基于模糊故障树的机床润滑系统可靠性分析

刘天一[1, 2]，李　迪[3]，佟翔宇[3]，田海龙[1, 2*]，陈传海[1, 2]

（1.吉林大学机械与航空航天工程学院，吉林 长春 130015；2.数控装备可靠性教育部重点实验室，吉林 长春 130022；
3. 中国航空工业集团公司北京航空精密机械研究所，北京 100007）

摘要：针对复杂系统传统故障树分析中基础数据缺失的问题，本研究提出基于模糊故障树的机床润滑系统可靠性分析方法。以 VDF1000E 型立式加工中心润滑系统为例，首先建立其故障树，收集专家对基本事件的评分，将专家的主观判断转化模糊数，再将模糊数转化为确切的模糊概率值，最终通过计算获得系统级的故障概率及各基本事件的重要性指标。通过定量分析，锁定影响系统可靠性的关键故障因素，为后续的针对性改进和可靠性分析工作提供基础。

关键词：数控机床；润滑系统；模糊故障树；模糊数；可靠性分析

中图分类号：TH17　　**文献标志码：**A

1　引言

数控机床润滑系统作为精密加工装备的核心功能单元，其运行可靠性直接影响加工精度与设备服役周期。该系统通过建立稳定油膜层，可有效降低导轨、丝杠等关键运动副的摩擦系数，抑制温升变形与异常磨损，避免因润滑失效引发的精度劣化与突发停机故障。持续稳定的油液供给不仅能保障机床动态性能，更能延长轴承、齿轮箱等核心部件的使用寿命，是维持数控设备高效、可靠运行的重要基础。开展润滑系统可靠性研究对于实现设备预测性维护、降低非计划停机损失具有显著工程价值。

在数据不完备条件下，模糊故障树分析法（FFTA）通过融合专家经验与模糊数学理论，为系统可靠性评估提供了有效解决方案，国内外学者在该领域进行了系列研究。Tanaka[1] 等首创性地采用梯形模糊数表征底事件失效概率，运用模糊扩展原理实现顶事件概率计算。Sawyer[2] 等提出基于 λ 截集的双向截断算法，解决了指数分布假设下模糊数运算的边界问题。Duan[3] 通过构建动态故障树模型，实现了多重失效机理的耦合分析。杨思航 [4] 针对高压电气系统提出功能 - 状态双模分析方法，通过 FFTA 处理功能型故障，结合多态理论评估性能退化。Zhang[5] 将模糊数学与多态故障树结合，建立了多状态模糊故障树，该方法对复杂多态系统进行可靠性评估。李钦奉 [6]

* 通信作者：田海龙

建立机床润滑系统失效模型，识别出油路堵塞与压力异常等主控因素。谭润泽 [7] 开发基于专家语义的模糊量化评价体系，成功应用于水下装备故障模式识别。陈红霞 [8] 采用梯形模糊数处理专家主观意见，实现了重型机床主轴系统薄弱环节定位。这些成果为 FFTA 的工程化应用奠定了方法基础。

本文针对数控机床润滑系统“故障数据少、失效诱因多”的典型特征，采用模糊故障树方法对其进行可靠性分析。为解决传统故障树分析对精确数据的依赖性，本研究将专家经验转化为模糊数表征底事件发生概率，最终通过定量计算识别出影响机床润滑系统可靠性的关键故障模式，为针对性改进提供理论依据。本文研究流程如图 1 所示。

