

数控机床局部机械故障多尺度自动化检测方法

屈福康¹,谢胜超¹,屈昕²

(1. 广州华立学院,广东 广州 511325; 2. 中山市阜沙镇政府,广东 广州 511325)

摘要:提出一种多尺度故障特征描述的自动化检测方法。采集数控机床振动信号,利用硬、软阈值消除其中的噪声;凭借多色集合理论构建局部机械故障多尺度层次传播图,对同一层次和不同层次间的节点故障展开多尺度分析,形成单向传递的层次结构;从水平横向和垂直纵向两个方向上,利用布尔矩阵分析节点故障之间的相关性、直接分解关系以及间接分解关系,实现局部机械故障的多尺度描述,进而完成自动化检测。在仿真测试中,这种多尺度故障描述检测方法展现出了较高的准确性和检测效率以及较低检测误差,与单一尺度振动信号阈值的检测方法对比,检测准确率明显提高。

关键词:多尺度;单一阈值标准;局部机械故障;故障层次传播图;多色集合理论;布尔矩阵

中图分类号:TP306.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)05-0236-04

Multi-scale Automatic Detection Method for Local Mechanical Faults of CNC Machine Tools

QU Fukang¹, XIE Shengchao¹, QU Xin²

(1. Guangzhou Huali College, Guangzhou 511325, China;

2. Fusha Town Government of Zhongshan City, Guangzhou 511325, China)

Abstract: An automatic detection method based on multi-scale fault feature description is proposed. Vibration signals of CNC machine tools are collected, and hard and soft thresholds are applied to eliminate noise. With the polychromatic set theory, a multi-scale hierarchical propagation diagram of local mechanical faults is constructed, and multi-scale analysis is carried out for node faults at the same level and between different levels to form a one-way transmission hierarchical structure. From the horizontal and vertical directions, Boolean matrix is used to analyze the correlation, direct decomposition relationship and indirect decomposition relationship between node faults, so as to achieve multi-scale description of local mechanical faults and complete automatic detection. The simulation test shows that multi-scale fault description detection method displays high accuracy, detection efficiency and low detection error, and the detection accuracy is significantly improved compared with the detection method of single scale vibration signal threshold.

Keywords: multi-scale; single threshold standard; local mechanical failure; fault hierarchical propagation diagram; polychromatic set theory; boolean matrix

0 引言

由于数控机床机械结构的复杂程度越来越高,局部故障检测过程中极易出现误差大、效率低等问题,亟需一套高效的局部故障检测方案。

相关专家学者展开了深入研究。赵荣中^[1]利用局部均值分解法实现对数控机床的局部故障检测,将机械故障信号中的噪声去除,计算其包络值,分量处理故障信号与调频信号的包络谱,实现数控机床机械故障检测。张展博等^[2]利用局部时空正则慢性特征提取方法实现对故障的检测,根据局部时空正则目标函数构建投影矩阵,提取其中的特征 S ;构建 S 张成空间和一次差分张成空间,实现对机械故障的检测。

由于上述两种方法中数控机床局部机械节点构造复杂,这些用单一尺度振动信号阈值标准的方法很难准确表达故障特征,导致检测结果准确性较低。为此,本文在多

色集合理论的基础上,提出一种局部故障多尺度描述的自动化检测方法。通过多尺度理念对同层次和异层次中各个节点故障进行分析,确定每个节点之间的传递关系;利用布尔矩阵计算节点故障之间的相关性、直接分解关系和间接分解关系,实现对局部故障的检测。测试结果也验证了本文方法在局部机械故障检测中的有效性。

1 故障振动信号采集与处理

在数控机床局部机械故障检测前,需要采集故障信号,并进行预处理,消除数据噪声,为故障检测奠定数据基础。

1) 数控机床局部机械故障信号采集

在数控机床上,选定6个均匀分布的主体孔,将不同数量的主体放置其中,得到局部机械故障模型,然后再对机械转子振动信号展开计算,如式(1)所示。

基金项目:广东省教育厅2016年重点培育学科项目(粤教研函(2017)1号)

