

# 基于失效模式和动态贝叶斯网络的 数控机床可靠性分析

黄贤振<sup>1,2</sup>, 李超<sup>1</sup>, 孙超<sup>1</sup>, 邱开慧<sup>3</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819; 2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 沈阳 110819; 3. 武汉钢铁有限公司, 武汉 430080)

**摘要:** 针对数控机床系统可靠性分析复杂的问题, 将故障模式影响及危害性分析方法和动态贝叶斯网络相结合, 建立了可靠性分析模型。首先, 分析了数控机床的故障原因、故障模式以及主要故障零部件, 并结合专家意见对故障原因进行了风险评估。然后, 基于数控机床的故障模式表和故障数据构建了动态贝叶斯网络可靠性模型的结构和参数。通过该模型对系统的状态变化、故障零部件的重要性、子系统的重要性以及各零部件的状态变化进行了分析, 并对模型分析的结果与传统的蒙特卡洛方法进行了对比验证。

**关键词:** 机械设计; 数控机床; 可靠性分析; 故障模式影响及危害性分析; 动态贝叶斯网络

**中图分类号:** TG659 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)11-3534-10

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240052

## Reliability analysis of CNC machine tools based on failure modes and dynamic bayesian networks

HUANG Xian-zhen<sup>1,2</sup>, LI Chao<sup>1</sup>, SUN Chao<sup>1</sup>, QIU Kai-hui<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion Systems Ministry of Education of China, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Wuhan Iron & Steel Co., Ltd., Wuhan 430080, China)

**Abstract:** In order to solve the complex problem of reliability analysis of CNC machine tool system, this paper combines the failure mode influence and hazard analysis method with the dynamic Bayesian network to establish a reliability analysis model. Firstly, the failure causes, failure modes and main fault parts of CNC machine tools were analyzed, and the risk assessment of the failure causes was carried out in combination with expert opinions. Then, based on the failure mode table and fault data of the CNC machine tool, the structure and parameters of the dynamic Bayesian network reliability model were constructed. The state change of the system, the importance of the faulty parts, the importance of the subsystem and the state changes of each component are analyzed by the model, and the results of the model analysis are compared with the traditional Monte Carlo method.

**Key words:** mechanical design; CNC machine tools; reliability analysis; failure mode impact and hazard analysis; dynamic Bayesian networks

收稿日期: 2024-01-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23B2098, U22B2087); 辽宁省应用基础研究计划项目(2023JH2/101300160)

作者简介: 黄贤振(1982-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 机械与系统可靠性. E-mail: xzhuang@mail.neu.edu.cn

## 0 引言

数控机床作为一种先进的机加工设备,在工业、航空航天等领域发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。随着时代发展,各行业对高精度、高质量零部件的需求日益增加。因此,为确保设备稳定运行并提高加工零部件的精度和质量,对数控机床进行可靠性分析至关重要。

针对数控机床的可靠性分析,国内外研究人员对其进行了系统深入的研究。较为常见的分析方法有 FMECA<sup>[2]</sup>、故障树<sup>[3]</sup>和马尔科夫分析<sup>[4]</sup>等。王刚等<sup>[5]</sup>利用 FMECA 方法对数控机床的转台进行了可靠性分析。章浩然等<sup>[6]</sup>提出了一种基于 FMECA 和模糊评判的数控机床可靠性分析方法。陈红霞等<sup>[7]</sup>利用模糊故障树对数控机床的主轴系统进行了分析。吴军等<sup>[8]</sup>利用隐马尔科夫模型实现了对数控铣床可靠性的预测。然而,传统 FMECA 无法对可靠度进行精确的定量评估和计算。随着贝叶斯网络的出现,作为一种新型的知识表达模型,更多人将其应用到了系统可靠性分析中。郑玉彬等<sup>[9]</sup>基于贝叶斯网络对链式刀库系统的重要度进行了分析。Mi 等<sup>[10]</sup>基于 DS 证据理论和贝叶斯网络对数控车床进给控制系统的可靠性进行了分析。Zuo 等<sup>[11]</sup>提出了考虑动态性和模糊性的贝叶斯网络方法并分析了数控机床液压系统的可靠性。因此,利用贝叶斯网络建立合理的可靠性模型,是一种有效的分析方法。考虑到系统早期的故障退化,Li 等<sup>[12]</sup>通过建立贝叶斯网络模型,对某数控机床主传动系统的早期失效进行可靠性分析。贝叶斯网络作为一种概率图模型,在反推理方面有着较大优势,这也赋予了它在故障诊断方面的能力。王立平等<sup>[13]</sup>基于故障树建立贝叶斯网络,对盘式刀库进行了故障分析。葛红玉等<sup>[14]</sup>建立了单元装配的贝叶斯网络结构,利用证据推理实现了机床故障装配因素的识别。以上研究都是针对数控机床某一子系统进行的可靠性分析,无法对数控机床整体系统的可靠性进行计算。因此,为数控机床建立整体系统的可靠性模型,并对其分析十分必要。

本文将故障模式影响及危害性分析方法与贝叶斯网络相结合,分析建立数控机床的动态贝叶斯网络模型,实现了数控机床的动态可靠性评估。首先,对数控机床进行故障模式分析,确定故障原因、故障模式以及故障零部件,并结合专家意见对

故障原因进行风险评估。然后,根据故障模式表建立动态贝叶斯网络模型,利用动态贝叶斯网络的概率推理实现了对其可靠度的计算,并利用贝叶斯网络的故障诊断能力,对该数控机床的主要零部件以及子系统的重要度进行了计算。最后,通过蒙特卡洛方法对其可靠度分析进行验证,证明了方法的有效性,说明该模型可以实现数控机床可靠性的有效评估。

