http://www.kekaoxing.com
维普资讯 http://www.cqvip.com

2006年 12月 装备指挥技术学院学报 December 2006
第17卷 第6期 Journal of the Academy of Equipment Command & Technology Vol. 17 No. 6

地空导弹武器系统可靠性分析及指标论证研究

靳 娜， 娄寿春
（空军工程大学导弹学院 指挥工程系，陕西 三原 713800）

摘 要：可靠性是武器系统战技指标的重要内容，如何将比较成熟的可靠性理论应用到具体的装备可靠性论证工作当中，是一个值得研究的课题。针对地空导弹武器（surface-to-air missile，SAMs）系统这种具体类别的武器装备，在分析武器系统组成和战斗工作时序的基础上，对其工作可靠性逻辑和可靠性指标选取论证进行了研究，并给出了2个指标的计算思路，最后，讨论了地空导弹武器可靠性增长试验中的问题。

关 键 词：地空导弹武器；可靠性逻辑；可靠性指标；可靠性增长试验
中图分类号：TJ 762.13
文献标识码：A **文 章 编 号**：1673-0127(2006)06-0061-05

Demonstration Research on the Reliability Analysis and Index for the Surface to Air Missile Weapon System

JIN Na， LOU Shouchun
(Department of Command Engineering, Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan Shaanxi 713800, China)

Abstract: Reliability is one of the most important tactical and technical indexes for the surface-to-air missile weapon system. How to imply the theory of reliability into unique weapons is a valuable question for discussion. The paper analyzes the reliability logic and chosen of the reliability index of the surface-to-air missile weapon system based on the discussion of its system composition and combating scheduling. And the calculation of two kinds of index is given as an example. Last, some discussion about reliability increase has been made as a reference.

Key words: surface-to-air missile (SAMs); reliability logic; reliability index; reliability increase test

地空导弹武器系统的可靠性指标，是其战术技术指标的重要组成部分，是军方极为重视的性能指标之一。过低的可靠性指标将影响武器装备的作战使用，但过高的指标则可望而不可及，增加了武器装备研制的难度、周期和成本，甚至导致研制工作的失败。合理确定可靠性指标是武器系统通用性论证中要解决的一个重要问题。地空导弹武器系统的结构和采用的技术较为复杂，各分系统的技术状况、任务剖面、工作时间和工作环境有一定差别。虽然，可靠性研究在我国的基础研究中取得了一些成绩，但针对地空导弹武器系统这种具体的武器装备类别，进行可靠性研究，不但要有正确的理论指导，而且要根据武器系统具体的结构和技术特征、工作使用情况，论证其可靠性指标要求，形成便于操作的程序和方法，即把可靠性研究的基础工作和应用研究结合起来，不仅具有

收稿日期：2006-03-28
作者简介：靳 娜(1979—)，女(汉族)，陕西三原人，博士研究生，pinkcici_jinna2007@126.com；
娄寿春(1940—)，男，教授，博士生导师.

维普资讯 http://www.cqvip.com

很多实践意义，同时可以丰富我国今后研制新型地空导弹武器可靠性指标的论证工作[1]。

1 组成与作战过程

地空导弹武器系统的概要组成为：指挥控制车，雷达车，通信车，红外跟踪车，发射车 n 辆、导弹 m 发(视具体型号而定)；变频车，定位定向车，其他辅助设备(如抗反辐射导弹诱骗设备等)。下面介绍几个常用的名词术语：

地面设备——武器系统中除导弹外的设备总和，主要有指挥控制车、雷达车、红外跟踪车、发射车及电源车；

发射通道——由指挥控制车、雷达车和一个发射车组成的导弹发射控制通道；

拦截循环——对分配给发射通道的一个目标，从雷达发现目标到击中该目标所需的时间；

战斗周期——由一次空袭决定的武器系统作战时间。

一个概要的地空导弹武器系统作战过程为：指挥控制车通过通信设备接收上级的命令和目标指示信息，雷达向指挥控制车上报目标参数、敌我信息。指挥控制车将以上信息及发射车上导弹的状态进行处理，向发射车分配目标，发射车开机，导弹加电，指挥控制车给出导弹的初始装订参数和导弹发射命令。对每个发射车，指控车适时给出某方向的一个目标，导弹发射后，按照一定的制导方式飞向目标直至击中目标。

