

激光红外多功能复合模拟系统设计研究

宋国栋¹, 罗亚烽², 任延群³

(1. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044;

2. 火箭军 驻燕山电子设备厂军代室, 北京 100076;

3. 中国北方工业有限公司, 北京 100053)

摘要: 红外制导具有被动成像隐蔽性好、精度高等优点, 但是红外制导极易受到激光干扰; 另外, 由于红外制导不能携带距离等信息, 而激光制导正好弥补了这一缺点, 因此激光红外复合制导以及相互干扰技术是目前国内外研究重点; 在对相关制导、干扰技术进行研究时需进行不同环境下的不同实验, 若在现场进行多种实验, 造价高且消耗人力物力时间较多, 因此可设计一个多功能模拟仿真系统进行不同环境下的多种模拟实验; 模拟系统应用了仿真理论、仿真技术、PID控制、图像处理、运动控制等多种技术和控制方法; 模拟系统中红外热源温度控制误差为, 转台可在转动范围且角分辨率优于 $20''$, 图像采集系统采集图像大小为 253×318 且连续采集速率为50帧/s; 模拟系统可对红外制导、激光制导、激光干扰红外制导等多种制导及相互干扰技术进行仿真实验。

关键词: 制导; 干扰; 模拟系统; 激光红外

Design and Research of Laser and Infrared Multifunctional Composite Simulation System

Song Guodong¹, Luo Yafeng², Ren Yanqun³

(1. School of Mechanical and Electronic Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Aerospace System Engineering Institute, Beijing 100076, China;

3. China North Industries Corp, Beijing 100053, China)

Abstract: Infrared guidance has the advantages of passive imaging concealment and high precision, but the infrared guidance is easily interfered by laser. In addition, infrared guidance can not carry information such as distance, while laser guidance just makes up for this shortcoming, so the laser infrared composite guidance technology and mutual interference technology is the focus of research at home and abroad. Different experiments in different environments are required in the study of correlation guidance and interference technology. If a variety of experiments are carried out in the field, it will cost a lot of money and consume a lot of manpower, material and time. Therefore, a multi-function simulation system can be designed to carry out a variety of simulation experiments in different environments. The simulation system applies simulation theory, simulation technology, PID control, image processing, motion control and other technologies and control methods. Simulation system of infrared heat source temperature control error is plus or minus $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, rotary table can rotate within $\pm 10^{\circ}$ or $\pm 20^{\circ}$ and its angular resolution is better than that of $20''$, the image size of collecting is 253×318 and continuous acquisition rate is 50fps/s. The simulation system can simulate the infrared guidance, laser guidance, laser interference infrared guidance and other kinds of guidance and mutual interference technology.

Keywords: guidance; interference; simulation system; laser and infrared

0 引言

目前, 各个国家都在大力研究精确制导技术。目前制导主要有雷达制导、激光制导、红外制导、惯性制导等制导模式。其中应用最为广泛的是红外制导和激光制导。红外制导具有被动性制动隐蔽性能良好等优点, 但是极易受到激光等光学手段的干扰和欺骗。激光制导能够携带距离等信息, 但是体积较大, 因此必须发展复合制导武器来提升制导性能^[1-3]。因此, 建立一个多功能模拟系统对真实环境下的多种制导模式及干扰模式进行仿真模拟尤为重要。

半实物仿真具有成本较低, 方便快捷的特点, 半实物仿真系统大大提升了制导武器的发展^[4]。

1 系统整体设计

在实际制导环节中主要涉及敌方目标、制导系统、制导方式三大环节^[5]。其中制导系统一般位于导弹的导引头中, 模拟系统模拟其制导环节主要如图1所示。信息处理机主要进行系统控制和数据处理。采集系统主要负责采集导引头相关制导信息, 采集后上传信息处理机, 信息处理机处理相关信息后对控制系统发出相应控制指令。

