

DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2012.01.29

基于 DLOWG 算子的 FMEA 风险评估方法

王晓暉, 熊 伟

(浙江大学 管理学院, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 为了解决传统故障模式与影响分析(FMEA)的风险评估过程中专家评判的模糊性和不确定性问题,提出基于依赖型语言有序加权几何(DLOWG)算子的 FMEA 风险评估方法. 该方法将故障模式风险优先数(RPN)的各个因子视为语言变量,基于提出的 DLOWG 算子来综合专家的群体评判意见. 该算子对错误或带有偏见的语言评价赋以较低的权重来减轻不公平性对决策结果的影响. 基于语言加权几何(LWG)算子和 DLOWG 算子,考虑各个风险因子及专家意见的权重,提出语言风险优先数的计算公式,对模糊环境中故障模式的风险进行评估. 以某汽车外部照明设备的故障模式风险评估为例,验证了该方法的有效性和实用性.

关键词: 故障模式与影响分析(FMEA); 风险评估; 可靠性分析; 语言信息; 依赖型语言有序加权几何(DLOWG)算子; 语言风险优先数(LRPN)

中图分类号: TB 114.3; C 934

文献标志码: A

文章编号: 1008-973X(2012)01-0182-07

Risk evaluation method in FMEA based on dependent linguistic ordered weighted geometric operator

WANG Xiao-tun, XIONG Wei

(School of Management, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: A new risk evaluation method based on the dependent linguistic ordered weighted geometric (DLOWG) operator was proposed in order to deal with inherent fuzziness and uncertainty of experts' judgments in risk evaluation in traditional failure mode and effects analysis (FMEA). The factors of risk priority number (RPN) of failure mode were treated as linguistic variables. Then linguistic judgments of a team of FMEA experts were aggregated by a developed DLOWG operator, in which the influence of unfair linguistic judgments on the aggregated result can be relieved by assigning low weights to those 'false' or 'biased' ones. Linguistic risk priority numbers (LRPNs), which considered the relative importance weights of risk factors and expert judgments, were proposed for prioritizing failure modes in fuzzy environment based on the linguistic weighted geometric (LWG) and DLOWG operators. A case of risk evaluation of a car lamp was provided to illustrate the effectiveness and practicality of the method.

Key words: failure mode and effects analysis (FMEA); risk evaluation; reliability analysis; linguistic variable; dependent linguistic ordered weighted geometric (DLOWG) operator; linguistic risk priority number (LRPN)

故障模式与影响分析(FMEA)是一种系统化和前瞻性的可靠性分析方法,用于从系统、设计、过程

和服务中发现产品的潜在故障模式,分析原因和影响,预先采取措施以降低故障风险^[1]. FMEA 可以

收稿日期: 2010-06-25.

浙江大学学报(工学版)网址: www.journals.zju.edu.cn/eng

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90718038);浙江省自然科学基金资助项目(Y7080086);浙江省社科规划课题资助项目(10CGGL20YBB).

作者简介: 王晓暉(1984-),男,博士生,从事质量工程与管理、产品研发管理的研究. E-mail: wangxt84@gmail.com

通信联系人: 熊伟,男,教授,博导. E-mail: zjuquality@yahoo.com.cn

用于产品、工艺设计或改进设计,对预防产品失效有重要作用^[2-6]. FMEA 起源于美国航空业,现已被广泛应用于航空、航天、机械、汽车及医疗设备等领域,取得了显著效果,为确保这些领域产品的可靠性发挥了巨大作用^[1].

在实际的 FMEA 项目中,常需要对可能的多个故障模式进行风险评估,以确定风险的优先次序,在有限资源下重点关注高风险的故障模式^[3-5]. 最常用的方法是风险优先数(RPN)法,RPN 由严重度 S 、发生度 O 和难检度 D 3 个风险因子决定. 虽然 FMEA 已被认为是最有效的事前预防措施,但其风险评估方法却广受质疑^[2-9]. 首先,传统 FMEA 要求专家采用精确数值来评价风险因子,但由于客观事物的复杂性、不确定性和人类思维的模糊性,专家难以做到精确估计. 其次,风险因子 O 、 S 和 D 之间的相对重要度未被考虑,而是假设其同等重要,这在实际应用中很难成立^[3]. 最后,3 个风险因子的不同组合可能产生完全相同的 RPN 值,即传统 FMEA 可能对具有不同内涵的风险缺乏区分度^①. 这可能导致资源浪费,甚至使高风险的故障被忽略.

