

# 基于振动信号分析的数控机床自动换刀系统故障诊断研究

陆丽丽

(南通开放大学,江苏 南通 226006)

**摘要:**以加工中心圆盘式刀库机械手自动换刀系统为研究对象,采用 Laplace 小波构造参数脉冲字典,利用分裂增广拉格朗日收缩算法求解稀疏表示系数,提取自动换刀循环过程中振动信号的瞬态特征,并用频率、阻尼比、发生时刻等参数表征,实现了系统故障特征的精确提取,提高了自动换刀系统状态分析和诊断的精确性,延长了自动换刀系统的正常工作时间,提升了系统的可靠性。

**关键词:**自动换刀系统;故障诊断;稀疏信号处理

**中图分类号:**TP206+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)06-0131-03

## Research on Fault Diagnosis of CNC Machine Automatic Tool Change System Based on Vibration Signal Analysis

LU Lili

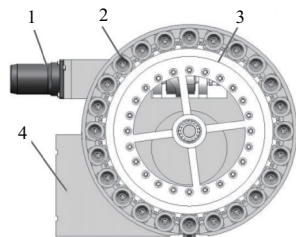
(Nantong Open University, Nantong 226006, China)

**Abstract:** Taking the automatic tool changing system of the disc-type tool magazine manipulator in the machining center as the research object, adopts the Laplace wavelet to construct the parameter pulse dictionary, uses the split augmented Lagrangian shrinkage algorithm to solve the sparse representation coefficient, and extracts the vibration during the automatic tool changing cycle. The transient characteristics of the signal are characterized by parameters such as frequency, damping ratio, occurrence time, etc., which realizes the accurate extraction of system fault characteristics, improves the accuracy of state analysis and diagnosis of the automatic tool changing system, prolongs the normal working time of the automatic tool change system, and enhances the reliability of the system.

**Keywords:** automatic tool changer system; fault diagnosis; sparse signal processing

### 1 自动换刀系统

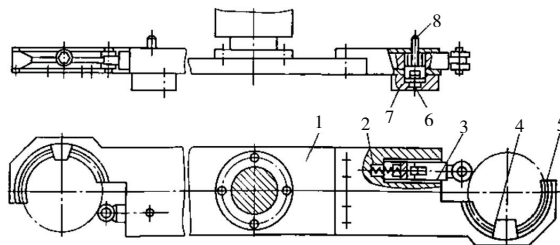
加工中心是一种加工精度高、自动化程度高的数控设备。它有一套自动换刀系统(ATC),可以实现在1台加工中心上对1个工件自动完成钻、铣、镗、铰和攻丝等多种工序的加工,工序集中,大大降低了因多次安装而导致的误差,提高了加工精度,节省了加工时间,提高了生产效率。自动换刀系统是由刀库和换刀装置组成,利用刀库存放所用刀具(图1),在加工过程中通过机械手抓取,实现新旧刀具之间的自动交换<sup>[1]</sup>。



1—刀盘电机;2—刀套;3—刀盘;4—基座。

图1 刀库

加工中心自动换刀过程为:1) 主轴定位;2) 抓刀手抓取刀库上的待取刀具;3) 机械手(图2)带刀具逆时针转90°,另一个抓刀爪抓住主轴上的刀具,主轴松开;4) 机械手前移,拔出主轴中刀具;5) 机械手绕自身水平轴旋转180°,交换两把刀具位置;6) 机械手后退,新刀具装入主轴,锁紧;7) 抓刀爪缩回,松开主轴上的刀具,机械手顺时针旋转90°,将刀具放回刀库,锁紧;8) 机械手复位,换刀完毕。



1—手臂;2,6—弹簧;3—活动销;  
4—锥销;5—手爪;7—锁紧销;8—长销。

图2 机械手臂和手爪

基金项目:江苏开放大学(江苏城市职业学院)教改研究一般课题项目(23-YB-14)

