

软硬件分统结合的导弹武器装备 可靠性评定方法

王琦

(92941 部队 93 分队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 阐述了现代武器系统软件构成特点及与武器装备可靠性之间的关系。介绍了靶场现有武器系统可靠性试验方法, 对其不适应性进行了深入分析。提出将武器系统可靠性指标分配给串联构成的软件、硬件分系统, 根据软件产品和硬件电子产品不同的失效机理, 运用适合其分布特性的检验方法进行可靠性检验, 然后再综合评估, 即软硬件分统结合的武器装备可靠性检验的总体思路。给出了相应的试验评估方法和数学模型, 论述了所涉及的若干技术问题的解决办法。

关键词: 软件可靠性; 硬件可靠性; 导弹武器系统; 综合评定; 测试

中图分类号: TP39

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2012)01-0050-03

随着电子计算机技术在军工产品中的广泛应用, 武器装备的信息化、自动化、智能化水平得到显著提高的同时, 也使其对计算机软件技术的依赖越来越强, 如美军 20 世纪 60 年代的 F-4“鬼怪”战机, 软件对功能的支持程度仅 8%, 到了当前的 F-22“猛禽”战机已高达 80%、一艘“宙斯盾”巡洋舰的软件源代码超过 5 000 万行、仅一个先进火炮系统的软件指令就在 100 万个以上。我军武器装备的状况与此极为类似。对近年来靶场完成的几型导弹武器系统定型或火控系统鉴定试验进行故障统计, 共计 16 次, 其中 5 次为硬件故障, 且有 2 次是导弹控制台某指示灯泡失效的轻微故障, 另 11 次均为软件故障, 约占总故障数的 70%。因此, 对软件所占比例越来越高的新型武器装备的可靠性如何进行科学合理的试验评价, 也就显得愈发重要。

靶场现有的可靠性试验检验方法主要是采用 GJB899—90《可靠性鉴定和验收试验》及相类似的方法, 将装备出现的软硬件故障等同对待, 进行可靠性试验信息收集与评价。目前有许多文献也推荐此方法^[1-7]。但笔者认为, 针对武器装备的新特点, 使用该方法的科学性值得认真商榷。原因首先是上述的标准和办法是面向硬件系统, 即按照试验剖面对硬件设备施加物理和化学作用, 使电子元件、电路和结构发生变化, 导致硬件系统发生故障, 而软件的故障与物理和化学作用无关, 它是由于软件运行过程中遇到了使其发生故障的输入条件, 即受到了“触发”作用。其次, 硬件产品的可靠性服从“浴盆曲线”规律, 其分布主要是以工作时间为自变量的指数寿命型分布, 而软件故障基本属随机出现, 故障分布服从成败型分布。再者, 硬件系统出现了可靠性故障, 进行维修、更换相应器件后, 同样的故障依然会发生, 而软件故障, 一旦对程序进行修改完善, 可以说同样的问题几乎不会再出现。

本文提出了软硬件分统结合的武器装备可靠性评定思路, 给出了相应的数学模型和实施办法, 对其中关键技术问题进行了分析, 并阐述了解决办法。

1 软硬件分统结合的可靠性评定

1.1 总体思路

将武器装备系统可靠性指标, 以任务可靠度的形式, 分配给软件分系统和硬件分系统。针对硬件和软件故障失效特性, 制定分系统的可靠性检验方案, 分别进行试验检验。综合可靠性检验结果, 给出武器装备系统的可靠性检验和评估结论。

1.2 可靠性分配模型

1) 等分配法

系统的可靠度 R_s , 系统各个单元的可靠度大致相同, 则单个单元的可靠度:

$$R_i = R_s^{1/n}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

2) 比例分配法

各个分系统的故障率预计 $\hat{\lambda}_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$;

