

文章编号: 1000-8055(2009)02-0385-05

基于模糊相似比例与综合评判的 发动机可靠性分配

杜 丽, 刘 宇, 黄洪钟, 彭 伟

(电子科技大学 机械电子工程学院, 成都 610054)

摘 要: 为了在可靠性指标分配时能充分利用相似旧机型已有的可靠性信息, 提出在航空发动机初期设计的可靠性分配阶段采用模糊相似比例与模糊综合评判相结合的可靠性指标分配方法. 该方法既能充分利用相似旧机型的可靠性数据, 同时又能通过模糊综合评判, 对基于相似旧机型的可靠性比例分配结果进行修正, 实现了在可靠性分配阶段确定性信息和不确定信息的互补, 进一步优化了可靠性分配结果.

关 键 词: 航空发动机可靠性; 可靠性分配; 相似比例; 模糊综合评判

中图分类号: V213; TE114.3

文献标识码: A

Aeroengine reliability allocation based on fuzzy prorating method and fuzzy synthetic assessment

DU Li, LIU Yu, HUANG Hong-zhong, PENG Wei

(School of Mechatronics Engineering,

University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: In this paper, an approach based on fuzzy prorating method and fuzzy synthetic assessment was proposed to allocate the reliability indices, by utilizing the existing reliability information from the similar version of aeroengine in the early design phase. The proposed approach not only considers the reliability information and data from the old version products, but also combines the information from fuzzy synthetic assessment as a complement. This method efficiently utilizes the certain and uncertain information simultaneously to further optimize the reliability allocation results.

Key words: aeroengine reliability; reliability allocation; fuzzy synthetic assessment; fuzzy proportional method

可靠性作为一个重要指标贯穿于现代航空发动机的设计、研制、生产、使用过程中. 可靠性分配作为方案论证与设计初期阶段不可缺少的过程, 在很大程度上决定了发动机固有可靠性. 以往在新型号航空发动机设计初期, 常常应用常规的可

靠性分配法或模糊综合评判方法对发动机系统级、子系统级、部件级进行可靠性指标分配. 采用模糊综合评判方法的主要原因是考虑到在设计初期可用于可靠性分配的可靠性数据或不足或可信度不高, 而且影响发动机可靠性的因素在设计初

收稿日期: 2008-01-17; **修订日期:** 2008-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(50775026); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA04Z403);

教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20060614016)

作者简介: 杜丽(1970-), 女, 四川成都人, 在职博士生, 副教授, 主要从事可靠性研究. E-mail: lidu@uestc.edu.cn

期大多具有模糊性^[1-9],因此,可靠性分配主要依赖于领域专家的经验进行决策,使用模糊集理论将精确评判扩展到模糊综合评判,从而可更准确地描述客观事实。

目前,国内外有关可靠性分配的研究较多地集中在单一的模糊综合评判上。文献[1]提出将模糊集理论应用在可靠性分配中,并建立了基于模糊综合评判的机械可靠性分配方法,该方法综合考虑了各种可靠性影响因素及其模糊性,能较客观地获取分配结果;文献[2]将模糊决策理论应用在燃气轮机的可靠性分配上,建立了多级模糊综合评判方法评估部件之间的相对失效系数,通过模糊运算获得较客观的可靠性分配指标;文献[3-4]通过对神经网络的训练,将专家信息存储在神经网络中,从而实现基于神经网络的模糊综合评判;文献[5]对现有的模糊综合评判方法进行改进,提出一种基于模糊数的可靠性模糊分配方法,不仅考虑了因素集与备择集的模糊性,同时也考虑了专家评分的模糊性,该方法更为客观地描述了各种因素的不确定性,因而更准确地刻画了客观现实。此外,文献[6-7]提出了采用基于遗传算法(GA)的可靠性分配方法。上述众多文献本质上都是建立在模糊综合评判方法基础上对产品进行可靠性分配的,所不同的是各种方法对模糊综合评判中不确定因素的划分、表示以及可靠性影响因素的权值分配上有所差异。事实上,很多新产品的的设计都是在原有产品基础之上进行改进、改型的,航空发动机就是属于这种产品。虽然航空发动机由于其型号不同、类型不同存在一定的差异,但是新型的航空发动机绝大部分是在原有的型号上进行改进、改型的。因此,原有型号的可靠性试验数据与维修信息对新型发动机的可靠性分配有很重要的指导作用,该作用不可忽视。此外,虽然专家在进行模糊综合评判时也考虑到了旧型号的相关信息,但是往往由于模糊综合评判的因素过多、过杂而削弱了旧型号可靠性数据对新产品可靠性分配的指导作用。本文正是考虑到这个问题的存在,提出模糊相似比例分配与模糊综合评判相结合的可靠性分配法。在模糊相似比例分配中,考虑到旧型号与新型号的相似度,引入模糊相似度的概念。最后,根据不同的权重因子将模糊相似比例分配与模糊综合评判分配结合在一起,以求得在一定置信水平下的可靠性分配值。

