

谭壮^{1,2} 李国发^{1,2} 许彬彬^{1,2} 王松^{1,2} 朱光^{1,2}

基于模糊评判的数控机床零部件 制造工艺 FMECA 研究

摘要

以数控机床零部件的制造工艺为研究对象,对其实施改进的制造工艺 FMECA,通过梯形模糊数评判的方法确定出工艺 FMECA 中风险优先数的排序,利用模糊综合评判方法确定出工艺系统的风险等级,有效地找出薄弱工艺环节并采取改进措施,从而提高数控机床零部件制造工艺可靠性。

关键词

数控机床;故障模式、影响及危害性分析(FMECA);模糊评判;制造可靠性

中图分类号 TH162

文献标志码 A

收稿日期 2014-05-13

资助项目 国家科技重大专项(2013ZX04011-012)

作者简介

谭壮,男,硕士生,研究方向为数控机床可靠性.tanzhuang05@sina.com

李国发(通信作者),男,博士,教授,主要研究方向为数控机床可靠性以及精密加工技术.ligf@jlu.edu.cn

1 吉林大学 机械科学与工程学院,长春,130022

2 吉林大学 机械工业数控装备可靠性技术重点实验室,长春,130022

0 引言

数控机床可靠性是衡量其功能维持能力的重要指标,也是其能否占有较大市场的重要影响因素.目前国内对数控机床可靠性的研究主要集中在可靠性试验和评价、可靠性设计与故障分析、可用性及维修性等方面,即使是国外关于机床制造过程的可靠性研究也很少.产品的可靠性是由设计、制造、管理等因素共同决定的.虽然设计决定了产品的固有可靠性,但制造是可靠性指标得以实现的保证,对产品的可靠性有着重要的影响,因此研究数控机床零部件的制造可靠性对保障机床的固有可靠性水平,提升机床制造企业的市场竞争力有着重要的意义^[1-3].

1 制造工艺 FMECA

为了提高数控机床零部件制造可靠性,最有效的方法是分析出其制造过程中的薄弱工序并对其加以改进.故障模式、影响及危害性分析(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, FMECA)是分析系统中每个单元所有可能产生的故障模式以及对系统产生的所有可能影响和后果,并且按照每个故障模式的发生概率及其严重程度予以分类的一种归纳分析方法^[4].数控机床零部件制造工艺 FMECA 的目的是针对数控机床零部件制造过程中每个工艺步骤可能发生的故障模式、影响及危害性,按照某一标准对故障模式风险进行评测,对薄弱的工艺环节制定改进措施,并预测或者跟踪改进措施的有效性,直到所有工艺故障模式风险达到预期目标,从而提高数控机床零部件的制造可靠性^[5].

制造工艺 FMECA 主要是应用在产品的试制过程中,介于多数机床厂对同一型号数控机床的生产批量通常是小批量,因此在零部件的试制中实施工艺 FMECA 时,对计算风险优先数的工艺故障模式发生概率等级进行准确打分较为困难.为使寻找薄弱工序环节的操作过程更加简便,并为建立关键工序质量控制点提供依据,本文采用以风险优先数(RPN)为评价指标的梯形模糊数评判方法.

2 梯形模糊数评判方法

梯形模糊数 M 的隶属函数 $\mu(x):R \rightarrow [0,1]$ 如下^[6]:

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

其中 $-\infty < a \leq b \leq c \leq d < +\infty$, a 和 d 为梯形模糊数 M 的上界和下界, 闭区间 $[b, c]$ 为梯形模糊数 M 的中值. 若 $(d-a)$ 值越大, 梯形模糊数 M 的模糊程度越强, 因此梯形模糊数可以表示为 $M = (a, b, c, d)$.

本文邀请了一组数控机床制造领域的专家, 以风险优先数为指标对数控机床零部件制造过程的各个工艺故障模式进行评价, 专家的评价用以下语义词来表示: “没有风险”、“风险很小”、“风险较小”、“风险一般”、“风险较大”、“风险非常大”. 梯形模糊数可以定量地表示这些语义词. 为便于计算, a, b, c 和 d 4 个分位数是属于 $[0, 1]$ 区间内, 其具体值可以由专家组进行确定, 即每个语义词的 4 个分位数都是通过加权平均的方法得到 (篇幅有限, 原始数据及计算过程略). 6 个语义词的梯形模糊数如表 1 所示.

