

文章编号: 1000-8055(2009)05-1143-07

基于领域专家知识的发动机模糊 可靠性分配方法

古莹奎, 黄开启

(江西理工大学 机电工程学院, 赣州 341000)

摘 要: 提出了一种基于多领域专家知识的发动机模糊可靠性分配方法, 以降低决策者主观偏好以及分配过程中模糊和不确定因素对分配结果的影响。基于对影响发动机可靠性因素的分析, 建立了发动机模糊可靠性分配的数学模型, 并以三角模糊数代替常规层次分析法中的标度, 提出了一种模糊评判矩阵方法来确定影响可靠性因素的权重。在可靠性分配过程中, 充分考虑多领域专家的意见和产品开发过程的风险性。以应用实例对提出方法的有效可行性进行了验证。

关 键 词: 可靠性分配; 发动机; 模糊集; 评判矩阵; 模糊决策

中图分类号: TB114.3

文献标识码: A

Fuzzy reliability allocation method for engine based on the experts' knowledge

GU Ying-kui, HUANG Kai-qi

(School of Mechanical and Electromechanical Engineering,
Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: A fuzzy reliability allocation method for engine was proposed based on multi-field experts' knowledge. In this method, fuzzy set theory was used to decrease subjective preferences of decision makers as well as fuzzy and uncertain factors in reliability allocation process. The mathematical model of fuzzy reliability allocation for engine was constructed based on the analysis of influential factors to engine reliability allocation. A fuzzy evaluation matrix method was proposed to determine the weights of the influential factors in which the triangular fuzzy numbers were utilized to substitute the scaling scheme of conventional analytic hierarchy process. Experts' opinions and the risk index of the product development process were also taken into account in the method. An application example was used to verify effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: reliability allocation; engine; fuzzy set; evaluation matrix; fuzzy decision

随着科学技术的飞速发展以及新型复杂系统的建立, 各种机械设备和系统日趋复杂, 容量参数不断提高, 环境条件更加严苛, 可靠性问题日益突出。对发动机而言, 将其整机可靠性指标优化分配到各部件对于提高系统可靠性有着至关重要的意

义。目前, 在实际的可靠性分配中, 采用较多的仍是等分法、评分法、比例组合法等传统方法。但是, 影响发动机可靠性分配的因素在设计初期大多具有模糊性, 从而使得设计初期的发动机可靠性分配实质上表现为一种依赖于专家经验的模糊决

收稿日期: 2008-05-21; **修订日期:** 2008-07-16

基金项目: 中国博士后科学基金(20060391029); 江西省自然科学基金(2007 GQC0654); 江西省教育厅科学技术项目(GJJ09245)

作者简介: 古莹奎(1976-), 男, 河南南阳人, 副教授, 博士, 主要从事可靠性与优化设计方面的研究。

策^[1]. 目前,模糊可靠性分配主要是基于模糊综合评判的方法^[2-3],但大多现有的方法在实施过程中对专家知识的处理过于简单,不能充分体现多领域专家的综合意见,而且在分配过程中没有将产品开发的风险性评估融入分配过程. 基于以上不足,本文综合运用模糊集理论并充分考虑多领域专家的意见和产品开发过程的风险性,提出一种基于领域专家知识的发动机模糊可靠性分配方法,为发动机可靠性的最优分配提供科学依据.

1 发动机可靠性分配及系统划分

发动机的可靠性分配,是指将发动机整机可靠性指标逐级分配到子系统和零部件. 发动机的结构一般分为三级,即系统级、子系统级和零部件级. 因而发动机的可靠性分配一般也分两个步骤进行,即系统到子系统的可靠性分配和子系统到零部件的可靠性分配,这两个步骤所采用的可靠性指标和分配方法略有不同. 本文仅探讨系统到子系统级的可靠性分配方法. 在这一级的可靠性分配中,为了有效利用相似机型外场维修数据的统计结果,一般采用平均故障间隔时间(MTBF)做为指标. MTBF 和故障率λ之间有如下关系:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

