

# 工业传动轴转矩实时检测与 数据分析系统设计

陈凌峰,周晨钟,李品俊,曾美霞,黄辉先  
(湘潭大学 信息工程学院,湖南 湘潭 411105)

**摘要:** 针对工业传动轴转矩研究的要求,设计了一种基于 STC12C5A60S2 单片机技术、结合 AD7705 模数转换器数据采集及 nRF24L01 无线模块进行数据通信的有转矩实时检测与数据分析的系统。系统的检测模块安装于传动轴上,通过无线模块将检测信息传送至接收模块,接收模块再把数据传至上位机进行转矩实时监控与数据分析。给出了系统硬件设计的原理电路及软件设计的程序流程图,同时给出了系统的上位机操作界面,系统运行良好,具有较好的应用性和可移植性。

**关键词:** 工业传动轴;转矩;实时监控;数据分析

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)01-0079-04

## Real-time torque monitoring and data analyzing system for industrial transmission shaft

Chen Lingfeng, Zhou Chenzhong, Li Pinjun, Zeng Meixia, Huang Huixian  
(School of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** According to the requirement of studies of industrial transmission shaft torque, a system of torque real-time monitoring and data analysis, based on STC12C5A60S2 MCU, has been designed, in which the technology of AD7705 ADC data acquisition and nRF24L01 wireless communication has been applied. The detection module of the system is fixed on the shaft transmitting the detection information to the receiver module via a wireless communication module, and then the receiver module transmit the data to upper computer operating interface for real-time monitoring and data analysis. In addition, the circuit diagram and the program flow chart of the system are given. The system is excellent in operation and has fine application and portability.

**Key words:** industrial transmission shaft; torque; real-time monitoring; data analysis

在机械传动系统中,转矩是反映机械设备性能的最典型的参数之一,是维护设备安全、控制设备高效工作、研究设备运动性能等工作中重要的参数,而这一参数主要体现在传动轴上。由于工业传动轴的不可破坏与拆装以及工作时连续旋转的特性,故传感器不允许改变传动轴的结构,同时传感器须结合无线装置。如果工业现场环境恶劣干扰信号强,则还要对检测信号和数据进行模拟和数字信号处理。随着计算机技术的发展,应用计算机软件收集、管理数据并进行可视化分析将为维护人员的工作提供极大的帮助,也能为研究人员提供科学有效的实时数据。本研究应这一需求,设计了一套具有传动轴转矩实时检测、监控和数据分析功能的系统。数据采

集模块具有精度高、量程大、体积小的特点,通过基于 nRF24L01 无线电路把采集的数据传至数据监测与传送模块实现简单检测功能,最后数据通过串口传输至上位机,利用虚拟仪器 LabVIEW 软件实现数据分析与全面的数据监控。

### 1 金属丝电阻式全桥应变检测原理

目前有各种转矩检测的方法,包括接触式检测方法(如电阻式应变片检测方法)和非接触式检测方法(如光学、光电子学、磁学、电磁学检测和其他各种相位数字检测方法等)<sup>[1]</sup>。

本系统采用金属丝电阻式应变片进行转矩检测。其检测原理是将电阻应变片作为传感元件,利用粘合剂将

其粘帖在被测构件上,当构件受力发生形变时应变片的敏感栅会随其产生等量形变,从而引起应变片电阻值发生变化,打破全桥测力电路平衡,输出电压  $\Delta U$ ,可以间接计算传动轴所受转矩。通过物理推导可得:

$$M_k = \frac{E \cdot W_p}{4 \cdot (1 + \mu) \cdot U \cdot k} \cdot \Delta U \quad (1)$$

式中,  $M_k$  为作用在传动轴上的转矩;  $E$  为金属材料的弹性模量;  $W_p$  为转矩断面系数(实心轴为  $\frac{\pi D^3}{16}$ );  $\mu$  为金属材料泊松比。

