

# 基于 STM32F4 的时栅位移传感器 信号处理系统设计

周金钢, 彭东林, 郑方燕, 郑永, 王淑娴

(重庆理工大学 机械检测技术与装备教育部工程研究中心

时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室, 重庆 400054)

**摘要:** 为了提高时栅位移传感器的测量精度及分辨率, 提出了一种基于 STM32F4 的时栅位移传感器信号处理系统; 系统包括硬件电路设计和软件设计; 硬件电路以 STM32F4 内核处理器芯片和复杂可编程逻辑器件 CPLD 为核心, 集成了信号调理、信号处理等电路模块; 运用高频时钟脉冲插补时栅位移传感器感应信号和参考信号之间的相位差, 通过软件设计控制信号的采集和处理, 实现了相位检测; 经实验验证, 采用以 STM32F4 为核心的时栅信号处理系统后, 时栅位移传感器的角度误差峰峰值达到 2.4", 实现了高精度、高分辨率的时栅角位移测量。

**关键词:** 时栅位移传感器; STM32F4; 高频脉冲插补; 相位检测

## Design of Time Grating Displacement Sensor Signal Processing System Based on STM32F4

Zhou Jingang, Peng Donglin, Zheng Fangyan, Zheng Yong, Wang Shuxian

(Ministerial Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment,

Ministry of Education, Chongqing Key Laboratory of Time-Grating Sensing and Advanced Testing Technology,

Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract:** In order to improve the measuring accuracy and resolution of time grating displacement sensor, we have put forward a time grating displacement sensor signal processing system based on STM32F4. This system includes hardware circuit and software design. The hardware circuit used STM32F4 kernel processor chip and complex programmable logic device CPLD as the core, including the integrated signal conditioning, signal processing circuit module, etc. Through the software design controled time gate signal acquisition and processing. In-serted phase difference between induction signal and reference signal by using the high-frequency pulse of STM32F4 kernel to complete the phase detection. By using this system, the experiments indicated that the peak-to-peak value of time grating position error is only 2.4". Realized the high precision and high resolution angular displacement measurement of time grating sensor.

**Keywords:** time grating sensor; STM32F4; high frequency interpolation; phase detector

## 0 引言

时栅位移传感器是基于时空转换思想研制的一种测量位移的新型传感器, 它摒弃了传统光栅等栅式传感器过分依赖的机械加工刻线工艺, 利用高频时钟脉冲插补感应信号和参考信号之间的相位差的方法来实现高精度和高分辨率的位移测量<sup>[1]</sup>。目前时栅已由静态领域测量拓展至动态领域测量, 为了保证测量精度以及分辨率, 动、定测头感应信号的频率从较低频率的 400 Hz 提升至较高频率的 40 kHz, 对如此高频率信号进行处理, 用传统的处理器难以实现。并且现有的检测、处理时栅信号的传统硬件电路设计方法开发周期长、调试难, 增加了开发成本, 限制了精度和分辨率的提高。为了应对上述问题, 本文研究了基于 STM32F4 的时栅位移传感器信号处理系统。意法半导体公司推出的基于 ARM Cortex-M4 内核<sup>[2]</sup>的高性能微处

理器 STM32F4, 是最新的嵌入式处理器<sup>[3]</sup>。

## 1 方案设计

### 1.1 时栅位移传感器原理

时栅位移传感器的工作原理<sup>[4]</sup>如图 1 所示, 用特制的精密正交激励电源, 于转子的正弦绕组和余弦绕组分别施加式 (1) 和式 (2) 所示的幅值相同、频率相同、相位互差 90°的交流激励电流。

$$i_s = I_m \sin \omega t \quad (1)$$

$$i_c = -I_m \cos \omega t \quad (2)$$

式中,  $I_m$  为信号幅值,  $\omega$  为信号频率,  $t$  为时间变量。

正弦绕组和余弦绕组在定子和转子的间隙上激发出两层驻波磁场, 这两个驻波磁场分别在转子绕组感应出驻波电势。两驻波电势在转子绕组中合成为时间电行波。将这个电信号与参考电信号同时输入时栅信号处理电路进行处理, 得到反映转子角位移的时间差。将时间差与时空转换因子相乘得到转子转动的角位移, 转换成相应的数据格式, 送至显示电路进行显示。

