

目录

基于物联网技术的自行车防盗追踪系统设计	
李梦实；董海涛；任 健；米 良·····	1
视觉诱发脑电采集和颜色分辨系统的设计	
宋洪震；董泽群；王子昂·····	7
一种基于遗传算法的多自由度机械手轨迹规划方法	
王华梁；殷观旭；刘 倩·····	11
基于小波变换和模极大值法的癫痫发作检测与分析	
刘光达；王依萌；胡秋月；马孟泽；蔡 靖·····	15
基于 OpenCV 的疲劳驾驶系统研究	
林思玉；施书通；赵宏伟；陈长征·····	21
基于红外扫描的人体定位风扇	
刘赛坤；曲子恒；毛安来·····	25
公共自行车防护系统设计	
贺小丹；魏 玮；张小龙·····	29
基于磁阻传感器的三分量水面磁测装置	
唐 汇；肖 蕊；张再熠·····	35
基于蓝牙技术的无导联线动态心电图仪设计	
周路佳；段荣宙；董唯昊·····	41
基于克里金插值的 EEG 二维成像最优化分析	
胡纪锋；刘锋华；蒙坚发·····	45

三分量磁测系统数据采集存储模块设计	
陶 毅·····	53
基于单目视觉的尺寸测量技术研究	
张天龙；仲点石；宫靖萱·····	57
基于 51 单片机的无线电能传输系统的设计	
周志鹏；徐佳辉；刘香江；许得锋·····	63
基于虚拟仪器的晶体管特性图示仪设计	
解来斌；王兴达；刘 旭·····	69
磁法探雷机器人	
赵鑫宇；马 智；崔鑫超·····	77
小尺寸零件外形尺寸参数视觉测量技术研究	
马健行；李 天；陈仁亮 ·····	83

基于物联网技术的自行车防盗追踪系统设计*

李梦实；董海涛；任 健；米 良

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院)

摘要：本文针对自行车防盗这一问题提出了新的解决方案，即一种基于物联网技术的自行车防盗追踪系统，具有感知防盗、实时定位等优点。智能防盗锁作为系统的前端感知，可智能判定自行车的安全状态，同时向主控制器发送控制指令，主控制器控制 GPS 定位并向用户发送位置信息，用户可通过手机地图 APP，及时得知自行车位置，实现实时定位追踪。

关键词：物联网技术 智能防盗锁 GPS 手机地图 APP

An Internet of things based bike anti-theft tracking system

Li Mengshi; Dong Haitao; Ren Jian; Mi Liang

(College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: This paper puts forward a new solution to the problem of bicycle theft, which is a kind of bicycle theft proof tracking system based on the technology of Internet of things, which has the advantages of perceived anti-theft, real-time positioning and so on. As the front-end perception of the system, intelligent security lock can determine the safety status of the bicycle intelligently, and send control instructions to the main controller. The main controller controls the GPS positioning and sends the position information to the user. The user can learn the position of the bicycle in time through the mobile map APP.

Key words: Internet of things technology Intelligent anti-theft lock GPS Mobile map

1 引言

近年来，大学校园内自行车盗窃现象愈发严重。为解决这一问题，目前有不少公司或团队都在进行对于自行车防盗追踪系统的研究与开发。国内方面，由北京天一众合科技公司研发的基于 RFID 的自行车防盗系统，主要应用射频识别技术进行防盗，具备很强的实用性，但其缺点是未采用 GPS 技术进行定位追踪，使得追踪地点存在范围误差^[1]。还有现阶段常用的各种防盗追踪器，利用 GPS 技术进行追踪，但其防盗系统不够完备，不能及时与车主建立信息交流。另外，时下较为流行的智能防盗锁，其功能是通过声音报警来达到防盗作用，其缺点是一旦距离过远，无法使车主及时获取车辆有效信息。国外方面，由阿姆斯特丹自行车公司 VanMoof 研究的智能自行车配备了 GSM 和蓝牙追踪系统。但其缺点是应用于防盗系统而设计的防盗锁仅适用于该款自行车，不具备普适性。由 D Godfrey 和 MH Song 组成的研发团队所设计开发的自行车防盗追踪系统^[8]，采用 GPS 追踪，但是由于采用振动传感器进行感知防盗，如果有轻微震动，就可能引起报警器误报，防盗效果并不好。针对上述各种问题而设计的基于物联网技术的自行车防盗追踪系统，具有很好的防盗和定位追踪的能力，能在自行车和用户之间建立信息交流，有效防止自行车盗窃现象的频繁发生。

2 系统的硬件结构组成

2.1 总体结构及功能

“基于物联网技术的自行车防盗追踪系统”主要应用于私人自行车的智能防盗追踪，并且应用物联网技术使用户可实时掌握自行车的当前状态^[2]。整个系统分为工作模式和休眠模式，当用户使用自行车时，系统处在休眠模式，其余时间整个系统都处在工作模式，进行实时防盗。在工作模式下，系统可提供自行车盗窃智能判定功能，位置信息采集功能，数据存储及传输功能，并且可向用户提供自行车位置信息，自行车追踪轨迹信息，警报记录等^[3]。本系统主要分为智能防盗锁、主控制器和手机 APP 三个部分，系统结构如图 1 所示：

