

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.10.002

# 舰空导弹武器系统可靠性维修性试验设计

薛鲁强<sup>1</sup>, 隋江波<sup>1</sup>, 王贵喜<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院指挥系, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 92493 部队 2 分队, 辽宁 葫芦岛 125000)

**摘要:** 针对舰空导弹在作战任务和战斗中的使用特点, 利用仿真试验设计的方法, 研究舰空导弹武器系统及分系统可靠性维修性对导弹武器系统作战效能的影响。建立舰空导弹武器系统的可靠性模型、维修性模型和使用模型。设置不同的战术应用背景, 提出舰空导弹武器系统可靠性维修对作战效能影响的指标, 在设定的 3 种典型作战模式下对作战效能影响进行试验设计和仿真研究。仿真结果表明: 该方法能取到试验范围全面、效果稳定、可多次重复调整和成本低的试验成果, 找到对系统效能影响最大的各因素增长及变动区间。

**关键词:** 舰空导弹; 可靠性; 维修性; 试验设计

**中图分类号:** TJ765.4 **文献标志码:** A

## Test Design of Ship-to-Air Missile System Reliability and Maintainability

Xue Luqiang<sup>1</sup>, Sui Jiangbo<sup>1</sup>, Wang Guixi<sup>2</sup>(1. Dept. of Command, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;  
2. No. 2 Unit, No. 92493 Army of PLA, Huludao 125000, China)

**Abstract:** Based on ship-to-air missile operation characteristics in operational mission and fight, use simulation experiment design method to research the influence of ship-to-air missile system and subsystem reliability and maintainability on missile weapon system fighting efficiency. Establish reliability model, maintenance model and using model of ship-to-air missile system. Set different combating applications background and put forward influence indexes of reliability maintenance on combating performance. Carry our test design and simulation research to combating performance influence under set 3 typical combating modes. The simulation results show that the method can take to test comprehensive in scope, stable effect and low cost, can be repeated adjustment to find the greatest impact of various factors of growth and change interval on system performance.

**Key words:** ship-to-air missile; reliability; maintainability; test design

## 0 引言

由于环境和平台的特殊性, 海上防空作战对舰空导弹武器系统的可靠性和维修性都比岸基系统的要求更高。舰空导弹武器系统的可靠性和维修性不仅是舰空导弹作战效能发挥的保障, 也是海上编队生存力的保证, 二者之间相辅相成, 可在一定程度上互为补充。如何确定二者之间的关系, 如何在既定经济和技术条件下, 合理确定舰空导弹武器系统可靠性维修性指标, 保障在任务环境和条件下, 舰空导弹武器系统作战效能的充分发挥, 是装备设计和使用过程中不可避免的一个现实问题。由于舰空导弹武器系统造价成本高, 导弹价格昂贵, 使用真实装备进行可靠性维修性和作战效能的检验试验, 在经济上很难承受。而且, 需要海域空域、供靶和效果评估保障, 组织非常困难, 进行重复性的试验代价非常大, 在实际工作中也不现实。使用试验设计的方法, 对各种任务条件和要求下的舰空导弹武

器系统的可靠性维修性指标进行试验设计, 并利用计算机进行仿真模拟, 可得到各指标对作战效能的贡献因子或影响权重, 找到各指标之间的互补关联。笔者利用计算机仿真和试验规划设计的方法, 对舰空导弹武器系统的可靠性维修性效果进行试验设计和效果分析。

## 1 可靠性维修性对系统作战效能影响模型

### 1.1 舰空导弹武器系统可靠性模型

可靠性是指舰空导弹武器系统在规定的条件下和规定的时间内完成规定防空战斗使命的能力<sup>[1]</sup>。在系统设计和使用中, 一般采用故障率  $\lambda(t)$  或平均无故障工作时间 MTBF 对舰空导弹武器系统及船机电系统可靠性进行评价<sup>[1-2]</sup>。

