

基于嵌入式技术的机床能耗监测系统研究

顾文斌,李卓,李育鑫,黄主
(河海大学 机电学院,江苏 常州 213022)

摘要:设计了一种以嵌入式技术为基础的数控机床能耗监测系统,可实时采集和监控机床加工过程中的能耗状态。系统通过电流互感器和电压互感器采集机床相关元器件的电压和电流,利用 ARM-M3 系列的嵌入式微控制器控制采集过程和处理数控机床能耗数据,并通过 PC 端的人机交互界面实现对数控机床加工过程中功率曲线的实时处理和监控。最后通过对 CK6136 型数控机床进行能耗监测试验,验证了系统的可行性。

关键词:数控机床;能耗监测;系统开发;人机交互界面

中图分类号:TP278 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)06-0155-04

Study of Energy Consumption Monitoring System of NC Machine Tools Based on Embedded Technology

GU Wenbin, LI Zhuo, LI Yuxin, HUANG Zhu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: A NC machine tool energy consumption monitoring system is designed, based on embedded technology. This system is used to collect the real-time data of the energy consumption of the NC machine tool in its operation process and the voltage and current of its related components by the current and voltage transformers. ARM-M3 embedded micro-controller is used to control the collection process, process the energy consumption data of NC machine tools and realize the real-time processing and monitoring of the power curve in the process of NC machine tools by the human-machine interface on PC terminal. Then, the energy consumption monitoring test for NC machine CK6136 is carried out, and the result shows that this system has high practicability.

Keywords: NC machine tools; monitoring of energy consumption; system development; man-machine interface

0 引言

近年来,随着制造业能耗和环境问题的日益严峻以及全球低碳化形势的发展,机械加工过程中的能耗问题成为绿色制造领域研究的热点问题之一。由于机床是制造业最重要的加工设备,加工过程中会消耗大量的能量,因此机床能耗问题的研究较为广泛。我国机床拥有量居世界第一,已超过 700 万台^[1],若每台机床额定功率平均以 10 kW 计算,则总功率约为 7×10^7 kW,约为三峡电站总装机容量(2.25×10^7 kW)的 3 倍^[2]。同时,大量统计调查表明:机床能量利用率十分低下,平均低于 30%,因此,机床加工过程中的节能潜力巨大。

关于机床能耗问题,国内外已经有大量的研究。国际生产工程科学院第 18 届生命周期工程会议针对机床能量消耗监控问题,提出了一种模块化能量消耗建模方法,为机床能量监控提供了方法学支持^[3];文献[4]中麻省理工大学的 KORDONOWY 提出了一种基于额定功率的机床能量效率测算模型,采用统计学的方法,将机床能耗分为可变能耗和固定能耗,并运用此方法对多种不同类型的机

床建立了能耗统计模型;澳大利亚新南威尔士大学 KARA 团队对 GUTOWSKI 教授提出的切削功率模型进一步阐述和完善,并在 Mori Seiki NL2000-5500 等机床上开展实验研究,该团队还提出一种在全球制造环境下评估产品能耗的模型^[5-7]。重庆大学刘飞等早年提出了机械加工过程中存在由载荷引起的附加能量损耗问题及其测算方法^[8];刘高君等人提出了一种人机交互式机床加工状态判别方法,但该方法需要人为实时操作,车间应用较为不便^[9];浙江大学唐任仲等在数控机床能量供给建模、机械加工工艺流程能量需求建模与产品车间生产过程碳排放计算等方面开展了相关研究^[10]。综上所述,对数控机床加工过程中的能量消耗过程进行监控,是获取机床能耗实时数据的有效手段,能够为机床节能优化决策和评估机床能耗提供数据支持,是我国机床产业节能减排的实际需求。

本文针对数控机床能耗监测问题,搭建了一套以 VB 和 ARM 为基础的机床能耗监测系统,为机床加工过程中的能效评估和能耗优化提供基础数据和理论支持,并利用所设计的数控机床能耗监测系统对某台数控机床进行了能耗监测试验。测试结果表明该系统能够实时、准确地测

作者简介:国家自然科学基金面上项目(51875171);江苏省常州市科技计划资助项目(CJ20159052);国家教育部人文社科规划基金项目(17YJA630127)