## 1 数控机床 FMECA 分析

### 1.1 数控机床 FMECA 分析

故障模式影响及危害性分析(Failure mode impact and hazard analysis, FMECA)是一种系统性的分析方法,在工程领域广泛用于评估系统或设备的可靠性<sup>[15]</sup>和安全性<sup>[16]</sup>。FMECA 是 FMEA 的扩展,根据风险对失效模式进行优先级排序。最初,该方法在航天领域<sup>[17]</sup>得到了应用。本文针对某国产数控机床进行了 FMECA 分析,采用自底向上的分析方法,将整个机床划分为 12 个子系统,包括基础系统、主传动系统、台尾系统、进给系统、刀架系统、电气系统、液压系统、润滑系统、冷却系统、排屑系统、数控系统和防护系统。在分析过程中,确定了该机床的 190 个主要故障原因、98 个常见故障模式以及 48 个主要故障零部件。主要零部件与主要故障模式的名称及代码见表 1 和表 2。

### 1.2 故障原因的风险量化

经过相关领域专家对数控机床主要故障原因进行评分后,将发生度( $O$ )、严重度( $S$ )和探测度( $D$ )3 个风险参数相乘计算 RPN(Risk priority number)值,用于表示故障原因的风险优先系数。第  $i$  个零件的  $n$  个故障原因的风险值构成评价向量:

$$R_i = [RPN_1, RPN_2, \dots, RPN_n] \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

对于单个零件,根据相关的故障模式及其故障原因确定风险评价向量  $R_i$ 。根据  $p$  个故障原因的状态确定发生向量:  $L = [L_1, L_2, \dots, L_p]^T$ ,  $L_j$  ( $j = 1, \dots, p$ ) 的值根据相应故障原因是否发生来确定,取值为 0 代表不发生,取值为 1 代表发生。

结合专家评估后的 RPN 值,作为衡量每个故障原因对零部件故障模式影响的贡献度。利用风险评价向量  $R_i$  与发生向量  $L$  相乘,确定对应发生

表 1 数控机床子系统及其零部件代码表

Table 1 CNC machine tool subsystem and its parts code table

| 系统  |       | 零部件  |        |      |      |     |      |
|-----|-------|------|--------|------|------|-----|------|
| 代码  | 名称    | 代码   | 名称     | 代码   | 名称   | 代码  | 名称   |
| JCS | 基础系统  | CS   | 床身     | LZ   | 立柱   | DZ  | 底座   |
| ZS  | 主传动系统 | ZZX  | 主轴箱    | ZZ   | 主轴   | ZC  | 滚动轴承 |
|     |       | SJ   | 锁紧螺母   | GZC  | 钢栅尺  | PD  | 皮带   |
|     |       | YG   | 油管     | LM   | 螺帽   | LG  | 拉杆   |
|     |       | KP   | 卡盘     |      |      |     |      |
| TYS | 台尾系统  | TWY  | 台尾液压组件 | TT   | 套筒   | DJ  | 顶尖   |
| JJS | 进给系统  | SF   | 伺服电机   | DL   | 同步带轮 | ZC  | 轴承   |
| DJS | 刀架系统  | LQG  | 冷却管路   | GJT  | 管接头  | BMQ | 编码器  |
|     |       | DCF  | 电磁阀    |      |      |     |      |
| DQS | 电气系统  | DC   | 电气控制箱  | XL   | 线路   | YYB | 液压泵  |
| YYS | 液压系统  | YDCF | 电磁阀    | YB   | 游标   |     |      |
| RHS | 润滑系统  | FYH  | 分油环    | RHB  | 润滑泵  | LQB | 冷却水泵 |
| LQS | 冷却系统  | YWJ  | 液位计    | LQSG | 冷却水管 |     |      |
| PXS | 排屑系统  | PXQ  | 排屑器    | JXC  | 接屑车  | DDJ | 电动机  |
| SKS | 数控系统  | XSZ  | 显示装置   | DB   | 底板   | DYB | 电源板  |
| FHS | 防护系统  | FHM  | 防护门    | FHZ  | 防护罩  | ZXB | 总线板  |

表 2 数控机床主要零部件故障模式表

Table 2 Failure modes of main parts of CNC machine tools

| 编号   | 故障模式      | 编号   | 故障模式     | 编号   | 故障模式     | 编号   | 故障模式     |
|------|-----------|------|----------|------|----------|------|----------|
| FM1  | 床身断裂      | FM26 | 编码器报警    | FM51 | 滚珠丝杠润滑不良 | FM76 | 液压泵泄压    |
| FM2  | 床身变形      | FM27 | 皮带松动     | FM52 | 滚珠丝杠副噪声  | FM77 | 润滑油泵压力不足 |
| FM3  | 立柱断裂      | FM28 | 皮带断裂     | FM53 | 滚珠丝杠不灵活  | FM78 | 润滑油泵吸油不足 |
| FM4  | 立柱变形      | FM29 | 皮带磨损     | FM54 | 刀架不出水    | FM79 | 分油环漏油    |
| FM5  | 底座破裂      | FM30 | 漏油       | FM55 | 刀架漏水     | FM80 | 冷却泵底座漏水  |
| FM6  | 底座变形      | FM31 | 无法装夹     | FM56 | 刀架冷却漏水   | FM81 | 冷却泵不上水   |
| FM7  | 导轨松动      | FM32 | 夹紧机构松动   | FM57 | 编码器松动    | FM82 | 冷却水管漏水   |
| FM8  | 导轨磨损      | FM33 | 夹紧机构磨损   | FM58 | 编码器损坏    | FM83 | 液位报警     |
| FM9  | 主轴箱铸造缺陷   | FM34 | 锁紧油缸漏油   | FM59 | 刀架不转位    | FM84 | 排屑器不转    |
| FM10 | 主轴箱刚度不足   | FM35 | 锁紧部位松动   | FM60 | 刀架转不停    | FM85 | 排屑器卡死    |
| FM11 | 主轴箱定位孔精度低 | FM36 | 卡盘无动作    | FM61 | 刀架转不到位   | FM86 | 接屑车漏水    |
| FM12 | 主轴定位故障    | FM37 | 卡盘无法夹紧   | FM62 | 刀架锁不紧    | FM87 | 电机烧坏     |
| FM13 | 主轴发热过大    | FM38 | 卡盘无动作    | FM63 | 换刀卡住     | FM88 | 电机运转不稳   |
| FM14 | 主轴噪声过大    | FM39 | 卡盘压力无法调节 | FM64 | 刀具交换时掉刀  | FM89 | 显示器无图像   |
| FM15 | 主轴停转      | FM40 | 电机损坏     | FM65 | 刀架报警     | FM90 | 显示器无响应   |
| FM16 | 主轴无变速     | FM41 | 电机线路故障   | FM66 | 刀架不反转只正转 | FM91 | 元件松动     |
| FM17 | 轴承磨损      | FM42 | 液压套筒无动作  | FM67 | 刀架不定位    | FM92 | 线路、电路短路  |
| FM18 | 轴承过度发热    | FM43 | 顶尖顶不紧    | FM68 | 电气控制箱故障  | FM93 | 线路接错     |
| FM19 | 轴承零件损坏    | FM44 | 台尾油路漏油   | FM69 | 线路断开或松脱  | FM94 | 防护门紧     |
| FM20 | 密封圈腐蚀     | FM45 | 压力不稳定    | FM70 | 滑阀卡住     | FM95 | 防护门卡死    |
| FM21 | 密封圈磨损     | FM46 | 电机噪声大    | FM71 | 电磁铁故障    | FM96 | 防护门合不上   |
| FM22 | 密封圈物理失效   | FM47 | 同步带轮裂纹   | FM72 | 电磁铁响声大   | FM97 | 防护罩脱落    |
| FM23 | 锁紧螺母断裂    | FM48 | 工件出现波纹   | FM73 | 游标漏油     | FM98 | 防护罩漏水    |
| FM24 | 锁紧螺母腐蚀    | FM49 | 工件加工误差大  | FM74 | 液压油泄露    |      |          |
| FM25 | 锁紧螺母疲劳    | FM50 | 加工工件粗糙度高 | FM75 | 异常噪声、振动  |      |          |