当系统经过试航试验, 性能趋于稳定,  $\lambda(t)$  为近似常数时, 舰空导弹武器系统及船机电系统可靠度  $R(t)$  与故障率  $\lambda(t)$  的函数关系转化平均无故障工作

收稿日期: 2012-05-05; 修回日期: 2012-06-28

作者简介: 薛鲁强(1975—), 男, 山东人, 博士, 讲师, 从事装备指挥与管理研究。

时间 MTBF

$$R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}} \quad (1)$$

当导弹储存故障率  $\lambda$  为近似常数时, 其储存可靠度  $r(t)$  与舰上储存时间  $t$  的关系可表示为

$$r(t) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

### 1.2 舰空导弹武器系统维修性模型

维修性是舰空导弹武器系统在规定的条件下和时间内, 按规定的程序和方法进行维修时, 保持和恢复到规定系统状态的能力<sup>[3]</sup>。舰空导弹武器系统维修性直接影响着维修工作量的大小, 并对维修人员的水平和数量有决定性的作用, 在很大程度上维修性不仅决定了舰空导弹武器系统维修经费的高低以及维修设施的需求等<sup>[1-2]</sup>, 而且还决定了系统在战时的抢修恢复能力。

舰空导弹武器系统修复率  $\mu(t)$  是故障在  $t$  时刻后单位时间内修复的概率, 当  $\mu(t)$  为常数  $\mu$  时, 舰空导弹武器系统维修度  $M(t)$  可表示为

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (3)$$

经历试航后, 系统稳定成熟, 舰空导弹武器系统及船机电系统维修度  $M(t)$  与修复率  $\mu(t)$  的函数关系转化平均修复时间 MTTR 为

$$M(t) = 1 - e^{-\frac{t}{MTTR}} \quad (4)$$

### 1.3 舰空导弹武器系统舰上使用剖面

表 1 舰空导弹武器系统假设使用剖面

舰艇状态	试航	远洋值班	航行间维修	远洋值班	航行间维修	坞修
时间/d	90	180	10	150	10	30
舰艇状态	远洋值班	航行间维修	远洋值班	小修	远洋值班	航行间维修
时间/d	180	10	120	90	150	10
舰艇状态	远洋值班	航行间维修	远洋值班	航行间维修	远洋值班	中修
时间/d	180	10	150	10	150	180

在设计和性能预估中, 一般采用任务剖面的方法描述舰空导弹武器系统的任务及其环境<sup>[3]</sup>。该剖面描述了舰空导弹系统在寿命周期中经历的事件(检测、装卸、运输、贮存、维修、部署和战斗使用等)以及事件的时序、持续时间、环境和舰艇及系统工作方式。如表 1, 舰空导弹武器系统在舰艇上的假设使用剖面包含一个或多个任务剖面<sup>[4-5]</sup>。在使用剖面设计上, 为了使各可靠性因素能明显影响系统效能, 并考虑到远洋作战环境装备勤务特点, 设计

了超过一般舰艇自持能力的 3 个月及以上的远洋战备值勤环节直至中修, 以充分体现系统可靠性对防空任务效能的影响。

### 1.4 舰空导弹武器系统射击模型和效能模型

空中目标在发射区范围内, 系统对其能发射的导弹数, 可根据目标飞行条件和发射间隔, 由式 (5) 确定:

$$r = \frac{S}{v_m \cdot t_c} + 1 \quad (5)$$

式中:  $S$  为发射区长度;  $v_m$  为空袭目标飞行速度;  $t$  为一次射击持续时间;  $t_c$  为发射间隔时间。

作战效能指标选取  $r$  次齐射目标至少命中一发的概率<sup>[6]</sup>:

