

基于模糊综合评判的农业机械 FMECA 方法研究

胡文泽¹ 何珂¹ 金诚谦¹ 耿端阳¹ 张国海¹ 鹿秀凤²

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 山东理工职业学院, 济宁 272000)

摘要: 针对当前农机装备功能增强、结构复杂导致故障后果影响严重的问题, 在传统故障模式、影响及危害性分析 (FMECA) 方法的基础上引入模糊综合评判, 形成了基于模糊综合评判的 FMECA 分析方法。通过建立因素集、评价集、模糊因素评价矩阵、权重集等步骤, 将定性评价指标予以定量化。以立式玉米脱粒试验台为例, 对其分析程序和分析方法进行了验证, 制定故障模式、影响分析 (FMEA) 表格, 对表中各故障模式进行模糊综合评价。依据评判结果得出各故障模式的危害等级排序, 进而找到产品可靠性改进的重点。结果表明, 此评判结果与实际情况相符, 该方法具有明显的准确性和可比性, 为农机装备的结构优化和维修大纲制定提供了科学、准确的决策依据。

关键词: 农业机械; 可靠性; 模糊综合评判; 故障模式、影响及危害性分析

中图分类号: S220.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0332-06

FMECA Method Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation

HU Wenzhe¹ HE Ke¹ JIN Chengqian¹ GENG Duanyang¹ ZHANG Guohai¹ LU Xiufeng²

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

2. Shandong Polytechnic College, Jining 272000, China)

Abstract: The enhanced functions and complex structure of agricultural machinery lead to serious consequences of failure. During reliability analysis of products, many evaluation elements are involved and failure information and evaluation indexes are fuzzy, so it is difficult to give credible and accurate analysis results. In view of these problems, the fuzzy comprehensive evaluation was introduced into the traditional method of failure mode effect and criticality analysis (FMECA), and the new FMECA analysis method based on fuzzy comprehensive evaluation was formed. Factors set, evaluation set, judgement matrix for fuzzy factors and weights set were established to quantify the qualitative evaluation index. Taking the vertical corn threshing test bed as a case, analysis table for failure modes and effects analysis (FMEA) was established and criticalities of failure modes in the table were evaluated. According to the criticality, failure modes were ranked and emphases of reliability improvement were found. The analysis procedure and method were verified. The result showed that the method had obvious accuracy and comparability, which provided scientific and accurate decision basis for the structural optimization and formulation of maintenance program of agricultural machinery.

Key words: agricultural machinery; reliability; fuzzy comprehensive evaluation; failure mode, effect and criticality analysis

0 引言

随着农机技术的发展, 农机产品的功能不断提高, 但也导致了结构趋于复杂, 农机装备可靠性对装备功能的发挥显得非常重要^[1-4]。可靠性是以产品寿命为主要研究对象的一门学科。故障分析是可靠

性设计的重要内容, 主要研究产品潜在或显著的故障机理、故障概率及故障影响等, 为产品改进和维修大纲制定提供决策依据。其目的在于尽早发现问题, 分析并找出潜在的弱点, 将分析结果反馈给产品设计、制造及使用单位, 从设计、制造、使用和维护等全寿命周期采取对策和措施, 以提高和维持产品的

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-08-20
基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR201702180137) 和山东省高等学校优势学科人才团队培育计划项目
作者简介: 胡文泽 (1992—), 女, 硕士生, 主要从事农业机械装备研究, E-mail: 1294622773@qq.com
通信作者: 耿端阳 (1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械装备研究, E-mail: dygxt@sdut.edu.cn

可靠性^[5-7]。在当今农业装备功能强大、结构复杂、技术水平不断提高的情况下,为确保农业装备的使用可靠性、经济性和安全性,开展农业装备的故障分析研究具有重要意义^[8]。

