

基于模糊理论的数控车床故障分析

张英芝¹ 申桂香¹ 吴 甦² 郑 锐¹ 何 宇¹

1. 吉林大学, 长春, 130025 2. 清华大学, 北京, 100084

摘要:根据收集的 17 台某型数控车床可靠性数据, 首先采用统计分析方法从整体上确定出各种故障部位与模式的比例, 然后针对危害度值排序法中故障影响概率不确定的问题, 将模糊数学中的模糊语言变量和模糊综合评价方法引入到危害度分析中, 进而找出对数控车床可靠性影响较大的故障模式与薄弱环节。

关键词:数控车床; 故障影响概率; 模糊变量; 模糊评价

中图分类号: TG659; TB114.3 **文章编号:** 1004—132X(2009)19—2354—04

Failure Analysis of NC Lathe Based on Fuzzy-set Theory

Zhang Yingzhi¹ Shen Guixiang¹ Wu Su² Zheng Rui¹ He Yu¹

1. Jilin University, Changchun, 130025 2. Tsinghua University, Beijing, 100084

Abstract: According to the data collected from 17 NC machine tools of one certain type, the statistical method was firstly used to carry out the rate between the failure positions and the failure modes. To solve the uncertain problem of the failure effect probability when sorting the criticality values, fuzzy linguistic variables and fuzzy comprehensive evaluation were introduced to the criticality analysis. Then the weakness and the failure modes can be identified, which has greater effect on the reliability of NC machine tools.

Key words: NC lathe; failure effect probability; fuzzy variable; fuzzy assessment

0 引言

故障模式、故障影响及危害度分析(failure mode effect and criticality analysis, FMECA)又称故障效应分析, 是通过分析系统与组成系统的各零部件之间的可靠性功能关系, 找出导致系统失效的原因, 有针对性地加强和改进造成系统失效的薄弱环节, 从而提高系统可靠性和使用寿命的一种故障分

析方法^[1]。

在近些年的数控车床可靠性研究中, 虽然也有采用 FMECA 方法的, 但由于数控车床是机电一体化产品, 其故障模式复杂多样, 故障原因、故障现象与故障机理之间存在着随机性和模糊性等十分复杂的不确定性关系, 致使在评估数控车床的故障影响即估算其危害度时, 存在很大的模糊性, 用常规的分析方法很难给出有效而准确的点估计值。因此, 本文引入模糊数学方法, 利用模糊集合论中的模糊语言变量和模糊综合评判方法来对故障危害度进行模糊分析, 以提高分析的准确性^[2-6]。

收稿日期: 2008—11—21

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2007AA04Z402); 国家自然科学基金资助项目(50875110)

[12] 胡玉杰, 李善平, 郭鸣. 基于本体的产品知识表达[J]. 计算机辅助设计图形学报, 2003, 15(12): 1531-1537.

[13] 谢永春, 朱才朝, 张晶. 旋转机械故障诊断 KBE 系统中的知识表达技术[J]. 中国机械工程, 2004, 15(14): 1262-1265.

[14] Chandrasekaran B. Functional Representation: a Brief Historical Perspective[J]. Applied Artificial Intelligence, 1994, 8(2): 173-197.

[15] Iwasaki Y, Vescovi M, Fikes R, et al. Casual Functional Representation Language with Behavior-based Semantics[J]. Applied Artificial Intelligence, 1995, 9(1): 5-31.

[16] Bogoni L. More Than Just Shape: a Representa-

tion for Functionality[J]. Artificial Intelligence in Engineering, 1998, 12(4): 337-354.

[17] 陈永亮, 徐燕申, 齐尔麦. 机械产品快速设计平台的研究与开发[J]. 天津大学学报, 2002, 35(6): 744-748.

(编辑 王艳丽)

作者简介:李桂东, 男, 1982 年生。南京航空航天大学机电学院博士研究生。研究方向为 CAD/CAM、工装快速设计。发表论文 5 篇。周来水, 男, 1962 年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。安鲁陵, 男, 1962 年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。谭昌柏, 男, 1978 年生。南京航空航天大学机电学院讲师、博士。

1 数控车床故障统计分析

1.1 故障部位统计分析

17 台某系列数控车床故障部位分布如表 1 所示。从表 1 中可以看出,该系列数控车床故障多发部位主要是数控系统(24%)、电气系统(16%)、液压系统(14%)、刀架系统(14%)、X 轴进给系统(10%)和装卡附件(9%)。这 6 个部位发生的故障占数控车床故障的 86%。而防护系统、润滑系统、主轴系统等部位的故障较少。

