

数控钻床钻头磨损自动监测系统研究^{*}

黄德福 管 芳 吴广军 胡鸿志

(桂林电子科技大学广西自动检测技术与仪器重点实验室 桂林 541004)

摘 要:环模是饲料加工机器的核心部件,其钻削加工是制约生产效率和产品质量的瓶颈工序。以钻头工况噪声为测试和研究对象,通过噪声功率谱分析得到钻头的实时磨损状态;融合计算机技术、嵌入式系统技术和短距离无线通信技术,研制了一种环模数控钻床钻头噪声监测系统,并开发了相应的人机交互软件,实现了钻头工作状态的实时检测和自动处理。实验测试表明,钻头噪声功率谱特征变化明显,钻头工况监测系统运行稳定可靠,目前产品已经投入实际生产测试。

关键词:噪声识别;数控钻床;监测系统;麻花钻

中图分类号: TN709 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Research on monitoring system of drill bit for CNC drilling machine

Huang Defu Guan Fang Wu Guangjun Hu Hongzhi

(Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instrument, Guilin University
of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Annular mould is a primary part of the feed pellet mill machine, and drilling is a key processing for the CNC manufacturing of annular mould. The operating mode noise of drill bits is tested in this paper, in order to distinguish the wear condition of drill bits by the noise analysis on power spectrum. By using the computer, embedded system and short distance wireless communication technologies, a novel drilling noise monitoring system and corresponding and a human-computer interaction software are achieved for the CNC drilling machine, to distinguish and dispose the worn-out drill bits automatically. The test result shows that the power spectrum characteristic of drill bit noise is distinct, as well as the monitoring system for wear condition of drill bits is reliable, and it has been applied and test in actual productions.

Keywords: noise analysis; CNC drilling machine; monitoring system; drill bit

1 引 言

钻削是机械制造中最基本的加工方法之一,调查显示钻孔工序约占机械加工总量的40%左右^[1]。实际生产中,钻头磨损是一个不可避免的问题,由于工作环境的多变性,钻削参数的复杂和多变性,钻头在切削过程中受到强谐波冲击、切削交变力和机床夹具固有的强迫振动等影响,同时由于钻头自身属性的离散性,这些因素共同导致刀具的磨损表现出随机性和复杂性,使得切削状态监测成为钻孔工艺自动化技术中的关键难题。因此,钻头磨损程度的实时在线监测一直是实现加工自动化、智能化的关键技术。

环模是饲料加工机器的核心部件^[2-3],钻孔是环模加

工过程中最重要和最耗时的工序,钻孔工艺水平直接决定环模的成品质量和使用寿命,是环模生产的瓶颈。本文针对数控自动钻床(CNC drilling machine)在钻削加工中需要人工监测钻头磨损状况的问题^[4-5],创造性的通过钻头噪声判别其磨损程度^[6-7],为研发非接触式钻头在线自动监测系统,实现企业原有环模钻床控制器的升级改造提供技术支撑。

2 钻头噪声特征提取理论

钻削加工过程中由于工作环境的复杂性,周围空间包含各种成分的噪声信号^[4,8-9]。传感器接收的噪声信号主要是由钻头振动、工件振动、钻头与工件接触点的撞击摩擦振动所引起的。其中摩擦振动所产生的信号最强也

收稿日期:2016-03

^{*} 基金项目:广西重点实验室基金项目(YQ15103&YQ16114)、国家大学生创新创业训练计划项目(201310595012&20121059544)资助

最具代表性。因为钻头振动所产生的噪声信号是钻头自身旋转、机器振动、摩擦振动等多种振动组合成的复合信号,其中自身旋转和机器振动等分量所占比重较大,能表征钻头磨损程度的分量较小;本文研究的噪声识别系统是装配在一款主要负责加工环模毛坯的数控钻床上,环模毛坯的重量在百公斤以上,具有非常大的惯性,对外界振动敏感度较低,毛坯本身由特定夹具固定在原有机机械结构上,其信号受原有机机械部分振动支配较严重,所以毛坯振动产生的噪声信号中,有效噪声信号比较微弱。

