

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.12.005

一种新的飞机系统可靠性分配方法

商兴华¹, 韩维², 李成¹, 董万里¹

(1. 海军航空工程学院 研究生管理大队, 山东 烟台 264001;

2. 海军航空工程学院 7系, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对现有可靠性分配方法存在的不足, 在基于权重值分配方法的基础上引入约束条件, 提出一种兼具无约束可靠性分配方法和约束可靠性分配方法特点的新的可靠性分配方法。通过探讨该方法的可行性, 建立其可靠性分配的数学模型, 并将该模型应用于飞机系统的可靠性分配中。结果表明, 该方法能较好体现 2 类方法的特点, 减少飞机系统的成本费用。

关键词: 飞机系统; 可靠性分配; 权重; 费用约束

中图分类号: V215.3 **文献标识码:** A

A New Method of Reliability Allocation of Airplane System

Shang Xinghua¹, Han Wei², Li Cheng¹, Dong Wanli¹

(1. Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. No. 7 Department, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In the light of disadvantages of the method of reliability allocation existing, constraints was introduced into the reliability allocation based on weight, and a new reliability optimal allocation method was presented which had both the characteristics of reliability allocation model without constraints and reliability allocation model with constraints of cost. By discussing the feasibility of the method, a corresponding mathematical model was conceived and applied to reliability allocation of airplane system. The result shows that the new method can reflect the characteristics of the two methods and reduce the cost of reliability design of airplane system.

Keywords: airplane system; reliability allocation; weight; constraints of cost

0 引言

可靠性分配^[1]是将系统或产品的可靠性指标分配到各功能层次的分系统、设备及元件, 用以确定各个低层次产品的可靠性指标。飞机系统可靠性分配合理与否不仅关系飞机的可靠性水平, 还对飞机系统设计费用产生较大的影响。如何寻求可靠性水平和成本费用的平衡点, 是一个飞机系统可靠性设计待解决的问题。现有的可靠性分配方法可以分为无约束可靠性分配方法^[2-5]和约束可靠性优化分配方法^[6-7]2类。无约束可靠性分配方法能比较客观的反映各个预分配单元在可靠性分配中权值比重大小的特点, 但并没有考虑产品可靠性分配时重量、体积和成本等的约束条件, 不能满足用户的成本或产品规格要求。约束可靠性分配方法考虑了可靠性分配时重量、体积和成本等的约束条件, 但是没有考虑各个预分配单元在可靠性分配中权值比重大小的特点。故针对这 2 种传统方法存在的问题, 提出一种新的可靠性分配方法, 较好地将这 2 种方法加以结合, 有效解决飞机系统可靠性分配中可靠性水平和成本费用的矛盾问题。

1 方法的提出和模型的建立

1.1 无约束可靠性分配方法

无约束可靠性分配方法的核心工作可以归结为一点, 就是找出预分配单元在上级单元可靠性分配中所占的比重, 即可靠性分配权重, 然后按照此权重分配上级单元的可靠性指标, 用公式可以表示为:

$$a_i = \frac{\lambda_i}{\sum_i \lambda_i} a \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中, a_i 为分配的可靠性指标值; λ_i 为预分配单元权重; a 为分配系统的可靠性指标值; n 为预分配单元数。

1.2 约束可靠性优化分配方法

约束可靠性优化分配协调系统各组成单元之间的可靠度以及各种资源重量、体积和成本等, 在某一目标最优的情况下将可靠性指标分配给各组成单元。一般采用总费用最小作为优化目标建立非线性优化模型。其数学模型为:

$$\min C = \sum_{i=1}^n c_i(R_i) \quad (2)$$

收稿日期: 2010-08-03; 修回日期: 2010-09-15

作者简介: 商兴华 (1985-), 男, 河北人, 硕士研究生, 从事飞行器设计研究。

$$s.t. \quad R_s \geq R_{obj}$$

$$R_{i,min} \leq R_i \leq R_{i,max}$$

其中, R_s 为系统可靠度; R_{obj} 为系统可靠性目标值; $c_i(R_i)$ 为单元成本与其可靠度的函数关系。

对于 $c_i(R_i)$, 许多学者构造了不同的模型^[6,8], 笔者采用文献[6]中的费用函数式, 即:

$$c(R_i) = \frac{1}{f_i} \ln \frac{R_{i,max} - R_{i,min}}{R_{i,max} - R_i} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