传动轴材料在弹性形变范围内的  $\frac{E \cdot W_p}{4 \cdot (1 + \mu) \cdot U \cdot k}$  为常数。由此可得,传动轴所受转矩值与测得电桥电压成线性关系。

基于以上原理,作用在被测传动轴上的转矩值转化为电阻应变片电阻值的变化值,通过电桥电路转变为电信号。

## 2 硬件系统设计

### 2.1 数据采集模块

检测电路由单片机控制电路、ADC 电路、无线电路等组成,其中单片机是核心控制器,用以协调其他部件工作。检测电路元件全部由贴片元件组成,尽量使检测模块小巧紧凑,这样模块能够稳定地安装在传动轴上。数据采集模块由大容量锂电池供电。检测系统组成如图 1 所示。

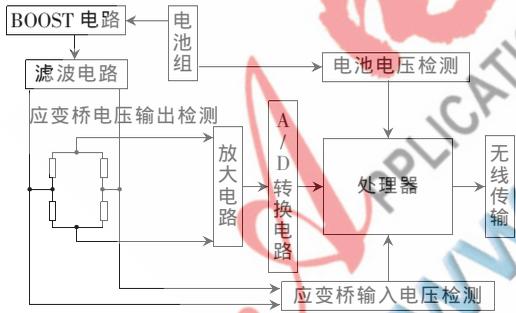


图 1 数据检测系统示意图

#### 2.1.1 单片机外围电路

采用 STC12C5A60S2 单片机作为控制器,该单片机可以工作在 3.3~5.5 V 的电压范围;具有 60 KB 程序存储空间;工作频率最高可达 35 MHz,相当于普通 8051 的 450 MHz;支持高速 SPI 通信总线,适应该系统高速监控的实时现场<sup>[2]</sup>。采用中断式数据更新操作,分别把  $\overline{INT0}$  和  $\overline{INT1}$  连接至 AD7705 模数转换器的  $\overline{DRDY}$  引脚和 nRF24L01 无线模块的 IRQ 引脚,大幅提高了系统实时操作能力;把 AD0 脚连接由电阻分压的锂电池电压输出端,即用单片机集成的 10 位高速 ADC 检测锂电池电压。单片机外围电路如图 2 所示。

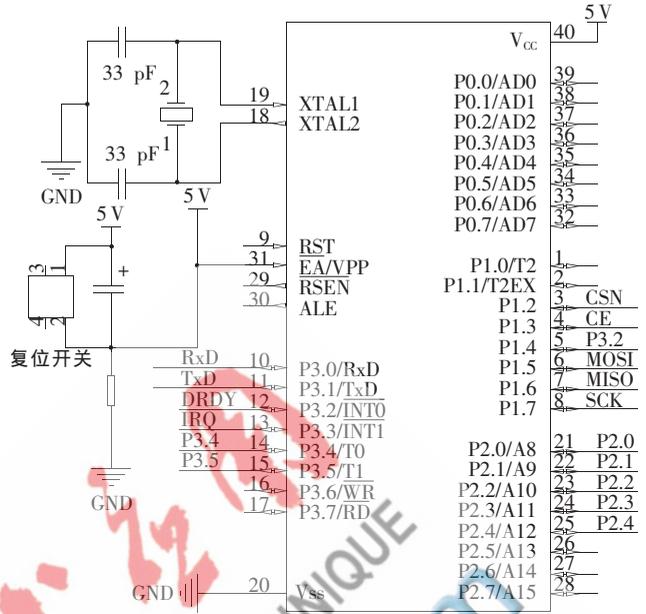


图 2 单片机外围电路

#### 2.1.2 传感信号检测电路

传感信号检测电路如图 3 所示。该电路的核心部件 AD7705 集成  $\Sigma-\Delta$  型双通道 16 位全差分 ADC 和可编程模拟放大前端,适用于检测电阻应变桥微小电压变化,同时保持较高精度;配置片内寄存器可实现模拟输入级缓冲工作模式和调整输入级增益倍数;在缓冲模式下输入级输入阻抗增大,以减少后级电路对前级电路的影响;AD7705 参考电压由高精度基准电压芯片 AD780AN 提供,当 SEL 引脚连接 NC 引脚时,芯片 OUT 引脚输出电压为 2.5 V;当 SEL 引脚连接地时,OUT 引脚输出电压为 3.0 V。本电路采用前一种接法,输出电压为 2.5 V。