第一作者简介:屈福康(1965—),男,湖南衡阳人,副教授,研究方向为数控编程与加工、机械设计等,654623687@qq.com。

$$e = \frac{v}{60} \quad (1)$$

式中 v 为数控机床机械转子的转速。

2) 局部机械故障信号去噪与重构

将数控机床机械振动信号划分为 y 层, 含有噪声的振动信号用 $t(x)$ 表示, 采用小波基将 $t(x)$ 分解为 y 级小波, 采用阈值法对分解后的故障信号做量化处理。小波分解表达式如式(2)所示。

$$w_x = \frac{[v - 2x + (v - 2) \bar{\omega}_\kappa + \sum_{\kappa=1}^x \bar{\omega}_\kappa]}{v}, x = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中: $\bar{\omega}$ 为小波分解系数的平方值, $\bar{\omega} = [\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \dots, \bar{\omega}_m]$, 同时满足条件 $\bar{\omega}_1 \leq \bar{\omega}_2 \leq \dots \leq \bar{\omega}_m$; κ 为机械故障信号分解系数^[3]。

将 w_x 中的最小值 w_{\min} 作为风险值, 利用 w_{\min} 求取 $\bar{\omega}$ 的最小值 $\bar{\omega}_{\min}$, 在式(2)的基础上, 利用式(3)计算阈值:

$$T = \sqrt{\bar{\omega}_{\min}} \quad (3)$$

经硬阈值去噪后, 得到小波系数表达式如式(4)所示^[4]。

$$\hat{u}_{y,\kappa} = \begin{cases} u_{y,\kappa} & |u_{y,\kappa}| \geq T \\ 0 & |u_{y,\kappa}| < T \end{cases} \quad (4)$$

式中 $u_{y,\kappa}$ 、 $\hat{u}_{y,\kappa}$ 分别为硬阈值去噪前、后的小波系数。

经硬阈值去噪后, 得到小波系数表达式如式(5)所示^[5]。

$$\hat{u}_{y,\kappa} = \begin{cases} \text{sign}(u_{y,\kappa}) \times (|u_{y,\kappa}| - T) & |u_{y,\kappa}| \geq T \\ 0 & |u_{y,\kappa}| < T \end{cases} \quad (5)$$

将式(4)与式(5)结合, 有效消除机械故障信号中的噪声, 并利用去噪后的信号重新构建数控机床局部机械故障信号, 表达式为

$$t(p) = \sum p_{y,m} k_{\kappa-2m} + \sum q_{y,m} o_{\kappa-2m} \quad (6)$$

式中: k 为分解高频故障信号的过滤器; o 为用于低频故障信号分解的过滤器; p 和 q 分别为低频故障信号和高频故障信号分解尺度因子。由此完成数据的采集和预处理。

2 局部故障多尺度描述与自动化检测

基于上节获得的故障信号数据, 利用多尺度下多色集合理论构建故障层次传播图, 分析故障之间的关联性和层次特性, 从水平横向和垂直纵向两个方面进行故障层次的图形化描述; 设计多尺度自动化检测算法, 利用布尔矩阵计算节点故障之间的相关性, 实现局部机械故障的多尺度自动化检测。

2.1 局部故障多层次传播图

为了分析数控机床局部机械故障的多尺度关联性和层次特性, 本文利用多色集合理论, 构建局部机械故障多层次传播图, 如图1所示。

图1中, 每个圆圈均代表一个节点故障, 最底层的节点深度为1, 每向上延伸一次深度加1。第一层为数控机

床已经发生的故障, 箭头方向代表故障发生的原因, 例如故障1发生的原因因为故障2和故障3, 故障2发生的原因因为故障4、故障5和故障6, 其他节点以此类推。

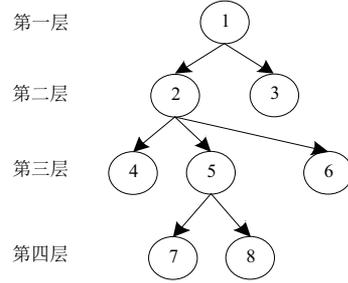


图1 数控机床局部机械故障层次传播图

按照以下3个步骤对图1进行分层处理。

步骤1, 对每一个节点计算其深度, 计算规则为:

- 1) 定义已经发生故障的节点深度为1;
- 2) 已知故障节点每向外延伸1次, 节点深度增加1;
- 3) 当节点出现重复时, 深度值^[6]取最大值。

步骤2, 统计所有节点深度值, 并整合成局部机械故障深度表。

步骤3, 根据局部机械故障深度表, 得到传播图各个节点之间的层次关系, 绘制故障多尺度层次传播图。

本文绘制的局部机械故障层次传播图中融入了故障树分层规则^[7], 所以处于同一层次上的各个节点之间是相互隔离的, 且任何故障只能从低层次向高层次传递, 不可逆转, 以此形成层次结构。

