

一种切削颤振监测技术的研究与实现

吕凯波, 景敏卿, 张永强, 刘恒, 李猛

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用自主开发的外置式数控机床功能部件可重构监测系统的原型平台, 研究开发了一种实用的切削颤振监测组件. 针对有代表性的车削、铣削加工工艺, 选择传统的振动加速度传感器拾取切削状态信息, 选用时域方差和频域谱特征作为颤振发生的综合指标, 采用监测数据与正常切削时建立的对比库进行比较的方法进行了颤振识别. 在对颤振特征量及其阈值进行研究的基础上, 进而使用 C# 编程语言来实现监测软件, 通过引入延时机制和数据重叠处理技术, 有效地提高了颤振早期预报的准确性和快速性. 通过工厂切削试验对所开发的颤振监测组件进行测试验证, 试验表明该组件的颤振诊断率可达到 80% 以上, 证明了此监测方法对于工业现场的适用性.

关键词: 数控机床; 颤振监测; 对比库

中图分类号: TP277; TH113.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)11-0095-05

Analysis and Implementation for Technique for Cutting Chatter Monitoring

LÜ Kaibo, JING Minqing, ZHANG Yongqiang, LIU Heng, LI Meng

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Chatter vibrations in metal cutting result in poor surface finish, reduced productivity, and shortened tool life. On the external reconfigurable-integrated monitoring and diagnosis prototype system for computer numerical control (CNC), taking the typical machining processes of turning and milling as monitoring objects, the accelerometers are chosen to acquire the cutting states and the feature extraction of chatter in the time and frequency domains are analyzed, then the criterion of chatter occurring is formulated in accordance with the variance and spectrum. A comparison scheme between the monitoring data and the reference database representing the stable cutting state is considered, subsequently, the chatter monitoring module and algorithms are implemented with C# programming, where delay strategy and overlap processing enable to improve the accuracy and rapidity of the monitoring and diagnosis system. The industrial tests are conducted to verify that the diagnostic rate is up to or beyond 80%.

Keywords: computer numerical control; chatter monitoring; reference database

在数控机床的切削加工过程中, 刀具及切削状态和工件加工质量直接相关, 机床的切削颤振始终是高速、高精和高柔性数控加工的主要制约因素之一. 由于重载、高速加工中颤振诱发的振动, 严重地影响了工件的表面质量和尺寸精度, 为了使机床在

切削加工过程中尽可能处于连续的高效稳定工作状态, 因此要对切削状态进行实时监测与控制.

功能部件故障和电气系统故障是数控机床最为常见的运行故障^[1], 但机床功能部件故障一直是国内外数控机床故障诊断领域的难题, 其原因是在线

监测的物理量如振动、声发射、功率等信号由于微弱或信噪比低而引起的特征提取的复杂性,以及机床功能部件种类复杂和多信号调制导致的运行状态监测信息的多样性.因此,切削颤振通常表现为刀具与工件之间产生的强烈的动态不稳定振动.自从土井静雄和加藤仁在1956年提出了切削力的时滞理论后,Tobias和Fishwick利用线性理论对切削颤振的稳定性进行了分析,随后Tlustý、Merritt、Shridar等人在线性切削范围内,对于颤振产生的原因和机理进行了进一步的研究,为后续人们对颤振现象的理解和预测做出了重要贡献,并逐步形成了以再生型、振型耦合和摩擦型颤振为主的3类颤振模型^[2].其中,被人们最为接受的是颤振的再生机理.对切削颤振的研究主要体现在颤振的监测、控制及稳定性的分析,在过去的半个多世纪里,国内外许多学者对于切削颤振监测技术做了积极的研究与探索^[3-8],现有方法的研究如时间序列、模式识别、神经网络等均取得了显著成果,但在颤振识别的快速性或自适应性方面仍有不足,并且鲜有文献给出颤振监测系统或模块开发实现的内容.目前,一些商用颤振监测诊断系统已开发出来,如瑞士Kistler切削力监测系统和德国ARTIS刀具监测系统.