本文以立式玉米收获试验台为案例,以模糊综合评判方法为手段,以可靠性设计中的故障模式影响危害度分析为目的,开展基于模糊综合评判的 FMECA 分析方法研究,为该方法在农业装备可靠性方面的研究和利用提供借鉴。

1 FMECA 的基本原理

FMECA (Failure modes, effect and criticality analysis)由故障模式及影响分析(FMEA)和危害性分析(CA)两部分组成^[9]。FMECA 是分析目标系统中每个潜在故障模式及其对该系统及上层系统所产生的影响,并根据每个故障模式所产生影响的严重程度、发生概率及故障危害程度进行分类的一种分析方法,是工程应用中较为常用的可靠性分析方法之一^[10-12]。

FMECA 的基本原理为:根据技术质量文件、历史资料和用户的要求,分析系统的结构,鉴别失效模式,分析引起失效的原因,并采用一定的统计方法,估算失效发生时后果的严重度(Severity,S)、发生度(Occurrence,O)和探测度(Detection,D)等,继而计算风险优先数(Risk priority number,RPN),根据RPN值对故障模式进行排序,并采取相应的改进或者维护保养措施,从而达到降低RPN值,确保系统可靠性的目的^[13]。

利用 FMECA 方法对产品进行故障分析虽然可以及时发现结构设计存在的缺陷,对比不同方案的优劣,并为改进结构设计和制定维修大纲提供决策依据,但由于该分析过程涉及的评价因素多、定性评价多,以及故障后果、影响具有很大的不可比性,所以导致分析人员经常难以给出准确有效的分析结果。而模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法,可以根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转换为定量评价,即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价^[14-19]。它具有结果清晰、系统性强的特点,能较好地解决模糊的、难以量化的问题,适合各种非确定性问题的解决。

所以将上述 2 种方法结合起来,形成基于模糊综合评判的 FMECA 分析方法,可以有效改进传统 FMECA 分析方法存在的缺陷,为改进设计和制定使用规则、维修大纲等提供更为准确的决策依据。

2 模糊 FMECA 方法

按确定的标准,对某个或某类对象中的某个因素或某个部分进行评价,称为单一评判,从众多单一评判中获得对某个或某类对象的整体评价,称为综合评判。模糊综合评判,即运用模糊数学思想,通过调查采样等方式积累数据,从而对不易量化的复杂系统进行评判的过程。其基本思想是利用模糊线性变换原理和最大隶属度(或加权平均等)原则,考虑与被评价事物相关的各个因素,对其作出合理的综合评价^[20-22]。

模糊综合评判的步骤如下:

(1)建立因素集和评价集。因素集是影响评判对象的各因素的集合,通常用 U 表示,记作 $U = \{u_1, u_2, \cdots, u_i, \cdots, u_m\}$,其中 u_i 表示第 i 个因素;评价集是对评判对象可能做出的评价等级的集合,通常用 V 表示,记作 $V = \{v_1, v_2, \cdots, v_j, \cdots, v_n\}$,其中 v_j 表示第 j 个评价等级。

(2)单因素评价。为了进行综合评价,首先要进行单因素评价。在对某一故障模式模糊综合评价的过程中,设第 i 因素 u_i 对评价等级 v_j 的隶属度为 r_{ij} ,从而得出第 i 个因素 u_i 的单因素评价集合 $r_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \cdots, r_{in}\}$ 。

常用的评价方法是成立一个由 x 人组成的专家评价组,每位成员对各影响因素 u_i 做出一个评价等级 v_j ,若 x 位组员中评定 u_i 隶属于 v_j 的有 x_{ij} 人,则得到 u_i 的评价集为

$$r_i = \left\{ \frac{x_{i1}}{x}, \frac{x_{i2}}{x}, \cdots, \frac{x_{in}}{x} \right\} = \{r_{i1}, r_{i2}, \cdots, r_{in}\} \tag{1}$$