多功能模拟系统整体需实现对试验过程中点目标模拟系统的运动、黑体温度、数据采集等进行控制并实现对试验状态、试验图像数据的采集存储, 完成对试验图像数据

收稿日期: 2019-03-04; 修回日期: 2019-03-28。

作者简介: 宋国栋(1994-), 男, 内蒙古人, 硕士研究生, 主要从事机电控制方向的研究。

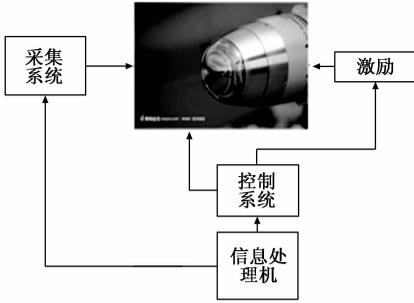


图 1 制导模拟系统图

特征的统计。

本模拟系统导引头采用模拟系统以降低成本缩短开发周期，导引头主要实现二维运动和图像采集两大功能，可采用二维转台搭载红外相机实现^[6]。控制系统由温度控制、运动控制、串口控制、红外相机控制等组成。其中、温度控制主要为黑体温度控制，采用不同温度黑体模拟不同敌方红外目标^[7]。运动控制主要控制导引头二维运动和红外目标一维运动。串口控制主要实现激光控制、快门控制等。控制部分互相协同工作完成对系统的整体控制。

其中一次完整模拟涉及红外导引头，红外目标，采集系统等多个系统，上位机通过控制软件统一进行指令发送以实现系统动作。以激光干扰红外制导为例，软件首先控制导引头进行目标搜寻，搜寻完毕在进行激光干扰，与此同时软件控制采集系统对复合图像进行采集处理，各系统间协调运行完成整个模拟实验。

2 控制系统搭建

2.1 运动控制设计

运动控制主要模拟导引头二维运动和红外热源一维运动。控制系统主要由运动板卡、外接拓展卡、驱动卡、电机构成^[8]。控制系统图如下图 2 所示。工控机内嵌运动控制板卡，运动板卡外接拓展卡连接驱动器对电机进行控制。工控机采用研华 IPC-610L 型高性能大内存工控机，为快速大量处理数据提供硬件基础。运动控制卡采用 DMC1380 高性能运动控制卡，提供多种运动模式，便于二次开发。电机驱动器采用雷塞驱动器驱动电机。一维转台采用 MRS103 型精密电控旋转台，配合点目标模拟系统，完成点目标模拟系统的水平±10°扫描。一维倾斜台选用上述一维倾斜台。一维转台采用 MGC102C 型精密电控倾斜台。

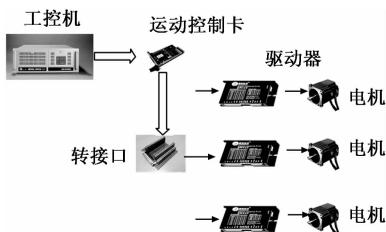


图 2 运动控制系统图

为方便模拟多种运动模式，控制系统研制了多种运动

方式，包括回零运动、快捷运动、往复运动、插补运动、自定义运动。其中，回零运动根据限位开关提供的电平信号变化进行限位控制。快捷运动提供了两种快速和慢速的快捷直线运动。往复运动主要为围绕一点进行往复运动。自定义运动可根据软件弹出框设置运动速度、运动距离进行自定义运动。

2.2 温度控制设计

温度控制主要对黑体进行控制温度控制以实现模拟不同温度的黑体目标。

黑体具有温度变化较快，廉价，控制方便等优点，本系统中黑体选取加热板为 XH-RJ505020 型号，50 × 50 mm 长宽比，2 mm 厚度的高温陶瓷晶体。该陶瓷晶片阻值为：12 Ω。最大辐射温度可达 300 ℃，均匀性优于 90%。电压最高值为 36 V，系统可达到的最高温度为 280 ℃，本系统黑体温度上限值：100 ℃。