作者简介:顾文斌(1980—),男,江苏连云港人,讲师,博士,主要研究方向为机电一体化、优化设计和智能控制算法等。

量机床加工过程中的能耗数据,运行稳定且可靠,对机床实际生产中的节能降耗研究起到指导作用。

1 机床能耗监测系统总体设计

为实现能耗信息的实时显示和监控,本文所设计的能耗监测系统主要由能耗数据采集模块、能耗数据处理模块、能耗数据控制传输模块、PC 监控端 4 部分构成。其中能耗数据采集模块主要包括电压互感器、电流互感器、低通滤波器;能耗数据处理模块包括 3 片三相电能计量芯片组成的电能计量芯片组;能耗数据控制传输模块主要包括 ARM 芯片、LED 显示器、矩阵键盘;PC 监控端采用 VB 编程的人机交互界面来显示能耗功率曲线。

1.1 监测系统

监测系统工作过程如下:电压和电流互感器分别采集三相电压和电流,经过低通滤波后进入电能计量芯片组,进行 A/D 转换和计算处理,得到相应的电压有效值、电流有效值、功率、电能等能耗参数,并将这些参数存储于寄存器中。该寄存器与 ARM 芯片之间通过 SPI 接口相连接,ARM 芯片可读取其中的参数进行计量、显示、存储,并通过通信接口向 PC 端传输数据,PC 端将接收到的数据通过 VB 软件编程进行图像绘制,通过人机交互界面显示能耗功率曲线。系统总体框图如图 1 所示。

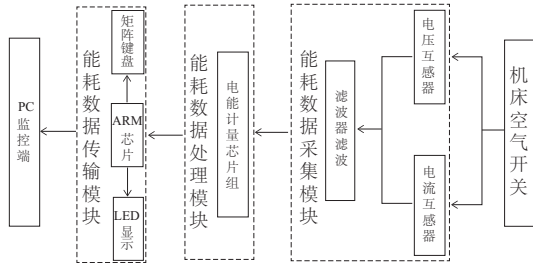


图 1 系统总体框图

1.2 工作原理

本文所设计的能耗监测系统通过电能计量芯片将电流(电压)传感器采集的采样值进行平方、开方等一系列运算,得到电流、电压有效值,并计算出有功功率、有功能量、机床有效能量和能量利用率,并将这些参数传输处理后传输至 PC 端人机交互界面进行能耗信息的显示,从而对机床加工过程的能耗进行监测。能耗参数的简要描述如下:

1) 电压(电流)有效值

SA9904B 电能计量芯片以 3.2 kHz 的采样频率对机床的电信号进行采样,经过模数转换后,分别对电流电压的采样值进行平方、开方得到电流有效值、电压有效值。

电流有效值为

$$I = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n i_n^2}{n}} \quad (1)$$

式中 i_n 是第 n 次采样得到的瞬时电流值。

电压有效值为

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u_n^2}{n}} \quad (2)$$

其中 u_n 表示第 n 次采样得到的瞬时电压值。

2) 有功功率

根据有效电流和有效电压,计算有功功率:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{n=0}^n (U(n) \times I(n)) \quad (3)$$

式中: $U(n)$ 表示第 n 次计算得到的有效电压值; $I(n)$ 表示第 n 次计算得到的电流有效值。得到单相的功率后,计算三相的有功功率:

$$P = P_a + P_b + P_c \quad (4)$$

3) 能量消耗

根据瞬时功率得出能量消耗为

$$E = \int P dt \quad (5)$$

4) 工件加工过程有效能量

工件加工过程的有效能量是在机床加工过程中实际用于切削加工的能量,反映了切削全过程直接用于去除材料的有用能量消耗,其表达式为

$$E_{\text{eff}} = \sum_{k=0}^n \int_{t_{\text{csk}}}^{t_{\text{cek}}} \left(\frac{P_{\text{in}}(t) - P_{U_i} - P_{\text{aux}}(t)}{1 + \alpha} \right) dt \quad (6)$$

式中: E_{eff} 表示检测机床的切削有效能量, P_{U_i} 表示机床加工动力系统在转速 n_i 下的空切功率, $P_{\text{aux}}(t)$ 表示机床特定辅助系统的功率, α 表示机床切削时的附加负载系数, t_{csk} 表示第 k 个切削过程的开始时间, t_{cek} 表示第 k 个切削过程的结束时间。

