

文章编号: 1000-8055 (2004) 03-0320-06

基于模糊数的 航空发动机可靠性预计模型

赵德孜^{1, 2}, 温卫东¹, 段成美²

(1 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2 海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041)

摘要: 根据模糊数适于量化模糊信息的特点, 运用模糊集和区间分析理论, 提出了一种基于模糊数的多级模糊综合评判方法, 它能更好地根据模糊信息作出模糊决策。在此基础上, 结合航空发动机可靠性的特点, 建立了一种航空发动机可靠性预计的模型。该模型的特点是能够在综合考虑各种可靠性影响因素及其模糊性的情况下, 对发动机的可靠性水平作出较为客观的综合评判, 尤其适用于航空发动机设计初期的可靠性预计。

关键词: 航空; 航天推进系统; 航空发动机; 可靠性预计; 模糊决策; 模糊数; 区间分析

中图分类号: V 231; O 159

文献标识码: A

A Model of Aeroengine Reliability Prediction Based on Fuzzy Number

ZHAO De-zi^{1, 2}, WEN Wei-dong¹, DUAN Cheng-mei²

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Qingdao Branch of Naval Aeronautics Engineering Institute, Qingdao 266041, China)

Abstract: According to the property of fuzzy number which is suited for quantifying fuzzy information, an approach to multi-stage fuzzy synthetical assessment based on fuzzy number is proposed by use of fuzzy sets and interval analysis, which can make a fuzzy decision well in terms of fuzzy information. A model of reliability prediction for an aeroengine is developed by applying the approach and considering the reliability properties of an aeroengine. By means of the model, the reliability level of an aeroengine can be assessed more objectively because a variety of the factors influencing aeroengine reliability can be synthetically considered in the model. Therefore the model is particularly adaptable to the reliability prediction in initial design stage for an aeroengine.

Key words: aerospace propulsion system; aeroengine; reliability prediction;
fuzzy decision making; fuzzy number; interval analysis

航空发动机是一种集热力气动、燃烧、传热、结构强度、控制与测试等多学科于一身, 温度、压力、应力、间隙和腐蚀等工作条件非常苛刻, 且

对重量、可靠性、寿命等要求又极高的复杂系统。它的研究与发展工作就是在内部物理化学过程尚无法精确计算的条件下探索材料和零部件工作的

收稿日期: 2003- 10- 14; 修订日期: 2004- 02- 26

作者简介: 赵德孜 (1962-), 男, 江苏镇江人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 海军航空工程学院青岛分院副教授, 主要从事航空发动机可靠性、系统工程和航空发动机控制技术研究

极限。因此,航空发动机的可靠性设计是一项难度很高的工作,而它的可靠性预计则是可靠性设计的重要任务之一。GJB 450-88规定,航空发动机的可靠性预计应从设计初期(方案的论证及设计阶段)就开始实施。由于航空发动机属于多发性故障、多故障模式类别的复杂机电产品(对于采用数控系统的发动机而言),其可靠性数据的统计结果会因统计方法的不同相差很大,且不同型号及类型发动机的可靠性数据也往往具有较大的特异性,因而适用于设计初期新机可靠性预计的可靠性数据或是不足,或是可信性不大。另一方面,影响发动机可靠性的因素很多,且在设计初期大多具有不同程度的模糊性。因此,新机设计初期的可靠性预计实质上就是一种模糊决策,文献[1~3]中的常规预计方法在此不适用。文献[4,5]给出了基于模糊理论的电子产品可靠性预计的方法,但因电子可靠性的特点不同于机械可靠性^[6],更不同于航空发动机可靠性的特点^[1],这些方法在此也不适用。文献[7]提出了一种应用现有的模糊综合评判模型,进行机械产品可靠性预计的方法,它假设机械产品的寿命服从指数分布且预知其中某个单元的可靠度。显然,该方法用于发动机可靠性预计的效果不佳。为此,本文在改进现有模糊综合评判理论的基础上,提出一种发动机设计初期的可靠性预计模型。

