

# 基于STM32的坝体水平变形测量仪

雷佳科<sup>1</sup>, 周云飞<sup>1\*</sup>, 熊欢<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉, 430074;

2. 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉, 430074)

**摘要:** 为了准确、高效地测量坝体水平变形量, 以实现坝体的安全监测, 分析了铅垂线原理, 设计了以减速直流电机为驱动元件, 激光发射接收装置和高精度光栅尺为测量元件的坝体水平变形量测量装置。控制系统以STM32为处理器, 并移植了嵌入式多任务操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 和多任务图形用户接口 $\mu\text{C}/\text{GUI}$ , 利用TFTLCD触摸屏开发出了人机交互界面, 通过操控触摸屏实现了数据的自动测量和手动测量, 通过远程上位机管理系统以及利用RS485通信网络发送相关指令完成了数据的测量及收集, 通过现场连接USB设备实现了数据的转存。实验结果表明, 该仪器能够实现大坝变形测量的自动化和网络化, 其测量速度快, 测量精度高达0.01 mm, 且重复性好。

**关键词:** 坝体水平变形量; 测量仪; 高精度光栅尺; 多任务

中图分类号: TH761; TH39; TP23 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)12-1443-05

## Measurement instrument of dam horizontal deformation based on STM32

LEI Jia-ke<sup>1</sup>, ZHOU Yun-fei<sup>1</sup>, XIONG Huan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Aiming at measuring the horizontal deformation of a dam accurately and efficiently to help monitoring dam safety, the plumb line principle was analyzed and a measuring instrument which adopted DC geared motor as the driving part and laser transmitters, phototransistors and a high-precision grating scale as the measuring elements was designed. STM32 was chosen as the microprocessor of the control system, multitasking operation system  $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$  and multitasking graphical user interface  $\mu\text{C}/\text{GUI}$  were embedded into the STM32 platform, an interactive interface was designed based on them using TFTLCD touch screen. By means of manipulating the touch screen, the measurement could be accomplished automatically and manually. This manipulation of the touch screen could also be replaced either by measurement, and data collection was completed with the relative instruction from the remote PC management system based on the RS485 interface, or the transference and saving of the data by virtue of connecting the USB equipment at the site. The results indicate that the instrument is networked and can measure the dam deformation automatically and quickly with a good reproducibility. It can attain an accuracy of 0.01 mm.

**Key words:** dam horizontal deformation; measurement instrument; high-precision grating scale; multitasking

## 0 引 言

坝体安全监测的主要项目有变形监测、渗流监测、应力应变监测、温度监测和大坝周围环境监测等<sup>[1]</sup>。

坝体变形测量是坝体安全监测的一个非常重要的环节, 通常研究者把测量过程分成两个部分进行, 即是水平方向上的二维变形和垂直方向的一维变形。

基于铅垂线法的测量仪器多种多样, 有电容感应

收稿日期: 2012-07-09

作者简介: 雷佳科(1987-), 男, 四川达州人, 主要从事嵌入式系统和运动控制方面的研究. E-mail: leijiake@163.com

通信联系人: 周云飞, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: yfzhou@mail.hust.edu.cn

式、电感感应式、电磁感应式、电荷耦合(CCD)式和步进电机式等,但只有电荷耦合式和步进电机式是真正实现非接触测量<sup>[2]</sup>。步进电机式变形监测仪器更有全数字化测量特点,具备可靠性好、量程范围大、成本低、防水防潮等优势<sup>[3]</sup>。

为了避免步进电机丢步造成测量结果不准确以及提高测量速度,本研究采用减速直流电机作为机械传动的驱动源,并且采用高精度光栅尺进行测量。同时,基于TFTLCD触摸屏开发人机交互界面用于现场测量;开发远程上位机系统,用于远程测量和数据管理,配备USB数据转存功能,实现测量的人性化、自动化和网络化。

## 1 测量原理介绍

### 1.1 铅垂线法描述

铅垂线法如图1所示。以地轴为Z轴,建立坐标系,与Z轴垂直的平面即为水平面,坝体水平变形即为发生在该平面上的变形。为方便研究,本研究定义该水平面上的坐标X和Y,二者互相垂直,交点为原点O。