发动机的整机一般可分为如下子系统:机体与汽缸盖组件、曲柄连杆机构、燃油供给系统、润滑系统、冷却系统、配气系统、起动系统和充电系统和其他等. 由此,待分配的发动机子系统可表示为 $S = (S_1, S_2, \cdots, S_l)$

2 基于专家知识的发动机模糊可靠性分配方法

2.1 模糊数及其运算

一个模糊数 $\bar{N} = \{(x, \mu_{\bar{N}}(x)), x \in \mathbf{R}\}$ 是定义在实数域 $\mathbf{R}$ 上的正规凸模糊集, $\mu_{\bar{N}}(x)$ 为从 $\mathbf{R}$ 到 $[0, 1]$ 上的连续映射. 模糊数 $\bar{N}$ 的隶属函数如图 1 所示,其一般表达式可以写为

$$\mu_{\bar{N}}(x) = \begin{cases} L(x), & l \leq x \leq m \\ R(x), & m \leq x \leq r \end{cases} \quad (1)$$

式中 $L(x)$ 为增函数,右连续,且 $0 \leq L(x) \leq 1$; $R(x)$ 为减函数,左连续,且 $0 \leq R(x) \leq 1$. 若 $L(x)$ 与 $R(x)$ 均为线性函数,则称 $\bar{N}$ 为三角模糊数,记为 $\bar{N} = (l, m, r), l \leq m \leq r$.

设 $\tilde{M} = (m_L, m_M, m_R)$ 和 $\tilde{N} = (n_L, n_M, n_R)$ 为

两个正的三角模糊数,则模糊数的基本运算如下^[4-5]:

$$\tilde{M} \oplus \tilde{N} = (m_L + n_L, m_M + n_M, m_R + n_R)$$

$$\tilde{M} \ominus \tilde{N} = (m_L - n_L, m_M - n_M, m_R - n_R)$$

$$\tilde{M} \otimes \tilde{N} = (m_L n_L, m_M n_M, m_R n_R)$$

$$\tilde{M} / \tilde{N} = (m_L / n_R, m_M / n_M, m_R / n_L)$$

$$k\tilde{M} = (km_L, km_M, km_R), \quad k > 0, k \in \mathbf{R}$$

若定义区间数的置信水平 $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$,则三角模糊数的 α 截集可以表示为^[6]

$$\forall \alpha \in [0, 1],$$

$$\text{使 } \tilde{N}_\alpha = [l^\alpha, r^\alpha] =$$

$$[(m - l)\alpha + l, -(r - m)\alpha + r]$$

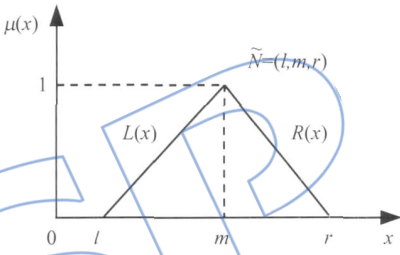


图 1 三角模糊数的隶属函数

Fig. 1 Membership function of triangular fuzzy numbers

2.2 建立影响发动机子系统可靠性的因素集

发动机可靠性的分配受到诸多主客观因素的制约. 可靠性工作小组在综合权衡发动机全寿命周期上的可靠性之后,确定以下因素对可靠性的分配具有较重要的影响: ①重要程度 F_1 , 即子系统失效对系统的影响程度; ②复杂程度 F_2 , 考虑组成该子系统的元器件数量、组装难易程度、元器件类型等; ③技术水平 F_3 , 考虑设计水平、制造水平、维修水平、结构工艺水平等因素; ④工作状况 F_4 , 考虑发动机工作的自然环境以及工作时间性质; ⑤产品类型 F_5 , 考虑产品是新品或是继承品等. 从而建立影响因素集,表示为 $F = (F_1, F_2, \cdots, F_n)$.

2.3 建立因素等级集和相应的分值集

因素集中各个因素所处的高低,大小,长短及优劣等状态,可用“高,较高,一般,较低,低”或“好,较好,一般,较差,差”等来表示. 此状态集合即为因素等级集,记为 $I = (I_1, I_2, \cdots, I_5)$,如表 1 所示.