表 1 数控车床故障部位频次表

代码	故障部位	频次	频率
NC	数控系统	14	0.24
V	电气系统	9	0.16
D	液压系统	8	0.14
M	刀架系统	8	0.14
X	X 轴进给系统	6	0.10
J	装卡附件	5	0.09
Q	防护系统	2	0.03
L	润滑系统	2	0.03
S	主轴系统	2	0.03
Z	Z 轴进给系统	1	0.02
R	其他	1	0.02

1.2 故障模式统计分析

17 台某系列数控车床故障模式分布如表 2 所示。

表 2 数控车床故障模式频次表

代码	故障部位	频次	频率
802	不能正常操作	12	0.21
301	液、气、油渗漏	9	0.16
501	运动部件无动作	7	0.12
701	几何精度超标	7	0.12
201	紧固件松动	5	0.09
504	转位、移位超程	4	0.07
103	液、气、油系统的元部件损坏	3	0.05
702	定位精度超标	3	0.05
102	元器件损坏	2	0.04
803	润滑不良	2	0.04
404	压力调整不当	1	0.02
405	行程不当	1	0.02
509	电机不能启动	1	0.02

从表 2 中可以看出,该系列数控车床最频繁的故障模式是不能正常操作(21%)。以下依次是液、气、油渗漏(16%),运动部件无动作(12%),几何精度超标(12%),紧固件松动(9%),转位、移位超程(7%),液、气、油系统的元部件损坏(5%),定位精度超标(5%)等。其中其他型故障,即不能正常操作与润滑不良达到 25%;功能型故障,即运动部件无动作、移位超程与电机不能启动为 21%;工艺型故障,即几何精度和定位精度超标为

17%;渗漏型故障,即液渗漏、气渗漏、油渗漏为 16%。

2 数控车床危害度分析

根据分析对象、分析需要以及分析可利用的数据的不同,危害度分析方法主要有危害度网格图法、危害度综合评分法和危害度值排序法三种。但由于数控车床的系统很复杂,故障模式多种多样,故障机理难以确定,所以本文采用危害度值排序法对其进行危害度分析。

危害度值排序法是利用零部件的故障率 λ 、故障模式频率比 α 、故障影响概率 γ 来计算其每一故障模式的危害度的。第 m 个零件第 j 种故障模式的危害度 C_{mj} 可表示为

$$C_{mj} = \alpha_j \gamma_j \lambda_m$$

零部件危害度 C_m 是其各故障模式危害度 C_{mj} 的总和,即

$$C_m = \sum_{j=1}^n C_{mj} = \sum_{j=1}^n \alpha_j \gamma_j \lambda_m$$

通过比较各零部件危害度值 C_m 的大小,来评定其危害度等级。但在计算中故障影响概率不是一个确定的值,因此,本文将模糊数学中的模糊语言变量和模糊综合评价方法引入到危害度分析中,使评分过程更符合客观实际和思维习惯。

2.1 危害度模糊分析的原理

数控车床危害度模糊分析的方法为:以数控车床各故障部位作为评判对象,将零部件的故障率 λ 、故障模式频率比 α 、故障影响概率 γ 作为评判因素对评判对象作出评价,得到评判矩阵;对每一因素,定义一个权重系数,表示该因素在模糊决策中的重要程度和贡献大小;最后,对各备择对象作出综合评判。

2.2 危害度模糊评判模型

采用危害度值排序法进行危害度分析时,由于故障影响概率是分析人员根据经验判断得到的,在一定区间内取值,这本身就具有不确定性。因此,本文首先把经典集合的绝对隶属关系扩展为各种不同的隶属度;考虑隶属度变化的幅度以及升降,同时用五个模糊语言变量“很低”、“低”、“中等”、“高”、“很高”来表示故障影响程度。

其次,建立评判对象的因素集和评判集。因素集 $U = \{u_1, u_2, u_3\}$ 。其中, u_1 为零部件平均故障率; u_2 为故障模式频率比; u_3 为故障影响概率。

建立评判集,每个因素的评判集含有五个等级,分别用五级语言变量表示,这五个语言变量构成一个评判集 $V, V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$,其中, v_1

为“很低”; v_2 为“低”; v_3 为“中等”; v_4 为“高”; v_5 为“很高”。评分采用 10 分制,五个等级的分值和相应的隶属函数见图 1。

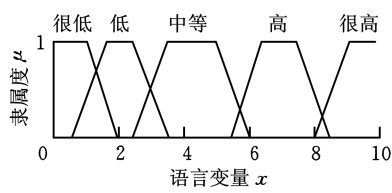


图 1 评判集的隶属函数

三个因素中前两个因素的评分按频率值推算,即将各频率值进行归一化,再乘以 10 即为其评分值。具体分析故障影响时,由于各部门对故障的评分标准不同,因此不能得到具体、确定的值,为较准确描述评分过程中的模糊性,使评分过程符合客观实际和思维过程,本文将故障影响的评分值按区间给出,如表 3 所示。