基于铅垂线法的大坝变形测量方法的描述如下:

(1) 在基岩上安装并悬吊一根张紧的铅垂钢丝作为基准线,该基准线永远指向地心,不会随着坝体变形发生运动。

(2) 使用另一根钢丝作为测量钢丝,一端安装在基岩上,另一端安装在测量墩上并保持张紧状态。测量仪器固定在大坝测量墩上,保证两根钢丝在测量仪的测量范围内。当大坝发生变形时,测量钢丝相对铅垂线发生了运动,偏移了原来的位置。

(3) 运用仪器测量两根钢丝的X和Y方向上的相对距离,并与变形之前的相对距离相比较,其差值即为坝体的水平变形量。

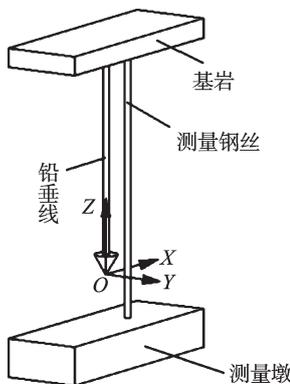


图1 铅垂线法

### 1.2 位置测量原理

本研究垂直Z轴方向将图1中两根钢丝做一个截

面,从底部向上看,可以得到的测量视图如图2所示。其中,A是铅垂线钢丝,B是测量钢丝,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>是激光发射器,R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>是激光接收器(光敏三极管),它们都安装在可沿着X正、反方向运动的测量平台上。

测量时,测量台沿着X正方向运动,测量分析图如图3所示。B在A右前方位置如图3(a)所示,B在A右后方位置如图3(b)所示,这两种情况可能会在坝体变形前后分别出现,但计算方法是相同的。光束经过A、B两处的时候会被挡住,此时R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>的电平状态变化可以检测出这个位置,通过下面的计算公式便可得到A、B两处的相对位置Δx和Δy。

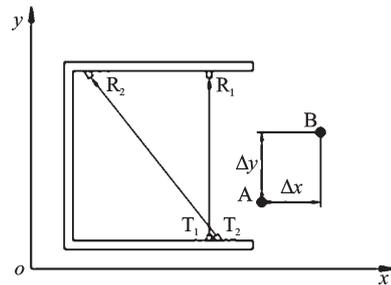


图2 测量视图

假设R<sub>1</sub>检测到A、B位置时测量台运动距离分别为L<sub>x1</sub>和L<sub>x2</sub>,接收器R<sub>2</sub>检测到A、B位置时测量台运动的距离分别为L<sub>y1</sub>和L<sub>y2</sub>,可得出:

$$\Delta L_1 = L_{x2} - L_{x1} \tag{1}$$

$$\Delta L_2 = L_{y2} - L_{y1} \tag{2}$$

再根据图3中图像的几何关系,可得出:

$$\Delta x = \Delta L_1 \tag{3}$$

$$\Delta y = (\Delta L_2 - \Delta L_1) \times \cot \alpha \tag{4}$$

式中:α—两束激光光线夹角,安装激光发射器时通过调节和标定确保其角度是45°。

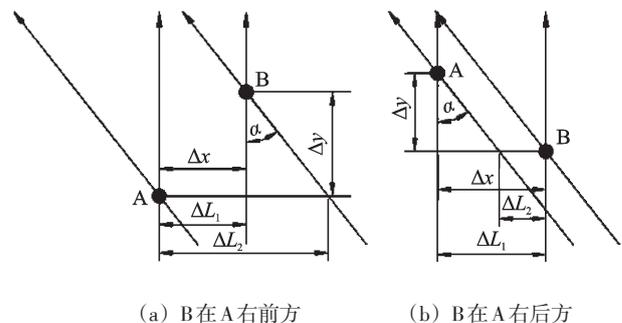


图3 测量分析图

光束经过A、B两点时测量台的L<sub>x1</sub>和L<sub>x2</sub>,L<sub>y1</sub>和L<sub>y2</sub>是通过光栅尺测量出来的。图3(a)中的Δx和Δy均为正值,图3(b)中的Δx为正值,Δy为负值。光栅尺的栅距是5 μm,测量范围是150 mm。测量台每行走一个栅距,光栅尺便会输出一个脉冲,通过控制器

