

新型雷达装备系统性能可靠性评估

黄建新¹, 边亚琴², 张胜涛¹, 周林¹

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 空装驻西北地区军代室, 陕西 西安 710043)

摘要:装备系统可靠性定量评估一直是军用产品可靠性工作的重要项目之一。提出了装备的工作性能可靠性问题是评估雷达装备系统性能可靠性的基本出发点,对雷达装备系统性能可靠性进行了定义,根据使用条件的限制,将雷达装备系统性能可靠性分为狭义工作性能可靠性和广义工作性能可靠性;通过雷达装备系统性能可靠性的分析,得出雷达装备系统性能可靠性是一个表明雷达装备工作性能可以保持多长时间的参数,是评估雷达装备效能的重要指标,提出从狭义工作性能可靠性和广义工作性能可靠性两方面评估新型雷达装备系统性能可靠性,并给出了基于狭义工作性能可靠性和广义工作性能可靠性的雷达装备系统性能可靠性评估模型,为装备维修决策、制定相关维修策略提供了科学依据。

关键词:新型雷达装备;性能可靠性;评估

中图分类号: TN956 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)05-0057-05

由元器件和结构件组成的雷达装备系统,质量水平主要由性能指标和可靠性指标表征。从工程角度看,随着可靠性理论与实践的发展,可靠性水平取决于装备在工作期间发生故障的频率,而装备是否发生故障是用性能失效判据来裁定的,促使人们重视装备的技术性能和性能可靠度问题^[1-6]。以往评估雷达装备系统可靠性时,是以能否保证正常开机工作运行安全和能否保证开机工作作为出发点,至于工作性能是否达到要求,很少考虑。本文根据新型雷达装备系统性能可靠性分析,提出从狭义和广义工作性能可靠性两方面实现装备系统性能可靠性评估。

1 雷达装备系统性能可靠性的含义

1.1 雷达装备系统性能可靠性评估的出发点

以往评估雷达装备系统的可靠性,一般只以能否保证正常开机工作运行安全和能否保证开机工作作为出发点。若能保证开机工作,不影响正常工作运行安全,则雷达装备处于良好状态;只有部件损坏或系统不能正常运行,保证不了雷达装备安全开机工作,才认为雷达装备处于故障状态。至于工作性能是否达到要求,一般很少考虑。如某些性能随装备使用时间增长后已达不到设计规定的工作性能参数,从常规的角度出发,认为该装备是良好的,但从作战使用角度看,则属于故障状态。这说明雷达装备的工作性能参数由于使用时间增长、环境条件变化等因素的影响而逐渐产生偏差,以致不能满足使用要求。因此,必须对性能偏差提出一定的要求,来满足装备的使用要求。也即从性能角度来看,也存在可靠性问题。这是本文提出评估雷达装备系统性能可靠性的基本出发点。

1.2 雷达装备系统性能可靠性的定义

雷达装备系统性能可靠性是指雷达装备在规定的工作条件下,规定的工作时间内,其性能参数满足规定允许限要求的能力。根据使用条件的限制,它又可分为狭义工作性能可靠性和广义工作性能可靠性^[7]。只要有一个工作性能参数超出允许限要求,即为故障,该故障定义的工作性能可靠性就是狭义工作性能可靠

收稿日期:2007-11-20

基金项目:国家“863”计划资助项目(2007AAX01105)

作者简介:黄建新(1969-),甘肃临夏人,博士,主要从事装备维修保障研究;E-mail: hlx692003@yahoo.com.cn

性;雷达装备在部队实际使用中,对某些工作性能参数要求并不十分严格,可放宽要求,当某项或某几项对工作性能有决定意义的参数超出允许限要求,则雷达装备为故障状态,以这种故障定义的工作性能可靠性为广义工作性能可靠性。

1.3 雷达装备系统性能可靠性分析

雷达装备系统性能可靠性是一个表明雷达装备工作性能可以保持多长时间(可称为性能寿命)的参数,是评估雷达装备效能的重要指标。传统意义上的可靠性只考虑了雷达装备能否保证安全开机工作,并不能显示出雷达装备保持其工作性能的程度^[8-9]。性能可靠性的提出就是给出了一个这样的参数。

