

# 基于失效模式与后果分析的混合燃料发动机风险分析

尤建新<sup>1,2</sup>, 郭仁祝<sup>1</sup>, 杨迷影<sup>2</sup>

(1. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092; 2. 埃克塞特大学 工程、数学与物理科学学院, 英国 埃克塞特 EX4 4QF)

**摘要:** 针对发动机在使用混合燃料过程中存在的潜在失效模式和故障风险, 尝试以改进失效模式与后果分析(FMEA)模型展开风险分析. 基于模糊集理论、灰色关联分析和决策试验与评价实验室方法构建改进 FMEA 模型, 将专家定性评价转化为定量指标并进行风险优先值(RPN)、关联度和原因度的计算. 将计算结果进行风险排序和比较, 由此揭示了使用混合燃料的发动机的风险排序, 进而对潜在的失效模式提出风险控制建议.

**关键词:** 混合燃料发动机; 失效模式与后果分析; 模糊集理论; 灰色关联分析; 决策试验与评价实验室

**中图分类号:** U461.91

**文献标志码:** A

## Risk Analysis of Blended Fuel Engine Based on an Improved Failure Mode and Effect Analysis Method

YOU Jianxin<sup>1,2</sup>, GUO Renzhu<sup>1</sup>, YANG Miming<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Engineering, Mathematics and Physical Science, University of Exeter, Exeter EX4 4QF, UK)

**Abstract:** An improved failure mode and effect analysis (FMEA) model was designed to analyze the potential failure modes and risks of the blended fuel engine. The FMEA model was established based on the fuzzy theory, grey relational analysis (GRA), and decision making trial and evaluation laboratory (DEMATEL). The experts' qualitative evaluation was translated into quantitative index and was then used in the calculation of the risk priority number (RPN), relevancy degree, and reason degree. The rank of the calculation results showed the risk prioritizing of the blended fuel engine. Corresponding risk control recommendations were proposed.

**Key words:** blended fuel engine; failure mode and effect analysis; fuzzy theory; grey relational analysis; decision making trial and evaluation laboratory

自诸如乙醇汽油、生物柴油等混合燃料投入市场以来, 其自身的价格和环保优势已展露无遗, 与此同时, 所带动的替代燃料新市场也逐步形成. 然而, 由于混合燃料的物理、化学性质还是有别于传统的化石燃料, 将其直接在尚未改装过的汽柴油机上燃用, 对整个车辆系统, 尤其是发动机而言, 所造成的风险值得评估. 通过可靠性风险评估方法, 可有效帮助实验人员或企业科研人员发现在使用新型混合燃料过程中潜在的风险, 并根据风险的产生原因和所造成的后果制定相应的预防和控制方案, 从而降低风险发生的概率, 避免不必要的损失.

失效模式与后果分析(failure mode and effects analysis, FMEA)是当前较为成熟的对产品可靠性进行分析的方法. 本文采用专家小组讨论的形式, 确定混合燃料使用过程中潜在的失效模式, 运用基于模糊集理论与灰色关联分析方法改进的 FMEA 模型, 结合决策试验与评价实验室(decision making trial and evaluation laboratory, DEMATEL)方法, 计算失效模式的风险原因度, 并以此作为依据提出相应的控制改进意见.

## 1 混合燃料研究现状

21 世纪以来, 汽车保有量的迅猛上升使得人们对石油资源的需求日益增长. 与此同时, 大量化石燃料燃烧所导致的环境恶化以及石油资源的逐渐短缺, 已经成为当今人类发展所面临的严峻挑战之一. 生物燃料相较于传统化石燃料, 因其自身分子中含有氧原子, 故可以提供额外的氧, 以促进燃料的燃烧, 减少燃烧过程中有害物质的生成; 且生物燃料还可从动植物、微生物等有机体中提取, 作为可再生能源. 因此, 近年来生物燃料被广泛应用于汽、柴油的混合燃料中, 作为内燃机的新型燃料.

收稿日期: 2018-07-06

第一作者: 尤建新(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 管理学博士, 主要研究方向为管理理论与工业工程. E-mail: yjx2256@vip.sina.com

通信作者: 郭仁祝(1995—), 男, 硕士生, 主要研究方向为管理理论与工业工程. E-mail: 13041054452@163.com

为了获得动力性能更强,排放性能更优的混合燃料,各个国家的科研人员和专家学者对掺入燃料的选择和掺入比例的调配进行了相关的理论与实验研究.李松红等<sup>[1]</sup>在一台装有多点电子喷射器的汽油机上进行了两种混合比例的甲醇汽油的燃烧特性试验,结果表明经改造供油系统后的电喷发动机在燃用混合燃料时动力性有明显提高,燃料的经济性和热效率提高显著.郭美华等<sup>[2]</sup>整合了几位国内外学者对纯汽油、含有添加剂的汽油和乙醇汽油的发动机动力性、燃油经济性以及排放特性的研究结果,认为使用中低混合比例乙醇汽油对发动机功率、扭矩等主要动力性能的影响不大,并且能在一定程度上减轻车辆尾气排放对环境的影响,降低汽油的消耗;与此同时也指出乙醇汽油在实际使用中仍然存在诸多问题,需要对存在的缺陷进行更进一步的探讨和研究.Labeckas 等<sup>[3]</sup>使用一台直喷柴油发动机,在两种发动机转速下,对燃用不同混合燃料(不同混合比例的乙醇、生物柴油和柴油)的发动机热效率、有效燃油消耗率、动力性以及排放物组成进行了数据对比,分析并得出了最佳混合比例.孙梦婷等<sup>[4]</sup>对比探讨了采用单次喷射和主-后喷射两种策略下两种不同混合比例的生物柴油对发动机燃烧和排放影响的数值模拟.