每个分系统的比例因子 $k_i = \frac{\hat{\lambda}_i}{\sum_{i=1}^n \hat{\lambda}_i}, i = 1, 2, 3, \dots, n$, 其中

$$\sum k_i = 1。$$

各个分系统的可靠性指标

$$R_i = k_i \cdot R_s \quad (2)$$

3) 评分分配法

系统故障率为 λ_s^* , 则分系统故障率

$$\lambda_i^* = C_i \cdot \lambda_s^* \quad (3)$$

式中: C_i 为第 i 个分系统评分系数, $C_i = \omega_i / \omega$ 。 ω_i 为第 i 分系统的评分; ω 为系统总评分。

$$\omega = \sum_{i=1}^n \omega_i$$

式中: $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 为分系统个数。

1.3 软件分系统可靠性评定模型

分配得到的软件分系统可靠性指标为 R_r 。根据 Neyman-Pearson 引理,假设检验。

经公式推导,当决策不等式为 $N \leq \frac{\ln(\alpha)}{\ln(1-R_{r0})} \Rightarrow R_{r0} \leq 1 - \alpha^{1/N}$,接收原假设 H_0 ,即软件可靠性检验合格。否则拒收。 α 为显著水平。

对给定的显著水平 α ,软件可靠性 R_r 的评估值分别为:

置信上限(UMA)为

$$\bar{R}_r = 1 - \alpha^{1/N} \quad (4)$$

最小中位无偏估计(UMMUE)为:

$$\hat{R}_r = 1 - 0.5^{1/N} \quad (5)$$

置信下限

$$R(N, \alpha) = 1 - \bar{R}_r = \alpha^{1/N} \quad (6)$$

经第 N 次测试后,软件的正常运行概率估计为

$$\hat{R}_r(N) = 1 - \hat{R}_r = 0.5^{1/N} \quad (7)$$

1.4 硬件分系统可靠性评定模型

分配得到的软件分系统可靠性指标为 R_r 。根据硬件故障分布特性,按系统任务时间,将分配给硬件分系统任务可靠度转换为指数寿命型的 MTTF 值,采用指数分布的假设检验方法。

$$\theta = -\frac{t}{\ln(R_r)} \quad (8)$$

式中, t 为系统的任务时间, θ 代表产品的 MTTF 值。

采用 MTTF 假设检验式:

$H_0: \theta = \theta_0; H_1: \theta = \theta_1 = \theta_0/d$ 。 d 为鉴别比, $d > 1$ 。

经公式推导,决策不等式为:当 $\frac{p(\theta_0|r)}{p(\theta_1|r)} \geq 1$ 时,接收 H_0 ; 当

$\frac{p(\theta_0|r)}{p(\theta_1|r)} < 1$ 时,采纳 H_1 。假设检验的临界值为:

$$F_c(\theta_0, \theta_1, T) = \frac{T \cdot (d-1)/\theta_0}{\ln(d)} \quad (9)$$

式中: T 为检验试验过程中综合工作时间; r 为试验结束时出现的总失效次数。

当 $r \leq F_c$ 则判断硬件可靠性合格。反之,则可靠性拒收。

对给定显著水平 α ,则 θ 的单侧置信下限估计为:

$$\theta_L = \frac{2r}{\chi_{\alpha}^2(2r+2)} \hat{\theta} = \frac{2T}{\chi_{\alpha}^2(2r+2)} \quad (10)$$

式中, $\hat{\theta} = \frac{T}{r}$ 为硬件 MTTF 的点估值。

1.5 系统可靠性综合与评定

软件、硬件分系统经可靠性检验后,综合给出全系统试验结论。若两个分系统试验结果均合格,则系统可靠性合格。若其中一个分系统未通过检验,则全系统可靠性检验结果为不合格。

在置信度 $1 - \alpha$ 条件下,系统的可靠性置信下限 R_{sl} 为:

$$R_{sl} = \underline{R}(N, \alpha) \times R_{rl} \quad (11)$$

式中, R_{rl} 为硬件系统对应的任务可靠度下限值。

$$R_{rl} = l^{-r/\theta_L} \quad (12)$$

2 关键技术问题及解决办法

2.1 可靠性分配模型的选取

采用上述的可靠性试验评价方法,如何将系统的可靠性指

标合理分配给硬件系统和软件系统,就成为必须解决的首要问题。公式(2)比例因子的确定需要做大量的统计,公式(3)专家评分分配法的分值,需要检验人员具有丰富的工程实践经验方可给出,工程实施有一定难度。公式(1)将系统可靠性粗分为软件、硬件两部分,略显粗糙,但简便易操作。文献[2]以计算机为例,认为软件的 θ 软可定为大体与硬件 θ 硬相近,视情适当调整时,相差不宜超过几倍”。考虑到新武器装备的实际,笔者认为采用公式(1)等比例分配模型较为可行。