故障原因状态下的RPN。对其中多种故障原因导致故障模式下的RPN值进行求和确定故障模式的风险评价向量：

$$R_{FM}=[RPN_{FM1},RPN_{FM2},\cdots RPN_{FMk}] \quad (2)$$

最后,经式(3)对整个零件故障模式的RPN值做归一化处理,可以求得相应故障模式发生的概率。将其结果作为故障原因与故障零部件之间的条件概率,作为后期动态贝叶斯网络故障原因

节点与零部件之间节点的参数定义。

$$P(\text{FM}_m) = \frac{\text{RPN}_{\text{FM}_m}}{\sum_{m=1}^k \text{RPN}_{\text{FM}_m}} \quad m=1, 2, \dots, k \quad (3)$$

### 1.3 故障原因的概率分布

根据实际的统计数据,对数控机床运行过程中出现的故障原因数据进行概率分布拟合。本文假定所有的故障原因均符合两参数的威布尔分布,其概率密度函数表达式见式(4),式中形状参数( $\eta$ )和尺度参数( $\beta$ )通过极大似然估计法确定。

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta} \quad (4)$$

对  $n$  个产品进行试验,统计得到故障原因的故障时间集合  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ,结合威布尔分布表达式构造对数似然函数(5)。

$$L(\beta, \eta) = n \ln \beta - n \beta \ln \eta + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln t_i - \frac{1}{\eta^\beta} \sum_{i=1}^n t_i^\beta \quad (5)$$

对上述函数进行求解,可得似然方程(6)。

$$\begin{cases} \frac{\eta}{\beta} - n \ln \eta + \sum_{i=1}^n \ln t_i - \sum_{i=1}^n \left( \frac{t_i}{\eta} \right)^\beta \ln \left( \frac{t_i}{\eta} \right) = 0 \\ \frac{n\beta}{\eta} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{t_i}{\eta} \right)^\beta \frac{\beta}{\eta} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

利用迭代法对方程求解最大似然估计值,从而确定形状参数( $\eta$ )和尺度参数( $\beta$ )。以主轴轴承发生损坏为例,对  $n$  台机床主轴轴承发生故障的时间进行统计,利用上述方法进行求解,最终确定形状参数  $\eta$  的值为 1 771 435.42,尺度参数  $\beta$  为 1.96。其他可统计的故障原因利用最大似然法进行估计,无法统计的故障原因根据相关专家的经验作出假设。

## 2 数控机床 FMECA-DBN 模型

### 2.1 FMECA-DBN 结构建模

贝叶斯网络(Bayesian network, BN)作为一种概率图模型<sup>[18]</sup>,由有向无环图和概率表组成,而动态贝叶斯网络(Dynamic bayesian networks, DBN)是在其基础上引入了时间维度。在 FMECA-DBN 结构建模时,通过将故障原因、故障模式以及故障零部件、子系统和整个系统的关系映射到 DBN 中,实现对复杂系统的概率建模。图 1 展示了某一简单系统在不同时间点下的贝叶斯网络结构建模示例。图中  $C1 \sim C8$  表示故障原因,  $L1 \sim L4$  表示故障零件层,  $S1 \sim S2$  表示子系统层,  $T$  表示整个

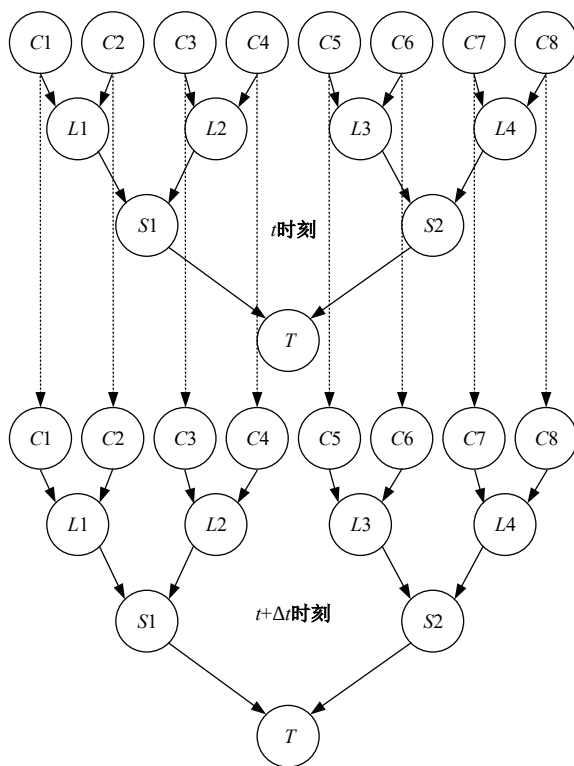


图 1 FMECA-DBN 模型图

Fig. 1 FMECA-DBN model diagram

系统。除零件层其余变量节点均有两种状态,因不同零件有着多种故障模式,所以其状态对应可分为正常以及其相关的故障模式等状态。

通过对数控机床进行 FMECA 分析,建立图 2 所示的 FMECA-DBN 模型。图中  $C01 \sim C190$  表示导致机床故障的 190 个故障原因节点,  $CS \sim FHZ$  表示数控机床的主要零部件节点,  $JCS \sim FHS$  表示数控机床的 12 个子系统节点,节点  $T$  表示机床故障。

