

某有源靶弹微波源程序指向系统的设计与实现

马洪霞, 梁彦

(中国人民解放军 92941 部队 42 分队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 针对有源靶弹供靶过程中因靶弹微波源对被试舰艇照射不稳定而导致供靶失败的问题, 提出了基于原有靶弹安控系统的微波源程序指向系统一体化设计方案; 根据不同频率、不同波束宽度靶弹微波源在不同供靶方案情况下的精准指向需求, 论证了微波源程序指向系统的技术要求, 建立了程序指向角计算模型, 设计了程序指向系统雷达模式、自动控制模式和程序指向模式等三种自动切换的工作模式, 编制了嵌入式软件模块, 研制了掠海有源靶弹微波源程序指向系统; 微波源程序指向系统配装不同型号靶弹实际应用表明, 该系统具有结构简单、功能完备、工作可靠、指向精度高、通用性好等特点, 大大提高了掠海有源靶弹的供靶成功率。

关键词: 有源靶弹; 微波源; 程序指向; 供靶成功率

Design and Implementation of Microwave Source Programmed Pointing System in Sea-skimming Active Target Missile

Ma Hongxia, Liang Yan

(CPLA 92941 Unit 42 Element, Huludao 125001, China)

Abstract: According to the precision pointing requirements of different microwave sources with different frequency and beam width under different target schemes, the technical requirements of the microwave sources programmed pointing system were demonstrated. A calculation model of programmed pointing angle was set up, and three kinds of automatic switching modes, such as radar mode, automatic control mode and pointing program mode, were designed for the programmed pointing system. An embedded software module was compiled. Microwave source programmed pointing system of sea skimming active target missile was developed, and the situation of different types of target missile and actual target missile flight of the microwave source programmed pointing system were described. The results of practical application indicated that the system possessed characteristics of structure simplify, complete function, high pointing precision, high reliability and high scalability, and it can effectively improve the success rate of sea skimming active target missile supplying.

Keywords: active target missile; microwave source; programmed pointing system; success rate of target supplying

0 引言

掠海有源靶弹主要是模拟敌配装末制导雷达的反舰导弹跟踪攻击被试舰艇, 以考核装配微波被动导引头的舰空导弹反导能力的空中靶标, 其要求靶弹的微波辐射源稳定照射被试舰艇。当前使用的有源靶弹主要采用装备时间较长的反舰导弹改装, 靶弹微波辐射源对被试舰艇的照射则利用原型弹的导引头自动扑捉跟踪被试舰艇。由于靶弹原型导弹引头存在超出使用寿命、灵敏度较低等原因, 而造成导引头扑捉跟踪被试舰艇不稳定、旁瓣扑捉、错扑其它目标等问题, 从而, 大大降低了供靶成功率。因此, 为解决装备试验的急需, 提高供靶成功率, 研制了在原掠海有源靶末制导雷达基础上的微波源程序指向系统。

收稿日期: 2018-02-28; 修回日期: 2018-04-09。

作者简介: 马洪霞(1970-), 女, 山东无棣人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事导弹武器装备试验鉴定方向的研究。

1 系统技术要求

通过有源靶弹的对目标舰的照射需求和不同供靶航路、靶弹原末制导雷达的关系, 综合论证了微波源程序指向系统的主要功能、改装要求、主要技术指标等技术要求。

1.1 功能要求

掠海有源靶弹微波源程序指向系统的主要功能是, 当靶弹原末制导雷达工作异常时, 控制原型弹末制导雷达主波束稳定的对准被试舰艇, 具体功能为:

- 1) 辅助跟踪功能。当末制导雷达不能稳定扑捉跟踪被试舰艇时, 系统能够根据不同的供靶方案, 自动对准或程序指向, 控制末制导雷达主波束准确对准被试舰艇;
- 2) 自动切换功能。系统能够实时监测末制导雷达的工作状态, 当工作异常时, 自动切换到程序指向的辅助跟踪状态;
- 3) 射前装订功能。系统能够根据要求, 通过射前装订