为便于后续的计算,因素等级按照一定的顺序排列,将因素等级分为 5 级,低失效率(即高可靠性)对应的因素等级写在前面,如此类推,随着失效率增高,分别对应不同的因素等级.

表 1 因素等级表

Table 1 State grade table of the influence factors

因素等级						
影响因素		I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
		重要	较重要	一般	不太重要	不重要
重要程度 F_1		重要	较重要	一般	不太重要	不重要
复杂程度 F_2		低	较低	一般	较高	高
技术水平 F_3		高	较高	一般	较低	低
工作状况 F_4		很好	好	一般	差	较差
...		...	...	...	...	...

每个等级都给予一个相应的分值,如技术水平“高”(技术成熟,有把握保证高可靠性)记为 1,技术水平“较高”记为 2,技术水平“一般”记为 4,技术水平“较低”记为 8,技术水平“低”记为 16,则与该因素等级集对应的分值集为

$$I = (I_1, I_2, \cdots, I_5) = (1, 2, 4, 8, 16).$$

对 I 进行归一化,得到以下分值集

$$I = (I_1, I_2, \cdots, I_5) =$$

$$(0.032, 0.064, 0.129, 0.258, 0.516).$$

2.4 确定各影响因素的权重

从本质上讲,可靠性分配过程是一个在一系列影响因素制约下的最优化过程.各影响因素的权重对于可靠性分配结果有着至关重要的影响,赋予不同的权重将产生不同的分配结果,从而对发动机的性能造成至关重要的影响.由于很多影响因素本身具有模糊性和不确定性,用传统的专家评价法来确定影响因素的权重往往不能客观、确切地反映出评价因素真正的影响程度.模糊集理论为不确定和信息不完备环境下的建模与决策提供了有力的支持.这里依据领域专家的知识,采用模糊层次分析的方法来确定影响因素的权重,为得到客观、真实的评价结果提供科学依据^[7].

权重确定过程中,采用层次分析法中评价矩阵建立方法,聘请来自各相关领域的 p 个专家 $E_m (m = 1, 2, \cdots, p)$,对影响因素 $F_k (k = 1, 2, \cdots, n)$ 两两比较,建立评价矩阵.常规层次分析法在构造判断矩阵时,采用 1~9 标度法来衡量评判对象的相对优劣.尽管这种标度法具有简单明了和使用方便的特点,但其本质上的不精确性和模糊性为决策者进行评判带了的很大的困难,难以得到客观、真实的评价结果.为弥补这一不足,本文采用三角模糊数 $\tilde{1} \sim \tilde{9}$ 代替 1~9 标度来进行评判.三角模糊数的隶属函数及语言含义如图 2 和表 2 所示.

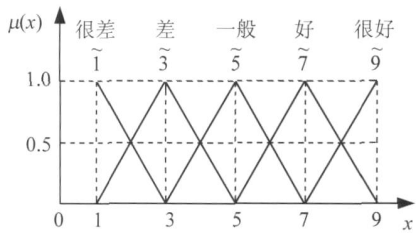


图 2 三角模糊数 $\tilde{1} \sim \tilde{9}$ 的隶属函数

Fig 2 Membership function of triangular fuzzy number $\tilde{1} \sim \tilde{9}$

表 2 三角模糊数 $\tilde{1} \sim \tilde{9}$ 的隶属函数及语言含义

Table 2 Fuzzy ratio scale and membership function of linguistic terms

模糊标度	隶属函数	语言变量
$\tilde{1}$	$(1, 1, 3)$	很差
$\tilde{3}$	$(1, 3, 5)$	差
$\tilde{5}$	$(3, 5, 7)$	一般
$\tilde{7}$	$(5, 7, 9)$	好
$\tilde{9}$	$(7, 9, 9)$	很好