表 1 语义词对应的梯形模糊数

Table 1 Trapezoidal fuzzy numbers for six risk grades

语义词(简记)	梯形模糊数			
	a	b	c	d
没有风险 (ND)	0.00	0.00	0.05	0.09
风险很小 (LD)	0.06	0.11	0.20	0.30
风险较小 (SD)	0.24	0.31	0.44	0.51
风险一般 (GD)	0.43	0.53	0.65	0.74
风险较大 (MD)	0.67	0.78	0.85	0.92
风险很大 (BD)	0.88	0.94	1.00	1.00

表 1 中的模糊函数图像如图 1 所示, 其中的每条折线代表了一个语义词所对应的梯形模糊函数.

$A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 是以故障原因为单位划分的工艺故障模式集合, 记 $N = \{1, 2, \dots, n\}$. 设元素 r_{ij} 表示故障模式 A_i 对故障模式 A_j 的模糊相对风险程度, 通过对故障模式的两两比较, 得到梯形模糊数互补判断矩阵^[7]:

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

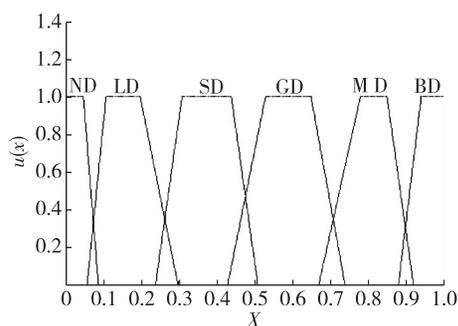


图 1 语义词对应的模糊函数图像

Fig. 1 Fuzzy functions for six risk grades

其中 $r_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$, 并且满足 $0 \leq a_{ij} \leq b_{ij} \leq c_{ij} \leq d_{ij} \leq 1, a_{ij} + d_{ji} = 1, b_{ij} + c_{ji} = 1, c_{ij} + b_{ji} = 1, d_{ij} + a_{ji} = 1, a_{ii} = b_{ii} = c_{ii} = d_{ii} = 0.5, i, j \in N$.

假设本文共邀请了 s 位专家, 每个专家都会给出一个梯形模糊数互补判断矩阵, 不同专家的权重为

$$\left\{ w_m \mid \sum_{j=1}^s w_j = 1, m = 1, 2, \dots, s \right\},$$

记专家组的一致判断矩阵为 $\tilde{R} = f(R_1, R_2, \dots, R_s)$. 为简便计算 \tilde{R} , 根据互补判断矩阵的性质, 只需计算出各专家模糊互补判断矩阵对角线以上同一位置处元素的一致判断 $\{\tilde{r}_{ij} = f(r_{ij}^1, r_{ij}^2, \dots, r_{ij}^s), j > i\}$ 即可, \tilde{r}_{ij} 的计算方法如下^[8-10]:

1) 计算单个模糊判断元素 $r_{ij}^m (m = 1, 2, \dots, s)$ 的质心 $C(r_{ij}^m) = (\bar{x}_{ij}^m, \bar{y}_{ij}^m), m = 1, 2, \dots, s$, 计算公式为

$$\bar{x}_{ij}^m = \left[\int_{a_{ij}^m}^{b_{ij}^m} \frac{x - a_{ij}^m}{b_{ij}^m - a_{ij}^m} dx + (c_{ij}^m - b_{ij}^m) + \int_{c_{ij}^m}^{d_{ij}^m} \frac{d_{ij}^m - x}{d_{ij}^m - c_{ij}^m} dx \right]^{-1} \cdot \left[\int_{a_{ij}^m}^{b_{ij}^m} \frac{x(x - a_{ij}^m)}{b_{ij}^m - a_{ij}^m} dx + \int_{b_{ij}^m}^{c_{ij}^m} x dx + \int_{c_{ij}^m}^{d_{ij}^m} \frac{x(d_{ij}^m - x)}{d_{ij}^m - c_{ij}^m} dx \right] \quad (2)$$

$$\bar{y}_{ij}^m = \frac{1}{2} \left[\int_{a_{ij}^m}^{b_{ij}^m} \frac{y - a_{ij}^m}{b_{ij}^m - a_{ij}^m} dy + (c_{ij}^m - b_{ij}^m) + \int_{c_{ij}^m}^{d_{ij}^m} \frac{d_{ij}^m - y}{d_{ij}^m - c_{ij}^m} dy \right]^{-1} \cdot \left[\int_{a_{ij}^m}^{b_{ij}^m} \left(\frac{y - a_{ij}^m}{b_{ij}^m - a_{ij}^m} \right)^2 dy + (c_{ij}^m - b_{ij}^m) + \int_{c_{ij}^m}^{d_{ij}^m} \left(\frac{d_{ij}^m - y}{d_{ij}^m - c_{ij}^m} \right)^2 dy \right]. \quad (3)$$