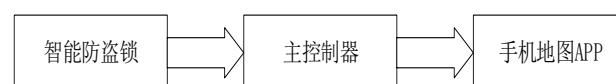


图 1 系统结构框图

Figure 1 system structure block diagram

智能防盗锁具有智能感知功能，可通过指纹识别是否正确和锁链是否断裂来判定自行车是否被盗并向主控制器发送指令；主控制器接收指令进行模式切换，进行 GPS 定位，并向用户发送示警信息以及自行车当前位置信息；用户接收到信息后，通过手机地图 APP 读取位置信息，可在手机地图上实时

* 指导老师：邱春玲
项目类型：大学生创新训练项目（2017A65301）

显示自行车当前位置。

2.2 智能防盗锁的结构及功能

智能防盗锁的结构框图如图 2 所示：智能防盗锁由 STM32 单片机、HC-05 无线蓝牙模块、AS608 指纹识别模块、小型电磁铁和便捷式电源进行整合设计，具有一定的智能判断能力。整体结构为链式锁，锁链内部有导线穿过，锁口由贴片磁铁相接，锁扣为一小型电磁铁，锁头为指纹模块，内含单片机、蓝牙和电源。当指纹识别正确时，电磁铁通电，锁正常打开，发送开锁信号；再次识别，电磁铁断电，锁锁住，发送关锁信号。当指纹识别错误，防盗锁被非正常打开或被人破坏（锁链及内部导线断裂）时，可自行判定自行车已被盗窃，并通过蓝牙向主控制器发送示警信号。

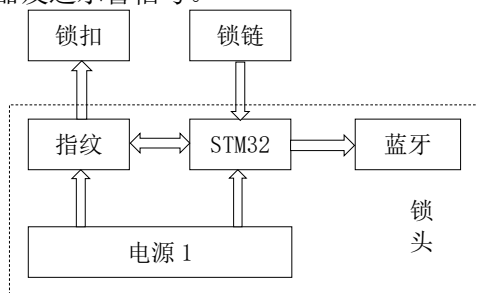


图 2 智能防盗锁结构框图

Figure 2 structure block diagram of intelligent anti-theft lock

2.3 主控制器的结构及功能

主控制器的结构框图如图 3 所示：主控制器包括 STM32 单片机、蓝牙模块、sim808 模块、电源四个部分，整合安装在自行车上。主控制器具有三大功能，由单片机进行控制实现：接收并处理智能防盗锁发出的信息；接收并存储自行车的位置信息，并进行智能判断，决定是否通过向用户发送警报提示；控制位置采集模块的工作状态切换。蓝牙模块用于接收智能防盗锁发出的信号。sim808 模块主要使用 GPS 定位技术^[4]，通过计算与已知卫星之间的距离，再综合多颗卫星的数据，进行接收解码，获得准确的位置信息，并将位置信息发送给单片机。电源是由多节蓄电池组成的可充放电电池组。防盗模式下，系统每 10min 保存一次位置信息，若二次定位超出电子围栏范围或蓝牙收到锁发来的示警信号，则都会报警并开启实时定位，向手机发送位置信息。

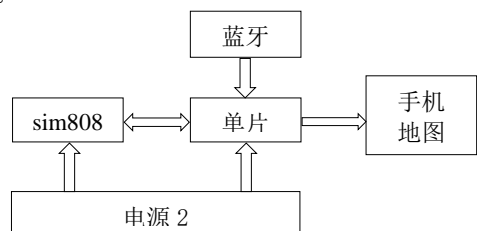


图 3 主控制器结构框图

Figure 3 block diagram of main controller

3 系统的软件流程设计

3.1 智能防盗锁程序流程设计

智能防盗锁的程序流程图如图 4 所示：智能防盗锁指纹识别上锁后，向主控制器发送上锁信号并开始进行智能判断，判断锁链是否断裂以及指纹再次识别是否正确。若锁链断裂或指纹识别错误则向主控制器发送报警信号，若指纹识别正确则向主控制器发送开锁信号。

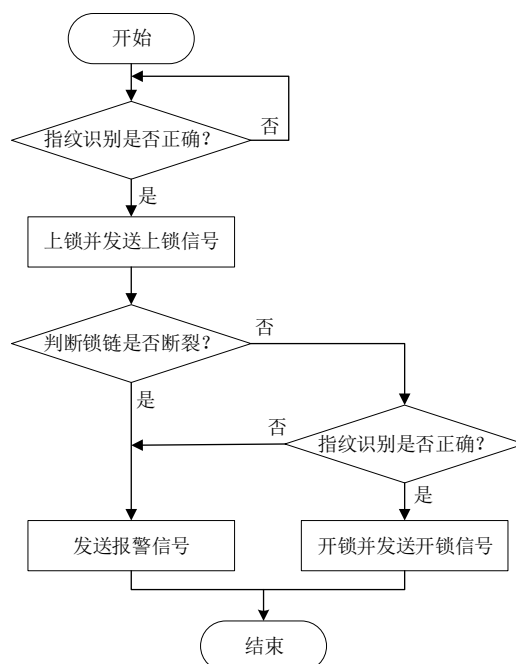


图 4 智能防盗锁程序流程图

Figure 4 Flowchart of intelligent anti-theft lock program

3.2 主控制器程序流程设计

主控制器的程序流程图如图 5 所示：主控制器接收到智能防盗锁发送的上锁信号后进入工作模式，开启防盗检测和围栏报警功能。若接收到控制信号或超出电子围栏范围，则开启实时定位，并向用户发送位置信息。