发动机之于车辆性能的重要性不言而喻,通常含有大量造价高昂且工艺精密的零部件.在进行混合燃料发动机燃烧特性和排放特性研究的试验中,由于燃料问题所导致的发动机机械故障不仅会大大增加试验成本,同时因零件的更换及调试,造成试验

的中断和延期,甚至发生实验事故,威胁到实验人员及实验室的安全.对于日常燃用混合燃料的机动车驾驶者,发动机故障会增加驾驶者的驾驶成本,使驾驶者承担额外的发动机修理费和维护费;潜在的发动机故障也会增加车辆使用风险,严重时可危及驾驶者及车辆乘坐者的生命安全.然而目前,对燃用混合燃料的发动机的安全评估研究甚少,鲜有学者从风险角度对混合燃料的发动机燃烧特性和排放特性进行探讨.随着如乙醇汽油、生物柴油等混合燃料已经或即将在全国进行推广使用,了解掌握燃用混合燃料对发动机可能造成的故障风险愈发受到关注.通过制定相关的改进方案,降低燃用混合燃料在试验和日常中发生风险的概率,提高消费者对混合燃料的满意度,进而更好地促进混合燃料的推广.因此,从风险角度对混合燃料在汽柴油发动机上的燃用进行探讨和分析显得尤为重要.

## 2 基于模糊集、灰色关联理论与 DEMATEL 方法的改进 FMEA 模型

### 2.1 确定风险因子

为准确选取燃用混合燃料的发动机在运转过程中可能出现的风险失效模式,本文邀请在混合燃料发动机燃烧特性研究方面有丰富经验的专家和科研人员等 5 人,以调查问卷的形式进行访谈.综合各位专家的意见与反馈,得出发动机在燃用混合燃料过程中潜在的 13 种失效模式(failure mode, FM)及相对应的失效原因(cause of failure, CF)如表 1 所示.

表 1 发动机在使用混合燃料时潜在的失效模式与原因

Tab.1 FMEA of the engine using blended fuel

FM 编号	失效模式	失效后果	CF 编号	失效原因
FM1	活塞环槽积炭	活塞环卡死,拉缸,机油消耗量增加	CF1	燃料胶质含量增加
FM2	燃烧室积炭	发动机爆震	CF1	燃料胶质含量增加
FM3	进气管表面产生沉积物	增加进气阻力,发动机动力性降低	CF1	燃料胶质含量增加
FM4	滤清器及供油系统堵塞	发动机启动困难和碳烟排放增加	CF2	燃料含游离甘油
FM5	喷油雾化不良	活塞烧蚀	CF3	燃料黏度高
FM6	柱塞磨损加剧	喷油量下降,发动机启动困难	CF4	燃料黏度降低
FM7	气缸腐蚀磨损	发动机动力性能下降	CF5	燃烧生成物腐蚀性强
FM8	活塞密封圈腐蚀	气缸漏气,发动机动力下降,机油消耗量增加	CF6	燃料具有腐蚀性
FM9	火花塞烧蚀	引起发动机故障	CF6	燃料具有腐蚀性
FM10	油路腐蚀	存在漏油风险	CF6	燃料具有腐蚀性
FM11	供油系统产生气阻	供油量减少,发动机启动困难易熄火	CF7	燃料沸点降低
FM12	燃料分层	引起穴蚀,喷油嘴失效	CF8	燃料吸水、亲水性强
FM13	燃料挥发有毒气体	对人体有害	CF9	燃料挥发性强

### 2.2 改进的 FMEA 模型

FMEA 模型在 20 世纪 50 年代首次应用于某战斗机操作系统的设计分析中,随后的 60 年代中期,

FMEA 技术在航天工业中得到正式应用并逐渐推广<sup>[5]</sup>.利用 FMEA 模型对系统或产品中潜在风险进行分析,并从失效模式的严重度(severity, S)、发生

度(occurrence,  $O$ )以及检测度(detection,  $D$ )3个风险角度进行评价并采取相应的预防措施,避免失效和故障的发生.与此同时,可使用 FMEA 模型对已存的失效模式进行分析,研究其导致失效产生的原因,进而有所针对性地选择改进方法,达到防止失效再次发生的最终目的<sup>[6]</sup>.因此,不仅可使用 FMEA 方法对潜在失效模式的发生进行事先预测与防范,同时还可针对已发生的失效模式进行事后分析与改进. FMEA 模型通过计算  $S$ 、 $O$ 、 $D$  的乘积得出每一个失效模式的风险优先系数(risk priority number, RPN),将 RPN 值排序得到风险较高的失效模式,并针对关键失效模式制定风险控制措施来加强产品或系统的可靠性和安全性<sup>[7]</sup>.但传统 FMEA 模型中存在以下 4 个方面缺陷<sup>[8]</sup>:①很难精确地将专家小组对风险因子的定性文字评价转化为定量数字;②忽略了风险因子  $S$ 、 $O$ 、 $D$  之间的相对重要性,简单地将三者的重要度视为等同;③不同的  $S$ 、 $O$ 、 $D$  的乘积可以是相同的,即得到一样的 RPN 值,而实际潜在的风险却不相同,更高风险的失效模式难以得到相应的重视;④由一种失效原因导致的多种失效模式的风险排序应该有别于其他失效模式,不能简单地按照 RPN 值来排序.