2 可靠性逻辑与指标选取

2.1 地空导弹武器工作可靠性逻辑分析

根据地空导弹武器系统的组成及其作战过程情况，可分析其作战工作时序，如图1所示。

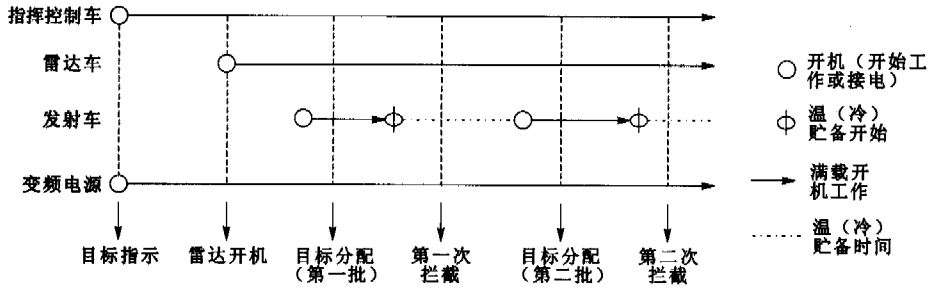

图1 某型地空导弹武器系统作战工作时序(对一个发射通道)

可见，武器系统地面设备各分系统工作时间并不相同。指挥控制车和雷达车在整个作战周期内处于连续工作状态；发射车处于间歇满负载工作状态，在工作间歇处于温贮备状态；而导弹则处于一次加载工作状态，直至击毁目标。所以，地面设备的可靠性逻辑图，如图2所示。

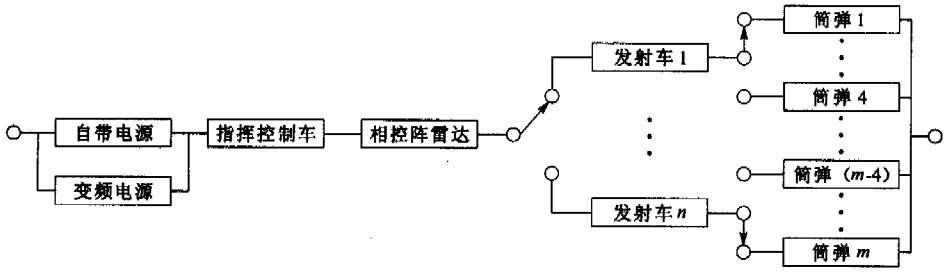

图2 某型地空导弹武器系统可靠性逻辑图(不含通信车)

从可靠性逻辑图中可以看出，地空导弹武器系统地面设备的可靠性逻辑，是一个具有多重旁联的复杂系统。指挥控制车与雷达车串联，发射车与指挥控制车、雷达车组成旁联系统，导弹与发射车组成旁待系统。当武器系统每次只拦截一批目标时，无论武器系统采用何种配置，指控车可以选择 n 台发射车中的一个，指挥控制车与发射车组成 $(n,1)$ 旁待系统，如对一批目标发射2发导弹，则发射车可选择 m 枚导弹中的2个，发射车与导弹组成 $(m,2)$ 旁待系统；同理，如拦截 k 批目标，对每批目标发射 l 发导弹，则指挥控制车与发射车组成 (n,k) 旁待系统，发射车与导弹组成 (m,l) 旁待系统。由于地空导弹武器系统的可靠性逻辑为多重旁待系统，确定可靠性指标系列及指标时，必须考虑这一点。

2.2 地空导弹武器可靠性指标选取论证

通过对武器系统可靠性逻辑及作战工作过程的分析可知，如对系统采用单一指标来概括其可

http://www.kekaoxing.com
维普资讯 http://www.cqvip.com

靠性是不合理的,原因如下:

1) 各分系统的加载工作时间不同。

从图 1 各分系统的工作时序可以看出,指挥控制车、雷达车在整个战斗周期内处于连续工作状态,发射车处于加载工作——温贮备的间歇工作状态。由于各分系统的加载工作时间不同,每个战斗周期中它们实际的工作时间差别很大。据计算,理性情况下的一个拦截循环中,雷达车的工作时间是发射车的 3 倍。因此,对各分系统可靠性要求应区别对待,用一个可靠性指标值来概括对整个地面设备的要求,显然是不合理的,应分开考虑其可靠性指标值的大小。