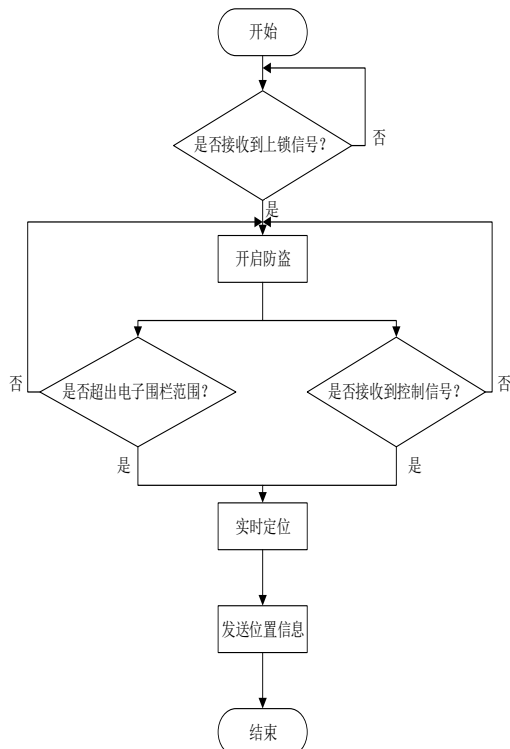


图5 主控制器程序流程图

Figure 5 main controller program flow chart

3.3 手机 APP 设计及功能

手机地图 APP 支持 Android 系统, 通过读取用户收到的报警短信中的经纬度信息, 在地图上实时显示自行车位置, 实现定位追踪的功能^[5]。手机地图 APP 的功能包括:

- (1) 地图控制: 可以对地图实现旋转、放大、缩小等功能。
- (2) 实时定位: 可以获取短信中的位置信息在地图上显示出来, 并即时获取位置信息。

根据上述地图功能, 利用百度地图 API 进行安卓地图应用开发。首先需要定义一个基类, 作为父类, 应用开发的类都是继承这个类, 这样使得代码利用率高且程序简洁, 设计流程如图 6 所示:

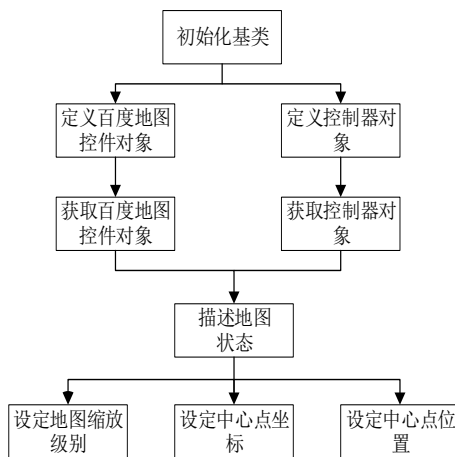


图6 定义基类

Figure 6 defines the base class

首先初始化基类, 之后定义两个对象, 即百度

地图控件对象和控制器对象, 获取这两个对象的内容后, 再使用 Map Status Update Factory 类来描述地图状态, 如设定地图缩放级别、坐标以及中心点等。

地图显示之后, 就需要根据短信中的位置信息进行实时定位, 设计流程如图 7 所示:

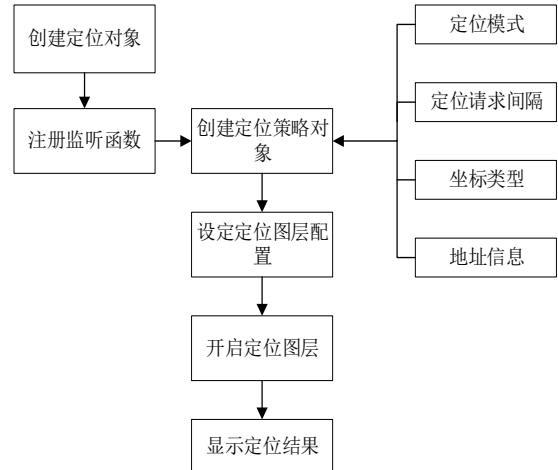


图7 定位流程图

Figure 7 positioning flow chart

使用 Location Client 类, 创建定位对象, 再使用 Location Listener 类, 注册监听函数, 以便进行实时定位。使用 Location Client Option 类创建定位策略对象, 设置定位的配置参数, 例如设置坐标类型、定位模式、地址信息等。之后配置定位图层的相关参数, 例如显示方向等, 最后开启定位图层, 显示定位结果。

4 测试结果

用户停放自行车并上锁后, 启动防盗系统, 之后如果自行车被挪动或锁被破坏或被非正常打开, 用户会收到一条“Warning! Your bike is moving!”的信息, 之后每隔 10s 会收到一条定位信息“GPS data: xxxxxxxxxx”, 用户打开手机 APP, 即可看到自行车当前的位置^[6]。测试结果如图 8 所示:

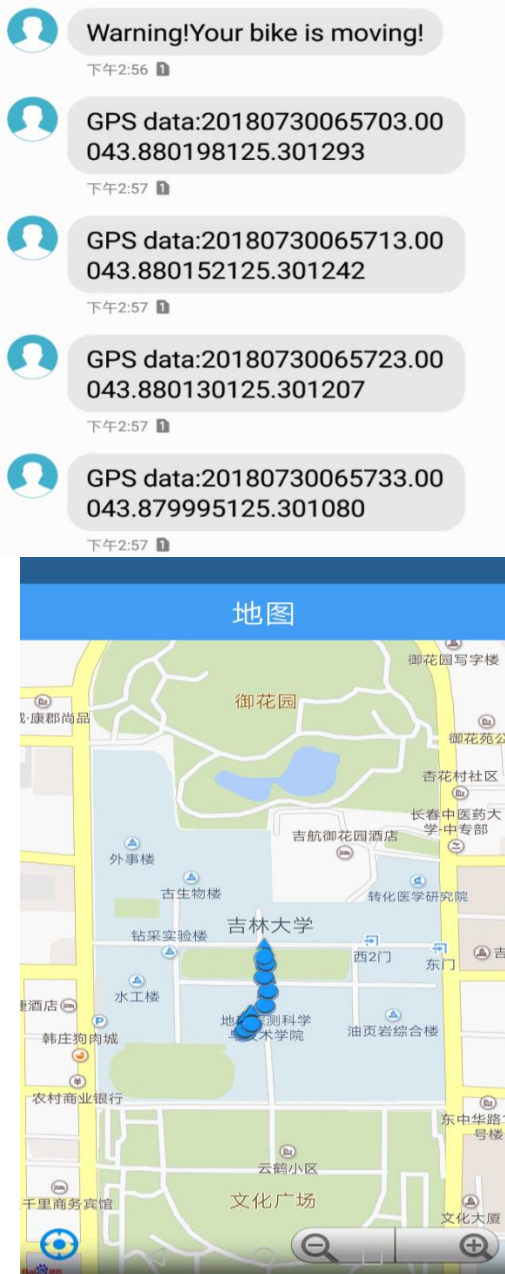


图 8 测试结果图

Figure 8 test result diagram

GPS 模块理论定位精度 2.5m, 实际实现稳定定位后每隔 10s 连续测得的 10 组定位数据如下:

表 1 测试定位数据表

Table 1 test location data table

测试次数	纬度/度	经度/度
1	43.880455	125.301213
2	43.880455	125.301208
3	43.880455	125.301200
4	43.880453	125.301193
5	43.880453	125.301185
6	43.880455	125.301178
7	43.880460	125.301173
8	43.880467	125.301165
9	43.880472	125.301167
10	43.880475	125.301168

算出平均纬度 $\bar{X}_A = 43.880460$ 度, 平均经度

$\bar{X}_B = 125.301185$ 度, 利用贝塞尔公式计算不确定度得 $U_A = 0.000008$ 度, $U_B = 0.000018$ 度。由于一纬度差约为 $\Delta X_A = 111 \text{ km}$, 一经度差约为 $\Delta X_B = 111 * \cos(X_A) \text{ km}$, 而纬度的余弦差为小数点后第七位, 远小于 U_B , 所以忽略不计, 用平均纬度 \bar{X}_A 代替 X_A , 代入计算得一经度差 $\Delta X_B = 111 * \cos(\bar{X}_A) = 80 \text{ km}$ 。总定位精度 $\delta = \sqrt{(U_A * \Delta X_A)^2 + (U_B * \Delta X_B)^2} = 1.7 \times 10^{-3} \text{ km} = 1.7 \text{ m} < 10 \text{ m}$ 。

围栏报警的范围由经纬度通过平面坐标计算得到, 大于 30m 报警。

自此系统功能全部实现, 从 GPS 定位启动到获得准确定位需要大约 55s, 定位精度约 1.7m, 实时定位每 10s 定位一次, 电子围栏范围 15m, 符合系统定位精度小于 10m, 启动耗时小于 2min 和电子围栏范围 30m 的技术指标要求。

5 结束语

目前, 随着绿色低碳生活的倡导, 自行车逐渐成为当下主流出行方式之一, 但随之而来的是自行车丢失盗窃事件的不断增加。本系统利用锁头防盗、GPS 定位和手机地图 APP 相结合来对自行车进行防盗追踪和实时定位, 从而有效遏制自行车盗窃事件的频繁发生。另外, 本套防盗追踪系统还可以植入其他应用领域, 对应用物品进行实时防盗, 便于人们监控管理。

参考文献

- 姜宇航. 基于 RFID 的自行车防盗系统的设计与实现[D]. 吉林大学, 2015.
- 沈建林. 基于物联网的居民电动自行车防盗解决方案[C]. 中国通信学会无线及移动通信委员会, 2014 全国无线及移动通信学术大会论文集. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 282-287.
- 徐云. 低成本电动自行车防盗跟踪监控模块设计[D]. 电子科技大学, 2015.
- 郭宏超, 罗梅群, 于耀程. 基于 GPS、GSM 的车载定位追踪系统的设计[J]. 科技资讯, 2009, (16): 67.
- 刘正, 陈强. 基于 Android 的 GPS 应用中的研究与开发[J]. 中国西部科技, 2010, (32): 15-16.
- 陈卓. 基于 GPS 和 GPRS 的追踪系统研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2009.
- 李飞. 便携式设备电源管理及低功耗设计与实现[D]. 湖南理工大学, 2015.
- D Godfrey, MH SONG. Safe Bike: Secure your Bicycle with this smart Arduino based GPS device[J]. The International Journal of Advanced Smart Convergence, 2016, 5(3): 16-26.
- PA Shinde, YB Mane, PH Tarange. Real Time Vehicle

Monitoring and Tracking System based on Embedded Linux Board and Android Application[J].International Conference on Circuit,2015:1-7.

10. VJE Jimenez,F Salmhofer,R Frosch,H Zeiner,W Haas.Safe Bicycle Parking Platform Based on RFID Technology[J].Springer International Publishing,2015.