### 2.2 FMECA-DBN 参数建模

图 3 是一个简单的 DBN 网络结构,变量  $X_1$ 、 $X_2$  的状态随时间发生变化,而根据贝叶斯网络的特性,各变量在下一时刻的状态只取决于前一个时刻的状态。

针对图 3 的动态贝叶斯网络,定义出变量状态转移矩阵。假设故障变量  $X_1$ 、 $X_2$  有发生(True)与不发生(False)两种状态,随时间变化,其状态变化的条件概率见式(7),其中  $f_{X_1}(t)$  为变量  $X_1$  的失效概率密度函数。变量  $X_2$  的定义与变量  $X_1$  相同。这两个故障变量决定了  $T$  的状态,  $T$  具有正常工作(Work)和失效(Fault)两种状态。只有当  $X_1$  和  $X_2$  同时为不发生(False)时,  $T$  才可以正常工作(Work),其条件概率见式(8)。

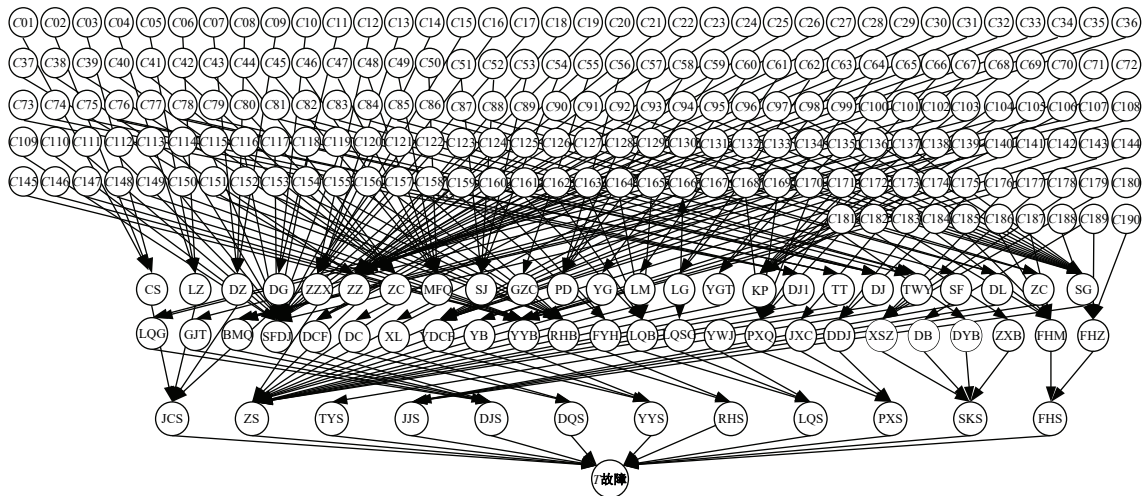


图 2 数控机床 FMECA-DBN 模型

Fig. 2 FMECA-DBN model of CNC machine tool

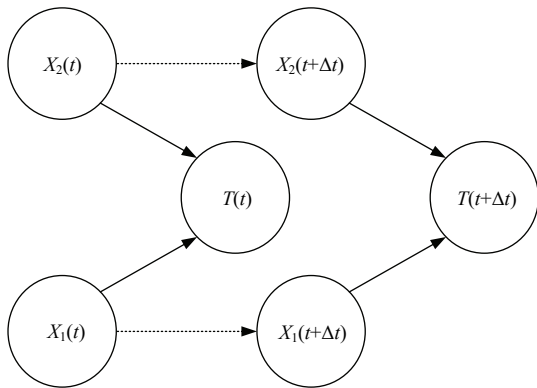


图 3 DBN 结构图

Fig. 3 DBN structure diagram

$$\begin{cases} P(X_1(t+\Delta t)=\text{False}|X_1(t)=\text{False})= \\ 1-\int_0^{\Delta t} f_{X_1}(t)dt \\ P(X_1(t+\Delta t)=\text{True}|X_1(t)=\text{False})=\int_0^{\Delta t} f_{X_1}(t)dt \\ P(X_1(t+\Delta t)=\text{True}|X_1(t)=\text{True})=1 \\ P(X_1(t+\Delta t)=\text{False}|X_1(t)=\text{True})=0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P(T(t+\Delta t)=\text{Work}|X_1(t+\Delta t), X_2(t+\Delta t)= \\ \text{False})=1 \\ P(T(t+\Delta t)=\text{Work}|\text{else})=0 \end{cases} \quad (8)$$

根据 1.3 节中所提出的方法对各个故障原因的概率分布进行拟合,可以得出相应故障的韦布尔分布模型的参数。故障原因有发生(True)和不发生(False)两种状态。根据式(7)可以推导出式(9),该公式表示故障原因从  $t$  时刻到  $t+\Delta t$  时刻状态转变的条件概率函数。其中,  $k$  表示时