且

$$\sum_{j=1}^m r_{ij} = 1$$

(3)构造模糊综合评价矩阵。把所分析故障模式的每个单因素评价集作为行,便能构成一个 m 行 n 列的矩阵,即该故障模式的模糊综合评价矩阵为

$$\begin{aligned} R &= [r_1 \quad r_2 \quad \cdots \quad r_n]^T = \\ &\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2}$$

(4)确定模糊因素权重集。不同因素对于各故障模式的重要程度不同,在进行综合评判前,应根据各因素的重要程度,赋予其相应的权数,并由这些权数组成因素的权重集。

专家评议法的主观因素影响太多,容易造成评价结果失准,很有可能得不到有意义的评判结果。而层次分析法(AHP)能弥补上述方法的不足,尽量

消除权重确定方法中的人为影响,保证权重的有效性和实用性。利用层次分析法求权重集的具体步骤如下:

(1)用 a_{ij} 表示影响因素 u_i 对 u_j 的相对重要性数值,构造影响因素相对重要性矩阵(a_{ij} 的选取依据如表 1 所示)

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

(3)

显然, $a_{ii} = 1, a_{ij} = 1/a_{ji}$ 。

表 1 因素相对重要程度判断值

Tab.1 Relative importance of factors

含义	a_{ij}	备注
u_i 与 u_j “同等重要”	1	
u_i 与 u_j “稍微重要”	3	
u_i 与 u_j “明显重要”	5	
u_i 与 u_j “强烈重要”	7	
u_i 与 u_j “绝对重要”	9	
u_i 与 u_j 的重要程度 (介于 2 个等级之间)	2,4,6,8 之一	2 个等级判 断值的中值

(2)计算一致性比率 R_c ,进行一致性检验。先计算矩阵 A 的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 和一致性指标 I_c ,即

$$I_c = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

(4)

然后确定 I_R 的值, I_R 表示影响因素相对重要性矩阵的平均随机一致性指标,对于 1 ~ 13 阶矩阵, I_R 的值如表 2 所示。

表 2 1 ~ 13 阶判断矩阵的 I_R 值

Tab.2 Values of I_R of 1 ~ 13 order judgment matrix

阶数 n	I_R	阶数 n	I_R
1	0	8	1.41
2	0	9	1.45
3	0.58	10	1.49
4	0.90	11	1.52
5	1.12	12	1.54
6	1.24	13	1.56
7	1.32		

根据 I_c 和 I_R ,计算一致性比率

$$R_c = \frac{I_c}{I_R}$$

(5)

当 $R_c < 0.1$ 时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,否则应对判断矩阵作适当修正。

(3)根据方根法,计算各因素的权重。设所分析故障模式的第 i 个因素的加权项为 w_i ,则

$$w_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}$$

(6)

那么得到该故障模式的因素权重集为 $W_1 = \{w_1, w_2, \cdots, w_i, \cdots, w_n\}$,其中 $0 < w_i < 1$,且满足归一

化条件: $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。

(4)确定综合评价模型,求出模糊综合评价向量。得到综合评价矩阵 R 和模糊因素权重集 W 之后,将模糊因素权重集改写为向量形式,故障模式的模糊综合评价矩阵为

$$B = WR = [b_1 \quad b_2 \quad \cdots \quad b_n]$$

(7)

(5)综合危害指数的确定。为了更直观地看出结果,将 B 通过加权平均法处理,得到一个简单数值 C 来表示故障模式对系统的综合危害程度,即

$$C = BV^T$$

(8)

式中 V ——评价等级矩阵

3 实例应用

玉米收获是整个玉米生产过程中最重要的环节之一,而玉米脱粒则是收获工作中的核心内容,玉米脱粒系统的可靠性直接关系到玉米收获机整机的可靠性水平。本文对立式玉米脱粒试验台传动系统进行了全面分析。