1 可靠性预计模型

航空发动机主要由若干主件(压气机、燃烧室和涡轮等)和附件(控制系统、滑油系统和电气系统等)串联而成,其可靠性模型是串联系统。这里,发动机的主件和附件统称为子系统。不同的研制阶段,其可靠性预计的对象不同。一般说来,随着研制进程的不断深入,可获得的可靠性数据不断增加,可靠性预计的对象也应该逐步向零件级细化。在设计初期,应以子系统级为可靠性预计的对象。只要分别预计出各个子系统的可靠性,就可以根据可靠性模型(不管是串联系统还是混联系统)预计出整个发动机的可靠性。因此,下面以子系统的可靠度 R_s 为对象,阐述可靠性预计模型。需要指出的是,下述模型的基本方法可以适用于各个层次的可靠度预计。

1.1 确定子系统可靠度的因素集和备择集

子系统可靠度的影响因素很多,其权重值不仅难以决定,而且会因“归一化”的要求变得很小,不易体现主要影响因素的作用,从而影响模

糊决策的合理性。根据文献[1],以影响因素的属性为依据,将影响因素归纳为3个类因素:设计、试验和制造。鉴于子系统的固有属性(复杂程度和技术成熟度等)和使用属性(工作条件和使用任务等)应在设计和试验中加以考虑,故这里不再单独考虑。以类因素为元素组成的普通集合称为因素集 U ,即:

$$U = \{\text{设计, 试验, 制造}\} = \{U_1, U_2, U_3\}$$

再将类因素 U_i 进一步细分为若干个基本因素(子因素), $i = 1, 2, 3$,由此组成因素子集:

$$U_1 = \{\text{设计规范, 设计理论, 设计经验}\} = \{u_{11}, u_{12}, u_{13}\}$$

$$U_2 = \{\text{试验规范, 试验技术, 试验设备}\} = \{u_{21}, u_{22}, u_{23}\}$$

$$U_3 = \{\text{工艺, 设备, 材料, 保质体系}\} = \{u_{31}, u_{32}, u_{33}, u_{34}\}$$

备择集 V 是由子系统可能具备的可靠度所组成的普通集合,故备择集可设为:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$$

1.2 建立影响因素的权重集

众因素对子系统可靠度的影响程度往往不同,需确定它们的权重。权重的合理性将在很大程度上影响决策的合理性,目前的赋权方法可分为两类:主观赋权法和客观赋权法。后者通常需要许多可靠性数据,故这里不适用。主观赋权法是基于专家的经验,虽具有较强的主观性,但较适合于可靠性数据缺乏的设计初期可靠性预计。但是,现有的主观赋权法,如专家调查法、AHP法和模糊二元排序法等,均将专家的评分处理为一个精确值,这与决策信息不足的实际情况不符。模糊理论中的模糊数是实数域上的一种特殊模糊集,也是一种表示模糊信息的有效方法,因而这里将其应用于权重赋值及后面的模糊评判,以弥补现有模糊评判方法的不足。模糊数有多种,这里所要采用的是有界正模糊数。

1.2.1 有界正模糊数

定义1 设 $\tilde{f}$ 是实数域 R 上的模糊集,若:

$$\forall x_1, x_2, x_3 \in R, \text{ 且 } x_1 > x_2 > x_3$$

均有:

$$\tilde{f}(x_2) \geq \tilde{f}(x_1) \wedge \tilde{f}(x_3)$$

称 $\tilde{f}$ 为凸模糊集。又若 $\tilde{f}$ 的核 $\text{Ker}(\tilde{f}) \neq \emptyset$,则称 $\tilde{f}$ 是正规凸模糊集。

定义2 $\forall \lambda \in [0, 1]$,若正规凸模糊集 $\tilde{f}$ 的

λ 截集 $I_\lambda = [a, b]$, $b \geq a \geq 0$, 则称 $\tilde{f}$ 为有界正模糊数。

因权重值和可靠度均不大于 1, 故 $b \in [0, 1]$ 。有界正模糊数有多种, 这里采用工程中常用的三角正模糊数 (TFN), 原因在于其参数在决策信息欠缺时宜于确定, 且计算简便。设 $\tilde{f}$ 为 TFN, 其隶属函数:

$$\tilde{f}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq \alpha \text{ or } x \geq \beta \\ \frac{x - \alpha}{m - \alpha} & \alpha \leq x \leq m \\ \frac{\beta - x}{\beta - m} & m \leq x \leq \beta \end{cases}$$