2) 各分系统的重要度不同。

设在一个拦截循环中,对某个目标已经选定了发射车,则指挥控制车、雷达车、发射车等组成可靠性串联系统。在方案论证阶段,采用加权分配法给出各分系统可靠性指标。设第 i 个分系统的可靠性受 m 个因素影响,如果每个因素是独立的,其故障率与标准故障率的关系为

$$\lambda_i = \lambda \cdot W_i = \lambda \cdot \prod_{j=1}^{m} w_{ij}$$

式中:w_{ij} 为第 i 个分系统第 j 个因素的加权系数;W_i 为第 i 个分系统的总加权因子。

选取时一般考虑:工作环境条件、设备复杂程度、设备标准化程度等。良好地面条件下(如加有空调的指挥控制车、相控阵雷达车等)的设备,环境因子可取0.2～0.5;一般的地面固定设备可取1;设备复杂程度中,导弹发射车最简单,如发射车取 1,则雷达车可取 5～10;指挥控制车的标准化程度(采用的元器件总数与标准化元器件之比)最高,如果其加权因子取 1,雷达可取 4～5[2]。

综合考虑,雷达是武器系统中可靠性的薄弱环节,并处于连续工作状态,因此,系统可靠性指标的确定,必须抓住对作战可用度影响最大,提高可靠度最困难的关键分系统详细考虑,分开考虑其可靠性指标值的大小。

3) 冗余系统的寿命不符合指数分布。

研究地空导弹武器系统的组成,可得一个发射通道的可靠性逻辑,如图 3 所示。

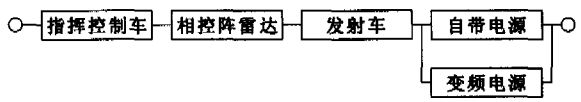

图 3　一个发射通道的可靠性逻辑

其中,指挥控制车、雷达车、发射车都自带电源,但它们都配有变频电源车,当自带电源发生故障时,变频电源立即接替供电,即变频电源是相应自带电源的冗余系统。

为研究方便,这里将自带电源与相应变频电源看成是结构相同的设备,其可靠度 $R(t)$ 服从失效率为常数 λ 的指数分布

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{1}$$

自带电源与相应变频电源组成供电系统的可靠度 $R_s(t)$,可用并联系统的可靠度表示

$$R_s(t) = 1 - F^2(t) = 1 - (1 - R(t))^2 = e^{-\lambda t}(2 - e^{-\lambda t}) \tag{2}$$

式中:$F(t)$ 自带或变频电源的不可靠度。

该并联系统的失效函数 $\lambda_s(t)$ 为

$$\lambda_s(t) = \frac{-R_s'(t)}{R_s(t)} = \frac{2\lambda(1 - e^{-\lambda t})}{(2 - e^{-\lambda t})}$$

从以上的 3 个方面可以看出,地空导弹武器系统的可靠性逻辑既有串联,又有并联和旁待,且冗余系统的失效函数不是常数,不能用平均无故障间隔时间(MTBF)的倒数表示。因此,选取地空导弹武器火力单元地面设备可靠性指标时,将火力单元地面设备简化为雷达车、指挥控制车和一部发射车 3 个分系统,并把它们的可靠性逻辑模型以串联方式表征,这样既便于研制方对武器系统的可靠性预计和设计,又便于军方清晰地检查、验收武器系统的可靠性指标。另外,为了突出分系统的重要度,除给出地面设备的可靠性指标外,还应给出主要分系统的可靠性指标。目前世界上多通道地空导弹武器系统,一般很少用一个可靠性指标来描述,需专门给出其关键分系统的 MTBF。例如,"爱国者"地空导弹武器系统,要求火力单元的 MTBF 为 29 h,同时提出相控阵雷达 54 h,指挥控制站 127 h,发射架 226 h,电源车 299 h。

