

随机模糊条件下加工中心故障模式分析*

申桂香¹ 樊少华¹ 张英芝¹ 姚金玖² 陈炳锬¹

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025; 2. 长春一汽轿车股份有限公司, 长春 130025)

【摘要】 在分析加工中心典型故障模式时,同时考虑故障发生的随机性和模糊性,将故障间隔时间定义为一个随机模糊变量,建立随机模糊条件下的加工中心故障模式发生机会模型。使用随机模糊模拟技术,计算出典型故障模式发生机会并对典型故障模式进行排序,通过典型故障模式发生机会和发生频率的对比分析,从整体上掌握了此型号加工中心故障的发生情况,找出了对加工中心可靠性影响较大的故障模式。

关键词: 加工中心 故障模式 随机模糊变量

中图分类号: TG659; TH165+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)02-0216-04

Failure Mode Analysis of Machining Center Based on Random Fuzzy Theory

Shen Guixiang¹ Fan Shaohua¹ Zhang Yingzhi¹ Yao Jinjiu² Chen Bingkun¹

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

2. Changchun Yiqi Sedan Stock Co., Ltd., Changchun 130025, China)

Abstract

In the analysis of the typical failure mode, randomness and fuzziness were taken into consideration, time between failures was defined as a random fuzzy variable, then the occurrence chance model was built. Random fuzzy method was used to calculate the occurrence chances of typical failure modes and the ranking. By virtue of the analysis of the occurrence chances and occurrence frequencies, some important conclusions could be made out. The failure mode which influenced the machining center most could be found out, the conclusions provided useful basis on how to eliminate these failure models and how to improve the reliability of machining center of this type.

Key words Machining center, Failure mode, Random fuzzy variable

引言

数控机床的故障包含大量的不确定性,这种不确定性主要表现为随机性和模糊性。传统的可靠性理论以概率论为基础,而近年来发展起来的模糊可靠性理论则以模糊理论为基础,在当前的研究过程中有各种不确定性相互渗透的趋势^[1~2]。数控机床结构复杂,工况多变,故障的发生受很多因素的影响,其故障模式也多种多样,这些故障数据既具有随机性,又具有模糊性,因此在处理数控

机床的故障数据、评估数控机床各故障模式在系统中作用时,应该同时考虑故障的随机性和模糊性。模糊随机变量可以看成是一个不精确的随机试验的观测值^[3],数控加工中心是带有刀库和自动换刀装置的数控机床。本文以加工中心为研究对象,基于随机模糊数学理论建立该加工中心故障模式发生机会模型,利用随机模糊模拟的方法计算每个故障模式的发生机会,确定故障模式发生的可能性大小,进而得到故障模式发生机会的排序。

收稿日期: 2010-09-25 修回日期: 2010-10-26

* 国家自然科学基金资助项目(50875110)、国家科技重大专项资助项目(2010ZX04014-011)和吉林大学科学前沿与交叉学科创新项目(200903165)

作者简介: 申桂香,教授,主要从事面向生命周期的数控装备可信性技术研究,E-mail: shengx@jlu.edu.cn

通讯作者: 张英芝,副教授,主要从事数控装备可信性技术研究,E-mail: zhangyz@jlu.edu.cn

1 原理和定义

1.1 模糊变量

假设 μ 为一从可能性空间 $(\Theta, P(\Theta), \text{Pos})$ 到实直线 R 上的函数, 则称 μ 是一个模糊变量^[4]。即模糊变量是一个从可能性空间到实数集的函数。

1.2 模糊数学中的3类测度

模糊数学中有3类测度: 可能性测度、必要性测度和可信性测度。这3类测度都是定义在可能性空间中, 可能性测度 $\text{Pos}(A)$ 描述了事件 A 发生的可能性; 必要性测度是描述事件 A 的对立集合 A^c 的不可能性; 可信性测度则定义为可能性测度和必要性测度的平均值, 是与概率测度相平行的概念。定义 ξ 是一个模糊变量, 它的隶属函数为 $\mu(x)$, r 是一个实数, 则模糊事件 $\{\xi \leq r\}$ 的可能性测度定义为

$$\text{Pos}\{\xi \leq r\} = \sup_{x \leq r} \mu(x)$$

必要性测度定义为

$$\text{Nec}\{\xi \leq r\} = 1 - \text{Pos}\{\xi > r\}$$

可信性测度定义为

$$\text{Cr}\{\xi \leq r\} = \frac{1}{2}(\text{Pos}\{\xi \leq r\} + \text{Nec}\{\xi \leq r\})$$

