

舰载武器装备安全射界测量与设计

王 赞, 符丽君

(北京机械设备研究所 装备总体技术研究室, 北京 100854)

摘要: 安全射界装置是保证舰载设备安全与完成作战使命任务的重要设施; 为了确保舰船在作战过程的设备完好以及发射的安全可靠, 对安全射界装置进行了需求分析, 对装置的组成进行设计, 构建了其硬件电路与软件框架, 并详细规划了软件中各模块的基本功能; 在对某型号武器系统轮廓曲线测量的前提下, 分析了停射滞后现象对安全射界轮廓曲线乃至发射装置安全性的影响, 对最大滞后角度进行了计算, 确定了禁射曲线应当预留的空隙值, 完成了发射可靠性与安全性验证, 为相似系统安全射界装置的设计提供了借鉴作用。

关键词: 舰载武器装备; 安全射界; 轮廓曲线识别; 提前角

Measurement and Design of Safety Firing Boundary for Shipborne Weapon Equipment

Wang Yun, Fu Lijun

(Equipment General Technology Laboratory, Beijing Institute of Mechanical Equipment, Beijing 100854, China)

Abstract: Safety firing apparatus is the important facility which assures the safety of shipborne weapon equipment and the achievement of combat mission. In order to ensure the ship safety and launch reliability in the operational process, the demand analysis of safety firing apparatus is carried out, the units of safety firing boundary are designed, the hardware and software architecture are built, and the basic functions of each software module are devised in details. On the basis of the contour curve measurement of a weapon system, the effectiveness of stop-shooting hysteresis to safety firing zones and launch device are analyzed, the maximum lag angle is calculated, the gap value of shooting forbidden curve is determined, the emission reliability and safety is verified, finally, provide the reference for the similar system design of safety firing apparatus.

Keywords: shipborne weapon equipment; safety firing boundary; contour recognition; advance angle

0 引言

随着新形势下军事装备需求的变化, 武器装备朝着高密度、集成化的方向发展。其主要表现形式为单一载体上作战单元由一变多、紧密排列, 虽然不同作战单元各自功能有所差异, 但集成在同一个大型载体上共同配合, 尽最大可能发挥出武器装备作战效能^[1]。舰载武器装备具备攻击、防御拦截不同射程目标的能力, 因此舰船上会合理布局防空、对海、反潜等不同类型的作战单元, 密集的布局为舰载武器系统设计带来了难题。舰载武器系统的测量与设计不仅仅考虑武器系统的毁伤因素, 还要考虑安全因素, 也就是不仅要发挥武器的最大作战效能, 还要尽可能大的设置安全发射范围, 确保舰上人员与设备的安全, 避免自伤情况发生, 实现武器系统作战效能在工作的前提下的最大化实现^[2]。

一般来说, 导弹发射装置的方位与俯仰都有一定的运动范围, 这是装置的固有属性^[3]。对于舰载武器装备而言, 由于安装在甲板上的武器装备周围有障碍物以及其他作战单元, 导弹发射必须满足特定的安全条件^[4], 因此具有自动判断是否可以发射的安全射界模块的设计成为武器系统设计的重要与必要环节。

1 安全射界概述

1.1 射界分类

舰载武器装备射界^[5]主要分为固有射界、安全瞄界、安全射界三类。固有射界是指武器系统自身的固有属性, 是导弹发射装置方位、俯仰所能达到的二维界限。安全瞄界与射界是指在确保舰上人员与舰面设备安全的情况下武器能够瞄准与发射的方位角与俯仰角范围。三者之间具有包含关系, 假设二维半球是全集, 则固有射界是二维半球的子集; 安全瞄界是固有射界的子集, 因为武器系统在复杂环境中存在障碍物的情况下会影响瞄准范围; 安全射界是安全瞄界的子集, 有障碍物之处一定不能发射导弹, 并且在没有障碍物的地方也需要考虑爆炸压力、毁伤碎片等对周围造成的影响。安全射界才是满足武器系统作战任务需求的发射轮廓曲线, 具体如图1所示。

对于舰载武器系统的设计, 具有对安全起决定性作用的是安全射界, 因此在武器系统设计过程中需要对安全射界模块进行着重设计。

1.2 安全射界组成

舰载武器装备安全射界模块是系统重要组成部分, 主要由安全射界板、安全射界测试软件、禁射轮廓曲线以及安装在方位、俯仰角度与位置检测组合中的自整角机共同构成。其工作流程是自整角机采集发射转塔方位、俯仰角度与位置信息, 安全射界模块将角度、位置信息与按照水面舰船的轮廓构成的禁止发射曲线进行比对, 当发射转塔运动到禁射区内时, 安全射界板向本地单体计算机提供开关量信号, 本地单体计算机通过以太网向整个武控计算机回报禁射状态, 武器系统控制计算机