为了解决上述问题,模糊逻辑在 FMEA 的改进中得到大量应用^[2-8]. Braglia 等^[2] 利用模糊逼近理想解的排序法(TOPSIS)来改进 FMEA,采用三角模糊数来评估风险因子及相对权重.Chang 等^[4] 采用模糊语言变量来评估风险因子,基于灰关联分析对潜在故障原因进行排序.Garcia 等^[5] 将风险因子模糊化,采用模糊数据包络分析(DEA)理论对故障模式的风险进行排序.Chin 等^[6-7] 通过建立风险因子和 RPN 之间的模糊 if-then 推理规则库来进行风险评估.然而建立模糊规则库需要专家做出大量判断,耗时耗力,难以得到完整的模糊规则库.鉴于此,Wang 等^[3] 将模糊加权几何平均法引入到 RPN 的计算过程,提出模糊风险优先数法,将风险因子及相对权重都用相应的三角模糊数和梯形模糊数来处理.耿秀丽等^[8] 研究 FMEA 风险评估中多专家多粒度模糊评价的统一和集结问题.

模糊逻辑在表达专家意见方面有一定优势,但也存在一些问题:首先,用模糊理论需事先确定隶属函数,而这通常是基于专家的经验判断,存在一定的主观性和不确定性^[10]. 为了简便起见,许多研究者常选择三角形、梯形等较简单的模糊数,很少评判选择的合理性^[11-12];其次,当采用模糊集及扩展原理运算时,存在一定的放大效应^[12],使得计算结果往

往不匹配初始的语言术语^[13];最后,模糊理论的处理都不可避免地涉及到解模糊的问题,存在丢失决策信息的可能^[14]. 这些因素都使得应用模糊理论来评估故障模式在某些情况下可能是不准确的.

实际上,由于思维的模糊性和不确定性,决策者更习惯于直接用语言变量的形式来反映自身的偏好^[13-14],这样既能合理地体现判断的模糊性,又能充分地利用决策信息^[13-14]. 相比于模糊理论须先将语言变量转换为模糊数运算,再将其解模糊化的二次转换过程,近年来最新发展的语言信息决策理论可以直接对语言变量进行“词计算”,在求解过程中不会丢失决策信息. 本文针对传统 FMEA 中风险评估方法存在的问题,提出基于依赖型语言有序加权几何(DLOWG)算子的改进风险评估方法. 考虑 FMEA 的群决策特点,直接用语言变量来表征 3 个风险因子,并考虑风险因子的相对权重. 基于语言加权几何(LWG)算子和 DLOWG 算子,提出语言风险优先数的计算公式,对模糊环境中故障模式的风险进行有效评估.

1 语言信息决策理论预备知识

语言评估标度是用语言变量进行决策的基础. 决策者在进行定性测度时,一般需要适当的语言评估标度,可以事先设定语言评估标度 $S = \{s_i | i = 1, 2, \dots, t\}$, S 中的术语个数一般为奇数,语言术语集的势为 $t - 1$,且 S 满足下列条件.

- 1) 若 $i > j$,则 $s_i > s_j$;
- 2) 存在逆算子 $\text{rev}(s_i) = s_j$,使得 $i + j = t + 1$;
- 3) 若 $s_i \geq s_j$,则 $\max(s_i, s_j) = s_i$;
- 4) 若 $s_i \leq s_j$,则 $\min(s_i, s_j) = s_i$.

例如 S 可以定义为

$$S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7\} = \{\text{极差, 很差, 差, 一般, 好, 很好, 极好}\}.$$

为了便于计算和避免决策信息丢失,在原有的离散语言标度集 $S = \{s_i | i = 1, 2, \dots, t\}$ 的基础上定义一个拓展的连续性语言标度集 $\bar{S} = \{s_\alpha | \alpha \in [1, p]\}$,其中 p ($p > t$) 为一个充分大的自然数. 若 $i \in \{1, 2, \dots, t\}$,则称 s_i 为本原术语;若 $s_i \in \bar{S}$,且 $s_i \notin S$,则称 s_i 为虚拟术语. 一般地,决策者用本原术语来评估决策,虚拟术语仅出现在运算中^[14].

① 例如,设 2 个故障模式的 O 、 S 和 D 值分别为 2、5、2 和 4、1、5. 显然两者的 RPN 值都为 20,但风险内涵不同.

定义 1 对于任意 2 个语言术语 $s_\alpha, s_\beta \in \bar{S}, \lambda \in [0, 1]$, 运算法则^[14-16]如下:

- 1) $s_\alpha \oplus s_\beta = s_\beta \oplus s_\alpha = s_{\alpha+\beta}$;
- 2) $s_\alpha \otimes s_\beta = s_\beta \otimes s_\alpha = s_{\alpha\beta}$;
- 3) $\lambda s_\alpha = s_{\lambda\alpha}$;
- 4) $(s_\alpha)^\lambda = s_{\alpha^\lambda}$.

定义 2 设 $s_\alpha, s_\beta \in \bar{S}$, 则称

$$d(s_\alpha, s_\beta) = \frac{|\alpha - \beta|}{t - 1} \quad (1)$$

为语言变量 s_α 和 s_β 的距离. 其中, $t - 1$ 为语言评估标度集 S 的势. 显然, $0 \leq d(s_\alpha, s_\beta) \leq 1$, 且 $d(s_\alpha, s_\beta)$ 越小, s_α 和 s_β 越接近, 偏差越小. 特别地, 若 $d(s_\alpha, s_\beta) = 0$, 则 $s_\alpha = s_\beta$.