依据第 m 个专家的知识建立的模糊评价矩阵为

$$\tilde{A}_m = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11m} & \tilde{a}_{12m} & \cdots & \tilde{a}_{1jm} & \cdots & \tilde{a}_{1nm} \\ \tilde{a}_{21m} & \tilde{a}_{22m} & \cdots & \tilde{a}_{2jm} & \cdots & \tilde{a}_{2nm} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{a}_{i1m} & \tilde{a}_{i2m} & \cdots & \tilde{a}_{ijm} & \cdots & \tilde{a}_{inm} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{a}_{n1m} & \tilde{a}_{n2m} & \cdots & \tilde{a}_{njm} & \cdots & \tilde{a}_{nnm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $\tilde{a}_{ijm} = \tilde{a}_{jim}^{-1}$, $\tilde{a}_{ijm} = (L_{ijm}, M_{ijm}, U_{ijm})$
令

$$\begin{cases} L_{ij} = \min(L_{ijm}) \\ M_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^p M_{ijm}}{p} \\ U_{ij} = \max(U_{ijm}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, n; m = 1, 2, \cdots, p$
令 $\tilde{a}_{ij} = (L_{ij}, M_{ij}, U_{ij})$

则依据 p 个专家的知识建立的模糊综合评价矩阵为

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1j} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \cdots & \tilde{a}_{2j} & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{a}_{i1} & \tilde{a}_{i2} & \cdots & \tilde{a}_{ij} & \cdots & \tilde{a}_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & \tilde{a}_{nj} & \cdots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

从而,对第 i 个影响因素,通过模糊运算可以计算其权重为

$$\tilde{w}_i = \frac{\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij}}, \quad i = 1, 2, \cdots, n; \quad j = 1, 2, \cdots, n \quad (5)$$

由此可以得到影响因素的模糊权重向量 $\tilde{w}$ 为

$$\tilde{w} = (\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \cdots, \tilde{w}_n) \quad (6)$$

2.5 构造评判矩阵

在整机到子系统的可靠性分配过程中,首先要依据影响该子系统可靠性分配的影响因素对该系统做出评判,从而确定分配到该子系统的可靠性比例。

对发动机的第 q 个子系统,采用三角模糊数 $\tilde{1} \sim \tilde{9}$,聘请来自各相关领域的 p 个专家 E_m ($m = 1, 2, \cdots, p$),首先依据第 k 个评价等级 I_k ($k = 1, 2, \cdots, m$) 对 n 个评价因素 F_i ($i = 1, 2, \cdots, n$) 进行评判,评价表(表 3) 和评价矩阵如下:

表 3 p 个专家依据第 k 个评价等级对 n 个因素的评价表
Table 3 Evaluation table of the n evaluation factors with respect to the k evaluation grades based on p experts

	I_k					
	E_1	E_2	$\cdots$	E_m	$\cdots$	E_p
F_1	$\tilde{a}_{1k1}$	$\tilde{a}_{1k2}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{1km}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{1kp}$
F_2	$\tilde{a}_{2k1}$	$\tilde{a}_{2k2}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{2km}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{2kp}$
$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$
F_i	$\tilde{a}_{ik1}$	$\tilde{a}_{ik2}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{ikm}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{ikp}$
$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$
F_n	$\tilde{a}_{nk1}$	$\tilde{a}_{nk2}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{nkm}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{nkp}$

$$\tilde{A}_{kp} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{1k1} & \tilde{a}_{1k2} & \cdots & \tilde{a}_{1km} & \cdots & \tilde{a}_{1kp} \\ \tilde{a}_{2k1} & \tilde{a}_{2k2} & \cdots & \tilde{a}_{2km} & \cdots & \tilde{a}_{2kp} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{a}_{ik1} & \tilde{a}_{ik2} & \cdots & \tilde{a}_{ikm} & \cdots & \tilde{a}_{ikp} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{a}_{nk1} & \tilde{a}_{nk2} & \cdots & \tilde{a}_{nkm} & \cdots & \tilde{a}_{nkp} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 $\tilde{a}_{ikm} = (L_{ikm}, M_{ikm}, U_{ikm})$ 为第 m 个专家对第 i 个评价因素依据第 k 个评价等级做出的评价。令

$$\begin{cases} L_{ik} = \min(L_{ikm}) \\ M_{ik} = \frac{\sum_{m=1}^p M_{ikm}}{p} \\ U_{ik} = \max(U_{ikm}) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $k = 1, 2, \cdots, m; i = 1, 2, \cdots, n; m = 1, 2, \cdots, p$ 。