捕获光栅尺输出的脉冲数,并乘上 $5\ \mu\text{m}$ ,即可确定测量台的运动距离,从而 $L_{x1}$ 和 $L_{x2}$ , $L_{y1}$ 和 $L_{y2}$ 的就可以得到。 $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 即可根据公式(1~4)计算出来。

## 2 测量仪结构设计

测量仪通过把同步带和测量台安装在一起,本研究用直流电机带动同步带的方式来带动测量台,利用激光发射器和接收器进行位置检测,并采用高精度光栅尺测量运动距离。

测量仪的机械结构如图4所示。激光发射器和激光接收器安装在测量台上。测量台在直流电机驱动下可以沿着导轨来回运动。

测量台中间的空腔位置为测量区域,铅垂线和测量钢丝则安装在该区域内。

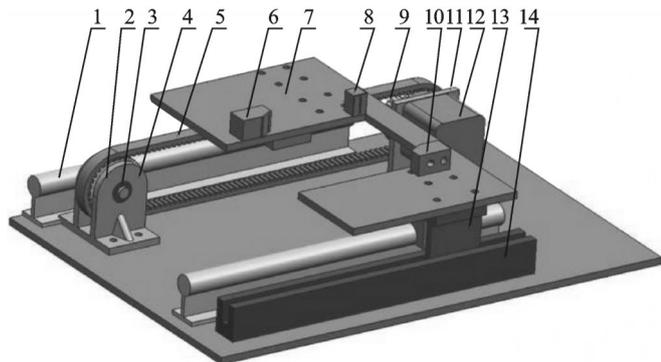


图4 测量仪结果示意图

1—导轨;2、9—同步带轮;3—轴承;4、11—支座;5—同步带;6、8—光敏三极管安装座;7—测量台;10—激光头安装座;12—直流电机;13、14—光栅尺

## 3 控制系统硬件设计

### 3.1 控制方案

控制系统功能结构如图5所示。

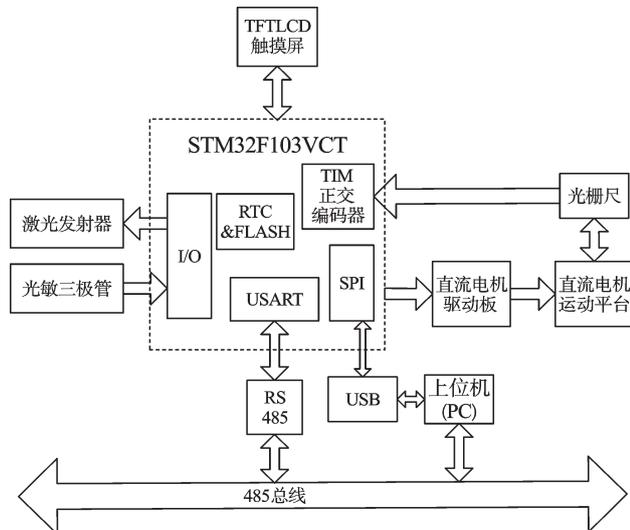


图5 控制系统功能结构图

测量仪是一个功能完整的系统,可同时实现手动测量和自动测量功能,并将测量时间和结果进行显示和保存。手动测量涉及到人机交互,自动测量需要设置实时时钟(RTC)和存储器(Flash)。此外,本研究为实现大坝变形测量的全自动化,需建立涉及所有仪器的485通信网络,故控制系统硬件功能主要包括:激光发射接收处理、定时、Flash数据存储、USB数据转存、触摸屏人机交互、RS485通信、电机驱动等。

