



武器装备研制项目的可靠性预计

程焰彬 鲁小强 吴三宝

高新技术的引进,使装备的复杂程度不断加强,需要的费用不断突破新高,必然要求系统性能不断完善。因此,可靠性作为衡量武器系统性能好坏的重要指标并贯穿武器系统设计、研制、使用的整个过程,被越来越多的人所重视。可靠性预计作为分析可靠性的重要手段在项目设计阶段大量运用,为设计方案优化、设计过程控制、进行可靠性试验等提供大量的依据,其作用过程见图1。本文重点介绍了可靠性预计的各类方法及特点,详细介绍了一种基于层次分析理论的模糊预计方法,并结合一种防空兵系统预研项目进行了实证研究。

难题。由于项目可靠性预计的复杂性和超前性,以及难以量化等特点,定性与定量相结合是一种有效的可靠性预计方法。传统的AHP法是请专家直接对系统可靠性概率进行打分,这对专家存在一定的难度,得到数据的离散性较大,数据的有效性得不到保证,势必影响评估结果的准确性。本文采用基于层次分析理论的模糊算法具有以下特点:①是一种定量与定性相结合的可靠性综合预计模型,结合了可靠性预计中的评分法、性能参数预计法,把模糊算法充实了到上、下限法中;②引入了可靠度因子的概念,将直接对可靠度大小的打分转化为对可靠度因子的打分,请专家对自己熟悉的内容进行评价,这样保证了评估的有效性和正确性。

二、基于层次分析理论的模糊预计模型

根据可靠性预计的定义,组成系统的元件、组件、分系统的可靠性来推测系统的可靠性。不难理解,系统可靠性预测 R 与分系统可靠度、关联程度和分系统权重有关,可以表示为可靠度(R_i)、关联程度(C)和分系统权重(A_i)函数,即 $R=f(R_i, C, A_i)$ 。可靠性因子 R_i 就是可靠性预计的似然估计是:

$$R_i = R_{if} \cdot C_i \cdot (A_{if})' \quad (1)$$

式中: R_{if} —— 分系统可靠度;

C_i —— 分系统相关系数;

A_{if} —— 分系统权重。

由于作战环境、生产管理、战备保养等模糊因素的影响,武器装备的完好与失效之间并没有明显的界限,用精确值描述武器装备可靠度仅是人们的一种简化处理方法。根据可靠性的定义,规定的条件和规定的时间也是模糊的,并且完成规

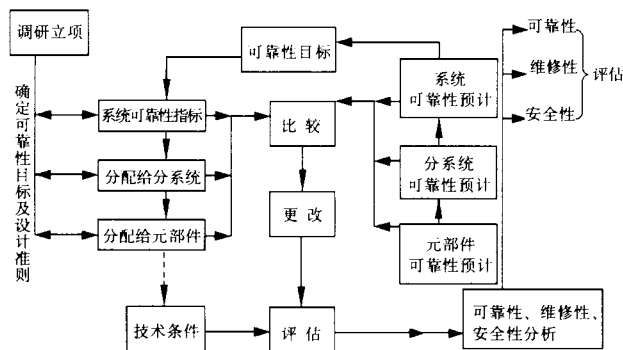


图1 可靠性预计运用

一、可靠性预计方法

工程中常用的可靠性预计方法见表1^[1]。

根据表中数据显示,对于机械、电子、光学一体化的复杂系统,有多种方法可以预计系统的可靠性参数。但是在实际应用中,由于客观基础数据不易获得,大量采用定性估计方法。从理论上分析,定性方法的准确性依赖于专家的经验,且存在数据处理上的难度。而大多数的定量方法大多是仿真方法,存在基础数据不足和求解复杂的

定的功能这种概念本身就是模糊的，因为武器装备状态从完好到失效是一动态过程，其间存在中间过渡区。因此，可靠性是模糊的，所以用模糊数描述可靠度更为科学合理。

1. 模糊数的表示^[2]

设论域 $L1$ 为实数域 R ， p 表示“大约为 m ”的模糊数， $\mu p(x)$ 为模糊数 p 的隶属函数，其取值范围为 $\mu p(x) \in [0, 1]$ 。隶属函数可采用多种形式，最简单而常用的是线性分布隶属函数。本文采用三角形隶属函数见图 2，公式表示为：

$$\mu p(x) = \begin{cases} 0 & (x < a) \\ (x-a)/(m-a) & (a \leq x \leq m) \\ (b-x)/(b-m) & (m \leq x \leq b) \\ 0 & (x > b) \end{cases}$$