$$P_r = 1 - \prod_{i=1}^r (1 - P_i)^{X_i} \quad (6)$$

式中:  $P_i$  为舰空导弹武器系统第  $i$  次齐射中的单发命中概率;  $X_i$  为第  $i$  次齐射弹量。

### 1.5 可靠性维修性对作战效能影响指标

舰空导弹武器系统的效能采用完成所赋予舰艇(编队)防空战斗任务的程度作为指标进行评价。因此对于设定使用剖面下第  $i$  次使用的效能实现系数  $K$ , 可用式 (7) 进行描述:

$$K_i = \frac{W_{RMi}}{W} \quad (7)$$

式中:  $W_{RMi}$  为可靠性维修性因素影响下, 使用剖面中第  $i$  次系统防空作战使用的效能;  $W$  为不考虑环境、干扰和系统可能故障影响的系统效能理想值。

舰空导弹武器系统的战斗能力是随时间变化而劣化或恢复的, 因而战斗效能实现系数是时间的函数。为了合理评价可靠性维修性因素的影响应该取战斗效能实现系数的平均值<sup>[1,7]</sup>, 如式 (8) 所示:

$$\bar{K} = \frac{1}{T} \int_0^T K(t) dt \quad (8)$$

其中:  $T$  为所经历的使用剖面时间;  $K(t)$  为使用剖面下  $t$  时刻战斗效能实现系数值。

在双发齐射情况下, 不考虑系统可靠性维修性影响时的作战效能可用目标被命中概率表述:

$$W = 1 - (1 - P)^2 \quad (9)$$

式中:  $P$  为单发命中概率。

在双发齐射情况下，舰空导弹武器系统及各分系统的故障及修复导致系统可靠度  $R_M$  对其作战效能的影响，用系统效能实现系数  $K$  表述为

$$K = \frac{W_R}{W} = \frac{1 - (1 - R_M P)^2}{1 - (1 - P)^2} \quad (10)$$

系统效能实现系数  $K$  综合了各可靠性维修性因素影响和武器系统作战效能 2 方面，能体现各可靠性维修性因素对系统效能发挥的影响。合理的设计时间区间  $T$  与舰艇使用剖面，将使用措施和作战环境背景相联系，这样指标  $K$  就能够综合反映出多可靠性维修性因素对舰空导弹武器系统战斗效能的影响<sup>[8-10]</sup>。

## 2 仿真设定条件和仿真模型

假定目标为巡航段反舰导弹，飞行速度 0.75 Ma；飞行高度 15 m。仿真计算设定的系统参数如表 2 所示。

表 2 仿真计算设定的舰空导弹系统性能参数

舰空导弹系统参数	数值
弹药基数/枚	48
火力通道	6
发射装置数量	2
系统反应时间/s	10
人员就位时间/min	5
系统启动时间/min	10
舰空弹准备时间/s	10
发射间隔/s	6
单发命中概率	0.65
舰空导弹最大速度/Ma	3
发射区近界/km	1.5
发射区远界/km	18

在仿真中设定 3 种作战任务模式：

1) 对来袭的单个目标对行一次双发齐射，作战背景模拟抗击偶然性或袭扰性空中打击，整个防空作战持续时间短，防空压力小。

2) 对来袭的 24 个目标进行双发齐射，目标出现间隔 15 min，作战背景模拟为海峡水道航渡的编队遂行防空掩护战斗任务，整个作战时间长达 6 h，抗击强度大，持续时间长，系统持续作战对可靠性依赖程度大，同时长的作战时间又为维修性的发挥提供了时间保障。

3) 对来袭的 24 个随机目标进行逐次双发齐射，目标出现时间间隔约 1 s，远小于单次齐射完成所需时间，作战背景模拟饱和攻击，此时防空压力尤其是对战斗人员的压力和要求为最大。

