

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.03.003

基于多色集合的数控机床故障诊断模型构建与推理方法

高新勤¹, 张艳平¹, 杨明顺¹, 李言¹, 王一珺²

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 数控机床故障具有层次性和相关性等复杂特点, 构建形式化的数控机床故障诊断模型并推理出故障原因, 是进行故障诊断的重要过程。本文基于多色集合理论, 提出数控机床故障诊断形式化结构模型的构建与推理方法。在阐述多色集合基本概念的基础上, 构建了基于多色集合的数控机床故障诊断层次结构模型; 利用多色集合的元素、个人颜色、统一颜色以及布尔矩阵, 从横向和纵向两个方向对该模型进行了形式化描述; 给出了数控机床故障诊断模型的推理算法流程, 实现了自顶向下的自动推理。最后以刀架系统故障诊断建模与推理过程为例, 验证了所提理论和方法的正确性和有效性。

关键词: 多色集合; 数控机床; 故障诊断; 建模与推理; 刀架系统

中图分类号: TH17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2016)03-0265-06

Modeling and reasoning method of fault diagnosis of CNC machine tools based on polychromatic sets

GAO Xinqin¹, ZHANG Yanping¹, YANG Mingshun¹, LI Yan¹, WANG Yijun²

(1. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The faults of CNC machine tools have the complex characteristics of hierarchy and correlation. It's an important process of fault diagnosis of CNC machine tools to establish and reason a formal structure model of fault diagnosis. Based on polychromatic sets theory, a formal modeling and reasoning method of fault diagnosis for CNC machine tools was proposed. The basic concepts of polychromatic sets (PS) were introduced and a PS-based hierarchical structure model of fault diagnosis for CNC machine tools was established. On the basis of the element, individual pigmentation and unified pigmentation, the structure model of fault diagnosis for CNC machine tools is described formally from horizontal and vertical direction. The reasoning algorithm of fault diagnosis model for CNC machine tools was proposed, and the top-down of fault diagnosis model was reasoned automatically. Finally, the fault model of tool carrier system is used as an example to illustrate the correctness and feasibility of the proposed theory and method.

Key words: polychromatic sets; numerical control machine tool; fault diagnosis; modeling and reasoning; tool carrier system

数控机床故障部件层次结构复杂, 故障模式与故障原因之间具有多关联特性^[1]。故障诊断模型是故障诊断推理的基础, 已建立的数控机床故障诊断

模型主要包括贝叶斯网络模型、Petri 网模型和本体模型等^[2-4]。贝叶斯网络适用于不确定性故障知识表达和故障信息间复杂关系推理, 但构造网络结构

收稿日期: 2016-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575443); 陕西省教育厅重点实验室科学研究资助项目(16JS075); 西安理工大学青年科技创新团队建设资助项目(102-211408)

作者简介: 高新勤, 男, 博士, 副教授, 研究方向为制造信息工程。E-mail: gaoxinqin@xaut.edu.cn

困难,推理计算复杂。Petri 网既能描述数控机床系统结构,又能运用产生式规则对故障进行推理,但存在故障组合爆炸、信息匹配冲突等问题。本体模型能够表示故障知识纵向属性分类和关联关系,但本体是对实体的概念抽象,缺少对“概念化”的明确定义。

为了拓展传统集合在复杂系统建模中的描述能力,俄罗斯 Pavlov 教授提出了多色集合(Polychromatic Sets, PS)理论^[5-6],为数控机床故障诊断模型构建与推理分析提供了有效方法^[7]。然而,现有基于多色集合的故障诊断模型没有考虑故障的相关性,当模型层数及节点个数较多时推理过程变得异常复杂。本文基于多色集合理论构建数控机床故障诊断模型,并对其进行形式化描述和推理,最后以数控机床刀架系统的故障诊断为例,验证所提理论和方法的正确性。

