驱动器参数进行监控和报警，并对上位机指令作出响应。

当运动过程中出现驱动器报警、限位开关报警或上位机急停信号，运动控制器会立即将电机安全停车并将报警状态传递给上位机，在报警状态下，运动控制器会对装置运动功能进行限制，当人工确认后，装置运动限制解除，可通过点动方式将装置移动到安全位置或者回零。

运动控制器和驱动器之间采用 EtherCAT 总线方式进行通信，运动控制器上的 NC 信号发生器 (setpoint generator) 读取上位机设定的位置、速度和加速度数值，并在每个 NC 周期与驱动器进行一次上述数据的传递。如果驱动器此时为位置模式，NC 信号发生器会将位置信号经过换算后发给驱动器；如果驱动器此时为速度模式，NC 信号发生器会将速度信号经过换算后发给驱动器。驱动器按照给定

参数通过脉冲信号控制电机运动，并将编码器反馈值与设定值进行对比，通过调整脉冲信号来实现对电机的精确控制。倍福外部设定值发生器如图 5 所示。

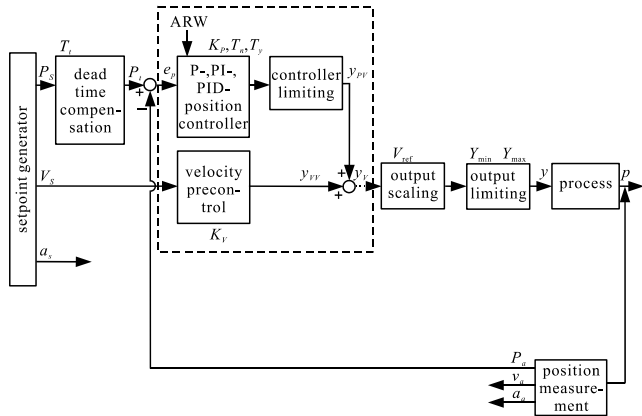


图 5 倍福外部设定值发生器

### 4 应用效果

该弹丸外弹道试验装置运动控制系统现已在某项目中得到成功应用。经测试，性能指标均满足试验要求，达到预期设计目标，实现了旋转弹丸的外弹道运动模拟功能。

### 5 结束语

基于线膛火炮旋转弹丸受力情况试验需求，笔

者采用倍福 CX5130 运动控制器、倍福 5000 系列驱动器等器件设计的弹丸外弹道试验装置运动控制系统，采取软硬件设计相结合的思路，实现旋转弹丸的外弹道运动模拟功能，具有实时性好、可靠性高和扩展性强等特点。该设计已在实际使用过程中得到验证，达到了预期设计目标。

### 参考文献：

[1] 钱林方. 火炮弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 1.

[2] 廖芸, 周丽娟, 胡阳. 基于 PROFINET 总线的高精度安全型火工品压药控制系统[J]. 兵工自动化, 2020, 39(6): 79-81.

[3] 赵晓利, 赵新, 张煊工. 基于弹速测量的弹道辨识技术[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(5): 141-143.

[4] 韩子鹏. 弹箭外弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 41.

[5] 韦卓, 汪加洁. 制导武器导引头外场半实物仿真系统设计研究[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(4): 33-36.

[6] 金翰林, 李锦, 谷岩波. 某枪弹装配系统的控制系统设计[J]. 兵工自动化, 2020, 39(6): 27-29.

[7] 王英. BeckHoff 控制器在堆垛控制系统中的应用[J]. 科技情报开发与经济, 2011, 21(27): 184-186.

[8] 王胜, 龚运环, 景富军. 基于 PLC 的纸盒成型机全自动控制系统设计[J]. 兵工自动化, 2017, 36(3): 24-44.

[9] 焦晓璇, 景博, 黄以锋, 等. 基于模拟退火离散粒子群算法的测试点优化[J]. 计算机应用, 2014, 34(6): 1649-1652.

[10] 羌晓清, 景博, 邓森, 等. 基于模拟退火粒子群算法的不可靠测试点优化[J]. 计算机应用, 2015, 35(4): 1071-1074.

[11] 叶晓慧. 基于动态贪婪算法的不可靠测试点选择[J]. 北京理工大学学报, 2010, 11(30): 1350-1354.

[12] 翟禹尧, 史贤俊, 杨帅, 等. 不可靠测试条件下基于 NSGA-II 算法的多目标测试优化选择研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2020: 1-12.

[13] 陈希祥, 邱静, 刘冠军. 测试不确定条件下基于贝叶斯网络的装备测试优化选择技术[J]. 中国机械工程, 2011, 22(4): 379-384.

[14] 代京, 于劲松, 张平, 等. 基于多信号流图的诊断贝叶斯网络建模[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(4): 472-475.

[15] 王成刚, 周晓东, 王学伟. 基于贝叶斯网络的复杂装备测试性评估[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(5): 17-21.

\*\*\*\*\*

(上接第 26 页)

[2] 张士刚. 非完美测试条件下的测试性设计理论与方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.

[3] 秦玉峰, 史贤俊, 郭家豪. 基于混合离散二进制粒子群-遗传算法的测试配置方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(12): 42-45.

[4] 吴新锋, 段然, 周虎, 等. 基于改进二进制粒子群遗传算法的测试优选[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(5): 146-150.

[5] 代西超, 南建国, 黄雷, 等. 基于改进遗传模拟退火算法的测试优化选择[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(2): 70-75.

[6] 王鹤淇, 王伟国, 郭立红, 等. 离散萤火虫算法的复杂装备测试点优化选择[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1357-1367.

[7] 吴涛, 叶晓慧, 王红霞. 基于量子遗传算法测试选择问题的研究[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(11): 2508-2510.

[8] 张钊旭, 王志杰, 李建辰, 等. 一种基于模拟退火-改进二进制粒子群算法的测试优化选择方法[J]. 水下无