### 3.2 关键器件选型

#### 3.2.1 微处理器

在该测量仪控制系统设计中,本研究采用STM32F103VCT6微控制器作为控制系统的核心处理器。其使用高性能的ARM Cortex-M3 32位的RISC内核<sup>[4]</sup>,工作频率为72 MHz,计算性能先进,中断系统响应快速,有优越的实时特性<sup>[5]</sup>。STM32F103普通I/O引脚丰富,并带有Flash闪存、实时时钟、USART、定时器(计数器)、SPI等外设,其设计简单,开发周期短。

#### 3.2.2 光栅尺

该系统采用的光栅尺栅距(分辨率)为 $5\ \mu\text{m}$ (200线/mm),输出信号为方波信号,两路A、B通道有 $90^\circ$ 的相位角差。由于方波信号为数字量,不需要A/D转换<sup>[6]</sup>,STM32的定时器(TIM)自带正交编码器,可以对两路信号直接进行处理,使得每走 $5\ \mu\text{m}$ 即计数一次,通过获取计数器某时刻的计数值,即可计算出测量台运动的距离。

#### 3.2.3 激光发射接收器

激光光束单色性好、相干性好、方向性好、亮度高,能够保证测量的精度。本研究选用的激光发射器供电电压 $3\ \text{V}\sim 5\ \text{V}$ ,可以直接用GPIO的普通I/O口(输出为 $3.3\ \text{V}$ )驱动,电流为 $20\ \text{mA}\sim 35\ \text{mA}$ ,需要串接 $120\ \Omega$ 的电阻。通过将控制引脚置高,即可使激光发射器发出激光。

激光发射器配对的接收器件—光敏三极管。其型号为3DU5C,有c、e两极,e极接地,c极接非门后再引入STM32的I/O引脚。正常情况下,c极被 $3.3\ \text{V}$ 电压拉高,当没有激光照射时,由于非门的存在,I/O引脚通过中断检测到低电平,当有激光照射时,c、e导通,c端被拉低,I/O引脚检测到由低电平到高电平(即上升沿)的跳变。测量仪工作时,光线被钢丝挡住瞬间,I/O则检测到高电平到低电平的跳变(下降沿),STM32里即可读取此时光栅尺的值。

### 3.3 直流电机驱动设计

为了方便控制减速直流电机,该系统需要配接驱动器。该系统使用L293作为直流电机驱动芯片。L293是微型电机驱动集成电路芯片,供电电压为 $4.5$

V~36 V,最大输出电流为1 A。测量台运动时的负载不大,使用L293能满足要求。

为了减少电机和驱动板的大电流信号对控制部分的弱电信号造成干扰,本研究需要对L293的控制信号增加光耦进行隔离。该驱动板可以实现电机的正、反转和启、停功能。

### 3.4 触摸屏电路设计

显示和触摸部分采用由SSD1289做显示驱动的3.2寸TFT真彩触摸屏模块,该模块供电电源为3.3 V,大屏幕像素为320×240,26万色TFT-LCD显示,支持8/16位总线接口(该设计采用16位接口),镜面屏,模拟I/O控制,彩屏模块上配置有ADS7843触摸控制器。模块接口电路图如图6所示。

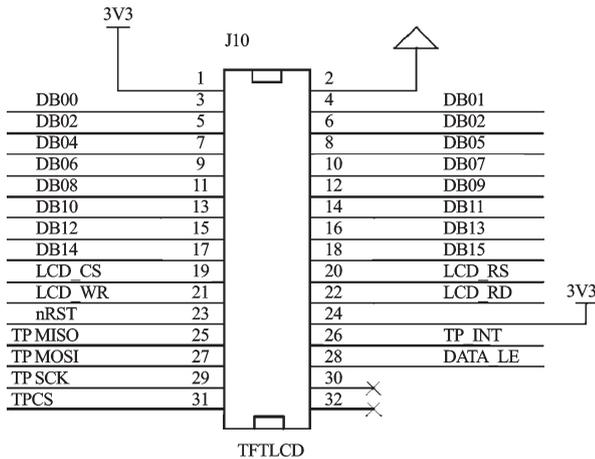


图6 TFTLCD触摸屏接口图

DB00-DB15—数据信号;LCD\_CS—片选信号;LCD\_RS—数据指令控制信号;LCD\_WR—写信号;LCD\_RD—读信号;nRST—复位信号;TP\_MISO—触摸面板SPI输出信号;TP\_MOSI—触摸面板SPI输入信号;TP\_SCK—触摸面板SPI时钟信号;TP\_INT—触摸面板中断信号;TP\_CS—触摸面板片选信号