收稿日期: 2014-10-21; 修回日期: 2015-03-31。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61203181)。

作者简介: 王 赞(1988-), 男, 辽宁大连人, 工程师, 主要从事复杂电磁环境下电气系统总体设计方向的研究。

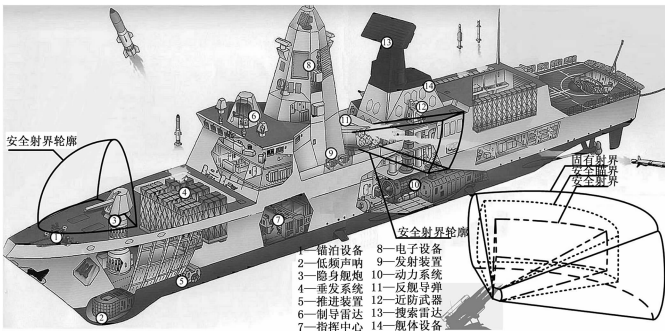


图 1 舰载装备三种射界示意图

识别出禁射信号与角度，向导弹发射控制设备提供禁射信号，改变导弹发射策略。

2 武器装备安全射界测量与设计

武器装备安全射界设计包括硬件设计与软件设计两方面，硬件主要是通过单片机完成原理框图的搭建，软件是结合硬件电路实现信息采集运算与开关量的输出过程^[6]。

2.1 硬件原理

安全射界设计硬件部分为安全射界板，它由 MSP430F169 单片机实现安全电路的控制，该单片机内含 60KB Flash 存储器，曲线数据和执行程序存储在 Flash 存储器中，安全射界板原理如图 2 所示，该单片机为 16 位低功耗 MCU，48 个 I/O 口可用于连接自整角机数字转换器的数字量输出信号和连接禁射报警信号。利用该单片机的看门狗及复位状态寄存器可用于监控程序是否跑飞，即系统是否受控。利用该单片机 JTAG 接口及编程器和开发软件可现场修改控制程序和装载 Flash 曲线数据。

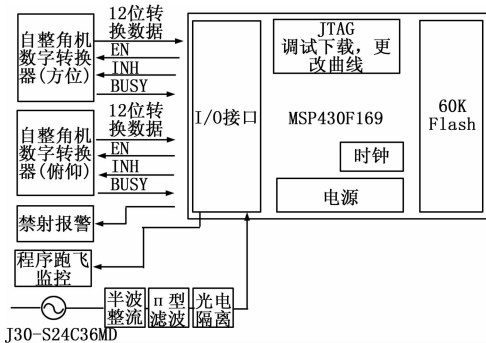


图 2 安全射界板原理框图

2.2 软件组成

每个软件都有其工作载体，安全射界软件固化在安全电路板上的 Flash 中，是基于 MSP430 单片机系统的实时控制软件，它融合了来自导弹发射装置的角度与位置信号之后，将禁射信号、状态信号反馈给导弹发射装置与武器系统控制计算机，武器系统控制计算机通过以太网^[7]再将禁射信号传递给导弹发射控制设备，其数据流程图如图 3 所示。

安全射界软件主要由主控模块、初始化模块、中断处理模块与禁射模块四部分组成，通过时序关系，按照上述流程顺序实现禁射状态计算，安全射界软件功能模块划分如图 4 所示。