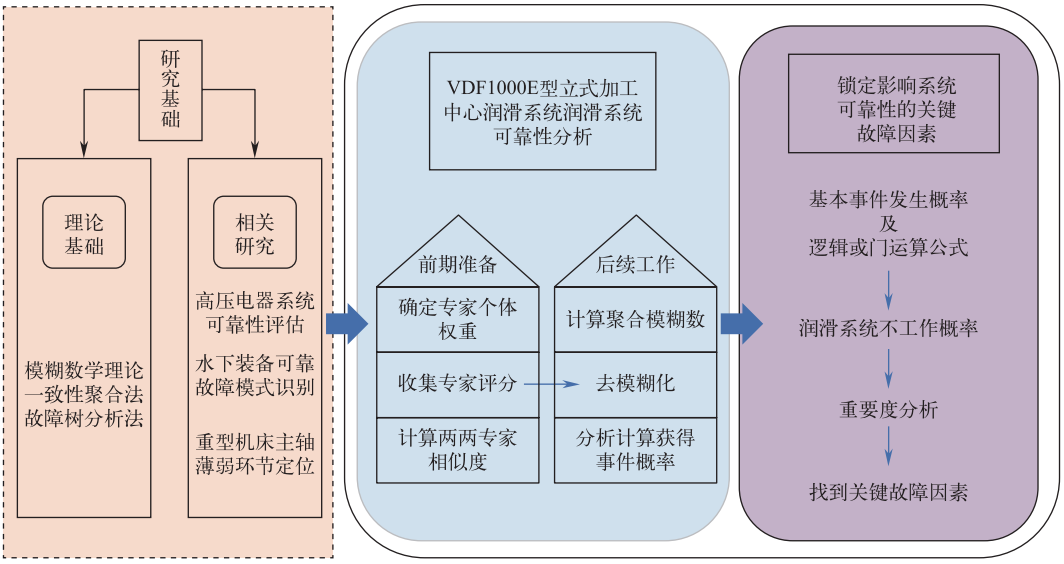

图 1　研究流程图

2　模糊故障树分析方法

2.1　确定专家评分及权重

为实现专家评价的客观性，依据评估人员与产品关联度、专业资质和实践经验，设置职称等级（高工 / 工程师 / 助工 / 技工）、学历层次（研究生 / 本科 / 大专 / 中专）及从业年限（＞ 20 年 /10~20 年 /5~10 年 / ＜ 5 年）三维评价指标，各维度划分四级评价标准并配置差异化权重系数，见表 1。确定各层级相对权重后，利用式（1）计算专家个体权重指数。

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}} \qquad (1)$$

式中，i 表示专家数，j 表示项目数。

2.2　模糊数表达

模糊集通过特征函数来表示集合中元素的隶属程度。与传统的二值集合不同，模糊集的隶属关系在区间 [0, 1] 内取值，以反映元素对集合的隶属程度。在本文中，采用梯形模糊数来表示基本事件的发生可能性。

表 1　专家组成结构及权重

因素	子因素	权重
职位	高级工程师	12
	工程师	9
	助理工程师	6
	技术工人	3
学历	研究生以上	4
	大学本科	3
	大学专科	2
	中专以下	1
工龄	20 年以上	8
	10-20 年	6
	5-10 年	4
	5 年以下	2

针对模糊信息处理需求，采用梯形模糊数表征事件发生概率。构建包含 7 级语义变量的评价集（非常低→非常高），通过隶属度函数实现自然语言向数学表达的转换，见表 2。定义梯形模糊数 $A=(a, b, c, d)$ 表征事件可能性区间，其中核心区间 [b, c] 表示最大隶属区域，边界值 a、d 界定可能性分布范围。

2.3 模糊故障树

（1）专家语言模糊化 在专家决策过程中，认知异同性往往源于知识储备与实践经历的差异，这种个体特征差异可能导致评估结论的非一致性。为消解多源评估数据的认知冲突，本研究通过模糊加权平均算子对数据进行融合处理。该融合算法能有效保持原始评估信息的结构特征，同时消除异常值对群体决策的干扰。

1）模糊化过程。①获取基本事件概率模糊数：基于模糊语义量化故障诱因的发生倾向，本研究采用模糊集合论方法，转换标准见表 2[8]。

表 2 模糊数转换标准

评定等级	故障发生概率	模糊数
非常高（VH）	大约 0.005 及以上	（0.8，0.8，0.9，1）
高（H）	大约 0.004	（0.7, 0.8, 0.8, 0.9）
较高（FH）	大约 0.002 5	（0.5, 0.6, 0.7, 0.8）
中等（M）	大约 0.001 5	（0.4, 0.5, 0.5, 0.6）
较低（FL）	大约 0.000 5	（0.2, 0.3, 0.4, 0.5）
低（L）	大约 0.000 15	（0.1, 0.2, 0.2, 0.3）
非常低（VL）	大约 0.000 05 及以下	（0，0，0.1，0.2）