令 $\delta = m - \alpha$, $\delta_k = \beta - m$, 两者分别称为 TFN 的左、右分布参数, 它们反映了 $\tilde{f}$ 所含信息的模糊程度, 则用三元组 (m, δ, δ_k) 表示。 $\delta = \delta_k = \delta > 0$ 时, $\tilde{f}$ 简写成 (m, δ) , 意为“大约为 m ”; m 为 TFN 的均值, 且分布参数越大, 模糊程度越大; $\delta = \delta_k = \delta = 0$ 时, $\tilde{f}$ 成为确定量 m 。 $\delta > \delta_k$ 时, $\tilde{f}$ 意为“大约为 m , 但略小于 m 的可能性较大”; 且 δ 比 δ_k 越大, 这种可能性也就越大。因此, 通过调整分布参数, TFN 可以丰富地表达模糊语言。若允许专家用 TFN 赋权, 可以使赋权结果更为合理, 也有利于提高决策的可信度, 因而合理的评分应该是一个 TFN。

定理 设三角正模糊数 $\tilde{f}_i$ 和 $\tilde{f}_j$ 的 λ 截集:

$$I_\lambda = [a_i, b_i], \quad I_\lambda = [a_j, b_j]$$

$k > 0$, 则有:

$$k \sum_{i=1}^n I_\lambda = \left[k \sum_{i=1}^n a_i, k \sum_{i=1}^n b_i \right] \quad (1)$$

$$\frac{I_\lambda}{I_\lambda} = \left[\frac{a_i}{b_j}, \frac{b_i}{a_j} \right] \quad (2)$$

该定理的证明参见文献 [8]。

1.2.2 权重赋值及权重集

为便于专家评分, 设评分等级为八级, 即“很不重要 (1)、不重要 (2)、较不重要 (3)、一般 (4)、较重要 (5)、重要 (6)、很重要 (7)、极为重要 (8)”; 括号内的 TFN 为基准分, 例如, 其中 δ 和 δ_k 由专家根据 TFN 的上述特性给出, 当决策信息比较模糊时, δ 和 δ_k 应选择较大的值。以类因素的赋权为例。设参与赋权的专家人数为 n , $\tilde{w}_{ij}$ 是第 j 位专家给类因素 U_i 评定的模糊权重, $i = 1, 2, 3$; $j = 1, 2, \dots, n$ 。借助 MATLAB 的模糊逻辑工具箱, 权重的算法如下:

(1) 利用工具箱的 “trinf” 和 “fuzarith” 函

数, 可以求出 U_i 的模糊平均权重 $\tilde{w}_i$;

(2) 利用工具箱的 “defuzz” 函数, 用质心法^[9]对 $\tilde{w}_i$ 进行去模糊化处理, 得到 U_i 的权重值;

(3) 重复步骤 (1) 和 (2), 即可得到其它类因素的权重值;

(4) 对类因素的权重值进行归一化处理, 得到类因素的权重集, 即 $\tilde{W} = (\tilde{W}_1, \tilde{W}_2, \tilde{W}_3)$ 。

(5) 重复上述 4 个步骤, 即可得到因素子集的权重集 $\tilde{w}_i$, $i = 1, 2, 3$ 。

1.3 模糊综合评判

模糊综合评判分为两级。一级评判是按每个类因素中的各个子因素进行综合评判。在现有的综合评判方法中, 评判对象属于某个备择元素的隶属度为一个精确值。基于与赋权相同的原因, 这里的隶属度用 TFN 表示。假定按类因素 U_i ($i = 1, 2, 3$) 中的第 j 个子因素 u_{ij} 评判时, 评判对象属于备择元素 v_k 的模糊隶属度为 $\tilde{r}_{ijk}$, $k = 1, 2, \dots, m$ 。则一级评判矩阵 $\tilde{R}_i = [\tilde{r}_{ijk}]_{p \times m}$, $i = 1, 2, 3$ 。