主控模块的主要功能包括：

- 1) 完成安全射界板上电后看门狗及时钟的设置；

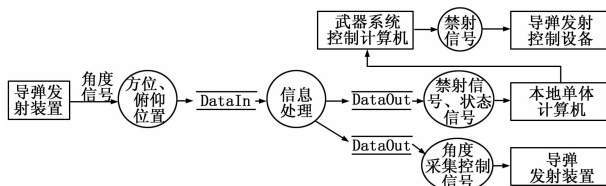


图 3 安全射界软件数据流图

- 2) 对各端口及中断定时器的初始化设置；

- 3) 进行各功能模块的调度；

- 4) 实现各端口实时的状态输出。

初始化模块的主要功能包括：

- 1) 完成计时器初始化，包括计时器的选择和初值的设定；

- 2) 实现中断方式的设置；

- 3) 完成各端口输出的初始态输出设定。

中断处理模块的主要功能包括：

- 1) 对中断周期进行分频处理；

- 2) 读取端口数据；

- 3) 数据处理，得到当前方位、俯仰角度值。

禁射模块主要功能是读取禁射曲线的数据，输入参数为方位位置，方位位置作为偏移地址可以读取禁射曲线中对应俯仰禁射角度。

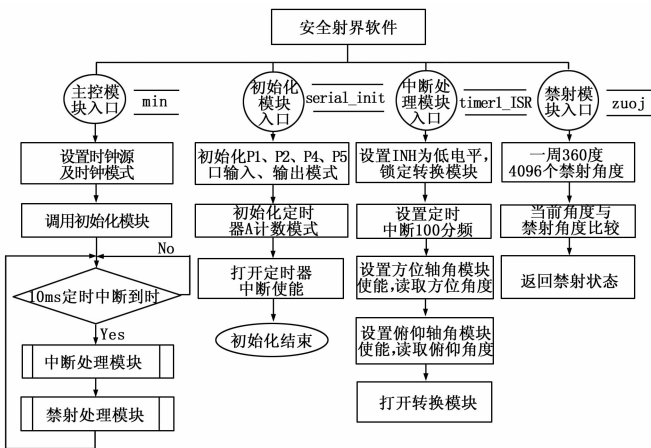


图 4 安全射界软件功能模块划分图

3 轮廓曲线识别

禁射曲线的测试完全在武器系统控制计算机的指令下自主运行。由于作战单元周围障碍物与物理环境、布局的因素，导致作战单元 360°范围内，不同角度方向的安全射界角度值是不同的。面向开阔的海域，其安全射界角很低接近于地平线，而周围有塔台，其他武器系统情况下，其安全射界角度较大，甚至会接近 90°，这就说明不同方向上禁射轮廓线是不同的。

以某型号武器系统为例，其安全射界分为 5 个区域，以舰船艏线为基准，舰船朝向为 0°指向，采用左舷为正的表示方式，在 +36°~ -36°范围内，导弹发射装置仰角大于 8.5°为安全范围；在 +36°~ +124°与 -36°~ -124°范围内，导弹发射装置仰角大于 1°为安全范围；在 +124°~ +180°与 -124°~ -180°范围内，由于导弹后方为舰载设备，则导弹只有很狭小的发射空间，仰角大于 85°为导弹发射的安全范围，二维图形如图 5 所示。

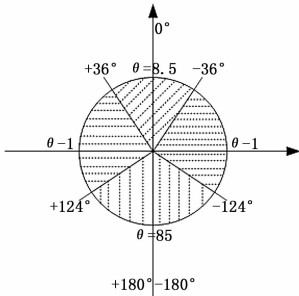


图 5 某型号武器系统禁射曲线轮廓二维图

由于无法对整个 360° 半球面进行扫描, 工程中采用以多条线扫描代替面扫描的方式对武器系统安全射界曲线进行扫描。根据该型号武器系统的研制要求可知系统固有方位射界为 $-160^{\circ} \sim +160^{\circ}$, 且要求安全射界轮廓曲线识别误差在 $\pm 0.2^{\circ}$ 范围内, 所以对于安全射界的扫描采用 150° 、 75° 、 0° 、 -75° 、 -150° 共 5 个特殊位置来对禁射轮廓曲线进行识别。具体算法如下:

```
For each position
Begin
Initialize universe of objects
Select azimuth data
Repeat
For each pitch angle do
Begin
Select attribute
Find flag
Complete servctrl
End
Select attribute and flag
General rules
Until no objects with selected positions
End
```

4 实验与分析

4.1 数据分析

按照上述算法, 在武器系统控制计算机的指令下进行发射装置从仰角接近垂直的 85° 开始向下扫描, 扫描速度选取 300 mrad/s , 因为在武器系统作战条件下对目标进行稳定跟踪过程跟踪过程中发射装置运动速度不会超过该速度指标范围, 得出 3 次安全射界不同位置禁射角结果如表 1 所示。

表 1 300 mrad/s 三次安全射界测试结果

项目	第一次	第二次	第三次
方位 150° 禁射角	84.95°	84.96°	84.98°
方位 75° 禁射角	0.58°	0.83°	0.87°
方位 0° 禁射角	8.07°	7.92°	8.46°
方位 -75° 禁射角	0.86°	0.85°	0.37°
方位 -150° 禁射角	84.97°	84.96°	84.93°

测量数据规定超过 0.2° 即认为偏差过大, 影响系统性能。通过表 1 可以看出, 3 组数据均出现了一个或几个位置禁射角度偏差过大的情况, 假如对方目标飞到禁射区边缘, 而我方武器系统未能识别出禁射信号, 冒然发射导弹, 会给舰船带来致命的毁伤后果。