表 3 故障影响的评分区间

故障影响程度	分值
灾难性 I	7 ~ 10
致命性 II	4 ~ 6
临界性 III	1 ~ 3
轻微 IV	0 ~ 1

表 3 给出的分值区间,实际上也是一个模糊集合。为简化计算过程,本文选用三角形分布,即中间值的隶属函数值等于 1,其他值依次由中间值向两侧减弱。如评定分值为 7 ~ 10,其隶属函数表达式为

$$\mu_{7\sim 10}(x)=\begin{cases}\frac{2}{3}(x-7) & 7\leq x\leq 8.5 \\ \frac{2}{3}(10-x) & 8.5<x\leq 10\end{cases}$$

第三,建立单因素评判矩阵。对于有 k 个评分值的单因素 u_i ,先分别求出对于每个评分值的评判向量(该评判向量由 5 个隶属度组成),然后由这 k 个向量确定因素的评价向量 $r_i=(r_{i1},r_{i2},r_{i3},r_{i4},r_{i5})$ 。

对于前两个因素,可将各频率值进行归一化,再乘以 10 来得到其评分值,然后再结合图 1,即可得到该因素的评价向量。

对于故障影响的评价向量的求解,就是求出模糊集与语言变量的交点,也就是模糊集与语言变量的模糊关系,其具体过程如下:

设故障影响为灾难性,评分值为 7 ~ 10,计算该评分值模糊集 B_1 与各语言变量 $v_1、v_2、v_3、v_4、v_5$ 的贴近程度 N_1 ,如图 2 所示。

$$N(v_1,B_1)=0;N(v_2,B_1)=0;N(v_3,B_1)=$$

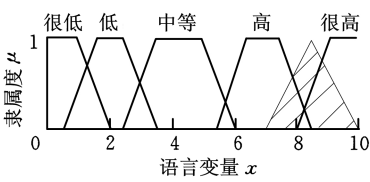


图 2 故障影响模糊语言变量等级分布及评分值

0; $v_4、v_5$ 分别与 B_1 相交,则得出:

$$N(v_4,B_1)=0.6 \quad N(v_5,B_1)=0.8$$

所以, $N_1=(0,0,0,0.6,0.8)$ 。

同样方法可得故障影响程度为致命性、临界性和轻微三种不同情况时的评价向量分别为 $N_2=(0,0,1,0.25,0)$, $N_3=(0.25,1,0.25,0,0)$, $N_4=(1,0.33,0,0,0)$ 。

按照上述方法得到三个因素的评价向量后,即可由三个评价向量组成模糊关系评价矩阵 R (即单因素评判矩阵):

$$R=\begin{bmatrix}r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35}\end{bmatrix}$$

第四,综合评判。由于平均故障率、故障模式频率比和故障影响三个因素对危害度分析的贡献不同,因此要对每个因素赋予不同的权重。根据使用部门、设计部门共同评定,选定平均故障率权重为 0.3、故障模式概率权重为 0.2、故障影响程度权重为 0.5。即权重集向量为

$$A=(a_1,a_2,a_3)=(0.3,0.2,0.5)$$

在 R 与 A 求出后,由模糊变换运算可得到综合评判矩阵 C :

$$C=A\cdot R=(a_1,a_2,a_3)\cdot\begin{bmatrix}r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35}\end{bmatrix}=[c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4 \quad c_5]$$

为避免运算时失掉很多信息,本文引进广义模糊算子 $Einstein(\dot{\epsilon},\dot{\epsilon})^{[6]}$,计算评判矩阵 C :

$$c_j=(a_1\dot{\epsilon}r_{1j})^+(a_2\dot{\epsilon}r_{2j})^+(a_3\dot{\epsilon}r_{3j}) \\ j=1,2,3,4,5$$

$$a_i\dot{\epsilon}r_{ij}=\frac{a_ir_{ij}}{1+(1-r_{ij})(1-a_i)}$$

$$a_i^+\dot{\epsilon}r_{ij}=\frac{a_i+r_{ij}}{1+a_ir_{ij}}$$

$$i=1,2,3$$

得到综合评判矩阵 C 后,进行归一化处理,根据最大隶属原则,得出决策。

按照上述办法,对某系列 17 台数控机床进行危害度模糊分析,结果见表 4、表 5。本文只列出了刀架系统危害度分析和刀架系统危害度模糊分析结果。

表 4 数控车床刀架系统危害度分析

序号	一级故障	故障模式	故障后果	危害度
1	螺钉	刀架编码器 固定螺钉松动	选不到刀	Ⅱ
2	调速阀	将调速阀 调整过小	刀架锁不紧	Ⅱ
3	空气开关	空气开关额定 电流过小	刀架不能转动	Ⅱ
4	电磁阀	液压油过脏 使电磁阀卡住	刀架不能转动	Ⅱ
5	紧固螺钉	刀盘紧固 螺钉松动	刀盘定位不准	Ⅲ
6	编码器	刀架编码器 失灵	自动操作方式 系统不能选刀	Ⅱ
7	开关	刀架内无触点 开关松动	自动操作方式选刀后 系统停止执行程序	Ⅲ
8	接近开关	刀架内接近 开关位置窜动	刀架不能转动	Ⅱ