②专家意见的相似度计算：为量化多专家评估结论的趋同性，本研究运用了基于模糊集合理论的一致性分析框架。设评估专家组集合为 $\{E_i|i=1, 2, \cdots, n\}$，对于任意两个专家评估结论 E_i 和 E_j，其对应模糊集合 A_i 与 A_j 的相似性度量 S（A_i，A_j）按式（2）进行运算：

$$S_{ij}(A_i, A_j)=1-\frac{1}{4}\left(\left|A_i-A_j\right|\right) \tag{2}$$

式中，$S_{ij}(A_i, A_j)$ 为相似函数；A_i、A_j 均为标准化梯形模糊集合，其数学表征分别为 $A_i=(a_i, b_i, c_i, d_i)$ 和 $A_j=(a_j, b_j, c_j, d_j)$ 。

完成两两专家间相似度计算后，需建立个体专家与群体共识的关联指标。首先通过式（3）求解各专家的平均共识度指标：

$$A(E_i)=\frac{1}{n-1}\sum_{\substack{i\neq j\\ j=1}} S_{ij}(A_i, A_j) \tag{3}$$

继而通过式（4）建立相对共识度指标 f_{RAD}，该参数反映专家评估结论在群体中的协调程度：

$$f_{RAD,i}=\frac{A(E_i)}{\sum_{i=1}^{n} A(E_i)} \tag{4}$$

为优化专家权重分配机制，采用改进的调和平均算法。在初始权重 R_i 基础上，引入松弛因子 $\alpha \in [0, 1]$ 建立双目标优化模型，如式（5）所示：

$$W_i=\alpha R_i+(1-\alpha) f_{RAD,i} \tag{5}$$

本模型设置 α=0.5，确保专家个体权威性与群体共识度的均衡性。

③专家聚合模糊数计算。基于上述权重系数，将建立多专家模糊信息融合。设第 i 位专家对第 j 个基础事件的评估结论为 A_{ij}，则综合模糊集合 P_j 的合成过程：

$$P_i=\sum_{i=1}^{n} W_i \otimes A_{ij} \tag{6}$$

式中，$\otimes$ 为模糊数标量乘法运算。该模型实现了 i 个专家对 j 个基础事件评估结论的有效聚合。

2）去模糊化过程。在专家评估数据预处理阶段，需将其意见其转化为模糊可能性，通过转换算法最终输出基本事件的模糊概率值。本文的去模糊化计算方法：

$$U_{\mathrm{L}}=\frac{1-a}{1+b-a}, U_{\mathrm{R}}=\frac{d}{1+d-c} \tag{7}$$

式中，a、b、c、d 是梯形模糊数的数值。

$$f_{\mathrm{FPS}}=\frac{U_{\mathrm{R}}+(1-U_{\mathrm{L}})}{2} \tag{8}$$

则第 i 个事件的最终概率值 P（X_i）为

$$P(X_i)=\begin{cases}\dfrac{1}{10^m} & f_{\mathrm{FPS}}\neq 0\\ 0 & f_{\mathrm{FPS}}=0\end{cases} \tag{9}$$

$$m=\left(\frac{1-f_{\mathrm{FPS}}}{f_{\mathrm{FPS}}}\right)^{\frac{1}{3}}\times 2.301 \tag{10}$$

3 机床润滑系统的模糊故障树分析

3.1 结构和功能分析

VDF1000E 型立式加工中心润滑系统示意图如图 2 所示，该机床采用集中润滑装置作为润滑系统。作为精密制造装备的关键保障模块，其核心功能在于通过调控实现摩擦界面的优化，该系统能够自适应调节各润滑点的注油周期与注油量。相较于传统润滑方式，该系统通过

建立稳定油膜层，可有效降低导轨、丝杠等关键运动副的摩擦系数，延长关键运动部件的使用寿命，抑制温升变形与异常磨损，同时降低能耗。通过总线与机床数控系统的数据交互，显著提升复杂工况下的设备可靠性。