对于禁射信号的误差^[8]分析其原因是由于时延导致的^[9]。武器系统不同级别控制计算机的采样频率不同, 步调节拍不一致是一种常见现象。正是由于这种现象的存在才导致了测量数据与烧写数据之间的误差。在安全射界模块设计时, 是将上级总体提供的舰船上作战单元安全发射轮廓线离散成数组存入禁射曲线中, 用以与当前角度与位置进行比对。而实际作战过程中武器系统控制计算机对本地计算机进行控制, 本地计算机对伺服进行控制, 由于采样时间的间隔与采样频率的差异出现延时或“停射滞后现象”, 延时是上报上级计算机时由于网络通讯异步导致的, 而停射滞后现象是延时逆过程的宏观表现, 就是武器系统控制计算机在接受到禁射信号之后, 发出停止指令, 直到对伺服运动机构进行控制, 这个过程中导弹发射装置又运行了一段时间, 出现了滞后现象。假想采用实际禁射曲线进行烧写入禁射模块, 停射之后很可能由于自身运动将装置朝向禁射区域, 此时若是发射会出现“自伤”的情形。

4.2 禁射提前角的确定

同样以前述某型号武器系统为例, 其武器系统控制计算机采用 62.5 ms 频率与下级进行通讯, 本地计算机对 I/O 端口访问周期为 50 ms , 安全射界板的角度采集周期为 10 ms , 三者的不匹配导致了安全射界禁止是有可能已经指向了禁射区域的情况。

安全射界板将采集的角度与安全射界曲线对应的角度进行比对, 当采集俯仰角度小于等于曲线对应角度, 上报禁射信号给本地计算机, 而本地计算机对 I/O 口访问的时间周期为 50 ms 。两者由于采样时刻不一致会导致时延现象出现, 最大会延迟 50 ms , 具体如图 6 (a) 所示。不仅如此, 由于本地计算机与武器系统控制计算机采用 62.5 ms 的通讯周期模式, 使得测量时延最大达到 62.5 ms , 分析过程如图 6 (b) 所示。跟踪目标过程中, 导弹发射装置具有一定的运动速度, 更加凸显了时延对停射滞后角的影响。

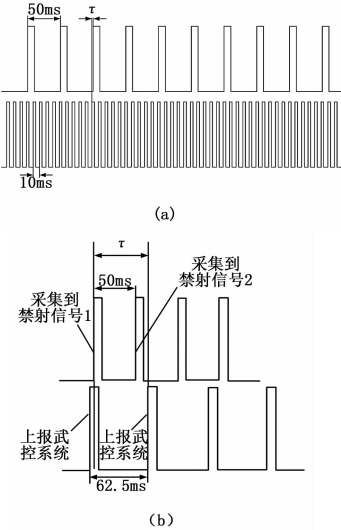


图 6 时延分析

停射滞后角度最大测量误差延时出现情况为刚向武器系统控制计算机上报非禁射信号之后 I/O 口就采集到禁射信号, 而距离下一次上报武控系统还有 62.5 ms , 这是时间延时最长的情况, 对于逆过程的停射滞后角度计算公式是时延与运动速度的乘积。

$$\theta_{\text{停射滞后角}} = \tau_{\text{时延}} \times \omega_{\text{调转角速度}} \tag{1}$$

通常跟踪目标过程中，导弹发射装置运动角速度最大不会超过 300 mrad/s，通过计算得知最大的停射滞后角。

$$\theta_{\text{max}} = \tau \times \omega = 62.5 \text{ ms} \times 300 \text{ mrad/s} \approx 1.07^\circ \tag{2}$$

据此设计该型号武器系统的禁射曲线，即将禁射范围稍微缩小，每条线边约预留出 1.07°的空隙余量，其三维视图展示如图 7 所示，其中图 7（a）为总体给定的轮廓线，图 7（b）为烧写入禁射模块的禁射曲线，其中着色部分为发射装置运动半球中禁止发射的部分，明显看出完善以后可发射区域减小。

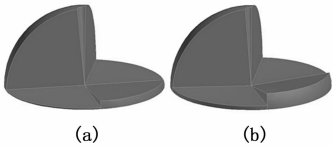


图 7 安全射界三维视图

完成了软硬件设计以及测量时延引起的误差修正之后，借助武器系统控制计算机对禁射曲线进行扫描，速度选取 300 mrad/s，结果如表 2 所示。

参数修正之后，测量结果与实际系统高度吻合，满足系统工作与发射的要求，参数余量解决了发射角滞后现象，确保发射过程中设备与人员的安全。

表 2 修正后 300 mrad/s 安全射界测试结果

项目	第一次	第二次	第三次
方位 150°禁射角	84.98°	84.97°	84.98°
方位 75°禁射角	0.89°	0.88°	0.88°
方位 0°禁射角	8.47°	8.42°	8.45°
方位-75°禁射角	0.96°	0.90°	0.91°
方位-150°禁射角	84.98°	84.98°	84.96°