1 航空发动机可靠性分配方法

航空发动机的子系统和部件间基本上是串联

关系,因此整个可靠性分配过程中仅采用串联结构,并且按串联模型处理也是基于最安全角度的考虑^[2,5,8]。

文献[5]中给出了某型航空发动机主机的可靠性指标为 $\lambda^* = 0.1514\%$,并将该指标分配给压气机、燃烧室、涡轮、尾喷管和附件传动装置5个单元。下面将针对该指标要求详细阐述本文所提出的可靠性分配方法。

1.1 模糊相似比例分配法

模糊相似比例分配法是对传统相似比例分配法的改进。传统的相似比例分配法仅考虑将旧型号产品各部件子系统间失效率的相互比率延续到下代新型号产品中,也就是说仅仅是将新的可靠性指标按原各部件分配比率重新分配。这种方法对于新产品中有部件进行较大改进的情况是不合理的,况且新型号产品与旧型号产品完全一致的可能性也是相当小的,因此本文引入相似度的概念来刻画新产品与旧产品的一致程度。

1.1.1 失效比率

假设存在与新型号发动机相似的 N 种旧型号发动机($M_1, M_2, \dots, M_N$),可从现有这 N 种旧型号发动机的可靠性试验数据以及外场维修数据中获取其系统的可靠性指标(失效率) $\lambda_j^M (j = 1, 2, \dots, N)$ 以及子系统可靠性指标 $\lambda_i^M (i = 1, 2, \dots, Z)$,其中 Z 是该系统下的子系统的个数。在各个子系统之间是串联关系的情况下存在

$$\lambda_j^M = \lambda_{1j}^M + \lambda_{2j}^M + \dots + \lambda_{Zj}^M \quad (1)$$

并且

$$\lambda_{ij}^M = p_i \lambda_j^M \quad (2)$$

式中 $p_i = N_i / N_s$, N_i 是子系统 i 的失效总数, N_s 是系统的失效总数。 p_i 代表子系统 i 在系统中的失效比率,当已知系统的可靠度 R_s^M ,其子系统的可靠度就可以通过式(3)求得。

$$R_s^M = \left(R_{s_j}^M \right)^{p_i} \quad (3)$$

实际上,可靠性分配的目的就是得到各子系统的失效比率 p_i 。由于存在统计上的不精确和人为误差,不可能很精准地统计得到相似机型的 p_i ,因此我们采用三角正模糊数来表达这种不确定性。

1.1.2 模糊失效比率

假设一模糊数 A 为三角正模糊数,其隶属函数如下:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} (x - a) / (m - a), & a \leq x \leq m \\ (b - x) / (b - m), & m \leq x \leq b \\ 0, & \text{Else} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $a \leq m \leq b$, 且仅当 $x = m$ 时, 存在 $\mu_{\bar{A}}(m) = 1$, 该模糊数 $\bar{A}$ 可用符号 (δ_L, m, δ_R) 表示, 其中 $\delta_L = (m - a)$ 为 $\bar{A}$ 的左参数, $\delta_R = (b - m)$ 为 $\bar{A}$ 的右参数, m 为 $\bar{A}$ 的核. 当 $\delta_L = \delta_R = 0$ 时, $\bar{A}$ 为精确数, 不含有模糊性; δ_L 或 δ_R 越大, 表示不确定性越大. 用模糊数 $\tilde{p}_i$ 来描述子系统与系统的失效比率较采用某一准确的实数更能合理地刻画信息的不确定性. 因此, 对于 M_j 型号发动机, 某系统下的子系统的失效比率可表示成为

$$\tilde{P}_{M_j} = (\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_Z)_{M_j} \quad (5)$$

式中 $\sum_{i=1}^Z m_{\tilde{p}_i} = 1$

$m_{\tilde{p}_i}$ 表示模糊数 $\tilde{p}_i$ 的核.