方式，设置工作状态。

4) 状态监视功能。系统能够实时记录、自动判断，并下传末制导雷达的工作状态及其主波束指向等到安控地面站并显示。

1.2 改装要求

由于该系统是在改装成熟的原有源靶弹基础上，为解决试验急需而进行的，因此，改装具体要求为：

- 1) 改动内容尽可能少，应满足靶弹现有空间、供电等要求；
- 2) 增加该系统后，不能影响原型靶弹的性能、指标；
- 3) 系统应尽可能简化设计，提高系统的工作可靠性。

1.3 主要技术指标

经过论证，系统的主要技术指标：

- 指向精度： $< 3^\circ (1\sigma)$ ；
- 指向计算时间： $< 2 \text{ ms}$ ；
- 指向计算周期： $< 100 \text{ ms}$ ；
- 指向延迟：雷达开机 3.2 s 识别雷达状态，若状态异常，0.3 s 后自动切换程序指向状态；
- 有效时间： $\geq 30 \text{ s}$ 。

2 设计方案

2.1 设计思路

针对有源靶弹供靶保障中存在的问题和系统研制的技术要求，确定了将弹上安控系统与微波源程序指向系统进行一体化设计，并对地面站软件进行适应性改进的研制思路。靶弹安控系统主要包括弹上安控系统，安控地面站组成，程序指向系统就是在原有弹上安控系统上进行硬件扩容，软件升级。同时，对安控地面站的指令和指示传输显示通道扩充，该部分只涉及软件升级工作。

- 1) 立足现有安控器及主被动地面站体系，遵循向下兼容，进行无缝升级；
- 2) 拓展安控器功能，挖掘已有硬件资源潜力，满足微波源程序指向功能需求；
- 3) 维持安控系统定型模式，增加控制微波源控制接口，维持原有数据传输设备，确保系统可靠性；
- 4) 沿用原有主被动地面站体制，通过扩展输入输出开关量通道及升级软件，完成程序指向功能扩展；
- 5) 共用靶载安控器计算机，实现供靶飞行中指向信息实时解算，控制微波源完成指向功能。

2.2 系统硬件设计

系统是在原靶弹安控系统基础上进行一体化设计，对靶弹弹上安控系统硬件 D/A 接口扩充，在原安控器基础上，扩展 4 路输出，用于程序指向电压、程序指向标志电压控制；利用原指令输出扩展微波辅助控制指令，控制微波辅助继电器，实现对辐射方向的控制，见图 1 虚线部分。

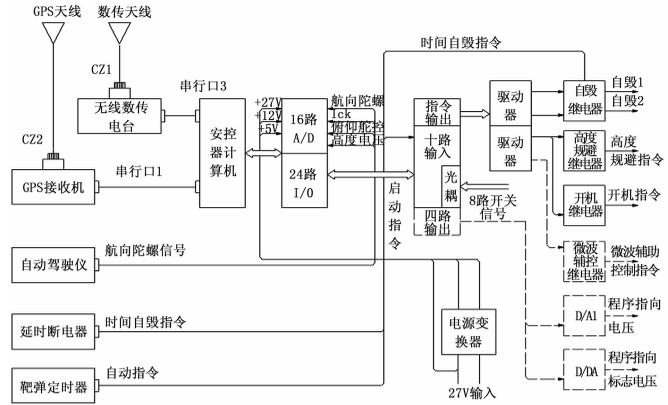


图 1 系统一体化设计框图

2.3 程序指向角计算模型

对于靶弹雷达机械轴与弹轴有一个固定夹角为 α ，靶弹与目标构成的视线角记为 $\beta^{[1]}$ 。以靶弹发射点 O 为原点，以理论射向为 x 轴，按右手定则水平方向垂直 x 轴为 z 轴建立发射坐标系， t 时刻靶弹位置为 $B(x_1, z_1)$ ，被试舰位置为 $A(x_2, z_2)$ ，如图 2 所示，直线 OB 与直线 BA 夹角即为靶弹与目标构成的视线角 $\beta^{[2]}$ ，计算公式为：