视觉诱发脑电采集和颜色分辨系统的设计*

宋洪震；董泽群；王子昂

（吉林大学 仪器科学与电气工程学院）

摘要：本文通过 OPENBCI 开源实验平台设计出一套高标准的脑电波采集系统，并且通过对颜色想象脑电信号的研究，设计一个颜色辨认的实验范式，并且采集不同提示信息下不同颜色的脑电信号。通过不同颜色脑电信号来进行处理，以特征信号作为源信号，使用欧几里得距离，PCA 等算法进行特征提取。通过 SVM，Ensemble Bagged Trees 等模式识别分类器算法进行学习分类，最后取得良好的实验效果，即普遍适用于大多数人，从而达到颜色分辨的作用。

关键词：脑电信号；特征提取；模式识别；颜色分辨

Design of visual evoked EEG acquisition and color resolution system

Song Hongzhen; Dong Zequn; Prince Wang

(College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University)

Abstract: This paper designs a set of high-standard brainwave acquisition system through OPENBCI open source experimental platform, and designs an experimental paradigm of color recognition through the study of color imaging EEG signals, and collects different colors of EEG under different prompt information. signal. The processing is performed by different color EEG signals, and the feature signal is used as the source signal, and the Euclidean distance, PCA and other algorithms are used for feature extraction. Through SVM, Ensemble Bagged Trees and other machine learning algorithms for learning classification, and finally achieve good experimental results, that is, generally applicable to most people, thus achieving color resolution.

Keywords: EEG signals; feature extraction; machine learning; color resolution

0 前言

脑机接口是一种把从人脑采集到的电信号转换成控制命令直接传递给计算机或其他机器的装置^[1]，其作用是建立一个独立于人体的大脑与电子设备的交流控制通道，可以有效地帮助身体严重残疾的瘫痪人士，研究脑机接口对于大脑研究，生理研究和临床疾病诊断具有重要的作用和意义^[2]，脑机接口的研究涉及神经科学^[3]，信号检测，信号处理，控制实现等多个领域。在过去几十年里面 BCI 技术的研究发展十分迅速，作为一门新兴的技术，正在受到越来越广泛的关注。

BCI 技术的显见用途是为思维正常但运动功能残缺的人提供一种新型的弥补功能和对外信息交流手段。目前，神经肌肉失调，包括脑瘫痪、多硬化症、脊髓损伤、肌萎缩性侧枝硬化症和肌肉营养失调等仅在美国就影响着 200 万至 300 万人，在全世界将更多^[4]。他们中的许多人需要辅助信息交换设备，而其余中的大部分人可以使用一种或几种目前可以得到的传统辅助设备（语音合成器、游戏杆或鼠标等替代输入设备、键盘增强器、吸呼开关等）。对于大多数用户来说，这些传统设备的速度和准确度都要比目前发展状况下的基于 EEG 的信息交换所能达到的效果要好。

1 系统设计

本文介绍一种基于 OPENBCI 的开源实验平台的和 MATLAB 模式识别的颜色分辨系统，以实现通过分析信号来判断人眼所看到的颜色的功能。本设计硬件电路结构简单，分为脑电诱发模块，脑电采集模块，通讯模块两大模块。软件结构分为信号处理模块，脑电分辨人机交互模块两大模块。其中脑电诱发模块使用 OLED 显示器作为刺激器，脑电信号采集模块选用基于 ads1299 芯片的 OPENBCI 开源实验平台和四路脑电的采集设备，通讯模块使用蓝牙通讯。信号处理模块使用 MATLAB 进行信号的滤波，特征提取机器学习。人机交互模块选用 OLED 显示器来显示数据。图 1 是这个那个的整体框图。

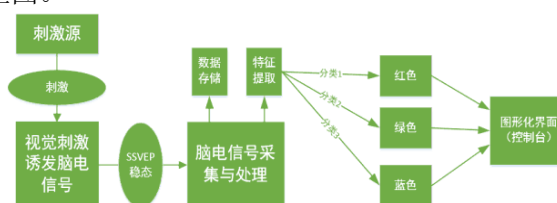


图 1 脑电采集和颜色分辨系统整体框图

Fig.1 Overall block diagram of EEG acquisition and color resolution system

* 指导教师：魏庆丽

项目类型：大学生创新训练项目（2017B65617）

2 脑电信号的采集

2.1 脑电诱发刺激器

按照刺激信号的频率，视觉诱发电位可以分成稳态视觉诱发电位 SSVEP 和瞬态视觉诱发电位 TSVEP^[5]；前者指的是采用小于 2Hz 频率的视觉刺激方式；后者采用的视觉刺激频率高于 4Hz。当频率小于或等 2Hz，刺激是一个接着一个出现的，而且第二个刺激发生时，皮质一系列刺激物反应消失，我们要研究的 VEP 波形为稳态视觉诱发电位。视觉诱发电位的检测是视觉功能研究的一个重要途径^[6]，视觉诱发电位不同的效果取决于不同的刺激时间和频率。视觉刺激器是脑机接口系统的重要组成部分，通过稳定可靠的视觉刺激，人类大脑产生的动作电位会变得稳定，这也是我们需要的动作电位。实验者盯着闪光灯，这些光线或图像会导致眼睛疲劳并干扰实验结果，所以本文需要选择一种柔和的刺激器作为刺激。因此我们使用电脑的显示屏 10hz 闪烁来当做刺激器。