其中包含 3 个参数: f_i 、 $R_{i,max}$ 、 $R_{i,min}$, f_i 表示提高单元 i 可靠性的可行度, $0 < f_i < 1$; $R_{i,max}$ 表示在当前的技术水平下单元 i 可达到的最大可靠度水平; $R_{i,min}$ 表示单元 i 最低要求可靠度。此费用函数单元成本随可靠度变化曲线如图 1 (在各个单元的可行度均为 0.9, $R_{i,min}$ 为 0.99, $R_{i,max}$ 为 0.999 的条件下)。由图 1 可见, 单元成本随可靠度的增加而增大。

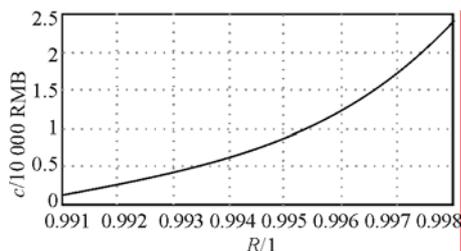


图 1 单元成本随可靠度变化曲线

1.3 方法的基本思想及可行性分析

首先, 在无约束分配方法中, 权重值的得出方法具有争议性。比如, 在评分分配法中, 专家的个人经验以及个人偏好可能影响评分值大小; 又如在考虑重要度和复杂度的分配方法中, 重要度及复杂度的概念本身就十分模糊。所以, 这些方法得出的权重值并不是十分准确, 即权重值在一定的小范围内的改变并不会使得可靠性分配值变得不合理。

其次, 追求产品效益的最大化是产品设计制造必然的选择, 降低产品的成本费用是提高产品效益的关键。产品的成本费用与组成产品的可靠度有直接关系。由图 1 可知, 单元的可靠度越高, 其费用越高, 相应的由各个单元组成的产品的费用就越高。而单元的可靠性是依据权重值得到的。由此可知, 权重值在一定的范围内改变就对应着此范围内产品费用的一个最小值。

综合上述分析可知, 将无约束可靠性分配方法和约束可靠性分配方法结合具有可行性。笔者提出

的方法就是找到一组约束条件下的可靠性分配值, 使得产品在基于权重分配时费用成本最少。

1.4 模型的建立

无约束分配即基于权重分配时, 分配的指标有很多种, 如故障率 λ 、不可靠度 F 、平均故障间隔时间 MTBF 等, 为了简化模型, 笔者假设基于权重分配时, 分配的指标为系统的不可靠度 F 。假如一串系统由 n 个单元组成, 并且采用无约束分配的方法得到各个单元可靠性分配权重为:

$$\beta_i (i=1,2,\dots,n), \text{ 即}$$

$$F_1 : F_2 : \dots : F_n = \beta_1 : \beta_2 : \dots : \beta_n \quad (4)$$

此时各个单元的可靠度为:

$$R_i = 1 - F_i (i=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

定义

$$k_i = \frac{F_i}{\beta_i} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (6)$$