1.1.3 模糊相似度

假设模糊数 $\tilde{L}_i$ 代表第 i 位专家认为的新型发动机与旧型发动机 M_j 的相似程度, 且该模糊数应满足 $a \geq 0, b \leq 1$, $\tilde{L}_i$ 在隶属度为 λ 时的截集为区间, 可表示为 $[a_i^\lambda, b_i^\lambda]$, 该区间也可称为模糊数 $\tilde{L}_i$ 在置信水平为 λ 时的置信区间.

采用打分的方式可获得所有 n 位专家对相似度评定的模糊数分值, 并通过模糊数运算获得待分配发动机与旧型号发动机的模糊相似系数 $\tilde{L}$, 其 λ 置信水平下的置信区间可表示为

$$\tilde{L}^\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{L}_i^\lambda = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^\lambda, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i^\lambda \right] \quad (6)$$

若 $\tilde{L}_i$ 均为三角模糊数, 则 $\tilde{L}$ 可表示为

$$\tilde{L} = (\delta_L, m, \delta_R) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{L_i}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{R_i} \right) \quad (7)$$

式中 $\delta_{L_i}, \delta_{R_i}, m_i$ 分别代表第 i 个专家对旧型发动机所给出的模糊相似系数的左右系数和核. 因此, 可获得专家对旧型发动机给出的模糊相似系数期望值 L_{M_j}

$$L_{M_j} = \frac{\int_{\delta_L}^{\delta_R} x \mu_{\tilde{L}}(x) dx}{\int_{\delta_L}^{\delta_R} \mu_{\tilde{L}}(x) dx} \quad (8)$$

由此可以得到考虑产品的相似度而采用相似比例法得到的待分配航空发动机子系统的模糊失效比率

$$\tilde{P}_{\text{比例}} = (\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_Z) = \frac{\sum_{j=1}^N L_{M_j} (\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_Z)_{M_j}}{\sum_{j=1}^N L_{M_j}} \quad (9)$$

则

$$\tilde{p}_i = \frac{\sum_{j=1}^N L_{M_j} (\tilde{p}_i)_{M_j}}{\sum_{j=1}^N L_{M_j}} \quad (i = 1, 2, \dots, Z) \quad (10)$$

表示新机型第 i 个子系统在系统中的模糊失效比率.

设置信水平为 λ , 则对应的期望失效比率系数取置信区间中值

$$P_{\text{比例}}^\lambda = \frac{a_\lambda + b_\lambda}{2} \quad (11)$$

其中 a_λ, b_λ 分别为模糊数 $\tilde{P}_{\text{比例}}$ 在置信水平为 λ 时的置信区间上下限. 若 $P_{\text{比例}}^\lambda = (p_1^\lambda, p_2^\lambda, \dots, p_Z^\lambda)$ 中, $p_1^\lambda + p_2^\lambda + \dots + p_Z^\lambda \neq 1$, 则需做归一化处理.

从式(9)可以看出, 如果待分配的新机型与旧机型越相似, 则该待分配新机型各子系统在系统中的失效比率 $\tilde{P}_{\text{比例}}$ 越接近于该旧机型. 一般来说, 需要尽量考虑机型相似系数 L_{M_j} 靠近 1 的旧机型的可靠性数据信息, 对于相似性较小 (如 $L_{M_j} \leq 0.5$) 的旧机型因其可参考的价值较小可以不予考虑.

1.2 模糊综合评判

文献[1-4, 8]均给出了采用模糊综合评判方法得到子系统各部件的可靠度水平比值, 从而可以转换为失效比率对每个子系统进行可靠性分配. 这里就不再详细阐述模糊综合评判的方法. 但是值得指出的是: 文献[5]中在得到各部件的模糊可靠度水平 $\tilde{Y}$ 后, 根据所给的置信水平求得置信区间中值作为期望模糊可靠性水平 Y^λ , 由此得到置信水平为 λ 的失效比率 $P_{\text{评判}}^\lambda$.