2.2 脑电信号采集

我们使用基于 ADS1299 的 OPENBCI 开源实验平台为我们采集脑电信号，OpenBCI 开源实验平台是一种开源脑机接口设备，价格适中，但是零飘和温飘都很低，信噪比很高。他可以用来采集 1-8 路的不同情况下的脑电信号 EEG，拥有较方便的使用体验。同时可以采集四通道、六通道和八通道低噪声、24 位同步采样，拥有 $\Delta-\Sigma$ 模数转换器。该开源实验平台内置可编程增益放大器 (PGA)、内部基准以及板载振荡器。并且芯片 ADS1299 具备额外脑电图 (EEG) 和心电图 (ECG) 应用所需的全部常用功能。凭借高集成度和出色性能，ADS1299 能够以大幅缩小的尺寸、显著降低的功耗和整体成本构建可扩展的医疗仪器系统^[7]。

2.3 脑电信号传输

信号传输部分使用蓝牙模块用作通讯模块，蓝牙模块是一种集成蓝牙功能的 PCB 板，用于短距离无线通讯，按功能分为蓝牙数据模块和蓝牙语音模块。蓝牙模块是指集成蓝牙功能的芯片基本电路集合^[8]，用于无线网络通讯，大致可分为三大类型：数据传输模块远程控制模块等。一般模块具有半成品的属性，是在芯片的基础上进行过加工，以使后续应用更为简单。受试者进行脑电波采集的过程如图 2。

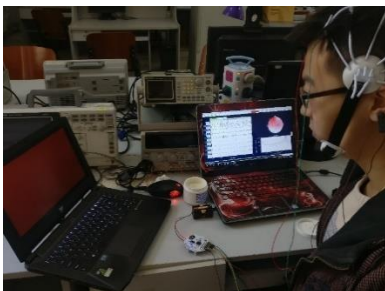


图 2 受试者进行脑电波采集的过程
Fig.2 Subject's process of brain wave acquisition

3 信号处理

3.1 信号预处理与特征提取

信号处理部分全部是基于 MATLAB 进行的，首先，我们先进行信号预处理。因为我们采集的脑电信号是由 10hz 的光诱发的，所以我们进行 6-14hz 的带通滤波，分析 10hz 的 SSVEP 的具体的信号。

其次进行信号特征提取，我们使用的准确率最高的算法是 Mean Absolute Deviation，中文翻译为平均绝对偏差，Mean Absolute Deviation 的计算方法把这个专有名词倒过来^[9]。先计算偏差 deviation，再把负数全部变成正数（绝对值）Absolute，然后再算平均数 Mean。如图 3。

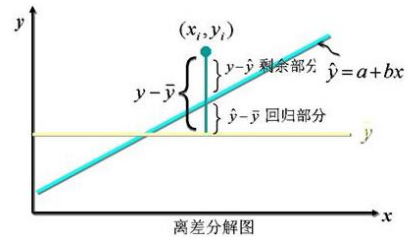


图 3 平均分布离差

Fig.3 Mean Absolute Deviation

简单平均差的计算公式如下：

$$A.D. = \frac{\sum |X - \bar{X}|}{n}, \quad (1)$$

式中，A.D.为平均差；X 为标志值； \bar{x} 为算术平均数； $|x - \bar{x}|$ 为绝对离差；n 为项数。

加权平均差的计算公式如下：

$$A.D. = \frac{\sum |X - \bar{X}|f}{\sum f}. \quad (2)$$

平均绝对离差的主要特征是它不会受到极端的或极端小的数值的影响。同时，它的计算利用了全部观测值。最后。它的绝对值处理起来有些困难。平均绝对离差的作用有两个，第一个是平均差计算简便，意义明确。第二个为平均差能将总体中所有各单位的标志值的差异情况全部包括进去，较准确地反映了总体各单位标志值的离差程度。

除了平均绝对离差之外，我们还使用了很多种特征提取的算法，具体使用了 Euclid Distances, Frequency Magnitude, Frequency Ratio, IQR, Kurtosis Feature, Maxfreq, Mean, Median, PCA, Quantile^[10]等特征提取的算法。

3.2 脑电信号的分类

在特征提取后，本文使用这些特征将各种脑电信号进行分类，我们使用了线性 SVM 支持向量机^[11]这一种算法机器学习算法对脑电信号的分类效果是最好的^[12]。具体来说，对于二类分类问题，训练集 $T = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\}$ ，其类别 $y_i \in \{0, 1\}$ ，线性 SVM 通过学习得到分离超平面：

$$w \cdot x + b = 0 \quad (3)$$

以及相应的分类决策函数：

$$f(x) = \text{sign}(w \cdot x + b) \quad (4)$$

因此，有如 4 图所示的分离超平面：

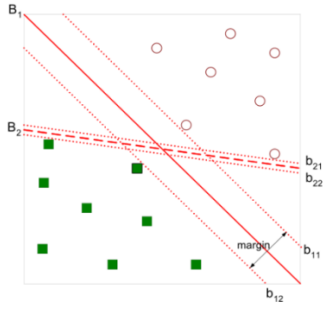


图 4 分离超平面

Fig.4 Separating hyperplane

直观上，超平面 B_1 的分类效果更好一些。将距离分离超平面最近的两个不同类别的样本点称为支持向量的，构成了两条平行于分离超平面的长带，二者之间的距离称之为 margin 。显然， margin 更大，则分类正确的确信度更高。通过计算容易得到：

$$\text{margin} = \frac{2}{\|w\|} \quad (5)$$

从上图中可观察到： margin 以外的样本点对于确定分离超平面没有贡献，换句话说，SVM 是很重要的训练样本（支持向量）所确定的。至此，SVM 分类问题可描述为在全部分类正确的情况下，最大化 $2/\|w\|$ （等价于最小化 $1/2 * (\|w\|)^2$ ）；线性分类的约束最优化问题：

$$\text{s.t. } y_i(w \cdot x_i + b) - 1 \geq 0 \quad (6)$$

对每一个不等式约束引进拉格朗日乘子 $\alpha_i \geq 0, i=1, 2, \dots, N$ ；构造拉格朗日函数：

$$L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i (w \cdot x_i + b) - 1 \quad (7)$$

