

导弹武器系统可靠性分配方法

刘永生, 高翔, 严聪

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:介绍了导弹武器系统(MWS)可靠性分配中的原准比例法和直接搜索法,并给出了实际算例。该方法在实际工程中已得到应用,取得了较为满意的效果。

关键词:导弹武器系统;可靠性;分配

中图分类号:TP302.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2002)01-0033-03

可靠性分配是系统可靠性设计中的一个重要环节。导弹武器系统(MWS)可靠性分配就是根据设计任务书上所给出的(MWS)可靠性指标,对构成系统的若干个分系统进行适当的调配,以确定各分系统的合理的可靠性指标^[1]。通过对(MWS)可靠性分配,达到以下目标:1)落实(MWS)可靠性指标,明确(MWS)中各分系统合理的可靠性分配指标;2)暴露(MWS)中的薄弱环节,为改进可靠性设计提供依据。

1 (MWS)可靠性分配方法

一般来说,系统可靠性分配方法可分为两大类。一类是以可靠性指标为约束条件,而以重量、体积、成本等其它参数为目标函数,求出其下限值;一类是以重量、体积、成本等为约束条件,以系统的最高可靠性为目标函数,求出其上限值。因此可以认为系统可靠性分配的方法,基本上是数学规划的方法,特别是动态规划的方法^[2]。

对于导弹武器系统这样一个大型的复杂系统,其可靠性分配不只是一个单纯的数学规划问题。在系统可靠性分配时,要把(MWS)的可靠性指标,根据重要度、复杂度、致命性、成熟性等不同情况,具体分配给组成导弹制导系统的每一个分系统,确定分系统的可靠性指标,再根据其数学模型分配给整机,最后根据整机功能及其所处的环境等因素具体分配给各个部件。对于系统中的电子系统,往往还要进一步将可靠性分配到元器件。可见,(MWS)可靠性分配是一个复杂的过程。

1.1 采用原准比例法对 MWS 进行可靠性分配

如果一个新设计的 MWS 与旧 MWS(原准)相似(如新设计的导弹与原准弹构造相似,均由弹体、动力装置、制导系统、战斗部、引信等分系统组成),但是新 MWS 的可靠性要求更高,就可以按原准弹各分系统的失效率比例来分配新导弹各分系统的失效率,由此确定新导弹各分系统的可靠性大小。

λ_0, λ_{i0} 为原准系统与其 i 分系统之失效率; λ_N, λ_{iN} 为新系统与其 i 分系统之失效率。

取

$$\lambda_{iN} = (\lambda_{i0}/\lambda_0) \lambda_N \quad (1)$$

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

$$\lambda = -\ln R/t \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),得

$$\frac{-\ln R_{iN}}{t} = \frac{\frac{-\ln R_{i0}}{t} - \ln R_N}{t} \quad (4)$$

可得
$$R_{iN} = e^{-\left[\frac{1nR_{i0}}{1nR_0}1nR_N\right]} \quad (5)$$

式中 R_{iN} ——新系统中 i 分系统的可靠性;

R_N ——新系统的可靠性指标;

R_{i0} ——原系统中 i 分系统的可靠性;

R_0 ——原准系统的可靠性。

原准弹分系统的可靠度已知,要设计一枚可靠性指标为 $R_N = 0.98$ 的新型导弹采用原准比例法的计算结果如表 1 所示。

2.2 采用直接搜索法对带约束冗余度的 MWS 进行可靠性设计

当分配的可靠性指标高于元器件预测值或经验值时,必须进行冗余设计。冗余系统可靠性设计的问题一般可以分为两类:一类是给定总的系统可靠性要求,已知分系统组成关系、各分系统元件的可靠性、成本值,要求设计(分配)各分系统的元件数量,使总成本最低。系统典型逻辑框图如图 1 所示。

上述问题可归纳成以下数学形式:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ f(x) = \sum_{i=1}^n C_i x_i \\ g(x) = \prod_{i=1}^n (1 - F_i^{x_i}) \geq b \\ x_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

式中 n 为分系统数量; F_i 为分系统元件的不可靠度; x_i 为分系统并联的元件数量; C_i 为分系统元件成本; $f(x)$ 为系统总成本; $g(x)$ 为约束条件; b 为系统要求的可靠度指标。

这类问题均可采用拉格朗日乘法、整数规划、动态规划来求解,但一般计算量较大,方法麻烦。

下面介绍一种较为简单的工程解法——直接搜索法。它的总体思路是:1) 寻找某一环节(分系统),在该环节上并联一个冗余件,使单位成本获得系统可靠度增量最大;2) 检验约束条件;3) 连续搜索,不断增加系统可靠度,直到满足全部约束条件为止。

根据图 1 所示的系统,若在第 i 个分系统上增加一个元件,该 i 分系统之可靠度增为

$$\Delta R_{is} = (1 - F_i^{x_i+1}) - (1 - F_i^{x_i}) = R_i F_i^{x_i} \quad (6)$$