（上接第 1594 页）

选择测试点的约束条件是覆盖所有故障，优化目标是总费用最小，数学模型为：

$$\begin{cases} \min & Cost \\ s. t. & \prod \mathbf{F}T \times \mathbf{X}^T > 0 \end{cases} \tag{5}$$

使用遗传算法求取最优的测试点，遗传算法的框图如图 6 所示。

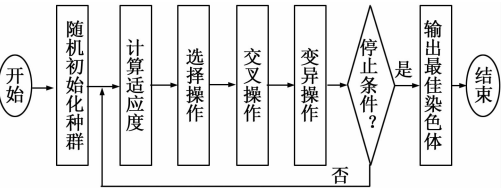


图 6 遗传算法运算框图

通过遗传算法可构建最优的测试序列。
使用最优的测试序列进行测试，测试结果异常时，可以直接激发故障诊断程序，根据测试性模型与测试获得的知识，排除不可能发生的故障，动态生成诊断测试子序列，TeatStand引擎将其加载执行，获得足够的测试信息后决策诊断故障部位，提高了测试与诊断的效率。

5 结论

本文在分析了舰载武器系统安全射界必要性与重要性的基础上，阐述了安全射界装置的组成，对模块装置的软硬件进行了设计，以某型号舰载武器系统为例，分析了停射滞后现象对安全射界轮廓曲线乃至发射装置安全性的影响，最后计算提前角并确定禁射曲线应当的预留空隙值。安全射界的设计有益于武器系统火力分配关系，是完成作战使命任务的必要条件。本文所述的安全射界模块设计方法对舰载武器系统相关模块的开发有借鉴性乃至指导的作用。

参考文献：

[1] 李进军，汪德虎. 舰载武器体系结构发展研究 [J]. 舰船科学技术，2002，24（3）：27-29.
[2] 刁端信. 舰炮停射提前角在舰船设计中的应用研究 [J]. 船舶，2012，23（1）：26-28.
[3] 杨军荣，杨国来，陈运生. 某车载自动迫击炮的炮口动态仿真 [J]. 南京理工大学学报，2005，29（6）：648-652.
[4] 刘 方，邱志明，马溢清，等. 多类型舰载武器共架发射弹位选择策略 [J]. 舰船科学技术，2011，33（5）：87-90.
[5] 邱宗辉. 战术级地形分析 OCOKA 模型的建立与系统设计 [D]. 长沙：国防科学技术大学，2010.
[6] 王晓蓓，夏 立，王向军，等. 一种舰船水下电场信号采集与分析软件设计与实现 [J]. 计算机测量与控制，2014，22（9）：3068-3070.
[7] 陈双龙. 以太网在舰载武器系统中的应用 [J]. 舰船科学技术，2005，27（2）：50-55.
[8] 朱利锋，鲍其莲，张炎华，等. 舰载炮的射击误差分析及消除方法 [J]. 中国造船，2006，47（3）：70-76.
[9] 万自明，孙 星，唐毓燕. 防空导弹武器系统的信息处理与通信延迟建模 [J]. 现代防御技术，2004，32（4）：54-57.

6 结论

针对部分导弹型号测试性设计依靠经验，缺乏理论依据的情况，详细介绍了导弹自动驾驶仪测试性建模的过程，突破驾驶仪测试性建模的难点，最终建立了测试性模型，并提出基于仿真模型的测试性验证方法，验证其正确性。基于模型构建了最优的测试序列和动态的诊断序列。在实际使用中，故障测试检测率和故障隔离率都有所提高，同时使得自动驾驶仪的测试和诊断时间大大缩短。

参考文献：

[1] 邱 静，刘冠军，等. 装备测试性建模与设计技术 [M]. 北京：科学出版社，2012.
[2] 李 岩，杨洪柱. 防空导弹测试技术与遥测系统应用设计 [M]. 北京：中国宇航出版社，1995.
[3] 蒋东翔，黄文虎. 多层抽象混合推理的智能诊断模型 [J]. 振动工程学报，1996，9（4）：353-357.
[4] 许 辉，梁 力. 基于多信号模型的测试性分析方法研究 [J]. 计算机测量与控制，2012，20（4）：914-916，920.
[5] 吴 伟，张宏军，刘 康，等. 基于 TestStand 的自动测试系统软件设计 [J]. 计算机测量与控制，2014，22（7）：2321-2323.