2.1 噪声功率谱估计原理

谱估计技术已成为数字信号处理的重要方法之一^[10],而自功率谱的估计则是现代谱估计的基础。自功率谱的计算有两种方法,一种是间接法,先通过相关函数的计算,然后作傅里叶变换得到自功率谱。另一种称为直接法,由功率谱的频率分布直接进行计算。巴什瓦(Parseval)定理从能量守恒方面提出了一种求功率谱的方法,即时域能量等于频域能量,不会因为变换而发生改变,其数学定义如式(1)所示:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |X(f)|^2 df \quad (1)$$

直接法计算离散傅里叶变换,比之用傅里叶逆变换计算自相关函数后再作傅里叶变换更为直接和方便。因此周期图法被广泛地用于功率谱估计方面。

2.2 平均周期图法

周期图法^[10-11]的基本思想是对数据直接进行傅里叶变换,然后取模的平方就是功率谱。巴特利特(Bartlett)提出的平均周期图法的主要思想是将输入的数据分段计算自功率谱,然后各段取平均。假如输入数据的每段长度为 N ,共有 M 段,输入数据为 $x(n)$,第 i 段的信号可表示为:

$$x^{(i)}(n) = x[n + (i-1)N] \quad (2)$$

式中: $0 \leq n \leq N-1$ 且 $1 \leq i \leq M$,则可得每一段的周期图:

$$I_M^{(i)}(k) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x^{(i)}(n) e^{-j2\pi nk/N} \right|^2 \quad (3)$$

式中: $1 \leq i \leq M$ 。如果 $k > N$ 时,信号的自相关函数很小,则可假设每段的周期图彼此之间相互独立,这时平均功率谱定义为:

$$P_{xx}(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_M^{(i)}(k) \quad (4)$$

此时平均周期图法的协方差为:

$$V_{ar}[P_{xx}(k)] = \frac{1}{M} V_{ar}[I_M(k)] = \frac{1}{M} P_{xx}^2(k) \left\{ 1 + \left[\frac{\sin(\omega N)}{N \sin \omega} \right]^2 \right\} \quad (5)$$

显然谱估计的方差随平均周期的图数 M 的增加而减小,所以当 M 很大时,巴特利特估计是一致估计。这种方法虽然减小了功率谱在真值附近的摆动,具有平滑作用,

但是以降低频率分辨率为代价的。平均周期图法是基于原始功率谱的横向方法,优点是提高了谱估计的一致性,减少了特征量。对于论文所研究的钻头磨损噪声信号,钻头的磨损虽然有其随机性的一面,但从钻头磨损事件的整个过程来看却是一个缓慢变化的过程,实际经验表明钻头都是经过长时间工作后才慢慢失效的。因此,通过纵向功率谱的累积叠加和平均可以很好地跟踪这一变化特性。

3 监测系统固件设计

监测系统采用集散控制的基本思想,融合计算机技术和无线局域网技术,以嵌入式微控制器为核心,兼顾分散控制与集中操作^[9,12-13]。

3.1 监测系统原理

钻头监测过程主要包括信号采样与数字化存储、噪声特征提取与钻头模式判别。在环模钻孔加工过程中,每当钻头进钻深度达到预设值,也就是钻头开始接触工件表面时,自动钻床向监测终端发送起始信号,终端开始采样噪声信号,并将模拟噪声信号线性转换为相应的数字量,存储到指定的内存空间;直到钻头完成钻削加工,并开始回退到初始位置时,自动钻床向监测终端发送停止信号,终端才停止信号采样。

当内存空间的信号样本数量足够时,嵌入式处理器开始基于谱估计理论处理样本数据,实时提取钻头噪声的频谱特征,并根据谱特征自动判断钻头的工作模式(失效模式和有效模式);一旦发现钻头的磨损程度达到或超过预定阈值,监测终端会立即通知钻床自动停机并回退钻头至初始位置,同时主动向主控平台报告警报信息。