则 p 个专家对第 i 个评价因素依据第 k 个评价等级做出的综合评价为

$$\tilde{a}_{ik} = (L_{ik}, M_{ik}, U_{ik}) \quad (9)$$

由此可得 p 个专家依据第 k 个评价等级对 n 个评价因素做出的综合评价,评价矩阵为

$$\tilde{A}_k = [\tilde{a}_{1k} \quad \tilde{a}_{2k} \quad \cdots \quad \tilde{a}_{ik} \quad \cdots \quad \tilde{a}_{nk}]^T \quad (10)$$

进一步,对子系统 q ,可得到 p 个专家依据所有 m 个评价等级对 n 个评价因素做出的综合评价,评价表(表 4) 及评价矩阵如下:

表 4 p 个专家依据 m 个评价等级对 n 个评价因素做出的综合评价表

Table 4 Comprehensive evaluation table of n evaluation factors with respect to m evaluation grades based on p experts

	I_1	I_2	$\cdots$	I_k	$\cdots$	I_m
F_1	$\tilde{a}_{11}$	$\tilde{a}_{12}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{1k}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{1m}$
F_2	$\tilde{a}_{21}$	$\tilde{a}_{22}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{2k}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{2m}$
$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$
F_i	$\tilde{a}_{i1}$	$\tilde{a}_{i2}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{ik}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{im}$
$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$
F_n	$\tilde{a}_{n1}$	$\tilde{a}_{n2}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{nk}$	$\cdots$	$\tilde{a}_{nm}$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1k} & \cdots & \tilde{a}_{1m} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \cdots & \tilde{a}_{2k} & \cdots & \tilde{a}_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{a}_{i1} & \tilde{a}_{i2} & \cdots & \tilde{a}_{ik} & \cdots & \tilde{a}_{im} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & \tilde{a}_{nk} & \cdots & \tilde{a}_{nm} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 $\tilde{a}_{ik}$ 为依据第 k 个评价等级对第 i 个评价因素做出的综合评价值。

对 $\tilde{A}$ 作归一化处理,令

$$\tilde{h}_{ik} = \frac{\tilde{a}_{ik}}{\sqrt[n]{\sum_{i=1}^n (\tilde{a}_{ik})^2}}, \quad k = 1, 2, \cdots, m \quad (12)$$

则综合评价矩阵转化为

$$\tilde{H} = \begin{bmatrix} \tilde{h}_{11} & \tilde{h}_{12} & \cdots & \tilde{h}_{1k} & \cdots & \tilde{h}_{1m} \\ \tilde{h}_{21} & \tilde{h}_{22} & \cdots & \tilde{h}_{2k} & \cdots & \tilde{h}_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{h}_{i1} & \tilde{h}_{i2} & \cdots & \tilde{h}_{ik} & \cdots & \tilde{h}_{im} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{h}_{n1} & \tilde{h}_{n2} & \cdots & \tilde{h}_{nk} & \cdots & \tilde{h}_{nm} \end{bmatrix} \quad (13)$$

在求得 $\tilde{w}$ 和 $\tilde{H}$ 后,由模糊变换得

$$\tilde{B} = \tilde{W} \circ \tilde{H} = (\tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \cdots, \tilde{b}_n) \quad (14)$$

式中 $\tilde{b}_k = \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \cdot \tilde{h}_{ik}; \quad k = 1, 2, \cdots, m.$

2.6 产品开发过程的风险评估

产品开发是一个充满风险的过程. 各种内外因素诸如产品设计、制造、装配所涉及技术的成熟程度、开发资金、供应商状况、市场状况等,都对产品开发成功与否产生很大的影响,加大了其风险性. 因此在进行可靠性分配时要充分考虑这一点,以降低产品开发的风险. 当产品开发所用到的技术均比较成熟,有成功的经验可以借鉴,开发资金充裕,供应商状况良好时,该产品开发方案所带来的风险明显较低,反之,则带有较高的风险.