可知 $k_i = k$ 为常数 $(i=1,2,\dots,n)$

现在令

$$\rho_1 \beta_i \leq \beta_i \leq \rho_2 \beta_i \quad (7)$$

其中, $0 < \rho_1 \leq 1 \leq \rho_2$ 且 ρ_1 、 ρ_2 相差不大, 即 β_i 可以在 $\rho_1 \beta_i$ 和 $\rho_2 \beta_i$ 之间的小范围内变化, 则

$$\rho_1 F_i \leq F_i \leq \rho_2 F_i \quad (8)$$

也就是说 F_i 的值可以在 $\rho_1 F_i$ 和 $\rho_2 F_i$ 之间的小范围内变化。则系统可靠性分配模型变为:

$$\min \quad C = \sum_{i=1}^n c_i(R_i) \quad (9)$$

$$s.t. \quad R_s \geq R_{obj}$$

$$R_{i,min} \leq R_i \leq R_{i,max}$$

$$F_i = 1 - R_i$$

$$\rho_1 F_i \leq F_i \leq \rho_2 F_i$$

2 飞机系统可靠性分配

2.1 可靠性分配模型

2.1.1 模型建立

将新的可靠性分配方法应用于飞机系统的可靠性分配中, 并将得到的结果与基于权重值分配方法得到的结果进行比较。

设某飞机系统由 5 个单元串联组成, 系统可靠性指标为 0.98, 要求将这一指标分配给各个单元。已知单元最低可靠度要求 $R_{i,min}$ 为 0.99, 各个单元的可行度均为 0.9, 最大可达可靠度 $R_{i,max}$ 均为 0.999。

假如无约束可靠性分配得到各个单元可靠性分配权重分别为：

$$\beta_1 = 0.1, \beta_2 = 0.2, \beta_3 = 0.2, \beta_4 = 0.3, \beta_5 = 0.2$$

由基于权重的可靠性分配方法得到的 5 个单元的不可靠度分别为：

$$F_1 = 0.002, F_2 = 0.004, F_3 = 0.004, F_4 = 0.006, F_5 = 0.004$$

由费用式 (3) 可得到此时成本为： $C = 6.756 5$ 万元。

此时，各个单元的可靠度分别为：

$$R_1 = 0.998, R_2 = 0.996, R_3 = 0.996, R_4 = 0.994, R_5 = 0.996$$

采用文中建立的模型，在现有基础上进行重新分配。取 $\rho_1 = 0.8, \rho_2 = 1.2$ ，则可靠性分配模型为：

$$\min C = \sum_{i=1}^5 \frac{1}{f_i} \ln \frac{R_{i,\max} - R_{i,\min}}{R_{i,\max} - R_i} \quad (10)$$

$$s.t. \quad R_s \geq R_{obj}$$

$$R_{i,\min} \leq R_i \leq R_{i,\max}$$

$$F_i = 1 - R_i$$

$$0.8F_i \leq F_i \leq 1.2F_i$$

2.1.2 模型求解

由模型可知，此问题为带有约束条件的非线性极值问题。求解约束极值问题可以采用的方法有：将非线性规划问题化为线性规划问题以及将约束问题化为无约束问题。罚函数法可将非线性极值问题的求解转化为一组无约束极值问题。这种方法的基本思想是，利用问题中的约束函数做出适当的罚函数，由此构造出带参数的增广目标函数，把问题转化为无约束非线性规划问题。罚函数法主要包括外罚函数法和内罚函数法 2 种形式^[9]。笔者利用外罚函数法对模型进行求解。

取一个充分大的数 $M > 0$ ，构造增广目标函数 $P(R, M)$ ，则原约束非线性极值问题成为以 $P(R, M)$ 为增广目标函数的无约束极值问题。利用 Matlab 软件编程求解可得：

$$R_1 = 0.997 6, R_2 = 0.996 3, R_3 = 0.995 9, R_4 = 0.994 2, R_5 = 0.995 9$$

此时由费用式 (10) 的目标函数可得系统的成本为： $C = 6.486 0$ 万元。与 6.756 5 万元相比较，成本降低。2 种方法可靠性分配值如表 1。

表 1 可靠性分配值比较

方法	R					C/万元
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	
基于权重分配方法	0.998 0	0.996 0	0.996 0	0.994 0	0.996 0	6.756 5
文中方法	0.997 6	0.996 3	0.995 9	0.994 2	0.995 9	6.486 0