根据拉格朗日对偶性，原始的约束最优化问题可等价于极大极小的对偶问题，并将 $L(w, b, \alpha)$ 对 w, b 求偏导并令其等于 0，将式子代入拉格朗日函数(3)中，对偶问题就变得简单许多，等价于最优化问题：

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \quad (8)$$

$$\alpha_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

除了支持向量机之外，我们还使用了 Bagged Trees 和 KNN 等机器学习算法来进行颜色分类的识别^[13]。

4 人机交互界面的设计

最后，我们制作了一个人机交互界面，用于显示脑电波性和显示最后经过信号处理判断出的结果。我们使用 C# 作为编程语言来设计人机交互界面^[14]，C# 是微软公司发布的一种面向对象的、运行于 .NET Framework 之上的高级程序设计语言^[15]。并定于在微软职业开发者论坛(PDC)上登台亮相。C# 是微软公司研究员 Anders Hejlsberg 的最新成果。C# 看起来与 Java 有着惊人的相似；它包括了诸如单一继承、接口、与 Java 几乎同样的语法和编译成中间代码再运行的过程。但是 C# 与 Java 有着明显的不同，它

借鉴了 Delphi 的一个特点，与 COM（组件对象模型）是直接集成的，而且它是微软公司 .NET windows 网络框架的主角。

C# 语言抽象层次高且基本只有一种（面向对象的），运行时支持丰富（垃圾回收等），类库丰富。所以它就是好学，易用，同时兼顾运行效率，尽量优化。C# 与 Java 类似，编译后得到的还不是机器代码，而是运行在虚拟机中的元指令。它对安全性做了更多的考虑，没有指针，不能直接操作内存，自动实现内存管理。

人机交互界面可以显示脑电信号的波形，并且可以调节大小，也可以显示最后脑电信号分类判断的结果。人机交互界面的具体成品如图 5 所示。



图 5 C# 人机交互界面

Fig.5 C# human-computer interaction interface

为了可以根据后期不同需要选用不同的调用方式，我们制作了两种人机交互界面与 MATLAB 连接的方式。第一种方式则是用 MATLAB 和 C# 混合编程的方法，需要从 MATLAB 中使用 deploytool 生成一个 dll 文件^[16]，之后在 C# 窗体程序中引用，这种方法对 C# 和 MATLAB 的版本有很严格的要求，需要 .NET 的版本不大于 MATLAB 生成的 dll 文件的 .NET 的版本，这样，有时候就会在程序中涉及到很多错误去修改。在 C# 编程的时候把调用过来的 dll 文件当作一个 CLASS 去使用就可以达到目标^[17]，第二种则是直接打开 MATLAB 文件。

5 测试结果

我们让受试者在一个黑暗隔音的环境中进行实验，试验内容是采集受试者看到 10hz 闪烁的不同颜色刺激器时的脑电信号。我们的采集了一共 1080s 红绿蓝三种颜色的 SSVEP 脑电信号，将这些信号进行信号预处理，然后用十多种不同的特征提取算法提取它们的特征，放入机器学习模型中进行训练，最后用另外的信号去判断，特征提取算法机器学习算法和得到的结果如表 1。

表 1 测试结果表
Table 1 Test result table

Feature Type	Classifier Type	Accuracy
Euclid Distances	Simple Tree	54.00%
Frequency Magnitude	Complex Tree	42.80%
Frequency Ratio	Ensemble Bagged Trees	53.30%
IQR	Cubic SVM	95.40%
Kurtosis Feature	Ensemble Boosted Trees	61.20%
Maxfreq	Linear SVM	37.20%
Mean	Fine Gaussian SVM	65.10%
Mean Absolute Deviation	Fine Gaussian SVM	98.10%
Median	Quadratic SVM	68.10%
PCA	Ensemble Subspace KNN	86.70%
Quantile25	Cubic SVM	75.90%
Quantile75	Fine Gaussian SVM	79.10%
Shannon Entropy	Ensemble Bagged Trees	76.10%
Skewness	Ensemble Bagged Trees	55.90%
Spectral Entropy	Medium Gaussian SVM	43.20%
Standard Deviation	Ensemble RUSBoosted Trees	96.30%
Svd	Ensemble Bagged Trees	89.40%

由以上图表可知,有的特征提取算法和机器学习算法的匹配性比较高,因此机器学习算法的学习效率和分类效果也就比较好,准确率也就比较高。而有的机器学习算法学习的特征和特征提取算法的关联性没有那么好,因此机器学习算法在分类时准确度也比较低。我们在实际应用的时候应该选择准确率比较高的几组来继续进行测试。

6 结论

由以上实验得到,对于常用的提取算法和机器学习算法而言,Mean Absolute Deviation 和 Fine Gaussian SVM 的搭配相较于其它的算子具有高识别准确率及稳定性;识别颜色的准确率可达 90%,系统有效识别颜色为红色绿色和蓝色,闪烁频率为 10hz,识别检测时间小于 3s,具有较高的准确率及稳定性。拓展的工作可以是将该方法应用到嵌入式系统,实现更加快捷的颜色分类。