5) 机床加工过程能量利用率

机床在整个工作过程中或在工件加工全过程的能量利用率是对机床实际工作效率的一个可靠评估,能反映出工件从毛坯到成品或半成品过程中有效能耗占总能量消耗的比例,其表达式为

$$\eta_E = \frac{E_{\text{eff}}}{E_{\text{in}}} = \frac{\sum_{k=0}^n \int_{t_{\text{csk}}}^{t_{\text{cek}}} \left(\frac{P_{\text{in}}(t) - P_{U_i} - P_{\text{aux}}(t)}{1 + \alpha} \right) dt}{\int_{t_{\text{ins}}}^{t_{\text{ine}}} P_{\text{in}}(t) dt} \quad (7)$$

式中: η_E 表示机床加工全过程的能量利用率, k 表示第 k 个切削过程。

2 硬件系统设计

2.1 能耗数据采集模块硬件设计

为对机床总输入端能耗数据进行采样,本文设计了能耗数据采集模块来实现上述任务要求。该模块选用 TA12-100 型电流互感器和 ZMPT101B 型电压互感器分别测量数控机床空气开关中的三相电流和三相电压,并选用 TCL14 型巴特沃斯低通滤波器滤除掉采样后模拟数据信号中的高频噪声和直流增益,提高信号的抗干扰性。模块接线示意图如图 2 所示。

ZMPT101B 型电压互感器模拟电压输出为 250 V 以内

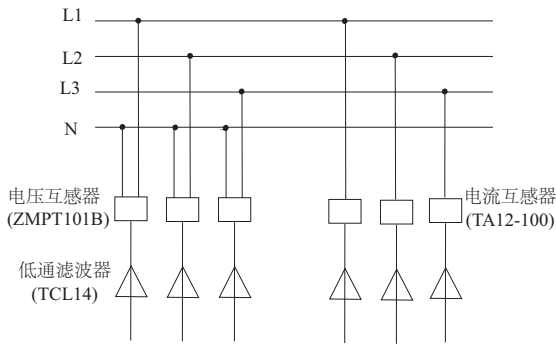


图2 能耗数据采集模块接线示意图

交流电压,所以对机床的三相四线(其相电压为 220 V)并联一个 110 k Ω 电阻对电压进行取样,并让其通过电压互感器。该电压互感器的输入/输出为 2 mA/2 mA,在交流电情况下,其产生的次级串联一个 50 Ω 的电阻,互感器将产生一个有效值为 0.1 V 的正弦信号,满足测量要求。TA12-100型电流互感器输入/输出比例为 5 A/5 mA,假设机床最大电流为 20 A,次级线圈将产生 20 mA 正弦电流,利用 50 Ω 电阻取样,将得到有效电压为 1 V 的交流电信号,从而满足测量要求。

2.2 能耗数据处理模块硬件设计

为了对采集得到的电流(电压)信号进行计算处理并得到有功功率、无功功率、功率因数及电能等能耗参数,最简单直接的方式就是采用电能计量芯片。因此,能耗数据处理模块的硬件选用 3 片 SA9904B 三相电能计量芯片组成的电能计量芯片组。该电能计量芯片集成了 A/D 转换模块和数字处理模块,包含 9 个代表各相的有功电能、无功电能与电源电压的 24 位元暂存器,用于存储经计算处理后的能耗数据。将 SA9904B 应用于机床能耗监测,不仅能够满足最基本的能耗监测需求,还能获得三相的电流、电压、有功功率等数据,可用于改进机床的使用、优化加工策略、提高加工质量等。

2.3 能耗数据控制传输模块硬件设计

为实现对采集过程进行编程控制,协调各个模块运行的优先级,协助调用系统资源,本文设计了能耗数据控制传输模块来满足上述要求。能耗数据控制传输模块的硬件设计包括微控制器和通信接口的选型以及 LED 显示器和矩阵键盘的设置方式。