这里, 模糊隶属度 $\tilde{r}_{ijk}$ 可以理解为: 从子因素 u_{ij} 来看, 评判对象取 v_k 的可能性 (模糊概率)。当多名专家参与评判时, $\tilde{r}_{ijk}$ 取其平均值。然后再对类因素 U_i 进行模糊综合评判, 得到评判集:

$$\tilde{B}_i = \tilde{W}_i \circ \tilde{R}_i = (\tilde{b}_{i1}, \tilde{b}_{i2}, \dots, \tilde{b}_{im})$$

$$i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

本模型的合成 “ $\circ$ ” 均采用 “+ , $\times$ ” 模糊算子, 这是因为该算子既考虑了所有因素的影响, 又保留了一级评判的全部信息。二级评判矩阵应为一级评判结果 $\tilde{B}_i$ 构成的矩阵 $\tilde{R}$, 即 $\tilde{R} = [\tilde{B}_1, \tilde{B}_2, \tilde{B}_3]^T$ 。考虑类因素之间的权重 $\tilde{W}$ 后, 得二级模糊综合评判指标:

$$\tilde{D} = \tilde{W} \circ \tilde{R} = [\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_m] \quad (4)$$

为得到预计结果, 对 $\tilde{d}_k$ ($k = 1, 2, \dots, m$) 运用加权平均法进行处理, 即将 $\tilde{d}_k$ 作为权数, 以对各个备择元素 v_k 进行加权平均的值作为评判结果, 则:

$$\tilde{R}_{ss} = \sum_{k=1}^m \tilde{d}_k v_k / \sum_{k=1}^m \tilde{d}_k \quad (5)$$

这里, $\tilde{R}_{ss}$ 也是一个模糊数。设参与一级评判的专家人数为 n , 则上述模糊综合评判的算法如下:

(1) 采用权重算法的步骤 (1), 可求出专家评判的平均结果 $\tilde{r}_{ijk}$, $j = 1, 2, \dots, p$, $k = 1, 2, \dots, m$, 从而得到一级评判矩阵 $\tilde{R}_i$, $i = 1, 2, 3$;

(2) $\forall \lambda \in [0, 1]$, 根据式 (1)、(3) 和

- (4), 求出阈值为 λ 时的二级模糊综合评判指标;
- (3) 令式 (1) 中的 $k=0$, 再根据式 (2) 和
- (5), 求出阈值为 λ 时的子系统可靠度 $\tilde{R}_{ss}^{(\lambda)}$;
- (4) 对不同的 λ , 重复步骤 (2) 和 (3), 即可得到不同阈值下子系统的可靠度 $\tilde{R}_{ss}^{(\lambda)}$ 。

由上述方法得到的评判结果实质上是由一系列不同阈值下的 $\tilde{R}_{ss}^{(\lambda)}$ 所组成的模糊集合 $\tilde{R}_{ss}$ (具体讲就是一个模糊数), 而 $\tilde{R}_{ss}^{(\lambda)}$ 是一个区间数 (这里可视为一个普通集合)。这里的阈值 λ 也称为置信水平^[7, 10], 即 $\tilde{R}_{ss}^{(\lambda)}$ 的置信水平是 λ , 则 $\tilde{R}_{ss}^{(\lambda)}$ 也相应地称为置信区间。需要指出的是, 这里的置信水平概念与概率统计中区间估计的置信水平概念是有显著差别的。根据文献 [11] 提出的可能性理论, 这里的置信水平意指区间数 $\tilde{R}_{ss}^{(\lambda)}$ 隶属于模糊集合 $\tilde{R}_{ss}$ 的可能性, 并且置信水平 λ 越高, 可能性越大, 置信区间越小, 模糊性越弱。但是, $\lambda=1$ 时, $\tilde{R}_{ss}^{(\lambda)}$ 为确定值, 又从某种意义上失去了模糊评判的内涵, 因而建议在实际使用中取 $\lambda=0.9\sim 0.95$ 。

2 示 例

限于篇幅, 这里仅以压气机首翻期的可靠度预计为示例, 阐述本模型的应用方法。用此方法, 同样也可以预计出其它子系统的可靠度, 进而预

计出整个发动机的可靠度。压气机可靠度的因素集和因素子集如上所述。根据其它压气机的统计数据和使用经验, 压气机首翻期的可靠度一般为 $0.96\sim 0.98$ 。因此, 本压气机的可靠度备择域可在此基础上稍加扩展, 则备择集可设置为 $V=\{0.95, 0.97, 0.975, 0.98, 0.99\}$, 但也不宜过多, 否则会给专家的评判带来困难, 反而影响评判的准确性。现有4位专家参与评判, 他们给出的类因素模糊权重如表1所示。