本文采用自主开发出来的外置式(弱耦合)数控机床功能部件可重构监测系统,以具有代表性的车削、铣削加工工艺为监测对象,选用传统的易于安装的加速度传感器拾取振动信号,研究其颤振发生时频域的特征和判决方法,进而采用C#编程语言来开发组件.最后,通过切削试验对颤振监测组件进行了实际应用验证.

1 特征提取

颤振监测技术包括3个技术环节,即传感器选用、特征量提取和预报判决.其中,特征量的合理选择及其判决阈值制定的准确程度直接决定了颤振预报判决的准确性.切削过程从稳定状态向不稳定状态过渡时,振动信号在时域上的振幅逐渐增强,采用振动信号时域方差作为特征量进行颤振预报,其计算简单、速度快,但容易产生误判和漏判.这是因为一方面信号方差易受噪音信号的干扰,另一方面因为随加工条件的改变,判别的阈值不易确定,而在频域内提取的特征量与时域内提取的特征量相比具有更好的准确性和可预测性^[3],因此本文选用信号的时域方差和频域谱特征作为颤振发生的综合指标.针对颤振发生的特征量阈值一般很难确定的问题,

本文采用将实时监测数据与正常切削时建立的对比库数据进行比较的方法,使颤振识别的自适应性得到了改善.

单点连续加工(如车削、镗削等)和断续多切削刃加工(如铣削)是金属切削中两类重要的加工工艺,由于其动力学模型不同,所以在颤振发生时表现出的频域特征也有所不同.本文考虑了再生型颤振,并且以刀具为主振动体,分别研究了颤振时车削、铣削的频域特征.

再生型颤振模型一般用时滞微分方程(DDEs)来描述,即系统的变化规律不仅与当前的状态有关,而且和过去的历史状态也有关.对于车削,其动力学模型为^[4-5,9]

$$m_1 \ddot{x} + c_1 \dot{x} + k_1 x = b k_{cl}(x(t - T_1) - x(t)) \quad (1)$$

对于铣削,其动力学模型为^[9-12]

$$m_2 \ddot{x} + c_2 \dot{x} + k_2 x = a_p h(t)(x(t - T_2) - x(t)) \quad (2)$$

式中: m_1 、 m_2 、 c_1 、 c_2 、 k_1 、 k_2 分别为车、铣削系统在 x 方向的模态质量、模态阻尼和模态刚度; T_1 为车刀到达同一切削位置的时间间隔,即时滞; k_{cl} 为车削力系数; $h(t)$ 为铣削力系数,是周期等于时滞 T_2 的函数; b 为切削宽度; a_p 为铣削深度.显然,式(1)是一个自治的DDEs,式(2)是非自治周期系数的DDEs,即文献[13]中介绍的强迫再生颤振模型.

研究表明,当颤振发生时,在频域内,切削振动的频带由宽带向窄带过渡,能量集中在一个十分窄的频段内.对于车削,频率中心往往与切削系统薄弱环节的固有频率接近^[4-5,9,14];对于铣削,由于切削力系数的不同,因此铣削颤振的频率为多个频率成分,并且伴随有切削频率及其倍频和(或)切削系统的固有频率^[10,12].其中,铣削频率的计算式为

$$f_m = Zn/60 \quad (3)$$

式中: Z 、 n 分别为刀齿个数、主轴转速.

2 组件开发

2.1 系统原型设计

由颤振理论研究和对切削时发生颤振的数据分析表明,颤振发生时振动幅值有明显的增大,并且有新的频率成分出现.方差能很好地反映振幅的变化,提高系统的灵敏度,在切削过程中,偶然产生的冲击信号、较强的干扰信号都能够满足方差增大的条件.因此,为了避免误报,引入了延时机制,即连续3次(默认值)以上发现颤振信号,颤振组件才会发出颤

振警报. 对于频谱信息的获取,采用滑移窗口重叠处理技术,可以提高频谱估计的准确性,但这并不说明数据重叠率越高,频谱估计就越准确. 滑移窗口重叠处理技术还可以提升信号实时处理和结果的显示速度,而引入的延时机制和数据重叠处理技术可以有效提高颤振早期预报的准确性和快速性.