时栅的角位移测量过程当中, 在动、定测头上分别感应出频率一样、相位不同的两路电势信号。运用高性能的比相电路将两路信号的相位差转换成时间差。用高频时钟脉冲对该时间

收稿日期: 2014-05-20; 修回日期: 2014-06-30。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51127001); 国家“863”项目 (2012AA041202); 重庆市“两江学者”计划。

作者简介: 周金钢 (1990-), 男, 河北邯郸人, 硕士, 主要从事现代传感技术方向的研究。

差进行刻划分度<sup>[5]</sup>。本文通过运用 STM32F4 产生的高频时钟脉冲对时间差进行分度。每个时钟脉冲对应一定的角位移，对脉冲进行计数就可实现位移测量，根据 (3) 式可计算出角位移值。

$$\theta = \frac{W}{T} \Delta T = \frac{360}{T} \Delta T \quad (3)$$

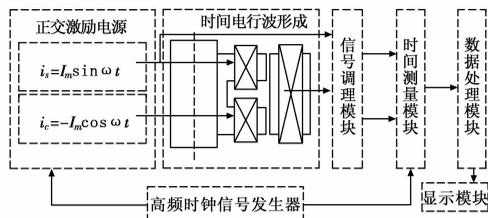


图 1 时栅位移传感器原理图

### 1.2 系统组成

运用以上原理，设计了如图 2 所示的信号处理系统。微弱的动、定测头感应信号通过信号调理电路的放大、整形、滤波，转换成更加易于处理的方波信号，并通过 CPLD 的锁存、计数功能，采集到信号处理所需要的数据，后再由 ARM 对数据进行处理和修正，从而换算出角度位移值。系统的 ARM 芯片采用了由意法半导体公司推出的基于 Cortex-M4 内核处理器 STM32F4 芯片。

通过对信号调理电路、数字信号处理电路，数码显示电路的设计，完成了以 STM32F4 处理器为核心的时栅测量信号的采集、处理、传输、显示等功能。

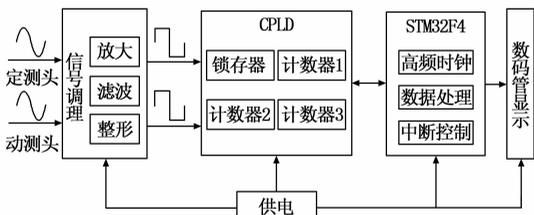


图 2 系统组成框图

## 2 系统硬件电路设计

### 2.1 信号调理电路

信号调理电路主要由前置放大电路、滤波电路和波形转换电路等 3 个电路单元构成。

前置放大电路用来放大微弱的感应电信号，以达到避免信号在传输过程中受到干扰的效果。时栅传感器的感应电信号的大小一般在几十毫伏，而温度等环境因素的变化会造成元器件参数的变化，包括电源的波动、电阻、电容、电感等阻抗的变化等，这些都会造成电压和电流的漂移。因此我们采用了高稳定性、高精度的仪用放大器三级放大电路对时栅感应信号进行放大处理，三级放大电路的放大倍数为 125 倍。

滤波电路用来滤除感应信号中的干扰信号以使信号更加纯净。根据实验可知，时栅感应信号经放大电路放大后仍存在高频信号干扰的成分，因此本文采用低通滤波器电路滤除时栅感应信号中的高频信号干扰成分。感应信号的频率与激励源的信号频率相同，滤波器的截止频率由相应的电阻电容设置，截止频率为 50 kHz。

波形转换电路将正弦波形信号转换成更易于进行时间测量的方波信号。时栅通过检测动、定测头感应信号正向过零点时间差来实现对空间角位移的测量，为了便于实现高频脉冲插补计数以提高时栅位移测量精度和分辨率的目的<sup>[6]</sup>。需要将经过非线性放大得到的梯形波输入至过零检测器 ZCD (Zero Crossing Detector) 中整形成方波，再经光电隔离后送入数字信号处理电路进行处理。

### 2.2 数字信号处理电路

数字信号处理电路如图 3 所示。电路采用了以 STM32F4 为核心的中央处理器单元和集成了锁存器、计数器等复杂可编程逻辑器件的 CPLD 相结合的结构设计。采用两个反相器对来自光电隔离的信号进行整形，使方波信号上升沿尽量陡峭，这样可减小时栅插补误差<sup>[7]</sup>。整形后得到的两路方波信号输入 CPLD 后由 ARM 控制对时栅信号进行高频脉冲插补细分处理，采集周期  $T$  和相位差  $\Delta T$  的数据，再计算出角度值后输出到显示电路。