1.3 随机模糊变量

随机模糊变量是取值为随机变量的模糊变量, 它是从可能性空间到随机变量集构成的集合的可测函数^[5]。设 ξ 是从可能性空间 $(\Theta, P(\Theta), \text{Pos})$ 到随机变量集合的函数, 则称 ξ 为一个随机模糊变量。

根据文献[6]对模糊随机变量的定义, 本文假设随机变量的概率分布类型是已知的, 随机概率分布的参数都是未知的, 在这种情况下, 假设某类型数控机床某部位的寿命 ξ 服从指数分布, 其概率密度函数为

$$\phi(x) = \begin{cases} \frac{1}{\theta} \exp\left(-\frac{x}{\theta}\right) & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases}$$

θ 是未知的参数。只要获得一定数量的样本数据, 就可以用统计学的方法对参数 θ 进行估计, 并且能够给出对应的值或置信区间。但有时由于缺乏这样的统计信息, 不能给出参数 θ 的真实值。若 θ 的值可以描述为一个模糊变量, 则寿命 ξ 为一个随机模糊变量。

1.4 本原机会和平均机会测度

由于随机模糊事件具有双重不确定性, 随机模糊事件的机会可以定义为一个函数而非一个实数。假设 ξ 是定义在可能性空间 $(\Theta, P(\Theta), \text{Pos})$ 上的随机模糊向量, 并且 $f: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^m$ 是可测函数, 则可以将随机事件 $\{f(\xi) \leq 0\}$ 的本原机会定义为从区间

$(0, 1]$ 到区间 $[0, 1]$ 的一个函数, 即

$$\text{Ch}\{f(\xi) \leq 0\}(\alpha) =$$

$$\sup \{\beta \mid \text{Cr}\{\theta \in \Theta \mid \text{Pr}\{f(\xi(\theta)) \leq 0\} \geq \beta\} \geq \alpha\}$$

α, β 为给定的置信水平。

通常情况下为了比较和排序, 需要随机模糊事件的机会是一个纯量值, 因此定义了本原机会的测度, 假设 ξ 是定义在可能性空间 $(\Theta, P(\Theta), \text{Pos})$ 上的随机模糊向量, 并且 $f: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^m$ 是可测函数, 则称 $\text{Ch}^a\{f(\xi) \leq 0\} = \int_0^1 \text{Ch}\{f(\xi) \leq 0\}(\alpha) d\alpha$ 为随机模糊事件 $\{f(\xi) \leq 0\}$ 的平均机会, Ch^a 表示平均机会测度^[6]。

2 加工中心故障模式发生机会模型

假设在某种故障模式单独作用下, 加工中心的故障间隔时间为 $t_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 寿命分布函数为 $g_i (i = 1, 2, \dots, n)$, n 为故障模式的数目, 加工中心的寿命分布函数为 $G = G(t)$ 。

定义: 若某一故障模式单独作用于加工中心的故障间隔时间和加工中心实际故障间隔时间都是随机模糊变量, 则 $A = \{g(x) < G(x)\}$ 是随机模糊事件, 称该随机模糊事件的机会测度 $\text{Ch}\{g(x) < G(x)\}(\alpha)$ 为置信水平 α 下的加工中心故障模式的发生机会^[7]。依据该定义, 可以计算出在动态情况下各种故障模式发生的机会测度, 进而确定发生机会最大的故障模式。

在处理随机模糊系统时, 试图设计解析的算法是不大现实的, 本文使用随机模糊模拟技术。假设 ξ 是定义在可能性空间 $(\Theta, P(\Theta), \text{Pos})$ 上的 n 维随机模糊向量, $f: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^m$ 为可测函数。对于任意给定的置信水平 α , 设计一种随机模糊模拟来计算 α 机会 $L = \text{Ch}\{f(\xi) \leq 0\}(\alpha)$ ^[4]。等价地, 就是要求出上确界 $\bar{\beta}$ 满足 $\text{Cr}\{\theta \in \Theta \mid \text{Pr}\{\xi(\theta) \in B\} \geq \bar{\beta}\} \geq \alpha$, 分别从 Θ 中均匀产生 θ_k 使得 $\text{Pos}\{\theta_k\} \geq \varepsilon$, 并记 $V_k = \text{Pos}\{\theta_k\} (k = 1, 2, \dots, n)$, ε 是一个充分小的正数。对于每个 θ_k , 通过随机模拟能够估计概率 $g(\theta_k) = \text{Pr}\{f(\xi(\theta_k)) \leq 0\}$ ^[4]。对于任意实数 r , 令

$$L(r) = \frac{1}{2} \left(\max_{1 \leq k \leq N} \{v_k \mid f(\theta_k) \leq r\} + \min_{1 \leq k \leq N} \{1 - v_k \mid f(\theta_k) > r\} \right)$$

