

基于无线传输的测振刀柄设计及实验研究

陈奇伟,陈蔚芳,崔蓉芳,苏川
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:分析了铣削加工中振动信号在线检测技术的不足,提出将无线传感器系统集成在刀柄上实现加工振动检测的方案;提出了用于解决刀柄系统刚度、动平衡问题的刀柄结构设计方案;针对测振刀柄离线供电方式续航能力差的问题,通过综合运用多种休眠方式,实现了嵌入式测振刀柄系统采集传输程序的低功耗设计。设计铣削加工振动检测方式对比实验,验证了刀柄系统振动检测的性能。

关键词:铣削加工;智能刀柄;振动检测;无线传感器;铣削振动

中图分类号:TG714;TH164 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)03-0026-04

Design and Experimental Study of Vibration Measuring Tool Handle Based on Wireless Transmission

CHEN Qiwei, CHEN Weifang, CUI Rongfang, SU Chuan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Due to the deficiency of on-line vibration detecting signal in milling, this paper proposes the scheme that the wireless sensor system is integrated into the tool holder and the scheme that the structural design of the tool handle is used for solving the problems of stiffness and dynamic balance of the tool handle system. Aiming at the poor endurance of off-line power supply of the vibration detecting tool holder, the low power design of embedded acquisition and transmission program is realized by using a variety of dormancy modes. By comparison and experiment, the vibration detection method for the milling is designed to verify the performance of the vibration detection of the tool holder system.

Keywords: milling; smart tools; vibration detection; wireless sensor; milling vibration

0 引言

随着现代机械制造技术的发展,人们对零件尺寸精度、加工表面质量以及加工效率提出了更高要求。切削加工中的刀具与工件的相对振动不仅会降低工件的表面质量,而且还会加剧刀具磨损,对加工精度和生产成本造成影响^[1]。为了保证工件的加工质量,实际加工过程中常采用降低切削用量的方法,限制了机床和刀具的切削性能的发 挥和机械加工生产效率的提高^[2]。因此,对加工过程中的切削振动进行监控对提高切削加工精度和加工效率有十分重要的意义。

在铣削加工的振动检测领域中,传统的加工振动检测方法一般是在机床主轴或工件上粘贴加速度传感器^[3]。将加速度传感器粘贴在机床主轴上测量振动信息,由于传感器距离工件-刀具加工区域距离较远,振动信号衰减严重,容易被机床噪声覆盖,难以检测到刀具的振动信息^[4]。而在工件上安装的加速度传感器则需要随着工件更换频繁拆装,且传感器在工件上的安装位置对走刀路径造成影响,不适合工件的高速、大批量加工。因此,需要提出一种更具通用性和实用性的铣削振动检测解决方案。

随着无线传输技术的发展,无线传感器技术在工程制造领域的应用越来越广泛^[5-6]。国内外许多研究者将传感器集成在刀柄上甚至刀具内部,实现了温度^[7]、切削力^[8]、转矩^[9]等信号的直接测量。目前国内外对测振刀柄的研究还停留在实验阶段,限制测振刀柄大规模应用的主要原因包括离线供电限制了单次充电后刀柄系统的续航时间和刀柄系统动平衡无法满足铣削加工需求等。

本文设计了具有振动检测功能的低功耗智能刀柄系统,提出了测振刀柄动平衡问题的解决方案,实现了刀柄铣削加工振动信号在线检测和无线传输。刀柄系统采用模块化设计,使用 BT30 刀柄进行改装,也适用于不同型号的铣刀以及机床主轴的铣削振动检测。因此测振刀柄具有通用性和重复利用性,对提高机械加工效率和零件加工表面质量有重要作用。

1 智能刀柄方案设计

由于刀柄跟随机床主轴做旋转运动,采用信号线将传感器与数据采集卡连接,使用 PC 进行信号采集的方法并不适用。因此需要将嵌入式数据采集系统和传感器集成到刀柄中,上位机通过无线通信技术对下位机振动信号的

基金项目:国家自然科学基金项目(51775277)