3.1 立式玉米脱粒试验台

产品的组成和结构是进行 FMECA 分析的基础,本研究的立式玉米脱粒试验台由动力系统、传动系统与工作系统 3 部分组成。其结构如图 1 所示,

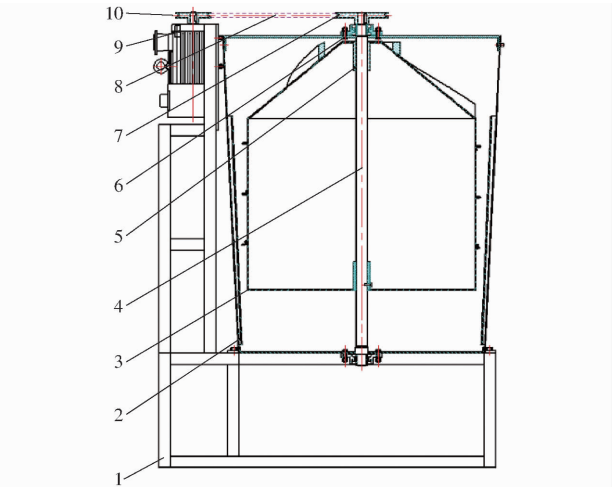


图 1 立式玉米脱粒试验台结构图

Fig.1 Structure diagram of vertical corn threshing test bed

- 1.机架 2.外筒 3.内筒 4.主轴 5.花键套 6.带座轴承
- 7.从动轮 8.三角带 9.电动机 10.主动轮

包括:机架、外筒、内筒、主轴、花键套、带座轴承、从动轮、三角带、电动机、主动轮等。

工作时,玉米果穗从外筒上部喂入,接着在重力作用和内筒锥部作用下被滑落到内筒外侧,在锥部螺旋叶片作用下纠正姿态,使其以直立状态进入内外筒脱粒通道;由于该通道上部间隙大、下部间隙小,加之内筒上螺旋分布脱粒元件的作用,果穗做螺旋滚动与滑动至滚筒外部,在此过程中果穗与果穗之间、果穗与弓齿弓板之间进行充分挤搓,籽粒被挤

搓下来,即完成整个脱粒过程。

3.2 传动系统 FMEA 分析

传动系统的故障模式主要是从有关信息中分析得到,表 3 为传动系统故障模式分析报告。

3.3 传动系统模糊 FMECA 分析

为了使 FMEA 的分析结果得到量化,通过模糊 FMECA 分析,可以对传动系统的可靠性进行评判,使各故障的风险更加清楚地呈现,以便于采取适当的措施,保证试验台安全可靠地运行。

表 3 立式玉米脱粒试验台 FMEA
Tab.3 FMEA of vertical corn threshing test bed

代码	产品或功能标志	功能	故障模式	故障原因	故障影响	故障检测方法	补偿措施
1	电动机轴组件	输出电动机的运动和力	电动机轴损伤:断裂或变形	负载过重导致扭矩过大	丧失功能	定期检查	更换
2	带传动	将电动机轴输出的运动和力传递给主轴	皮带损伤:裂纹、脱层、松散,甚至断裂	传动带在应力的反复作用下产生疲劳破坏	丧失功能	目视检查	更换
3			皮带打滑	负载过重导致传递的力大于带轮之间摩擦力总和的极限	功能下降	目视检查	增加传动带根数或减轻负载
4			皮带脱落	两带轮不在同一平面上 皮带过长	丧失功能	仪器检测 目视检查	调整两带轮相对位置 更换或使用张紧轮
5	主轴组件	带动脱粒滚筒转动	主轴损伤:断裂或变形	负载过重导致扭矩过大	丧失功能	定期检查	更换
6			转动不灵活,有卡滞现象	两端轴承的同轴度低 润滑不良	丧失功能 功能下降	仪器检测 视情检查	更换 加强润滑

在 FMEA 分析的基础上,对其故障模式分别进行模糊综合评价,其步骤如下:

(1)确定因素集。在对传动系统进行故障危害性评价时采用因素集 $U = \{ \text{故障发生频度}(u_1), \text{检测难易程度}(u_2), \text{影响严重程度}(u_3), \text{维修难易程度}(u_4) \}$ 。

(2)确定评价集。本研究的主要目的在于找到

立式玉米脱粒试验台的薄弱环节,为其改进和维护提供决策参考。对于因素评价而言,绝对的“好”和“差”毕竟是很少的部分。因此,本文以各影响因素可能出现的各种评价结果作为元素,建立评价集,在两者间加入“较好、一般、较差”3 个等级,设置评价等级数为 5,即 $V = \{ 1, 2, 3, 4, 5 \}$ 。各因素的具体评价等级如表 4 所示。

表 4 各因素评价等级
Tab.4 Evaluation grade of factors

影响因素	评价等级				
	1	2	3	4	5
故障发生频度 u_1	几乎不发生	很少发生	偶尔发生	有时发生	频繁发生
检测难易程度 u_2	几乎无影响	轻度故障	中等故障	严重故障	致命故障
影响严重程度 u_3	可直接发现	容易检测	不易检测	很难检测	无法检测
维修难易程度 u_4	简单调试	重新安装	更换零件	更换整机	无法维修

(3)构造综合评判矩阵。设经过专家评判组的评定,故障模式 1 的故障发生频度模糊集为 $r_1 = \{ 0, 0.1, 0.6, 0.3, 0 \}$, 检测难易程度模糊集为 $r_2 = \{ 0.15, 0.45, 0.3, 0.1, 0 \}$, 影响严重程度模糊集为 $r_3 = \{ 0, 0.1, 0.7, 0.15, 0.05 \}$, 维修难易程度模糊集为 $r_4 = \{ 0, 0, 0.4, 0.5, 0.1 \}$ 。因此得到模糊评价矩阵为

$$R_1 = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & r_4 \end{bmatrix}^T =$$
$$\begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.6 & 0.3 & 0 \\ 0.15 & 0.45 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.7 & 0.15 & 0.05 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.5 & 0.1 \end{bmatrix}$$

(4)确定故障模式 1 的因素权重集。根据故障

模式 1 中因素对评判结果的影响,得到决策模型中各影响因素之间的相对重要度,并通过计算得到其权重,如表 5 所示。

表 5 故障模式 1 各影响因素相对重要度及权重

Tab. 5 Relative importance and weights of factors belong to failure mode 1					
影响因素	u_1	u_2	u_3	u_4	权重 w_i
u_1	1	5	1/3	5	0.280 4
u_2	1/5	1	1/7	1	0.067 9
u_3	3	7	1	7	0.574 7
u_4	1/3	1	1/7	1	0.077 0

根据上文所述一致性检验方法,数据代入式(5)计算,则有 $R_c < 0.1$,表明该判断矩阵满足一致性要求。因此,可得到故障模式 1 的因素权重集 $W_1 = \{0.280\ 4, 0.067\ 9, 0.574\ 7, 0.077\ 1\}$ 。

(5)对故障模式 1 的模糊综合评价。故障模式 1 的模糊综合评价矩阵为

$$B_1 = W_1 R_1 =$$
$$[0.010\ 2\ 0.116\ 0\ 0.621\ 7\ 0.215\ 7\ 0.036\ 4]$$

这说明故障模式 1 对危害度等级 1、2、3、4、5 的隶属度分别为 0.010 2、0.116 0、0.621 7、0.215 7、0.036 4。

(6)综合危害度等级计算。根据式(8)可以求得故障模式 1 的综合危害等级为 $C_1 = 3.152\ 1$ 。

(7)应用同样方法确定故障模式 2~6 的模糊评价矩阵分别为

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.15 & 0.4 & 0.25 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0.25 & 0.35 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix}$$
$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.2 & 0.7 & 0.1 \\ 0 & 0.25 & 0.65 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \end{bmatrix}$$
$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.55 & 0.15 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.6 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0.8 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$
$$R_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 \\ 0 & 0.3 & 0.6 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}$$