1 多色集合理论

传统集合是由元素组成的整体,集合中的元素仅仅是名字不同。在多色集合中,集合整体和组成集合的元素被涂上一些不同的“颜色”,用来表示研究对象及其组成要素的性质或属性^[8]。经典多色集合由 6 个基本成分组成,其数学表达式为

$$PS = (A, F(a), F(A), [A \times F(a)], [A \times F(A)], [A \times A(F)]) \quad (1)$$

在公式(1)中, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 表示多色集合中元素的组成; $F(a) = \{f_1, f_2, \dots, f_q\}$, 表示所有元素的个人着色; $F(A) = \{F_1, F_2, \dots, F_p\}$, 表示多色集合的统一着色; 布尔矩阵 $[A \times F(a)]$ 、 $[A \times F(A)]$ 和 $[A \times A(F)]$ 分别表示所有元素与个人着色、统一着色以及统一着色的体之间的关系。

在用多色集合构建数控机床故障诊断模型时,首先将最底层故障原因定义为集合 A ,同时引入多色集合中的 4 个布尔矩阵:

1) 布尔矩阵 $[F(a) \times F(A)]$ 和 $[A \times F(A)]$

$[F(a) \times F(A)]$ 是多色集合所有元素的个人着色 $F(a)$ 与统一着色 $F(A)$ 形成的布尔矩阵,可表示为:

$$[F(a) \times F(A)] = \begin{bmatrix} F_1 & \dots & F_j & \dots & F_p \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{i,1} & \dots & c_{i,j} & \dots & c_{i,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{q,1} & \dots & c_{q,j} & \dots & c_{q,p} \end{bmatrix} \begin{matrix} f_1 \\ \vdots \\ f_i \\ \vdots \\ f_q \end{matrix} \quad (2)$$

在布尔矩阵(2)中,如果个人颜色 f_i 影响到统一颜色 F_j 的存在,那么 $c_{i,j} = 1$, 否则 $c_{i,j} = 0$ 。在数控机床故障诊断模型中,该布尔矩阵主要用于描述不同层故障模式之间的层次性关系。特别地,故障模式与最底层故障原因之间的层次性关系采用多色集合中元素与统一着色形成的布尔矩阵 $[A \times F(A)]$ 表示。

2) 布尔矩阵 $[F(a) \times F(a)]$ 和 $[A \times A]$

$[F(a) \times F(a)]$ 是多色集合所有元素的个人着色 $F(a)$ 的自相关布尔矩阵,可表示为:

$$[F(a) \times F(a)] = \begin{bmatrix} f_1 & \dots & f_j & \dots & f_q \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{1,1} & \dots & c_{1,j} & \dots & c_{1,q} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{i,1} & \dots & c_{i,j} & \dots & c_{i,q} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{q,1} & \dots & c_{q,j} & \dots & c_{q,q} \end{bmatrix} \begin{matrix} f_1 \\ \vdots \\ f_i \\ \vdots \\ f_q \end{matrix} \quad (3)$$

在布尔矩阵(3)中,如果个人颜色 f_i 与个人颜色 f_j 存在相关关系,那么 $c_{i,j} = 1$, 否则 $c_{i,j} = 0$ 。在数控机床故障诊断模型中,该布尔矩阵主要用于描述相同层故障模式之间的相关性关系。特别地,最底层故障原因之间的相关性关系采用多色集合中元素的自相关布尔矩阵 $[A \times A]$ 表示。

2 基于多色集合的数控机床故障诊断结构模型

2.1 数控机床及其故障的层次性分析

数控机床在结构上具有层次性特点,其故障可以分解为故障部件(结构单元)和故障模式两部分^[9]。在用多色集合构建数控机床故障诊断模型,尤其是机械故障诊断模型时,对数控机床故障进行分层处理,用一个故障节点同时表示数控机床结构单元和故障模式,如图 1 所示。