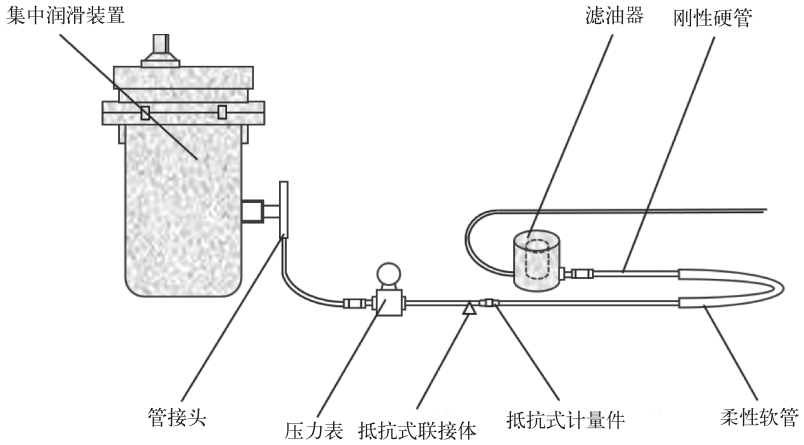

图 2　VDF1000E 型立式加工中心润滑系统示意图

3.2　建立润滑系统故障树

基于历史故障模式建立润滑系统故障树模型，将系统级失效模式设定为故障树顶事件。按照故障传导机理，根据故障传播路径确定中间事件层级结构将直接引发顶事件的失效模式作为一级中间事件，逐层分解至不可再分的底事件。通过逻辑门运算符构建事件关联，建立完整的故障逻辑关系网络。

在事件独立性假设前提下，选定润滑系统不工作作为顶事件研究对象。以润滑不充分、油压问题、流量问题和泄露为一级中间事件，最终形成包含 31 个基本事件的故障树。如图 3 所示，具体信息见表 3、4。