2.2 模型的深入分析

在此方法中， ρ_1 、 ρ_2 值可以改变，但会影响得到的结果。

表 2 分别为当 $\rho_1 = 0.8, \rho_2 = 1.2, \rho_1 = 0.7, \rho_2 = 1.3$ 以及 $\rho_1 = 0.6, \rho_2 = 1.4$ 时得到的结果。

表 2 不同 ρ 值情况下可靠性分配值比较

ρ	R					C /万元
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	
$\rho_1=0.8$ $\rho_2=1.2$	0.997 6	0.996 3	0.995 9	0.994 2	0.995 9	6.486 0
$\rho_1=0.7$ $\rho_2=1.3$	0.997 4	0.995 6	0.995 4	0.994 9	0.996 5	6.351 7
$\rho_1=0.6$ $\rho_2=1.4$	0.997 2	0.995 7	0.995 7	0.995 1	0.996 2	6.284 0

由表 2 可以看到，当 ρ_1 和 ρ_2 值相差变得越来越大时，系统的成本越来越小，但是单元可靠性分配的结果与基于权重分配的结果偏差也越来越大，即成本的减少是以牺牲基于权重分配结果为代价的。

如果 ρ 值限制为 1，则文中方法就是传统基于权重值的无约束可靠性分配方法；如果没有 ρ 值的限制，则此方法就是传统的约束优化分配方法。关

于 ρ 值的确定，在实际产品的可靠性分配中应根据实际的情况加以确定。

3 总结

该方法较好地体现了 2 类方法的特点，对飞机系统可靠性分配有实际的指导作用。该方法的关键是 ρ_1 、 ρ_2 的选择， ρ_1 、 ρ_2 值选择相差过大，就不

能体现基于权重值的分配方法的特点; ρ_1 、 ρ_2 值选择相差过小, 产品成本就不能得到有效地降低, 失去该方法的意义。

参考文献:

[1] 杨为民. 可靠性·维修性·保障性总论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 52-62.

[2] 《飞机设计手册》总编委会. 可靠性、维修性设计. (飞机设计手册第 20 册)[M]. 北京: 航空工业出版社, 1999: 66-92.

[3] 张琳, 黄敏, 刘婷. 航空发动机可靠性评分分配法[J]. 质量与可靠性, 2009(2): 49-52.

[4] 冯虎田, 殷爱华, 韩军, 等. 基于评分分配法的某型火箭炮可靠性分配[J]. 火炮发射与控制学报, 2003(1):

40-43.

[5] 张健, 雷雨成. 串联系统可靠性分配的层次分析法[J]. 机械设计与制造, 2000(6): 1-3.

[6] 刘飞, 张为华. 基于费用函数的系统可靠性优化分配[J]. 机械设计与制造, 2005(11): 11-12.

[7] 李峰, 刘顺利, 陈兵, 等. 基于遗传算法系统可靠性分配优化模型[J]. 装备指挥技术学院学报, 2004, 15(4): 98-100.

[8] 刘湖东, 梁庆卫. 基于造价和维修费用的系统可靠性指标分配方法[J]. 机械设计与制造, 2004(5): 4-6.

[9] 司守奎. 数学建模算法与程序[M]. 烟台: 海军航空工程学院, 2007: 45-50.

[10] 吴彩华, 彭世蕤, 李海鸿, 等. 利用演化硬件技术提高控制系统可靠性的新方法[J]. 四川兵工学报, 2009(9): 19-21.