针对传统 FMEA 模型中存在的不足,国内外学者均提出了相应的改善模型,如逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)、区间二元语义测度(interval 2-tuple hybrid weighted distance, ITHWD)、数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)、云模型理论等<sup>[9-12]</sup>.

本文在成熟的模糊集理论与灰色关联分析方法上,同时采取了用以处理失效模式与失效原因之间相互关系的 DEMATEL 方法.在模型的构建过程中,首先建立描述 3 个风险因子的模糊语言术语集,并根据术语的含义确定与之相对应的模糊数;随后由专家依靠自身经验及知识,从模糊语言术语集中选取合适的评价术语对失效模式中的 3 个风险因子进行评分,通过模糊集理论的运用,将专家评价进行

定量转换,并由此展开失效模式之间的灰色关联度计算;根据计算所得的灰色关联度构建失效模式与失效原因之间的直接影响关系矩阵,再由公式转化为综合影响关系矩阵,引入 DEMATEL 方法,得出失效模式与失效原因之间的原因度,最后由原因度对失效模式进行风险优先性的排序,对容易对系统产生严重影响的失效模式制定相应的控制和改善措施<sup>[13-14]</sup>.相对于传统 FMEA 而言,改进后的 FMEA 模型更为准确地将专家对风险因子的模糊语言评价转化为定量数据,并且考虑了 3 种风险因子之间的相对重要度,避免了仅依靠 RPN 值来进行失效模式风险优先度排序的弊端,同时,综合考虑了共因失效的问题,认识到由同一种失效原因所导致的多种失效模式对系统的影响应该有别于其他失效模式.该模型的计算流程如图 1 所示.

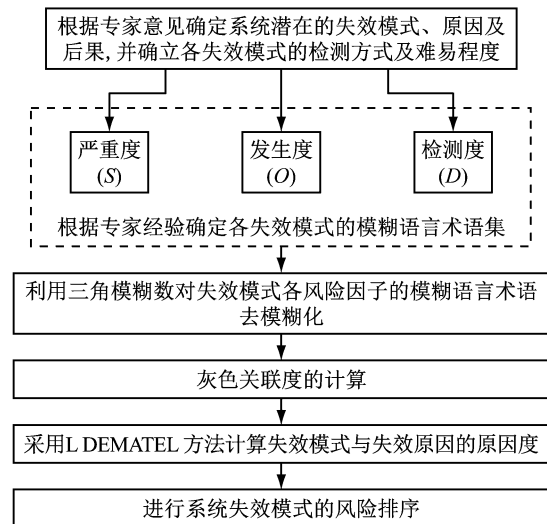


图 1 改进 FMEA 模型计算流程图

Fig.1 Flowchart of improved FMEA model

### 2.3 建立风险因子的模糊语言术语集

在对 3 个风险因子  $S$ 、 $O$ 、 $D$  进行定性语言评价时,可先建立三者的模糊语言术语集,即{极低( $R$ )、低( $L$ )、中等( $M$ )、高( $H$ )、极高( $V_h$ )},从中选取相应的评价术语对风险因子进行描述,模糊语言术语的具体含义见表 2.

表 2 模糊语言评价术语含义

Tab.2 Meaning of evaluative terms

语言术语	严重度	发生度	检测度
极低	系统正常运行,失效对系统功能几乎无影响	失效发生概率极低	失效基本可以确定被检测出
低	系统部分运行正常,失效使部分系统功能下降	失效发生概率低	失效被检测出的概率高
一般	系统运行失常,失效对系统功能产生影响	失效偶尔发生	失效被检测出的概率中等
高	系统运行严重失常,失效对系统功能产生严重影响	失效发生概率高	失效被检测出的概率低
极高	系统停止运行,失效造成系统严重损坏	失效发生概率极高	失效被检测出的概率极低

## 2.4 确立与模糊语言术语相对应的模糊数

定性评价的语言变量模糊信息可根据模糊集理论采用模糊数转化为定量评价. 本文在对风险因子模糊语言术语的定量化处理过程中使用的是三角模糊数, 其用符号表示为  $T=(a, b, c)$ , 其隶属函数为

$$\lambda_T(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ (x-a)/(b-a), & a < x \leq b \\ (c-x)/(c-a), & b < x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (1)$$

在确定三角模糊数  $(a, b, c)$  的具体数值时可依据专家经验, 结合专家对所研究问题的专业程度确定该专家所占比重  $\theta_i$ , 而由此位专家评价所得风险因子对应的三角模糊数设为  $\rho_i=(a_i, b_i, c_i)$ , 最后综合 5 位专家的评价, 可根据式(2)~(4)得出该变量的模糊语言术语对应的三角模糊数为

$$a = \sum_{i=1}^n \theta_i a_i \quad (2)$$

$$b = \sum_{i=1}^n \theta_i b_i \quad (3)$$

$$c = \sum_{i=1}^n \theta_i c_i \quad (4)$$

其中,  $\sum_{i=1}^n \theta_i = 1, \theta_i \in (0, 1)$ .