第一作者简介:陈奇伟(1994—),男,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为智能制造。

采集工作进行控制,实现刀具振动信号的无线监测。刀柄系统通过锂电池离线供电,为了满足测振刀柄系统重复使用的要求,需要对外提供充电接口。由于刀柄系统的体积受到刀柄尺寸和加工环境的限制,供电电池容量也相应受到限制。为了提高刀柄系统单次充电的续航能力,需要对刀柄系统进行功耗控制。除了硬件方面选用低功耗的电子元件之外,在软件方面,需要设计低功耗睡眠功能,减少刀柄系统非工作时间的功耗。

为了保证刀柄系统的刚度,智能刀柄系统方案设计中选用在 BT30 刀柄上加装一体化嵌入式系统模块的方法,避免对刀柄本身结构造成破坏。嵌入式系统使用有较高机械强度和刚性的 POM 材料作为电路安装盒,四周均匀分布 8 个螺栓孔,通过调节平衡螺栓来修正刀柄系统的剩余不平衡量。电路安装盒的四面留有 4 个安装槽,分别安装传感器驱动电路以及电源调理电路,具有无线传输功能的嵌入式处理器模块、锂电池组等,测振刀柄实物图如图 1 所示。

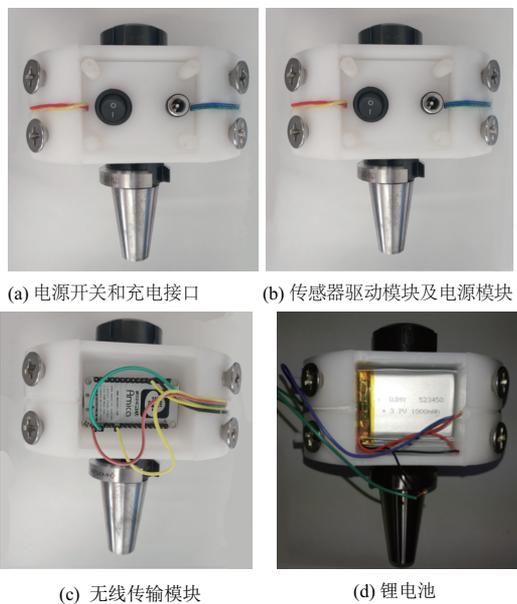


图 1 测振刀柄实物图

2 智能刀柄系统设计

2.1 刀柄硬件系统设计

智能测振刀柄硬件系统组成包括:作为微控制器和无线传输模块的低功耗 Wi-Fi 芯片 ESP8266,电源调理模块,具有 ADC 转换功能的 ADXL345 加速度传感器模块。系统硬件组成图如图 2 所示。

ESP8266 是某公司生产的低功耗、高集成度 Wi-Fi 芯片,内置 Tensilica L106 32-bit RISC 处理器,CPU 时钟速度最高可达 160 MHz,支持实时操作系统和 Wi-Fi 协议栈,可将高达 80% 的处理能力留给编程开发。ESP8266 有 Modem-sleep、Light-sleep、Deep-sleep 3 种省电模式,工作温度范围达到 $-40^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$,适合作为微控制器和 Wi-Fi 模块应用在工业领域中。

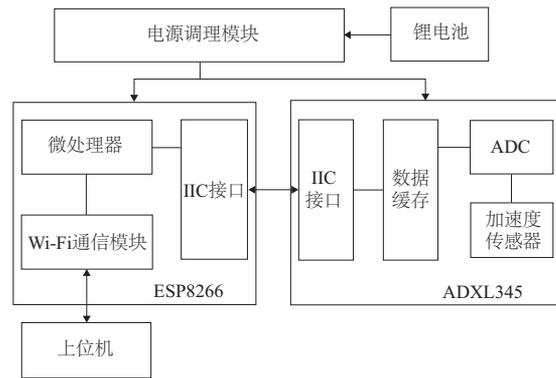


图 2 测振刀柄硬件组成

ADXL345 是一款体积很小的超低功耗 3 轴加速度传感器芯片,A/D 转换精度为 13 位精度,加速度测量范围达 $\pm 16\text{g m/s}^2$,内置转换速度为 3 kHz 的 ADC 模块简化了电路设计,通过 I2C 或 SPI 接口可以方便地与控制器直接连接,实现振动数据读取。