3.2 监测终端设计

钻头监测系统以嵌入式微处理器为终端核心,PC机为总控和人机交互平台。终端的噪声识别模块是监测系统的关键组件,配备无线模块构建监测网络。各个监测终端连接原有的数控自动钻床控制器,协同完成噪声识别和钻头控制。

监测终端是整个系统的关键固件,其构成如图1所示,主要由电声传感器、夹具、信号调理电路、MCU系统、自动钻床通信接口、报警模块、无线网络节点、电源模块等组成。MCU内部集成ADC和FLASH存储器等资源,通过持续采样和分析钻头的工作噪声,实时判别钻头的工作状态,为系统自动控制提供决策依据。

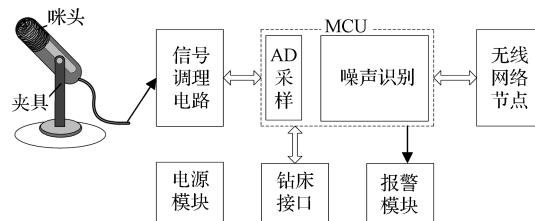


图1 监测系统终端模块示意

所有监测终端配备无线网络节点,系统上电时无线节点自动搜索并接入控制网络;如果网络连接意外断开,节点自动重新连接;无法搜索到控制网络或连接超时,则自动报警提示。自动组网成功后,整个监测系统组建完成,自动开始钻头噪声监测。

3.3 监测系统软件设计

监测终端软件采用模块化设计,主要包括钻头失效监测软件、自动钻床通信软件和网络节点通信软件,软件总体流程如图2所示。其中噪声识别软件作为系统的核心软件,是实现钻头失效监测的核心代码。自动钻床通信软件则为监测终端和原有数控自动钻床之间建立了有效的通信连接。所有终端通过网络节点连接至PC总控平台,实现终端数据和控制命令的实时传递。

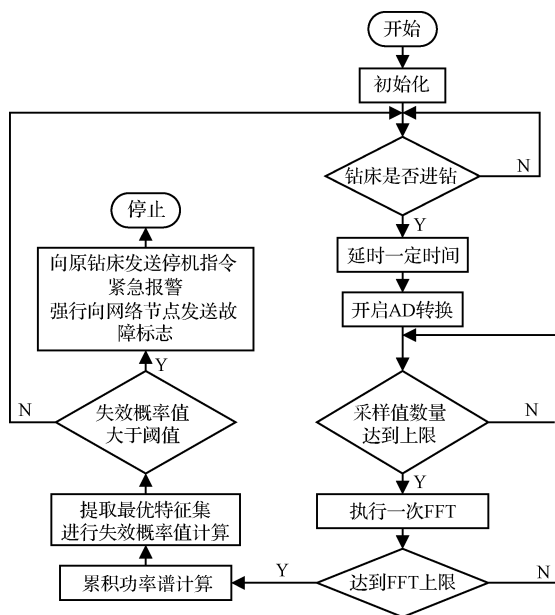


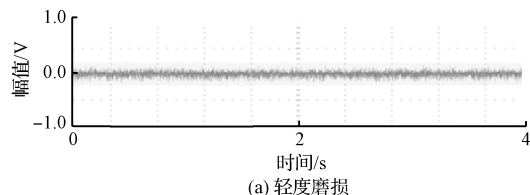
图2 监测系统软件流程

4 系统测试验证

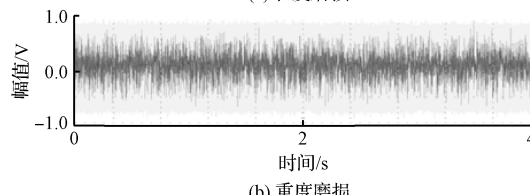
4.1 钻头噪声监测终端测试

工况条件下利用通用录音设备记录自动钻床钻孔时钻头发出的噪声,并利用播放器和数字存储示波器观测原始信号波形。在保持钻孔环模材质相同(未进行热处理的不锈钢)的条件下,针对不同的钻孔孔径(钻头直径)和钻孔密度录制噪声样本。