$$\text{tg}\beta = \frac{k_2 - k_1}{1 + k_1 \cdot k_2} \quad (1)$$

式中， k_1 为直线 OB 斜率， k_2 为直线 BA 斜率。

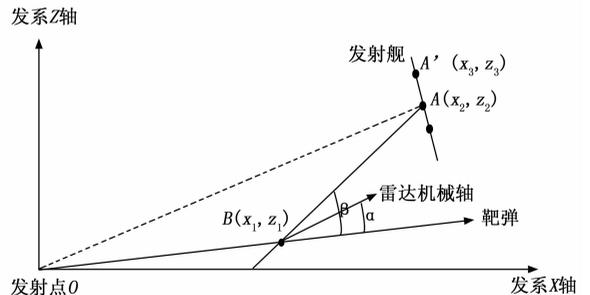


图 2 发射坐标系靶弹、被试舰与雷达视线关系

靶弹位置 $B(x_1, z_1)$ 来自靶弹安控 GPS 数据，发射舰位置 $A(x_2, z_2)$ 根据协同程序推算，B 点、A 点坐标均为大地坐标（B 纬度，L 经度，H 高度），实际使用时先把大地坐标转换为地心直角坐标 (x, y, z) 再将地心直角坐标 (x, y, z) 转换为靶弹发射坐标系^[3]。

转换矩阵为：

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\alpha_F \sin L_0 - \sin\alpha_F \cos L_0 - \cos\alpha_F \cos B_0 \\ \cos\alpha_F \cos L_0 \sin B_0 & \cos\alpha_F \sin B_0 \sin L_0 & \cos\alpha_F \cos B_0 \\ \cos B_0 \cos L_0 & \sin L_0 \cos B_0 & \sin B_0 \\ -\cos\alpha_F \sin L_0 + \cos\alpha_F \cos L_0 + \sin\alpha_F \cos B_0 \\ \cos L_0 \sin B_0 \sin\alpha_F & \sin\alpha_F \sin B_0 \sin L_0 & -\sin\alpha_F \cos B_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, α_F 为靶弹射向, 靶弹在发射坐标系坐标为:

$$\begin{bmatrix} X_F \\ Y_F \\ Z_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_e - X_{F0} \\ Y_e - Y_{F0} \\ Z_e - Z_{F0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

被试舰位置使用理论航路进行推算, 首先将靶弹发射时被试舰的位置 (大地坐标, 高度用 0) 计算出在靶弹发射坐标系的位置, 在 XOZ 平面上根据被试舰的航向和航速, 确定一条射线, 根据靶弹飞行时间来确定其位置^[4]。

设靶弹发射时刻为 T_0 , T_0 时刻被试舰在 XOZ 平面上的位置是 X_{S0} 、 Z_{S0} , 航向为 ψ (单位为°, 真北方位角), 航速为 V_S (单位是 m/s), 则其航路可用直线方程来表示。

$$X_{ST} = X_{S0} + V_S T \sin(\alpha_F - \psi) \quad (4)$$

$$Z_{ST} = Z_{S0} + V_S T \cos(\alpha_F - \psi) \quad (5)$$

靶弹的发射系坐标已知, 被试舰的发射系坐标已知, 天线机械偏角已知, 即可根据反正切函数计算角度。

2.4 程序指向系统的工作模式设计

2.4.1 程序指向系统工作模式

程序指向系统设计了三种工作模式, 各工作模式间可以相互切换, 使系统工作灵活。

1) 工作模式 1: 雷达模式。

该模式为原型弹末制导雷达的工作模式, 其能较为真实地模拟弹载和机载雷达对目标搜索、捕捉、跟踪的全过程, 不依赖外部提供靶标位置和姿态信息, 独立性强, 天线对准精度高^[5]。