1.3 综合分配结果

综合分析上述两种方法, 同时考虑到新型航空发动机的设计过程并非完全摒弃过去旧型号而重新设计, 很多设计过程都在旧机型基础上效仿、改进、提高, 所以旧机型的可靠性数据对新型号的发动机可靠性分配具有很重要的指导作用. 因此, 认为新型航空发动机的失效比率可由下式决定

$$\tilde{P}_{\text{new}} = (\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_Z)_{\text{new}} = w_1 \tilde{P}_{\text{比例}} + w_2 \tilde{P}_{\text{评判}} \quad (12)$$

式中 $\tilde{P}_{\text{比例}}, \tilde{P}_{\text{评判}}$ 是分别采用模糊相似比例法和模糊综合评判法得到的模糊失效比率; w_1, w_2 是两种方法分别对应的系数, 且有 $w_1 + w_2 = 1$. w_1, w_2 同样可以通过专家评分的方式确定. 需要强调的是如果新机型在设计时, 其技术、工艺、制造等

方面较旧机型有较大提高,则 w_2 取值可相对高一些;若对模糊综合评判的信任度较低而新机型改进较少时,可使 w_1 取值高一些.当 $w_1 = 1$ 或 $w_2 = 1$ 时,该模型分别变成模糊相似比例法或模糊综合评判法.

当给定置信水平 λ 时,对应的失效比率为

$$P_{\text{new}}^{\lambda} = \left(p_1^{\lambda}, p_2^{\lambda}, \cdots, p_z^{\lambda} \right)_{\text{new}} =$$
$$w_1 P_{\text{比例}}^{\lambda} + w_2 P_{\text{评判}}^{\lambda} \tag{13}$$

2 实例分析

文献[5]给出了采用模糊综合评判法得到的压气机、燃烧室、涡轮、尾喷管和附属传动装置的可靠性水平 $\tilde{Y} = \left(\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \cdots, \tilde{y}_5 \right)$,其中

$$\tilde{y}_1 = (0.5, [4.6499, 5.6174], 0.4151)$$

$$\tilde{y}_2 = (0.4082, [2.8015, 3.7152], 0.2835)$$
$$\tilde{y}_3 = (0.4445, [2.2325, 2.9195], 0.3524)$$
$$\tilde{y}_4 = (0.4235, [5.8525, 6.8462], 0.5571)$$
$$\tilde{y}_5 = (0.2625, [7.5187, 8.5315], 0.3412)$$

由此可以得到在不同置信水平 λ 时对应的不同置信区间中值,以此作为置信水平为 λ 时的各部件可靠性水平值.取 $\lambda = 0.9$ 得失效比率为

$$P_{\text{评判}}^{0.9} =$$
$$\left(0.1994, 0.2179, 0.2246, 0.1873, 0.1708 \right)$$
假设已知该新机型是从相似旧机型 M_1 和 M_2 改型得到, M_1 和 M_2 对应的模糊失效比率 $\left(\tilde{p}_j \right)_{M_j}$ 、期望相似度 L_{M_j} 以及按式(9)所得新机型模糊失效比率 $\tilde{P}_{\text{比例}}$ 如表 1 所示.

表 1 旧机型与新机型失效比率值
Table 1 Failure rates of old and new versions

	M_1	M_2	New
$\tilde{p}_1$	(0.1, 0.25, 0.05)	(0.1, 0.35, 0.01)	(0.1, 0.3, 0.03)
$\tilde{p}_2$	(0.03, 0.2, 0.08)	(0.05, 0.1, 0.1)	(0.04, 0.15, 0.09)
$\tilde{p}_3$	(0.1, 0.3, 0.1)	(0.05, 0.3, 0.1)	(0.077, 0.3, 0.1)
$\tilde{p}_4$	(0.1, 0.15, 0.1)	(0.04, 0.1, 0.15)	(0.07, 0.13, 0.124)
$\tilde{p}_5$	(0.05, 0.1, 0.15)	(0.1, 0.15, 0.2)	(0.07, 0.12, 0.174)
L_{M_j}	0.9	0.8	-

由此得到置信度为 $\lambda = 0.9$ 时的期望模糊失效比率

$$P_{\text{比例}}^{0.9} =$$
$$\left(0.2965, 0.1525, 0.3012, 0.1327, 0.1252 \right)$$

归一化后得

$$P_{\text{比例}}^{0.9} =$$
$$\left(0.2941, 0.1513, 0.2987, 0.1316, 0.1242 \right)$$

