

# 基于模糊逻辑的数控机床故障分析

薛玉霞, 申桂香, 张英芝

(吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022)

**摘要:**针对数控机床故障发生的实际特点,提出将模糊故障树分析与模糊危害度分析相结合的故障分析方法。以某型号数控机床为例,对根据其现场故障数据建立的模糊故障树进行了定量分析,确定了顶事件及各次级事件的模糊故障率,并在此基础上进行了模糊危害度分析,确定了关键元件和薄弱环节,为可靠性改进提供了理论依据。

**关键词:**数控机床;故障分析;模糊逻辑;模糊故障树;模糊故障率;模糊危害度

**中图分类号:**TG659;TB114.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)Sup.-0115-04

## Fault analysis for numerical control machine tools based on fuzzy logic

Xue Yu-xia, Shen Gui-xiang, Zhang Ying-zhi

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A fault analysis method by combination of the fuzzy fault tree analysis and the fuzzy criticality analysis was proposed to consider the actual fault characteristics of the numerical control (NC) machine tools. Taking a certain type of NC machine tool as an example a quantitative analysis of the fault tree built on the basis of the on-site fault data was done to determine the fuzzy fault rate of the top fault event and the secondary fault events. Based on this analysis, the fuzzy criticality analysis was performed to find out the key components and the weak links, providing a theoretical basis for the reliability improvement of the NC machine tools.

**Key words:** NC machine tool; fault analysis; fuzzy logic; fuzzy fault tree; fuzzy fault rate; fuzzy criticality

数控机床的故障分析是数控机床可靠性研究的重要内容<sup>[1,2]</sup>。以往的研究多数都是假设机床完好,或者故障。然而在实际使用中,许多故障是由于损伤累积导致性能下降引起的,系统从完好到故障由一系列的中介状态构成,这种中介过渡状态既不是完全完好,也不是完全故障,而是呈现出“亦此亦彼”的模糊性<sup>[3]</sup>,即遵循一种模糊逻辑<sup>[4,5]</sup>。文献[6]采用三角模糊数进行了模糊故障树分析,给出了机床主轴部件故障的概率区间。

本文提出将模糊故障树与模糊危害度分析相结合的故障分析方法,解决了以往研究中子系统(部件)故障率难以确定的问题。

## 1 模糊故障树分析

### 1.1 故障树各级事件的选择

根据现场实际故障的特点和可靠性改进设计的需要,选取数控机床现场故障(M01)作为整体故障树的顶事件。次级事件按其故障部位依次选

收稿日期:2007-02-13.

基金项目:“863”国家高技术研究发展计划项目(2004AA424512);吉林省科技发展计划项目(20050535).

作者简介:薛玉霞(1973-),女,博士研究生.研究方向:数控机床可信性技术. E-mail:lance99@126.com

通讯联系人:申桂香(1957-),女,教授,博士生导师.研究方向:面向生命周期的数控装备可信性技术.

