

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.09.008

VxWorks 平台下的火控系统设计与仿真

高金艳^{1,2}, 李冬辉¹

(1.天津大学 电气与自动化工程学院,300072 天津;2.国防科技大学 电子科学与工程学院,410073 长沙)

摘 要:为适应军事发展的要求,基于经典火控系统结构,首先设计了火控仿真系统的系统框架,建立了仿真系统的各子系统数学模型;而后基于嵌入式 VxWorks 实时操作系统,实现了各子系统功能模块及其间的通信;最后,基于所实现的火控仿真系统,在不同国产武器配置类型下,实现了空空攻击想定条件下的两组实例仿真研究。仿真结果表明:空空攻击时,若进行近距离格斗,选择霹雳-8(PL-8)较好,若是远距离格斗,则选择霹雳-12(PL-12)更适宜,更能保证攻击路线的稳定性和平滑性。

关键词: 火控仿真系统; VxWorks; 比例导引; 纯追踪; 多任务

中图分类号: V219

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)09-0042-04

Fire control system design and simulation based on VxWoks

GAO Jinyan^{1,2}, LI Donghui¹

(1.School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, 300072 Tianjin, China;

2.College of Electronic Science and Engineering, National University of Defence Technology, 410073 Changsha, China)

Abstract: To meet the requirements of military development, firstly, the framework of the fire control simulation system (FCSS) is designed; then establishes every mathematical model of the fire control system, including the test management subsystem model, the weapon management subsystem model, the flight control subsystem model, the sensor management subsystem model and the fire control task machine subsystem model; secondly, based on the embedded real-time operating system VxWorks, this paper realizes the functional modules of each subsystem, and on this basis realizes the communication among them; finally, two sets of simulation results are analyzed in air-attack. Simulation results show that: to ensure the stability and smoothness of the attack route, PL-8 is better in the air to air missile fire control attack, PL-12 is more suitable in the long-distance combat.

Keywords: FCSS; VxWorks; proportional navigation guidance; pure-tracking; multi-task

日益复杂多变的现代作战战场环境对火力控制系统提出越来越高的要求,而在传统联合式的综合火控系统中,功能要求的提高将直接导致火力控制系统子系统数目的增多^[1]. 然而,功能子系统数量的快速增长将使得火力控制系统的复杂度增加,从而在很大程度上会降低航空火力控制系统的可靠性以及实时性. 另外,考虑到军队训练受许多因素的限制,近年来国内就此作了大量研究仿真研究^[2-6].

鉴于当前火力控制系统的系统特征和要求,同时考虑到 VxWorks 操作系统^[7-8]具有强实时性和高可靠性的特点,本文基于嵌入式 VxWorks 平台,在建立航空火力控制系统各个功能系统模型基础上,实现了一个航空火控仿真系统.

收稿日期：2014-04-02.

基金项目: 国家自然科学基金(61302002).

作者简介:高金艳(1989—),女,博士研究生;

李冬辉(1962—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 李冬辉, gjynpu@126.com.

1 航空火力控制系统

航空火力控制系统的基本任务是控制飞机火力的方向、密度、时机和持续时间。其基本功能是在引导飞机到目标或载机发现目标后,沿最佳航线接近目标、搜索、识别、跟踪目标;测量目标与载机的运动参数,进行火力控制计算,选择武器类型、控制武器的发射方式、数量和装订引信;必要时对某些指导武器进行发射前的参数装订和发射后制导,使用雷达等火控系统导引武器命中目标^[9]。

本文搭建的火控仿真系统总体结构如图 1 所示,包括试验管理与运行、飞行控制管理、火控任务机、传感器管理、武器管理子系统 5 个模块。各子系统间交联过程如下:试验管理与运行子系统通知各子系统作战想定类型以及要发射何种武器,飞行控制管理子系统提供飞机飞行的实时数据,一旦传感器子系统雷达截获目标,飞行控制管理子系统将飞机的飞行参数、传感器子系统探测到的目标参

数一并提供给火控任务机子系统,火控任务机子系统通过解算,判断武器是否满足发射条件,若满足发射条件,通知武器管理子系统发射武器。图中箭头方向代表各子系统间的通信方向。