基于以上任务模式，仿真流程图如图 1。

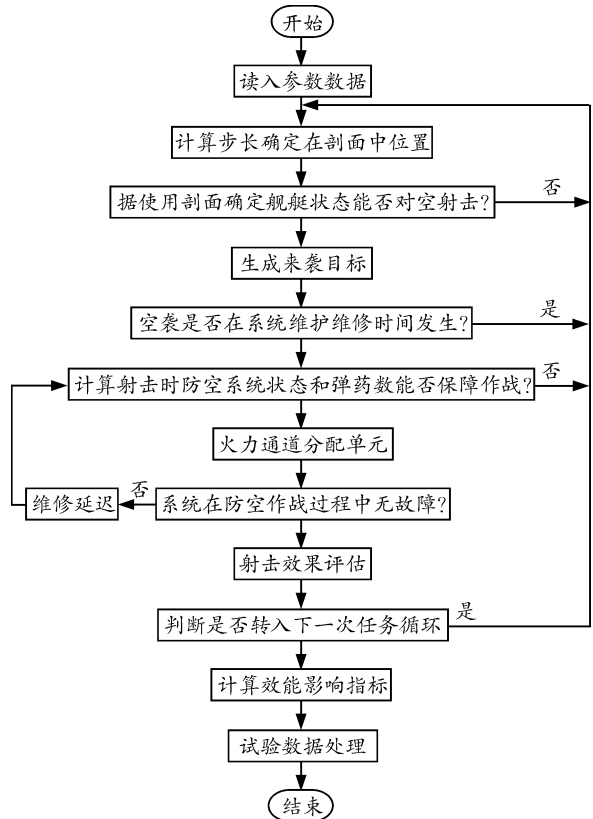


图 1 系统可靠性维修性对作战效能影响计算框图

## 3 全因素试验设计与数据处理

全因素试验法利用排列整齐的全因素表来对试验进行整体设计、综合比较、统计分析，实现通过试验找到较好的因素条件，以达到最高收益。因为使用计算机仿真模拟，笔者对各因素采用 2 水平 (-1,+1) 描述 8 因素表，对每一作战任务模式进行遍历试验 256 次。

选择舰空导弹武器系统作战效能  $K$  为试验的质量特性指标。选择各分系统可靠性指标为提高或改进的质量特性的相关因素。

通过试验，可得  $K$  值的二项式描述：

$$K = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_i x_j + \dots \quad (11)$$

式中： $x_i, x_j$  为各因素水平； $a_0, a_i, a_{ij}$  为各因素二项式系数。

各一次项系数代表了各可靠性维修性因素对系统作战效能指标值  $K$  的影响权重。一次项系数可由试验数据的相互正负拟合处理获得，通过正负拟合还可以屏蔽其他因素的影响。一次项系数越大说明可靠性对效能影响波动大，或者说是性能不稳定、因可靠性增长引发的效能增长裕度大。

二次项系数反映了各因素之间的相互影响, 可由式 (12) 求得:

$$a_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_{ui} x_{ji}}{N} \quad (12)$$

式中:  $y_i$  为第  $i$  次试验的值;  $u, j=1, 2, \dots, n$  为各因素编号。

常数  $a_0$  是各次试验的平均值:

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (13)$$

在设定的作战任务模式下对典型的导弹武器系统进行了仿真研究。全因素试验设计表见表 3。

表 3 舰空导弹武器系统全因素试验设计表

因素	值	变动区间	水平
装备勤务正确率 $P_1/\%$	0.93	[0.86,1]	[-1,1]
控制系统 MTBF $T_1/h$	70	[30,110]	[-1,1]
	0.94	[0.88,1]	[-1,1]
战斗操作正确率 $P_2/\%$	0.91	[0.82,1]	[-1,1]
	0.85	[0.7,1]	[-1,1]
平均修复时间 $T_2/h$	1.5	[2.75,0.25]	[-1,1]
导弹装载完好率 $P_3/\%$	0.987	[0.974,1]	[-1,1]
导弹故障率 $\lambda/\text{年}^{-1}$	0.01	[0.02,0]	[-1,1]
发射装备发射可靠率 $P_4/\%$	0.998	[0.996,1]	[-1,1]
船机电 MTBF $T_3/h$	60	[20,100]	[-1,1]