为了降低系统功耗,充分利用芯片性能,本系统以 ESP8266 作为加速度信号采集的主要控制芯片和无线数据传输的 Wi-Fi 通信芯片。测振刀柄用于低主轴转速下的加工振动检测,振动信号的数据量相对较小,而且由于刀柄体积的限制,电路板布局需要尽量紧凑,本文选用了通信速率较低但接口较为简单的 I2C 总线进行数据采集。使用 ESP8266 的 GPIO 口模拟 I2C 接口,移植 I2C 接口驱动和传感器驱动程序,实现传感器初始化配置和加速度信号读取。

刀柄系统为旋转部件,无法实现接触式在线供电,因此选用 7.4 V 锂电池(2 个标准 3.7 V 锂电池串联)对 ESP8266 进行供电;选用了低功耗开关电源芯片 LM2596 对锂电池电源进行降压,将稳定的 5 V 直流电压提供给负责采集和信号传输的 ESP8266 模块。为了节省电路板空间,将电源调理电路与传感器芯片驱动电路集成在一块电路板上。

2.2 刀柄软件系统设计

刀柄系统(下位机)上电后首先完成 ADC 芯片初始化配置、Wi-Fi 自动连接以及服务器创建,等待上位机(PC 机)连接以及控制命令。下位机软件通过建立 TCP 服务器的方式对外提供通信,在同一局域网中的 PC 机都可通过。通过向刀柄系统服务器发送相应请求命令来实现测振刀柄的数据采集和传输控制、低功耗/工作模式切换、下位机重启等操作。

使用 ESP8266 提供的睡眠模式可以减少芯片功耗,有效提高系统单次充电后的续航时间。ESP8266 提供 3 种睡眠模式,分别是 Modem-sleep、Light-sleep、Deep-sleep,其特性比较如表 1 所示。

在不需要检测振动信号时,上位机可发送控制消息使刀柄系统进入 Light-sleep 模式,将 CPU 暂停,并以 30 s 为周期通过定时器自动唤醒,在下位机的唤醒回调函数中响应上位机的状态控制命令,判断是否开始采集振动信号,软件流程如图 3 所示。

表 1 睡眠模式特性

项目	Modern-sleep	Light-sleep	Deep-sleep
	自动/强制	自动/强制	强制
GPIO 状态	保持	保持	保持
Wi-Fi	关闭	关闭	关闭
系统时钟	开启	关闭	关闭
RTC	开启	开启	开启
CPU	开启	暂停	关闭
衬底电流	15 mA	0.4 mA	20 μ A

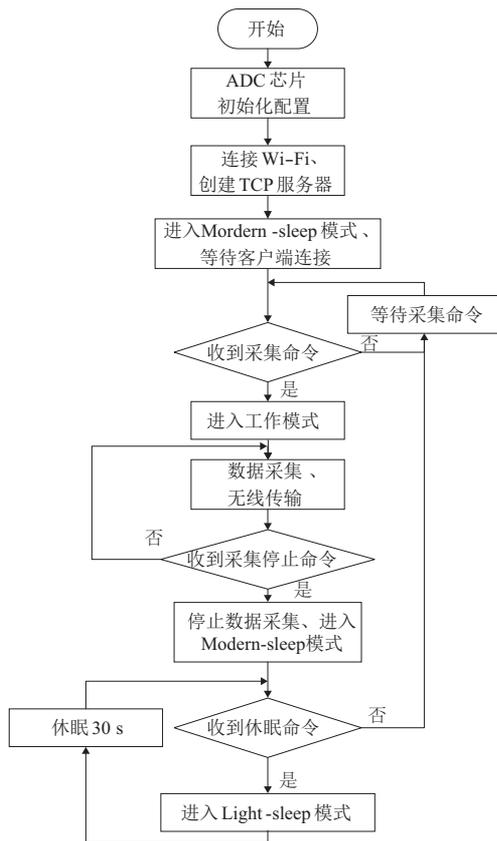


图 3 下位机软件流程

3 智能刀柄监测软件设计

本文以 PC 机作为上位机软件开发平台,上位机监测软件使用 Qt 编写界面,使用 socket 网络编程与智能测振刀柄的 TCP 服务器进行通信。为了实现大量振动数据的还原和后续处理,上位机软件调用 MATLAB 信号处理函数对振动数据进行信号处理和分析。上位机监控软件由采集控制模块、信号预处理模块以及振动信号分析模块组成。