在评价过程中,给定模糊综合评判向量 $\tilde{B}$ 的 $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ 截集,则有^[8]

$$\tilde{B}^\alpha = [\tilde{b}_1^\alpha \quad \tilde{b}_2^\alpha \quad \cdots \quad \tilde{b}_k^\alpha \quad \cdots \quad \tilde{b}_n^\alpha] \quad (15)$$

式中 $\tilde{b}_k^\alpha = [b_{kl}^\alpha, b_{kr}^\alpha],$

$$b_{kl}^\alpha = l_k + \alpha(m_k - l_k); \quad b_{kr}^\alpha = u_k - \alpha(u_k - m_k)$$

若给定风险指数 $\beta(0 \leq \beta \leq 1)$, 令

$$b_{k\beta}^\alpha = \beta b_{kl}^\alpha + (1 - \beta) b_{kr}^\alpha \quad (16)$$

则在风险指数 β 下的 $\tilde{B}^\alpha$ 为

$$\tilde{B}_\beta^\alpha = [b_{1\beta}^\alpha \quad b_{2\beta}^\alpha \quad \cdots \quad b_{k\beta}^\alpha \quad \cdots \quad b_{n\beta}^\alpha] \quad (17)$$

将各子系统所对应的 $\tilde{B}_\beta^\alpha$ 和对应的因素等级值 I 相乘,即可得到该子系统的综合评价分值

$$\varepsilon_q = \tilde{B}_\beta^\alpha \cdot I^T \quad (18)$$

发动机所有待分配可靠性的子系统的综合评价分值均可由以上方法求出,用向量表达为

$$\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \cdots, \varepsilon_i)$$

2.7 可靠性分配

如果所讨论发动机的系统失效率为 λ_s , 那么单元 q 所对应分配的失效率 λ_q 为

$$\lambda_q = \lambda_s \cdot \frac{\varepsilon_q}{\sum_q \varepsilon_q} \quad (19)$$

3 实例分析

以某内燃机生产企业在某新型发动机开发过程中可靠性的分配为例对提出的方法进行验证. 为了方便说明,选择 4 个发动机子系统来进行可靠性分配,即曲柄连杆机构、机体与汽缸盖组件、燃油供给系、润滑系. 系统失效率目标值 $\lambda_s = 0.005$. 待分配的发动机子系统依次表示为

$$S = (S_1, S_2, S_3, S_4)$$

首先确定影响发动机子系统可靠性的因素集,为便于分析,在进行可靠性分配时着重考虑以下因素:重要程度、复杂程度、技术水平 3 个因素. 将以上因素依次表示为 $F = (F_1, F_2, F_3)$.

按照 2.3 中建立的方法确定各因素等级集和相应的分值集.

$$I = (I_1, I_2, \cdots, I_5) =$$

$$(0.032, 0.064, 0.129, 0.258, 0.516)$$

按照 2.4 中建立的方法确定各因素的权重. 聘请来自于发动机设计、制造、使用及维修等方面的 4 位专家根据开发目标对各影响因素进行评价. 经过计算得出各自的权重为

$$\tilde{w}_1 = (0.255, 0.396, 0.634)$$

$$\tilde{w}_2 = (0.204, 0.310, 0.493)$$

$$\tilde{w}_3 = (0.178, 0.294, 0.445)$$

$$\tilde{W} = (\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \tilde{w}_3)$$

首先对第一个子系统 S_1 进行分析.