## 2.5 三角模糊数去模糊化

模糊数的使用过程中需将模糊数去模糊化, 有很多种去模糊化的方法, 如最大均值法、面积中心等. 在本文中采用了如下公式进行去模糊化<sup>[15]</sup>:

$$A(x) = \frac{1}{6}(a + 4b + c) \quad (5)$$

## 2.6 灰色关联理论在 FMEA 中的应用

$$\xi(x_o(t), x_i(t)) = \frac{\min_i \min_t |x_o(t) - x_i(t)| + \eta \max_i \max_t |x_o(t) - x_i(t)|}{|x_o(t) - x_i(t)| + \eta \max_i \max_t |x_o(t) - x_i(t)|} \quad (6)$$

式中:  $|x_o(t) - x_i(t)|$  为失效模式比较矩阵与参考矩阵的距离;  $\eta$  为分辨系数,  $\eta \in (0, 1)$ , 本文中取  $\eta = 0.5$ .

### (4) 计算灰色关联度

对于某一失效模式而言, 不同的风险因子所造成的影响是有差异的, 因此在衡量失效模式的风险排序时, 应根据风险因子的影响程度设定相应的权重系数, 令该权重系数为  $\zeta_i$ , 则第  $i$  种失效模式的关联度可根据下式得到:

$$\nu(x_o, x_i) = \sum_{t=1}^3 \zeta_t \{ \xi(x_o(t), x_i(t)) \} \quad (7)$$

式中:  $\sum_{t=1}^3 \zeta_t = 1$ , 权重系数  $\zeta_t$  可由专家讨论决定.

传统 FMEA 模型在计算 RPN 值时容易出现较高的重复率, 因此, 本文采用灰色关联决策方法计算灰色关联度, 根据理想最优情况与各个失效模式之间的关联度进行风险排序, 进而消除传统 FMEA 模型的弊端<sup>[16]</sup>. 其具体实施步骤如下:

### (1) 建立比较矩阵

若某发动机系统在运行过程中存在  $n$  种失效模式, 分别记为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 由于每种失效模式均包含 S、O、D 3 种风险因子, 因此, 第  $i$  种失效模式的数据可表示为  $x_i = \{x_i(1), x_i(2), x_i(3)\}$ , 其中  $x_i(t)$  ( $t = 1, 2, 3$ ) 表示 FMEA 小组对 3 种风险因子的评估, 其值可通过去模糊化公式(5)得到. 由此可得到如下  $n$  种失效模式比较矩阵:

$$\{x_i(t)\} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & x_1(3) \\ x_2(1) & x_2(2) & x_2(3) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n(1) & x_n(2) & x_n(3) \end{bmatrix}$$

### (2) 建立参考矩阵

失效模式的风险因子排序是基于一定的参考准则确定的. 为保证系统的正常运行, 参考矩阵应选择风险因子的最低水准或最高水准作为参考标准. 本文选取最高风险水平作为参考标准建立参考矩阵

$$\{x_o(t)\} = \begin{bmatrix} V_h & V_h & V_h \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ V_h & V_h & V_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 & 10 & 10 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 10 & 10 & 10 \end{bmatrix}$$

### (3) 计算灰色关联系数

根据下式可计算得到失效模式下各个风险因子与参考准则的关联系数:

## 2.7 应用 DEMATEL 方法确定失效模式原因度

由于传统 FMEA 模型在计算 RPN 值时存在没有考虑共因失效的问题, 本文采用 DEMATEL 方法构建和分析复杂因素之间因果关系.

具体实施步骤如下:

(1) 构造失效模式与失效原因之间的直接影响关系矩阵  $A$ .

$$A = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 0 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

式中:  $a_{ij}$  为计算所得的失效模式与失效原因之间的灰色关联度.

(2)将矩阵  $A$  规范化,具体过程为先将矩阵  $A$  中各行的数值相加,取各行和的最大值,将矩阵  $A$  中各元素除以该最大值,得到规范化矩阵  $B$ .

$$B = [\beta_{ij}]_{n \times n}$$

$$\beta_{ij} = \frac{a_{ij}}{\max_{i=1 \rightarrow n} \sum_{j=1}^n a_{ij}}$$

(3)计算综合影响矩阵  $T$ . 计算过程如下,其中  $I$  为  $n \times n$  的单位矩阵.

$$T = B(I - B)^{-1}$$

(4)将综合影响矩阵  $T$  中的各行及各列中的数分别相加求和,得到两个新的矩阵  $E$  和  $F$ . 这两个矩阵分别表示某失效模式或失效原因对其他所有失效模式和失效原因的影响程度,以及该失效模式或失效原因受到其他所有失效模式和失效原因的影响程度.