作者简介:陆丽丽(1983—),女,江苏南通人,讲师,硕士研究生,研究方向为机电一体化、数控技术、模具设计等方面的教学,ill\_402@163.com。

## 2 自动换刀系统典型故障分析

自动换刀系统结构复杂,动作繁琐,比较容易出现故障。据统计,机械手掉刀、刀套掉刀和刀套拉钉孔下边缘磨损3类故障占到了自动换刀总故障的91%,这些都是自动换刀系统的典型故障。

### 1) 机械手掉刀

导致机械手掉刀故障的主要原因是机械手刀爪回复力不足<sup>[2]</sup>。自动换刀系统频繁换刀,在抓刀过程中滑动弹簧被压缩,在机械手复位过程中,滑动弹簧恢复,交变载荷不可避免造成滑动弹簧疲劳,致使机械手刀爪回复力伴随着滑动弹簧疲劳而不断递减,刀具在惯性力的作用下,从刀爪处飞出,最终掉落至工作台,折断切削刀具、砸伤夹具,甚至危及工人的生命安全。

### 2) 刀套掉刀

由于加工中心自动换刀系统频繁换刀,刀套弹簧在插刀和拔刀过程中反复伸缩,不可避免产生疲劳,致使刀套锁紧力伴随着刀套弹簧的疲劳而不断递减,锁紧力不足,导致刀套掉刀。

### 3) 刀套拉钉孔下边缘磨损

机械手在插刀过程中,刀套拉钉孔轴线与刀柄轴线不重合,拉钉上锥面撞击拉钉孔下边缘,使边缘材料产生塑性变形,进而被撕脱;机械手发生周向错位,导致发生刀套拉钉孔下边缘磨损故障。

精确分析以上3种自动换刀过程中的主要故障特征,做好故障发生前的干预工作,可以大大减少故障发生的概率,提高自动换刀系统的可靠性。

## 3 自动换刀系统故障诊断过程

精确诊断换刀系统故障的关键是分析换刀循环振动

$$\Psi_{\gamma}(t) = \begin{cases} A \exp \left[ -\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} 2\pi f(t-\tau) \right] \exp[j2\pi f(t-\tau)], & t \in [\tau, \tau+W_s] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\gamma=(A, f, \zeta, \tau)$ 为参数矢量,其成员变量 $A$ 、 $f$ 、 $\zeta$ 和 $\tau$ 分别表示幅度、振动频率、黏性阻尼因子和时移量; $W_s$ 是小波紧支撑区间的宽度。通过离散化式 Laplace 小波原子中的参数矢量 $\gamma$ 中 $f$ 、 $\zeta$ 和 $\tau$ ,可以获得 Laplace 小波字典。

### 3.2 建立稀疏表示模型

信号稀疏表示方法起源于原子分解,类似于最优化求解。其主要思想是信号通过少数的原子表示出来,从原子中抓取信号蕴含的主要信息,在参数脉冲字典中寻找与信号内在结构最匹配的原子,将信号表示为最优原子线性组合的形式。

将换刀振动信号建模为

$$y = x + n \quad (2)$$

式中: $y$ 是振动信号; $x$ 是不含噪声的换刀循环振动信号; $n$ 是噪声。进行稀疏转换为无约束优化问题:

$$\min_b J(b) = \frac{1}{2} \|Db - y\|_2^2 + \lambda \|b\|_1 \quad (3)$$

式中: $J(b)$ 是优化问题的目标函数; $\lambda > 0$ 是正则化参数; $D$ 是参数脉冲字典; $d$ 称作原子; $D = [d_1, d_2, \dots, d_M]$ ;重构信

信号的特点,提取出信号的特征。本文针对自动换刀系统振动信号具有稀疏性和瞬态性的特点<sup>[3]</sup>,构造了 Laplace 参数脉冲字典,利用分裂增广拉格朗日收缩算法求解稀疏表示系数,提取出自动换刀循环过程中振动信号的瞬态特征。这个过程包括了构造参数脉冲字典、求解稀疏表示系数、瞬态特征提取和故障识别4个步骤(图3)。