2) 工作模式 2: 自动控制模式。

该模式是靶弹末制导雷达工作异常时的主要工作模式, 其实时解算靶载微波源天线轴线与目标之间的夹角^[6], 与天线当前角度相比较形成解算方位误差信号代替来自信号接收及处理系统真实角误差信号, 驱动天线对准预定目标的工作模式。该模式简化了原配末制导雷达功能, 辐射微波源只需要微波发射组合、天线伺服机构等少数部件正常工作即可实现定向辐射, 对原末制导雷达的要求降低, 可靠性提高。

3) 工作模式 3: 程序指向模式。

该模式为工作模式 2 的备用模式, 其利用射前装定的理论弹道数据代替靶标的位置及运动信息进行指向角解算^[7], 驱动天线定向辐射的工作模式。该模式同样简化了原配末制导雷达功能, 对雷达要求降低。

2.4.2 程序指向系统三种工作模式的切换

靶弹发射后, 靶载微波源首先进入雷达模式对目标进行搜索与跟踪以实现定向辐射; 当雷达不能正常捕获目标时, 利用靶标位置及姿态等信息自动解算天线指向角转入自动控制模式; 当靶标位置等数据无效时 (如出现惯导故障、GPS 失捕或信号传输故障等情况), 则自动进入天线程序控制模式, 引入理论弹道数据控制天线按程序转动照射预定目标。

2.5 程序指向系统接入末制导雷达控制回路设计

雷达方位控制电压和程序指向电压切换电路如图 3 所示。弹上安控 PC-104 计算机发出辅控指令, 继电器 J1 吸合, 常开点接到运算放大器输出端, 计算机依据靶弹当前位置和拦截舰位置计算出程序指向角, 通过 D/A 通道输出到运算放大器输入端, 这时雷达电轴在程序指向电压作用下指向拦截舰; 同时计算机发出辅控标志置位指令, 继电器 J2 吸合, 输出 +27 V 控制电压到雷达伺服机构使雷达天线接入程序指向回路。

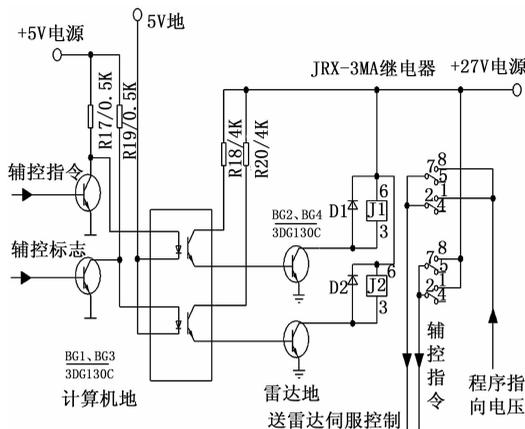


图 3 雷达方位控制电压和程序指向电压切换电路

2.6 程序设计

系统软件在安控系统数据获取、自主式安控解算、被动式安控接收、指令控制和辅助测试等软件的基础上, 增加程序指向模块, 作为一个软件模块嵌入到原安控程序, 软件组成见图 4。该模块利用 GPS 实时获取靶弹飞行数据及发射点、拦截舰位置信息, 通过 PC-104 计算机运行程序指向模块, 解算结果由 D/A 扩展模块输出给微波源控制组合, 控制辐射天线指向目标舰艇。

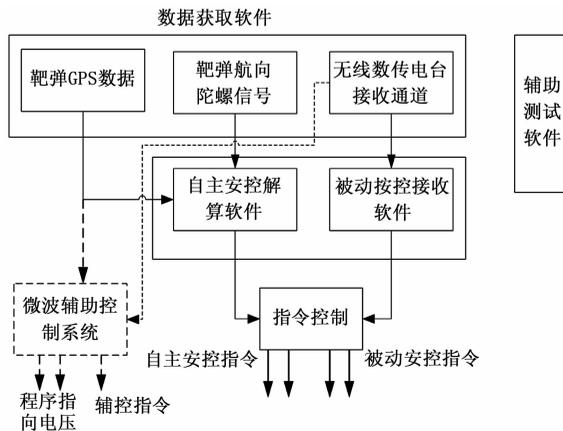


图 4 软件组成框图

程序指向模块与安控程序共享 CPU 等硬件资源, 在软件初始化阶段读入程序指向配置文件, 在执行原安控指令后, 如果不需要执行程序指向, 则安控程序执行原上传信

息编码模块；如果满足程序执行发出条件，或接受到被动“辅控指令”，则执行程序指向模块。程序指向模块先计算程序指向角，变换成控制电压数据写入 D/A，再发出“辅控指令”、“辅控标志”指令^[8]，然后执行下传信息编码模块，软件流程图见图 5。