$$E = [e(1), e(2), \dots, e(n)]$$

$$e(i) = \sum_{j=1}^n t_{ij}$$

$$F = [f(1), f(2), \dots, f(n)]$$

$$f(j) = \sum_{i=1}^n t_{ij}$$

(5)计算原因度  $R$ .

$$R = E - F = [r_1, r_2, \dots, r_n]$$

式中: $r_i$  表示失效模式或失效原因  $i$  的原因度,当  $r_i > 0$  时,表示失效模式或失效原因  $i$  影响其他失效模式或失效原因;当  $r_i < 0$  时,表示失效模式或失效原因  $i$  被其他失效模式或失效原因影响<sup>[14]</sup>.

最后将计算所得的原因度根据数值大小降序排列,确定失效模式的风险优先级别.

### 3 案例应用分析

#### 3.1 风险优先度排序

根据专家在混合燃料发动机领域的工作经验和熟知程度,确定各位专家在本次评价中的权重比例,借助专家知识和经验与模糊集理论,建立风险因子的模糊术语集和相应的三角模糊数. 具体如表 3 所示.

表 3 模糊语言术语集及相应模糊数

Tab.3 Fuzzy linguistic term set and corresponding fuzzy number

专家	$\theta$	$R$	$L$	$M$	$H$	$V_h$
1	0.3	(0, 1.3, 2.5)	(1.4, 3.3, 4.9)	(3.5, 5.4, 7.9)	(6.8, 8.3, 9.6)	(8.5, 10, 10)
2	0.3	(0, 1.3, 2.6)	(1.3, 3.2, 4.7)	(3.4, 5.4, 7.8)	(6.7, 8.4, 9.7)	(8.9, 10, 10)
3	0.2	(0, 1.3, 2.4)	(1.5, 3.5, 5.1)	(3.3, 5.5, 7.7)	(6.4, 7.9, 9.4)	(8.6, 10, 10)
4	0.1	(0, 1.3, 2.7)	(1.3, 3.3, 4.8)	(3.6, 5.6, 8.0)	(6.5, 8.2, 9.5)	(8.3, 10, 10)
5	0.1	(0, 1.3, 2.6)	(1.2, 3.1, 4.6)	(3.3, 5.3, 7.6)	(6.4, 8.0, 9.5)	(9.0, 10, 10)
总计	1	(0, 1.3, 2.54)	(1.36, 3.29, 4.84)	(3.42, 5.43, 7.81)	(6.62, 8.21, 9.57)	(8.67, 10, 10)

根据式(5)将三角模糊数去模糊化,得清晰数如表 4 所示.

表 4 模糊语言术语对应清晰数

Tab.4 Clear numbers corresponded to fuzzy linguistic term

语言术语	$R$	$L$	$M$	$H$	$V_h$
清晰数	1.29	3.23	5.49	8.17	9.78

采用二次评价法对得到的 10 种失效模式和 9 种失效原因进行专家评价,评价结果如表 5 所示.

根据各专家权重计算得到各失效模式最终的风险因子评价,根据传统 FMEA 模型中的 RPN 计算方法,得到风险排序如表 6 所示.

采用模糊灰色关联方法进行风险排序:将所得风险因子评价所对应的清晰数代入,建立比较矩阵,根据所建立的参考矩阵及公式(6),计算出失效模式各个风险因子与参考基准的关联系数.再根据由专家经验事先设定的失效模式各个风险因子的权重系数  $\zeta_1=0.5, \zeta_2=0.3, \zeta_3=0.2$ ,由公式(7)计算得

到失效模式相对参考基准的关联度.将各失效模式按关联度的大小进行排序.

最后用所得关联度构建 DEMATEL 方法中的直接影响关系矩阵和相对直接影响关系矩阵,再根据 DEMATEL 方法中的计算步骤,逐一计算失效模式和失效原因的原因度.

3 种方法所计算排序得到的结果如表 7 所示.

#### 3.2 风险排序结果分析

通过 3 种排序方法的对比,可以看出本文所采用的改进 FMEA 方法主要有以下两方面优点:

(1)克服了传统 FMEA 模型仅通过计算 RPN 值进行失效模式的风险排序.如 FM5 与 FM11 的风险因子  $S, O, D$  分别为 6、2、4 和 4、3、4.传统 FMEA 方法计算 RPN 值均为 48,但使用灰色关联方法后,其关联度分别为 0.453 和 0.411,即 FM5 的风险处理优于 FM11.这是由于考虑了风险因子的权重,FM5 的严重度  $S$  大于 FM11 的严重度,因此在实际