通过专家评分后得权重系数 $w_1 = 0.6$, $w_2 = 0.4$,由式(13)得到在置信度 $\lambda = 0.9$ 时的新机型失效比率为

$$P_{\text{new}}^{\lambda} =$$
$$(0.2562, 0.1779, 0.2691, 0.1539, 0.1428)$$

新型机主机待分配可靠性指标为 $\lambda^* = 0.1514\%$,则压气机、燃烧室、涡轮、尾喷管和附属传动装置对应分配的失效率分别为 3.8789×10^{-5} , 2.6934×10^{-5} , 4.0742×10^{-5} , $2.3300 \times$

$$10^{-5}, 2.1620 \times 10^{-5}.$$

3 结 论

本文结合模糊相似比例分配法和模糊综合评判法,建立了航空发动机的一种新的可靠性分配方法.该方法既考虑了相似比例法能够充分利用已有机型的可靠性试验数据和维修记录相关的确定信息,并通过模糊相似度来刻画新机型与旧机型的相似程度,同时也考虑到模糊综合评判法对新机型的改型、改进等有效信息,对各部件失效比率进行相应调整,从而充分利用旧机型数据对新机型可靠性分配的指导作用,将确定信息与不确定信息融合在一起,在一定程度上弥补了目前单纯基于专家模糊综合评判确定可靠性指标分配方法的不足,并充分利用已有产品可靠性信息,获取更为可信的可靠性分配结果.

参考文献

- [1] 黄洪钟. 机械系统可靠性分配的模糊方法[J]. 机械科学与技术, 1996, 15(2): 182-186.
HUANG Hongzhong. The fuzzy method for the reliability apportionment of the mechanical system[J]. Mechanical Science and Technology, 1996, 15(2): 182-186. (in Chinese)
- [2] 赵德孜, 温卫东, 段成美. 基于模糊理论的燃气轮机可靠性分配[J]. 燃气轮机技术, 2003, 16(4): 44-47.
ZHAO Dezi, WEN Weidong, DUAN Chengmei. Reliability allocation of GT based on fuzzy theory[J]. Gas Turbine Technology, 2003, 16(4): 44-47. (in Chinese)
- [3] 徐勇, 侯朝桢, 杨国胜. 系统可靠性分配的神经网络模型[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(1): 90-92.
XU Yong, HOU Chaozhen, YANG Guosheng. Neural network model of system reliability assignment[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(1): 90-92. (in Chinese)
- [4] 杨明顺, 林志航, 陈琨, 等. 基于神经网络的模糊可靠性分配[J]. 机床与液压, 2002, (1): 19-21.
YANG Mingshun, LIN Zhihang, CHEN Kun, et al. Fuzzy distribution of reliability based on neural network[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2002, (1): 19-21. (in Chinese)
- [5] 赵德孜, 温卫东. 基于模糊综合评判的航空发动机可靠性分配方法[J]. 航空发动机, 2005, 31(1): 22-27.
ZHAO Dezi, WEN Weidong. An approach to aeroengine reliability index apportionment based on fuzzy synthetic assessment[J]. Aeroengine, 2005, 31(1): 22-27. (in Chinese)
- [6] 王永传, 庄钊文, 郁文贤. 基于遗传算法的模糊可靠性分配加权模型及其实现[J]. 机械科学与技术, 2001, 20(2): 185-187.
WANG Yongchuan, ZHUANG Zhaowen, YU Wenxian. Weighted model and realization of fuzzy reliability apportionment optimization based on genetic algorithm[J]. Mechanical Science and Technology, 2001, 20(2): 185-187. (in Chinese)
- [7] Yang J E, Hwang M J, Sung T Y, et al. Application of genetic algorithm for reliability allocation in nuclear power plant[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1999, 65(3): 229-238.
- [8] 赵德孜. 燃气轮机可靠性的模糊预计与优化分配[J]. 燃气轮机技术, 2005, 18(1): 47-51.
ZHAO Dezi. Fuzzy prediction and optimal allocation for gas turbine reliability[J]. Gas Turbine Technology, 2005, 18(1): 47-51. (in Chinese)
- [9] Dhillon B S. Reliability apportionment/allocation: A survey[J]. Microelectronic & Reliability, 1986, 26(6): 1121-1129.