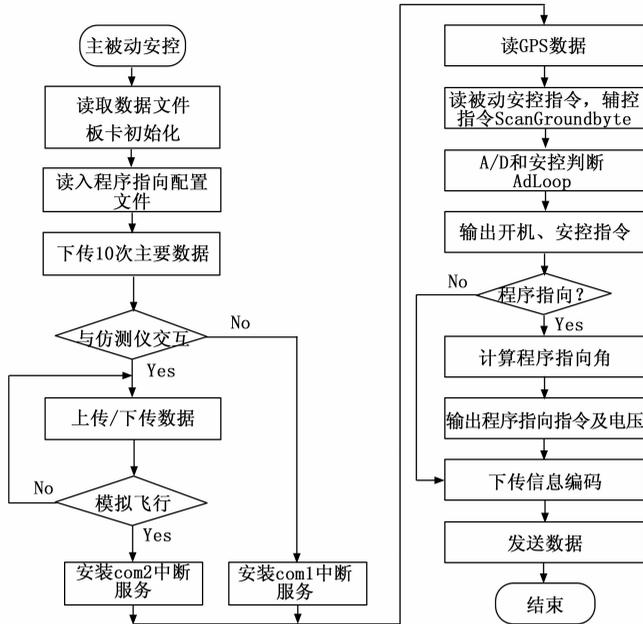


图 5 系统软件流程图

程序指向模块中计算程序指向角的原始数据为靶弹 GPS 经纬度、拦截舰坐标等都是离散数据，使得输出指向角也是每 2 ms 更新一次的离散数字量，经 D/A 模块转换形成微波源指向模拟量是不平滑的模拟电压，从而引起微波源伺服系统工作不平稳，为了平稳控制微波源，须对指向角进行数字滤波处理，而安控器 PC104 计算机中无硬件滤波通道，因此，设计了软件数字滤波模块完成指向角滤波功能。

程序指向模块仍然借助 PC-104 开发工具，采用 Visual C++ 语言编写运算与控制软件，编写调试完成后，首先由模拟数据输入模型，测试模型输出数字量，数字量经硬件输出后，仪器监测输出模拟量，由数据分析软件分析数据正确性；实验室单机调试阶段，主要进行改进后电路板与接口配置正确性检查和通路检查，以及一体化安控系统软件运行后输出测试，软件正确性验证；与靶弹对接调试阶段，主要进行接口对接，检查改进正确性；仿真验证阶段，依据以往实际海上飞行数据，输入真实的靶弹 GPS、拦截舰、发射点信息，验证指向角输出正确性和指向精度。

主被动安控地面站软件升级包括控制板软件升级和地面站显控软件的升级改造。控制板软件升级保持原有布局，将备用“被动自毁”指令及按钮更改为“程序指向”指令及按钮，将航控电压显示时间由 150 s 压缩到 90 s 以便观

察；地面站显控软件的升级为了监控程序指向系统辅控效果，而增加地面站监控功能，其需增加上传数据容量，方法是在安控器系统下传数据包由一帧 64 字节调整为 72 字节，新增数据置于数据包最后，维持以往数据定义，不影响数据接收提取，仅微调接收数据包数量。

3 工程应用

3.1 装配靶弹情况

该系统具有结构简单、功能完备、工作可靠、指向精度高、通用性好等特点，已成功装配于 2 个系列多型有源靶弹，解决了不同靶弹的不同型号、不同频率、不同波束宽度微波源在不同供靶方案情况下的精准指向问题，实现了不同型号靶弹微波源程序指向系统的通用。