### 3.5 RS485通信单元设计

为实现全自动的变形测量,需要多台仪器组成网络,所有同一网络的仪器把存储数据发送到相同的主控机上,本着简单可靠的原则,本研究采用RS485总线作为通信接口。RS485采用平衡发送和差分接收,具有抑制共模干扰的能力。总线收发器具有高灵敏度特性,能检测低至200 mV的电压,故传输信号能在千米以外得到恢复。本研究通过运用RS485可以联网构成分布式系统,其允许最多并联32台驱动器和32台接收器。

### 3.6 USB存储设计

测量仪将测量结果保存在STM32内部的Flash中,除了将数据通过485网络传送至上位机外,还可以插入USB设备将数据读取出来,并转移到任何上位机上进行查看。

CH376是文件管理控制芯片<sup>[7]</sup>,用于单片机系统

读写U盘或者SD卡中的文件。CH376支持USB设备方式和USB主机方式,支持3种通讯接口:8位并口、SPI接口或者异步串口,该设计利用STM32自带的SPI接口作为通讯接口,并通过软件将其设置为USB主机方式,可以对USB设备进行读写操作。

USB设备带电热插拔时,为避免CH376芯片的工作电流突然增大,时间长了会使芯片发热甚至损坏,研究者需要在USB端口的电源供给端串联100 mA的限流电感以限制峰值电流,同时并联100 μF的储能电容以缓解电压瞬时下降<sup>[8]</sup>。

## 4 控制系统软件设计

μC/OS-II是由Labrosse先生编写的一个源码公开、可移植、可固化、可裁剪、占先式实时多任务操作系统<sup>[9-10]</sup>。为了提高系统的实时性,并准确地反映测量时刻的测量情况,本研究采用μC/OS-II嵌入式操作系统进行开发,并在嵌入了μC/OS-II之后,移植μC/GUI多任务图形用户接口开发人机交互界面。

### 4.1 软件流程

系统的软件结构框图如图7所示。

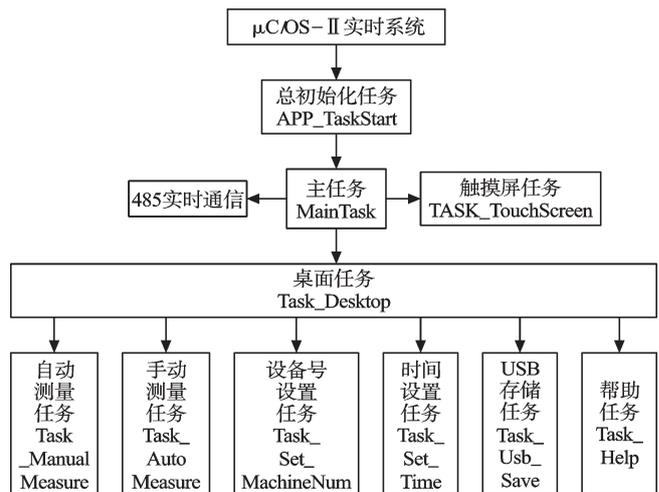


图7 系统任务图

μC/OS-II实时操作系统负责协调和调度各个任务。总初始化负责初始化基本参数和外设,主任务负责RS485通信和调动触摸屏扫描任务和桌面任务。桌面任务下设有6个任务:自动测量在经过设定闹钟后会在对应的时刻进行测量并保持数据;手动测量通过人工操作触摸屏直接进行一次测量;设备号设置任务是设置机器的编号;时间设置任务是设置系统的实时时间;USB存储任务负责将系统内部的测量数据转存到USB设备内;帮助任务则提供人性化的操作说明。