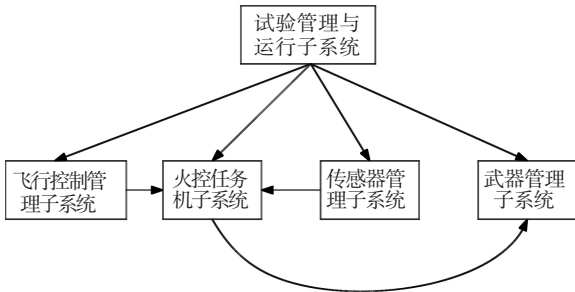


图 1 火控仿真系统总体结构设计

2 火控仿真系统建模

2.1 试验管理与运行子系统设计与实现

试验管理与运行子系统是火控仿真系统的主控系统,是维护系统的主要事件循环,负责整个软件系统各模块的协同工作。其具体实现功能如下:首先,判断系统要发射哪种武器对目标进行攻击;其次,创建信号量,为实现任务间通信作准备;最后,通过 VxWorks 中任务创建函数 taskSpawn 创建并激活所需的 5 个任务,仿真结束后通过任务删除函数 taskDelete 删除相应任务。

2.2 飞行控制管理子系统设计与实现

飞行控制管理子系统工作流程如图 2 所示,图中 T_{info} 为持续截获目标时间, T_{st} 为雷达从搜索到跟踪目标所需时间。起初雷达若搜索不到目标,飞机以一定速度朝假定目标飞行,若雷达搜索到目标的时间超过 T_{st} (假定 $T_{st} = 30\text{ s}$), 则认为飞机成功截获目标,若目标刚好又在雷达的跟踪范围内,则设定雷达状态为跟踪状态,并将目标数据信息传递给传感器子系统。

2.3 传感器管理子系统设计与实现

雷达模型的工作状态切换流程如图 3 所示。雷达传感器模型有两种工作模式:搜索和跟踪。雷达的起始工作状态为搜索状态。当目标的距离、方位角、俯仰角和目标线角速度满足雷达探测条件时,雷达截获目标。持续截获目标达到一定长的时间,且满足跟踪的距离、方位角、俯仰角和目标线角速度限制后,进入跟踪状态。无论是在截获状态还是在跟踪状态,一旦丢失目标,雷达立即进入搜索状态。

2.4 火控任务机子系统设计与实现

火控任务机子系统主要用于数据处理,包括瞄准计算与控制、导航计算、显示机制、总线传输控制、飞行能量管理等相应的任务^[9]。本文设计的火控任务机子系统的工作过程:火控任务子系统从传感器

子系统接收到目标的数据并从飞行控制管理子系统接收到飞机数据后,通过解算,若武器一开始不满足发射条件,控制飞机在一定时间内按纯追踪方式对目标进行跟踪,并实时判断武器是否满足发射条件。