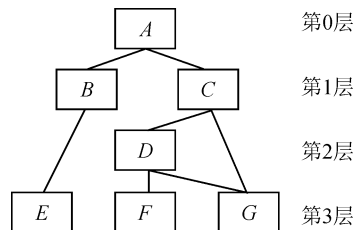


图 1 数控机床故障的层次关系
Fig. 1 Hierarchical relationship of faults in CNC machine tool

在图 1 中,不同层故障之间在逻辑上具有因果关系,低层故障是导致高层故障发生的原因,但是故

障原因节点不一定在故障节点的相邻层上。最底层为故障原因集 A ,它是各故障模式进行故障原因推理时的终止条件。

2.2 数控机床故障节点间的关联关系

数控机床故障具有纵向传播特性,即高层某一结构单元故障可能由低层与之相关的一个故障独立引起(“或门型”故障)或多个故障共同引起(“与门型”故障),不同层故障模式之间存在因果关系。数控机床故障也具有横向传播特性,即某一结构单元故障与同层其它结构单元故障相关联,相同层故障模式之间存在相关关系。

这里对数控机床故障中最常见的“或门型”故障进行重点研究,主要包括 3 种约束关系:不同层故障之间的直接因果关系,用约束 C_1 表示;相同层故障之间的相关关系,用约束 C_2 表示;不同层故障之间的间接因果关系,用约束 C_3 表示。在实际应用中,约束 C_1 表示数控机床同一子系统中不同层结构单元故障模式的直接因果关系;约束 C_2 表示数控机床系统中同一层结构单元故障模式间的关联关系;约束 C_3 表示数控机床不同子系统间不同层结构单元故障模式间的间接因果关系。三种约束关系如图 2 所示。

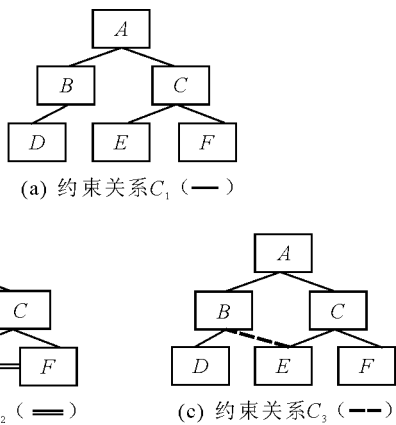


图 2 数控机床故障之间的三种约束关系

Fig. 2 Three kinds of constraint relations of faults in CNC machine tool

2.3 数控机床故障诊断层次结构模型

根据数控机床故障之间的层次特性和关联关系,采用多色集合理论构建数控机床故障诊断层次结构模型如图 3 所示。从层次结构的角度的分析,高层故障由低层故障导致,即不同层故障之间在逻辑上具有因果关系。从具体的某个故障角度分析,如图 3 中第 k 层的第 i_k 个故障 $F_{i_k}^k$,它的发生由 k 层以下的一个或多个故障引起,同时它的发生也会导致第 k 层以上的一个或多个故障发生。从信息系统层

次结构模型整体角度分析,该模型反映了已知故障结果寻求故障原因的自顶向下的追溯与推理过程。

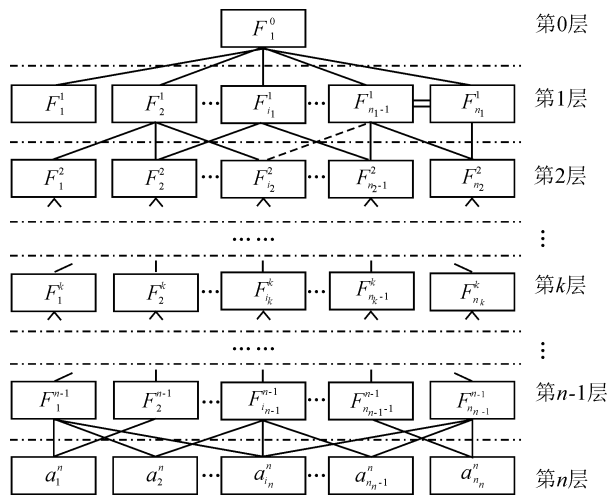


图 3 数控机床故障诊断层次结构模型

Fig. 3 Hierarchical structure model of fault diagnosis for CNC machine tool

3 数控机床故障结构模型的形式化描述与推理

3.1 数控机床故障诊断结构模型的形式化描述

1) 水平横向

在图 3 中,将处于同一层次(第 k 层)的所有故障节点组成的集合记为 F^k ,其表达式为:

$$F^k = \{F_1^k, F_2^k, \dots, F_{i_k}^k, \dots, F_{n_k}^k\} \quad (4)$$

式中, k 为层次结构模型的当前层数, $k \in [1, n]$; n_k 为第 k 层的所有节点个数。

在数控机床故障诊断模型中,同一层故障模式之间的相关性关系 C_2 ,采用多色集合中个人着色的自相关布尔矩阵 $[F(a) \times F(a)]$ 进行描述,可表示为:

$$[F^k \times F^k] = \begin{bmatrix} c_{1,1} & \dots & c_{1,j_k} & \dots & c_{1,n_k} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{i_k,1} & \dots & c_{i_k,j_k} & \dots & c_{i_k,n_k} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n_k,1} & \dots & c_{n_k,j_k} & \dots & c_{n_k,n_k} \end{bmatrix} \begin{matrix} F_1^k \\ \vdots \\ F_{i_k}^k \\ \vdots \\ F_{n_k}^k \end{matrix} \quad (5)$$

在布尔矩阵(5)中,如果故障模式 $F_{i_k}^k$ 影响到故障模式 $F_{j_k}^k$,即存在相关性关系 C_2 ,那么 $c_{i_k,j_k} = 1$,否则 $c_{i_k,j_k} = 0$ 。特别地,最底层故障原因之间的相关性关系采用自相关布尔矩阵 $[A \times A]$ 描述。

2) 垂直纵向

在图 3 所示的数控机床故障诊断模型中,不同层故障模式之间的层次性关系,包括直接分解关系 C_1 和间接分解关系 C_3 ,采用多色集中个人着色和统一着色形成的布尔矩阵 $[F(a) \times F(A)]$ 进行描述,即:

$$[F^k \times F^m] = \begin{bmatrix} F_1^m & \cdots & F_{i_m}^m & \cdots & F_{n_m}^m \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{1,1} & \cdots & c_{1,i_m} & \cdots & c_{1,n_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{i_k,1} & \cdots & c_{i_k,i_m} & \cdots & c_{i_k,n_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n_k,1} & \cdots & c_{n_k,i_m} & \cdots & c_{n_k,n_m} \end{bmatrix} \begin{matrix} F_1^k \\ \vdots \\ F_{i_k}^k \\ \vdots \\ F_{n_k}^k \end{matrix} \quad (6)$$

在布尔矩阵(6)中,如果故障 $F_{i_k}^k$ 的发生导致故障 $F_{i_m}^m$ 发生,即存在层次性关系,那么 $c_{i_k,i_m} = 1$, 否则 $c_{i_k,i_m} = 0$ 。特别地,故障模式与最底层故障原因之间的层次性关系采用布尔矩阵 $[A \times F(A)]$ 表示。

3.2 数控机床故障诊断结构模型的形式化推理

对故障诊断模型进行推理的目的在于根据已知的故障结果自顶向下寻求导致故障发生的原因。基于多色集合的数控机床故障诊断层次结构模型,其形式化推理算法流程如图 4 所示,主要推理步骤如下。

步骤 1: 初始化数控机床故障诊断模型,定义初始推理条件,并令第 1 层为当前层,该层故障为当前故障,即 $F^k = F^1, F_{i_k}^k = F_{i_1}^1$ 。

步骤 2: 按照 $[F(a) \times F(a)]$ 或 $[A \times A]$ 进行同层搜索,若存在相关关系 C_2 ,则将其添加到故障原因集 R 中,被搜索层下移,即 $m = k + 1$ 。

步骤 3: 按照 $[F(a) \times F(A)]$ 或 $[A \times F(A)]$ 进行异层搜索,若存在直接分解关系 C_1 或间接分解关系 C_3 ,则将其添加到故障原因集 R 中,被搜索层下移,即 $m = k + 1$ 。