2) 计算判断集中的每 2 个模糊判断 $r_{ij}^m, r_{ij}^{m'}$ 的距离 $d(r_{ij}^m, r_{ij}^{m'}), m' = 1, 2, \dots, s$, 其计算公式为

$$d(r_{ij}^m, r_{ij}^{m'}) = \sqrt{(\bar{x}_{ij}^m - \bar{x}_{ij}^{m'})^2 + (\bar{y}_{ij}^m - \bar{y}_{ij}^{m'})^2}. \quad (4)$$

3) 计算判断集中的每 2 个模糊判断 $r_{ij}^m, r_{ij}^{m'}$ 的相似度 $S(r_{ij}^m, r_{ij}^{m'})$, 其计算公式为

$$S(r_{ij}^m, r_{ij}^{m'}) = 1 - \frac{d(r_{ij}^m, r_{ij}^{m'})}{U}, \quad (5)$$

式中 $U = \max_{m, m' \in F} d(r_{ij}^m, r_{ij}^{m'}), F = \{1, 2, \dots, s\}$.

4) 根据步骤 3) 计算的相似度 $S(r_{ij}^m, r_{ij}^{m'})$, 得到相似度矩阵

$$S_M = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1s} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{s1} & s_{s2} & \cdots & s_{ss} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由式(5)可知, 矩阵 S_M 是对称矩阵且主对角线元素均为 1, 即 $S_{pq} = S_{qp}$ 且 $S_{pp} = 1, p, q = 1, 2, \dots, s$.

5) 计算判断集中的每个模糊判断 $r_{ij}^m (m = 1, 2, \dots, s)$ 的平均一致程度, 其计算公式为

$$A(r_{ij}^m) = \frac{\sum_{q=1, q \neq p}^s S_{pq}}{s-1}. \quad (7)$$

6) 计算判断集中的每个模糊判断 $r_{ij}^m (m = 1, 2, \dots, s)$ 的相对一致程度, 其计算公式为

$$R(A_{ij}^m) = \frac{A(r_{ij}^m)}{\sum_{n=1}^s A(r_{ij}^{m'})}. \quad (8)$$

7) 计算判断集中的每个模糊判断 $r_{ij}^m (m = 1, 2, \dots, s)$ 的总体一致程度系数, 计算公式为

$$C(D_{ij}^m) = \beta \cdot R(A_{ij}^m) + (1 - \beta)w_m, \quad (9)$$

其中 β 为一常数, 若评判更依赖专家权重, β 取较小值, 否则 β 取较大值.

8) 由上述步骤的计算可得到专家组的一致判断 $\tilde{r}_{ij} = f(r_{ij}^1, r_{ij}^2, \dots, r_{ij}^s), (j > i)$ 如下:

$$\tilde{r}_{ij} = \sum_{m=1}^s C(D_{ij}^m) \cdot r_{ij}^m. \quad (10)$$

按照上述步骤及互补判断矩阵的性质对模糊互补判断矩阵对角线以上的每个元素进行计算, 从而得到专家组的一致判断矩阵 $\tilde{R} = f(R_1, R_2, \dots, R_s)$ 如下:

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} \tilde{r}_{11} & \tilde{r}_{12} & \cdots & \tilde{r}_{1n} \\ \tilde{r}_{21} & \tilde{r}_{22} & \cdots & \tilde{r}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{r}_{n1} & \tilde{r}_{n2} & \cdots & \tilde{r}_{nn} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

恰当地选择一个在 $[0, 1]$ 区间内单调函数 $Q(y)$, 将一致判断矩阵 \tilde{R} 中元素 \tilde{r}_{ij} 按式(12) 计算从而得到期望值互补判断矩阵 E_p [11].