间片的索引,  $\Delta t$  表示两时间片之间的时间间隔,取时间间隔  $\Delta t=1$  年。

$$\begin{cases} P\{C_i(t+\Delta t)=\text{False}|C_i(t)=\text{False}\}= \\ e^{-\left(\frac{k\Delta t}{\eta}\right)^p+\left(\frac{(k-1)\Delta t}{\eta}\right)^p} \\ P\{C_i(t+\Delta t)=\text{True}|C_i(t)=\text{False}\}= \\ 1-e^{-\left(\frac{k\Delta t}{\eta}\right)^p+\left(\frac{(k-1)\Delta t}{\eta}\right)^p} \\ P\{C_i(t+\Delta t)=\text{True}|C_i(t)=\text{True}\}=1 \\ P\{C_i(t+\Delta t)=\text{False}|C_i(t)=\text{True}\}=0 \end{cases} \quad (9)$$

变量节点之间的条件概率关系根据节点之间的关系进行确定。故障原因与零部件之间的条件概率关系通过 1.2 节所提的方法定义。而零部件与子系统以及子系统与整个系统之间均为串联,可以使用式(8)来确定。

通过上述方法,定义动态贝叶斯网络模型的条件概率参数,并基于此进行概率推理。

### 3 数控机床可靠性分析

数控机床系统的可靠性表示在规定时间内,数控机床及其子系统以及各零部件正常运行的能力。通过前文所构建的数控机床 FMECA-DBN 模型对其可靠性进行分析。初始时刻,假定所有故障原因都处于不发生(False)状态。在  $t=0$  时,在 FMECA-DBN 模型中各输入节点  $C_i$  的先验概率为  $P\{C_i(0)=\text{False}\}=1, P\{C_i(0)=\text{True}\}=0$ 。随着时间变化,故障原因的状态在不发生到发生之间转换。利用 Netica 软件搭建的贝叶斯网络,实现对整个系统的动态建模,并利用联结树算法

作为贝叶斯网络后验概率的求解算法,推导出数控机床系统可靠性。

### 3.1 数控机床可靠度分析

在进行数控机床可靠性分析时,将时间间隔

设定为一年。通过使用贝叶斯网络进行正向推理,可以得出数控机床在9年时间内的可靠度情况。图4展示了各个子系统以及整个数控机床系统的可靠度随时间的变化曲线。

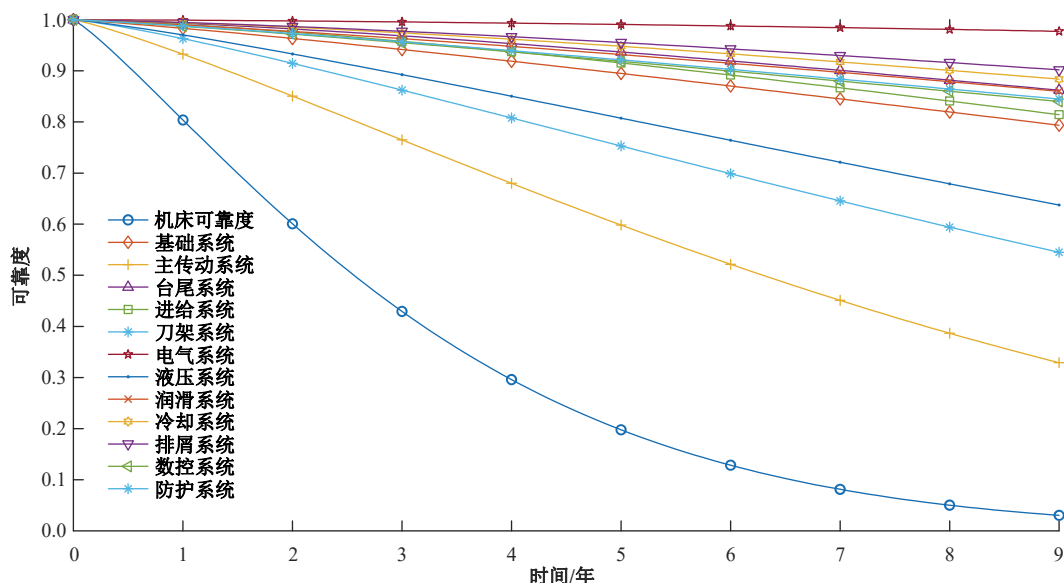


图4 数控机床及子系统可靠度变化曲线

Fig. 4 Reliability curve of CNC machine tools and subsystems

从图4可以看出,随着时间的推移,数控机床的可靠度会逐步降低。在不考虑数控机床的定期维修下,数控机床的可靠度会在9年后最终变为0.030 288 4。其中,主传动系统的可靠度下降对整个数控机床系统的可靠度影响最为显著,其次是刀架系统和液压系统,其他系统的影响相对较小。根据各个子系统对数控机床系统可靠度的影响程度,可以加强对这些薄弱子系统的初期设计和后期维护,以确保数控机床能够正常工作的能力。

### 3.2 数控机床主要零部件状态分析

利用贝叶斯网络可以得到机床主要组成零部件的各状态发生概率,这也是不同于以往对系统零件状态建模的一点。传统的贝叶斯网络将零件简单划分为正常和故障两种状态,而本文方法对主要零部件的状态划分不仅包括了正常工作状态,更将其故障状态细化为多种故障模式。由于本文涉及的零部件较多,故只对主轴零件进行分析,其各状态的发生度随时间变化结果如图5所示。

从图5中可以看出,主轴在故障时,主轴噪声过大(FM14)的发生度较大,主轴发热过大(FM13)的故障模式次之,主轴无变速(FM16)的

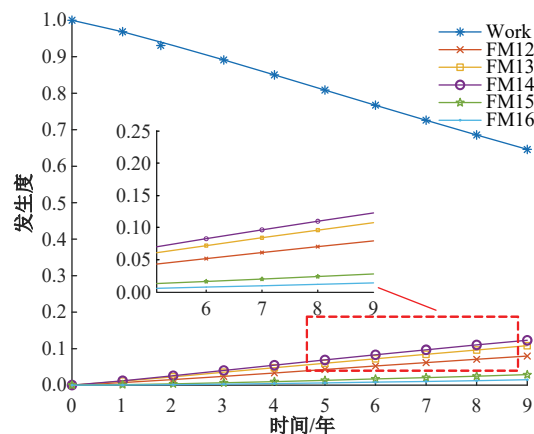


图5 主轴各状态随时间变化图

Fig. 5 Variation of each state of the spindle over time

概率最低。通过分析结果,可以判断主轴无法正常工作时,更可能处于哪种故障模式,以便快速准确地对机床故障进行定位并修复。

### 3.3 数控机床子系统及主要零部件重要度

数控机床FMECA-DBN模型可用于计算机床发生故障后各子系统或者零部件故障的概率,以衡量它们的重要程度。采用反推理方法,在将机床状态设为故障的先验概率下,反向推导出每个子系统或零部件出现故障的概率(即 $P\{S_i(t)=1|T(t)=1\}$ )。以此为依据,可根据概率大小排序,确定每个子系统或零部件的重要度。对数控