步骤 4: 在以上步骤中,被搜索层每下移一次,都要判断搜索是否未超过最底层,即 $m \leq n$,如果是,跳转至步骤 3 继续异层搜索,直至超过最底层;如果否,跳转至步骤 5。

步骤 5: 判断原因集 R 中是否包含非最底层故障原因,即原因集 R 与最底层故障原因集 A 的差集 $(R-A)$ 是否为非空集合,如果是,按照原因集 R 中一个故障节点所在层数 s 重新定义当前层和当前故障,即 $F^k = F^s, F_{i_k}^k = F_{i_s}^s$,并将其从原因集 R 中剔除,之后跳转至步骤 2 继续同层搜索;否则,输出最终的原因集,故障诊断推理程序结束。

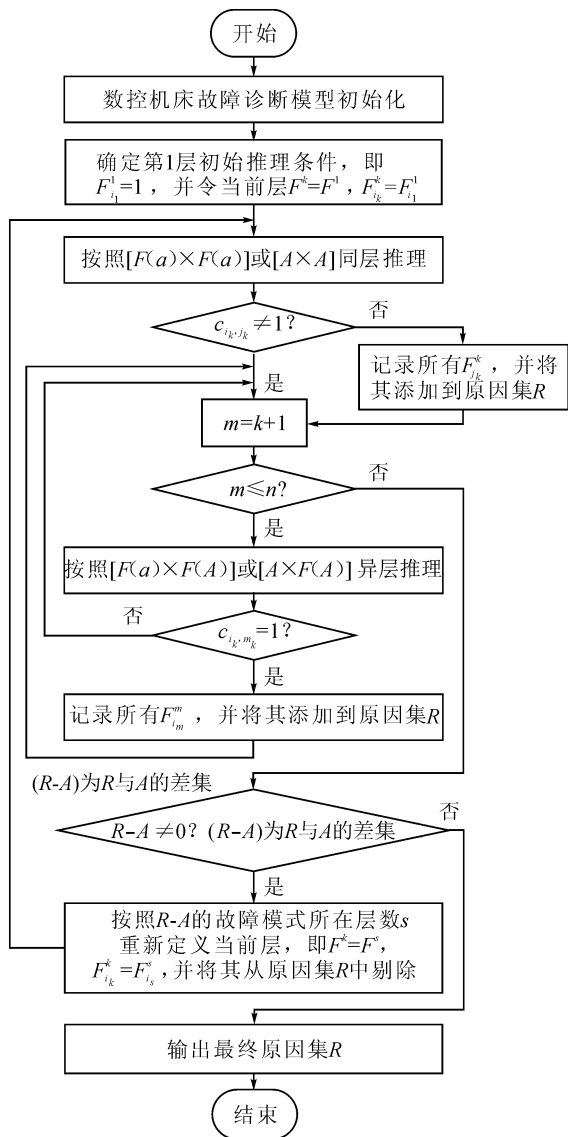


图 4 数控机床故障诊断模型推理算法流程
Fig. 4 Reasoning algorithm flow of fault diagnosis model for CNC machine tool

4 应用实例分析

在数控机床故障中,刀架系统的故障率最高,占据了整个故障的 30% 以上^[10]。提高刀架系统的故障诊断能力是数控机床可靠运行的保证。下面以数控机床刀架系统故障诊断为例,对基于多色集合的数控机床故障诊断建模及推理方法进行验证。

4.1 刀架系统故障诊断结构模型构建

数控机床刀架系统存在刀架不转动、转不停、定位不准、锁不紧、转动异响等五种故障模式,每种故障模式又可以进一步分解为子故障模式,直至故障原因。在这些故障模式中,刀架锁不紧与刀架转动异响之间存在同层相关性关系,即约束关系 C_2 ; 刀架转动异响与刀架传动机构故障之间存在间接分解

关系,即约束关系 C_3 ;其余各层故障模式之间存在直接分解关系,即约束关系 C_1 。通过对故障模式的分解和约束关系的分析,构建基于多色集合的数控机床刀架系统故障诊断层次结构模型如图 5 所示。

