

飞机元器件可靠性的优化模型

刘家学 李文华* 朱铁稳
(空军第一航院, 信阳, 464000)

摘要 讨论了利用单元冗余来提高歼击机元器件系统的可靠性问题, 建立了可靠性与费用、体积及重量关系的多目标优化模型, 并利用数学分析的方法给出了优化配置解。

关键词 可靠性; 冗余; 多目标优化

中图分类号 V271.45

0 引言

歼击机各分系统的可靠性是其重要指标之一, 它的提高依赖于各元器件可靠性的提高。然而由于生产工艺及材料的限制, 当元器件的可靠性无法再提高时, 只有将系统的元器件引入冗余(备份), 才能进一步提高系统的可靠性。但元件冗余又会导致系统体积、重量及成本的提高, 从而影响歼击机的机动与生存能力。因此, 为了不影响飞机的作战效能, 在采用元件冗余提高可靠性的同时, 必须考虑系统的体积、重量及成本, 力争使它们增加最少。

1 冗余优化模型

假设歼击机某系统由 K 个元件组成, 第 i 个元件的失效率、成本、体积和重量分别是 F_i 、 C_i 、 V_i 、和 G_i 。将第 i 个元件并联备份成 n_i 个独立相同的元件, 则冗余后第 i 个分系统的可靠性为

$$R_i = 1 - F_i^{n_i} \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

冗余后该系统的可靠性为

$$R_s = \prod_{i=1}^k R_i = \prod_{i=1}^k (1 - F_i^{n_i}) \quad (2)$$

我们的目标是, 要使系统达到一定的可靠性 R_o 的同时, 使冗余后系统的成本、体积及重量最小。于是问题转化为如下优化模型。

收稿日期: 1997-10-27

* (郑州工业大学数力系)

第一作者 男 1963年1月生 硕士学位 讲师

$$MOP1: \begin{cases} \min C = \min \sum_{i=1}^k n_i C_i \\ \min V = \min \sum_{i=1}^k n_i V_i \\ \min G = \min \sum_{i=1}^k n_i G_i \\ s. t. \prod_{i=1}^k (1 - F_i^{n_i}) \geq R_o \end{cases} \quad n_i \text{ 为自然数, } (i = 1, 2, \dots, k)$$

提 高

显然这是一多目标非线性整数规划问题。

2 模型求解方法

尽管人们对非线性整数规划问题的解法做了大量进展性的工作(如分枝定界等),但目前尚无有效的算法。下面我们通过一种巧妙的变换,将 $MOP1$ 转化为与其等价的另一多目标优化模型 $MOP2$,通过化为单目标规划求其连续最优解,再枚举取整,达到解决问题的目的。

作变量代换

$$R_i = R_o^{\beta_i} \quad (i = 1, 2, \dots, K; \beta_i > 0) \quad (3)$$

由(2)式得

$$R_s = \prod_{i=1}^k R_i = \prod_{i=1}^k R_o^{\beta_i} = R_o^{\sum_{i=1}^k \beta_i}$$

要使冗余后系统的可靠性不小于 R_o ,则必须

$$\sum_{i=1}^k \beta_i \leq 1 \quad (4)$$

又 $R_i = 1 - F_i^{n_i}$, 即 $R_o^{\beta_i} = 1 - F_i^{n_i}$, 从而

$$n_i = \frac{\ln(1 - R_o^{\beta_i})}{\ln F_i} \quad (5)$$

把变换后的(4)、(5)两式代入 $MOP1$, 得到下列等价多目标优化模型

$$MOP2: \begin{cases} \min C = \min \sum_{i=1}^k \frac{C_i}{\ln F_i} \cdot \ln(1 - R_o^{\beta_i}) \\ \min V = \min \sum_{i=1}^k \frac{V_i}{\ln F_i} \cdot \ln(1 - R_o^{\beta_i}) \\ \min G = \min \sum_{i=1}^k \frac{G_i}{\ln F_i} \cdot \ln(1 - R_o^{\beta_i}) \\ s. t. \sum_{i=1}^k \beta_i \leq 1 \end{cases}$$

可证明, $MOP2$ 是一凸规划。下面采用线性加权法把它化为单目标规划来处理。可通过层次分析法或其它方法给出三个目标的权重为 $W = (W_1, W_2, W_3)$, 其中 $W_i \geq 0$, 且 W_1