(上接第 11 页)

$$\begin{aligned}
 & (\mu \sum_{k=1}^p \alpha_k v_{k2} + (1-\mu) \sum_{k=p+1}^q \alpha_k u_{k2}) \sum_{i=1}^n x_{i2}^2, \dots, (\mu \sum_{k=1}^p \alpha_k v_{km} + (1-\mu) \sum_{k=p+1}^q \alpha_k u_{km}) \sum_{i=1}^n x_{im}^2 \Big]^T \\
 & = [(\mu \sum_{k=1}^p \alpha_k v_{k1} + (1-\mu) \sum_{k=p+1}^q \alpha_k u_{k1}), (\mu \sum_{k=1}^p \alpha_k v_{k2} + (1-\mu) \sum_{k=p+1}^q \alpha_k u_{k2}), \\
 & \quad \dots, (\mu \sum_{k=1}^p \alpha_k v_{km} + (1-\mu) \sum_{k=p+1}^q \alpha_k u_{km}) \Big]^T
 \end{aligned}$$

故:

$$\begin{aligned}
 W_{m1} = & [(\mu \sum_{k=1}^p \alpha_k v_{k1} + (1-\mu) \sum_{k=p+1}^q \alpha_k u_{k1}), (\mu \sum_{k=1}^p \alpha_k v_{k2} + (1-\mu) \sum_{k=p+1}^q \alpha_k u_{k2}), \\
 & \quad \dots, (\mu \sum_{k=1}^p \alpha_k v_{km} + (1-\mu) \sum_{k=p+1}^q \alpha_k u_{km}) \Big]^T
 \end{aligned}$$

从而给出指标集 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ 中各指标的组

合后的权重为

$$\begin{aligned}
 w_1 = & (\mu \sum_{k=1}^p \alpha_k v_{k1} + (1-\mu) \sum_{k=p+1}^q \alpha_k u_{k1}), \\
 w_2 = & (\mu \sum_{k=1}^p \alpha_k v_{k2} + (1-\mu) \sum_{k=p+1}^q \alpha_k u_{k2}), \\
 \dots & \\
 w_m = & (\mu \sum_{k=1}^p \alpha_k v_{km} + (1-\mu) \sum_{k=p+1}^q \alpha_k u_{km})
 \end{aligned}$$

就指标 f_i 的权重 $w_j = (\mu \sum_{k=1}^p \alpha_k v_{kj} + (1-\mu) \sum_{k=p+1}^q \alpha_k u_{kj})$ 而

言, $\sum_{k=1}^p \alpha_k v_{kj}$ 表示 p 种主观赋权法对指标 f_i 所确定的

权重的加权平均, $\sum_{k=p+1}^q \alpha_k u_{kj}$ 表示 $q-p$ 种客观赋权法

对指标 f_i 所确定的权重的加权平均, w_j 则表示 q 种赋权法所确定的组合权重。

3 结束语

该方法将主观权重与客观权重加权综合起来, 其加权系数由数学规划求出, 从而弥补了单纯采用主观赋权法或客观赋权法的不足, 使效能评估的分析结果同时反应了主观意愿和客观情况, 具有一定的理论价值和应用价值, 但仍需进一步深入。

参考文献:

[1] 陆明生. 多目标决策中的权系数[J]. 系统工程理论与实践, 1986, 6(4): 77-78.

[2] 徐泽水, 达庆利. 多属性决策的组合赋权方法研究[J]. 中国管理科学, 2002, 10(2): 84-88.

[3] 陈华友. 多属性决策中的一种最优组合赋权方法的研究[J]. 运筹与管理, 2003, 25(2).

[4] Fan Z P, Zheng L H, Pan D H. An objective and subjective synthetic method for multiple attribute decision making[C]. Proceeding of the IFAC World Congress, San Francisco, USA: 1996: 255-260.

[5] Keeney R L, Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs [M]. New York: Wiley, 1976: 32-49.

[6] 郭齐胜, 等. 装备效能评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 2-3.

[7] 吴志明. KPI: 帮你解决绩效评估中的难题[J]. 中外管理导报, 2001(2).

[8] 王学义, 孙德宝. 部队装备保障能力评价研究[J]. 军械工程学院学报, 2002(1).

[9] 同济大学应用数学系. 高等数学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 10.

[10] 同济大学应用数学系. 线性代数[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 8.

[11] 姚志龙, 董辉平, 周华龙, 等. 装甲装备基层级维修保障能力评估指标体系[J]. 四川兵工学报, 2009(5): 107-108.