黑体控制采用闭环控制系统^[9]。系统控制图如下图 3 所示。上位机接受温度变送器回采的温度数据，软件中根据当前温度值和目标温度值根据 PID 算法不断调节输出电压值进而改变黑体温度值。



图 3 温度控制系统

温度控制主要采用 PID 算法控制，电压值和温度值采用分段拟合技术实现精确的温度控制。由于黑体温度控制系统没有精确的传递函数因此很难建立精确地温度控制模型求解 PID 控制方法中的 K_p , K_i , K_d 三个参数，因此温度控制系统中参数整定采用经验整定法实现，通过大量实验数据获取 K_p , K_i , K_d 三个参数，最终系统 3 个参数大小为 $K_p=1.5$, $K_i=0.28$, $K_d=0$ ，调节时间 1 000 ms。

为提高温度控制精度，系统通过采集大量温度控制数据对电压值 U_{base} 和温度值进行了线性拟合，拟合关系如下所示。

$$U_{base} = \begin{cases} \frac{targetmp}{7.5} & (0 \leq targetmp < 30) \\ \frac{targetmp}{5.6} & (30 \leq targetmp < 35) \\ \frac{targetmp}{5.5} & (35 \leq targetmp < 40) \\ \frac{targetmp}{4.55} & (40 \leq targetmp < 44) \\ \frac{targetmp}{4.5} & (44 \leq targetmp < 48) \\ \frac{targetmp}{4.2} & (48 \leq targetmp < 55) \\ \frac{targetmp}{4.1} & (55 \leq targetmp < 60) \end{cases}$$

$$U_{base} = \begin{cases} \frac{targettmp}{4.15} & (60 \leq targettmp < 65) \\ \frac{targettmp}{3.9} & (65 \leq targettmp < 70) \\ \frac{targettmp}{3.8} & (65 \leq targettmp < 70) \end{cases} \quad (1)$$

在此基础上引入 pid 进行调节。一次完整调节过程如下所示: 上位机获取调节温度目标值, 与当前温度做差, 得到一个差值, 将差值传入 pid 算法中, pid 算法通过目标温度大小选取输出电压基值 (U_{base}) 并结合 pid 算法得到一个输出电压值, 当电压值超过 20 V, 使用 20 V 调节, 当电压值为 0 V 时, 使用 0 V 调节, 并驱动程控电源调节电压大小, 该调节过程在开辟的线程中不断循环, 直到温度到达误差范围允许的精度, 一次调节完成。另外, 为保证温度调节的稳定性, 在达到精度后, 调节并不退出线程, 在线程内一直维持调节以保证温度的稳定性。

一次实验数据如下表 1 所示, 该实验完成了从室温到 75 °C 再从 75 °C 调节到室温的完整过程。从下表中可以看出温度控制最大误差为 0.33 °C, 满足满量程的 2% 的精度要求。

表 1 一次升温降温实验数据记录

升温理论幅度	实际温度	降温理论幅度	实际温度
30	30.28	30	30.33
33	33.06	33	33.22
35	34.97	35	35.18
38	37.81	38	37.95
40	40.24	40	40.23
42	42.12	42	42.11
45	45.05	45	45.31
48	48.21	48	48.17
50	50.18	50	50.04
52	52.08	52	52.12
55	55.05	55	55.24
58	57.94	58	58.23
60	59.79	60	60.31
62	61.74	62	61.93
65	64.79	65	65.31
68	67.93	68	68.17
70	70.00	70	70.23
72	72.01	72	72.12
75	74.94	75	74.94