定义 3 设 $LWG: \bar{S}^n \rightarrow \bar{S}$, 则定义 LWG 算子为 $LWG_w(s_1, s_2, \dots, s_n) =$

$$(s_1)^{w_1} \otimes (s_2)^{w_2} \otimes \dots \otimes (s_n)^{w_n} . \quad (2)$$

式中: w 为 $s_j (j=1, 2, \dots, n)$ 的指数加权向量, $w = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$, 且 $\omega_j \in [0, 1], \sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ ^[17].

定义 4 设 $LOWG: \bar{S}^n \rightarrow \bar{S}, \omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$ 为指数加权向量(位置权重向量), 且 $\omega_j \in [0, 1], \sum_{j=1}^n \omega_j = 1$, 使得

$$LOWG_\omega(s_1, s_2, \dots, s_n) = (s_{l_1})^{\omega_1} \otimes (s_{l_2})^{\omega_2} \otimes \dots \otimes (s_{l_n})^{\omega_n} . \quad (3)$$

式中: s_{l_j} 为语言变量组 $s_j (j=1, 2, \dots, n)$ 中第 j 大的元素, 则称 LOWG 为 n 维语言有序加权几何平均算子^[14].

2 DLOWG 算子

定义 5 设 s_1, s_2, \dots, s_n 为一组语言变量(语言评价值), 其中 $s_j \in S (j=1, 2, \dots, n)$, 则定义语言变量的均值为

$$s_\mu = \frac{1}{n}(s_1 \oplus s_2 \oplus \dots \oplus s_n) . \quad (4)$$

定义 6 设 s_1, s_2, \dots, s_n 为一组语言评价值, 其中 $s_j \in S (j=1, 2, \dots, n)$, 则定义语言变量的标准差为

$$s_\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d^2(s_j, s_\mu)} . \quad (5)$$

定义 7 设 s_1, s_2, \dots, s_n 为一组语言评价值, 其中 $s_j \in S (j=1, 2, \dots, n), s_\mu$ 为这组语言变量的均值, $(\varphi(1), \varphi(2), \dots, \varphi(n))$ 为语言变量下标 $(1, 2, \dots, n)$ 的一个置换, 使得对于任意的 $j=2, \dots, n$, 都满足 $s_{\varphi(j-1)} \geq s_{\varphi(j)}$, 于是称

$$SIM(s_{\varphi(j)}, s_\mu) = 1 - \frac{d(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}{\sum_{j=1}^n d(s_{\varphi(j)}, s_\mu)} \quad (6)$$

为这组语言变量中第 j 大的语言变量 $s_{\varphi(j)}$ 与该组语言变量的均值 s_μ 之间的相似度.

现实中, 专家在群体决策时, 往往带有很强的个人偏见, 对自己偏好的方案给予很高的评价, 对自己厌恶的方案给予很低的评价, 这样不利于最优方案的选择. 为此, 对有偏见的评价, 应给予较低的权重, 即: 若专家的评价值接近平均值, 则给予较高的权重; 若评价值偏离平均值较远, 则给予较低的权重. 通过对错误或具有偏见的语言评价值赋以较低的权重, 减轻不公平性对决策结果的影响^[18, 20-21].

令 $w = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$ 为 LOWG 算子的权重, 定义:

$$\omega_j = \frac{SIM(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}{\sum_{j=1}^n SIM(s_{\varphi(j)}, s_\mu)} , \quad (7)$$

$$\omega_j \in [0, 1], \sum_{j=1}^n \omega_j = 1 .$$

由式(3)可得

$$LOWG_w(s_1, s_2, \dots, s_n) = (s_{\varphi(1)})^{\frac{SIM(s_{\varphi(1)}, s_\mu)}{\sum_{j=1}^n SIM(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}} \otimes (s_{\varphi(2)})^{\frac{SIM(s_{\varphi(2)}, s_\mu)}{\sum_{j=1}^n SIM(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}} \otimes \dots \otimes (s_{\varphi(n)})^{\frac{SIM(s_{\varphi(n)}, s_\mu)}{\sum_{j=1}^n SIM(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}} . \quad (8)$$

由于

$$\sum_{j=1}^n SIM(s_{\varphi(j)}, s_\mu) = \sum_{j=1}^n SIM(s_j, s_\mu) \quad (9)$$

和

$$(s_{\varphi(j)})^{\frac{SIM(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}{\sum_{j=1}^n SIM(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}} = (s_j)^{\frac{SIM(s_j, s_\mu)}{\sum_{j=1}^n SIM(s_j, s_\mu)}} , \quad (10)$$