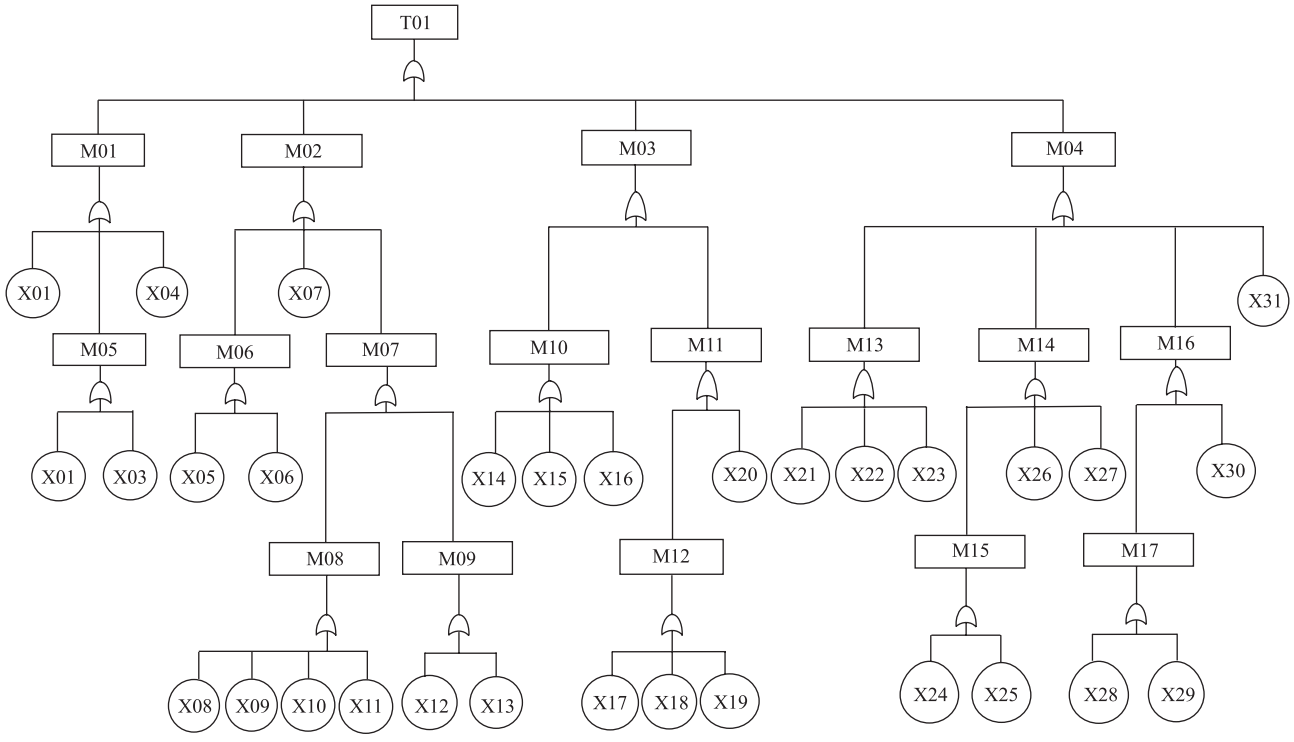

图 3　润滑系统不工作故障树

表 3　故障树中间事件说明

代码	事件名称	代码	事件名称
M01	润滑不充分	M10	供油时间间隔短
M02	油压问题	M11	单次供油量大
M03	流量问题	M12	没调试好
M04	泄露	M13	部分元件漏油
M05	油泵故障	M14	元件与管路连接处漏油
M06	装配问题	M15	联接松动
M07	管路堵塞	M16	油管管路漏油
M08	油箱缺油	M17	油管本身问题
M09	油粘度高		

表 4　故障树底事件说明

代码	事件名称	代码	事件名称
X01	油液分散不均	X17	手动拉杆调节太高
X02	油泵故障	X18	调节标定位置不准确
X03	传动故障	X19	调节处锁紧螺母失效
X04	抵抗连接件质量问题	X20	泵容积有问题
X05	元件混装	X21	压力表质量不达标
X06	密封不紧泄压	X22	滤油器质量不达标
X07	压力表显示错误	X23	抵抗连接件质量问题
X08	油箱漏油	X24	卡套密封不好
X09	电气系统故障	X25	卡套装配不良
X10	液位发讯器故障	X26	接头螺纹间隙大
X11	破损导致杂质进入	X27	机械振动导致
X12	长时间未加入新油	X28	油管质量不达标
X13	油液变质	X29	管夹头质量不达标
X14	泵电机故障	X30	接头质量不达标
X15	设定时间太短	X31	油箱质量不达标
X16	I/O 接口通信不正常		

3.3　专家对基本事件的判断

从产品研发、型式试验及工艺制造三个关键部门各遴选一名人员参与评估。分别求得三位专家的权重，具体人员资质背景与权重分布见表 5。

表 5　专家构成

序号	职称	学历	工龄	权重
专家 1	高级工程师	研究生	16	0.431
专家 2	工程师	本科生	9	0.314

经现场工况数据采集与特征提取，由 3 位领域专家构成的评估小组对故障树底层节点进行语义评价，评价结果见表 6。

表 6　各个基本事件的专家评分

代码	专家 1	专家 2	专家 3	代码	专家 1	专家 2	专家 3
X01	VL	VL	VL	X17	VL	VL	L
X02	VL	L	VL	X18	VL	VL	VL
X03	VL	VL	VL	X19	VL	L	VL
X04	VL	VL	L	X20	VL	VL	VL
X05	VL	VL	VL	X21	VL	VL	L
X06	VL	VL	VL	X22	VL	L	VL
X07	VL	VL	VL	X23	VL	VL	VL
X08	VL	L	VL	X24	VL	VL	VL
X09	VL	L	L	X25	VL	VL	VL
X10	L	VL	VL	X26	VL	VL	L
X11	VL	VL	VL	X27	VL	L	VL
X12	L	L	VL	X28	L	VL	VL
X13	VL	L	VL	X29	L	VL	VL
X14	VL	VL	VL	X30	VL	VL	VL
X15	VL	VL	L	X31	VL	L	VL
X16	VL	VL	VL				