3.2 供靶试验情况

该系统已 7 次成功应用于靶场试验供靶任务，其中，4 次为雷达模式供靶，3 次为自动模式供靶。在这 3 次自动模式供靶中，2 次为末制雷达副瓣扑捉、1 次为错误扑捉其它目标的异常情况，系统均能够准确判断雷达情况，自动切换到自动控制模式，避免了 3 枚靶弹的无效供靶。

3.3 供靶精度分析

某次供靶任务中，系统首先进入雷达模式，但雷达模式出现副瓣扑捉照射现象，系统判断后，利用靶标位置及姿态等信息自动解算天线指向角转入自动控制模式，程序指向角与靶弹雷达航控电压比对见图 6。

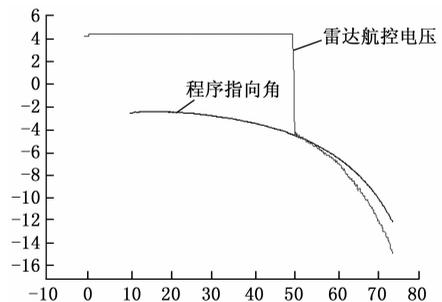


图 6 程序指向角与靶弹雷达航控电压对比图

可见前 10 s，二者最大差值为 0.44 V，换算成角度大约 0.25°；10~15 s 间，最大差值为 2.88 V，换算成角度大约 1.7°；15~30 s 间，近似 2°^[9]；由于开环控制，雷达伺服控制误差近似为 1°^[10]。

经分析，微波辅助控制产生的综合误差主要来源于算法误差 σ_1 ，靶弹 GPS 定位误差 σ_2 、拦截舰舰位误差 σ_3 ，靶弹雷达固定偏角误差 σ_4 、靶弹雷达伺服非线性误差 σ_5 及靶弹雷达伺服控制误差 σ_6 ，则综合误差 $\sigma^{[11]}$ 可用下式表示：

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2 + \sigma_6^2} \quad (6)$$

经计算得，程序指向综合误差 σ 为： $\sigma < 2.3^\circ$ 。

因此，程序指向方法产生的综合误差小于指标 3°，满足供靶要求。

4 结束语

本文介绍了基于有源靶弹安控系统的微波源程序指向系统的一体化设计方案, 论证了微波源程序指向系统的技术要求, 建立了程序指向角计算模型, 设计了程序指向系统的雷达模式、自动控制模式和程序指向模式等三种能够自动切换的工作模式, 研制了掠海有源靶弹微波源程序指向系统, 阐述了微波源程序指向系统的装配靶弹情况和实际供靶飞行情况。掠海有源靶弹微波源程序指向系统的研制成功, 解决了有源靶弹供靶过程中存在的微波源对拦截舰艇照射不稳定, 而导致供靶失败的问题, 本文对其它型号有源靶弹的研制也具有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 唐国富, 邵宗舜. 飞航导弹雷达导引头 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1991.
- [2] 卢毅, 姜永华, 瞿龙军. 末制导雷达一次捕捉最小角度搜索范围模型 [J]. 宇航学报, 2011 (3): 599-602.

(上接第 107 页)

通过本文设计的控制器示教功能和在线编程功能实现了点 P_0 到 P_1 的直线插补, 点 P_1 , P_2 和 P_3 的圆弧插补, 从图 12、13 可以看出 P_0 到 P_1 点保持严格的直线运行, P_1 、 P_2 、 P_3 点间的轨迹平滑, 足以说明该控制器具有很好的示教、在线编程功能以及运行稳定性; 通过表 3 可以看出, 运行点 P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 与其示教点误差分别为 0.1312 mm、0.0947 mm、0.1466 mm、0.1341 mm, 完全满足工业生产中的加工精度要求, 可见该控制器对 ER50 机器人的正逆运动学模型建立准确。