机床子系统的重要度进行分析,选取一年后数控机床整机系统故障作为已知条件,进而得出其各子系统故障的概率,分析结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,主传动系统的重要度最高,刀架系统和液压系统次之,随后的是其他系统,如润滑系统、基础系统等。

利用相同的方法可以实现对零部件重要度的分析,对 9 年后各零部件的可靠度以及各重要度进行分析,其分析结果如图 7 所示。从图 7 中

可以看出,9 年后主轴(ZZ)的可靠度最低。又因为所有零部件是串联关系,所以其重要度值最大,为 0.354 0。伺服电机(SFDJ)的重要度次之,其值为 0.326 4。相应的其他零部件的重要度依次排列,如液压泵(YYB)、电磁阀(DCF)等。通过对零部件重要度进行分析,可以明确数控机床系统在运行中的薄弱环节,从而对这些零部件进行日常维修与维护,进一步提高机床系统的可靠度。

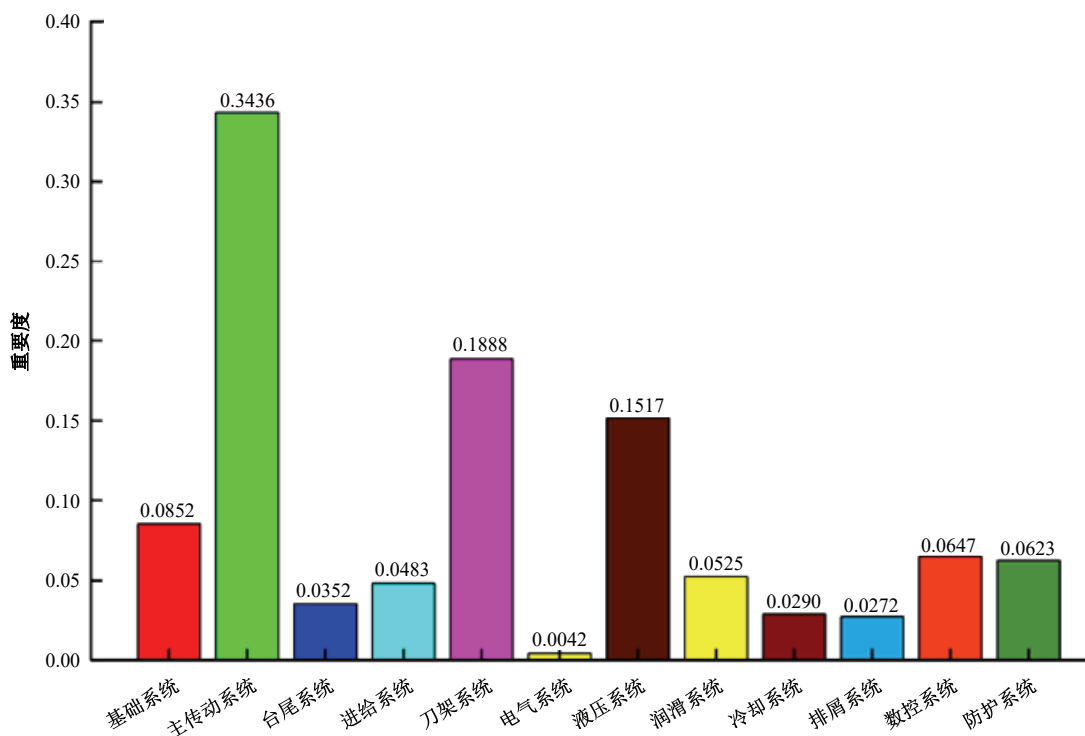


图 6 各子系统重要度

Fig. 6 Importance of each subsystem

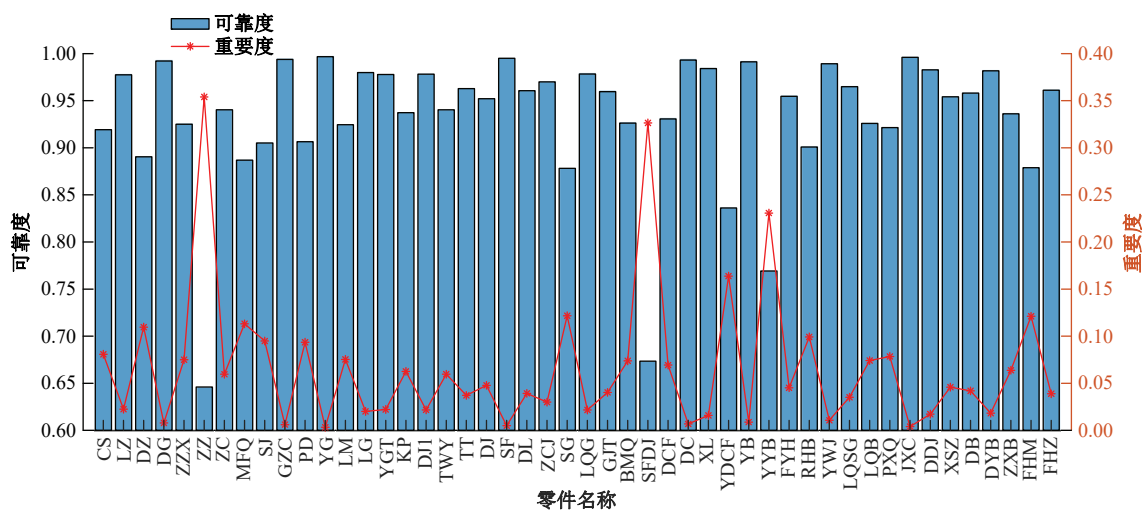


图 7 零部件可靠度及重要度

Fig. 7 Reliability and importance of parts

3.4 数控机床子可靠性模型验证

在系统可靠性分析中,常见的定量分析方法包括基于概率的方法,如蒙特卡洛方法以及马尔科夫分析方法。本文通过对比 FMECA-DBN 模型和蒙特卡洛方法在 9 年内可靠度变化的结果,得出了图 8 所示的对比结果。从表 3 中分析可以看出,利用蒙特卡洛方法在样本数为  $10^6$  时得到的数控机床可靠度结果与本文提出的方法进行对比时,误差较小,这进一步验证了本文方法的准确性。而与图 9 中蒙特卡洛方法耗时 12.693 0 s 相比,利用本文提出的模型分析时间更短,效率更高,并且能够使用图模型来表达系统中各部件之间的组成关系。

通过定义变量之间的条件概率,可以降低计算的复杂度。此外,贝叶斯网络的反推理能力能够实现对系统中主要部件的重要度分析,而蒙特卡洛方法无法实现这一点。

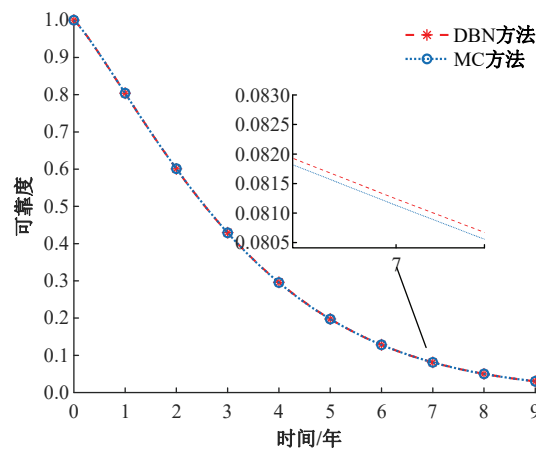


图 8 蒙特卡洛与 FMECA-DBN 对比图  
Fig. 8 Comparison between Monte Carlo and FMECA-DBN

表 3 蒙特卡洛与 FMECA-DBN 结果对比

| Table 3 Comparison of Monte Carlo and FMECA-DBN results |           |             |        |
|---------------------------------------------------------|-----------|-------------|--------|
| 可靠度                                                     | MC 方法     | FMECA-DBN   | 相对误差/% |
| R(0)                                                    | 1         | 1           | 0.00   |
| R(1)                                                    | 0.803 922 | 0.803 848 8 | 0.01   |
| R(2)                                                    | 0.601 295 | 0.600 746 1 | 0.09   |
| R(3)                                                    | 0.429 012 | 0.429 308 2 | 0.07   |
| R(4)                                                    | 0.295 428 | 0.295 915 0 | 0.16   |
| R(5)                                                    | 0.197 395 | 0.197 676 7 | 0.14   |
| R(6)                                                    | 0.128 258 | 0.128 378 4 | 0.09   |
| R(7)                                                    | 0.081 126 | 0.081 236 8 | 0.14   |
| R(8)                                                    | 0.050 201 | 0.050 174 5 | 0.05   |