因各故障模式的影响因素相对重要度相同,皆如表 5 所示,所以此处采用相同的权重集,即 $W_1 = W_2 = W_3 = W_4 = W_5 = W_6$ 。

可以求出各故障模式的模糊综合评价向量 B_i 和综合危险指数 C_i 。

$$B_2 = [0.042\ 1\ 0.259\ 5\ 0.477\ 2\ 0.178\ 7\ 0.042\ 5]$$
$$C_2 = 2.920\ 2$$
$$B_3 = [0\ 0.254\ 5\ 0.311\ 1\ 0.398\ 6\ 0.035\ 7]$$
$$C_3 = 3.215\ 6$$
$$B_4 = [0.062\ 9\ 0.246\ 5\ 0.475\ 7\ 0.157\ 5\ 0.057\ 5]$$
$$C_4 = 2.900\ 1$$
$$B_5 = [0.013\ 6\ 0.222\ 2\ 0.414\ 5\ 0.264\ 2\ 0.085\ 5]$$
$$C_5 = 3.185\ 9$$
$$B_6 = [0.287\ 3\ 0.251\ 6\ 0.242\ 6\ 0.162\ 4\ 0.056\ 1]$$
$$C_6 = 2.448\ 3$$

根据综合危险指数,故障模式 1~6 按其危险度从小到大依次为:故障模式 6、故障模式 4、故障模式 2、故障模式 1、故障模式 5、故障模式 3。

(8)经仿真分析和现场试验发现,此评判结果与实际情况相符,且精度很高;同时,把传统可靠性理论用于模糊可靠性的计算中,就可通过计算可靠性指数来直接衡量模糊可靠性。

4 结论

(1)开展了基于模糊综合评判的 FMECA 分析方法研究,建立了模糊综合评价模型。为农业装备的可靠性设计提供了理论依据,为可靠性分析在农机领域的应用奠定了基础。

(2)以立式玉米脱粒试验台为例,用上述模型对其传动系统的故障模式进行了验证分析,结果表明,此评判结果与实际情况相符,说明该评价模型是能够充分利用系统模糊信息进行可靠性分析的有效方法。

(3)模糊综合评判的排序结果表明,传动系统的各故障模式中,故障模式 3 的危害指数最高,是可靠性改进的重点,其次是故障模式 5。根据此结果有针对性地提出改进措施,并制定预防性维修大纲,有利于全面提高并维持整机的可靠性水平。