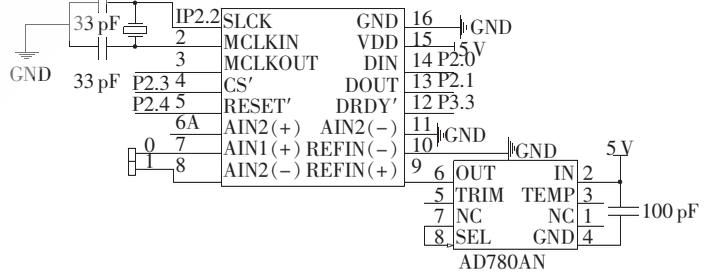


图 3 传感信号检测电路

#### 2.1.3 可变电压电路

如图 1 所示,4 片相同型号的电阻应变片以惠斯通电桥型连接,其中  $U$  为电桥电压。可以由物理公式推得:

$$\Delta U = \frac{\Delta R}{R} \cdot U \quad (2)$$

然后推得:

$$\Delta U = K \cdot \frac{dL}{L} \cdot U \quad (3)$$

式中,  $K$  为敏感栅灵敏度系数,  $K$  为常数。则根据式(3)当  $\frac{dL}{L}$  不变时,  $\Delta U$  与  $U$  成正比例关系, 也就是说, 当敏感栅金属丝径向拉伸量不变时, 提高加载在电桥上的给定电压能够加大电桥输出电压的变化; 模数转换器的分辨率不变时, 可以提高检测精度。

采用 LM2577 芯片设计简易开关 BOOST 升压电路, 其电压输出范围为 4~30 V, 满足不同电阻值的电阻应变片传感电路提高检测精度的需要。值得一提的是, 由于该电路是开关电源, 其纹波含量比线性电源大, 在电源输出端增加低通滤波器可以有效减少纹波。实验证明该电路输出纹波为 220 mV, 而增加滤波器后纹波降至 10 mV 以下。可变电电压电路如图 4 所示。

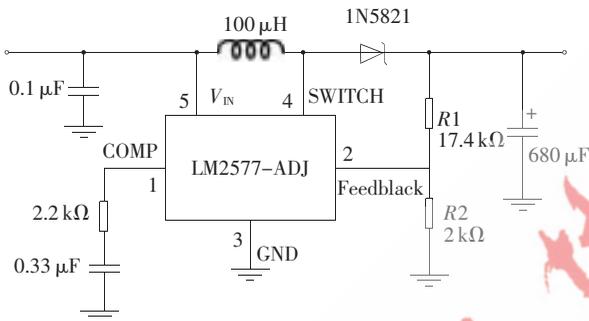


图4 可变电电压电路

#### 2.1.4 无线通信电路

无线通信电路采用了 nRF24L01 芯片, 通过该芯片可以在 2.4~2.5 GHz 世界通用 ISM 频段进行无线通信; 该芯片发射功率为 -6 dBm 时电流仅为 9.0 mA, 接收模式时为 12.3 mA, 故采用该芯片的无线通信电路功耗极低, 在电池供电情况下可以长时间工作。此外, 该芯片支持 SPI 通信方式, SPI 接口数据速率达 0~8 Mb/s, 可以实现数据高速传输<sup>[3]</sup>。经实验该通信电路在有障碍的环境中通信范围达 25 m, 空旷的环境中通信范围达 50 m。