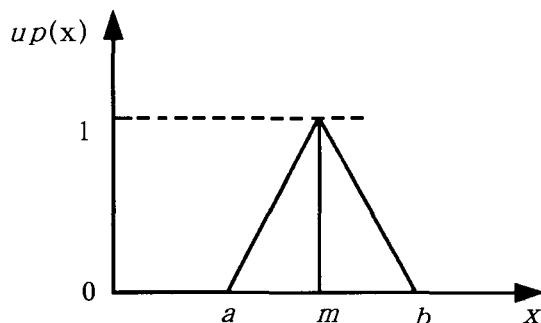


图 2 线性隶属度函数

由图 2 知，模糊数 p 可由参数 a 、 m 、 b 表征，简记为 $p = (a, m, b)^{[3]}$ 。实际应用中，为方便起见，可将模糊数表示为：

$$p = (m - \alpha, m, m + \beta) \quad (2)$$

α 、 β 按模糊性选取。信息越模糊， α 、 β 所

表 1 工程中常见的可靠性预计方法

预计方法	使用范围	使用阶段	简要说明	预计方法	使用范围	使用阶段	简要说明
元件计数法	电子类产品基本可靠性预计	方案论证及初步设计	根据元器件的品种及粗略的质量要求，查 MIL-HDBK-217(国外元器件) GLB/Z299A(国内元器件)，得到各元器件故障率数据，按产品中元器件数量将故障率相加 缺点：对于机械、机电系统不能进行可靠性预计	评分法	机械、机电类产品。产品中仅个别单元有故障数据基本或任务可靠性预计	方案论证及初步设计	专家根据其经验，按几种因素（如复杂度、环境、技术水平等）对产品的各单元进行评分。通过已知故障率单元的数据，推算出其他单元的故障率。按数学公式算出产品的故障率 缺点：评估的好坏主要基于专家对系统的认识
应力分析法	电子类产品基本可靠性预计	详细设计	根据元器件的品种、质量水平、工作应力及环境应力等因素，查 MIL-HDBK-217(国外元器件) GLB/Z299A(国内元器件)，得到各元器件故障率数据，按产品中元器件数量将故障率相加 缺点：对于机械、机电系统不能进行可靠性预计	性能参数预计法	比较复杂的机械、电子、机电系统或分系统基本或任务可靠性预计	方案论证及初步设计	根据同类产品的大量统计数据，建立产品可靠性与其性能参数的数学关系。将新研产品的有关性能参数代入，预计新研产品的可靠性 缺点：需要建立比较复杂的数学模型并需要掌握产品可靠性与性能参数
故障率预计法	机械、电子、机电类产品，但是求组成产品的所有单元均有故障率数据基本或任务可靠性预计	详细设计	根据产品原理图，建立其可靠性模型，输入各单元的故障率数据进行计算 缺点：需要各单元故障数据，对于新研制的产品很难收集	上、下限法	复杂的机械、电子、机电系统或分系统法，其各单元均有可靠性数据任务可靠性预计	方案论证及初步设计	利用简化方法算出复杂系统可靠性的上、下限，再将上、下限综合预计系统可靠性 缺点：计算出的可靠性是一个值域，对更高要求的可靠性分析还需进一步处理
相似产品法	机械、电子、机电类产品，具有相似产品的可靠性数据基本或任务可靠性预计。	方案论证及初步设计	将研制的新产品与其可靠性已知的相似产品进行比较 缺点：需要找到相似的产品，并知道相似产品的可靠性数据				

选值越大;反之,所选值越小。本文采用以下处理方法:当武器系统单元参数小于0.5时,可认为信息模糊,取 $\alpha = \beta = 0.278m$;当武器系统单元参数在0.5~0.8之间,认为信息模糊程度一般,取 $\alpha = \beta = 0.1668m$;在0.8~0.9时,可认为信息较清晰,按文献[2]取 $\alpha = \beta = 0.0556m$;当系数在0.9至0.99之间时,取 $\alpha = \beta = 0.00556m$ 。需指出的是, β 值的选取不应使 $m + \beta$ 超过1,这是由于系统参数的取值不能超过1决定的。当系数大于0.99时,可按文献[1]给出的公式选择合适的值^[4]。