+ $W_2 + W_3 = 1$. 把 $MOP2$ 转化为其评价函数的优化问题。

$$P(W): \begin{cases} \min H = \min(w_1 C + w_2 V + w_3 G) \\ s.t. \sum_{i=1}^k \beta_i \leq 1 \end{cases}$$

即
$$P(W): \begin{cases} \min H = \min \sum_{i=1}^k \frac{(w_1 C_i + w_2 V_i + W_3 G_i)}{\ln F_i} \cdot \ln(1 - R_o^\beta) \\ s.t. \sum_{i=1}^k \beta_i \leq 1 \end{cases} \quad \text{其等}$$

通过拉格朗日乘法及有关数学分析方法,可得 $P(w)$ 的解为

$$\beta_i = \frac{(w_1 C_i + w_2 V_i + W_3 G_i) / \ln F_i}{\sum_{j=1}^k [(w_1 C_j + w_2 V_j + W_3 G_j) / \ln F_j]} \tag{6}$$

将 β_i 再代入(5)式并枚举取整,可求出第 i 分系统冗余元件优化配置个数 $n_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 。

3 实例分析

某型歼击机上某系统由 3 个元件组成,各元件的费用、体积、重量和失效率见表 1,要使该系统达到 $R_o = 0.98$ 的可靠性,应该怎样优化配置各元件的冗余个数。已知经调查分析,费用、体积、重量三目标的权重为: $W = (0.2, 0.5, 0.3)$ 。

表 1 三元件的费用、体积、重量和失效率

元件序号 i	费用 C_i (万元)	体积 $V_i(\text{cm}^3)$	重量 $G_i(\text{kg})$	失效率 F_i
1	1.0	9.5	2.2	0.15
2	0.8	5.3	1.2	0.21
3	0.6	4.6	0.8	0.12

由(6)、(5)式得计算结果如表 2。

表 2 计算结果

元件序号 i	β_i	n_i (第 i 系统冗余元件数)
1	0.4737	2.51
2	0.3254	3.22
3	0.2010	2.60

在表 2 冗余数 n_i 的连续解中,取 n_i 相邻两整数,即 $n_1 = 2, 3$; $n_2 = 3, 4$; $n_3 = 2, 3$, 进行组合枚举配置方案,由表 3 可见,在达到系统可靠性要求的前提下,方案六、七、八是优化方案,而其中以方案六为最佳方案。

说明:本文所讨论的元件可靠性冗余优化配置方法,是以严格的数学规划为依据,并用科学的方法分析而得到的。因此采用此方法对飞机分系统元件进行可靠性冗余优化,不但科学可靠,而且易于计算。

表 3 配置方案

冗余方案	系统可靠性	成本 C (万元)	体积 $V(cm^3)$	重量 $G(kg)$
方案一($n_1=2, n_2=3, n_3=2$)	0.9545	5.6	44.1	9.6
方案二($n_1=2, n_2=4, n_3=2$)	0.962	6.4	49.4	10.8
方案三($n_1=2, n_2=3, n_3=3$)	0.970	6.2	48.7	10.4
方案四($n_1=2, n_2=4, n_3=3$)	0.974	7.0	54.0	11.6
方案五($n_1=3, n_2=3, n_3=2$)	0.973	6.6	53.6	11.8
方案六($n_1=3, n_2=3, n_3=3$)	0.986	7.2	58.2	12.6
方案七($n_1=3, n_2=4, n_3=2$)	0.980	7.4	58.9	13.0
方案八($n_1=3, n_2=4, n_3=3$)	0.993	8.0	63.5	13.8

参考文献

1 张建华. 空军装备的可靠性与维修性管理. 北京:国防工业出版社, 1993, 31~38

2 梅启智. 系统可靠性基础. 北京:科学出版社, 1992, 180~200

3 宣家骥. 多目标决策. 长沙:湖南科技出版社, 1989, 185~230

Reliability Optimizing Model on Parts of Aircrafts

Liu Jiaxue Li Wenhua* Zhu Tiewen
(*The First Aviation Institute of Aviation Army*)
* (*Zhengzhou University of Technology*)

Abstract In this paper, the problem on improvements by element redundancy of the reliability of the parts of fighters is discussed. Then, the multiple-objective optimum model on the relation of the reliability to cost, volume and weight are set up. Finally, the optimum allocation resolution is given by the method of mathematical analysis.

Keywords reliability; redundancy; multiple-objective optimization