| R(9)                                                    | 0.030 408 | 0.030 288 4 | 0.39   |

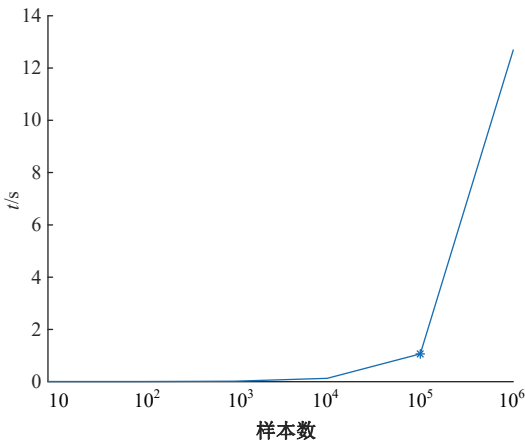


图 9 蒙特卡洛方法计算耗时变化图  
Fig. 9 Calculation time variation of Monte Carlo method

为了对比和验证贝叶斯网络反向推理方法计算的子系统重要度,本文采用 Birnbaum 重要度方法<sup>[19]</sup>进行了分析。该方法是计算子系统从正常变为故障时,导致整个系统失效的变化率,具体表达式如式(10)所示:

$$I_B(i|t)=h(1_i,P)-h(0_i,P) \quad (10)$$

式中: $i$ 表示第  $i$  个零件或子系统; $1$ 表示处于正常状态; $0$ 表示处于故障状态; $P$ 表示着整个系统处于失效状态。

将两种方法计算得到的子系统重要度进行比较(见表 4),结果表明贝叶斯网络反向推理方法计算得出的子系统重要度排序准确可靠。这些对比和验证表明:本文提出的方法在系统可靠性分析中具有优势,不仅能够准确计算可靠度,还能够实现对系统主要部件重要度的分析,而且无需大量样本点,降低了计算的复杂度。

表 4 DBN 方法与 Birnbaum 重要度对比

| Table 4 Comparison of importance between DBN method and Birnbaum |           |    |           |    |
|------------------------------------------------------------------|-----------|----|-----------|----|
| 系统名称                                                             | DBN 方法    | 排序 | Birnbaum  | 排序 |
| 基础系统                                                             | 0.085 158 | 4  | 0.820 053 | 4  |
| 主传动系统                                                            | 0.343 620 | 1  | 0.861 945 | 1  |
| 台尾系统                                                             | 0.035 229 | 9  | 0.809 442 | 9  |
| 进给系统                                                             | 0.048 344 | 8  | 0.811 545 | 8  |
| 刀架系统                                                             | 0.188 817 | 2  | 0.834 766 | 2  |
| 电气系统                                                             | 0.004 209 | 12 | 0.804 513 | 12 |
| 液压系统                                                             | 0.151 712 | 3  | 0.828 504 | 3  |
| 润滑系统                                                             | 0.052 487 | 7  | 0.812 211 | 7  |
| 冷却系统                                                             | 0.028 983 | 10 | 0.808 445 | 10 |
| 排屑系统                                                             | 0.027 211 | 11 | 0.808 162 | 11 |
| 数控系统                                                             | 0.064 734 | 5  | 0.814 187 | 5  |
| 防护系统                                                             | 0.062 316 | 6  | 0.813 796 | 6  |