E-mail:shengx@jlu.edu.cn

取为:主轴故障(A01)、进给故障(A02)、刀库故障(A03)、润滑故障(A04)、液压故障(A05)和其他故障(A06)。故障事件代码见表 1。

表 1 故障事件代码表

Table 1 Fault events code table

| 事件代码 | 基本事件        | 事件代码 | 基本事件       |
|------|-------------|------|------------|
| M01  | 数控机床现场故障    | B29  | 接水簸箕尺寸不符漏水 |
| A01  | 主轴故障        | B30  | 软件使用问题     |
| A02  | 进给故障        | B31  | 工作精度超标     |
| A03  | 刀库故障        | C01  | 主轴拉刀碟簧坏    |
| A04  | 润滑故障        | C02  | 主轴电机齿轮坏    |
| A05  | 液压故障        | C03  | 主轴拉杆坏      |
| A06  | 其他故障        | C04  | 装配问题       |
| B01  | 参数设置错误      | C05  | 轴承安装间隙未调整好 |
| B02  | 零部件损坏       | C06  | 液压卡紧不能定位   |
| B03  | 发出异响        | C07  | 主轴与刀库门相撞   |
| B04  | 主轴失调        | C08  | 转位移位超程     |
| B05  | 定向不准        | C09  | 丝杠坏        |
| B06  | 准停感应器故障     | C10  | 电机齿轮坏      |
| B07  | 零部件损坏       | C11  | 皮带轮坏       |
| B08  | 几何精度超标      | C12  | 装配问题       |
| B09  | 发出异响        | C13  | 轴承坏        |
| B10  | 行程开关设置不当    | C14  | 编码器坏       |
| B11  | 元器件损坏       | C15  | 编码器电缆坏     |
| B12  | 液、气、油渗漏     | C16  | 进给伺服放大器坏   |
| B13  | 液、气、油渗漏     | C17  | 定时定量润滑油量太大 |
| B14  | 刀库不转        | C18  | 防护密封不好     |
| B15  | 刀库不定位       | C19  | 结构不合理      |
| B16  | 换刀锐响        | C20  | 刀库渗冷却液     |
| B17  | 换刀时间长       | C21  | 刀库漏油       |
| B18  | 刀库门故障       | C22  | 润滑不良       |
| B19  | 润滑电机坏       | C23  | 电机坏        |
| B20  | 床身底座漏油      | C24  | 马式机构卡死     |
| B21  | 油箱管路漏油      | C25  | 制动器坏       |
| B22  | 压力表损坏       | C26  | 定向器坏       |
| B23  | 液压箱漏油       | C27  | 刀库位置偏斜     |
| B24  | 液压油箱接管漏油    | C28  | 主轴偏斜       |
| B25  | 电气柜散热差、温升过高 | C29  | 气路换向阀反接    |
| B26  | 整体防护网板损坏    | C30  | 换向阀坏       |
| B27  | 密封不好        | C31  | 气路接错       |
| B28  | 水箱喷淋        | C32  | 库门不灵活      |

1.2 建立故障树

图 1 至图 6 为以数控机床现场故障为顶事件的故障树。

1.3 模糊故障树定量分析

使用语言值逻辑{非常低,低,比较低,中等,比较高,高,非常高}({VL, L, FL, M, FH, H, VH})来表示“故障率”的语言评价,并将语言值用模糊数来近似表示,将其论域定义为 $[10^{-6}$ ,

$10^{-1}]$ ,采用对数均匀分度。语言值逻辑{VL, L, FL, M, FH, H, VH}的近似模糊数如图 7 所示。

在数控机床的模糊故障树分析计算中,将各种模糊数归一化为梯形模糊数后进行计算。设故障事件  $i$  的故障率为模糊数  $\tilde{q}_i = (a_i, b_i, c_i, d_i)$ ,