则系统的可靠度增量为

$$\Delta R_s' = R_1 R_2 \dots (R_{is} + \Delta R_{is}') \dots R_n - \prod_{i=1}^n R_{is} = R_s \Delta R_{is}' / R_{is} \quad (7)$$

式中 R_{is} 为第 i 个分系统的可靠度; R_s 为当前系统的可靠度; R_s' 为第 i 个分系统增加一个元件,引起系统可靠度的增量。

设第 i 个分系统成本为 C_i ,即可由此求出单位成本使系统可靠度增加的大小,用 m_i 表示:

$$m_i = \frac{\Delta R_s'}{C_i} = \frac{R_s \Delta R_{is}'}{R_{is} C_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

设法求出其最大值:

$$m_i^* = \max(m_i) = \max \frac{\Delta R_{is}'}{R_{is} C_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

于是便是在 i^* 分系统上增加冗余件,这样重复进行,直到满足要求为止。

具体计算步骤如下:

步骤 1 给定初始状态:

$$x^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0] \quad (10)$$

表 1 用原准比例法对导弹各分系统的可靠性计算结果

序号	分系统名称	原分系统可靠性	新分系统可靠性
1	导引头	0.995 7	0.998 7
2	自动驾驶仪	0.997 8	0.999 4
3	舵机	0.992 7	0.997 9
4	操纵机构	0.994 7	0.998 5
5	弹体结构	0.987 4	0.996 3
6	战斗部	0.994 0	0.998 2
7	引信	0.996 0	0.998 8
8	发动机	0.973 0	0.992 0
9	系统可靠性	0.933 1	0.98

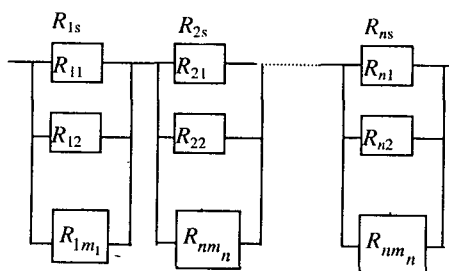


图 1 系统典型逻辑框图

步骤2 计算在 x^0 状态下,各分系统增加一个冗余件,系统的可靠度增量 ΔR_{is} :

$$\Delta R_{is} = R_i F_i^{x_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

步骤3 x^0 状态下,各分系统单位成本的可靠性增量 m_i 并求其最大值及其分系统 i^* :

$$m_i^* = \max \frac{\Delta R_{is}}{R_{is} C_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

步骤4 取 $x_i^{1*} = x_i^{0*} + 1, x_i^1 = x_i^0 \quad i \neq i^* \quad i = 1, 2, \dots, n$ 得

$$x^1 = [x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1] \quad (13)$$

检查 x^1 是否满足约束条件:

$$g(x^1) = R_s^1 = \prod_{i=1}^n (1 - F_{is}^{x_i^1}) \geq b \quad (14)$$

若恰好满足,则停止计算当前 x^1 即为所求;若不满足约束,则将 x^1 代替 x^0 ,重复步骤2。若超过约束,则以 m_i 大小为序,从小开始逐个减少元器件,直到满足约束为止。

2.3 算例

设某型导弹由四个分系统串联组成。现在已知各分系统可靠度 R_i 、成本 C_i ,见表2,但不满足可靠度要求。试求系统在 $R_s \geq 0.99$ 条件下,设计(分配)各分系统的冗余件,而使系统成本最低。

表2 导弹各分系统可靠性和成本数据

第 i 分系统	1	2	3	4
可靠度 R_i	0.8	0.7	0.8	0.7
成本 C_i	20	30	15	10

根据计算步骤计算:1)取起始点 $x^0 = [3 \ 4 \ 3 \ 4]$;2)经多次运算可得理论最优解 $X_{OPT} = [4 \ 5 \ 4 \ 5]$;3)分系统的冗余件为 $[4 \ 5 \ 4 \ 5]$;4)计算结果为:最低成本 $f_{OPT} = 340$; $R_s = g(X_{OPT}) = 0.991 \ 96 \geq 0.99$,满足要求。

3 结论

可靠性分配是一项既重要又复杂的工作,本文介绍的 MWS 可靠性分配方法,在实际应用中较为实用,应用这些方法对 MWS 进行可靠性分配,取得了较为满意的效果。可靠性分配是一项繁琐、耗时、费用较大的工作,随着计算机的广泛应用,本文介绍的可靠性分配方法将能够迅速准确地进行。

参考文献:

- [1]刘隆和,王灿林. 无线电制导[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
 [2]白文林,温炳恒. 有翼导弹总体设计原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,1992.

(编辑:田新华)

Method for Reliability Distribution in MWS

LIU Yong - sheng , GAO Xiang, YAN Cong

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

Abstract: Originally - based proportion and direct search methods on the reliability of MWS are discussed in this paper. Two examples are given out for better understanding of the two methods listed in this paper. These methods are satisfactory in practical use.

Key words: missile weapon system ; reliability; distribution