2.2 软件输入空间的确定

软件输入一组输入,按照任务书规定的处理法则,给出一组输出。软件可能输入点来构成了软件可靠性试验的输入空间。软件输入空间是可靠性测试检验的一项基础性工作,科学确立相当重要。输入空间的确定,应包括正常情况下所有满足输入要求的点,还应考虑到由于内外干扰产生的输入,比如实际可能发生的,而任务书中忽略的,所谓“不希望事件”。输入空间不能确立的过小,若输入空间确立的过小,将会影响评价的可信性。软件可靠性测试空间不能仅使用研制者提供的数据。

2.3 软件输入空间的使用

应用公式(4)~(7)软件可靠性评价模型,要求输入点的使用一定要随机抽取。由于很难确定测试数据应采取何种分布能符合实际情况,为保证测试数据的独立同分布,可采用均匀分布的方法进行测试数据的抽取模式,从输入空间中随机取出一个点进行测试,每个测试点编号为 n ,已经抽取过的数据再次被测试没有意义,所以在每次抽取后,应注意将该编号从抽取队列中去除。

2.4 试验实施及分系统信息的互用

武器系统的任务可靠度是指在规定的条件下,系统完成一次规定任务,如一次飞行、一次火控、一次发射等的能力。因此,每次测试数据记录应根据确定的任务剖面,从输入点开始,到这次任务执行完成为止。

根据软件的失效机理,只有产生了能够执行到有缺陷的部分程序的输入条件,才能使软件丧失在规定的限度内执行所要求的功能的能力。因此,软件的可靠性检验可单独进行,其测试过程产生的硬件可靠性信息可计入硬件可靠性统计。若软件可靠性所有的输入点测试完成后,硬件可靠性仍未达到接收/拒收判别条件,则可选用软件测试输入空间的任意一个值,重复进行系统执行任务的操作,直到达到硬件可靠性给出结论为止。

3 应用举例

某导弹火控系统的可靠性指标为:任务时间 2 小时、任务可靠度 0.95。按照式(1)等分配法分配给 $R_r = R_r = R_r^{1/2} = 0.9747$ 。按式(8)硬件分系统折合成 MTTF = 78 小时。

将火控系统的完成导弹发射任务所需的射击扇面、目标距离、目标方位、目标速度、载舰航向、载舰速度、载舰纵摇角、载舰横摇角、环境风速、环境温度、海况等参数,分为 11 个因素 2 水平,与 4 种导弹射击方式进行输入空间设计,共有输入点为 $4 \times 2^{11} = 8192$ 。由式(6),在置信度 $\alpha = 0.8$ 情况下,检验软件可靠性 $R_r = 0.9747$ 所需的输入点个数为 62。应用随机函数 RND(),随机抽取输入点值 $n = \text{INT}[(8192 \times \text{rnd}()) + 1]$ 。

取鉴别比 $d = 2$ 。根据式(8)、(9),确定指数寿命型的硬件

分系统可靠性检验方案为:硬件分系统累计任务工作时间 108 小时,出现的失效次数 ≤ 2 ,则判定其可靠性合格。

假设现场测试过程中,系统累计工作到 $T = 108$ 小时,出现失效故障 $r = 1$,则判断硬件分系统的可靠性合格,由式(10),在置信度 $\alpha = 0.8$ 下,其置信度下限估计为 $\theta_L = \frac{2T}{\chi_{\alpha}^2(2r+2)} = \frac{2 \times 108}{\chi_{0.2}^2(2 \times 1 + 2)} = 64.26$ 小时,折合任务可靠度下限为 $R_{yL} = l^{-\frac{1}{\theta_L}} = l^{-\frac{1}{64.26}} = 0.9694$;软件测试到第 60 个点时,出现 1 次失效故障,则判定该系统软件可靠性不合格,此时软件可靠性在置信度 $\alpha = 0.8$ 的下限估计为 $R(60, 0.2) = 0.2^{1/60} = 0.9735$ 。综合系统的可靠性检验结果为不合格,采用式(11)、(12)给出其下限估值为: $R_{sL} = R(N, \alpha) \times R_{yL} = 0.9735 \times 0.9694 = 0.9437$ 。