颤振组件通过滑移窗口的方式,从一次监测到的振动信号中获取样本. 系统首先提取第 1 次信号的前 10 个(默认值)频率,然后把频率存储在对比库中,为了解决旁瓣泄露引起的频率分辨问题,以正负 2 倍的频率分辨率区间来区分各个新频率,同时对信号求方差,并存储在方差对比库中. 当加工工况改变时,可以通过手动更新对比库,然后将采集到的信号与对比库中的信号进行对比,通过系统筛选获得新生的频率. 根据试验测试和先前经验,如果新频率的成分满足能量,并达到对比库中最大频率成分能量的 20%,再将样本的方差与对比库中的方差值进行对比,如果满足系统设定的判断阈值 3 倍,颤振组件就会发出警报,同时输出颤振频率. 组件设计的框图如图 1 所示.

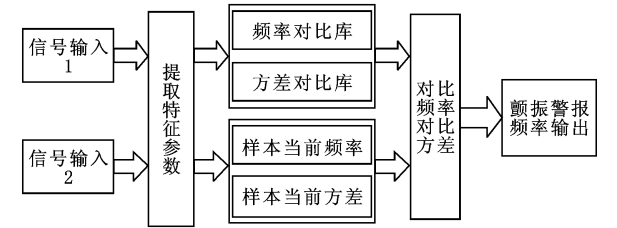


图 1 颤振组件设计框图

2.2 软件实现

将时域方差和频域谱特征作为颤振发生的综合指标,软件采用 C# 编程语言来完成开发实现. C# 是基于 NET 库的开发语言,NET 库具有丰富的库函数,有利于应用程序的快速开发. 颤振组件以可重构监测系统嵌入式传感器模块中的加速度信号作为输入信号,采用滑移窗口可以提高系统的响应速度,采用方差表征振动幅值的变化,可以提高系统监测的灵敏度. 颤振监测组件中主要设计的功能模块有振动频率提取模块、新频率查找模块、方差计算模块和方差对比模块,软件的流程图如图 2 所示,软件界面如图 3 所示.

颤振监测组件作为数控机床可重构监测系统的一个组件,通过编写自己的配置文件,同时完成可重构监测系统要求的软件接口,就可以集成到数控机

床可重构监测系统中.