表 7　基本事件概率

代码	概率	代码	概率
X01	$1.103\,2\times10^{-5}$	X17	$4.912\,1\times10^{-5}$
X02	$5.519\,3\times10^{-5}$	X18	$1.103\,2\times10^{-5}$
X03	$1.103\,2\times10^{-5}$	X19	$5.519\,3\times10^{-5}$
X04	$4.912\,1\times10^{-5}$	X20	$1.103\,2\times10^{-5}$
X05	$1.103\,2\times10^{-5}$	X21	$4.912\,1\times10^{-5}$
X06	$1.103\,2\times10^{-5}$	X22	$5.519\,3\times10^{-5}$
X07	$1.103\,2\times10^{-5}$	X23	$1.103\,2\times10^{-5}$
X08	$5.519\,3\times10^{-5}$	X24	$1.103\,2\times10^{-5}$
X09	$1.468\,3\times10^{-4}$	X25	$1.103\,2\times10^{-5}$
X10	$6.681\,1\times10^{-5}$	X26	$4.912\,1\times10^{-5}$
X11	$1.103\,2\times10^{-5}$	X27	$5.519\,3\times10^{-5}$
X12	$1.843\,0\times10^{-4}$	X28	$6.681\,1\times10^{-5}$
X13	$5.519\,3\times10^{-5}$	X29	$6.681\,1\times10^{-5}$
X14	$1.103\,2\times10^{-5}$	X30	$1.103\,2\times10^{-5}$
X15	$4.912\,1\times10^{-5}$	X31	$5.519\,3\times10^{-5}$
X16	$1.103\,2\times10^{-5}$		

3.4 基本事件概率计算

通过运算将专家评价转化为模糊可能性，经去模糊化处理获得基本事件发生概率，结果汇总于表 7。

3.5 顶事件概率计算

针对润滑系统故障演化机理，本研究采用逻辑或门（OR-gate）构建故障树。因此，根据布尔代数原理，系统级故障概率可依据式（11）进行运算。

$$P(X)=1-\prod_{i=1}^{n}[1-P(x_i)] \tag{11}$$

式中，X 为输出事件；x_i 为输入事件，i=1, 2, …, n；P（x_i）为输入事件的概率。

根据表 7 所示的各基本事件，可确定故障树顶事件发生概率为：$P_T = 1.317\ 151 \times 10^{-3}$。

3.6 基本事件重要度分析

采用重要度指标来分析基本事件对润滑系统不工作的影响程度，找出关键故障因素。按排序前五位的故障模式依次为：X12 长时间未加入新油，X09 电气系统故障，X29 管夹头质量不达标，X10 液位发讯器故障，X28 油管质量不达标；重要度分别为 0.998 866 94，0.998 829 51，0.998 749 58，0.998 749 58，0.998 749 58。

4 结束语

针对故障数据不足及信息缺失等不确定性问题，本文通过梯形模糊数对概率进行量化，计算基本事件的发生概率以及重要度指标。通过将所提方法应用于 VDF1000E 型立式机床润滑系统的可靠性分析中，建立了润滑系统不工作故障树并展开定量分析，最终确定润滑系统发生故障的概率为 $1.317\ 151 \times 10^{-3}$。通过故障模式影响分析，所得结论可为系统可靠性建模与预防性维护策略制定提供理论支撑。

参考文献

[1] TANAKA H，FAN L T，LAI F S，et al. Fault-tree analysis by fuzzy probability[J]. IEEE Transactions on Reliability，1983，R-32 (5)：453-457.

[2] SAWYER J P，RAO S S. Fault tree analysis of fuzzy mechanical system[J]. Microelectronics and Reliability，2015，34 (4)：653-667.

[3] DUAN R，FAN J. A novel diagnosis strategy for braking system of urban rail transit based on fuzzy set and dynamic fault tree[J]. ICIC Express Letters，2014，8 (7)：1809-1814.

[4] 杨思航．基于多态模糊故障树的纯电动客车高压电气系统可靠性分析 [D]．长春：吉林大学，2016.

[5] JING Z. Reliability analysis of high voltage electric system of pure electric passenger car based on polymorphic fuzzy fault tree[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems，2020，38 (4).

[6] 李钦奉，薛晓昕，朱永梅，等．基于故障树的机床设备润滑系统可靠性分析 [J]. 组合机床与自动化加工技术，2018 (6)：65-67.

[7] 谭润泽，李晓彬，杜志鹏，等．基于模糊理论的 PMT 水下防爆试验故障树分析 [J]．振动．测试与诊断，2020，40 (5)：969-975，1027.

[8] 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.

收稿日期：2025-03-14