4 结束语

文中阐述的软硬件分统结合的武器装备可靠性试验方法,在实际工程应用中,一些具体问题,如科学分配系统可靠性指标、合理充分的设计软件分系统输入空间等,需要根据具体装备的特性和工程实际情况予以解决。

针对海军新型武器装备发展给试验鉴定提出的新问题,寻

求办法予以解决,确保试验任务高标准、高质量完成,意义极为重大。本文在这一方面做了一些研究探讨,相信会对靶场相关工作的开展有借鉴作用。

参考文献:

- [1] 张岳林,杨网成. 海军信息战作战指挥研究[J]. 南京:海军指挥学院,2011.
- [2] 何国伟. 软件可靠性[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [3] 陈学楚. 装备系统工程[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- [4] 何国伟. 可靠性试验技术[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [5] 周正伐. 航天可靠性工程[M]. 北京:中国宇航出版社,2007.
- [6] 曲宝忠,孙晓峰. 海军战术导弹试验与鉴定[M]. 北京:中国宇航出版社,2005.
- [7] 王正明. 导弹试验的设计与评估[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [8] 吴进煌,宋贵宝,王志勇. 舰空导弹贮存可靠性分配与预计方法研究[J]. 海军航空工程学院学报,2011(2):199-203.

(责任编辑 周江川)

(上接第 37 页)

图 4 表明,即便是双机协同攻击,随着攻击机与潜艇初始攻击距离的增大,鱼雷命中概率也明显下降;当攻击机与潜艇初始攻击距离为 2 000 ~ 3 000 m 时,潜艇纯机动规避和使用噪声干扰器且机动规避时的鱼雷命中概率相差不大,而初始攻击距离在 3 000 m 以上时,二者的命中概率相差越来越大,说明潜艇单纯机动规避,不足以对抗双机协同攻击。因此,应尽量采用双机协同攻击并适当缩短攻击机与潜艇初始攻击距离。

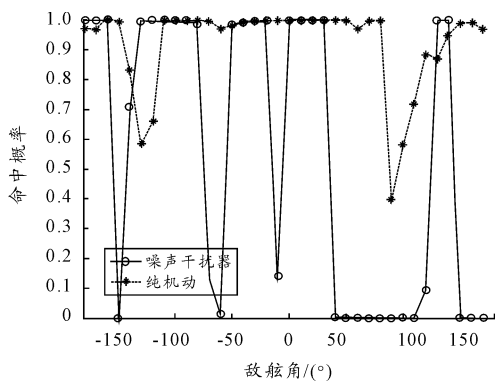


图 5 命中概率随敌舷角变化图

图 5 表明,双机协同攻击,当潜艇使用噪声干扰器并机动规

避时,鱼雷的命中概率会受到较大影响。只有当攻击机初始敌舷角位于 $0^\circ \sim 30^\circ$ 、 $130^\circ \sim 140^\circ$ 、 $-20^\circ \sim -50^\circ$ 、 $-160^\circ \sim -180^\circ$ 等时,鱼雷的命中概率才与目标规避机动时相差不大,说明当潜艇使用噪声干扰器并采取机动规避措施时,鱼雷的命中概率和初始敌舷角关系密切。因此,应选择合适的初始敌舷角对潜艇发起攻击。

综上分析,在对抗条件下,双机协同前飞投雷依然能够满足作战需要。要取得相同的作战效果,双机协同攻击所需的初始条件较为宽松。因此可得出结论:双机协同前飞投雷是舰载直升机反潜的有效方式之一。

参考文献:

- [1] 孙明太. 航空反潜战术[M]. 北京:军事科学出版社,2003.
- [2] 肖锋. 噪声干扰器对抗声自导鱼雷效果仿真研究[J]. 舰船论证参考,2007(4):45-48.
- [3] 孟庆玉,张静远,宋保维. 鱼雷作战效能分析[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [4] 陈春玉. 反鱼雷技术[M]. 北京:国防工业出版社,2003.

(责任编辑 鲁进)