按照 2.5 中建立的方法构造评判矩阵. 聘请来自于发动机设计、制造、使用及维修等方面的 4 位专家根据评价等级对影响因素评价. 如依据第二个评价等级 I_2 , 4 位专家对 3 种因素的评价为

$$\tilde{A}_2 = \begin{bmatrix} \tilde{9} & \tilde{9} & \tilde{7} & \tilde{9} \\ \tilde{7} & \tilde{7} & \tilde{5} & \tilde{5} \\ \tilde{7} & \tilde{7} & \tilde{7} & \tilde{7} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} (7, 9, 9) & (7, 9, 9) & (7, 9, 9) & (7, 9, 9) \\ (5, 7, 9) & (5, 7, 9) & (3, 5, 7) & (3, 5, 7) \\ (5, 7, 9) & (5, 7, 9) & (5, 7, 9) & (5, 7, 9) \end{bmatrix}$$

则 4 位专家依据 I_2 对第一个因素的评价为

$$A_{12} = [(7, 9, 9) \quad (7, 9, 9) \quad (5, 7, 9) \quad (7, 9, 9)]$$

由式(8)可得

$$L_{12} = \{ \min(L_{ikm}), m = 1, 2, 3, 4 \} = \min(7, 7, 5, 7) = 5$$

$$M_{12} = \frac{\sum_{m=1}^4 M_{ikm}}{4} = \frac{9 + 9 + 7 + 9}{4} = 8.5$$

$$U_{12} = \{ \max(U_{ikm}), m = 1, 2, 3, 4 \} = \max(9, 9, 9, 9) = 9$$

则 4 位专家根据 I_2 对第一个因素的综合评价为

$$\tilde{A}_2' = [L_{12}, M_{12}, U_{12}]^T = [5, 8.5, 9]^T$$

依次计算,可得到 4 个专家依据 5 个等级对 3 个因素做出综合评价,综合评价矩阵为

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (7,9,9) & (5,8.5,9) & (5,7,9) & (3,6,9) & (1,4,7) \\ (3,6.5,9) & (3,6,9) & (3,5,7) & (1,5,9) & (1,4.5,9) \\ (3,6,9) & (5,7,9) & (3,6,9) & (5,7.5,9) & (5,8,9) \end{bmatrix}$$

由式(12)对 $\tilde{A}$ 作归一化处理,则综合评价矩阵转化为

$$\overline{H} = \begin{bmatrix} \tilde{h}_{11} & \tilde{h}_{12} & \tilde{h}_{13} & \tilde{h}_{14} & \tilde{h}_{15} \\ \tilde{h}_{21} & \tilde{h}_{22} & \tilde{h}_{23} & \tilde{h}_{24} & \tilde{h}_{25} \\ \tilde{h}_{31} & \tilde{h}_{32} & \tilde{h}_{33} & \tilde{h}_{34} & \tilde{h}_{35} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{h}_{11} = (0.4990, 0.7132, 1.0995); \quad \tilde{h}_{12} = (0.3207, 0.6778, 1.1717);$$

$$\tilde{h}_{21} = (0.1924, 0.5151, 1.0995); \quad \tilde{h}_{22} = (0.1924, 0.4785, 1.1717);$$

$$\tilde{h}_{31} = (0.1924, 0.4755, 1.0995); \quad \tilde{h}_{32} = (0.3207, 0.5882, 1.1717);$$

$$\tilde{h}_{13} = (0.3442, 0.6674, 1.3725); \quad \tilde{h}_{14} = (0.1924, 0.5541, 1.5213); \quad \tilde{h}_{15} = (0.0688, 0.3995, 1.3471);$$

$$\tilde{h}_{23} = (0.2065, 0.4767, 1.0675); \quad \tilde{h}_{24} = (0.0642, 0.4618, 1.5213); \quad \tilde{h}_{25} = (0.0688, 0.4494, 1.7320);$$

$$\tilde{h}_{33} = (0.2065, 0.5721, 1.3725); \quad \tilde{h}_{34} = (0.3207, 0.6926, 1.5213); \quad \tilde{h}_{35} = (0.3442, 0.7990, 1.7320);$$

由式(14)进行模糊变换有

$$\tilde{B} = [\tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \tilde{b}_3, \tilde{b}_4, \tilde{b}_5]$$

$$\tilde{b}_1 = (0.2007, 0.5819, 1.7284); \quad \tilde{b}_2 = (0.1781, 0.5897, 1.8419);$$

$$\tilde{b}_3 = (0.1667, 0.5803, 2.0072); \quad \tilde{b}_4 = (0.1192, 0.5662, 2.3915); \quad \tilde{b}_5 = (0.0928, 0.5324, 2.4787)$$