2.2 数控机床局部机械故障层次传播图多尺度特征描述

1) 水平横向描述

将图1中处于同一层次(第 n 层)内的所有节点整合为一个集合 F^n , 表达式为

$$F^n = \{F_1^n, F_2^n, \dots, F_{i,n}^n, \dots, F_{h,n}^n\} \quad (7)$$

式中: n 为局部机械故障层次的层数, $n \in [1, h]$; $F_{i,n}^n$ 为在第 i_n 层中故障; $F_{h,n}^n$ 为第 h_n 层中故障。

对于同一层次中的两个节点故障, 用 C_2 表示二者之间的相关性, 利用多色集合理论中的个人着色自相关布尔矩阵^[8] $[F(a) \times F(a)]$ 对其进行描述。在布尔矩阵中, 如果故障 $F_{i,n}^n$ 与故障 $F_{j,n}^n$ 之间产生相互影响, 即说明二者之间具有相关性关系; 反之, 说明二者之间不具备相关性关系。这里需要特别说明的是, 处于故障层次结构中最底层的故障节点, 无法利用布尔矩阵进行相关性关系的计算, 需采用自相关布尔矩阵。

2) 垂直纵向描述

在图1所示的局部机械故障多层次传播图中, 位于不同层次中的节点故障, 二者之间具有层次性关系, 即直接分解关系 C_1 和间接分解关系 C_3 。根据多色集合理论中的布尔矩阵 $[F(a) \times F(A)]$ 对其进行描述。如果故障 $F_{i,n}^n$ 发生的原因是故障 $F_{i,n}^n$, 即可认定二者之间存在层次性关系; 反之, 则二者之间不存在层次性关系。这里也要格外注意, 故障发生原因与故障层次结构中最底层之间的层次

性关系应采用布尔矩阵 $[A \times F(A)]$ 进行计算。

2.3 自动化检测实现

数控机床局部机械故障多尺度自动化检测算法流程图如图2所示,算法主要实现步骤为:

- 1)对局部机械故障多层次多尺度传播图进行初始化处理,并将第一层作为故障当前层,即 $F^n = 1, F_{i,n}^n = F_{i,1}^1$;
- 2)利用布尔矩阵 $[F(a) \times F(a)]$ 或 $[A \times A]$ 在同一层次中的节点故障进行搜索,如果存在相关性关系 C_2 ,则将其归入到故障原因集 R 中,转至下一层继续搜索,即 $s = n + 1$;
- 3)利用布尔矩阵 $[F(a) \times F(A)]$ 或 $[A \times F(A)]$ 对不同层次之间的节点故障进行搜索,如果节点之间存在 C_1 或者 C_3 的关系,就将这些节点划入 R 中,继续下一层的搜索,即 $s = n + 1$;
- 4)经过上述分析处理后,在搜索传播图层次时,要确定该层是否为最底层,即 $s \leq n$ 。如果是,则按照异层搜索规则,直到最底层为止;如果不是,直接转至步骤5);
- 5)判断 R 中的节点是否全部来自于非最底层,即 R 与最底层故障原因集 A 的差集 $(R - A)$ 是否是一个非空集合。如果是,则需对当前搜索层和当前故障层进行重新选择,即 $F^n = F^s, F_{i,n}^n = F_{i,s}^s$,并将其移出故障原因集,转至步骤2)进行同层搜索即可;如果不是,输出故障原因集,实现局部机械故障的自动化检测。