$$E_p(P_{ij}) = \frac{1}{3} [(1 - \lambda)(\tilde{a}_{ij} + 2\tilde{b}_{ij}) + \lambda(2\tilde{c}_{ij} + \tilde{d}_{ij})],$$

$$\lambda = \int_0^1 Q(y) dy,$$

$$E_p(P_{ji}) = 1 - E_p(P_{ij}). \quad (12)$$

所得矩阵 E_p 如下:

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

对矩阵 E_p 按式(13) 计算, 得到排序向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n), \omega_i$ 越大, 即表示对应的工艺故障模式风险优先数(RPN) 越大.

$$\omega_i = \frac{1}{n} \left[\sum_{j=1}^n P_{ij} + 1 - \frac{n}{2} \right]. \quad (13)$$

对数控机床零部件加工的整个工艺系统实施模糊综合评判的具体方法如下[12]:

1) 为工艺系统综合评价建立评判等级, 等级 V 是对工艺故障模式状态的 h 个评价决断即 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_h\}$.

2) 专家组以评判等级为标准对工艺故障模式集合 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 中各元素进行打分并通过加权方法得到评判矩阵 P_A , 故障模式 A_i 的评判集 P_{A_i} 可表示为 $P_{A_i} = [\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{ih}]$, 其中 θ_{ij} 即表示该故障模式 A_i 在等级 v_j 上的隶属度得分, 且 $\sum_{j=1}^h \theta_{ij} = 1, 0 \leq \theta_{ij} \leq 1$, 所以 n 个故障模式的评判矩阵 P_A 为

$$P_A = [P_{A_1}, P_{A_2}, \dots, P_{A_n}]^T = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \cdots & \theta_{1h} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \cdots & \theta_{2h} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \theta_{n1} & \theta_{n2} & \cdots & \theta_{nh} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

3) 各故障模式的权重组成集合 $B = [b_1, b_2, \dots, b_n]$, $\sum_{i=1}^n b_i = 1$ 且 $0 \leq b_i \leq 1$, 综合评判模型 C 的计算如下:

$$\begin{cases} C = B \cdot P_A, \\ B = \omega^1 \end{cases} \quad (15)$$

其中 ω^1 为排序向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 的归一化向量.

4) 引入等级列向量 $D = (d_1, d_2, \dots, d_h)^T$, 综合评判的危害程度 E 的计算如式(16) 所示, 根据 E 数值大小即可得出系统危害程度等级:

$$E = C \cdot D. \quad (16)$$

因此采用模糊评判的数控机床制造工艺 FMECA 的分析流程可概括为图 2 所示.

3 实例分析

本文以国内某机床厂生产的某型号加工中心关

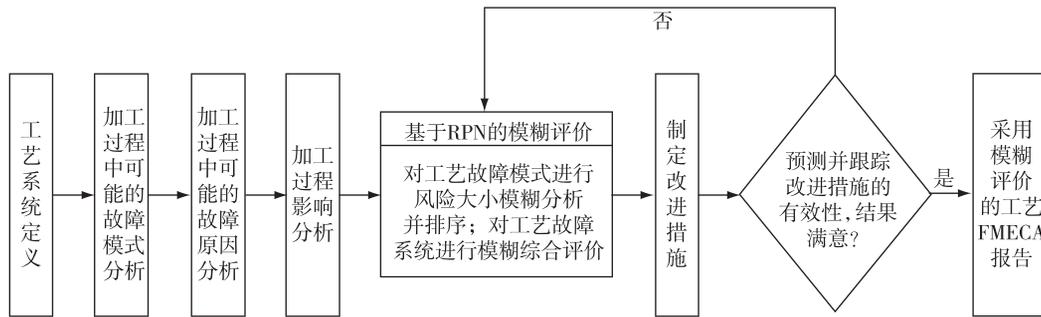


图 2 采用模糊评判的数控机床零部件制造工艺 FMECA 流程

Fig. 2 Flowchart of FMECA for CNC parts based on fuzzy evaluation

重件——主轴箱(如图 3 所示)的制造工艺为例,对其应用本文上述的模糊评判方法进行工艺 FMECA 研究.由于篇幅的限制,本文仅列出其中 2 道工序 4 种故障产生原因的工艺故障模式.