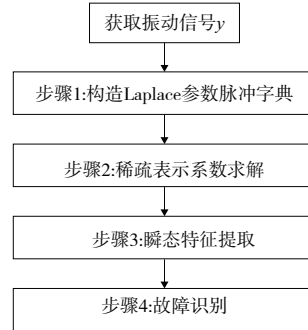


图3 基于参数脉冲字典稀疏表示的自动换刀系统故障诊断方法流程图

### 3.1 构造参数脉冲字典

本文采用参数化表达式的解析字典构造方法设计字典,匹配故障信号的特征结构,通过显式的数学表达式,离散化数学表达式中的参数取值区间来生成原子,使信号的信息主要聚集在少数几个原子上,从而获得信号的稀疏表示。

因为实测振动信号都是实信号, Laplace 小波常被应用在工程实际中<sup>[4]</sup>。它实质上是一种复小波,具有单边衰减性质,常用于提取故障振动信号中的瞬态成分,其表达式为

号为 $x^{(\lambda)} = Db^{(\lambda)}$ ;表示系数 $b$ 是 $\lambda$ 的函数,如果 $\lambda \rightarrow 0$ ,则 $Db \rightarrow s$ ,恢复信号包含大量噪声;反之, $\lambda \rightarrow \infty$ ,则 $Db \rightarrow 0$ 。

式(3)中有两项,分别为数据保真项 $\frac{1}{2} \|Db - y\|_2^2$ 和正则化项 $\lambda \|b\|_1$ 。若式(3)的稀疏解为 $\hat{b}$ ,则重构信号为

$$\hat{x} = D\hat{b} \quad (4)$$

假定 $b_{1a}, b_{2b}, b_{3c}, b_{4d}, b_{5e}, b_{6f}, b_{7g}, b_{8h}$ 是向量 $\hat{b}$ 的8个非零元,则式(4)可以表示为

$$\hat{x} = [d_1, d_2, \dots, d_M] \begin{bmatrix} \dots \\ \hat{b}_{1a} \\ \dots \\ \hat{b}_{2b} \\ \dots \\ \hat{b}_{8h} \\ \dots \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\hat{b}_{1a}$ 表示系数向量 $\hat{b}$ 的第一个非零元,位于第 $a$ 行;其

余 7 个非零元的含义以此类推。式(5)中的重构信号 $\hat{\mathbf{x}}$ 可以表示为函数展开形式

$$\hat{\mathbf{x}} = \hat{b}_{1a} \mathbf{d}_{1a} + \hat{b}_{2b} \mathbf{d}_{2b} + \dots + \hat{b}_{7g} \mathbf{d}_{7g} + \hat{b}_{8h} \mathbf{d}_{8h} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{d}_{1a}$ 表示位于字典第  $a$  列的原子,对应于系数向量 $\hat{\mathbf{b}}$ 的第一个非零元 1;其余 7 个原子的含义依次类推,分别表示重构信号中的 8 个瞬态成分。

### 3.3 瞬态特征提取

自动换刀系统结构组成复杂,每个换刀子步骤的振动信号可能包含一个甚至多个冲击响应信号,可能会出现 Laplace 小波与叠加多个冲击响应的瞬态信号匹配不佳的情况。本文采用多维实 Laplace 小波作为过完备字典的基底函数<sup>[5]</sup>,对 Laplace 小波字典进行了优化,其表达式为

$$\varphi_{\gamma}(t) = \begin{cases} \sum_{k=1}^p A_k e^{-\frac{\zeta_k}{\sqrt{1-\zeta_k^2}} 2\pi f_k(t-\tau)} \sin[2\pi f_k(t-\tau) + \phi_k], & t \geq \tau \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $p$ 是多冲击响应原子包含的 Laplace 小波个数; $A_k$ 、 $f_k$ 、 $\zeta_k$ 和  $k$  分别表示第  $k$  个 Laplace 小波的幅度、振动频率、黏性阻尼因子和初始相位。显然,波形参数集 $\gamma = \{p\} \cup \{A_k, \zeta_k, f_k, \phi_k\}_{k=1}^p$ 决定了多维实 Laplace 小波的特性,其中  $p$  也称为模态个数,  $\{A_k, \zeta_k, f_k, \phi_k\}$  称为第  $k$  个模态的模态参数。当  $p=1$  时,多维实 Laplace 小波退化为一维 Laplace 小波。