1) 微控制器和通信接口选型

本文选用 STM32F103C8T6 型号的 ARM 芯片作为该模块的微控制器。STM32F103C8T6 型号的 ARM 芯片使用高性能的 32 位处理器,它为实现 MCU 的需求提供了低成本的平台、较少的引脚数目、较低的系统功耗,同时提供卓越的计算性能和先进的终端系统响应。由于该模块对微控制器的要求不是很高,没有很复杂的算法,都是简单的数据传输存储、输入显示,因此该芯片完全可以满足设计要求。由于 RS-232 是通信工业中最广泛应用的一种串行接口,且能够满足该模块数据传输的功能,因此本文选用 RS-232 串口来实现微控制器和 PC 端间的数据传输。

2) LED 显示器和矩阵键盘的设置

为了便于用户操作,在本地端设了一个 4 \times 3 的键盘,其中包括 0-7 的 8 路通道选择数字键以及一些控制显示方式、显示状态等功能键。在这里可以同时选择两路或多路通道进行电压、电流、功率、电能等能耗参数的数据通信。显示器选择 4 位七段 LED 数码管完成数据的显示,其中 1 位用来显示通道号,3 位用来显示电压、电流、功率值。

3 软件系统设计

系统软件包括下位机软件和上位机软件,由于机床加工过程中需要传输的能耗数据种类较多,根据系统的实时性要求,本系统的串口通信采用以上位机发出指令、下位机应答的方式进行工作。具体过程是上位机根据系统运行不同阶段,向下位机发送指令,下位机以中断方式接收指令,每接收一条指令,按照上位机指令的要求执行后,将运行结果反馈给上位机。

3.1 下位机软件设计

下位机软件主要实现对电流、电压、功率、电能的采集处理发送,由 1 个主程序和 4 个子程序构成。主程序主要负责系统的初始化和子程序的调用;子程序包括 UART 通信子程序、数模转换子程序、LED 显示子程序和矩阵键盘子程序。由于系统采用 8 位输出,在程序设计上就采用 8 位输出模式。通道数的选择以及中断的控制都由软件来设计。下位机软件程序框图如图 3 所示。

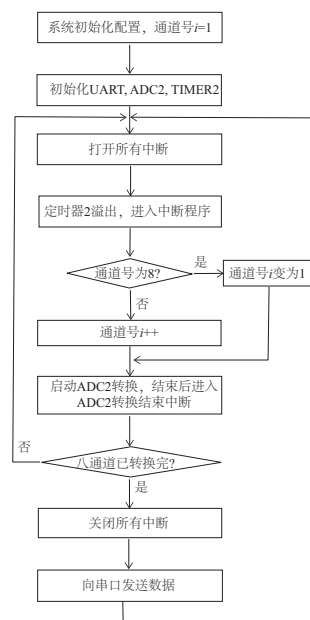


图3 下位机软件程序框图

3.2 上位机人机交互软件设计

a) 上位机程序设计

上位机(PC端)的作用是实时接收下位机(微控制器)发送的能耗参数数据并将接收到的数据进行图形绘制和数据分析。上位机用图形界面来反映机床实际能耗

情况,并为用户提供人机交互界面,使用户能够在界面上监视机床能耗和运行状态。

上位机采用 Visual Basic 软件来进行人机交互界面的程序设计,通过控件的调用和程序代码的编写,实现能耗数据监测系统的可视化编程。软件通过调用 TextBox(文本框)、Button(按钮)、Label(标签)等控件实现控制命令的发送;通过调用 Mscomm 控件实现上位机与 ARM 微控制器之间的串口通信;通过调用 CWGraph 控件实现数据曲线显示。下位机软件编程程序框图如图 4 所示。

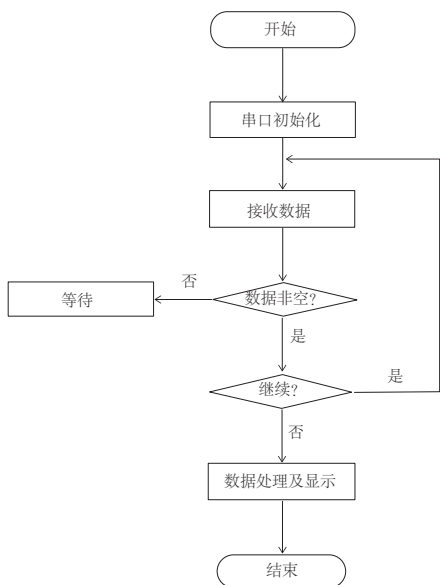


图 4 下位机软件编程程序框图

b) 人机交互界面功能实现

数控机床能耗监测系统的人机交互界面由能耗监测、能耗分析和结果输出 3 个功能模块构成。各功能模块在能耗监测过程的作用如下:

1) 能耗监测模块:主要用于监测机床能耗的功率数据,包括采集、显示、存储等功能,对实时功率数据进行存储/显示的同时绘制机床加工过程中的功率曲线。为便于观察,可以对功率曲线进行显示、隐藏和局部放大等操作。

2) 能耗分析模块:主要用于对能耗信息处理和分析;统计计算如机床总能耗、机床有效能量、机床能量利用率和机床运行时间等机床能耗信息并绘制机床能耗分布图。

3) 结果输出模块:主要用于输出用户需求的能耗信息,例如机床总能耗、机床有效能量和机床能量利用率等机床能耗信息。该数控机床能耗监测系统人机交互界面如图 5 所示。

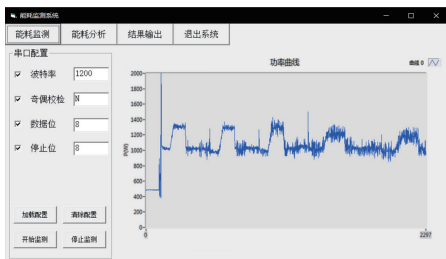


图 5 监测系统人机交互界面

4 实验验证

4.1 实验过程

在完成了构成该系统的软件和硬件设计后,为了验证该原型系统的准确性和有效性,对常州某公司加工车间的 CK6136 数控车床进行在线能耗监测实验。首先进行校表,将监测系统中的能耗数据采集模块接入机床空气开关,并运行一段空程序,使机床处于运行状态并监测其电流、电压、功率以及电能消耗变化。

4.2 加工零件信息

车间对 CK6136 数控车床安排的加工零件为进气芯轴。该零件加工的主要工序为车外圆。机床能耗测试实验对加工零件没有要求,对 CK6136 数控车床进行能耗监测实验时,即监测加工进气芯轴从毛坯到半成品的过程中 CK6136 数控车床的能耗。进气芯轴的毛坯为 $18\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的黄铜棒料,加工时主轴转速 550 r/min 。

4.3 结果分析

为了验证设计的能耗监测系统的准确度,使用了由日本某公司生产的型号为 HIOKI3390 宽频功率分析仪来作为校准仪器。在数控机床 CK6136 总电源空气开关处同时安装该监测系统的数据采集模块 HIOKI3390 宽频功率分析仪,对机床实时输入总功率进行记录,并对两个仪器记录的数据进行了对比,某个测试过程功率曲线记录如图 6 所示,由图 6 可看出两者测量的功率值相对误差较小。

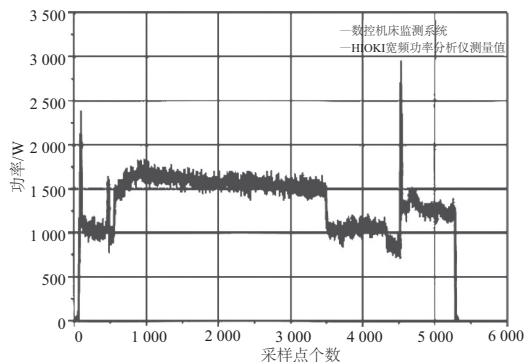


图 6 能耗监测结果

实测所得的数控机床加工过程能耗过程分析如图 7 所示,其中机床总能耗、机床有效能量、机床能量利用率和机床运行时间等机床能耗信息均由人机交互界面显示,便于工作人员更好地分析和了解数控机床的工作过程及其实时能耗,为后续提高生产过程中的节能减排效果提供可靠的数据支撑。

5 结语

本文设计了一套基于嵌入式系统的数控机床能耗状态监测系统,该系统能实时反映出机床在运行过程中的功率曲线、能耗参数等信息,具有良好的实时性、可靠性和稳

(下转第 167 页)