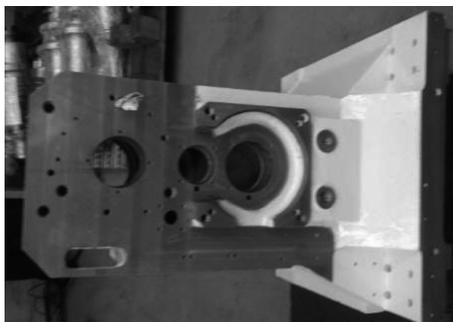


图 3 某机床厂生产的主轴箱

Fig. 3 Picture of a spindle box

1) 系统定义.主轴箱是加工中心关键零部件之一,具有体积较大,加工精度高等特点,毛坯为铸件,其加工过程不仅运输困难,而且装夹费时费力,具有一定的加工难度.

2) 绘制“工艺流程表”(表 2)及“零部件-工艺关系矩阵”(表 3).

3) 分析工艺故障模式、故障原因及影响,并对故障模式以故障原因为单位编号(表 4).

表 2 主轴箱工艺流程(部分)

Table 2 Some of the manufacturing processes of machine-tool spindle box

工艺流程	输入结果	输出结果
工序 3(铣):铣零件图中标注尺寸为 860 mm Ra1.6 的面	切削速度、背吃刀量、进给速度	有关几何尺寸、形状和位置误差、表面粗糙度
工序 8(镗):镗直径为 150 mm,公差为 H6 的主轴孔	切削速度、背吃刀量、进给速度	有关几何尺寸、形状和位置误差、表面粗糙度

表 3 零部件-工艺关系矩阵(部分)

Table 3 Matrix of part-process(part)

零部件特性	工艺操作(部分)			
	工序 1	工序 3	工序 5	工序 8
总长		✓		
主轴孔孔径				✓

4) 基于风险优先数的模糊评判.本文共邀请相关领域的 5 位专家,各位专家的权重如表 5 所示.请每位专家对表 4 中所编号的工艺故障模式进行两两比较,并打分得到模糊互补评判矩阵(篇幅有限,原始数据未列出),利用式(2)~(11),其中式(9)中的 β 取 0.5,得到专家组的一致判断矩阵 \tilde{R} 如下:

表 4 主轴箱工艺故障模式、故障原因及影响(部分)

Table 4 Failure mode, effects and criticality of spindle-box manufacturing processes(part)

工序名称及功能	工艺故障模式	故障原因	对下道工序影响	对组件或部件影响	对整机影响	编号
工序 3(铣):铣零件图中标注尺寸为 860 mm Ra1.6 的面	表面太粗糙	背吃刀量设置太大	无	无	Z 向运动阻力增大	1
		刀具磨损严重				2
工序 8(镗):镗直径 150 mm,公差为 H6 的主轴孔	主轴孔尺寸精度不足 主轴孔圆柱度偏大	刀具径向调整量不合理	无	不利于主轴装配	影响机床加工精度	3
		一侧装夹过紧				无

表 5 专家权重分配
Table 5 Weights of experts

	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
权重	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} (0.50 \ 0.50 \ 0.50 \ 0.50) & (0.23 \ 0.30 \ 0.38 \ 0.45) & (0.06 \ 0.10 \ 0.16 \ 0.23) & (0.05 \ 0.09 \ 0.14 \ 0.20) \\ (0.55 \ 0.62 \ 0.70 \ 0.77) & (0.50 \ 0.50 \ 0.50 \ 0.50) & (0.42 \ 0.51 \ 0.58 \ 0.64) & (0.45 \ 0.55 \ 0.62 \ 0.70) \\ (0.77 \ 0.84 \ 0.90 \ 0.94) & (0.36 \ 0.42 \ 0.49 \ 0.58) & (0.50 \ 0.50 \ 0.50 \ 0.50) & (0.40 \ 0.48 \ 0.56 \ 0.65) \\ (0.80 \ 0.86 \ 0.91 \ 0.95) & (0.30 \ 0.38 \ 0.45 \ 0.55) & (0.35 \ 0.44 \ 0.52 \ 0.60) & (0.50 \ 0.50 \ 0.50 \ 0.50) \end{bmatrix}$$

式(12)中取 $Q(y) = y^2$, 计算得到期望值互补判断矩阵 E_p 如下:

$$E_p = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.32 & 0.12 & 0.10 \\ 0.68 & 0.50 & 0.52 & 0.56 \\ 0.88 & 0.48 & 0.50 & 0.50 \\ 0.90 & 0.44 & 0.50 & 0.50 \end{bmatrix}$$

对矩阵 E_p 按式(13)计算, 得到排序向量 ω 如下:

$$\omega = (0.01, 0.315, 0.340, 0.335).$$

因此可以得出编号为 3 的工艺故障模式即因刀具径向调整量不合理造成的主轴孔尺寸精度不足是风险最大的工艺故障模式(仅限于表 4 中所编号的各工艺故障模式).