同时,应用增广拉格朗日收缩算法求解目标函数,提高了稀疏表示系数的求解速度。通过每次迭代更新稀疏表示系数  $\mathbf{b}$ ,使目标函数  $J(\mathbf{b})$  单调递减,最终得到一组最优的稀疏表示系数。

将式(3)转化为更广义的形式:

$$\min_{\mathbf{b}} J(\mathbf{b}) = \min_{\mathbf{b}} f_1(\mathbf{b}) + f_2(\mathbf{b}) \quad (8)$$

式中: $f_1(\mathbf{b}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{s} - \mathbf{D}\mathbf{b}\|_2^2$  为数据保真项,其中  $\mathbf{s}$  是最优原子集; $f_2(\mathbf{b}) = \lambda \|\mathbf{b}\|_1$  为正则化项。通过引入一个新的变量  $\mathbf{v}$  代替  $f_2$  中的变量  $\mathbf{b}$ ,则式(8)可以转化为

$$\min_{\mathbf{b}} J(\mathbf{b}) = \begin{cases} \min_{\mathbf{b}, \mathbf{v}} f_1(\mathbf{b}) + f_2(\mathbf{v}) \\ \text{s.t. } \mathbf{v} = \mathbf{b} \end{cases} \quad (9)$$

利用增广拉格朗日方法,将该问题转化为无约束优化问题。

$$\min_{\mathbf{b}} J(\mathbf{b}) = \min_{\mathbf{b}, \mathbf{v}} f_1(\mathbf{b}) + f_2(\mathbf{v}) + \boldsymbol{\eta}^T(\mathbf{v} - \mathbf{b}) + \frac{\mu}{2} \|\mathbf{v} - \mathbf{b}\|_2^2 \quad (10)$$

式中: $\boldsymbol{\eta}$  是对偶变量; $\mu$  是惩罚参数。式(10)的后两项可以合并为关于变量  $\mathbf{b}$  和  $\mathbf{v}$  二次项的形式  $\frac{\mu}{2} \left\| \mathbf{v} - \mathbf{b} + \frac{1}{\mu} \boldsymbol{\eta} \right\|_2^2 - \frac{1}{2\mu} \|\boldsymbol{\eta}\|_2^2$ ,其中  $\frac{1}{2\mu} \|\boldsymbol{\eta}\|_2^2$  是变量无关的常数。因此,式(10)可以转化为等价形式:

$$\min_{\mathbf{b}} J(\mathbf{b}) = \min_{\mathbf{b}, \mathbf{v}} f_1(\mathbf{b}) + f_2(\mathbf{v}) + \frac{\mu}{2} \left\| \mathbf{v} - \mathbf{b} + \frac{1}{\mu} \boldsymbol{\eta} \right\|_2^2 \quad (11)$$

使用变量  $\mathbf{d}$  代替  $\frac{1}{\mu} \boldsymbol{\eta}$ ,则式(11)可以转化为交替求解以下 3 个子问题:

$$\mathbf{b}^{(k+1)} = \arg \min_{\mathbf{b}} \frac{1}{2} \|\mathbf{D}\mathbf{b} - \mathbf{y}\|_2^2 + \frac{\mu}{2} \|\mathbf{v}^{(k)} - \mathbf{b} + \mathbf{d}^{(k)}\|_2^2 \quad (12)$$

$$\mathbf{v}^{(k+1)} = \arg \min_{\mathbf{v}} \lambda \|\mathbf{b}\|_1 + \frac{\mu}{2} \|\mathbf{v} - \mathbf{b}^{(k+1)} + \mathbf{d}^{(k)}\|_2^2 \quad (13)$$

$$\mathbf{d}^{(k+1)} = \mathbf{d}^{(k)} + \mathbf{v}^{(k+1)} - \mathbf{b}^{(k+1)} \quad (14)$$