将式(7)改写为

$$LOWG_w(s_1, s_2, \dots, s_n) = (s_1)^{\frac{SIM(s_1, s_\mu)}{\sum_{j=1}^n SIM(s_j, s_\mu)}} \otimes (s_2)^{\frac{SIM(s_2, s_\mu)}{\sum_{j=1}^n SIM(s_j, s_\mu)}} \otimes \dots \otimes (s_n)^{\frac{SIM(s_n, s_\mu)}{\sum_{j=1}^n SIM(s_j, s_\mu)}} . \quad (11)$$

称式(11)为 DLOWG 算子. 可以看出, DLOWG 算子的集结与语言变量的顺序无关, 是一个净算子^[19]. DLOWG 算子不需要对评价值进行排序, 也不需要单独决定权重向量, 具有很好的可操作性和较高的准确性.

定理 1 设 s_1, s_2, \dots, s_n 为一组语言评价值, 其中 $s_j \in S (j=1, 2, \dots, n), s_\mu$ 为这组语言变量的均值, $(\varphi(1), \varphi(2), \dots, \varphi(n))$ 为语言变量下标 $(1, 2, \dots, n)$ 的一个置换, 使得对任意的 $j=2, \dots, n$, 都满足 $s_{\varphi(j-1)} \geq s_{\varphi(j)}$. 设 $SIM(s_{\varphi(j)}, s_\mu)$ 为第 j 大的语言变量 $s_{\varphi(j)}$ 与均值 s_μ 之间的相似度, 那么如果 $SIM(s_{\varphi(i)}, s_\mu) \geq SIM(s_{\varphi(j)}, s_\mu)$, 则有 $\omega_i \geq \omega_j$.

显然, 如果对于任意的 $i, j=1, 2, \dots, n$, 都有 $s_i = s_j$, 那么 $\omega_j = 1/n, j=1, 2, \dots, n$.

基于数理统计理论中正态分布的思想^[20],本文给出另一种确定 LOWG 算子权重的方法:

$$\omega_j = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s_\sigma} \exp \left[\frac{-d^2(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right]. \quad (12)$$

式中: $(\varphi(1), \varphi(2), \dots, \varphi(n))$ 为语言变量下标 $(1, 2, \dots, n)$ 的一个置换,使得对于任意的 $j=2, \dots, n$, 都满足 $s_{\varphi(j-1)} \geq s_{\varphi(j)}$.

考虑到 $\omega_j \in [0, 1], j=1, 2, \dots, n$,

$\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$, 由式(12)可得

$$\omega_j = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}s_\sigma} \exp \left[\frac{-d^2(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right]}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}s_\sigma} \exp \left[\frac{-d^2(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right]} = \frac{\exp \left[\frac{-d^2(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right]}{\sum_{j=1}^n \exp \left[\frac{-d^2(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right]}. \quad (13)$$

由式(3)可得

$\text{LOWG}_w(s_1, s_2, \dots, s_n) =$

$$\begin{aligned} & (s_{\varphi(1)}) \exp \left[\frac{-d^2(s_{\varphi(1)}, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right] / \sum_{j=1}^n \exp \left[\frac{-d^2(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right] \otimes \\ & (s_{\varphi(2)}) \exp \left[\frac{-d^2(s_{\varphi(2)}, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right] / \sum_{j=1}^n \exp \left[\frac{-d^2(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right] \otimes \\ & \dots \otimes (s_{\varphi(n)}) \exp \left[\frac{-d^2(s_{\varphi(n)}, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right] / \sum_{j=1}^n \exp \left[\frac{-d^2(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

由于

$$\sum_{j=1}^n \exp \left[\frac{-d^2(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right] = \sum_{j=1}^n \exp \left[\frac{-d^2(s_j, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right] \quad (15)$$

和

$$(s_{\varphi(j)}) \sum_{j=1}^n \exp \left[\frac{-d^2(s_{\varphi(j)}, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right] = (s_j) \sum_{j=1}^n \exp \left[\frac{-d^2(s_j, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right], \quad (16)$$

可将式(7)改写为

$\text{LOWG}_w(s_1, s_2, \dots, s_n) =$

$$\begin{aligned} & (s_1) \exp \left[\frac{-d^2(s_1, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right] / \sum_{j=1}^n \exp \left[\frac{-d^2(s_j, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right] \otimes \\ & (s_2) \exp \left[\frac{-d^2(s_2, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right] / \sum_{j=1}^n \exp \left[\frac{-d^2(s_j, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right] \otimes \\ & \dots \otimes (s_n) \exp \left[\frac{-d^2(s_n, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right] / \sum_{j=1}^n \exp \left[\frac{-d^2(s_j, s_\mu)}{2(s_\sigma)^2} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

显然,式(17)是一个净 DLOWG 算子.