给定模糊综合评判向量 $\tilde{B}$ 的 $\alpha(\alpha = 0.9)$ 截集,则由式(15)有

$$\tilde{B}^{\alpha.9} = [(0.5438, 0.6965), (0.5458, 0.7149), (0.5389, 0.7230), (0.5215, 0.7487), (0.4884, 0.5727)]$$

给定风险指数 $\beta(\beta = 0.2)$,则由式(17),在风险指数 β 下的 $\tilde{B}^{\alpha}$ 为

$$\tilde{B}^{\alpha.9}_{0.2} = [0.6660, 0.6816, 0.6862, 0.7033, 0.6793]$$

由式(18)可以得出该子系统的综合评价分值 $\varepsilon = 0.5039$.

对其余各个子系统,均可按照以上步骤算出其综合评价分值, $\varepsilon = 0.1182, \varepsilon = 0.3134, \varepsilon = 0.2415$.

由式(19)确定各个子系统的可靠性

$$\lambda_k = 0.005 \cdot \frac{0.5039}{0.5039 + 0.1182 + 0.3134 + 0.2415} = 0.00214$$

$$\lambda_e = 0.005 \cdot \frac{0.1182}{0.5039 + 0.1182 + 0.3134 + 0.2415} = 0.00050$$

$$\lambda_g = 0.005 \cdot \frac{0.3134}{0.5039 + 0.1182 + 0.3134 + 0.2415} = 0.00133$$

$$\lambda_h = 0.005 \cdot \frac{0.2415}{0.5039 + 0.1182 + 0.3134 + 0.2415} = 0.00103$$

4 结 论

可靠性分配的本质是一个工程决策过程,是一个综合权衡优化的问题.由于决策过程本身的复杂性,以及影响发动机可靠性的因素在设计初期大多具有模糊性和不确定性,加大了客观决策的难度,使得使用传统的可靠性分配方法难以得

出科学客观的结果.基于以上存在的问题,本文提出了一种基于领域专家知识的发动机模糊可靠性分配方法,应用模糊集理论,并充分考虑到多领域专家的意见和产品开发过程的风险性,为从系统级到子系统级进行客观、合理的可靠性分配提供科学依据,从而确保新开发的产品具有高的可靠性.

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 赵德孜, 温卫东, 段成美, 等. 机械系统设计初期可靠度模糊分配方法的研究[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(7): 852-856.
ZHAO Dezi, WEN Weidong, DUAN Chengmei, et al. Study on fuzzy apportionment of mechanical system reliability during conceptual design[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(7): 852-856. (in Chinese)
- [3] 邵旭飞, 宋保维, 毛昭勇, 等. 串联系统可靠性分配的模糊层次分析方法[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(1): 250-253, 256.
SHAO Xufei, SONG Baowei, MAO Zhaoyong, et al. A fuzzy analytic hierarchy process method for reliability apportionment of series systems[J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2007, 27(1): 250-253, 256. (in Chinese)
- [4] Ayag Z. An integrated approach to evaluating conceptual design alternatives in a new development environment[J]. Journal of Production Research, 2005, 43(4): 687-713.
- [5] Vanegas L V, Labib A W. Fuzzy approaches to evaluation in engineering design[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2005, 127(1): 24-33.
- [6] Zeki A. A fuzzy AHP-based simulation approach to concept evaluation in a NPD environment[J]. IIE Transactions, 2005, 37(9): 827-842.
- [7] 古莹奎, 吴陆恒. 机械运动方案评价中评价因素权重的模糊层次分析法[J]. 中国机械工程, 2007, 18(9): 1052-1055, 1067.
GU Yingkui, WU Luheng. A fuzzy AHP approach to the determination of weights of evaluation factors in mechanism scheme evaluation process[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(9): 1052-1055, 1067. (in Chinese)
- [8] Zsidisin G A. A grounded definition of supply risk [J]. Journal of Purchasing and Supply Management, 2003, 9: 217-224.