参 考 文 献

1 叶秉良,俞高红,赵匀. 拖拉机最终传动多目标模糊可靠性优化设计[J]. 农业机械学报,2010,41(4):95-100.
YE Bingliang, YU Gaohong, ZHAO Yun. Multi-objective fuzzy reliability optimization design of tractor's final transmission[J].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(4):95–100. (in Chinese)
- 2 朱月和. 可靠性设计在农机方面的应用[J]. 农机使用与维修,2016(7):27.
- 3 张迎春,耿端阳. 可靠性设计在农机方面的应用[J]. 农业装备与车辆工程,2009(7):31–33,54.
ZHANG Yingchun, GENG Duanyang. Application research of reliability design in farm machinery[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering,2009(7):31–33,54. (in Chinese)
- 4 耿爱军,杨建宁,张兆磊,等. 国内外玉米收获机械发展现状及展望[J]. 农机化研究,2016,38(4):251–257.
GENG Aijun, YANG Jianning, ZHANG Zhaolei, et al. Discuss about the current situation and future of corn harvest machinery about domestic and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(4):251–257. (in Chinese)
- 5 张义民. 机械零件可靠性分析的参数灵敏度分析[J]. 机械强度,2003(6):657–660.
ZHANG Yimin. Parametric sensitivity in reliability analysis of the mechanical components[J]. Journal of Mechanical Strength,2003(6):657–660. (in Chinese)
- 6 赵东元. 可靠性工程与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2009:141–143.
- 7 北京航空航天大学可靠性工程研究所. GJB/Z 139—2006 故障模式、影响及危害性分析指南[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2006:95–98.
- 8 张秀花,张爱军,夏玲,等. 可靠性在农业机械中的应用[J]. 河北农业大学学报,2005,28(1):100–103.
ZHANG Xiuhua, ZHANG Aijun, XIA Ling, et al. Application of reliability theory to farming machine[J]. Journal of Agricultural University of Hebei,2005,28(1):100–103. (in Chinese)
- 9 竹建福. FMECA 在船舶主机系统中的应用[D]. 上海:上海海事大学,2006.
- 10 张晗亮. 以 FMECA 为中心的柴油机可靠性研究[D]. 成都:电子科技大学,2009.
- 11 康瑞,石荣德. FMECA 技术及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2006:35–40.
- 12 XU K, TANG L C, XIE M, et al. Fuzzy assessment of FMEA for engine systems[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002,75(1):17–19.
- 13 赵云生,刘凤刚. FMECA 工程技术在铁道车辆零部件设计中的应用[J]. 铁道车辆,2009,47(2):11–15.
ZHAO Yunshen, LIU Fenggang. Application of FMECA engineering technology in design of parts and components of rolling stock [J]. Rolling Stock,2009,47(2):11–15. (in Chinese)
- 14 李永华,兆文忠. 铁路货车故障模式危害性分析方法[J]. 中国铁道科学,2009,30(3):103–108.
LI Yonghua, ZHAO Wenzhong. Criticality analysis method for the failure mode effects of railway freight car[J]. China Railway Science,2009,30(3):103–108. (in Chinese)
- 15 董玉革,王爱因,吴成龙. 传统可靠性理论在模糊可靠性计算中的应用[J]. 农业机械学报,2007,38(2):142–145.
DONG Yuge, WANG Ainan, WU Chenglong. Application of conventional reliability theory in fuzzy reliability calculation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(2):142–145. (in Chinese)
- 16 唐淑云. 基于模糊理论的发动机可靠性风险评价方法研究[D]. 赣州:江西理工大学,2010.
- 17 YANG Zaili, STEVE B, WANG Jin. Fuzzy rule-based bayesian reasoning approach for prioritization of failures in FMEA[J]. IEEE Transactions on Reliability,2008,57(3):517–528.
- 18 LOTFIAZ. Fuzzy sets and fuzzy information granulation theory[M]. Beijing:Beijing Normal University Press,2000:57–61.
- 19 TAYKM, LIMCP. 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.
- 20 周真,马德仲,于晓洋,等. 基于故障数据统计的电磁流量计失效模式分析[J]. 仪器仪表学报,2009,10(6):82–84.
ZHOU Zhen, MA Dezhong, YU Xiaoyang, et al. Failure modes analysis of electromagnetic flow meter based on failure data statistics [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument(Supplement),2009,10(6):82–84. (in Chinese)
- 21 林泽力,郑国,莫固良,等. 基于模糊综合评判的飞机液压泵故障预测振动[J]. 振动. 测试与诊断,2016,36(4):746–750.
LIN Zeli, ZHENG Guo, MO Guliang, et al. Prediction of aircraft hydraulic pump fault based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis,2016,36(4):746–750. (in Chinese)
- 22 徐征捷,张友鹏,苏宏升. 基于云模型的模糊综合评判法在风险评估中的应用[J]. 安全与环境学报,2014,14(2):69–72.
XU Zhengjie, ZHANG Youpeng, SU Hongsheng. Application of risk assessment on fuzzy comprehensive evaluation method based on the cloud model[J]. Journal of Safety and Environment,2014,14(2):69–72. (in Chinese)