该机器人控制器功能众多, 本文仅对直线、圆弧插补功能进行测试, 从测试过程可以看出, 本文设计的这款基于 CoDeSys 软件平台的运动控制器运行稳定、控制精度高, 同时具备了丰富的使用功能和人机交互界面, 满足大多数机器人平台的运动控制要求。

5 结束语

本文研究了一种基于 ARM+CoDeSys 架构的运动控制器。以 ER50 六自由度工业机器人为控制对象, 结合 EtherCAT 通信技术和 PLCopen 规范, 研发了一款具备在线示教、在线编程、关节空间与笛卡尔空间点动以及轨迹插补规划等功能于一体的机器人运动控制器。该款控制器控制精度高, 运行稳定, 具有很好的开放性、可移植性和低成本等优势, 已在六轴工业机器人、SCARA 机器人以及三轴机器人等平台工厂化使用, 并取得了预期控制效果。

参考文献:

- [1] 张利梅. 基于单片机的伺服电机运动控制器系统软件的开发与研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2006.

- [3] 谢钢. 全球导航卫星系统原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [4] 田颖, 张弘. 航路捷径波动与雷达误差关系研究 [J]. 指挥控制与仿真, 2012 (10): 110-114.
- [5] 刘铮, 张翼, 李振, 等. 制导雷达角度测量性能影响因素分析研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2011 (10): 206-211.
- [6] 姚长虹, 尹勇, 齐建中. 基于卫星导航系统的导弹姿态测量算法研究 [J]. 航空兵器, 2017 (3): 13-19.
- [7] 陈俊吉, 黄剑伟, 许家栋, 等. 动态雷达目标电磁散射中姿态角的计算 [J]. 弹箭与制导学报, 2010 (12): 183-185.
- [8] 陈春红, 武亚平, 李军显. 雷达导引头最优控制问题研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2010 (6): 38-40.
- [9] 董大钧. 误差分析与数据处理 [M]. 北京: 清华大学出版社.
- [10] 高烽. 雷达导引头概论 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [11] 苏佳胜, 聂在平. 单脉冲寻向天线和目标的一体化仿真及测角误差分析 [J]. 电子学报, 2014 (9): 1824-1828.

- [2] Dai F, Becker O. A PLCopen-Based Approach for Utilizing Powerful Industrial Robot Functions in PLC-Controlled Applications [M]. Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems. Springer International Publishing, 2013: 547-557.
- [3] 张宏, 李富平. 基于 PC+运动控制卡的开放式数控系统的研究 [J]. 机械设计与制造, 2008, 5 (6): 171-172.
- [4] 张旭明, 周会成, 陈吉红, 等. 基于 PC 的开放式软件运动控制器的研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2006 (2): 43-46.
- [5] 任福深, 陈树君, 高胜, 等. 开放式管道插接专用焊接机器人控制系统 [J]. 焊接学报, 2012, 33 (7): 61-64.
- [6] 马琼雄, 吴向磊, 李琳, 等. 基于 IPC 的开放式工业机器人控制系统研究 [J]. 机电产品开发与创新, 2008, 21 (1): 15-17.
- [7] 胡鹏, 方康玲, 刘晓玉. 基于 PMAC 的开放式机器人控制系统 [J]. 微计算机信息, 2006, 22 (11): 171-173.
- [8] 门昌华, 关学锋, 胡明, 等. 基于 PMAC 的六自由度机器人开放式控制系统开发 [J]. 机电产品开发与创新, 2008, 21 (4): 4-5.
- [9] Sünder C, Zoitl A, Mehofer F, et al. Advanced use of PLCopen motion control library for autonomous servo drives in IEC 61499 based automation and control systems [J]. E & I Electrotechnie and Informations technie, 2006, 123 (5): 191-196.
- [10] Qin H, Xia Q G, Yu F U. PLC Programming Environment Based on IEC61131-3 Standard [J]. Computer Engineering, 2009, 35 (23): 246-248.
- [11] John J. Craig 著, 负超等译. 机器人学导论 (第 3 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.