直径2.8mm的钻头噪声样本如图3所示,原始噪声的振荡幅值随着钻头磨损程度加剧而增加。进一步在MATLAB中分析噪声信号原始数据的功率谱,其结果如图4所示,可以看出当钻头锋利时,2.5kHz以上的音频带内频谱较为稳定平滑;而当钻头磨损严重时,在5kHz附近的频带内出现了明显的峰值,可以作为频谱特征自动判定钻头的工作状态。

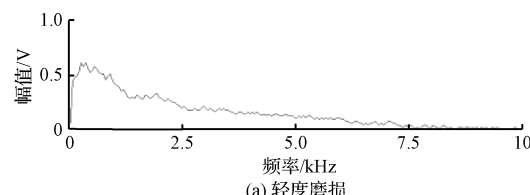


(a) 轻度磨损

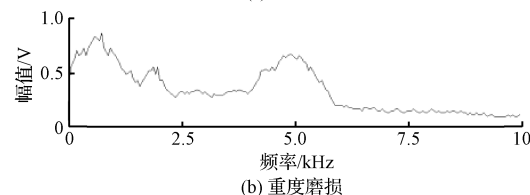


(b) 重度磨损

图3 钻头噪声原始信号



(a) 轻度磨损



(b) 重度磨损

图4 钻头噪声功率谱

构建钻头噪声监测终端测试系统如图5所示,通过PC和音箱播放工况钻头噪声样本,并在环境中加入干扰声音信号,模拟工厂环境加工现场实际工况,测试监测终端对不同钻头噪声样本信号响应的实时性、正确性和稳定性。测试结果如表1所示,噪声监测终端成功实现钻头磨损程度的辨识和自动报警。

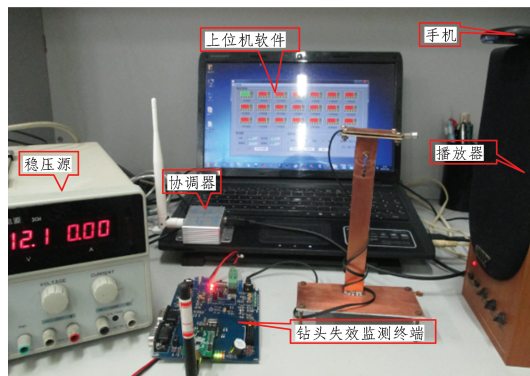


图5 监测终端测试

表1 监测终端测试结果

测试条件	测试次数	报警次数	正确率(%)
重度磨损,无干扰	20	20	100
重度磨损,工况干扰	50	50	100
轻度磨损,工况干扰	50	50	100
纯工况干扰	50	1	98

4.2 自动钻床设计改造

以原有的环模加工机床为基础,结合钻头噪声监测技术,升级改造为数控环模自动钻床。如图6所示为数控自动钻床控制器的控制电路,如图7所示为改造完成后的自动钻床控制器。经过实验室测试验证,经过升级改造的数控自动钻床自动组网功能运行正常,能够有效实现钻头磨损状态的自动判别和相应的处理。