狭义工作性能可靠性对雷达装备的每一个工作性能参数都提出了要求,比较严格、科学;但在工程实践中,如果对每一个参数的可靠性都严格要求,代价就很大,而且也不必要。因此,广义工作性能可靠性用一项或几项最能体现雷达装备性能的参数来定义其性能可靠性是比较适合工程实践要求的。

2 新型雷达装备系统性能可靠性评估模型

根据以上对雷达装备系统性能可靠性的分析,可从狭义工作性能可靠性和广义工作性能可靠性两方面评估新型雷达装备系统性能可靠性。

2.1 狭义工作性能可靠性评估

2.1.1 装备系统性能可靠度的求解

装备系统技术性能的失效,按其故障性质可分为2类^[10]:一类是由突发性故障引起的突发性失效(如元器件损坏);一类是由渐变性故障引起的退化性失效(如参数漂移)。若用同一个失效判据去检验装备的性能指标,无论是突发性故障还是渐变性故障,都可用统一的性能可靠度来表征装备系统的可靠性水平。因此,装备系统的可靠度应是上述2种可靠度的综合,即:

$$R = R_s R_p \quad (1)$$

式中: R 为装备系统可靠度(实际就是装备系统所有性能指标可靠性的综合),即装备不发生突发性失效和退化性失效的概率; R_s 为装备系统发生突发性失效的可靠度,即装备不发生突发性失效的概率; R_p 为装备系统发生退化性失效的可靠度(称渐变可靠度),即装备不发生退化性失效的概率。

当装备系统有 m 个独立的性能指标时,

$$R_s = \prod_{i=1}^m R_{si} = \prod_{i=1}^m (1 - \lambda_{si}) = \prod_{i=1}^m (1 - r_i/T_i), R_p = \prod_{i=1}^m R_{pi} \quad (2)$$

$$R = \prod_{i=1}^m R_i = \prod_{i=1}^m R_{si} \prod_{i=1}^m R_{pi} = \prod_{i=1}^m (1 - r_i/T_i) R_{pi}$$

式中: r_i 为每一性能指标在指定时间内发生突发性失效的次数; T_i 为该性能指标累计工作(检测)时间。

对整机装备而言,每一个性能指标的工作时间是相同的,因此每一性能的突发性失效次数应相加,与现在常用的可靠性观测值统计表达式相似,即:

$$R = (1 - 1/\hat{\theta}) \prod_{i=1}^m R_{pi}, \quad \prod_{i=1}^m R_{si} = \prod_{i=1}^m (1 - r_i/T_i) = 1 - \sum_{i=1}^m r_i/T_i = 1 - 1/\hat{\theta} \quad (3)$$

式中, $\hat{\theta}$ 为为装备可靠性观测值。

根据文献[11],一般雷达装备系统的性能指标有4种形式,即

对称型: $r_0 \pm \Delta r$,例如,雷达测距精度 $\Delta R = (2 \pm 0.5) \text{m}$;

下限型: $a \leq r_i$,例如,接收机灵敏度 $S_{\min} \leq -120 \text{dBmW}$;

上限型: $b \geq r_i$,例如,发射机功率 $P \geq 1000 \text{W}$;

双限型: $a \leq r_i \leq b$,例如,雷达测距范围 $2 \text{km} \leq R \leq 800 \text{km}$ 。

无论以何种形式表示的装备系统性能指标,对它进行检测时,其值都是时间变量。该变量值因受到多种偶然因素(如气温、机械应力、电应力等)的影响,一般呈正态分布。在求解装备系统渐变型失效的性能可靠度时,可以先求解性能指标 V_i 正态分布的平均值 V_a 和标准离差 σ ,然后再进行正态函数积分得到结果。表1列出对应4种性能指标表示形式的计算式。表1中 $V_a = V_i$ 的正态分布均值, $\sigma = V_i$ 的标准离差, $\Phi_a^{(k)} = \int_0^k (1$

$-\sqrt{2\pi}e^{-(z^2/2)}dz, k$ 为各式括号内的内容。

具体计算步骤:

第1步 由试验测得装备系统性能指标值变量(在确定的时间内等间隔连续测量读取性能指标值);

第2步 对参数进行正态分布检验,剔除异常值;

第3步 求出平均值 V_a 和标准离差 σ ;

第4步 根据该性能指标的表达式类型,选

取相对应的计算公式,把 V_a 和 σ 代入求出渐变可靠度值;

第5步 按装备系统性能可靠度的综合模型,把每个性能指标的渐变可靠度和系统突变可靠度的值代入,从而求得装备系统性能可靠度。

2.1.2 狭义工作性能可靠性评估模型

由性能可靠性定义可知,当雷达装备系统有 m 个独立的性能指标(雷达探测能力、分辨力、精度、噪声改善因子、箔条改善因子、地杂波改善因子、反截获因子、反识别因子、机动性因子、目标容量)时,评估其狭义工作性能可靠性可用串联模型,如图1所示。由图1可知,雷达装备系统狭义工作性能可靠度为

$$R = R_1 R_2 \cdots R_m = \prod_{i=1}^m R_i \quad (4)$$

式中, $R_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 为各项工作性能可靠度。雷达装备系统最大探测能力为

$$R_1 = P\{S_{\max} \geq S_{n\max}\}$$

式中: S_{\max} 为最大探测能力; $S_{n\max}$ 为标准最大探测能力。

2.2 广义工作性能可靠性评估

2.2.1 工作性能综合效用值的概念

为了定量评估广义工作性能可靠性,引入工作性能综合效用值概念,即以雷达装备系统工作性能参数为目标值,按照多目标效用函数理论计算得出的^[12],能够衡量雷达装备系统工作性能的综合效用值,用 X 表示。

2.2.2 雷达装备系统工作性能综合效用值的计算方法

1) 计算原理。假设某一定量型多目标评价的目标集为 $G = \{G_1, G_2, \dots, G_m\}$, 其权重向量为

$$w = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T, \sum_{j=1}^m w_j = 1$$

评价对象集 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 评价对象 A_i 对目标 G_j 的属性值为 $Y_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$; 矩阵 $Y = (Y_{ij})_{n \times m}$ 表示评价对象集 A 对目标集 G 的属性矩阵,即工作性能参数矩阵。

2) 计算步骤。

第1步 建立工作性能参数矩阵 Y 为 $Y = (Y_{ij})_{n \times m}$

以 n 部雷达装备为评价对象,组成评价对象集 A 。根据经验和分析,选取适当的工作性能参数进行统计,组成参数矩阵,如表2所示。该矩阵也就是评价对象集 A 对目标集 G 的属性矩阵。

第2步 求效用值矩阵。根据逻辑判断或经验规定出效用曲线的类型,如直线型、折线型、双曲线型。然后按一定方向给出效用曲线的数学表达式,即为效用函数。表3给出了雷达装备性能参数的效用函数表

表达式。利用效用函数将参数的目标值转换成效用值 (Z_{ij}), 即可得效用值矩阵 Z 为

$$Z = (Z_{ij})_{n \times m} \quad (5)$$

表1 4种性能指标表示形式的计算式

Tab. 1 Four type performance index calculating formula

性能指标表达式	渐变型可靠度计算公式
对称 $V_a \pm \Delta V$	$2\Phi_a(\Delta V/\sigma)$
下限 $a \leq V_i$	$0.5 + \Phi_a[(V_a - a)/\sigma]$
上限 $b \leq V_i$	$0.5 + \Phi_a[(b - V_a)/\sigma]$
双侧 $a \leq V_i \leq b$	$\Phi_a[(V_a - a)/\sigma] + \Phi_a[(b - V_a)/\sigma]$

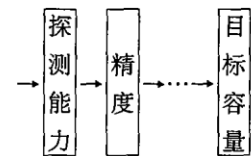


图1 狭义工作性能可靠性串联模型

Fig. 1 Model on the narrow sense reliability of working performance

表2 工作性能参数矩阵

Tab. 2 Working performance parameter matrix

型号	1	2	...	n
探测能力	Y_{11}	Y_{12}	...	Y_{1n}
精度	Y_{21}	Y_{22}	...	Y_{2n}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
目标容量	Y_{m1}	Y_{m2}	...	Y_{mn}