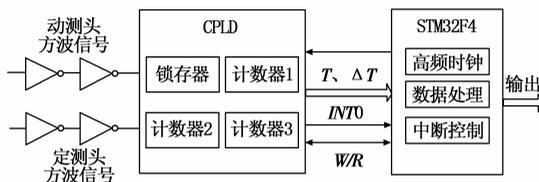


图 3 数字信号处理电路原理框图

由 STM32F4 处理器产生的高频时钟脉冲对周期信号和相位差进行插补细分。通过计数器对高频时钟脉冲计数来实现对周期  $T$  和相位差  $\Delta T$  的计数。而对周期  $T$  的测量采用两套电路同时工作，由软件控制采样分别得到  $T_1$  和  $T_2$ ，再由 ARM 软件判断两者大小，取其中较大者作为  $T$ ，从而提高周期数据采样的准确性。在动、定测头感应信号上升沿到来时进行高频脉冲插补，当中断 INT0 的下降沿到来时采集数据，即动、定测头感应信号的相位差  $\Delta T$ 。

### 2.3 数据显示电路

数据显示电路主要由 1 个显示驱动芯片 MAX7219 和 8 个 7 段共阴数码管组成，数码管用来显示当前测得的分度值，以度分秒的格式进行显示。MAX7219 是一种新型的串行接口的 8 位数字显示芯片，以串行接口 SPI 接口方式接收数据，待显示的数据内容通过 SPI 送至 MAX7219 驱动数码管后进行显示。

## 3 系统软件设计

### 3.1 信号采集

由 STM32F4 提供的在 CPLD 中插入的高频时钟脉冲个数分别由三路计数器进行跟踪，得到  $T_1$ 、 $T_2$  和  $\Delta T$  三组数据，取  $T_1$ 、 $T_2$  两者中较大者为动、定测头感应信号的周期  $T$ 。取  $\Delta T$  为动、定测头正向过零点的时间差。同时由采样信号和高频时钟信号合成一个锁存信号，在采样信号到来时将  $T$  和  $\Delta T$  锁存，后产生一个复位信号，将计数器清零，进行下一次采样，信号采集流程图如图 4 (a) 所示。采用这种软件控制、硬件锁存和复位的方式来满足采样的实时性要求。

### 3.2 信号处理

采集到感应型号的周期  $T$  和时间差  $\Delta T$  后，触发中断，当中断到来时将数据送给 STM32F4 处理器处理，通过其优越

的 DSP 能力, 计算当前测量的角位移值, 计算公式如式 (4) 所示, 利用傅氏级数谐波修正技术对角度误差进行修正<sup>[8]</sup>, 以提高测量精度。

$$\theta = \Delta T / T \times W \quad (4)$$

式中,  $W$  为空间当量, 即 1 个对极所对应的角度值。

时栅位移传感器的信号处理的程序流程图如图 4 (b) 所示。

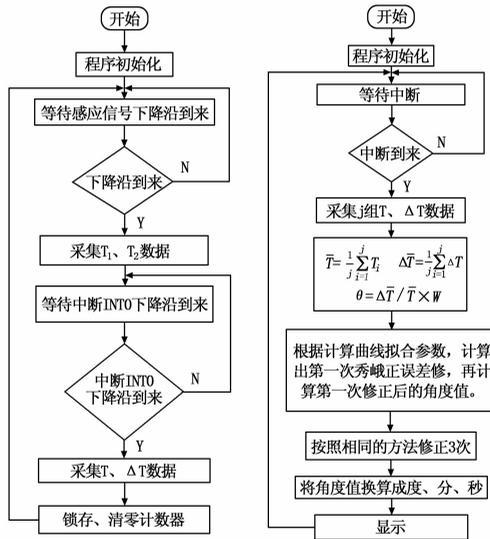
1) 将程序初始化, 查询中断是否到来, 若中断到来, 则对动、定测头周期  $T$ , 正向过零点时间差  $\Delta T$  分别采集  $j$  组数据, 若中断没有到来则继续查询中端。