上位机将 Socket 与 TCP 服务器的 IP 地址和开放的端口号绑定,通过对 Socket 的读写实现与测振刀柄系统的通信和数据传输,上位机通过发送采集控制命令以及系统休眠命令控制智能刀柄系统的工作。采集命令发送完成

后,刀柄系统会通过 TCP 服务器将振动数据发送至上位机,并在监控界面实时显示。

由于刀具切削过程的复杂性与切削现场的各种干扰,使铣削加工振动信号总是夹杂着噪声。加工振动信号属于非平稳信号,时频域去噪算法的滤波效果并不理想,考虑到小波阈值去噪算法的计算速率较快且去噪效果较好的特点,本文通过 Qt 调用 MATLAB 小波分析工具箱,对振动信号进行了阈值去噪处理。

为了更加直观地观察铣削加工振动情况,需要对振动信号特征进行提取和分析。常用的信号分析方法包括时域、频域信号特征提取,小波分析等。本文采用时域分析中的均方根值来反映振动信号的能量特征。通过小波包分析提取振动信号的小波包频带能量分布情况,从中可以较直观地看出振动信号的能量分布情况。

4 智能刀柄性能实验验证

在动平衡仪的工具参数编辑界面输入希望达到的平衡质量等级,设定目标铣削加工的表面粗糙度 R_a 为 3.2,机床主轴最大转速为 2500 r/min,刀柄质量 2.5 kg,则测振刀柄的许用剩余不平衡量 U 为 15.8 g·mm。经过动平衡调节后,测振刀柄的剩余不平衡量为 2.9 g·mm,满足铣削半精加工的许用剩余不平衡量要求。

为了验证刀柄系统的振动检测性能,本文设计了铣削加工振动检测性能对比实验。在工件上粘贴加速度传感器,使用测振刀柄进行铣削加工,同时对加工振动信号进行检测,将加速度传感器与测振刀柄采集的振动信号进行对比,实验环境如图 4。试验所用机床为某公司的立铣床(型号 XK-L540,最高转速 30000 r/min),试验加工材料为铝合金,工件尺寸为 170 mm×130 mm×50 mm,铣刀直径为 10 mm。加速度传感器粘贴在工件表面,距离铣削加工区域 80 mm。机床主轴转速 1000 r/min,切削深度为 1 mm,进给速度 400 mm/min。

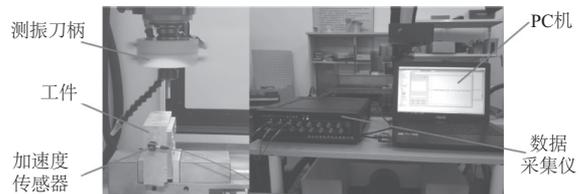
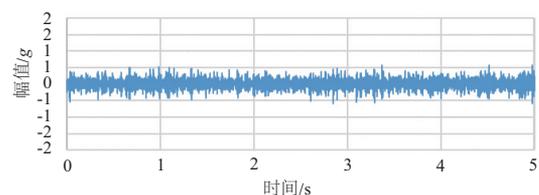
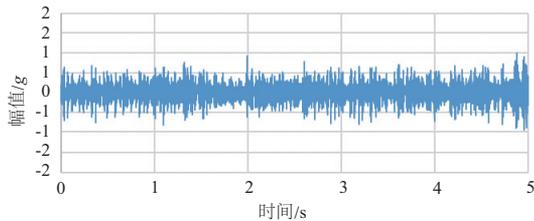


图 4 铣削振动试验现场

传统测振方式以及使用智能刀柄测得的振动信号如图 5 所示。经过计算可知传统方式测得的加速度信号均方差为 0.138 20g,测振刀柄的加速度信号均方差为 0.231 41g。