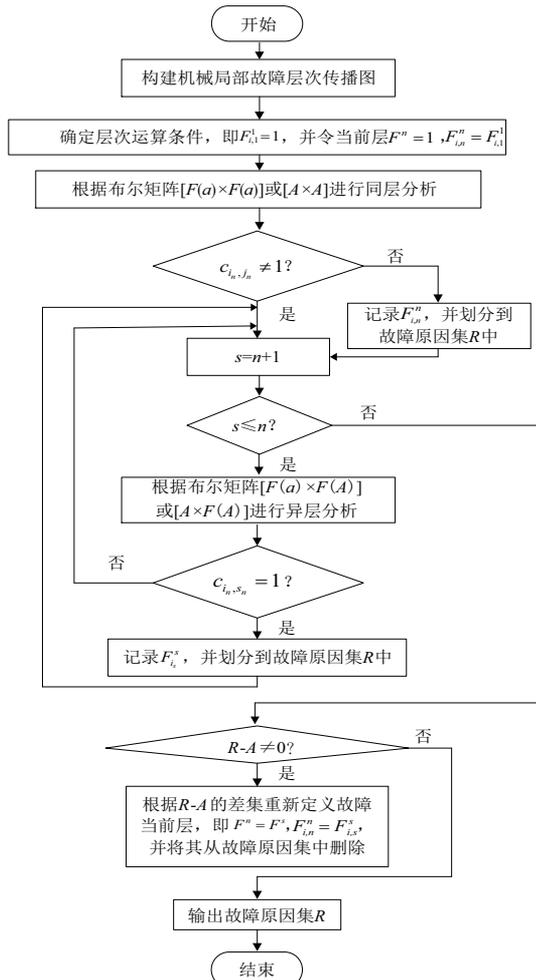


图2 数控机床局部机械故障多尺度自动化检测流程

3 仿真测试

为了验证本文方法的检测效果,与局部均值分解法(文献[1])和局部时空正则慢性特征提取方法(文献[2])展开了对比测试。研究对象数控机床机械结构如图3所示,根据该结构通过MATALAB2018a完成平台的搭建。

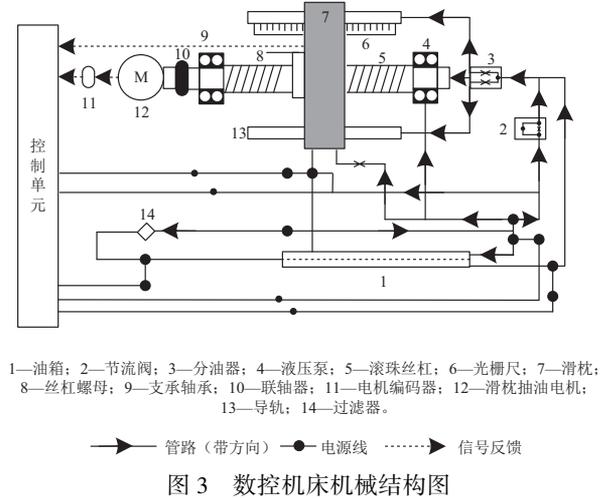


图3 数控机床机械结构图

3.1 仿真测试结果分析

对机床局部复杂故障检测是将采集到的振动数据放入设计的仿真检测仪中,检测仪根据相关算法计算出结果,并对数据进行处理,最后依据算法设定的相关阈值,模拟测试软件能否实现检测功能。

对相关故障确认设置了4个阈值:电流阈值、绝压阈值、差压阈值、振动信号频率阈值。通过传统的简单单一阈值检测方法进行故障检测结果测试,测试结果如图4所示。

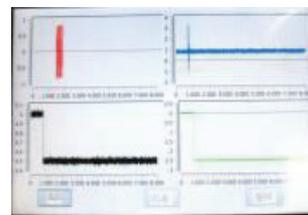


图4 单一阈值对数控机床局部机械故障的信号反映

通过本文的方法,对相关故障进行特征反映,相关结果如图5所示。

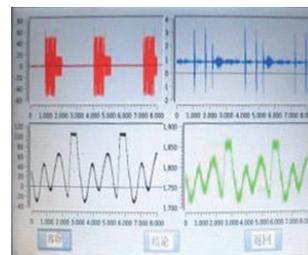


图5 本文方法下的故障信号波形显示

由图4和图5可以看出,通过设置单一阈值对故障信号进行检测,虽然可以分辨出信号故障的特点以及根据故障特点显示出相应的故障解决方案,但是对局部区域的检测过程类似,无法多次识别相关故障,只能对影响整体运行的故障进行一次性检测,而本文方法可以针对局部故障,不影响对相关整体运行的故障进行多次重复检测,优化效果明显。