表3中各性能参数的效用函数表达式中的相关参数见文献[13],这里不再赘述。

第3步 求性能参数的权重。运用AHP法确定各参数的权值,得到权值向量 $w = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ 。

第4步 计算综合效用值。运用加权法和连乘法、最小二乘法等方法将效用值合并成一个综合效用值。如以加权法和法为例,计算出各部雷达装备系统工作性能综合效用值 X_i 为

$$X_i = Z_{ij} W_j$$

2.2.3 广义工作性能可靠性评估模型

计算出雷达装备系统工作性能综合效用值后,则广义工作性能可靠度 R^* 为

$$R^* = P\{X \geq X_l\} \quad (6)$$

式中, X_l 为雷达装备系统工作性能综合效用值的允许下限。

从广义工作性能可靠性的定义可知 R^* 的经验公式为

$$R^* = \frac{X \geq X_l \text{ 的雷达装备数}}{X \geq X_l \text{ 的雷达装备数} + X < X_l \text{ 的雷达装备数}}$$

因此,广义工作性能可靠度可通过以下步骤求出:

- 1) 选取所要评估的雷达装备,根据以上计算综合效用值的步骤,求出各部雷达装备系统工作性能综合效用值;
- 2) 以雷达装备系统的工作性能综合值为样本,分析其统计规律,确定其分布函数类型;
- 3) 求出工作性能综合效用分布函数,即可利用该函数求雷达装备系统广义工作性能可靠度。

3 结束语

由于以往评估雷达装备系统可靠性存在的不足,本文根据新型雷达装备系统性能可靠性的分析,给出了雷达装备系统性能可靠性的定义,提出从狭义工作性能可靠性和广义工作性能可靠性两方面实现对新型雷达装备系统性能可靠性的评估,可验证雷达装备维修策略制定的有效性和合理性。

参考文献:

- [1] 徐廷学,顾钧元,高鸣,等. 无失效试验数据系统可靠性评估方法研究[J]. 海军航空工程学院学报,2008,23(1):95-97.
XU Tingxue, GU Junyuan, GAO Ming, et al. Research on Reliability Estimation Method for Zero-failure Test Data[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautics University, 2008, 23(1):95-97. (in Chinese)
- [2] 俞敏雯,曾辉,刘正高. 系统可靠性评估技术发展综述[J]. 质量与可靠性,2005,23(2):32-35.
YU Minwen, ZENG Hui, LIU Zhenggao. System Reliability Evaluation Technology Development Summarizes [J]. Quality and Reliability, 2005, 23(2):32-35. (in Chinese)
- [3] Canclla H, Khadar M. The Recursive Variance-reduction Simulation Algorithm for Network Reliability Evaluation[J]. IEEE Transaction on Reliability, 2003, 17(2):52-54.
- [4] David W C, JIA C L. System Reliability Optimization With k-out-of-n Subsystems, International Journal of Reliability [J]. Quality and Safety Engineering, 2000, 7(2):129-142.
- [5] Huseby A B, Naustdal M. Improved Simulation Methods for System Reliability Evaluation [M]. New York: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2003.
- [6] Yu Dan, Guo Kui. An Introduction to Package RAP for System Reliability Evaluation - basic Frame and Methods: Proceeding of ICRMS 2001 [C] Dalian: [s. n.], 2001:145-150.