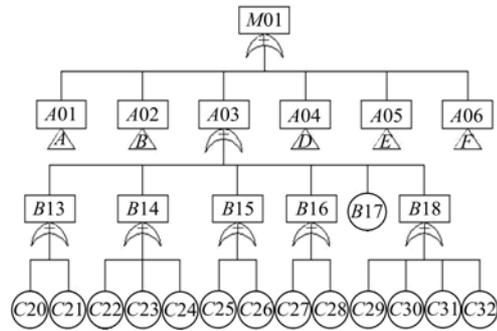


图 1 数控机床故障树

Fig. 1 Fault tree of NC machine tools

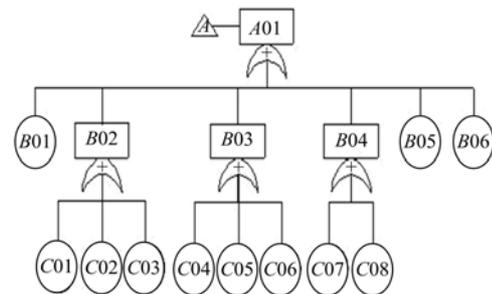


图 2 主轴故障树

Fig. 2 Fault tree of principal axis

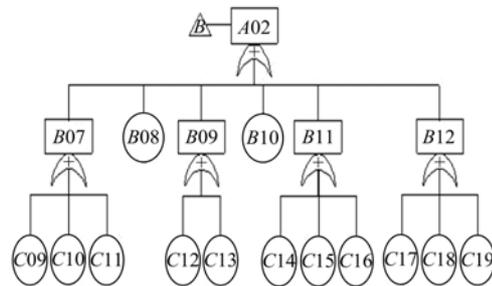


图 3 进给系统故障树

Fig. 3 Fault tree of feeding system

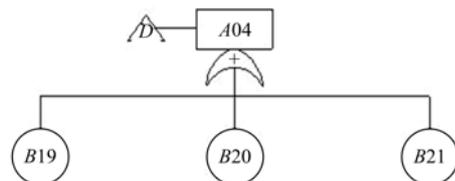


图 4 润滑系统故障树

Fig. 4 Fault tree of lubrication system

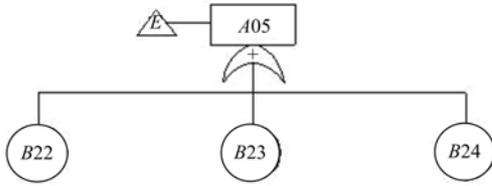


图 5 液压系统故障树

Fig. 5 Fault tree of hydraulic system

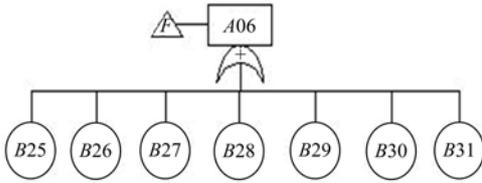


图 6 其他部位故障树

Fig. 6 Fault tree of other components

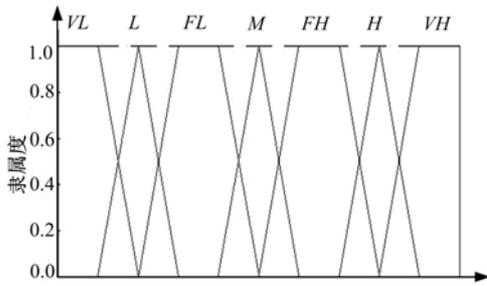


图 7 语言值的近似模糊数

Fig. 7 Approximate fuzzy number of language values

则有如下模糊算子<sup>[5]</sup>成立:

(1)“与”门模糊算子

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_{AND} &= (a_{AND}, b_{AND}, c_{AND}, d_{AND}) = \prod_{i=1}^n \tilde{q}_i = \\ &(\prod_{i=1}^n a_i, \prod_{i=1}^n b_i, \prod_{i=1}^n c_i, \prod_{i=1}^n d_i) \end{aligned} \quad (1)$$

(2)“或”门模糊算子

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_{OR} &= (a_{OR}, b_{OR}, c_{OR}, d_{OR}) = 1 \simeq \prod_{i=1}^n (1 \simeq \tilde{q}_i) = \\ &(\tilde{q}_1 \oplus \tilde{q}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{q}_n = \\ &((1 - \prod_{i=1}^n (1 - a_i)), (1 - \prod_{i=1}^n (1 - b_i)), \\ &(1 - \prod_{i=1}^n (1 - c_i)), (1 - \prod_{i=1}^n (1 - d_i))) \end{aligned} \quad (2)$$

以刀库故障为例说明其计算过程。刀库故障各个基本事件相互独立,当各个事件故障率的概率值均用梯形模糊数表示时,由图 1 可得到如下算式

$$\tilde{q}_{B13} = \tilde{q}_{C20} \oplus \tilde{q}_{C21} \quad (3)$$

$$\tilde{q}_{B14} = \tilde{q}_{C22} \oplus \tilde{q}_{C23} \oplus \tilde{q}_{C24} \quad (4)$$

$$\tilde{q}_{B15} = \tilde{q}_{C25} \oplus \tilde{q}_{C26} \quad (5)$$

$$\tilde{q}_{B16} = \tilde{q}_{C27} \oplus \tilde{q}_{C28} \quad (6)$$

$$\tilde{q}_{B18} = \tilde{q}_{C29} \oplus \tilde{q}_{C30} \oplus \tilde{q}_{C31} \oplus \tilde{q}_{C32} \quad (7)$$

$$\tilde{q}_{A03} = \tilde{q}_{B13} \oplus \tilde{q}_{B14} \oplus \tilde{q}_{B15} \oplus \tilde{q}_{B16} \oplus \tilde{q}_{B17} \oplus \tilde{q}_{B18} \quad (8)$$

对于能通过现场数据、经验数据、可靠性手册等途径获取的基本事件的故障率,可确定其精确概率值;对于不能获取精确值的底事件,由专家进行语言值评价获得基本事件的模糊数。将刀库故障的基本事件代入以上各式,得到刀库故障的模糊故障率。同理计算可得数控机床各次级事件及顶事件的模糊故障率,见表 2 所示。