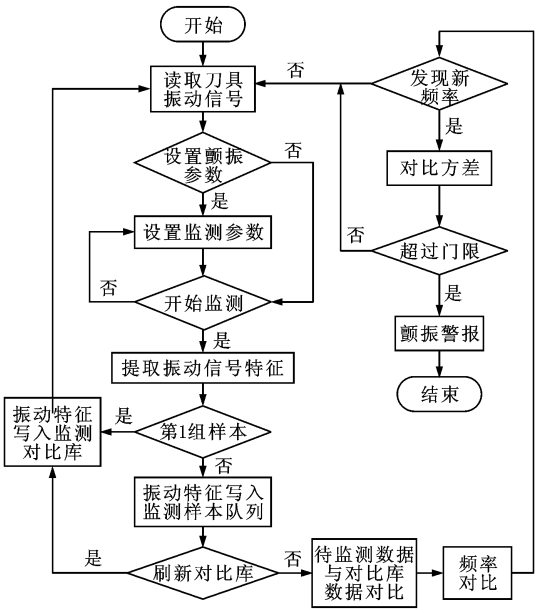


图 2 颤振监测组件流程图

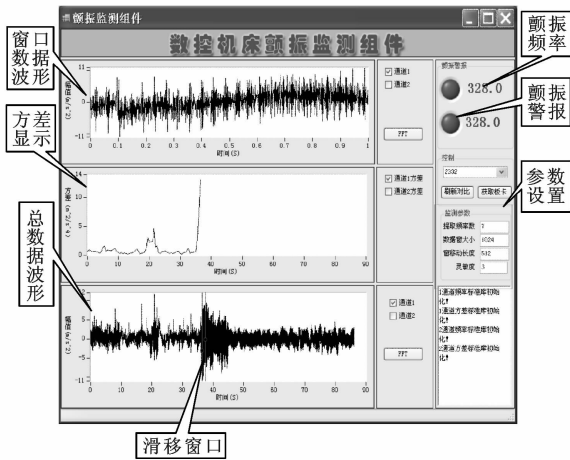


图 3 颤振监测组件界面

3 试验验证

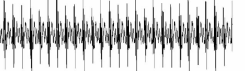
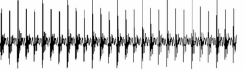
为了证明颤振监测组件的正确性与可靠性,分别在大连机床厂和西安交通大学工程坊完成了现场试验验证. 在大连机床厂生产的 9 轴 5 联动车铣复合中心(CHD25A)上进行细长轴车削、大型蜗杆工件铣削的加工,在工程坊数控车床(G-CNC6135)上进行了车削试验. 试验所用工件的材质均为 45 号钢,切削刀片均为硬质合金刀,大连机床厂所用车刀为山特维克公司的 TR-VB1304-F 型刀具,工程坊数控车床所用车刀为 T31305F 型刀具,铣刀为山特维克公司的六齿面铣刀(R200-105Q32-20M). 采用

3 个均布的刀齿和 6 个刀齿(CoroMill 200)进行加工试验,所用传感器为 ICP 加速度传感器(Dytran 3255A 系列).

对 100 组试验数据样本依据现场记录,将每次走刀后加工表面质量的情况(其中实际加工过程中稳定切削和颤振数据分别占 62 组、38 组)进行随机抽样检验,颤振监测组件的诊断率达到了 87%. 表 1 给出了几组代表性的验证数据,其中车削数据为连续采集存储,铣削为单点采集,切削参数分别对应于转速 n 、切深 d 及进给速度 f . 从表 1 中可以看出,颤

振监测组件能够较好地诊断出切削过程中出现的颤振故障,并且铣削的颤振诊断率要高于车削,在铣削颤振信号的频谱中出现了 $3/2f_m$ 、 $5/2f_m$ 的诸分频成分,并发生了倍周期分叉型颤振^[10,12]. 对表 1 中误判的原因做进一步分析后,得知切削过程中由于人为地改变了进给量,使 f 从 14 mm/min 增加为 56 mm/min,因此引起振动量加大,这时重新更新对比数据库即可避免误判. 试验发现,对于细长工件的加工,其加工质量采用双刀对置车削要优于传统的单刀车削,监测组件的颤振诊断率可达到 80%以上.

表 1 颤振监测组件的试验验证

切削工艺	切削参数 n, d, f	振动加速度信号	颤振判决指标		切削状态识别
			频谱特征	方差增幅	
车削	1 400, 0.1, 14		326 Hz附近窄带频率	7.84倍	颤振
	1 400, 0.1, 14		328 Hz附近窄带频率	7.35倍	颤振
	560, 3.3, 50		334 Hz附近窄带频率	5.82倍	颤振
	800, 2.5, 50		350 Hz附近窄带频率	4.81倍	颤振
	1 120, 2, 70		171.9 Hz附近窄带频率	6.73倍	颤振
	1 400, 2, 14→56 (双刀对置)		369 Hz附近窄带频率	3.37倍	误判
	1 400, 2, 14 (双刀对置)		稳定	稳定	正常
铣削	840, 1.2, 550 (3个刀齿)		f_m 及其倍频, 频带宽	稳定	正常
	800, 1, 330 (3个刀齿)		同上	同上	正常
	840, 1.6, 385 (3个刀齿)		出现 $3/2f_m$ 、 $5/2f_m$ 诸分频, 频带变窄	增大	颤振
	840, 1.2, 720 (6个刀齿)		同上	同上	颤振

4 结 论

(1)本文选用信号的时域方差和频域谱特征作为颤振发生的综合指标,识别算法简便、计算快. 方差反映了振动幅值的变化,可以提高系统监测的灵敏度,与时域内提取的特征量相比,频域内提取的特

征量具有更好的准确性和可预测性. 采用将实时监测数据与正常切削时建立的对比库数据进行比较的方法来提高颤振识别的自适应性,而本文判断颤振阈值主要是根据试验或经验给出.