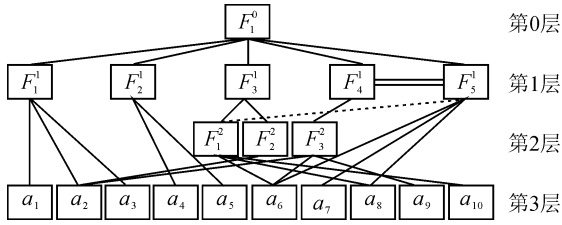


图 5 数控机床刀架系统故障诊断层次结构模型
Fig. 5 Hierarchical structure model of fault diagnosis for tool carrier system

从图 5 可知,数控机床刀架系统故障诊断模型共包含 4 个层次,各层节点所代表的物理含义如表 1 所示。

表 1 节点的物理含义
Tab. 1 Physical meanings of nodes

节点	物理含义	节点	物理含义
F_0^0	刀架系统故障	a_2	严重操作失误
F_1^1	刀架不转动	a_3	电路故障
F_2^1	刀架转不停	a_4	接收发信号故障
F_3^1	刀架定位不准	a_5	霍尔元件故障
F_4^1	刀架锁不紧	a_6	制造误差
F_5^1	刀架转动异响	a_7	固定件松动
F_1^2	刀架传动机构故障	a_8	齿间有异物
F_2^2	刀架反靠故障	a_9	反锁时间有误
F_3^2	刀架锁紧机构故障	a_{10}	装配误差
a_1	转动电机故障		

从水平横向分析该模型:第 0 层, $F^0 = \{F_0^0\}$, 包含 1 个节点;第 1 层, $F^1 = \{F_1^1, F_2^1, F_3^1, F_4^1, F_5^1\}$, 包含 5 个节点;第 2 层, $F^2 = \{F_1^2, F_2^2, F_3^2\}$, 包含 3 个节点;第 3 层为最底层原因集, $F^3 = A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}\}$, 包含 10 个节点。

从垂直纵向分析该模型: $F_0^0 = \{F_1^1, F_2^1, F_3^1, F_4^1, F_5^1\}$, $F_1^1 = \{a_1, a_2, a_3\}$, $F_2^1 = \{a_4, a_5\}$, $F_3^1 = \{F_1^2, F_2^2\}$, $F_4^1 = \{F_3^2\}$, $F_5^1 = \{a_6, a_7, a_8\}$, $F_1^2 = \{a_6, a_8, a_{10}\}$, $F_2^2 = \{a_2\}$, $F_3^2 = \{a_2, a_6, a_9\}$ 。

4.2 刀架系统故障诊断模型描述与推理

采用多色集合中的布尔矩阵 $[F(a) \times F(A)]$ 或 $[A \times F(A)]$, 描述刀架系统故障诊断结构模型中不同层节点之间的层次性关系, 包括直接分解关系 C_1 和间接分解关系 C_3 , 建立推理矩阵如下: $M_{0,1} = [F^0 \times F^1]$, $M_{1,2} = [F^1 \times F^2]$, $M_{1,3} = [F^1 \times F^3]$, $M_{2,3} = [F^2 \times F^3]$ 。

采用多色集合中的布尔矩阵 $[F(a) \times F(a)]$ 或 $[A \times A]$, 描述刀架系统故障诊断结构模型中相同层节点之间的相关关系 C_2 , 建立推理矩阵: $M_{1,1} = [F^1 \times F^1]$, $M_{2,2} = [F^2 \times F^2]$, $M_{3,3} = [F^3 \times F^3]$ 。 $M_{2,2}$ 和 $M_{3,3}$ 因无元素值 $c_{i_k, j_k} = 1$ 而不予考虑。