例 1 考虑一个群决策问题,假设有 6 位专家 $D_i (i=1, 2, \dots, 6)$, 采用语言评估标度 $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7\} = \{\text{极低, 很低, 低, 一般, 高, 很高, 极高}\}$, 对某新产品开发项目的风险情况进行评估. 专家给出的评估结果如下:

$$s^{D_1} = s_3, s^{D_2} = s_4, s^{D_3} = s_6,$$

$$s^{D_4} = s_5, s^{D_5} = s_7, s^{D_6} = s_2.$$

由式(1)、(4)和(5)可以求得该组语言变量的均值和标准差:

$$s_\mu = s_{4.333}, s_\sigma = 0.272.$$

对专家给出的语言评价价值 $s^{D_i} (i=1, 2, \dots, 6)$ 从大到小重新排序后可得

$$s_{\varphi(1)} = s^{D_5} = s_7, s_{\varphi(2)} = s^{D_3} = s_6,$$

$$s_{\varphi(3)} = s^{D_4} = s_5, s_{\varphi(4)} = s^{D_2} = s_4,$$

$$s_{\varphi(5)} = s^{D_1} = s_3, s_{\varphi(6)} = s^{D_6} = s_2.$$

根据式(7)可以求得权重如下:

$$\omega_1 = 0.141, \omega_2 = 0.163, \omega_3 = 0.185,$$

$$\omega_4 = 0.193, \omega_5 = 0.170, \omega_6 = 0.148.$$

由式(11)可得

$\text{DLOWG}_w(s^{D_1}, s^{D_2}, \dots, s^{D_6}) =$

$$(s_7)^{0.141} \otimes (s_6)^{0.163} \otimes (s_5)^{0.185} \otimes$$

$$(s_4)^{0.193} \otimes (s_3)^{0.170} \otimes (s_2)^{0.148} = s_{4.141}.$$

由式(13)得到权重如下:

$$\omega_1 = 0.069, \omega_2 = 0.155, \omega_3 = 0.240,$$

$$\omega_4 = 0.256, \omega_5 = 0.187, \omega_6 = 0.094.$$

由式(17)可得

$\text{DLOWG}_w(s^{D_1}, s^{D_2}, \dots, s^{D_6}) =$

$$(s_7)^{0.069} \otimes (s_6)^{0.155} \otimes (s_5)^{0.240} \otimes$$

$$(s_4)^{0.256} \otimes (s_3)^{0.187} \otimes (s_2)^{0.094} = s_{4.146}.$$

由例 1 可知,根据式(7)和(13)确定权重的原则是:通过计算单个评价价值与平均评价价值之间的相似度,来确定该评价价值的权重. 语言评价价值越接近平均值,相应的权重越大,反之则越小,从而对错误或具有偏见的语言评价价值赋以较低的权重来减轻不公平性对决策结果的影响. 2 种方法的区别如下:与前者相比,后者对接近平均值的语言评价价值赋予更大的权重;而前者的计算过程更加简单直接,具有更好的实用性.

3 改进的 FMEA 风险优先数评估方法

设 FMEA 团队的专家 $E_h (h=1, 2, \dots, k)$ 对于故障模式 $M_j (j=1, 2, \dots, n)$, 从风险因子 O, S 和 D 三方面用语言变量进行测度和评估,得到专家 E_h 给出的故障模式 M_j 的语言评估值为 $(s_{jh}^O, s_{jh}^S, s_{jh}^D)$. 设 O, S 和 D 的权重为 $w = [w_O, w_S, w_D]$, 可由 FMEA 专家基于知识和经验获得, $w \geq 0$, 且 $w_O + w_S + w_D = 1$. w 由专家采用层次分析法(AHP)^[22]确定. 基于上述假设,下面给出群决策环境下改进的风险评估方法中 RPN 的计算过程.

1) 利用式(2)的 LWG 算子对 FMEA 专家 E_h 所给出的故障模式 M_j 的语言评估值 $(s_{jh}^O, s_{jh}^S, s_{jh}^D)$ 进

行集结,得到专家 E_h 给出的故障模式 M_j 的语言风险优先数 s_{jh}^{RPN} ($j = 1, 2, \dots, n; h = 1, 2, \dots, k$) 为

$$s_{jh}^{RPN} = \text{LWG}_w(s_{jh}^O, s_{jh}^S, s_{jh}^D) = (s_{jh}^O)^{w_O} \otimes (s_{jh}^S)^{w_S} \otimes (s_{jh}^D)^{w_D}. \quad (18)$$

2)通常, FMEA 的分析过程由专家团队完成, 而团队中各人角色不同, 意见的权重也应不同. 为了保持分析结果的准确性、客观性和公正性, 在集结专家意见时应充分考虑不同专家意见的权重.