2.3 串口控制

模拟系统中对激光、快门、程控电源、热像仪相机的控制都通过串口实现, 通过串口按照协议发送串口数据对相应硬件设备进行控制。

激光控制主要实现电流、温度控制、查询等功能, 便

于模拟系统中不同强度的激光。

快门控制主要用于控制激光的通断。

热像仪相机主要用于控制相机、调节相机性能。

2.4 图像采集处理系统

图像采集处理是系统核心关键。图像采集主要由工控机、图像采集板卡、红外相机构成采集处理系统如图 4 所示。上位机发送采集指令采集板卡控制相机进行图像采集。

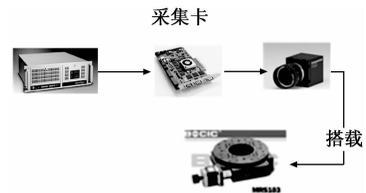


图 4 图像采集系统

受限于红外相机与板卡之间的相互配合约束, 图像采集大小为 $1 \times 81\ 920$, 由于系统需要对目标图像进行显示, 因此需要对图像像素进行转化, 采用 Opencv 库函数对原来像素点进行遍历访问并重新定义为大小为 $253 \times 318 = 80\ 454$ 的图像^[10]。一次转化效果如图 5 所示。图像的动态显示采用 opencv 的 CvvImage 类进行显示, 在 MFC 中 picture control 中动态的刷新图片, 达到图片的动态显示已实现目标的动态跟踪。

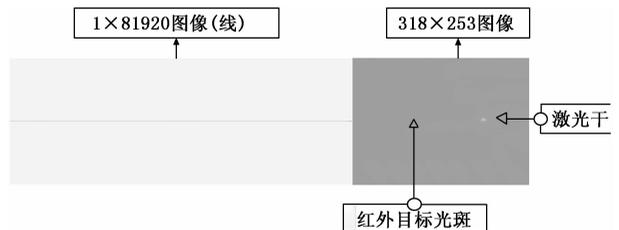


图 5 图像像素转化结果对比图

3 系统软件设计

3.1 软件模块

配合硬件系统, 需要有软件系统配合工作, 软件主要负责对硬件的模块控制和数据处理。软件主要分为初始化、6 个功能模块、自动动作模块等三大部分。软件功能模块如图 6 所示。软件启动时完成磁盘管理等相关初始化, 进入软件点击初始化主要完成对板卡的初始化和变量的初始化。

3.2 软件设计

软件设计采用模块化思想进行设计, 不同模块之间耦合性保证最小。软件主要分为三层, 分别为界面、驱动层、控制层。其中, 界面主要以模块分块设计、自动测试、软件初始化退出三部分, 模块分块设计主要针对不同硬件进行设计, 自动测试部分在软件界面进行文本选择并启动测试, 软件初始化退出功能主要设计部分硬件初始化、变量初始化、磁盘检测、软件退出等。驱动层主要负责界面与

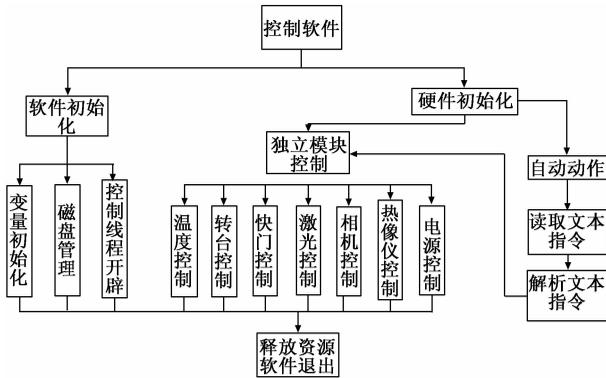


图 6 测试软件结构组成

底层进行数据交换以提高软件执行效率，降低数据传输错误，界面卡死等情况。控制层也是最底层，负责对各硬件的控制，控制层主要通过二次开发使得原有硬件功能更加丰富、友好性更高，接口更为简单。控制层主要实现温度控制、激光控制、红外控制、快门控制、运动控制、红外相机控制、电源控制、图像算法处理模块。

运动控制主要对既有 API 函数进行二次封装，运动控制模块以一个类单独实现，类中对不同运动方式、开始、停止、采集运动位置等功能进行了不同函数的改写。

温度控制采用串口控制显示，软件在完成初始化后自动开辟线程，在线程中软件不断获取黑体温度数据，调节温度函数设置两个接口，软件通过现有温度和当前温度在线程中通过调节温度函数不断进行动态调节，直到温度与目标温度差值小于误差范围内。