对工艺系统建立评判等级 $V = \{\text{风险很高, 风险较高, 中等风险, 轻度风险}\}$, 请专家组对表 4 所编号的各工艺故障模式打分(篇幅有限, 原始数据未列出), 并加权得到专家组的一致评判矩阵 P_A 如下:

$$P_A = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.09 & 0.27 & 0.62 \\ 0.23 & 0.13 & 0.35 & 0.29 \\ 0.04 & 0.24 & 0.23 & 0.49 \\ 0.10 & 0.38 & 0.46 & 0.06 \end{bmatrix}$$

表 4 中所编号的各工艺故障模式的权重可由排序向量 ω 归一化得到, 其具体数值如表 6 所示.

表 6 不同原因引起的各工艺故障模式权重分配
Table 6 Weights of failure modes caused by different factors

	1	2	3	4
权重	0.01	0.315	0.340	0.335

根据式(15)计算得到综合评判模型 C 如下:

$$C = [0.12, 0.25, 0.35, 0.28].$$

根据表 7 可知等级列向量 $D = (100, 75, 50, 25)^T$, 根据式(16)可得主轴箱工艺系统(仅限于表 4 所编号的各工艺故障模式)综合评判的危害程度 E :

$$E = C \cdot D = 55.3.$$

表 7 主轴箱工艺系统评判等级与改进措施

Table 7 Evaluated risk grades and improvement measures of process system

系统评判等级	建议措施	安全等级
$E < 25$ (轻度风险)	不必采取特别的措施	非常安全
$25 \leq E < 50$ (中等风险)	存在一定的安全隐患, 需对薄弱环节加以改进并监测从而预防事故发生	比较安全
$50 \leq E < 75$ (较高风险)	存在较大的安全隐患, 需对薄弱环节加以改进并监测从而减少事故的发生	比较不安全
$75 \leq E < 100$ (很高风险)	存在很大的安全隐患, 对薄弱环节重复进行改进, 直到系统可靠性满足要求为止	很不安全

由表 7 可知, 主轴箱工艺系统(仅限于表 4 所编号的各工艺故障模式)存在较大的安全隐患, 即有必要对薄弱环节采取改进措施, 比如采取对工序 8 建立关键工序质量控制点等措施.

5) 针对不同原因引起的各个工艺故障模式制定改进措施直到其符合要求为止. 例如对工序 8 中的故障模式“主轴孔尺寸精度不足”采取了“正确使用调刀仪, 规定刀具径向调整量范围”的改进措施, 经跟踪, 该故障模式的发生概率降低了, 专家的最终评价为“风险很小”, 这表明改进措施是有效的. 最后制定采用模糊评判的主轴箱工艺 FMECA(表 8).

4 结束语

本文对数控机床零部件制造工艺 FMECA 进行了研究, 采用梯形模糊数评判方法, 将专家组对制造工艺故障模式风险的定性分析转化为定量分析, 并有效找出数控机床零部件制造工艺的薄弱环节. 利用模糊综合评判方法确定出数控机床零部件制造工艺系统的危险等级, 为是否对工艺系统实施改进提供了重要依据. 实例证明采用模糊评判的工艺 FMECA 可以有效地提高数控机床零部件制造工艺可靠性.

表 8 采用模糊评判的主轴箱工艺 FMECA(部分)

Table 8 FMECA table of spindle-box process adopting fuzzy evaluation

工序名称	工序功能	故障模式	故障原因	故障影响			改进前风险优先数模糊评判排名	改进措施	责任部门	改进措施执行情况	改进措施执行后的风险等级
				下道工序影响	组件/部件影响	整机影响					
工序 3 (铣)	铣零件图标注尺寸为 860 mm Ra1.6 的面	表面太粗糙	背吃刀量太大 刀具磨损严重	无	无	运动阻力增大	4	规定背吃刀量的大小	机加车间	执行有效	风险很小
							3	增加刀具检查的频率		执行有效	风险很小
工序 8 (镗)	镗 150 mm H6 的主轴孔	尺寸精度不足	刀具径向调整量不合理	无	不利主轴装配	影响机床加工精度	1	正确使用调刀仪,规定刀具径向调整量范围(建质控点)	机加车间及质量管理部	执行有效	风险很小
		圆柱度偏大	一侧装夹过紧	无	不利主轴装配	降低机床加工精度	2	注意装夹力度,各方向夹紧力度均匀(建质控点)		执行有效	风险很小
改进前系统综合评分 $E = 55.3$, 风险较高 (仅针对表中所列的工艺故障模式)							改进后系统综合评分 $E < 25$, 轻度风险 (仅针对表中所列的工艺故障模式)				