专家意见的权重由式(4)~(7)求得, 特点如下:

1)专家意见权重是从专家给出的评判数据中直接求得, 无需提供除问题所需处理的数据集合外的任何先验信息, 保证了客观性; 2)对于错误或有偏见的评价值赋予较低的权重, 因此既能充分考虑决策者的自身重要性, 也可较好地保证决策结果的公平性. 需注意的是, 对于专家给出的一组评价, 可由式(4)~(7)求得该组意见的相对权重. 对于故障模式 M_j , 专家意见权重为 v_{jh} ($j = 1, 2, \dots, n; h = 1, 2, \dots, k$), 且满足 $v_{jh} \geq 0, \sum_{h=1}^k v_{jh} = 1$.

3)利用式(11)的 DLOWG 算子对 FMEA 专家 E_h ($h = 1, 2, \dots, k$) 给出的故障模式 M_j 的语言风险优先数 s_{jh}^{RPN} ($j = 1, 2, \dots, n; h = 1, 2, \dots, k$) 进行集结, 得到专家群体评价的故障模式 M_j 的语言风险优先数 s_j^{RPN} ($j = 1, 2, \dots, n$) 为

$$s_j^{RPN} = \text{DLOWG}_v(s_{j1}^{RPN}, s_{j2}^{RPN}, \dots, s_{jk}^{RPN}) = (s_{j1}^{RPN})^{v_{j1}} \otimes (s_{j2}^{RPN})^{v_{j2}} \otimes \dots \otimes (s_{jk}^{RPN})^{v_{jk}}. \quad (19)$$

4)根据 s_j^{RPN} 对 M_j 进行排序, s_j^{RPN} 越大, 则该故障模式的整体风险越大, 相应处理措施的优先次序也应越高.

4 实例研究

某品牌汽车公司为保证所生产汽车的质量和可靠性, 在某款新车型的设计与开发过程中设计 FMEA. 为了提高 FMEA 分析的准确性, 应用本文提出的 DLOWG 法于 FMEA 风险评估过程.

由于商业秘密需要, 对实际车型开发项目中的原始数据进行适当的处理, 但处理后的数据没有改变原始数据的性质, 也不影响本文方法的应用. 另一方面, 实际的汽车 FMEA 项目规模较大, 涉及的故障模式、故障原因和故障效应众多. 由于篇幅所限和为了更清楚地说明问题, 仅选取某车用外部照明设备中的 5 个故障模式来说明本文方法的主要应用步骤和结果.

在本案例中, 技术人员分析得出的某汽车外部照明设备可能的故障模式如表 1 所示.

表 1 某汽车外部照明设备的故障模式

Tab. 1 Failure mode of car lamp

序号	潜在故障模式	潜在故障影响	潜在故障原因
1	灯具与灯壳间隙不匀	面差间隙不合格, 顾客不满	灯具难以精确定位, 安装不到位
2	投射镜抖动	影响亮度, 产生振动噪声	远近灯只能一起调整, 力臂较长, 绕度较大; 投射镜安装框刚性不足
3	无法调光	灯具安装车体后调整不到位	远近灯只能一起调整, 空间偏小
4	灯具中有雾气产生	照明亮度不够, 影响安全性	结构设计不合理
5	内套松动	产生振动噪声	内套卡榫弹性不足

给定专家在评估风险因子 O 、 S 和 D 时所采用的语言术语集, 如表 2 所示.

表 2 风险因子的语言术语集

Tab. 2 Linguistic term sets of risk factors

风险因子	语言术语集						
	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7
O	极少发生	很少发生	相对少发生	偶尔发生	经常发生	很容易发生	极容易发生
S	极不严重	很不严重	不严重	一般	严重	很严重	极其严重
D	极易检出	很易检出	容易检出	需注意	较难检出	很难检出	极难检出

FMEA 团队由 3 位技术专家 E_h ($h = 1, 2, 3$) 组成, 利用语言评估标度, 针对 5 个潜在故障模式 ($M_1 =$ 灯具与灯壳间间隙不均匀, $M_2 =$ 投射镜抖动, $M_3 =$ 无法调光, $M_4 =$ 灯具中有雾气产生, $M_5 =$ 内套松动), 分别从故障模式的发生度、严重度和难检度 3 方面进行评价.

在本案例中, 3 位技术专家 E_h ($h = 1, 2, 3$) 给出的故障模式 M_j ($j = 1, 2, 3, 4, 5$) 的语言评估值为 $(s_{jh}^O, s_{jh}^S, s_{jh}^D)$, 如表 3~5 所示.