2. 分系统可靠度 R_{if}

一个完整的武器系统,都由多个分系统组成(A_i)。从表1可以看山,分系统的可靠性预计与各种器件的使用寿命、使用材料、运用技术等密切相关,有多种计算方法。并且针对不同结构、不同材料的分系统一般都有适合自己的可靠性预计方法,如电子器件可以选用故障率预计法,机械方面可以采用性能参数法等。运用成熟的评价方法得出分系统的可靠度 R_{if} 。

3. 相关系数 C ——二级模糊评判法

分系统之间的关联程度是影响可靠性预计的重要参数。运用模糊数表示法,可将武器系统间相关程度完成分为强、较强、一般、较弱、弱等离散状态,因此得评语集 $V = \{\text{强、较强、一般、较弱、弱}\} = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$ 。进一步对评语集定义见表2。

表2 系统相关量值表

评语集	弱(V1)	较弱(V2)	一般(V3)	较强(V4)	强(V5)
语言描述	相互之间基本不相互影响离开另一系统均能正常工作	脱离另一系统能工作,但有一定的影响	两系统中部分单元关联紧密脱离另一系统不能正常工作	重要系统关联密切,两系统相互依存	联系紧密,工作时属于串连系统

根据表中标准,请系统结构专家组对分系统的相关性进行评分,可得相关模糊矩阵 V 。

$$V' = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & \Lambda & V_{1n} \\ V_{21} & V_{22} & \Lambda & V_{2n} \\ M & M & M & M \\ V_{n1} & V_{n2} & \Lambda & V_{nn} \end{bmatrix}$$

式中: V_{ij} ——第 i 个系统与第 j 个系统的相关模糊评判而后根据前面模糊数的定义取:

$$V_1 \in (0, 0.357), V_2 \in (0.357, 0.564), V_3 \in (0.564,$$

$$0.790), V_4 \in (0.790, 0.894), V_5 \in (0.894, 1)。$$

根据评判结果所在的值域,进行二次评判,确定 m 值,得出 C 的模糊数矩阵。

4. 权重因子 A ——层次分析法^[5]

分系统在整个武器系统的作用权重决定了整个武器系统的可靠性预计结果,根据作用程度赋予不同的权重因子,因子集 A 对应的评价集 W 的5个量级的量值向量 $W = (W_1, W_2, W_3, W_4, W_5) = (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9)^{[6]}$,评价集 W 中5个量值描述见表3。

表3 分系统权重量值表

量值	$W_1=0.1$	$W_2=0.3$	$W_3=0.5$	$W_4=0.7$	$W_5=0.9$
语言描述	运用成熟技术分系统相对独立并且简单	局部运用改进技术在系统中起一定作用	运用可行性强的先进技术在系统中作用突出	运用先进技术在系统中作用十分重要	最先进复杂系统是整个系统的核心部件

请可靠性专家评估组照表3的评价标准,对预研项目进行权重对比评价打分,确定相应的量值,得出对比矩阵。运用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)。得出分系统权重模糊向量 A 。

三、预计模型在防空预研项目的应用

防空兵通用射击评价系统是一种机械、光、电综合化系统,可以全过程采集射击过程,计算目标与弹迹参数,自动处理,自动输出射击结果。运用了近红外技术、ARM 技术、同步信号处理技术、图像处理技术、模式识别等多种手段,属于高技术武器系统。防空兵通用射击评价系统主要由光电系统(A)、伺服系统(B)、轴——码变化系统(C)、信号采集系统(D)、信号处理系统(E)、计算机控制系统(F)6大系统组成,其中每个分系统又有多个系统组成。如,光电系统就包括光学电路设计(A1)、光学结构设计(A2)、光学效果设计(A3)3个子模块组成。因此,防空兵通用射击评价系统结构复杂,系统与系统之间关联紧密,涉及高技术多,可靠性预计有一定的难度,需要一定的方法手段。运用上面介绍的方法,分析计算过程如下:

(1)根据分系统的特点分别用故障率预计法、相似产品法、性能参数预计法、应力分析法评分法、相似产品法计算出 $A \sim F$ 各分系统的可靠度因子。得到可靠度向量 R_{if} 。



$R'_{if}=(0.987, 0.998, 0.994, 0.985, 0.923, 0.951)$;

(2)根据表2的评判标准,通过技术专家的相关性评判,经统计整理得相关性矩阵结果。

$$C'_f = \begin{bmatrix} 1 & 0.197 & 0.875 & 0.948 & 0.039 & 0.128 \\ 0.197 & 1 & 0 & 0.088 & 0.937 & 0.677 \\ 0.875 & 0 & 1 & 0.852 & 0.025 & 0.018 \\ 0.984 & 0.088 & 0.852 & 1 & 0.861 & 0.489 \\ 0.039 & 0.937 & 0.025 & 0.861 & 1 & 0.667 \\ 0.128 & 0.677 & 0.018 & 0.489 & 0.667 & 1 \end{bmatrix}$$