由 $L(r)$ 的单调性, 可以通过二分法找到满足 $L(r) \geq \alpha$ 的最大的 r 值, 这个值就是 L 的估计值。

当只有一种故障模式单独作用于加工中心时, 加工中心寿命分布 F 与 f_i 都服从威布尔分布, 即 $f_i \sim W(m, \eta, \gamma), F \sim W(m, \eta, \gamma)$, 由于参数未知并且现场数据不足, 专家只能计算出或者由历史信息估

计出参数的大致范围,即在某个区间或者某个具体值的附近。当得到这个具体值时再将其模糊化,用 $\tilde{\eta}_1, \tilde{\gamma}_1, \tilde{m}_2, \tilde{\eta}_2, \tilde{\gamma}_2$ 来表示模糊参数,按照下面的步骤进行计算,便可求出每种故障模式的发生机会。

(1)分别由模糊向量 $\tilde{\eta}_1, \tilde{\gamma}_1, \tilde{m}_2, \tilde{\eta}_2, \tilde{\gamma}_2$ 的 ε 水平集中均匀地产生大小为 N 的向量 $\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1, \mathbf{z}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{y}_2, \mathbf{z}_2$;其中 $\mathbf{x}_1 = (x_{11}, x_{12}, \cdots, x_{1n}), \mathbf{y}_1 = (y_{11}, y_{12}, \cdots, y_{1n}), \mathbf{z}_1 = (z_{11}, z_{12}, \cdots, z_{1n}), \mathbf{x}_2 = (x_{21}, x_{22}, \cdots, x_{2n}), \mathbf{y}_2 = (y_{21}, y_{22}, \cdots, y_{2n}), \mathbf{z}_2 = (z_{21}, z_{22}, \cdots, z_{2n})$,记

$$ww(i) = \mu_{\tilde{\eta}_1}(x_{1i}) \wedge \mu_{\tilde{\gamma}_1}(y_{1i}) \wedge \mu_{\tilde{\gamma}_2}(z_{1i}) \wedge \mu_{\tilde{\eta}_2}(x_{2i}) \wedge \mu_{\tilde{\gamma}_2}(y_{2i}) \wedge \mu_{\tilde{\gamma}_2}(z_{2i}) \quad (i=1, 2, \cdots, n)$$

其中 ε 是充分小的正数。

(2)对每一组 $ww(i) = (x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}, x_{2i}, y_{2i}, z_{2i})$ 分别产生服从威布尔分布 $f \sim W(x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}), F \sim W(x_{2i}, y_{2i}, z_{2i})$ 的随机样本 $f(i) = (f_{i1}, f_{i2}, \cdots, f_{im}), F(i) = (F_{i1}, F_{i2}, \cdots, F_{im}) \quad (i=1, 2, \cdots, n)$,其中 m 为产生随机样本的个数。

(3)对每一组 $f(i), F(i), M_i$ 表示为 $f_{ij} < F_{ij}$ 的个数 $(j=1, 2, \cdots, m)$;令 $P(i) = M_i/m \quad (i=1, 2, \cdots, n)$ 。

(4)对 $ww(k), P_k$ 重新排序,使得 $P_1 \leq P_2 \leq \cdots \leq P_n$ 。

(5)计算

$$u(k) = \frac{1}{2} \left[\max_{k \leq j \leq N} ww(j) - \max_{k+1 \leq j \leq N+1} ww(j) \right] + \frac{1}{2} \left[\max_{1 \leq j \leq k} ww(j) - \max_{0 \leq j \leq k-1} ww(j) \right]$$

其中 $ww(0) = ww(n+1) = 0$

(6)计算 $\sum_{k=1}^N P_k u(k)$,即为所求。

3 计算过程与结果分析

3.1 计算过程

加工中心故障间隔时间服从多种分布类型,如:指数分布、威布尔分布或正态分布等。当只考虑一种故障模式作用于加工中心时,该故障模式的分布函数也服从于上述几种分布模型,本文选用两参数威布尔分布模型。依据 20 台某型号加工中心的现场故障数据,选出现频率大于等于 4 的典型故障模式进行数据整理,并对这些选中的故障模式进行参数估计。这些主要的故障模式有:0102 元器件损坏、0202 锁紧部件松动、0301 液气油渗漏、0407 刀库失调、0504 转位和移位超程、0603 发出异响、0802 不能正常操作。以 0102 元器件损坏为例,在完成对该故障模式的数据整理后,首先对故障间隔时间绘制 WPP 图,经检验该批数据服从威布尔分布,通过对该模型进行参数估计,得到参数的估计值并画出