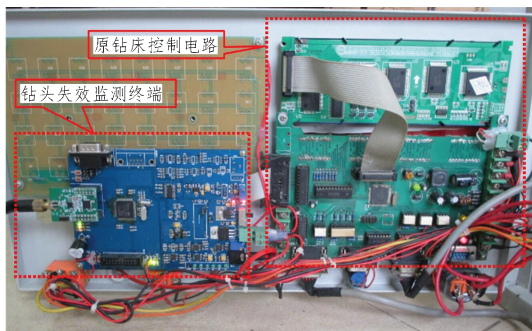


图6 数探自动钻床控制电路

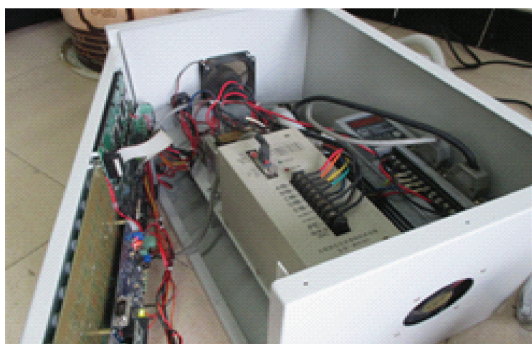


图7 升级版数控环模自动钻床控制器

目前系统已经在某机械设备有限公司的环模加工车间投入实际运行测试。由于系统能够及时的判别磨损钻并自动停机等待处理,因此由钻头磨损而操作人员未能及时处理所导致的钻头折损情况得到极大缓解,钻头切削寿命也得到了提高。如图8所示,以直径1.2 mm和2.8 mm的钻头为例,与公司原有的独立式环模自动钻床相比

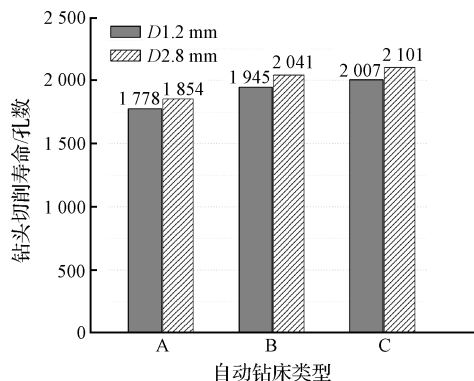


图8 钻头切削寿命对比

较^[2],钻头使用寿命分别提高了约3.2%和2.9%;图8中自动钻A为市场销售的某型号环模自动钻床,自动钻B项为项目组前期自主研发的环模自动钻床,自动钻C为本文提出的基于噪声监测的自动钻床。

实际测试基于噪声监测的自动钻床所产生的效果,与钻头使用寿命的提高相比,更为显著的是环模加工人工成本和劳动强度的进一步降低。如图9所示为公司环模加工环节的机床数量和操作工人数量配置情况对比,实际生产中工人是按每天两个班次配备,图9中A表示公司原来的手工加工机床,B表示项目组前期研发的环模自动钻床,C表示基于噪声监测的自动钻床。从图9中可以看出,在公司环模生产环节中钻床装机数量增加的情况下,对操作工人的数量需求却随着技术升级不断下降;此外,随着生产自动化程度的提高,对操作工人文化水平的要求逐渐降低,因此大大缓解了公司环模生产环节的招工难问题,也极大地降低了生产单个环模所需的人工成本,为公司带来了良好的直接经济效益。

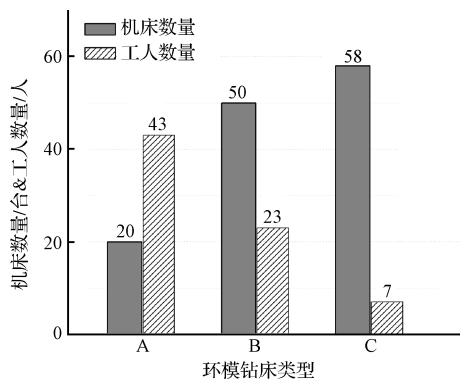


图9 自动钻床与操作工作配置对比

5 结论

本文所设计的钻头噪声监测系统,采用先进的Cortex系列ARM处理器,融合数字信号处理技术和短距离无线组网技术,实现了环模钻孔加工过程中钻头磨损状态的自动监测和实时处理,以及环模数控自动钻床的升级改造,提高了钻头的平均工作寿命,间接降低了环模的生产成本和工人劳动强度,增强了环模生产企业的核心竞争力。后续研究将在优化算法复杂度方向展开,并适当引入智能学习功能,进一步提高钻头监测的自适应性和抗干扰能力。