表 2 各次级事件及顶事件的模糊故障率

Table 2 Fuzzy fault rates of secondary events and top event

| 事件   | 故障率的模糊概率 $\tilde{\lambda}_i$                | 重心                    |
|------|---|-----------------------|
| 进给故障 | $(1.05, 1.13, 1.18, 1.63) \times 10^{-3}$   | $1.3 \times 10^{-3}$  |
| 主轴故障 | $(0.65, 0.73, 0.83, 1.63) \times 10^{-3}$   | $1.0 \times 10^{-3}$  |
| 刀库故障 | $(0.445, 0.575, 0.725, 1.2) \times 10^{-3}$ | $0.76 \times 10^{-3}$ |
| 润滑故障 | $(0.23, 0.28, 0.28, 0.68) \times 10^{-3}$   | $0.4 \times 10^{-3}$  |
| 其他故障 | $(0.17, 0.235, 0.445, 0.53) \times 10^{-3}$ | $0.34 \times 10^{-3}$ |
| 液压故障 | $(0.19, 0.23, 0.23, 0.28) \times 10^{-3}$   | $0.23 \times 10^{-3}$ |
| 顶事件  | $(2.81, 3.22, 3.67, 6.34) \times 10^{-3}$   | $4.01 \times 10^{-3}$ |

从表 2 可知,进给系统、主轴系统和刀库系统的模糊故障率的重心高于其他几个部位,是数控机床的薄弱环节。

## 2 模糊危害度分析

危害度的计算可由计算风险优先数法和计算项目危害数法获得。本文采用计算项目危害数法,基于故障部位的模糊故障率等因素,定量分析系统中的各故障模式对系统的危害程度。

设数控机床的零部件  $i$  发生故障致使该数控机床发生故障的模糊危害度为  $\tilde{C}_i$ ,其计算公式为

$$\tilde{C}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{\alpha}_{ij} \cdot \tilde{\beta}_{ij} \cdot \tilde{\lambda}_i \quad (9)$$

式中: $\tilde{\alpha}_{ij}$ 为零部件  $i$  以故障模式  $j$  引起该零部件发生的故障模式概率,此处采用零部件  $i$  的第  $j$  种故障模式出现频次与零部件  $i$  的全部故障模式出现频次之比。 $\tilde{\beta}_{ij}$ 为零部件  $i$  以故障模式  $j$  发生造成该部位损伤的概率,国标草案将此称为丧失功能的条件概率。 $\tilde{\beta}_{ij} = 0$  表示该件无影响; $\tilde{\beta}_{ij} =$

0.1 表示该件很少发生损伤; $\tilde{\beta}_{ij}=0.5$  表示该件有可能发生损伤; $\tilde{\beta}_{ij}=1$  表示该件肯定发生损伤。 $\tilde{\lambda}_i$  为零部件  $i$  的故障率的模糊概率,其值如表 2 所示。 $\tilde{\alpha}_{ij}$ 、 $\tilde{\beta}_{ij}$  的值如表 3 所示。

表 3 CA 的各因子值  
Table 3 Factor values of CA

| 零部件     | 故障模式     | $\tilde{\alpha}_{ij}$ | $\tilde{\beta}_{ij}$ |
|---------|----------|-----------------------|----------------------|
| 主轴箱     | 发出异响     | 0.375                 | 0.1                  |
|         | 零部件损坏    | 0.25                  | 1                    |
|         | 定向不准     | 0.125                 | 0.5                  |
|         | 主轴系统失调   | 0.0625                | 0.5                  |
|         | 转位、移位超程  | 0.0625                | 0.5                  |
|         | 回零不准     | 0.0625                | 0.1                  |
|         | 传感部件失灵   | 0.0625                | 0.5                  |
| Z 轴进给系统 | 零部件损坏    | 0.25                  | 1                    |
|         | 发出异响     | 0.167                 | 0.1                  |
|         | 元器件损坏    | 0.042                 | 1                    |
|         | 几何精度超标   | 0.042                 | 0                    |
| X 轴进给系统 | 液、气、油渗漏  | 0.125                 | 0.1                  |
|         | 零部件损坏    | 0.083                 | 1                    |
| Y 轴进给系统 | 液、气、油渗漏  | 0.167                 | 0.1                  |
|         | 零部件损坏    | 0.042                 | 1                    |
| 刀库系统    | 液、气、油渗漏  | 0.2                   | 0.1                  |
|         | 刀库失调     | 0.2                   | 0.5                  |
|         | 性能参数下降   | 0.2                   | 0.1                  |
|         | 护板、护罩损坏  | 0.1                   | 1                    |
|         | 运动部件过紧   | 0.1                   | 0.5                  |
|         | 发出异响     | 0.1                   | 0.1                  |
| 润滑系统    | 液、气、油渗漏  | 0.7143                | 0.1                  |
|         | 电机损坏     | 0.2857                | 1                    |
| 液压系统    | 液、气、油渗漏  | 0.8                   | 0.1                  |
|         | 元器件参数漂移  | 0.2                   | 0.5                  |
| 电气系统    | 元器件损坏    | 0.11                  | 1                    |
|         | 温升过高     | 0.11                  | 0.5                  |
|         | 电机不能正常工作 | 0.11                  | 0.1                  |
| 整体防护    | 护板、护罩损坏  | 0.11                  | 1                    |
| 冷却系统    | 液、气、油渗漏  | 0.11                  | 0.1                  |
| CNC 系统  | 元器件功能丧失  | 0.11                  | 0.5                  |
| 其他      | 几何精度超标   | 0.11                  | 0.1                  |