(a) 传统方式测得的振动时域波形



(b) 测振刀柄测得的振动时域波形

图5 两种方式测得的加工振动

5 结语

本文分析了铣削加工振动监测技术的不足,并提出了将无线传感器应用于机床刀柄系统中的无线振动监测方案,完成了刀柄系统的结构设计、下位机软硬件设计以及上位机监测软件的开发,并提出了测振刀柄系统的动平衡解决方案。刀柄系统剩余不平衡量为 $2.9\text{ g}\cdot\text{mm}$,可满足主轴转速 2500 r/min 以下的铣削半精加工需求。经过铣削加工振动检测试验,得出了以下结论:

1) 测振刀柄最高转速可达 2500 r/min ,可以满足中、低转速下铣削半精加工的需求,测振刀柄可对一般铣削加工中的振动进行在线监测。

2) 在工件上粘贴加速度传感器的传统方式测得的加速度信号均方差为 0.13820g ;而测振刀柄得到的加速度

信号均方差为 0.23141g ,较传统测量方式的结果增加 67% 。可见测振刀柄对振动信号的检测能力更强。

参考文献:

- [1] 郑鹏. 机床加工过程振动特性及对加工表面质量影响的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
- [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.
- [3] 张世光. 铣削刀具磨损状态监测系统关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.
- [4] 刘海军. 面向铣削过程的无线测振刀柄的关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [5] 周畅. 面向领域的6LoWPAN网络性能监测工具及路由优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [6] 陈建立. 刀柄系统智能化技术基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- [7] P.K.Wright, D.A.Dornfeld, R.G.Hillaire, et al. A wireless sensor for tool temperature measurement and its integration within a manufacturing system[J]. Transaction of North American Manufacturing Research Institute, 2006, 34:1-8.
- [8] 刘晓东. 新型四维铣削力测量刀柄[J]. 仪表技术与传感器, 1999(1): 34-37.
- [9] DINI G, TOGNAZZI F. Tool condition monitoring in end milling using a torque-based sensorized toolholder[J]. Proceedings of IMech E, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2006, 221:11-23.

收稿日期:2018-12-17

(上接第14页)

振频率,并且可以进一步提高隔振效率。由修正后的液压隔振器模型可以知道,隔振器的共振频率和反共振频率与隔振器的体积刚度有关,隔振器的体积刚度会随着隔振器液体的初始静压增大而增大,从而影响隔振性能。

4 结语

本文设计制作了一种新型液压式动力反共振隔振器,进行了大量试验研究,并与理论分析进行比较,得到如下结论:

1) 考虑隔振器体积刚度的新型液压隔振器模型能够较好地预测隔振器试验结果,较单自由度集中参数模型能够更好地预测系统的二阶共振峰值。

2) 新型液压隔振器的反共振频率可通过调节惯性质量的大小来实现,隔振系统的两阶共振峰值都会随着负载的增大而减小,但对反共振频率没有影响。

3) 隔振器的初始液压影响着隔振效果,合理增加初始液压能够提高隔振效率。

参考文献:

- [1] 肖庆雨,周加喜,徐道临,等. 一种六自由度准零刚度隔振平台[J]. 振动与冲击,2019,38(1):258-264.

- [2] 路纯红,白鸿柏. 新型超低频非线性被动隔振系统的设计[J]. 振动与冲击,2011,30(1):234-236.
- [3] 刘兴天,张志谊,华宏星. 新型低频隔振器的特性研究[J]. 振动与冲击,2012, 31(5):161-164.
- [4] 徐道临,刘怀远,刘春嵘. 流体隔振浮筏反共振特性的试验研究[J]. 振动工程学报,2013, 26(5):642-646.
- [5] FLANNELLY W. G. Dynamic antiresonant vibration isolator; U.S., 3322379[P]. 1967-05-30.
- [6] 龚亮. 液弹隔振器设计与试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- [7] HALWES. D.R. Vibration suppression system; U.S., 4236607[P]. 1979-02-26.
- [8] BRAUN. D. Development of antiresonance force isolators for helicopter vibration reduction[J]. Journal of the American Helicopter Society, 1982, 27(4):37-44.
- [9] N.F. Du Plooy, P.S. Heyns, M.J. Brennan. The development of a tunable vibration absorbing isolator [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005, 47:983-997.
- [10] SMITH M R, REDINGER W S. The model 427 pylon isolation system[C]// Annual Forum Proceedings- American Helicopter Society, 1999, 1:195-201.

收稿日期:2019-03-05