### 4.2 人机交互界面开发

除了上位机通过RS485接口远程操作之外,研究

者还可以使用现场操作的方式来进行坝体水平变形的检测。人性化的交互界面如图8所示。



图8 人机交互主界面

## 5 实验结果

本研究通过运用上位机管理系统分别在两天同一时段设置测量仪进行10次测量,其实际测量结果如表1所示。

表1 测量结果

序号	X值/mm		Y值/mm		测量时刻
	第1天	第2天	第1天	第2天	
1	15.23	15.23	9.59	9.59	10:00
2	15.23	15.23	9.59	9.58	10:10
3	15.22	15.23	9.60	9.60	10:15
4	15.23	15.24	9.60	9.60	10:20
5	15.23	15.23	9.59	9.59	10:25
6	15.22	15.23	9.61	9.60	10:30
7	15.23	15.24	9.59	9.59	10:35
8	15.22	15.23	9.60	9.60	10:40
9	15.22	15.24	9.61	9.60	10:45
10	15.23	15.23	9.60	9.60	10:50
均值	15.226	15.233	9.598	9.595	

由表1可以看出,测量仪在X方向重复性误差为0.01 mm,在Y方向的重复性误差为0.02 mm,其重复性误差小。测量精度为0.01 mm,远大于步进式坐标仪0.1 mm<sup>[11]</sup>的精度。本研究将两天的均值做一个差值,即可得出一天内坝体变形水平变形量为(0.007 mm, -0.003 mm),四舍五入后,则X向方向变形为0.01 mm, Y向变形为0。可知坝体变形很小,可以忽略不计。

但是,坝体不是一天两天就能迅速变形的,有时要长达数月甚至数年才变化1 mm,所以本研究需要利用测量仪系统对坝体进行常年监测,将测量数据集中分析,为坝体安全监测提供有力的帮助。

## 6 结束语

本研究对基于STM32的坝体水平变形测量仪的工作原理进行了分析,并介绍了仪器的机械结构和控制系统的设计方案,最后对仪器进行测试。由测试结果可知,该仪器具有测量行程大,测量速度快和测量精度高等优点。

该仪器使用方便,操作界面人性化,已应用于某水坝安全监测中,通过RS485网络挂接分布在各个测量点的32套测量仪,主机通过专门开发的管理系统远程控制这些仪器,定期定时发送测量命令并收集测量数据,以进行进一步分析。整套系统为坝体安全监测提供了有力的帮助,并在全国坝体监测中得到了推广。

## 参考文献(References):

- [1] 郭国平,蔡一廷,曹家印. 戈兰滩大坝临时外部变形监测方案设计与实施[J]. 云南水力发电,2008(s1):32.
- [2] 卢文富,孟敏仪,储华平. 步进传感器在大坝变形监测中的应用[J]. 广东水利水电,2009,20(3):88-90.
- [3] 毛良明,施海莹. 新型步进电机式大坝变形自动监测仪器[J]. 传感器与微系统,2006,25(4):55-57.
- [4] 张洪涛,彭潇丽. 基于STM32处理器的锂电池快速充电设计[J]. 湖北工业大学学报,2012,27(2):8-10.
- [5] 晏英俊,张自强. 基于STM32的步进电机转速控制实验设计[J]. 实验室科学,2012,13(6):60-61.
- [6] 杨辉,周建军,李鸣. 精密二维工作台双闭环控制系统设计[J]. 科技创新导报,2008(36):98-99.
- [7] 沁恒电子. CH376手册 Version 1.0[M]. 沁恒电子,2009.
- [8] 沁恒电子. USB芯片的电路及PCB设计的重要注意事项. Version 2.0[M]. 沁恒电子,2009.
- [9] 何良斌,王健. 基于 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的PID温度控制系统[J]. 大众科技,2011(5):37-38.
- [10] 李晓豁,赵悦,姜鹤,等. 基于SOC的MEMS双轴式数显倾角仪的研究[J]. 机械,2010,37(1):67-70.
- [11] 朱爱华,周克明,程利华. 步进式变形监测仪器的研制及应用[J]. 人民长江,2000,31(5):35-36.

[编辑:张翔]