经计算得到各故障部位的模糊危害度,如表 4 所示。

由表 4 可知,主轴系统危害度最高,是影响数控机床可靠性的关键部件,应重点进行可靠性改进设计;Z 轴进给系统、刀库系统、X 轴进给系统和润滑系统,危害度次之,也应进行可靠性改进设计。Y 轴进给系统、电气系统等部位危害度较小,可根据发生的故障现象采取相应的改进措施。

表 4 数控机床模糊危害度分析

Table 4 Fuzzy criticality analysis table of NC machine tools

| 部件或子系统  | 危害度模糊数                                    | 重心                    |
|---------|---|-----------------------|
| 主轴系统    | $(2.93, 3.29, 3.74, 7.34) \times 10^{-4}$ | $4.55 \times 10^{-4}$ |
| Z 轴进给系统 | $(3.24, 3.49, 3.64, 5.03) \times 10^{-4}$ | $3.93 \times 10^{-4}$ |
| 刀库系统    | $(1.56, 2.01, 2.54, 4.20) \times 10^{-4}$ | $2.64 \times 10^{-4}$ |
| X 轴进给系统 | $(1.44, 1.55, 1.62, 2.24) \times 10^{-4}$ | $1.75 \times 10^{-4}$ |
| 润滑系统    | $(0.82, 1.00, 1.00, 2.43) \times 10^{-4}$ | $1.42 \times 10^{-4}$ |
| Y 轴进给系统 | $(0.62, 0.66, 0.69, 0.96) \times 10^{-4}$ | $0.75 \times 10^{-4}$ |
| 电气系统    | $(0.30, 0.41, 0.78, 0.93) \times 10^{-4}$ | $0.61 \times 10^{-4}$ |
| 液压系统    | $(0.34, 0.41, 0.41, 0.50) \times 10^{-4}$ | $0.42 \times 10^{-4}$ |
| 整体防护系统  | $(0.21, 0.28, 0.54, 0.64) \times 10^{-4}$ | $0.42 \times 10^{-4}$ |
| CNC 系统  | $(0.09, 0.13, 0.25, 0.29) \times 10^{-4}$ | $0.19 \times 10^{-4}$ |
| 冷却系统    | $(0.02, 0.03, 0.05, 0.06) \times 10^{-4}$ | $0.38 \times 10^{-4}$ |
| 其他      | $(0.02, 0.03, 0.05, 0.06) \times 10^{-4}$ | $0.38 \times 10^{-4}$ |

### 3 结束语

基于模糊逻辑的数控机床故障分析方法可将现场试验数据与工程技术人员的经验结合起来,在故障信息模糊或不精确时,仍能给出可靠性改进的优先次序,因而具有较强的工程实用价值。

#### 参考文献:

[1] Dai Yi, Jia Ya-zhou. Reliability of a VMC and its improvement[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001,72: 99-102.

[2] 于捷, 贾亚洲. 数控车床故障模式影响与致命度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005(12): 1725-1727.  
Yu Jie, Jia Ya-zhou. Failure mode effect and criticality analysis on certain serial CNC lathes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005(12): 1725-1727.

[3] 董玉革. 机械模糊可靠性设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 46-48.

[4] Shimoda Mamoru. A natural interpretation of fuzzy sets and fuzzy relations[J]. Fuzzy Set and Systems, 2002, 128(2): 135-147.

[5] Ross Timothy J. 模糊逻辑及其工程应用[M]. 钱同惠等译. 北京: 电子工业出版社, 2001: 161-162.

[6] 张英芝, 申桂香, 薛玉霞, 等. 数控车床主轴模糊故障树分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(增刊 2): 65-68.  
Zhang Ying-zhi, Shen Gui-xiang, Xue Yu-xia, et al. Fuzzy fault tree analysis of the principal axis of numerical control lathe[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(Sup. 2): 65-68.