(2)颤振监测组件采用 C# 编程语言开发实现,其中延时机制和数据重叠处理技术的引入有效地提

高了颤振早期预报的准确性和快速性,通过试验验证了组件的颤振诊断率可达到 80% 以上。

(3) 根据信息交流途径的不同,监测诊断系统通常有外置式(弱耦合)和内嵌式(强耦合)2 种部署方式,本文介绍的颤振监测功能组件属于外置式结构,其优点是监测诊断系统和数控系统具有各自独立的系统硬件,只需开发轻量级的应用层通信协议,就可实现嵌入式监测单元与现有数控系统的实时信息交换,系统稳定可靠,易于扩展和维护,缺点是增加了系统成本、测试传感器的安装布置等问题,嵌入式数控监测系统具有硬件结构紧凑、信息交换直接、系统成本低的优点,从而为数控机床各功能部件的监测诊断技术的研究与实现提供了新的途径。

参考文献:

- [1] 王太勇,蒋永翔,刘路,等. 复杂制造系统动态测控与智能诊断技术 [J]. 航空制造技术,2010(13):26-29.
WANG Taiyong, JIANG Yongxiang, LIU Lu, et al. Complicated manufacturing system dynamic measure-control and intelligence diagnosis technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2010(13): 26-29.
- [2] 王立刚,刘习军,贾启芬. 机床颤振的若干研究和进展 [J]. 机床与液压,2004(11): 1-5.
WANG Ligang, LIU Xijun, JIA Qifen. Studies and developments about cutting chatter of machine tools [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2004(11): 1-5.
- [3] 费仁元,王民. 切削颤振在线监控的研究现状及进展 [J]. 中国机械工程,2001,12(9): 1075-1079.
FEI Renyuan, WANG Min. Recent development in machining chatter control and prediction [J]. China Mechanical Engineering, 2001,12(9): 1075-1079.
- [4] 师汉民. 金属切削理论及其应用新探 [M]. 武汉:华中科技大学出版社,2003: 1-74.
- [5] 于骏一,周晓勤. 切削颤振的预报控制 [J]. 中国机械工程,1999,10(9): 1028-1032.
YU Junyi, ZHOU Xiaoqin. Predictive control of cutting chatter [J]. China Mechanical Engineering, 1999,10(9): 1028-1032.
- [6] 于英华,徐兴强,徐平. 切削颤振的在线监测与控制研究现状分析 [J]. 振动与冲击,2007,26(1): 130-

132.

YU Yinghua, XU Xingqiang, XU Ping. A review of on-line monitoring and control for machine tool chatter [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(1): 130-132.

- [7] SHI D, GINDY N N. Industry applications of online machining process monitoring system [J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2007, 12(5): 561-563.
- [8] 聂建华,司伟. 一种基于振动信号处理的颤振预报方案研究 [J]. 工业仪表与自动化,2009(4): 57-60.
NIE Jianhua, SI Wei. The method for prediction of chatter based on the vibration signal processing [J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2009(4): 57-60.
- [9] ALTINTAS Y, WECK M. Chatter stability of metal cutting and grinding [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2004, 53(2): 619-642.
- [10] ALTINTAS Y, STEPAN G, MERDOL D, et al. Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008, 1(1): 35-44.
- [11] 王民,李南京,袁伟军,等. 铣削过程的计算机仿真及试验研究 [J]. 北京工业大学学报,2003,29(3): 292-295.
WANG Min, LI Nanjing, YUAN Weijun, et al. Computer simulation and experimental study on the stability of milling processes [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2003, 29(3): 292-295.
- [12] INSPERGER T, STEPAN G, BAYLY P V, et al. Multiple chatter frequencies in milling process [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003,262(2): 333-345.
- [13] 吴雅. 机床切削系统的颤振及其控制 [M]. 北京:科学出版社,1993: 20-30.
- [14] 黄强,张根保,张新玉,等. 机床颤振过程的试验与分析 [J]. 重庆大学学报,2008,31(4): 360-365.
HUANG Qiang, ZHANG Genbao, ZHANG Xinyu, et al. The chatter vibration process of machine tools [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(4): 360-365.

(编辑 管咏梅)