表 5 失效模式专家评价

Tab.5 Evaluation of failure modes from expert

风险因素	专家 1			专家 2			专家 3			专家 4			专家 5		
	S	O	D	S	O	D	S	O	D	S	O	D	S	O	D
F1	M	L	H	L	L	M	M	L	H	L	L	V <sub>h</sub>	M	L	H
F2	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	M	H	H	H
F3	M	L	M	L	R	M	M	L	M	L	R	M	M	L	M
F4	V <sub>h</sub>	V <sub>h</sub>	H	H	H	M	V <sub>h</sub>	V <sub>h</sub>	H	H	H	H	V <sub>h</sub>	V <sub>h</sub>	H
F5	M	L	M	H	R	L	M	L	M	H	R	M	M	L	M
F6	H	H	M	M	H	H	H	H	M	M	H	L	H	H	M
F7	L	R	L	M	L	R	L	R	L	M	L	R	L	R	L
F8	R	L	L	R	R	L	R	L	L	R	R	M	R	L	L
F9	H	M	H	M	L	M	H	M	H	M	L	M	H	M	H
F10	V <sub>h</sub>	R	M	H	L	L	V <sub>h</sub>	R	M	H	L	M	V <sub>h</sub>	R	M
F11	L	R	M	M	M	M	L	R	M	M	M	R	L	R	M
F12	R	R	H	M	L	H	R	R	H	M	L	L	R	R	H
F13	V <sub>h</sub>	L	V <sub>h</sub>	H	M	H	V <sub>h</sub>	L	V <sub>h</sub>	H	M	V <sub>h</sub>	V <sub>h</sub>	L	V <sub>h</sub>

表 6 失效模式传统 FMEA 分析结果

Tab.6 Result of failure modes based on traditional FMEA

失效模式	失效原因	S	O	D	RPN
FM1	CF1	5	3	6	90
FM2	CF1	8	7	8	448
FM3	CF1	4	3	5	60
FM4	CF2	9	8	5	360
FM5	CF3	6	2	4	48
FM6	CF4	5	7	7	245
FM7	CF5	6	2	3	36
FM8	CF6	3	3	4	36
FM9	CF6	7	5	7	245
FM10	CF6	8	2	5	80
FM11	CF7	4	3	4	48
FM12	CF8	3	3	7	63
FM13	CF9	9	4	8	288

表 7 失效模式的 3 种 FMEA 分析结果对比

Tab.7 Comparison of three FMEA analysis results

失效模式	失效原因	传统方法		模糊灰色关联法		本文方法	
		RPN	排序	RPN	排序	RPN	排序
FM1	CF1	90	6	0.484 623	7	1	1
FM2	CF1	448	1	0.739 693	2	1	1
FM3	CF1	60	9	0.432 204	11	1	1
FM4	CF2	360	2	0.694 969	3	0.419 54	8
FM5	CF3	48	10	0.463 655	9	0.279 90	11
FM6	CF4	245	4	0.583 160	4	0.352 04	9
FM7	CF5	36	12	0.463 655	9	0.279 90	11
FM8	CF6	36	12	0.432 204	11	0.948 44	4
FM9	CF6	245	4	0.560 798	6	0.948 44	4
FM10	CF6	80	7	0.578 113	5	0.948 44	4
FM11	CF7	48	10	0.411 236	13	0.248 25	13
FM12	CF8	63	8	0.476 927	8	0.287 91	10
FM13	CF9	288	3	0.802 761	1	0.484 61	7

处理中,FM5 应优先 FM11 得到处理。

(2) 考虑了共因失效问题,如均由失效原因 CF1 所导致的失效模式 FM1、FM2 和 FM3,以及均由失效原因 CF6 导致的失效模式 FM8、FM9 和 FM10。

采用本文的方法计算得到的优先度要高于传统 FMEA 方法。

根据风险排序可以发现,由于所使用的混合燃料胶质含量增高所导致的发动机积炭问题在所有风险中是最为严重的,燃烧室内积炭过多,不仅会造成发动机功率的降低、增加油耗,更为严重的还会引起发动机气缸的爆震,对活塞以及曲轴连杆造成损害,从而严重影响汽车安全。其次是掺入的新燃料具有一定的腐蚀性所导致的失效风险,混合燃料对发动机部分金属精密部件、橡胶密封部件等的腐蚀作用是混合燃料使用过程中的一大弊端。再者是如生物柴油中含有的游离甘油对汽车的滤清器及供油系统的影响,其主要影响汽车的启动性能以及排放性能。而对于使用混合燃料的汽油机,由于混合燃料本身具有的挥发毒性以及燃料黏度降低所导致的柱塞偶件磨损加剧也是潜在的较大隐患。

### 3.3 风险控制意见

#### 3.3.1 新型发动机的研制

针对混合燃料在使用过程中的潜在风险,可设计使用混合燃料的特定发动机。特定发动机可根据混合燃料的具体特性,在原有的汽柴油机基础上加以改装改进(如改装原有机油泵,使用特定油泵增大泵油压力,用以解决混合燃料易产生气阻现象;调整发动机点火时刻,解决使用混合燃料导致的发动机加速迟缓等现象<sup>[17]</sup>),使发动机与混合燃料更加匹配,降低发动机在使用混合燃料中潜在风险发生的概率。如某些大型汽车厂商,已经设计生产数款以混合燃料作为使用油品的特定发动机。