为了方便表达, 将以上 5 个布尔矩阵画在同一张图中, 得到如图 6 所示的推理关系矩阵。

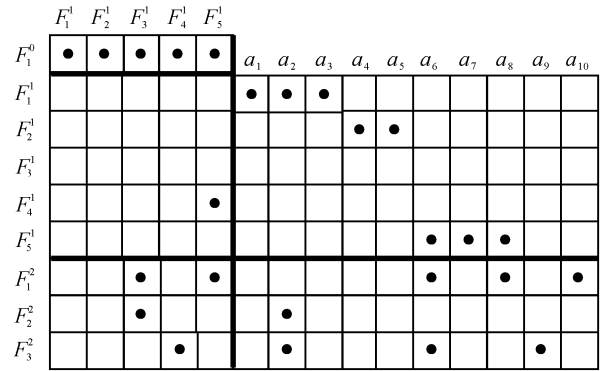


图 6 数控机床刀架系统故障诊断推理关系矩阵
Fig. 6 Reasoning relation matrix of fault diagnosis for tool carrier system

依据推理关系矩阵, 数控机床刀架发生故障后的推理过程如下。

1) 假定刀架故障为刀架不转动, 首先将故障模式用布尔矢量表示为 $F^1 = [10000]$; 然后依次搜索布尔矩阵 $M_{1,1}, M_{1,2}$ 和 $M_{1,3}$, 得到布尔矢量 $F^3 = [1110000000]$ 。此时当前层为最底层, 推理过程结束, 所以引起数控机床刀架不转动的原因可能有 3 个, 它们是 a_1 (转动电机故障)、 a_2 (严重操作失误) 和 a_3 (电路故障)。同理, 引起数控机床刀架转不停的原因可能有 2 个, 它们是 a_4 (接收发信号故障) 和 a_5 (霍尔元件故障)。

2) 假定刀架故障为刀架定位不准, 首先将故障模式用布尔矢量表示为 $F^1 = [00100]$; 然后依次搜索布尔矩阵 $M_{1,1}, M_{1,2}, M_{1,3}$ 和 $M_{2,3}$, 得到布尔矢量 $F^3 = [0100010101]$ 。此时当前层为最底层, 推理过程结束, 所以引起数控机床刀架定位不准的原因可能有 4 个, 它们是 a_2 (严重操作失误)、 a_6 (制造误差)、 a_8 (齿间有异物) 和 a_{10} (装配误差)。同理, 引起数控机床刀架锁不紧的原因可能有 3 个, 它们是 a_2 (严重操作失误)、 a_6 (制造误差) 和 a_9 (反锁时间有误)。

3) 假定刀架故障为刀架转动异响, 首先将故障模式用布尔矢量表示为 $F^1 = [00001]$; 然后搜索布尔矩阵 $M_{1,1}$ 得到 $F^1 = [00010]$, 将 F_4^1 添加到原因集 R ; 搜索布尔矩阵 $M_{1,2}$ 得到 $F^2 = [100]$, 将 F_1^2 添加

到原因集 R ; 搜索布尔矩阵 $M_{1,3}$ 得到 $F^3 = [0000011100]$, 将 a_6 、 a_7 和 a_8 添加到原因集 R ; 搜索布尔矩阵 $M_{1,1}$ 得到 $F^1 = [00000]$, 把 F_4^1 从 R 中剔除; 搜索布尔矩阵 $M_{1,2}$ 得到 $F^2 = [001]$, 将 F_3^2 添加到原因集 R ; 搜索布尔矩阵 $M_{1,3}$ 得到 $F^3 = [0000000000]$, 没有故障原因添加到原因集 R ; 搜索布尔矩阵 $M_{2,2}$ 得到 $F^2 = [000]$, 把 F_1^2 从 R 中剔除; 搜索布尔矩阵 $M_{2,3}$ 得到 $F^3 = [0000010101]$, 将 a_6 、 a_8 和 a_{10} 添加到原因集 R ; 搜索布尔矩阵 $M_{2,2}$ 得到 $F^2 = [000]$, 把 F_3^2 从 R 中剔除; 搜索布尔矩阵 $M_{2,3}$ 得到 $F^3 = [0100010010]$, 将 a_2 、 a_6 和 a_9 添加到原因集 R 。此时原因集 R 中不包含非最底层故障原因, 推理过程结束。所以引起数控机床刀架转动异响的原因可能有 6 个, 它们是 a_2 (严重操作失误)、 a_6 (制造误差)、 a_7 (固定件松动)、 a_8 (齿间有异物)、 a_9 (反锁时间有误) 和 a_{10} (装配误差)。