应当指出, nRF24L01 芯片对 5 V 工作电平的单片机并不兼容, 若输入端电流大于 10 mA 将会损毁芯片, 故在电路 CE、SCK、CSN 和 MOSI 端增设阻值 1 kΩ 的电阻限流, 以保护芯片。

#### 2.1.5 温度检测电路

为了追求更高的检测精度, 可以对电阻应变片和传动轴进行温度补偿。本系统采用 DS18B20 单线数字温度传感器检测传感器工作环境温度。该传感器贴片封装体积小, 适用电压 3~5 V, 在 -10~+85℃ 范围内, 精度高达 0.5℃, 非常适合本系统进行温度检测。此外, 该传感器内部集成有存储器、配置寄存器和独特的单线通信接口, 能使设计更具灵活性。

#### 2.2 数据监测与传输模块

数据监控与传送系统是把检测数据传送到上位机

的中转站, 同时还具有简单实时数据监测功能。该模块以单片机为控制核心, 辅以液晶显示模块、无线模块、输入键盘、报警电路和 RS-232 标准串口通信电路。由开关电源适配器供电。数据监控与传送系统示意图如图 5 所示。

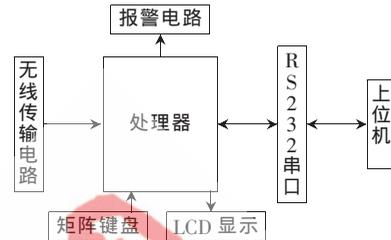


图5 数据监控与传送系统示意图

实时监控电路包括了显示模块、输入键盘和报警电路。其中, 显示模块采用的是 12864 中文图形液晶显示屏, 内建 GB 码简体中文型字库, 该模块显示转矩数值和电池电量信息; 输入键盘为矩阵式键盘, 通过输入键盘可以对传动轴受力的安全范围进行设定, 当受力超过安全范围时报警电路将发出警报; 报警电路由蜂鸣器和 NPN 三极管驱动电路组成。

### 3 软件系统设计

#### 3.1 下位机程序设计

本系统下位机 C 语言代码分为传动轴转矩检测与发射部分和接收监控人机操作部分。其中转矩检测发射部分主要包括 AD7705 芯片驱动程序和 nRF24L01 通信芯片驱动程序, 以及 STC12C5A60S2 单片机的内部逻辑和实时监控发射程序。发射系统流程图和接收系统流程图分别如图 6、图 7 所示。

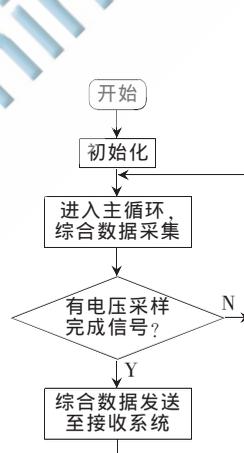


图6 发送系统流程图

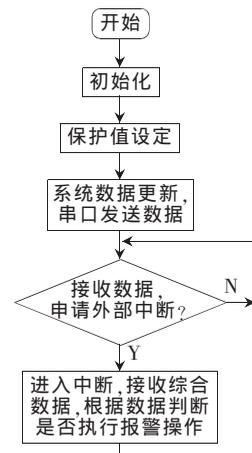


图7 接收系统流程图

接收监控系统的程序主要包括: 12864 液晶驱动程序、nRF4L01 通信芯片驱动程序、矩阵键盘扫描驱动程序、RS232 标准的串行数据通信程序以及一套单任务的嵌入式实时操作系统程序。操作系统程序中包括了人机交互式界面、实时数据管理和刷新显示界面和上位机实时通信界面。将采样数据发送至上位机, 有利于进行实时监控。此外系统包含转矩报警程序, 即一旦超过设定