表 5 数控车床刀架系统危害度模糊分析

序号	$u_1(10^{-5})$	u_2	u_3	C_i
1	2.74	0.125	Ⅱ	[0.026 0.387 0.419 0.168 0]
2	2.74	0.125	Ⅱ	[0.026 0.387 0.419 0.168 0]
3	2.74	0.125	Ⅱ	[0.026 0.387 0.419 0.168 0]
4	2.74	0.125	Ⅱ	[0.026 0.387 0.419 0.168 0]
5	2.74	0.125	Ⅲ	[0.246 0.401 0.353 0 0]
6	2.74	0.125	Ⅱ	[0.026 0.387 0.419 0.168 0]
7	2.74	0.125	Ⅲ	[0.246 0.401 0.353 0 0]
8	2.74	0.125	Ⅱ	[0.026 0.387 0.419 0.168 0]

在第 1 种故障模式下, $C_1 = [0.026 \ 0.387 \ 0.419 \ 0.168 \ 0]$, 由最大隶属原则, 得出决策值为 0.419, 即第一种故障模式对刀架系统的致命性影响为“中等”。以此类推, 可以得到刀架系统第 2、第 3、第 4、第 6、第 8 六种故障模式对刀架系统的致命性影响均为“中等”; 第 5、第 7 两种故障模式对刀架系统的致命性影响均为“低”。

由表 5 可以得到刀架系统对数控车床产生的致命性影响矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.081 & 0.3906 & 0.4024 & 0.126 & 0 \end{bmatrix}$$
$$c_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_{ij}$$
$$j = 1, 2, 3, 4, 5$$

式中, n 为刀架系统故障模式总数; c_{ij} 为第 i 种故障模式综合评判矩阵中第 j 列数值。

由最大隶属原则, 得出刀架系统对数控车床的致命性影响为“中等”。同理可以求出其余各故障部位对数控车床的致命性影响, 其中关键故障部位是刀架系统、主轴和防护系统。

3 结论

(1) 数控车床故障多发部位是数控系统、电气系统、液压系统和刀架系统。最常见的故障模式是不能正常操作、液气油渗漏、运动部件无动作和几何精度超标。其中机床不能正常操作主要是由于刀具编码器位置变动及编码器失灵导致系统不能正确选刀, X 轴走线防护托板转角过小导致 X 轴伺服电机电缆线及液压油管在托板内严重磨损, NC 下电按钮底座脱落导致 NC 不能断电, 用户所用液压油过脏致使电磁阀卡住, 进而刀架不能正确选刀等问题造成的。

(2) 该系列数控车床的关键故障部位是刀架、主轴和防护系统; 不能正常操作与润滑不良这种其他型故障模式是对机床可靠性影响最大的故障模式。因为刀架系统既是故障多发部位又是关键故障部位, 所以必须对其进行可靠性改进设计, 同时应给其分配较高的可靠度。

参考文献:

[1] 黄华梁, 赵小莲, 李小周. 甘蔗压榨机系统可靠性的失效模式影响模糊评估分析[J]. 中国机械工程, 2002, 13(19): 1669-1672.

[2] 鞠鲁粤. 矩阵 FMECA 技术在维修性分析中的应用[J]. 起重冶金电机, 1992, 10(3): 17-22.

[3] 鞠鲁粤. 模糊致命度分析及其在矩阵 FMECA 中的应用[J]. 上海大学学报, 1999(5): 463-466.

[4] 鞠鲁粤, 李泉生. 用矩阵方法实施故障模式、影响及致命度分析[J]. 上海工业大学学报, 1993, 14(1): 44-49.

[5] 康锐, 郑涛. 危害性分析中的模糊数学方法[J]. 北京航空航天大学学报, 1995, 21(4): 60-65.

[6] 桑怀胜, 郁文贤. 模糊数学在故障树分析中的应用[J]. 质量与可靠性, 2002(2): 26-29.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 张英芝, 女, 1970 年生。吉林大学机械科学与工程学院副教授。研究方向为数控装备可靠性分析技术。发表论文 20 余篇。申桂香, 女, 1957 年生。吉林大学机械科学与工程学院教授、博士研究生导师。吴 甦, 男, 1963 年生。清华大学工业工程系教授。郑 锐, 男, 1985 年生。吉林大学机械科学与工程学院硕士研究生。何 争, 女, 1986 年生。吉林大学机械科学与工程学院硕士研究生。