表 3 专家 E_1 给出的语言评判信息

Tab. 3 Linguistic information given by E_1

风险因子	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
O	s_2	s_4	s_5	s_6	s_3
S	s_3	s_2	s_6	s_7	s_4
D	s_6	s_5	s_6	s_2	s_6

表 4 专家 E_2 给出的语言评判信息

Tab. 4 Linguistic information given by E_2

风险因子	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
O	s_3	s_4	s_5	s_5	s_4
S	s_3	s_3	s_5	s_6	s_3
D	s_5	s_6	s_4	s_2	s_5

表 5 专家 E_3 给出的语言评判信息

Tab. 5 Linguistic information given by E_3

风险因子	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
O	s_5	s_3	s_6	s_3	s_5
S	s_5	s_3	s_7	s_4	s_4
D	s_7	s_6	s_5	s_4	s_7

1) 3 位专家采用 AHP 法确定的风险属性的权重为 $w = [0.370, 0.473, 0.157]$. 根据式 (18) 对 FMEA 分析专家 E_h 所给出的故障模式 M_j 的语言评估值 $(s_{jh}^O, s_{jh}^S, s_{jh}^D)$ ($j=1, 2, 3, 4, 5; h=1, 2, 3$) 进行集结, 得到专家 E_h 给出的故障模式 M_j 的语言风险优先数 s_{jh}^{RPN} 如下:

$$\begin{aligned} s_{11}^{RPN} &= s_{2.880}, s_{21}^{RPN} = s_{2.986}, s_{31}^{RPN} = s_{5.609}, \\ s_{41}^{RPN} &= s_{5.428}, s_{51}^{RPN} = s_{3.833}, s_{12}^{RPN} = s_{3.251}, \\ s_{22}^{RPN} &= s_{3.722}, s_{32}^{RPN} = s_{4.827}, s_{42}^{RPN} = s_{4.718}, \\ s_{52}^{RPN} &= s_{3.616}, s_{13}^{RPN} = s_{5.272}, s_{23}^{RPN} = s_{3.346}, \\ s_{33}^{RPN} &= s_{6.271}, s_{43}^{RPN} = s_{3.596}, s_{53}^{RPN} = s_{4.744}. \end{aligned}$$

2) 考虑专家意见的不同权重, 利用式 (4)~(7) 可以求得对于上述 5 个故障模式的专家意见权重为 v_{jh} ($j=1, 2, 3, 4, 5; h=1, 2, 3$):

$$\begin{aligned} v_{1h} &= [v_{11}, v_{12}, v_{13}] = [0.343, 0.407, 0.250], \\ v_{2h} &= [v_{21}, v_{22}, v_{23}] = [0.254, 0.250, 0.496], \\ v_{3h} &= [v_{31}, v_{32}, v_{33}] = [0.487, 0.250, 0.263], \\ v_{4h} &= [v_{41}, v_{42}, v_{43}] = [0.285, 0.465, 0.250], \\ v_{5h} &= [v_{51}, v_{52}, v_{53}] = [0.415, 0.335, 0.250]. \end{aligned}$$

3) 利用式 (19) 求得专家群体评价的故障模式 M_j ($j=1, 2, 3, 4, 5$) 的语言风险优先数 s_j^{RPN} . 以 s_1^{RPN} 为例, 有

$$s_1^{RPN} = (s_{2.88})^{0.343} \otimes (s_{3.25})^{0.407} \otimes (s_{5.27})^{0.250} = s_{3.519}.$$

同理可得

$$\begin{aligned} s_2^{RPN} &= s_{3.339}, s_3^{RPN} = s_{5.563}, \\ s_4^{RPN} &= s_{4.588}, s_5^{RPN} = s_{3.965}. \end{aligned}$$

若采用模糊集理论计算, 则最终结果往往不匹配初始的语言术语. 本文直接采用语言变量进行评估和运算, 计算结果是语言变量, 这样更合理^[13].

4) 依据 s_j^{RPN} ($j=1, 2, 3, 4, 5$) 对故障模式进行排序, 可得

$$M_3 > M_4 > M_5 > M_1 > M_2.$$

可以看出, 故障模式 3 风险最大, 应该优先修正和处理, 其次为故障模式 4、5、1 和 2. 基于对故障模式风险情况的准确分析、评估和排序, 技术人员可以确定实施预防措施的优先次序, 将有限资源优先分配给语言风险数高的故障模式. 例如, 对于故障模式 3

(无法调光), 通过分析故障原因, 技术人员认为需要将远近灯具设计为可分开调节式; 对于故障模式 4 (灯具中有雾气产生), 专家认为需要增加透气孔数, 并将位置灯安装在不易产生雾气的位置. 类似地, 可以依次分析其他高风险的故障模式, 分析引起风险的原因, 制定改进措施, 提高新车型的可靠性.

5 结 语

准确的风险评估是 FMEA 这种前瞻式可靠性分析方法能够发挥作用的重要前提. 为了更准确、合理地开展 FMEA 过程中的风险评估, 本文提出一种基于 DLOWG 算子的 FMEA 风险评估方法. 首先, 给出一种基于语言变量及运算法则的新算子: DLOWG 算子. 其次, 将故障模式风险优先数的各个因子用语言变量来表征, 提出基于 LWG 算子和 DLOWG 算子的语言风险优先数计算公式, 对模糊环境中故障模式的风险进行评估. 最后, 以某汽车外部照明设备的故障模式风险评估为例, 表明该方法是灵活、实用和有效的.