所得到的函数拟合图,如图 1 所示。根据威布尔概率纸的性质,由图 2 可以判断出该批数据符合威布尔分布模型,所估计的参数可以通过 K-S 检验,所估计的参数为 $\eta = 819.04, m = 1.4745$,所对应的概率分布函数为 $F(x) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{x}{819.04} \right)^{1.4745} \right)$ 。

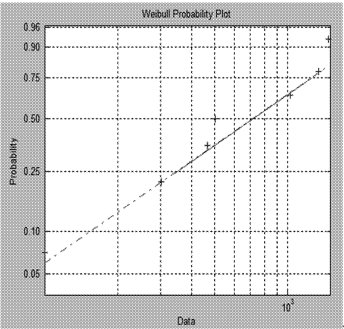


图 1 故障模式 0102 WPP 图
Fig.1 WPP figure of failure mode 0102

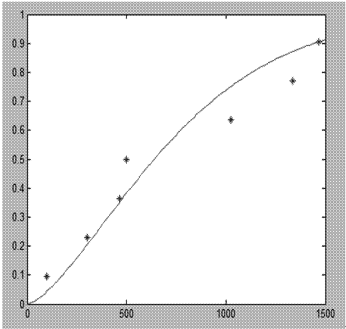


图 2 故障模式 0102 分布拟合图
Fig.2 Distribution fitting figure of failure mode 0102

运用同样的步骤可以估计出其他 6 个典型故障模式的参数,这些参数都通过了 K-S 检验,参数如表 1 所示。

表 1 典型故障模式的威布尔参数		
Tab.1 Weibull-parameters of typical failure modes		
故障模式	η	m
0102	819.04	1.4745
0202	1238.75	0.9737
0301	2225.08	1.6150
0407	935.61	0.9772
0504	782.43	0.7453
0603	1189.65	1.6737
0802	1435.53	0.9906

在假设不充分的条件下,三角形或梯形模糊数适合于对故障数据中存在的模糊性和主观性进行描述,且易于处理。本文选用三角形模糊变量表征威布尔模型中的参数,如表 2 所示。

根据平均机会的计算步骤,采用 Matlab 6.0 编

表 2 典型故障模式参数的三角形模糊数

Tab.2 Triangular fuzzy number of typical failure modes

故障模式	尺度参数 (r_1, r_2, r_3)	形状参数 (r_1, r_2, r_3)
0102	482.81,819.04,1389.39	0.8017,1.4745,2.7117
0202	518.45,1238.75,2959.76	0.5224,0.9737,1.8148
0301	1417.04,2225.08,3493.90	0.9042,1.615,2.8844
0407	583.87,935.61,1499.23	0.6838,0.9772,1.3964
0504	251.27,782.43,2436.44	0.3992,0.7453,1.3915
0603	747.21,1189.65,1894.09	0.8978,1.6737,3.1202
0802	745.31,1435.53,2764.99	0.5871,0.9906,1.6715

写模拟程序,对加工中心的故障模式发生机会进行模拟,得到的排序结果见表 3。通过模拟方法计算出的结果和用统计方法计算出的故障发生频率对比结果见表 4。

表 3 典型故障模式发生机会计算结果

Tab.3 Occurrence chances results of typical failure modes

故障模式	$f_i > F$	故障频率
0102	0.3796	0.066038
0202	0.2496	0.056604
0301	0.1544	0.075472
0407	0.3048	0.188679
0504	0.3577	0.056604
0603	0.2837	0.066038
0802	0.2196	0.103774

表 4 典型故障模式的发生频率和平均机会测度排序结果

Tab.4 Occurrence frequencies and chances of typical failure modes

序号	典型故障模式 (按发生频率排序)	典型故障模式 (按平均机会排序)
1	0407	0102
2	0802	0504
3	0301	0407
4	0102	0603
5	0603	0202
6	0202	0802
7	0504	0301

3.2 结果分析

根据表 4 可以得到以下结论:

(1)对每种故障模式进行随机模糊综合分析后,其发生机会排序和按照频率的排序并不一致,有些发生机会比较大的故障模式其发生频率并不高,说明只是单纯的按照发生故障频率的多少来决定每种故障模式的发生机会是不准确的。