#### 3.3.2 混合燃料的优化

对于汽柴油混入替代燃料后自身特性发生改变所造成的风险,可对混合燃料本身进行改良和优化。

可在混合燃料中加入适量的金属腐蚀抑制剂,用以改善混合燃料对于发动机气缸及橡胶密封材料的腐蚀;在混合燃料中添加助溶剂,降低燃料分层的风险。此外,国内外学者也在积极研究探索新一代混合燃料(如丁醇柴油混合燃料等)。这些新型混合燃料在发动机适用性上的表现或将更为出色,但还需更多研究数据和实际应用中的表现。

### 3.3.3 使用者自身意识提高

目前,仍有一定量的发动机风险故障是由于车辆使用者自身对油品使用及风险预防上的意识缺失所造成的,提高使用者对车辆发动机油品适用性和风险防范的意识,也有助于规避潜在风险的发生。如在添加混合燃料前对原本使用纯汽、柴油的发动机、供油系统及油路进行彻底清洗;严格遵守发动机油品使用要求添加相应的燃料,避免贪图价格上的优惠错加燃料等,通过了解使用混合燃料的潜在风险做出相应调整,防止在使用过程中对车辆造成不必要的危害及影响。

## 4 结语

本文结合模糊集、灰色关联分析与 DEMATEL 方法对 FMEA 模型加以改进,并应用于使用混合燃料的车辆发动机的风险分析中。研究表明,通过使用 FMEA 方法,可以帮助科研人员较为全面地掌握发动机在燃用新型混合燃料的过程中潜在的对于发动机系统及整个车辆系统产生负面影响的失效风险;同时,通过对风险因子的分析与计算,并对计算结果进行排序,研究人员可以更为清晰、准确地了解各个失效模式的风险程度优先级,进而有针对性地制定控制措施及改进方案,亦或是对系统本身进行调整,降低系统发生故障的可能性,消除潜藏的风险,保障系统的平稳运行。

在具体的案例分析中,改进后的 FMEA 方法能够减少传统 FMEA 模型中所存在的不合理性。例如,考虑了风险因子之间的相对重要度,对系统中存在的共因失效问题进行了更为合理的分析。由此可见,改进的 FMEA 模型能够更为实际、更为全面地对系统中的潜在风险进行评价,并根据排序结果,提出相应的风险控制意见,用以预防风险的发生,改善混合燃料对于车辆发动机的适用性。

### 参考文献:

[1] 李红松,曹建国,张勇. 不同比例甲醇汽油混合燃料对电喷汽

油机性能影响的研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2008, 37(4): 70.

LI Hongsong, CAO Jianguo, ZHANG Yong. Research on effects of methanol-gasoline blend fuel with different methanol volume fractions on EFI engine performances [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2008, 37(4): 70.

[2] 郭美华,杜宝杰. 乙醇汽油混合燃料的燃烧和排放特点分析[J]. 叉车技术, 2010(2): 22.

GUO Meihua, DU Baojie. The analysis of ethanol-gasoline blend fuel combustion and exhaust [J]. Forklift Technology, 2010(2): 22.

[3] LABECKAS G, SLAVINSKAS S, MAZŽEIKI M. The effect of ethanol-diesel-biodiesel blends on combustion, performance and emissions of a direct injection diesel engine [J]. Energy Conversion & Management, 2014, 79(2): 698.

[4] 孙梦婷,成晓北,王兆文. 后喷射策略下生物柴油对发动机燃烧和排放影响的数值模拟[J]. 内燃机工程, 2017, 38(4): 14.

SUN Mengting, CHENG Xiaobei, WANG Zhaowen. Numerical simulation of effect of biodiesel on engine combustion and emissions with post injection [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2017, 38(4): 14.

[5] 李涵敏. FMEA 在汽车零部件供应商管理中的应用[J]. 中国物流与采购, 2015(11): 76.

LI Hanmin. The application of FMEA in the management of automobile spare part supplier [J]. China Logistics & Purchasing, 2015(11): 76.

[6] 崔文彬,吴桂涛,孙培廷. 基于 FMEA 和模糊综合评判的船舶安全评估[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(3): 263.

CUI Wenbin, WU Guitao, SUN Peiting. Ship safety assessment based on FMEA and fuzzy comprehensive evaluation methods [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(3): 263.

[7] 尤筱玥,雷星晖,刘虎沉. 基于失效模式与后果分析扩展模型的外包风险分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 309.

YOU Xiaoyue, LEI Xinghui, LIU Huchen. Evaluation of the risk of outsourcing failure modes using interval 2-tuple linguistic FMEA model [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(2): 309.

[8] 王立恩,刘虎沉. 基于模糊集和 COPRAS 的改进 FMEA 方法[J]. 模糊系统与数学, 2017(3): 69.

WANG Lien, LIU Huchen. An improved FMEA based on fuzzy set theory and COPRAS [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2017(3): 69.

[9] LIU H C, YOU J X, SHAN M M, *et al.* Failure mode and effects analysis using intuitionistic fuzzy hybrid TOPSIS approach [J]. Soft Computing, 2015, 19(4): 1085.

[10] 尤筱玥,尤建新. 基于区间二元语义 VIKOR 的外包供应商选择模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(9): 1407.

YOU Xiaoyue, YOU Jianxin. Outsourcing supplier selection by interval 2-tuple linguistic VIKOR method [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2017, 45(9): 1407.