用 MATLAB 编写权重的计算程序, 计算后得到 $\tilde{W}=(0.349, 0.305\ 8, 0.345\ 2)$ 。同样, 可以得到子因素的权重集:

$$\tilde{W}_1=(0.333\ 4, 0.410\ 3, 0.256\ 3)$$

$$\tilde{W}_2=(0.375\ 1, 0.300\ 6, 0.324\ 3)$$

$$\tilde{W}_3=(0.296\ 2, 0.240\ 7, 0.271\ 7, 0.191\ 4)$$

这里, 一级评判采用对称的 TFN ($\delta=\delta_k$), 并将模糊评语分成3个等级: “有可能是 m ”, 采用模糊数 $(m, 0.615)$; “可能是 m ”, 采用模糊数 $(m, 0.08)$; “很可能是 m ”, 采用模糊数 $(m, 0.04)$ 。表2列出了4位专家针对子因素“设计规范”各自进行地单因素模糊评判。

由表2中可知: 1号专家认为, 就压气机的设

表1 专家评定的类因素模糊权重
Table 1 Fuzzy weights of group factors assessed

专家	类因素		
	设计	试验	制造
N _a 1	(8, 0.6, 0.2)	(7, 0.5, 0.3)	(7.0.2, 0.6)
N _a 2	(7, 0.5)	(6.5, 0.4, 0.7)	(8, 0.4, 0.3)
N _a 3	(8, 0.7, 0.1)	(6, 0.2, 0.8)	(7, 0.7, 0.3)
N _a 4	(8, 0.4)	(7, 0.6)	(8, 0.5, 0.2)

表2 针对子因素“设计规范”的单因素评判
Table 2 Single factor assessment for " design standard"

专家	可能性				
	0.95	0.97	0.975	0.98	0.99
N _a 1	(0.20, 0.04)	(0.75, 0.08)	(0.90, 0.08)	(1.0, 0.15)	(0.60, 0.08)
N _a 2	(0.30, 0.08)	(0.85, 0.04)	(1.0, 0.08)	(0.9, 0.08)	(0.70, 0.15)
N _a 3	(0.20, 0.15)	(0.70, 0.08)	(0.95, 0.08)	(1.0, 0.15)	(0.90, 0.15)
N _a 4	(0.25, 0.08)	(0.80, 0.08)	(0.95, 0.04)	(1.0, 0.08)	(0.75, 0.08)

计规范来看, 压气机可靠度取0.95的可能性“很可能是20%”, 取0.97的可能性“可能是75%”, 取0.975的可能性“可能是90%”, 取0.98的可能性“有可能是100%”, 其余的以此类推。用MATLAB 编程计算, 得到平均的评判结果:

$$\tilde{r}_{11} = [(0.237\ 5, 0.087\ 5), (0.775, 0.07), (0.95, 0.07), (0.975, 0.115), (0.7375, 0.115)]$$

采用同样的方法, 可以得到对其它子因素进行单因素模糊评判的平均评判结果, 进而得到 $\tilde{R}_{10}$ 。同理, 也可以得到 $\tilde{R}_2, \tilde{R}_3$ 。然后根据式(3), 得二级模糊综合评判的评判矩阵 $\tilde{R}$ 。最后, 根据式(4)和(5), 就可以得到不同置信水平下的压气机可靠度, 表3列出了部分评判结果。