参考文献

References

[1] 杨兆军,陈传海,陈菲,等.数控机床可靠性技术的研究进展[J].机械工程学报,2013,49(20):89-95
YANG Zhaojun, CHEN Chuanhai, CHEN Fei, et al. Progress in the research of reliability technology of machine tools [J]. Journal of Mechanical Engineering 2013, 49 (20): 89-95

[2] 蒋平.机械制造的工艺可靠性研究[D].长沙:国防科学技术大学信息系统与管理学院,2010
JIANG Ping. Research on process reliability for manufacturing [D]. Changsha: College of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, 2010

[3] 张义民.机械可靠性设计的内涵与递进[J].机械工程学报,2010,46(14):167-188
ZHANG Yimin. Connotation and development of mechanical reliability-based design [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 167-188

[4] 曾声奎,赵廷弟,张建国,等.系统可靠性设计分析教程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2000
ZENG Shengkui, ZHAO Tingdi, ZHANG Jianguo, et al. Design and analysis of system reliability [M]. Beijing: Beihang University Press, 2000

[5] 中国人民解放军总装备部.GJB/Z 1391—2006 故障模式、影响及危害性分析指南[S].2006
Chinese PLA General Armament Department. GJB/Z 1391—2006 Guide for failure mode, effects and criticality analysis [S]. 2006

[6] Cheng C H. Evaluating weapon systems using ranking fuzzy numbers [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 107 (1): 25-35

[7] 侯福均,吴祈宗. I 型不确定数互补判断矩阵的一致性和排序研究[J].系统工程理论与实践,2005,25(10):60-66
HOU Fujun, WU Qizong. Consistency and ranking method for I type uncertain number complementary judgment matrix [J]. Systems Engineering: Theory and Practice, 2005, 25(10): 60-66

[8] 蒋平,周忠宝,张永宏.一种评价制造过程中产品质量特征影响因素的模糊方法[J].南京信息工程大学学报:自然科学版,2010,2(3):267-273
JIANG Ping, ZHOU Zhongbao, ZHANG Yonghong. A fuzzy method to evaluate impacting factors for product quality characteristics in manufacturing [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 2 (3): 267-273

[9] Wang K L, Liu H M. A fuzzy aggregation approach to group decision-making based on centroid measurement [J]. Expert Systems, 2006, 23(5): 313-322

[10] Cheng C H. A new approach for ranking fuzzy numbers by distance method [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 95 (3): 307-317

[11] 吴坚.一种新的梯形模糊数互补判断矩阵的排序方法[J].中国管理科学,2010,18(3):95-100
WU Jian. A new approach for priorities trapezoidal fuzzy number reciprocal judgement matrix [J]. Chinese Journal of Management Science, 2010, 18(3): 95-100

[12] 王俊祥.FMECA 方法在无人机燃油系统中的应用[D].成都:电子科技大学机械电子工程学院,2011
WANG Junxiang. FMECA application in the UAV fuel system [D]. Chengdu: School of Mechanical Electronic and Industrial Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, 2011

Research on manufacture process FMECA for CNC parts based on fuzzy evaluation

TAN Zhuang^{1,2} LI Guofa^{1,2} XU Binbin^{1,2} WANG Song^{1,2} ZHU Guang^{1,2}

1 College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022

2 Key Laboratory of CNC Equipment Reliability Technique of Machinery Industry, Jilin University, Changchun 130022

Abstract The improved Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) is carried out for manufacturing process of Computer Numerically Controlled (CNC) machine parts. The risk priority numbers in manufacturing processes are sequenced by trapezoidal fuzzy evaluation. Then the fuzzy comprehensive evaluation is carried out to get the risk grades of the manufacturing processes, through which we can find out the weak link for improvement to increase manufacturing process reliability of CNC parts.

Key words CNC machine; failure mode, effects and criticality analysis (FMECA); fuzzy evaluation; manufacturing reliability