2) 中断到来后, 把采集到的数据求平均值, 由 ARM 计算测量的当前角度值。

3) 根据傅氏级数谐波修正技术对计算得到的角度值进行角度误差修正。

4) 将修正后的角度值换算成显示需要的度分秒的显示格式。

5) 角度补偿后, 清除中断标志, 并将角度值送至数码管进行显示。



(a) (b)  
图 4 数据采集、处理流程图

### 4 实验验证

为了检验系统的信号处理性能, 对研制的信号处理电路板做了如下实验。

如图 5 所示的实验装置, 采用士 1" 精度的海德汉 RON886 光栅传感器作为误差标定基准, 将光栅和时栅角位移传感器同轴安装, 时栅的信号处理电路采用本设计研制的信号处理电路板。对传感器的误差实测采样, 依次读取时栅和光栅的测得值, 其差值 (时栅测得值减光栅测得值) 就是时栅的误差值。图 6 为运用傅立叶算法在 Matlab 软件中拟合出的角位移测量误差曲线图, 可以得到时栅在  $0^\circ \sim 360^\circ$  范围内误差的最大值为  $+1.0''$  和最小值为  $-1.4''$ , 峰峰值为  $2.4''$ , 实现了动态测量的高精度测量。

### 5 结束语

为了应对时栅位移传感器的发展需要, 提出了一种基于高

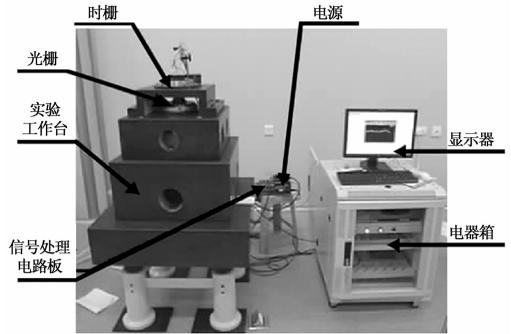


图 5 实验装置

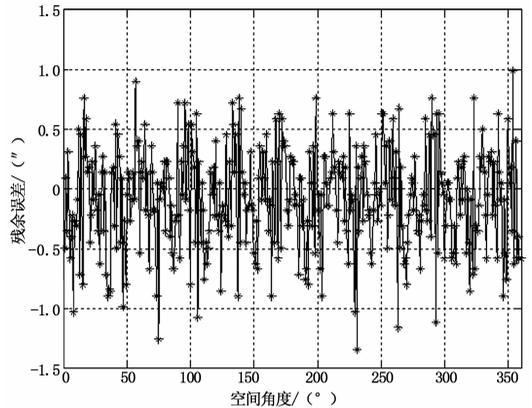


图 6 误差曲线

性能、带有信号处理功能的 STM32F4 处理器的时栅信号处理系统。完成了对频率为 40 kHz 时栅感应信号的采集、处理、传输、显示等功能, 实现了时栅位移传感器的高精度动态测量。与传统的硬件电路设计相比, 通过使用性能优秀的 STM32F4 处理器芯片、众多的性能优良的宏模块以及系统集成等完整的解决方案的实现, 大大减少设计的风险, 缩短了开发周期, 降低了开发成本, 提高了电路性能。实验表明, 采用本系统后, 时栅位移传感器的位置误差峰峰值为  $2.4''$ 。

### 参考文献:

[1] 彭东林. 时栅位移传感器与新型机床动态检测系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
 [2] 廖义奎. ARM STM32F4 嵌入式实战开发精解: 基于 STM32F4 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.  
 [3] STMicroelectronics. STM32F415xx [ Z/OL ]. <http://www.st.com>, 2012.  
 [4] 彭东林, 张兴红, 刘小康等. 基于时空转换的精密位移测量新方法与传统方法的比较 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27 (4): 423-426.  
 [5] 蒲红吉, 冯济琴, 郑芳燕, 等. 基于数字内插法的时栅位移传感器信号处理系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014 (2): 507-509.  
 [6] 刘小康, 彭东林, 张兴红等. 自补偿技术在时栅位移传感器中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2006 (1): 65-74.  
 [7] 徐伟业, 江冰, 虞湘宾. CPLD/FPGA 的发展与应用之比较 [J]. 现代电子技术, 2007, 30 (2): 1-4.  
 [8] 刘小康. 基于电气制导与误差修正的几何测量新方法 & 新型栅式位移传感器研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2004.