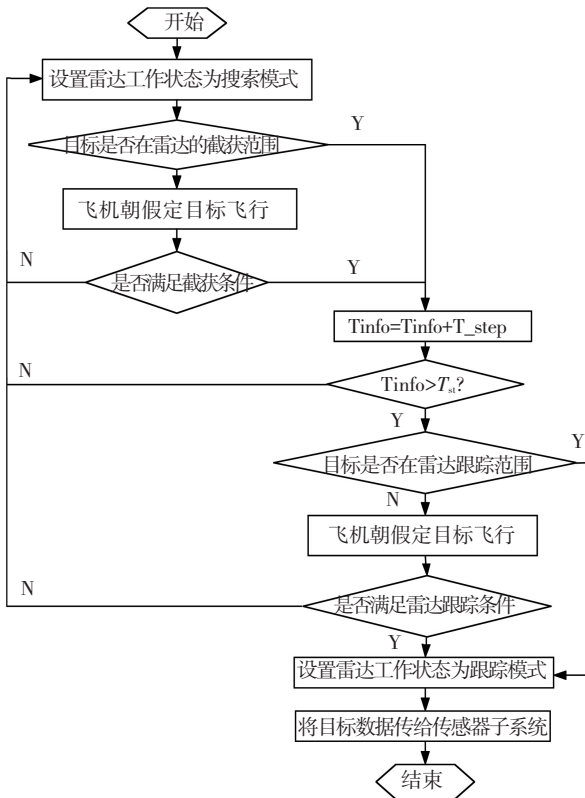


图 2 飞行控制管理子系统工作流程

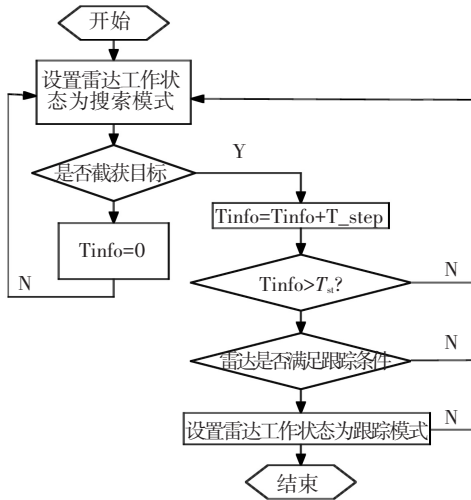


图 3 雷达工作状态切换流程

2.5 空空导弹武器管理子系统设计与实现

空空导弹武器管理子系统运行流程如图 4 所示。武装直升机进行空战时,使用的空空导弹类型主要为近距红外格斗弹^[10]。因此导弹发射后,不需要载机对其进行指令制导,直接从自身导引头获取目标信息,按照比例导引飞行,不断地更新其速度和位置矢量,同时判断是否满足爆炸条件和攻击失败条件。若满足爆炸条件,则导弹爆炸,不再存活;若

满足攻击失败条件,则导弹攻击失败,不再存活;若既不满足爆炸条件,也不满足攻击失败条件,则继续按照比例导引飞行. 下面从爆炸条件、攻击失败条件两个方面详细论述.

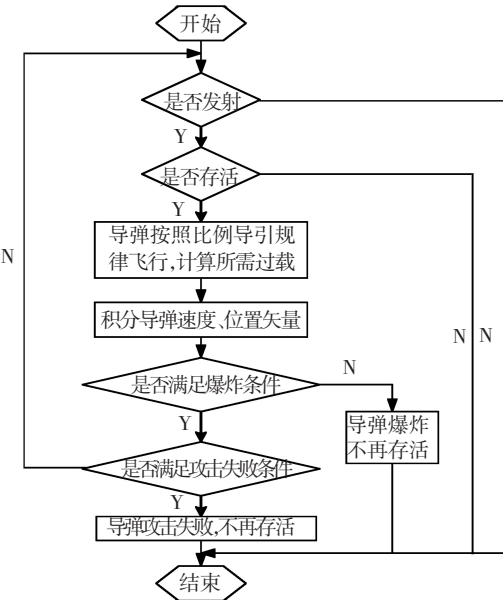


图 4 空空导弹运行流程

2.5.1 爆炸条件

模型主要从导弹安全时间、最小接近速度、导引头盲区距离、杀伤半径等因素来考虑导弹的爆炸条件,如图 5 所示. 图中, R_1 为导引头盲区距离; R_2 为导弹杀伤半径; D 为导弹到目标的距离; D_e 为导弹的脱靶量.

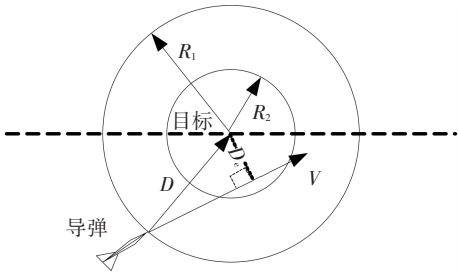


图 5 导弹命中条件

导弹飞行时间为

$$t > T_{\min}. \tag{1}$$

导弹接近速度为

$$\|\vec{V}_M - \vec{V}_T\| > V_{\text{delta}}. \tag{2}$$

弹目距离为

$$\|\vec{R}_M - \vec{R}_T\| < R_1. \tag{3}$$

脱靶量为

$$D_e = \|\vec{D} - (\vec{D} \cdot \vec{i}_v) \cdot \vec{i}_v\| < R_2. \tag{4}$$

式中: $T_{\min}$ 为导弹最小可发射安全时间; V_{delta} 为导弹对目标的最小接近速度; $\vec{V}_M$ 为导弹初始速度; $\vec{V}_T$ 为

导弹在第 T 时刻的速度; $\vec{R}_M$ 为导弹初始位置; $\vec{R}_T$ 为导弹在第 T 时刻到目标的距离; $\vec{i}_v$ 为与速度方向相同的单位向量.