注:  $P_2$  三组数值分别对应作战任务模式一、模式二和模式三。

### 4 结果分析

按照表 3 的设计, 进行全因素仿真试验, 将试验结果按照文中数据处理的方法进行处理, 得到各因素对作战效能影响的多项式描述。各因素对效能的影响主要表现在其一次项系数(影响权重)上, 如图 2~图 4 所示。

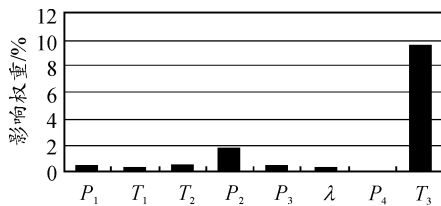


图 2 作战模式一下可靠性维修性对作战效能影响权重图

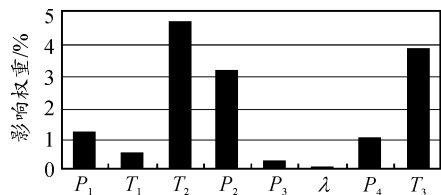


图 3 作战模式二下可靠性维修性对作战效能影响权重图

由图 2 可以看出, 作战模式一条件下, 船机电平均无故障工作时间对系统作战效能有较大影响, 战斗操作正确率有一定影响, 其他因素影响较小。

由图 3 可以看出, 作战模式二条件下, 代表维修性的指标平均修复时间对作战效能的影响最大, 在此种作战模式下维修性发挥了自己的作用。船机电平均无故障工作时间、战斗操作正确率、装备勤务正确率和发射装备发射可靠率对系统作战效能也有较大影响。

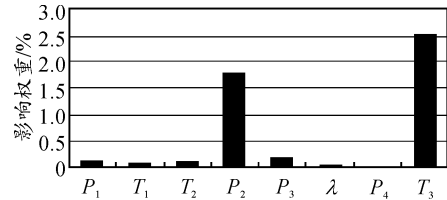


图 4 作战模式三下可靠性维修性对作战效能影响权重图

由图 4 可以看出, 作战模式三条件下, 船机电平均无故障工作时间和战斗操作正确率对系统作战效能有较大影响。但是, 影响的幅度远小于前 2 种作战模式。

### 5 结束语

通过试验设计和仿真分析, 可以得到试验范围全面、效果稳定、可多次重复调整和成本低的试验效果, 找到对系统效能影响最大的各因素增长及变动区间, 为装备设计选型、实兵试验和可靠性改进增长提供先期研究依据。

### 参考文献:

- [1] 宋太亮, 等. GJB 451A-2005 可靠性维修性保障性术语 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2005: 15-17.
- [2] 薛鲁强. 舰空导弹武器系统使用仿真模型[C]//第十二届俄罗斯科学院导弹火炮年会论文集第四卷. 圣彼得堡: 俄罗斯海军军事科学院出版社, 2009: 489-494.
- [3] 鲍里斯·玛尔钦科, 薛鲁强. 舰载导弹武器系统使用特点分析[J]. 俄罗斯海洋学报, 2007, 22(2): 96-98.
- [4] 薛鲁强. 舰空导弹系统可靠性维修性对训练影响研究[J]. 指挥控制与仿真, 2011, 33(6): 106-108.
- [5] 潘吉安. 可靠性维修性可用性评估手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 115-120.
- [6] 薛鲁强. 舰上贮存可靠性对舰空导弹作战效能影响研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(7): 145-147.
- [7] 薛鲁强. 舰空导弹发射装置可靠性对作战效能影响[J]. 兵工自动化, 2011, 30(10): 10-12.
- [8] 陈建华. 舰艇作战模拟理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 115-127.
- [9] 王治军, 等. 导弹武器系统的可靠性与维修性[M]. 西安: 第二炮兵工程学院出版社, 1994: 75-97.
- [10] 徐品高. 防空导弹体系总体设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1996: 26-27.