3.2 不同方法的检测对比

首先,对3种算法迭代训练100次,在检测误差方面展开性能对比,结果如图6所示。

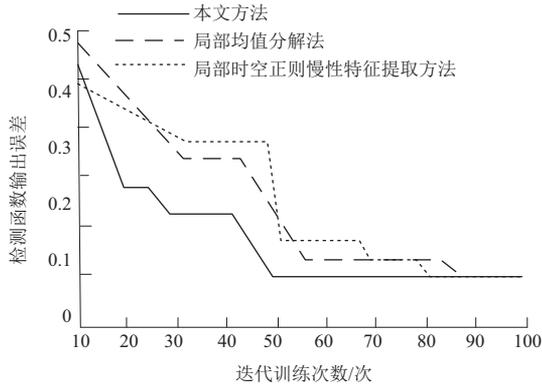


图6 3种算法检测误差对比

通过观察图6可以很明显地看出,随着迭代训练次数的不断变化,3种算法的检测误差均不断降低。本文方法仅仅在50次迭代后就实现0误差输出,其他两种方法则陷入了很长一段时间局部最优中,证明本文方法与其他两种方法相比,能更加快速地获得全局最优。接下来从检测效率方面对3种算法展开测试,结果如图7所示。

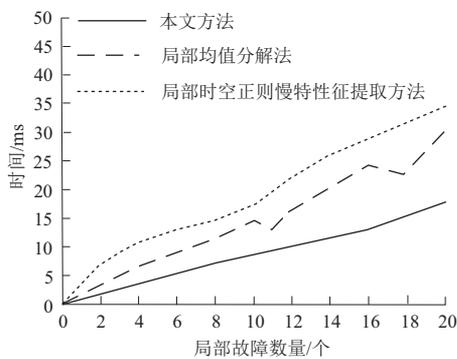


图7 3种算法检测效率对比

从图7中可以看出,随着数控机床局部机械故障的增加,3种算法的检测时间也在不断增加,但是综合对比之下可以看出,本文方法所用的时间始终都是最少的,局部均值分解法次之,局部时空正则慢性特征提取方法用时最多。这是由于本文方法对局部机械故障信号进行了去噪与重构,消除了其中的噪声信号,大大提升了算法的检测效率。

3.3 实际应用结果

为了更加清晰地体现本文算法的综合故障检测性能,

将本文方法实际应用于某加工厂10台马扎克数控VMC1270三轴线轨高速重切削机床中。

应用本文方法对该机床进行局部机械故障检测,与人工实际检测结果对比如表1所示。

表1 局部机械故障实际检测结果

序号	本文方法检测结果	实际情况
1	无故障	无故障
2	三轴换刀点偏移	偏移
3	主轴编码器故障	故障
4	刀床变速箱故障	故障
5	液压泵故障	故障
6	无故障	无故障
7	刀床变速箱故障	故障
8	主轴编码器故障	故障
9	无故障	无故障
10	刀床变速箱故障	故障

由表1可知,本文方法的检测结果与人工实际检测结果完全相同,这说明本文方法具有较高的检测准确性。

综上所述,本文提出的数控机床局部机械故障检测方法,可在保证较高检测准确性和检测效率的同时,具有最低检测误差率,保障了数控机床机械部分的正常稳定运行。

4 结语

本文利用多色集合理论,针对数控机床提出了一种局部故障多尺度描述的自动化检测方法。采集数控机床故障信号,并对其去噪和重构处理,利用多色集合理论构建故障层次传播图对处于同一层次和不同层次下的节点故障进行分析;通过布尔矩阵实现局部机械故障的多尺度自动化检测。测试结果表明,本文方法可取得较高的准确性和检测效率以及较低检测误差率。

参考文献:

- [1] 赵荣中. 数控机床机械局部故障智能检测方法仿真[J]. 计算机仿真, 2020, 37(5): 146-149, 234.
- [2] 张展博, 王振雷, 王昕. 基于正交局部慢性特征的故障检测方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(8): 693-700.
- [3] 梁若舟, 赵曦滨, 万海. 针对工业控制拓扑的确定性局部多点故障检测方法[J]. 通信学报, 2021, 42(10): 10-22.
- [4] 周剑飞, 刘晨. 基于LSTM的设备故障在线检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(1): 272-278.
- [5] 李全坤, 景兴建. 基于传递函数特征的机械结构故障诊断方法新进展[J]. 航空学报, 2021, 42(11): 5248-5245.
- [6] 孔祥玉, 解建, 罗家宇, 等. 基于局部信息增量与MPLS的质量相关故障检测方法[J]. 控制与决策, 2021, 36(7): 1647-1654.
- [7] 陈勇, 丁文政, 卞荣. 数控机床主轴的多传感器迁移学习故障诊断[J]. 机械设计与制造, 2021(10): 259-262.
- [8] 林伟强. 基于循环神经网络的数控机床故障诊断研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(5): 191-196.

收稿日期: 2022-09-06