值将立刻报警,提醒工作人员进行保护操作。

### 3.1.1 系统人机交互界面

接收监控系统启动以后,用实时刷新的扫描算法,通过矩阵键盘输入转矩的保护值、安全设定值以及复位信息等,相当于人工设定数字的参考量,设置完毕后进入系统进行实时监控、误差比较和报警,使整套系统按照给定值安全地运行。

### 3.1.2 智能化设计

根据不同的电阻应变片配置合适的输入电压  $U$  可以最大限度地提高检测精度,然而根据式(1),当输入电压  $U$  改变时,转矩计算公式需要调整。本系统通过单片机空余 A/D 口采集电桥输入电压值,与先前电桥输入电压值进行对比,然后判断是否改变转矩计算公式。这样的智能化设计避免了繁琐的修改程序过程。

此外,环境温度  $t$  对应变片的所有性能都有显著的影响<sup>[4]</sup>。虽然全桥结构的应变片检测电路可以消除由环境温度引起的虚假输出,但是温度变化依然会影响应变片的检测性能,从而造成误差。如果使用温度自补偿的电阻应变片,可以很好地解决温度漂移问题。如果电阻应变片不具有自补偿功能,则使用金属丝电阻应变片时把阻值近似为与温度  $t$  的函数关系:

$$R(t) = R_0[1 + \alpha(t - t_0)] \quad (4)$$

式中,  $R_0$  为参考温度  $t_0$  (通常  $= 0^\circ\text{C}$ ) 时的阻值;  $\alpha$  为正温度系数<sup>[5]</sup>。

### 3.2 上位机实时监控界面

采用 LabVIEW 软件设计了具有实时检测功能和数据分析功能的上位机系统具有界面友好简洁的特点,上位机以串口通信与下位机相连,通过调用串口传送的数据,及时接收下位机发送来的数据并实时更新再经过处理绘制成转矩与时间同步的曲线<sup>[6]</sup>,从而传动轴应力得以形象化地显示在上位机界面。

上位机数据分析界面提供了数字滤波器,可对滤波算法、采样点数、截止频率进行自由设定,从而消除检测过程中的高频噪声的干扰,保留有效的低频转矩信号。

系统底层程序采用 LabVIEW 的底层数字滤波模块,通过数字信号处理算法对采集的信号进行滤波。值得一提的是,数字滤波可以应对消除不同干扰的需要灵活设计滤波算法,这远比采用模拟滤波器要优越。

本文完成了单片机系统的硬件设计、制作、调试,完成了单片机控制程序设计、调试以及上位机监控系统程序设计调试,模拟转矩实验中取得了良好的效果。通过上位机系统监控传动轴的应力,并对转矩数据进行分析,适用于传动轴保护工作和运动系统研究工作,系统具有良好的可移植性和一定的自适应性。值得一提的是该项目是应湘潭钢铁集团有限公司的需求而立项,检测转矩量程高达  $1.2 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{M}$ ,一直是国内外待解决的难题。

### 参考文献

- [1] 朱春梅,王朝霞.基于单片机的转矩测量技术研究[J].新技术新工艺·数字技术与机械加工工艺装备,2008(9):47-49.
- [2] 胡新华,戴索江,俞冬丽.STC12C5A60S2 单片机在可控电动扳手控制器中的应用[J].微型机与应用,2010,29(16).
- [3] 刘丽霞.车辆转矩与转速测量系统[J].仪表技术与传感器,2010(7):89-91.
- [4] 尹福炎.电阻应变片的温度自补偿及其他[J].称重知识,2009,38(9):40-44.
- [5] 潘永湘,杨延西,赵跃.过程控制与自动化仪表(第2版)[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [6] 王涛.基于虚拟仪器技术的发动机功率于转矩的测量[J].科技信息,2010(20):76.

(收稿日期:2011-06-11)

### 作者简介:

陈凌峰,男,1990年生,本科,主要研究方向:自动化。  
周晨钟,男,1990年生,本科,主要研究方向:自动化。  
李品俊,男,1987年生,本科,主要研究方向:自动化。