## 4 结束语

本文针对数控机床系统的可靠性分析,将 FMECA 模型与动态贝叶斯网络模型相结合,考虑了故障原因、故障模式以及故障影响等因素,建立了 FMECA-DBN 的数控机床可靠性分析模型。该模型综合考虑了系统各个组成部分的故障概率以及故障对系统的影响,能够对数控机床系统的可靠性进行全面的分析。通过 FMECA-DBN 模型,可以分析主要组成零部件在不同故障模式下的发生概率,还可得出各个子系统和整个机床的可靠度变化情况。同时,利用贝叶斯网络的反推理能力,能够确定各子系统的重要度。

从可靠性结果可得出以下结论:在 9 年之后数控机床整体的可靠度下降到了 0.030 288 4,而其中主传动系统、刀架系统及液压系统相比于其他子系统对机床整机的影响较大。在主传动系统中,主要零部件主轴因噪声过大和发热过大而产生故障的概率最高。

### 参考文献:

- [1] 陈红霞,李宏悦,包斯日古楞,等.某重型数控机床可靠性建模及评估研究[J].机床与液压,2024,52(12):239-243.  
Chen Hong-xia, Li Hong-yue, Bao Si-ri-gu-leng, et al. Research on reliability modeling and evaluation of a heavy-duty CNC machine tool[J]. Machine Tools and Hydraulics, 2024, 52(12): 239-243.
- [2] Stamatis D H. Failure Mode and Effect Analysis[M]. Welshpool: Quality Press, 2003.
- [3] Lee W S, Grosh D L, Tillman F A, et al. Fault tree analysis, methods, and applications: a review[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1985, 34(3): 194-203.
- [4] Cowles M K, Carlin B P. Markov chain monte carlo convergence diagnostics: a comparative review[J]. Journal of the American Statistical Association, 1996, 91(434): 883-904.
- [5] 王刚,陈捷,王华,等.基于 FMECA 的数控转台可靠性分析[J].南京工业大学学报:自然科学版,2018,40(4):52-58.  
Wang Gang, Chen Jie, Wang Hua, et al. Reliability analysis of CNC turntable based on FMECA[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 40(4): 52-58.
- [6] 章浩然,洪荣晶,陈复兴,等.基于 FMECA 和模糊评判的数控机床可靠性分析方法[J].制造技术与机床,2020(11):125-129.  
Zhang Hao-ran, Hong Rong-jing, Chen Fu-xing, et al. Reliability analysis method of CNC machine tools on FMECA and fuzzy evaluation[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2020(11): 125-129.
- [7] 陈红霞,王纪华,马爱博,等.基于模糊故障树的某重型数控机床主轴系统可靠性分析[J].机床与液压,2022,50(24):165-170.  
Chen Hong-xia, Wang Ji-hua, Ma Ai-bo, et al. Reliability analysis of a heavy-duty CNC machine tool spindle system based on fuzzy fault tree[J]. Machine Tools and Hydraulics, 2022, 50(24): 165-170.
- [8] 吴军,邵新宇,邓超.隐马尔科夫链模型在装备运行可靠性预测中的应用[J].中国机械工程,2010,21(19):2345-2349.  
Wu Jun, Shao Xin-yu, Deng Chao. Application of hidden Markov chain model in equipment operation reliability prediction[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2010, 21(19): 2345-2349.
- [9] 郑玉彬,申桂香,张英芝,等.基于贝叶斯网络的链式刀库系统重要度分析[J].吉林大学学报:工学版,2019,49(2):466-471.  
Zheng Yu-bin, Shen Gui-xiang, Zhang Ying-zhi, et al. Importance analysis of chain-type tool magazine system based on Bayesian network[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition) 2019, 49(2): 466-471.
- [10] Mi J, Li Y F, Peng W, et al. Reliability analysis of complex multi-state system with common cause failure based on evidential networks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 174: 71-81.
- [11] Zuo F, Jia M, Wen G, et al. Reliability modeling and evaluation of complex multi-state system based on bayesian networks considering fuzzy dynamic of faults[J]. CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2021, 129(2): 993-1012.
- [12] Li H, Deng Z M, Golilarz N A, et al. Reliability analysis of the main drive system of a CNC machine tool including early failures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 215: 107846.
- [13] 王立平,朱斌,吴军,等.基于贝叶斯网络的盘式刀库故障分析[J].吉林大学学报:工学版,2022,52(2):280-287.  
Wang Li-ping, Zhu Bin, Wu Jun, et al. Fault analy-

- sis of circular tool magazine based on Bayesian network[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(2): 280-287.
- [14] 葛红玉, 王拓, 刘园, 等. 基于贝叶斯网络推理的数控机床元动作装配情景异常识别[J]. 机械设计, 2023, 40(4): 36-42.
- Ge Hong-yu, Wang Tuo, Liu Yuan, et al. CNC machine tool element action assembly scenario anomaly identification based on Bayesian network reasoning [J]. Mechanical Design, 2023, 40(4): 36-42.
- [15] Zúñiga A A, Fernandes J F P, Branco P J C. Fuzzy-based failure modes, effects, and criticality analysis applied to cyber-power grids[J]. Energies, 2023, 16(8): 3346.
- [16] Yu L, Zhang T, Tian H, et al. FMECA of CNC machine tool design stage based on CBWM and DEA [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2024, 40(1):154-169.
- [17] Liu H C, Liu L, Bian Q H, et al. Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(4): 4403-4415.
- [18] Friedman N, Koller D. Bayesian approach to structure discovery in Bayesian networks[J]. Machine Learning, 2003, 50(1/2): 95-125.
- [19] Andrews J D, Beeson S. Birnbaum's measure of component importance for noncoherent systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2003, 52(2): 213-219.