在地空导弹武器系统可靠性指标研究当中,还应该考虑其关键分系统或部件的寿命特征,这也是军方十分关心的问题[3]。地空导弹武器系统的关键分系统多为电子装备。电子产品的寿命特征服从浴盆曲线:即包括早期故障、偶然故障和耗损故障 3 个阶段。偶然故障阶段的值即其寿命值。使用下面的模型估计

$$M_{TBF} = M_{TBF_0}(1 + \alpha)^T \tag{3}$$

式中:M_{TBF} 为退化后的平均无故障间隔时间;M_{TBF_0} 为使用期(寿命期)最佳平均无故障间隔时间;α 为退化率;T 为使用时间或寿命。退化率 α 可由其他相似装备的数据估计。

维普资讯 http://www.cqvip.com

3 指标值分析论证

根据以上分析，地空导弹武器系统可靠性指标系列可采用平均故障间隔时间(MTBF)、可靠度($R(t)$)、使用寿命(T)和平均修复时间(MTTR)。地面设备(指挥控制车、雷达车和一部发射车组成的串联模型)采用MTBF；电源车、通信车、定位定向车等采用MTBF，并大于指挥控制车MTBF；导弹采用飞行可靠度$R(t)$；给出指挥控制车、雷达车、发射车和电源的寿命T，维修性指标采用MTTR。

下面对反空袭情况下地面设备(雷达)可靠性预计和导弹可靠性指标进行分析计算。

地空导弹武器系统主要担负机动或固定的要地防空任务，根据近几十年来的几次局部战争空袭情况看，实施空袭方一般会采用多批次、连续突击的方式，这决定了地空导弹武器系统必须具有连续拦截能力，也要求雷达、指控和电源都有较长的正常无故障工作能力[4]。

首先分析武器系统反空袭作战的最小作战周期$T_{\min}$。设目标高度H，速度V_t，目标高低角ε_t，所以目标飞临保卫要地上方时间

$$t_f = H/V_t \cdot \sin \varepsilon_t$$

在无目标指示的情况下，雷达为发现目标必须提前开机搜索，为此，雷达对一批目标的搜索、跟踪时间应加20%的余量

$$t_f' = t_f(1+20\%)$$

考虑最坏的情况下，只有一套武器系统对某一主要方向进行防御，而敌人以单击跟进顺次空袭，每架间隔为ΔT，若对每个目标发射1发导弹，当n个发射车上的l(在每辆车配m发弹的情况下，$l = n \cdot m$)发导弹耗尽时，雷达最长工作时间为

$$t_{\max} = t_f' + (l-1)\Delta T$$

即在这段时间内雷达必须正常工作才能保障作战的进行，所以，反空袭作战的最小作战周期

$$T_{\min} = t_{\max} = t_f' + (l-1)\Delta T$$

理论分析和实践都证明，只要电子设备的元器件足够多，不管其中的元器件失效分布如何，经老练后，设备的可靠性符合失效率为常数λ的指数分布。所以，雷达在一个作战周期T中的可靠度[5]为

$$R(t) = e^{-\lambda T} = e^{-T/M_{TBF}}$$
$$M_{TBF} = \frac{1}{\lambda} \approx \frac{1}{K \cdot N \cdot \lambda_a} \quad (4)$$

式中：T为系统战斗周期(取最小作战周期的一定余量)；K为环境系统系数；N为雷达的元器件总数；λ_a为元器件平均失效率；雷达的元器件总数N、元器件平均失效率λ_a均可通过相似装备数据估计。

导弹的可靠性指标应取含可靠度的导弹杀伤概率，此时为导弹的飞行任务可靠度，计算如下

$$R_{mf} = R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_F \cdot R_A \cdot R_Z \quad (5)$$

式中：R_2，R_3，R_4分别为导弹的发射准备状态、主动飞行状态和被动飞行状态的可靠度；R_F，R_A，R_Z分别为导弹发动机、安全机构和战斗部的可靠度。如此计算出来的R_{mf}仅为理论上导弹的可靠度，还需考虑我国工业水平，利用导弹历史数据给以修正。