参考文献

- [1] 王卫俊,郭庆,刘威,等. 基于PLC的数控钻床控制器的研制[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(1): 41-45.
- [2] 胡鸿志,朱明强,郭庆. 环模自动钻床钻削进给算法[J]. 北京交通大学学报:自然科学版, 2005, 35(6): 85-88.
- [3] 敖银辉,汪宝生. 钻头磨损检测与剩余寿命评估[J].

机械工程学报, 2011, 16(1): 177-181.

- [4] 李佳, 郑建明, 李言, 等. 基于深孔钻削噪声信号的钻头磨损特征提取方法研究[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(4): 446-450.
- [5] 韩海舰, 李文海. 自适应噪声抵消系统的设计与性能仿真[J]. 电子测量技术, 2015, 38(9): 82-85.
- [6] 焦卫东, 林树森. 用噪声残差似然估计改进经验模态分解基信号去噪方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2808-2816.
- [7] 胡为, 庄奕琪, 包军林, 等. 红外探测器低频噪声长时间监测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(2): 265-271.
- [8] 王莉, 牛群峰, 胡红生. 便携式多功能噪声特性测试分析仪[J]. 仪表技术与传感器, 2009(5): 19-21.
- [9] 于洪涛, 余桐奎, 王双记, 等. 主成分分析法在振动噪声源分析中的应用[J]. 测控技术, 2009, 28(5): 78-81.
- [10] 何志勇, 朱忠奎, 张茂青. 基于小波包域噪声能量分布

的脉冲噪声消除[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(9): 2071-2078.

- [11] CARNITI P, CASSINA L; GOTTI C. A technique for noise measurement optimization with spectrum analyzers [J]. Journal of Instrumentation, 2015, 10(8): 1-12.
- [12] 周涛, 郭庆, 徐翠锋. 基于图像处理的麻花钻角度测量[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(6): 37-40.
- [13] 张伟, 焦卫东, 钱苏翔. 一种多通道噪声与振动信号联合采集装置[J]. 仪表技术与传感器, 2007(10): 41-43.

作者简介

黄德福, 1992 年出生, 男, 汉族, 工学学士, 主要研究方向为测控技术与仪器。

管芳(通讯作者), 1985 年出生, 女, 汉族, 工学硕士, 主要研究方向为测控技术与仪器。

E-mail: phoehu@eyou.com

(上接第 41 页)

- [18] 王肖洋, 高贵, 周石琳, 等. 一种基于双通道 DPCA 的 SAR GMTI 杂波抑制方法[J]. 雷达学报, 2014(2): 241-248.
- [19] 刘尧, 王辉, 禹卫东. 星载 Ka-SAR 俯仰向自适应 DBF 算法研究[J]. 信号处理, 2015(7): 808-814.
- [20] 李智勇, 余小萍, 姜真, 等. 基于蛙眼检测模型的双阈值判定目标跟踪方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(2): 187-195.
- [21] 张国刚, 徐向辉. 基于加权纹理特征的 SAR 图像目标识别算法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(9): 22-25.

作者简介

王明辉(通讯作者), 1991 年出生, 本科毕业于北京信息科技大学, 现硕士在读, 就读于中国科学院电子学研究所通信与信息系统专业, 主要研究方向为毫米波 SAR 动目标检测与成像。

E-mail: wangminghui3163@163.com

王辉, 1972 年出生, 工学博士, 现工作于中国科学院电子学研究所, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为毫米波合成孔径雷达信号处理技术。

E-mail: wanghui@mail.ie.ac.cn

赵凤军, 1963 年出生, 工学博士, 现工作于中国科学院电子学研究所, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为合成孔径雷达微波技术。

E-mail: fjzhao@mail.ie.ac.cn