$$\begin{aligned} \tilde{R}_1 = & \begin{bmatrix} (0.237\ 5, 0.087\ 5) & (0.775, 0.007) & (0.95, 0.07) & (0.975, 0.115) & (0.737\ 5, 0.115) \\ (0.225, 0.05) & (0.812\ 5, 0.095) & (0.925, 0.077\ 5) & (0.987\ 5, 0.077\ 5) & (0.825, 0.087\ 5) \\ (0.312\ 5, 0.097\ 5) & (0.862\ 5, 0.115) & (0.975, 0.097\ 5) & (0.925, 0.122\ 5) & (0.712\ 5, 0.095) \end{bmatrix} \\ \tilde{R}_2 = & \begin{bmatrix} (0.3125, 0.1225) & (0.7125, 0.0975) & (0.9875, 0.06) & (0.925, 0.095) & (0.8125, 0.1225) \\ (0.2125, 0.0975) & (0.625, 0.1325) & (0.9375, 0.0975) & (0.995, 0.095) & (0.890, 0.0775) \\ (0.7125, 0.115) & (0.925, 0.0875) & (0.9875, 0.0775) & (0.8625, 0.0975) & (0.5625, 0.115) \end{bmatrix} \\ \tilde{R}_3 = & \begin{bmatrix} (0.6125, 0.06) & (0.875, 0.0875) & (0.9625, 0.06) & (0.9375, 0.115) & (0.5625, 0.08) \\ (0.6875, 0.095) & (0.925, 0.07) & (0.9875, 0.0775) & (0.925, 0.095) & (0.5875, 0.0875) \\ (0.5625, 0.0775) & (0.9125, 0.115) & (0.995, 0.0875) & (0.95, 0.07) & (0.5375, 0.1225) \\ (0.725, 0.0975) & (0.975, 0.095) & (0.9875, 0.07) & (0.9125, 0.0975) & (0.6125, 0.1325) \end{bmatrix} \\ \tilde{R} = & \begin{bmatrix} (0.2516, 0.0747) & (0.8128, 0.0918) & (0.9461, 0.0801) & (0.9673, 0.1015) & (0.7670, 0.0986) \\ (0.4122, 0.1126) & (0.7551, 0.1048) & (0.9725, 0.0769) & (0.9258, 0.0958) & (0.7547, 0.1065) \\ (0.6385, 0.0804) & (0.9164, 0.0922) & (0.9821, 0.0736) & (0.9331, 0.0946) & (0.5713, 0.1034) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

表3 在不同置信水平下预计的压气机可靠度
Table 3 Reliability probability predicted at the different confidence levels

可靠度	区间	平均值
$\lambda=0.90$	[0.952 1, 0.998 5]	0.975 3
$\lambda=0.95$	[0.963 5, 0.986 7]	0.975 1
$\lambda=0.97$	[0.968 1, 0.982 0]	0.975 05
$\lambda=0.98$	[0.970 4, 0.979 7]	0.975 05
$\lambda=0.99$	[0.972 7, 0.977 4]	0.975 05
$\lambda=1.0$	0.975 04	0.975 04

从表3中可以看出, 当置信水平 $\lambda=0.95$ 时, 压气机首翻期的可靠度预计为0.963 5~0.986 7, 平均值为0.975 1。而且 $\lambda \geq 0.9$ 时, 平均值约为0.975。需要说明的是, 当 λ 过小时, 预计的可靠度上限可能会大于1, 其原因在于上述评判中采用的

是对称的TFN, $m+\delta_k$ 有可能大于1。但是, 这一般不会影响评判结果的实际应用, 因为所要采用的评判结果, 其置信水平 λ 不能过低, 如前所述, λ 宜取0.9~0.95。此外, 若在 $m+\delta_k > 1$ 时规定 $m+\delta_k=1$, 也可以解决这个问题。万一要采用低置

信水平的评判结果时, 则可取其平均值。

参考文献

[1] 孔瑞莲 航空发动机可靠性工程 [M] 北京: 航空工业出版社, 1996

[2] 曾天翔 可靠性及维修性工程手册 [M] 北京: 国防工业出版社, 1994

[3] 高社生, 张玲霞 可靠性理论与工程应用 [M] 北京: 国防工业出版社, 2002

[4] Bowles J. A Survey of Reliability Prediction Procedures for Microelectronic Devices [J]. IEEE Trans Reliability, 1992, 41 (3): 2- 12

[5] Marius Bazu A Combined Fuzzy-Logic & Physics-of-Failure Approach to Reliability Prediction [J]. IEEE Trans Reliability, 1995, 44 (2): 237- 242

[6] 陆廷孝, 郑鹏洲 可靠性设计与分析 [M] 北京: 国防工业出版社, 1995

[7] 董玉革 机械模糊可靠性设计 [M] 北京: 机械工业出版社, 2000

[8] 赵德孜, 温卫东, 段成美 故障树模糊分析方法的研究 [J] 机械设计与制造, 2003, 4: 35- 37

[9] Timohy J Ross (美). 模糊逻辑及其工程应用 [M] 钱同惠, 沈其聪, 葛晓滨, 等译 北京: 电子工业出版社, 2001

[10] Knezevic J, Odoom E R. Reliability Modelling of Repairable Systems Using Petri Nets and Fuzzy Lambda-Tau Methodology [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 73: 1- 17.

[11] Zadeh L A. Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1978, 1: 3- 28