4 可靠性增长问题

新研武器系统的初始可靠性水平和使用初期可靠性水平必然低于其固有可靠度，这是由于研制、生产和制造中的一些缺陷机理引起的，因此，必须允许采用一定时间进行可靠性增长试验。如美国的“爱国者”地空导弹武器系统，大约经历了15 a的研制，到1982年将第一套兵器交给美国陆军防空炮兵部队，经部队使用后发现许多可靠性问题，美国军方强烈要求总承包商雷锡恩公司对已订货的装备重新放至流水线修理，并促使该公司在质量管理方面做了许多的改进，直到1985年才决定将“爱国者”向欧洲部署。

关于可靠性增长试验时间长短的预计，可由杜安模型推断

$$\ln \frac{M_{TBF_1}}{M_{TBF_2}} = m \cdot \ln \frac{T_1}{T_2} \quad (6)$$

式中：M_{TBF_1}为T_1时刻的M_{TBF}观察值；M_{TBF_2}为T_2时刻的M_{TBF}观察值；m为可靠性增长率，其值小于1。

m的取值，按照下列原则：产品的可靠性设计、管理程序严格，对出现的问题分析与采取措施得力，可取$m \geqslant 0.7$；否则只能取$m \geqslant 0.3$。考虑实际情况，这里可靠性增长率取$0.3 \leqslant m \leqslant 0.7$。这样，如果对火力单元的可靠性最低要求为$M_{TBF} = n_1(h)$，研制生产的样机初始$M_{TBF} = n_2(h)$，取$m = 0.5$，则有$\ln \frac{n_1}{n_2} = 0.5 \ln \frac{1}{T_2}$，即火力单元的可靠性达到$M_{TBF} = n_1(h)$要求，必须经过近$T_2$ a的使用。

另外一个在可靠性增长试验中要注意的问题

http://www.kekaoxing.com
维普资讯 http://www.cqvip.com

就是，关于武器系统的配置问题。因为火力单元最多可配 n 台发射车，发射车数量由 1 至 N 变化，且只需一个发射车正常工作时，发射车系统构成 $(N,1)$ 旁待系统，发射系统的可靠度为

$$R_f(t) = \sum_{i=0}^{N-1}((\lambda t)^i e^{-\lambda t}/i!) \qquad (7)$$

发射车数量不同，其可靠度也不同。

5　结 束 语

本文针对地空导弹武器系统的可靠性指标论证问题进行了研究。分析了其武器系统组成和可靠性逻辑，对其可靠性指标的选取进行了详细深入的讨论，并给出了反空袭情况下地面设备可靠度和导弹飞行可靠度计算的例子。可靠性理论的研究虽多，但针对具体类别的武器系统分析的并不多，这篇文章为地空导弹武器系统在可靠性研究实践方面提供了一个具体的思路和方法，把可靠性的基础研究和应用研究结合了起来。

参考文献　(References)

[1] 车庆军. 面向对象的系统可靠性模型与仿真[D]. 石家庄：燕山大学，2002：1-5.

[2] 陈炳生. 电子可靠性工程[M]. 北京：国防工业出版社，1988：63-70.

[3] BENGTSSON M. Condition based maintenance system technology-where is development heading[C]//Proceedings of the 17th European Maintenance Congress, Barcelona, Spain, 2004：132-138.

[4] 夏　泓. 电子元器件失效分析及应用[M]. 北京：国防工业出版社，1996：45-56.

[5] 张学渊，赵东明. 某新型雷达可靠性指标的论证[J]. 电子产品可靠性与环境试验，2000(5)：29-34.

（责任编校：李江涛）

参考文献著录规则实行新的国家标准

为进一步提高学报的编辑规范，使学报在国内外交流中达到共享文献信息资源的目的，本刊文后参考文献著录规则实行新的国家标准(GB/T 7714－2005)。新的著录标准已自 2006 年第 1 期开始实施，具体要求详见“征稿简则”。

文后参考文献是学术论文的重要组成部分，是作者良好学术作风的反映，是期刊文献计量评价的重要依据。为此，希望作者重视参考文献的标注，从真实引用的角度，努力增加引文数量，积极提供详细、准确的引文参数，配合编辑部不断提高学报的编辑质量。

《装备指挥技术学院学报》编辑部

2006 年 12 月 28 日