本文方法计算简便快捷, 与传统 FMEA 中的风险评估方法相比, 此方法还具有以下优点: 1) 考虑风险因子的权重以及专家意见的权重, 使本文方法更具实用性和灵活性, 且区分度更高; 2) 采用语言变量评估风险, 既有效表征了专家判断的模糊性, 又避免了决策信息的丢失, 更符合人的思维习惯而使评估更易实施; 3) 本文方法不局限于 O 、 S 和 D 3 个风险因子, 可以容纳更多的风险因子于评估模型, 使结果更准确; 4) 本文提出的 DLOWG 算子是一种新的语言信息集成算子, 可以较好地保证决策的公平性, 也能在一定程度上提高 FMEA 分析的准确性.

参考文献 (References):

[1] STAMATIS D H. 故障模式影响分析: FMEA 从理论到实践[M]. 陈晓彤, 姚绍华, 译. 北京: 国防工业出版社, 2005: 23, 171-226.

[2] BRAGLIA M, FROSOLINI M, MONTANARI R. Fuzzy TOPSIS approach for failure mode, effects and criticality analysis [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2003, 19(5): 425-443.

[3] WANG Y M, CHIN K S, POON G K K, et al. Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(2): 1195-1207.

[4] CHANG C L, WEI C C, LEE Y H. Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey theory [J].

- Kybernetes**, 1999, 28(9):1072-1080.
- [5] GARCIA P A A, SCHIRRU R, FRUTUOSO EMELO P F. A fuzzy data envelopment analysis approach for FMEA [J]. **Progress in Nuclear Energy**, 2005, 46(3/4): 359-373.
- [6] CHIN K S, CHAN A, YANG J B. Development of a fuzzy FMEA based product design system [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2008, 36(7/8): 633-649.
- [7] TAY K M, LIM C P. Fuzzy FMEA with a guided rules reduction system for prioritization of failures [J]. **International Journal of Quality and Reliability Management**, 2006, 23(8): 1047-1066.
- [8] 耿秀丽, 褚学宁. 基于故障因果链的故障模式与影响分析风险评估方法 [J]. **计算机集成制造系统**, 2009, 15(12): 2473-2480.
GENG Xiu-li, CHU Xue-ning. Risk evaluation method in failure mode and effects analysis based on failure cause-effect chain [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2009, 15(12): 2473-2480.
- [9] CHIN K S, WANG Y M, POON G K K, et al. Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach [J]. **Computers and Operations Research**, 2009, 36(6): 1768-1779.
- [10] 李延来, 唐加福, 姚建明, 等. 质量屋构建的研究进展 [J]. **机械工程学报**, 2009, 45(2): 280-293.
LI Yan-lai, TANG Jia-fu, YAO Jian-ming, et al. Progress of researches on building house of quality [J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2009, 45(2): 280-293.
- [11] LI H, AZARM S. An approach for product line design selection under uncertainty and competition [J]. **Journal of Mechanical Design**, 2002, 124(3): 385-392.
- [12] ZHAI L Y, KHOO L P, ZHONG Z W. A rough set based QFD approach to the management of imprecise design information in product development [J]. **Advanced Engineering Informatics**, 2009, 23(2): 222-228.
- [13] XU Y J, DA Q L. Standard and mean deviation methods for linguistic group decision making and their applications [J]. **Expert Systems with Applications**, 2010, 37(8): 5905-5912.
- [14] 徐泽水. 基于语言信息的决策理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1-27.
- [15] WU Z B, CHEN Y H. The maximizing deviation method for group multiple attribute decision making under linguistic environment [J]. **Fuzzy Sets and Systems**, 2007, 158(14): 1608-1617.
- [16] XU Z S. A method for multiple attribute decision making with incomplete weight information in linguistic setting [J]. **Knowledge-Based System**, 2007, 20(8): 719-725.
- [17] XU Z S. On generalized induced linguistic aggregation operators [J]. **International Journal of General Systems**, 2006, 35(1): 17-28.
- [18] XU Z S. Dependent uncertain ordered weighted aggregation operators [J]. **Information Fusion**, 2008, 9(2): 310-316.
- [19] YAGER R R. Families of OWA operators [J]. **Fuzzy Sets and Systems**, 1993, 59(2): 125-148.
- [20] XU Z S. An overview of methods for determining OWA weights [J]. **International Journal of Intelligent Systems**, 2005, 20(8): 843-865.
- [21] 卫贵武. 基于依赖型算子的不确定语言多属性群决策法 [J]. **系统工程与电子技术**, 2010, 32(4): 764-769.
WEI Gui-wu. Method of uncertain linguistic multiple attribute group decision making based on dependent aggregation operators [J]. **Systems Engineering and Electronics**, 2010, 32(4): 764-769.
- [22] HO W. Integrated analytic hierarchy process and its applications: a literature review [J]. **European Journal of Operational Research**, 2008, 186(1): 211-228.