将数据进行处理得 C_f 的标准矩阵:

$$C_f = \begin{bmatrix} 0.314 & 0.068 & 0.316 & 0.230 & 0.011 & 0.043 \\ 0.062 & 0.345 & 0 & 0.021 & 0.266 & 0.227 \\ 0.275 & 0 & 0.361 & 0.199 & 0.007 & 0.006 \\ 0.297 & 0.030 & 0.308 & 0.234 & 0.244 & 0.164 \\ 0.012 & 0.323 & 0.009 & 0.202 & 0.283 & 0.224 \\ 0.040 & 0.234 & 0.006 & 0.114 & 0.189 & 0.336 \end{bmatrix}$$

(3)根据表3的评判标准,通过专家对各系统进行两两相互对比,得出对比矩阵,然后运用层次分析法得出权重向量。

$A_{if}=(0.2153, 0.0625, 0.1465, 0.0867, 0.1028, 0.3862)$;

(4)由式(1)得:

$$\begin{aligned} R_f &= R_{if} \cdot C_f \cdot (A_{if})' \\ &= (0.9868, 0.9616, 0.9881, 0.9711, 0.9646, 0.9628) \cdot (A_{if})' = 0.9725 \end{aligned}$$

由于 $R_f > 0.9$, 因此系统的模糊程度低,按照文献[2]的要求取 $\alpha = \beta = 0.00556$ 可得 R_f 的模糊数是:

$$P=(0.9671, 0.9725, 0.9779)$$

从模糊数可以看出,防空兵通用射击评价系

统项目设计可靠性高,可以按照现在的方案进行开发、设计、研制。

四、结束语

可靠性预计是新型防空武器系统研制过程中衡量武器系统可靠性的重要手段,因此,合理的量化评估具有重要的意义。项目可靠性预计结果的准确性一方面取决于评估模型的科学性和实用性;另一方面取决于分系统相关因子和权重因子的取值,这在一定程度上取决于专家评估结果的客观性。通常专家的评估意见不是直接基于大量的实验数据,但也不是完全由个人主观估计结果,而是从特征相似项目中获得的数据进行参考外推而得。运用二次评判,进行反馈评估,结果比较客观、可信。

参考文献:

- [1] 杨为民,阮谦,俞沼,屠庆慈.可靠性·维修性·保障性总论[M].北京:国防工业出版社,1995.
- [2] 李执力,杨鸣,许智辉.模糊理论分析方法在武器系统可靠性中的运用[J].火力与指挥控制,2003,5(12).
- [3] 刘普寅,吴孟达.模糊理论及其应用[M].长沙:国防科技大学出版社,1998.
- [4] 黄洪钟.模糊故障理论及其在机械加工系统可靠性分析中的应用研究[M].机械设计与制造,1995.
- [5] 姜启源,谢金星,叶俊.数学模型[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [6] 徐哲,冯允成,鲁大伟.武器装备研制项目的技术风险评估[J].系统工程与电子技术,2005,6(16):1123~1127.

(本文第一作者:防空兵指挥学院硕士)

(上接第5页)管理有机结合,促进体系的有效运行。

(3)制定监视和测量准则。组织确定需要进行监视和测量的项目或特性后,应制定相应的评价方法,包括重点过程监视和测量方法、质量管理考核细则、工作质量考核细则、质量目标考核细则、特殊过程评定准则、过程审核办法等。在这些方法或准则中,应明确重点过程的能力评价标准并尽可能量化,以提高监视和测量的可证实性和有效性。监视和测量准则应定期进行评审和修订。

(4)规定监视和测量的频次。组织对某些目标

随时进行监测,如工艺纪律执行率、过程产品抽检合格率、过程能力指数(CP值)、小区和商场的状态等。对某些目标应进行阶段性监测,如中标率、合同履约率、顾客满意率、新产品(项目)开发成功率、内外部故障成本、出厂产品返修率、错漏检率等。

总体来说,无论对于何种过程,采用何种方法予以监测,其目的都是为了促进过程的改进,最终实现过程有效性和效率的提高。

(本文作者:河南省信阳市质量技术监督局注册质量工程师)