激光、快门、红外热像仪、电源均通过串口控制实现，软件对应不同功能编写不同功能函数，基本流程为根据相应功能组帧、发送、解帧、执行等步骤。

初始化完成后软件动态显示当前黑体温度，用户可通过点击各个模块功能按钮实现相应功能。软件采用 C++ (MFC) 编程，图像处理采用 Opencv 库函数进行研究处理。软件如图 7 所示。



图 7 软件界面

其中，转台模块主要实现对转台的控制，主要实现了直线运动、往复运动、回零运动等多种运动模式。热像仪模块完成图像实时显示和实时处理以及对热像仪红外相机

的控制。其它模块主要负责激光和黑体温度控制等。另外，软件还设计了按照文本运动功能，该功能可以实现按照用户写入指令系统自动运动的功能，用户按照指令标识字段在 txt 文件中按照顺序写入指令，软件将按照指令顺序对系统进行控制。

4 激光干扰红外制导模拟仿真研究

红外图像制导具有被动制导隐蔽性好的优点但是极易受到激光干扰^[11-12]。本次实验采用该系统对红外制导激光干扰进行仿真模拟。

仿真主要分为系统启动、搜寻、采集、处理、分析等环节，具体仿真步骤如下所示。

1) 系统启动，配置实验环境。系统启动后，启动软件，通过软件将红外热源温度设置为 35，打开红外转台系统开关，检查系统磁盘避免大量图像数据存储导致磁盘溢出损失图像数据。

2) 两轴导引头联动搜寻红外目标。待红外热源温度稳定到 35，使用系统软件控制导引头在两个方向下进行低速缓慢搜寻，直到红外目标出现在视场中，此时立即停止搜寻，使用系统回零功能将红外热源置于视场中央。

3) 采集红外图像。回零后打开红外热源一维运动台，使得红外目标在 1°范围内进行循环往复运动，采集图像采集系统对红外图像进行连续采集并保存。

4) 红外图像分析。搜寻目标如图 8 所示，从图中可知，在红外源温度较低时，红外目标在视场成像较弱，此时若有其它强光进行干扰，由于软硬件的识别能力将会出现对敌方目标识别偏差的情况。



图 8 红外目标捕获图像

采用 MATLAB 对红外目标图像亮度分布进行分析。分别对其图像亮度三维图和峰值坐标图进行了分析计算显示^[13-14]，显示结果如图 9 和图 10 所示。由图像可知，红外成像后在局部光强将变得很大，该区域经过处理识别质心后即可作为精确打击目标。