其中:式(12)属于最小二乘问题,存在闭式解;式(13)可以采用软阈值算法求解。通过不断迭代求解上述 3 个子问题,直到目标函数  $J(\mathbf{b})$  取值稳定,就可以获得式(3)的稀疏解 $\hat{\mathbf{b}}$ ,则原始信号可逼近为

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{D}\hat{\mathbf{b}} \quad (15)$$

### 3.4 故障识别

利用此方法对振动信号进行稀疏表示,将信号各瞬态的发生时刻转化为一组稀疏表示系数,从而实现瞬态的检测,进行自动换刀系统故障的诊断。瞬态参数见表 1,对应的最优字典原子如图 4 所示。

表 1 换刀循环振动信号各瞬态的参数识别结果

瞬态个数 $I$	$i$	$p_i$	$k$	$A_{ik}/(\text{m/s}^2)$	$\zeta_{ik}$	$f_{ik}/\text{Hz}$	$\phi_{ik}/(\text{r/min})$
8	1	2	1	0.96	0.009 8	1 602	0.4
			2	2.2	0.014 5	1 594	0.9
	2	2	1	1.5	0.007 5	1 140	0.2
			2	1.88	0.008 9	1 082	0.6
	3	1	1	2.4	0.027	1 518	0.1
	4	1	1	1.6	0.013	1 094	0.35
	6	1	1	3.7	0.04	2 962	0.05
	7	1	1	2.8	0.018	1 432	0.01
	8	2	1	0.64	0.001	1 025	0.4
2			0.73	0.018	758	0.84	
9	2	1	0.34	0.065	1 560	0.24	
		2	0.6	0.16	600	1.17	

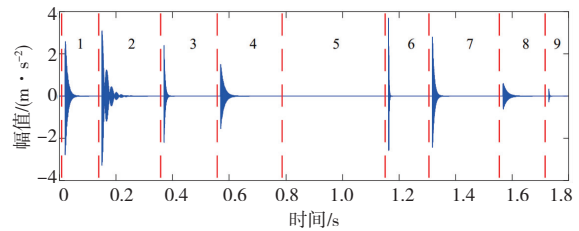


图 4 最优字典原子

图 5 为本章所提方法得到的稀疏表示结果。从图 5(b)可以得到换刀循环振动信号中各瞬态的发生时刻,与换刀时序图中的结果基本吻合,提取的相邻瞬态时间间隔的相对误差只有 0.7%,说明精度非常高。图 5(c)是重构的换刀循环振动信号。图 5 表明该方法能够有效识别换刀振动信号各瞬态的发生时刻和提取相邻瞬态的特征。

(下转第 146 页)

根据表 4 的数据可知,本文方法的电力线路异常报警率均在 96.0%以上,最高值达到了 97.3%;文献[2]方法的电力线路异常报警率低于 90.0%,最高值为 89.3%,最低值为 87.3%;文献[3]方法的电力线路异常报警率最高值为 94.1%,最低值为 80.3%,该监测方法的报警率最高值虽高,但是其波动较大,电力线路异常报警不够稳定。3 种方法相比可知,本文方法在监测电力线路异常时,可以有效报警,其异常报警率最高,有效识别出电力线路的异常情况,并且发出报警信号。

## 4 结语

针对传统三维全景监测方法存在的弊端,设计并提出一种基于回归模型的电力线路三维全景监测方法。该方法应用了回归模型,结合其他方法,进一步提高监测效果。经大量实验测试结果证明,所提监测方法提取电力线路特征数量最多,并且三维全景图像更加清晰,同时其电力线路异常报警率达到了 97.3%,本文方法有效提高了电力线