[11] CHANG D, SUN K P. Applying DEA to enhance assessment capability of FMEA [J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2009, 26(6): 629.

- [12] 尤建新,徐涛,毛人杰. 基于失效模式与后果分析的农场到家庭模式风险分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 604.  
YOU Jianxin, XU Tao, MAO Renjie. Evaluation of the risk of farm to family failure modes using failure mode and effects analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(4): 604.
- [13] 罗党,刘思峰. 灰色关联决策方法研究[J]. 中国管理科学, 2005, 13(1): 101.  
LUO Dang, LIU Sifeng. The study of grey relational decision-making[J]. Chinese Journal of Management Science, 2005, 13(1): 101.
- [14] 李新月,高琦,刘军. 基于模糊共因失效分析的FMEA风险评估方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(10): 62.  
LI Xinyue, GAO Qi, LIU Jun. An improved FMEA risk assessment method considering the fuzzy common cause failures[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2017(10): 62.
- [15] LIU H C, YOU J X, LIN Q L, *et al.* Risk assessment in system FMEA combining fuzzy weighted average with fuzzy decision-making trial and evaluation laboratory [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2015, 28(7): 701.
- [16] 门峰,姬升启. 基于模糊集与灰色关联的改进FMEA方法[J]. 工业工程与管理, 2008, 13(2): 55.  
MEN Feng, JI Shengqi. An improved FMEA based on fuzzy set theory and grey relational theory [J]. Industrial Engineering and Management, 2008, 13(2): 55.
- [17] 朱和菊. 乙醇汽油对轿车性能影响的分析及使用注意事项[C]//中国汽车工程学会燃料与润滑油分会第十二届年会论文集. 北京:中国汽车工程学会, 2006:211-215.  
ZHU Heju. The performance influence analysis and caution of using ethanol-gasoline blend fuel on automobiles [C]// Annual Meeting of Fuel and Lubricating Fuel Institute, the Branch of China Automotive Engineering Institute. Beijing: China Society of Automotive Engineers, 2006:211-215.

(上接第730页)

- HU Xinming, LU Zhiqiang. Optimization of aircraft moving assembly line scheduling problem considering material delivery [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(12):2573.
- [6] BANERJEE A G, YUND W, YANG D, *et al.* A hybrid statistical method for accurate prediction of supplier delivery times of aircraft engine parts[C]//Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Boston: ASME, 2015: 286-295.
- [7] CAI H X, DAI M Y, YU T. Material coding for aircraft manufacturing industry[J]. Journal of Aerospace Technology & Management, 2014, 6(2):183.
- [8] ZHENG Y, HAN D, NI Y, *et al.* Research and application of bottom-up route-based product data conformity inspection approach for civil aircraft [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2014, 27(6):591.
- [9] YAO S, JIANG Z, LI N. A branch and bound algorithm for minimizing total completion time on a single batch machine with incompatible job families and dynamic arrivals[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(5):939.
- [10] BENNELL J A, MESGARPOUR M, POTTS C N. Dynamic scheduling of aircraft landings [J]. European Journal of Operational Research, 2017, 258(1): 315.
- [11] PAUL S K, SARKER R, ESSAM D. A quantitative model for disruption mitigation in a supply chain[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 257(3):881.
- [12] SOBEYKO O, MONCH L. Heuristic approaches for scheduling jobs in large-scale flexible job shops [J]. Computers & Operations Research, 2016, 68:97.
- [13] SAHIN C, KUVVETLI Y. Differential evolution based meta-heuristic algorithm for dynamic continuous berth allocation problem[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(23/24):10679.
- [14] PARK J, MEI Y, SU N, *et al.* An investigation of ensemble combination schemes for genetic programming based hyper-heuristic approaches to dynamic job shop scheduling [J]. Applied Soft Computing, 2018, 63:72.
- [15] YANG G, TANG W, ZHAO R. An uncertain furniture production planning problem with cumulative service levels[J]. Soft Computing, 2017, 21:1041.
- [16] NASIRI M M, YAZDANPARAST R, JOLAI F. A simulation optimisation approach for real-time scheduling in an open shop environment using a composite dispatching rule [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2017, 30(46):1239.
- [17] WANG K, CHOI S H, QIN H, *et al.* A cluster-based scheduling model using SPT and SA for dynamic hybrid flow shop problems [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(9/10/11/12):2243.
- [18] ZHOU B H, XU J H. An adaptive SVM-based real-time scheduling mechanism and simulation for multiple-load carriers in automobile assembly lines [J]. International Journal of Modeling Simulation & Scientific Computing, 2017, 8(4):1.
- [19] LIU X, LI M J, SUN Y L, *et al.* Support vector data description for weed/corn image recognition [J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2010, 8(1):214.
- [20] DUAN L, XIE M, BAI T, *et al.* A new support vector data description method for machinery fault diagnosis with unbalanced datasets [J]. Expert Systems with Applications, 2016, 64:239.
- [21] VERBEECK C, PETEGHEM V V, VANHOUCHE M, *et al.* A metaheuristic solution approach for the time-constrained project scheduling problem[J]. Or Spectrum, 2017, 39(2):353.