2.5.2 攻击失败条件

模型主要从导弹的最大飞行时间、导引头跟踪视场角、跟踪角速度、导引头最远跟踪距离、导引头允许使用高度限制来考虑导弹的攻击失败条件,即在以下条件下,导弹攻击失败.

导弹飞行时间为

$$t > T_{\max}. \tag{5}$$

导引头天线指向与弹轴夹角为

$$\varphi > \varphi_{\text{maxtrack}}. \tag{6}$$

瞄准线角速度为

$$w > w_{\text{maxtrack}}. \tag{7}$$

弹目距离为

$$D > D_{\max}. \tag{8}$$

导弹高度为

$$H > H_{\max} \text{ 或 } H < H_{\min}. \tag{9}$$

其中: $T_{\max}$ 、 $\varphi_{\text{maxtrack}}$ 、 w_{maxtrack} 、 $D_{\max}$ 、 $H_{\max}$ 、 $H_{\min}$ 分别为导弹最大飞行时间、导引头最大跟踪视场角、最大跟踪角速度、最大跟踪距离、最大跟踪高度、最小跟踪高度.

3 系统仿真与分析

在 Tornado 开发环境下实现火控仿真后,以空空攻击想定类型 PL-8、PL-12 两种发射武器类型为例,进行空战过程的仿真,并将仿真结果进行评估和横向对比. 仿真时需作如下假定:假定机载、武器系统能够无故障工作;飞行员能够正确及时操作.

实例 1 载机和目标位置相对较近,载机初始位置为(3 000 m, 3 000 m, 0 m),初始速度为(200 m/s, 30 m/s, 3 m/s);目标初始位置为(6 000 m, 2 000 m, 1 000 m),初始速度为(150 m/s, 10 m/s, 6 m/s).考虑到实际空战中我机处于比敌方高的位置对目标攻击更加安全、容易,选取目标比导弹低 1 000 m 的一组初始数据. 飞机截获目标过程中,飞机、目标飞行轨迹如图 6 所示. 图中, $C1$ 为飞机截获目标阶段的飞行轨迹, $C3$ 为飞机返航阶段的飞行轨迹, M 为导弹运动轨迹, T 为目标运动轨迹.

由图 6 中,火控仿真系统执行过程:首先,飞机携导弹直飞,成功截获目标,如图中红色段所示;其次,经火控系统解算,目标在导弹的攻击区内,导弹发射,飞机返航. 导弹按比例导引方式发射后轨迹如图中粉色段所示,飞机返航轨迹如图中绿色段所示,返航点如图中黄色段所示,目标从始至终飞行轨迹如图中蓝色段所示.

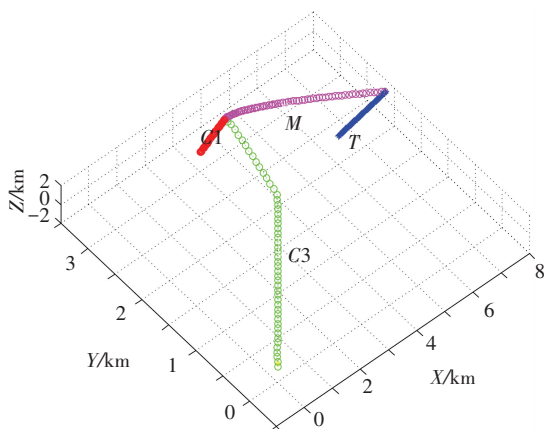


图6 PL-8 高空对低空近距仿真图

实例2 载机和目标位置相对较远,根据 PL-8 导弹各项发射边界条件选取的初始参数. 载机初始位置为 (3 000 m, 2 000 m, 0 m), 初始速度为 (200 m/s, 18 m/s, 3 m/s); 目标初始位置为 (95 000 m, 500 m, 16 000 m), 初始速度为 (150 m/s, 3 m/s, 6 m/s). 发射 PL-8 导弹时, 仿真结果如图 7 所示; 发射 PL-12 导弹时, 仿真结果如图 8 所示.