路三维全景监测效果。

### 参考文献:

- [1] 付文启,黄永章,管飞,等. MGP 提高直流送端新能源动态无功补偿能力研究[J]. 大电机技术,2021(1):34-39.
- [2] 凌晓波,叶康,胡友琳,等. 基于激光三维扫描设备全景的电力监控数据应用模型设计[J]. 激光杂志,2020,41(7):213-217.
- [3] 杨剑锋,秦钟,庞小龙,等. 基于深度学习网络的输电线路异物入侵监测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(4):37-44.
- [4] 林志军,刘宝军,关俊峰,等. 基于影像特征分析的架空输电线路三维实景建模[J]. 电子器件,2022,45(1):172-177.
- [5] 彭向阳,易琳,钱金菊,等. 大型无人直升机电力线路巡检系统实用化[J]. 高电压技术,2020,46(2):384-396.
- [6] 何继勇,周海阔,朱仁勋. 高压输电线路在线监测设备无线供电电磁耦合机构优化[J]. 中国电力,2021,54(5):139-147,165.

收稿日期:2022-06-13

(上接第 133 页)

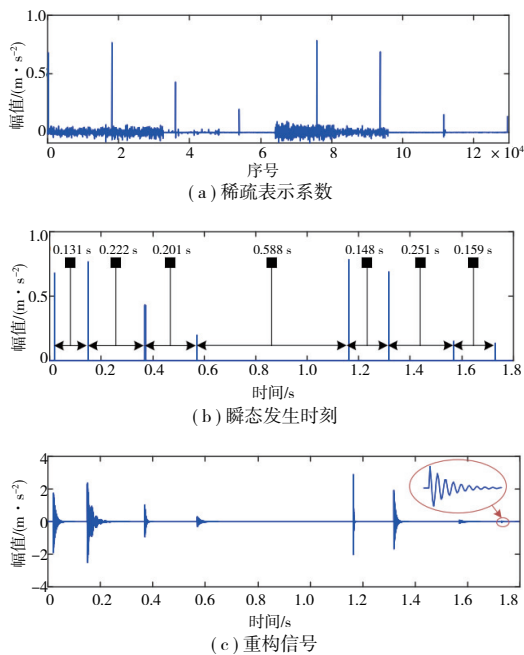


图 5 正常换刀循环振动信号的稀疏表示结果

## 4 结语

自动换刀系统是加工中心的重要组成部分,其性能直

接影响工件的加工精度以及企业的经济效益。本文提出了一种基于参数脉冲字典瞬态成分稀疏表示的自动换刀系统故障诊断方法。首先,根据换刀振动信号中的瞬态成分呈现多阶模态的特征,利用物理意义明确的多维实 Laplace 小波作为原子构造参数脉冲字典;然后,应用分裂增广拉格朗日收缩算法对稀疏表示模型进行了求解,使表示系数的求解速度提高了 95 ms。在正常换刀循环振动信号瞬态特征提取中,所提方法得到的瞬态间隔与理论值的相对误差只有 0.7%,诊断精度提高了 1.2%,有明显的优越性,取得较好的应用效果。

### 参考文献:

- [1] 霍永超. 加工中心自动换刀系统典型故障稀疏诊断方法研究[D]. 长春:吉林大学,2021.
- [2] 邓飞跃,强亚文,郝如江,等. 基于自适应 Morlet 小波参数字典设计的微弱故障检测方法研究[J]. 振动与冲击,2021,40(8):187-193,254.
- [3] 李强,韩军,汪满新,等. 基于信号共振稀疏分解的自动换刀装置故障诊断[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(4):107-110.
- [4] 杜乐. 基于状态监测数据的盘式刀库故障预测与健康管理技术研究[D]. 长春:吉林大学,2018.
- [5] 李景乐,谢馨,王华庆. 改进 Laplace 小波字典在轴承故障诊断中的应用[J]. 轴承,2018(11):57-60.

收稿日期:2023-08-23