5 结 语

数控机床故障具有层次性、相关性等特点, 诊断过程复杂, 诊断难度大。本文基于多色集合理论, 提出了数控机床故障诊断形式化结构模型的构建与推理方法。阐述了多色集合的基本概念, 构建了基于多色集合的数控机床故障诊断层次结构模型; 利用多色集合布尔矩阵, 从横向和纵向两个方向对该模型进行了形式化描述, 给出了数控机床故障诊断模型推理算法流程, 实现了自顶向下的推理; 以刀架系统故障诊断为例, 验证了基于多色集合的数控机床故障诊断建模与推理方法的正确性和有效性。需要指出的是, 本文提出的故障诊断建模与推理方法, 主要适合于数控机床机械故障的诊断, 且推理得到的是逻辑层面可能导致故障发生的原因集合, 具体的故障原因还需要从数量层面做进一步分析。另外, “与门型”故障和“混合型”故障还需要采用多色集合的“合取运算”和“体运算”进行建模与推理, 这是后续研究的方向。

参考文献:

[1] 王家海, 黄江涛, 沈斌, 等. 数控机床智能故障诊断技术的研究现状与展望[J]. 机械制造, 2014, 52(5): 30-32.
WANG Jiahai, HUANG Jiangtao, SHEN Bin, et al. Research status of intelligent fault diagnosis for CNC machine tools and its prospect[J]. Machinery, 2014, 52(5): 30-32.

[2] TOBON-MEJIA D A, MEDJAHER K, ZERHOUNI N. CNC machine tool's wear diagnostic and prognostic by using dynamic Bayesian networks[J]. Mechanical

Systems and Signal Processing, 2012, 28: 167-182.

[3] 谢刚. 基于模糊推理的五轴数控机床故障预警系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
XIE Gang. Research on early warning system of five-axis CNC machine failure based on fuzzy reasoning[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.

[4] 王家海, 黄江涛, 沈斌, 等. 数控机床故障诊断本体建模研究[J]. 精密制造与自动化, 2014, 198(2): 32-36.
WANG Jiahai, HUANG Jiangtao, SHEN Bin, et al. Research on ontology modeling of CNC Machine fault diagnosis[J]. Precise Manufacturing & Automation, 2014, 198(2): 32-36.

[5] 高新勤, 李宗斌, 赵姗姗. 基于多色集合理论的概念设计建模和推理技术研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(3): 255-259.
GAO Xinqin, LI Zongbin, ZHAO Shanshan. Study on modeling and reasoning technology of conceptual design based on poly chromatic sets[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(3): 255-259.

[6] GAO Xinqin, WANG Xueping, LI Yan, et al. Workflow dynamic change and instance migration approach based on polychromatic sets theory[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2016, 29(4): 386-405.

[7] 赵亮亮, 肖明清, 盛晟, 等. 基于多色集与概念格的多故障推理研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2690-2699.
ZHAO Liangliang, XIAO Mingqing, SHENG Sheng, et al. Study on reasoning of multi-failure based on polychromatic sets and concept lattice[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(12): 2690-2699.

[8] LI Zongbin, XU Lida. Polychromatic sets and its applications in simulating complex objects and systems[J]. Computers & Operations Research, 2003, 30(6): 851-860.

[9] 盛博, 邓超, 熊尧, 等. 基于图论的数控机床故障诊断方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(6): 1559-1570.
SHENG Bo, DENG Chao, XIONG Yao, et al. Fault diagnosis for CNC machine tool based on graph theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(6): 1559-1570.

[10] 张华, 房议. 基于故障树贝叶斯网络的数控刀架故障研究[J]. 科技资讯, 2015, 13(20): 4-6.
ZHANG Hua, FANG Yi. Research on the fault of CNC turret based on fault tree Bayesian network[J]. Science & Technology Information, 2015, 13(20): 4-6.