表3 雷达装备性能参数的效用函数表达式

Tab. 3 Function expression of radar equipment performance parameter

雷达性能参数	效用函数
探测能力	$R_i = \sum_{i=1}^K R_{mi}^3 \theta_{ci} / T_s$
分辨力	$V_F = R^2 C \tau \theta_a \theta_c / T_d$
精度	$V_J = R^2 C \tau \theta_a \theta_c / T_d$
噪声改善因子	$I_N = [T_{sa} R_j^2 G_s ^2 B_{gf} / P_j G_r \lambda^2]^{1/4}$
箔条改善因子	$I_c = 1/R(\sigma_c/\eta)^{1/2} (G/\tau)^{1/2} (I_{ch})^{1/2}$
地杂波改善因子	$I_g = 1/R\phi/h_a \sigma_i / \sigma^0 B_s \lambda I_{gh} / \theta_a$
反截获因子	$Y = \beta G_s / P_i$
反识别因子	$T_{id} = \beta B_{og} / B_s K_p T_s / T_d T_{pmax} / T_{pmin} \tau_{max} / \tau_{min}$
机动性因子	$I_j = A_1 t_{jk} + A_2 t_j + A_3 N$
目标容量	$I_y = \text{批次} / T_s$

- [7] 陈廷楠,孟文龙. 关于飞机性能可靠性的探讨[J]. 飞行力学,2000,18(1):42-44.
CHEN Tingnan. MENG Wenlong. The Discussion on Reliability of Flight Performance[J]. Flight Dynamics,2000,18(4):42-44. (in Chinese)
- [8] GJB813-1990. 可靠性模型的建立和可靠性预计[S].
GJB813-1990. Establishment of Reliability Model and Reliability Prediction [S]. (in Chinese)
- [9] GJB451-1990, 可靠性维修性术语[S].
GJB451-1990. Reliability and Maintenance Terms [S]. (in Chinese)
- [10] 杨志飞. 装备性能可靠性研究[J]. 电子质量,1994,15(8):22-24.
YANG Zhifei. Equipment Performance Reliability Research[J]. Electronic Quality,1994,15(8):22-24. (in Chinese)
- [11] 胡昌寿,何国伟. 可靠性工程——设计、试验、分析、管理[M]. 北京:宇航出版社,1988.
HU Changshou, HE Guowei. Reliability Engineering: Design, Examination, Analysis, Management [M]. Beijing: Space Navigation Publishing Company, 1988. (in Chinese)
- [12] 乔伊科奇 A. 多目标决策分析及其在工程和经济中的应用[M]. 北京:航空工业出版社,1987.
Joykechy A. Multi-object Decision Making Analysis and Application in Engineering and Economy Field[M]. Beijing: Navigation Industry Publishing Company, 1987. (in Chinese)
- [13] 杨秉喜,后小明,陈怀春,等. 雷达综合技术保障工程[M]. 北京:中国标准出版社,2002.
YANG Binxi, HOU Xiaoming, CHEN Huaichun, et al. Radar Colligation Technology Support Engineering [M]. Beijing: Chinese Standard Publishing Company, 2002. (in Chinese)

(编辑:田新华)

The Evaluation of the Performance Reliability of New Type Radar Equipment System

HUANG Jian-xin¹, BIAN Ya-qin², ZHANG Sheng-tao¹, ZHOU Lin¹

(1. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2. Military Representative Room in Northwest by Arms Equipment Department of Air Force, Xi'an 710043, Shaanxi, China)

Abstract: The evaluation of equipment system performance reliability is one of the most important items in the reliability evaluation work of the armament products. In the past, few consideration is given to the problem whether the radar equipment system working performance can reach the requirement or not, while evaluating the radar reliability of working performance (RWP). This paper shows that the problem of the equipment reliability is a basic starting point in the evaluation of radar equipment system performance reliability and defines the reliability in performance of radar equipment system. According to the limitation of the using condition, the reliability in performance of radar equipment system is defined as a narrow sense working performance reliability and a broad sense working performance reliability. Through the analysis of the radar equipment system performance reliability, we get to know that the radar equipment system reliability is a parameter to tell how long the radar equipment performance can hold on, and an important guide line in evaluating the radar equipment efficiency. In this paper, the evaluation of the performance reliability of new type radar equipment system is carried out from both the narrow sense working performance reliability and the broad sense working performance reliability, and an evaluation model of the new type radar equipment system working performance based on the narrow sense RWP and broad sense RWP is given, which can provide a scientific basis for the equipment maintenance decision-making and the establishment of related maintenance strategy.

Key words: new type radar equipment; performance reliability; evaluation