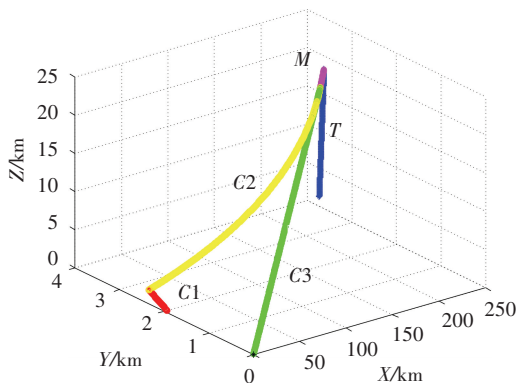


图7 PL-8 边界条件下发射仿真

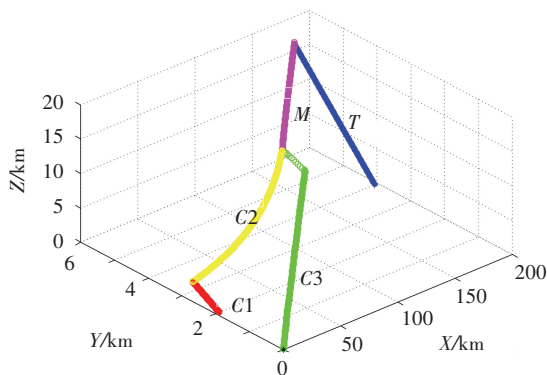


图8 PL-12 在 PL-8 边界条件下仿真

图 7、8 中, 火控仿真系统各子系统协调工作, 对目标打击过程: 飞机先截获目标, 如图中红色段所示; 由于弹目距离大于导弹的最大发射距离, 飞机不得不按纯追踪跟踪目标一段时间, 如图中黄色段所示; 导弹满足发射条件后, 导弹按比例导引追踪目标, 如图中粉色段所示; 飞机返回, 如图中绿色段所示; 目标从始至终飞行轨迹如图中蓝色段所示.

如果载机初始位置距离目标很远, 搜索、跟踪不到目标, 即使能截获目标, 目标也不在导弹的可攻击区内, 这时需要载机携带武器作较长时间的飞行, 既危险, 又很可能导致载机返航失败, 这种情况下更适宜发射远程导弹 PL-12.

4 结 论

1) 设计了火控仿真系统的系统框架, 基于此系统框架, 建立了仿真系统的各个子系统数学模型, 其中包括试验管理子系统模型、武器管理子系统模型、飞行与控制子系统模型、传感器管理子系统模型以及火控任务机子系统模型.

2) 根据建立的各火控仿真子系统模型, 基于嵌入式 VxWorks 实时操作系统, 实现了各子系统功能模块及其间的通信.

3) 基于所实现的火控仿真系统, 对于不同武器配置进行了两组战况仿真, 并对仿真结果进行了分析与比较. 空空攻击时, 若进行近距格斗, 选择 PL-8 较好, 若是远距离格斗, 则选择 PL-12 更适宜.

4) 实现的火控仿真系统为探索和研究新一代综合火控系统的系统设计和开发提供了一个研究平台, 同时为研制新型武器的早期功能设计提供了测试和验证平台, 具有一定的适用价值.

参考文献

- [1] 温增葵, 高晓光, 魏小丰. 基于 VxWorks 的机载火控仿真系统设计与实现[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(7): 174-178.
- [2] 李如年, 倪国旗, 方中江. 某型火控雷达仿真系统的设计与实现[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(3): 730-732.
- [3] 杨小龙, 李成玉, 封吉平. 组网火控雷达目标跟踪仿真系统设计[J]. 电光与控制, 2013, 20(7): 24-27.
- [4] 苏建刚, 黄艳俊, 王志生, 等. 自行高炮光电火控半实物仿真系统技术实现途径分析[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(7): 160-163.
- [5] 凌忠. 面向机载火控雷达软件设计半实物仿真系统[J]. 现代雷达, 2012, 34(3): 50-54.
- [6] 谭立新, 何艳丽. 火炮火控系统火控算法研究[J]. 郑州: 中州大学学报, 2009, 26(2): 126-128.
- [7] 相征. 基于 VxWorks 嵌入式系统的数据通信[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
- [8] 张杨, 于银涛. VxWorks 内核、设备驱动与 BSP 开发详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [9] 陆彦, 周志刚, 夏英明. 航空火力控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [10] 高晓光. 航空军用飞行器导论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004.

(编辑 魏希柱)