(2)此型号加工中心故障模式发生最频繁的是 0407 刀库失调,而平均机会最大的故障模式是 0102 元器件损坏,这一结果更符合客观事实。在对其它机电类产品或其它类型的数控机床进行故障模式分析可以得到相似的结论^[8]。对此,企业应按照质量管理体系中的内容对供货商进行规范化管理,及时发现不符合要求的元器件供应厂家,并且及时纠正,制定相应的改进措施。

(3)故障模式 0407 刀库失调,其发生频率是最高的,其故障模式发生机会也比较高,故对此故障模式应该引起足够的重视。刀库、机械手的机械结构较复杂,常常是机、电、液、气相结合,机构越复杂,发生故障的隐患也越高,故其对加工中心可靠性的影响也比较大。刀库和机械手的定位精度要求较高,刀具不到位、不回零的现象占很大比例,必须提高控制与重复定位的精度。刀库和机械手动作以后,要将动作之后的信号反馈给数控系统,经由数控系统确定之后,再次把信号传递给机械部件进行调整。所以为进一步避免此种故障模式的发生,应该选用具有较高可靠性的元器件,并且对刀库及机械手进行早期故障试验,力求避免各零部件之间配合出现的故障问题。

4 结束语

综合考虑故障发生的随机性和模糊性,提出了基于随机模糊理论的故障分析方法,该方法能够判断出哪种故障模式发生的可能性最大,得出典型故障模式发生机会的排序,为可靠性设计提供理论依据,这将有利于减少故障的发生机会,提高加工中心整机的可靠性水平。

参 考 文 献

1 刘宝碇,彭锦. 不确定理论教程[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

2 彭锦,饶从军. 基于可信性理论的模糊风险分析:理论、方法及应用[C]//第五届中国不确定系统年会论文集,武汉,2007.
Peng Jin, Rao Congjun. Fuzzy risk analysis based on credibility theory: theory, approach and applications [C]//The Fifth China Annual Conference Papers on Uncertainty, Wu Han,2007. (in Chinese)

3 Inés Cousoa, Luciano Sánchezb. Higher order models for fuzzy random variables[J]. Fuzzy Set and Systems,2008,159(3): 237 ~ 258.

- 3 Recht R F. A dynamic analysis of high-speed machining [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1985, 107(4): 309 ~ 315.
 - 4 Turley D M, Doyle E D. Calculation of shear strains in chip formation of titanium [J]. Materials Science and Engineering, 1982, 55(1): 45 ~ 48.
 - 5 He N, Lee T C, Lau W S. Assessment of deformation of shear localized chip in high speed machining [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1 ~ 3): 101 ~ 104.
 - 6 Duan C Z, Wang M J, Pang J Z. A calculational model of shear strain and strain rate within shear band in a serrated chip formed during high speed machining [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 178(1 ~ 3): 274 ~ 277.
 - 7 Komanduri R, Shroeder T, Hazra J, et al. On the catastrophic shear instability in high-speed machining of an AISI 4340 steel [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1982, 104(2): 121 ~ 131.
 - 8 Davies M A, Burns T J, Evans C J. On the dynamics of chip formation in machining hard metals [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1997, 46(1): 25 ~ 30.
 - 9 Davies M A, Chou Y, Evans C J. On the chip morphology, tool wear and cutting mechanics in finish hard turning [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1996, 45(1): 77 ~ 82.
 - 10 Cotterell M, Byrne G. Dynamics of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti-6Al-4V [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(11): 93 ~ 96.
 - 11 苏国胜, 刘战强, 杜劲, 等. 锯齿形切屑变形表征与其形态演化研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 223 ~ 227.
Su Guosheng, Liu Zhanqiang, Du Jin, et al. Description of serrated chip deformation and its morphology evolution [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 223 ~ 227. (in Chinese)
-

(上接第 219 页)

- 4 刘宝碇, 赵瑞清, 王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 144, 248 ~ 249.
- 5 Liu B. Theory and practice of uncertain programming[M]. Heidelberg: Physica-Verlag, 2002.
- 6 Liu Y K, Liu B. Random fuzzy programming with chance measures defined by fuzzy integrals[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2002, 36(4 ~ 5): 143 ~ 160.
- 7 Ana Colubi. Statistical inference about the means of fuzzy random variables: Applications to the analysis of fuzzy and real-valued data[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2009, 160(3): 344 ~ 356.
- 8 戴怡, 贾亚洲, 申桂香. 立式加工中心的故障分析与改进措施[J]. 中国机械工程, 2001, 12(11): 1 209 ~ 1 211.
Dai Yi, Jia Yazhou, Shen Guixiang. Failure analysis and reliability improvement for vertical machining center[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(11): 1 209 ~ 1 211. (in Chinese)