5) 激光进行干扰。一段时间后，打开激光并调节相应亮度，最后打开快门，此时在强烈的激光照射下，模拟导引头视场将出现两个光斑，系统依旧对图像数据进行采集保存。

6) 干扰图像分析：干扰后图像有明显的两个光斑，在激光干扰下，制导算法精度将急剧下降，其中一副干扰图像如图 11 所示。

对该图像亮度进行分析计算获得其光强度三维分布图

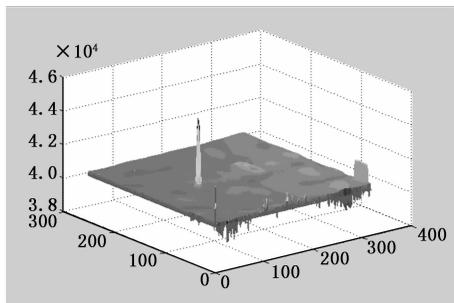


图 9 光强三维图

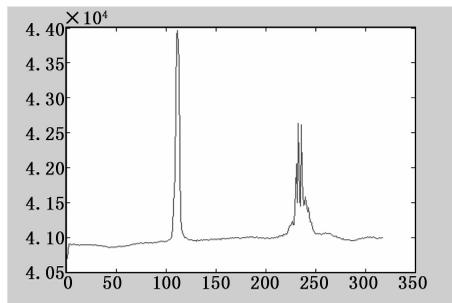


图 13 光强坐标显示图

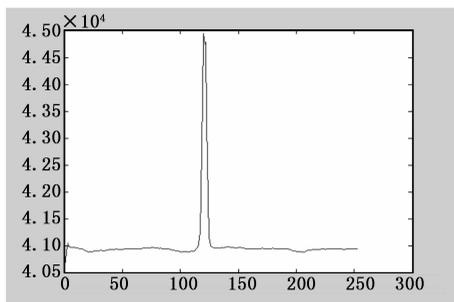


图 10 光强坐标显示图



图 11 干扰图像捕获图像

和坐标如图 12 和图 13 所示。可以看出此时光强分布不集中, 软件算法将会出现偏差, 导致导引头制导准确率大大下降。

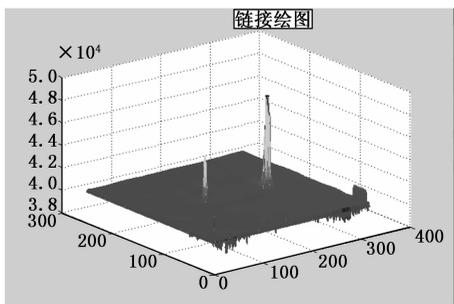


图 12 光强三维图

该仿真实验表明强烈激光照射到红外相机后, 由于激光大量占据相机饱和元, 使得算法无法准确定位激光光斑和红外光斑进而导致红外制导效率急剧下降。

5 结束语

本文研究设计了可用于研究激光和红外干扰技术及复合制导等多项制导技术的仿真系统, 该系统组成包含导引

头模拟系统、红外点源模拟系统、控制系统、信息处理机。几大模块互相配合工作, 完成模拟实验。该系统大大降低了现场做试验的成本, 可以多次模拟多种类型制导相关实验。

参考文献:

- [1] Yin X C, Fu Y H. Optical design of common aperture IR/ladar dual-mode imaging seeker [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44 (2): 428-431. (in Chinese).
- [2] Chavez-Garcia R O, Aycard O. Multiple sensor fusion and classification for moving object detection and tracking [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17 (2): 525-534.
- [3] Li Y J, Zhang J J, Chang B K, et al. Remote multiband infrared image fusion system and registration method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45 (5): 0526002. (in Chinese)
- [4] Val Belair. Simulation of Infrared imaging seeking missiles [A]. Proceedings of SPIE, 2003 [C]. USA: SPIE, 2003, 4365: 46-47.
- [5] 陈 炜. 基于 ARM 平台的红外制导仿真系统 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [6] 李 奕. 气动效应及激光干扰红外导引头成像建模仿真研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [7] 扬振鹏, 冯 勤, 王行仁, 等. 虚拟环境红外物理模型研究 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14 (3): 328-329.
- [8] 谢敏燕. 红外制导测试装置的研究与精度分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [9] 许 杰, 杨林华, 李 娜. 低温黑体关键技术及国内外发展现状航天环境工程, 2011, 28 (2): 151-156.
- [10] 毛星云. OpenCV 编程入门 [Z]. 2015.
- [11] 童忠诚, 孙晓泉. 激光制导炸弹无源干扰的有效性仿真 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37 (1): 82-85.
- [12] 宋凯英, 岳 敏, 杨 军, 等. 对红外成像制导系统干扰效果的研究 [J]. 西北工业大学学报, 2000, 18 (1): 166-169.
- [13] 李 卓, 李益民. Matlab 与 VC++ 混合编程技术在图像处理中的应用研究 [J]. 电脑知识与技术, 2011 (22).
- [14] 杨入超. VC++ 与 Matlab 混合编程实现光场光强的三维显示 [J]. 电脑知识与技术, 2012, 8 (8): 1906-1908.