参考文献

1. 覃京燕.信息维度与交互设计原理[J].包装工程,2018(16):57-68.
2. 何超,唐文辉,平雅婧,陈文锦,黄程,徐雷.增强现实技术及其教育培训现状研究[J].电子世界,2018(15):13-15.
3. 姜雷,张海,张岚,吴闯,孙启存,李海斌.脑机接口研究之演化及教育应用趋势的知识图谱分析——基于 1985-2018 年 SCI 及 SSCI 期刊论文研究[J].远程教育杂志,2018,36(04):27-38.
4. 陈柳松,杨利,张宇,刘丽.基于.NET 程序集的 C#与 Matlab

混合编程技术及应用[J].控制与信息技术,2018(02):44-46+64.

5. 曹艳.植入式脑机接口中微电刺激信息反馈和神经信息约简的研究[D].浙江大学,2016.
6. 唐昂藏 1,罗荣 2,董晓丽 3,刘陇黔 1.多焦视觉诱发电位在脑性瘫痪患儿中的应用[J/OL].华西医学,2016(06):1-6[2018-08-24].http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1356.R.20160614.2243.010.html.
7. 张瑞.面向重度残疾人的脑机接口功能辅助研究[D].华南理工大学,2016.
8. 王江,张惠源,李芳,张兵文,李鹏.脑机接口中半监督学习算法研究[J].电子测量技术,2014,37(05):9-12.
9. 谢宏,李亚男,夏斌,姚楠.基于 ADS1299 的可穿戴式脑电信号采集系统前端设计[J].电子技术应用,2014,40(03):86-89.
10. 李诚刚,赵佳宝,陈兆荣.Visual C#与 Matlab 混合编程在可视化软件中的应用[J].软件,2012,33(02):78-79+83.
11. 侯秉文.运动想象脑机接口的特征提取与模式分类研究[D].西安电子科技大学,2012.
12. 叶柠.基于脑电信号的脑—机接口的关键技术与实验研究[D].东北大学,2010.
13. 黄安湖.P300 脑电诱发电位的分类识别及在脑机接口中的应用[D].山东大学,2008.
14. 吕竟雷.基于支持向量机的 P300 脑电信号分类研究[D].西北工业大学,2005.
15. 董国军.蓝牙无线通信技术及其应用研究[D].天津大学,2004.
16. 何庆华.基于视觉诱发电位的脑机接口实验研究[D].重庆大学,2003.
17. 周继贤.绵羊神经肌肉运动失调的临床鉴别[J].国外兽医学.畜禽疾病,1996(02):28-30.

一种基于遗传算法的多自由度机械手轨迹规划方法*

王华梁；殷观旭；刘 倩

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院)

摘要：本文针对工业中普遍使用的具有六个自由度机械手如何实现规划快速并且高效的轨迹，本文构建的机械手 D-H 坐标系利用了 D-H 建模法，并利用正运动学对机械手进行分析。把时间最短做为优化的目标，引入遗传算法，同时考虑多节点的约束关系。最后，通过仿真分析得出一组机械臂最优关节角，满足机械臂运动时间最短。
关键词：六自由度机械臂；正运动学；轨迹规划；Matlab 仿真

A Multi-degree of Freedom Manipulator Planning Method Based on Genetic Algorithm

Wang Hualaing; Yin Guanxu; Liu Qian

(College of Instrument Science and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: In view of the fast and efficient trajectory planning of the industrial six degree of freedom manipulator, this paper constructs the D-H coordinate system of the manipulator based on the D-H robot modeling method, and carries out the positive kinematics analysis of the manipulator. Secondly, the manipulator is modeled and simulated by using MATLAB. Then, the genetic algorithm is introduced to optimize the target with the shortest time and the constraint relationship of multiple nodes is considered. Finally, the optimal joint angle of a group of mechanical arms is obtained through simulation analysis, which satisfies the shortest movement time of the manipulator.

Key words: six degree of freedom manipulator; positive kinematics; planning of the routine; Matlab simulation

0 前言

随着科学技术的发展，机械臂已应用到多个领域，为完成高复杂度的任务已开发具有高自由度的机械臂，随着自由度的增加连杆运动具有更强的耦合性^[1]。因此，针对具有多参数、强耦合和非线性运动的多约束多体系统的轨迹规划问题具有较大难度^[2]。如何提高路径规划的高效性，对于机械臂系统工作效率和运动精度具有重要意义。

1. 六自由度机械手正运动学分析

机器人运动学是一种分析机器人位姿与其每个运动关节和机械臂关系的方法，分两类，正运动学和逆运动学^[3-4]。正运动学分析机器人可以得到机器人运动学正解，这种方法从机器人的始端出发，

经由每个关节

和变量到达末端，从而计算出末端位姿的变换矩阵。根据 D-H 建模分析法^[5]，对机械臂建立参考坐标系，如下图 1 所示。D-H 参数见表 1。

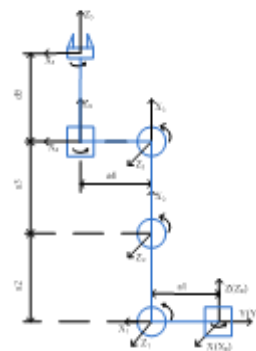


图 1 六自由度机械臂模型

Figure 1 Six-degree-of-freedom manipulator model

表 1 机械手 D-H 参数

Table 1 Robot DH parameters

连杆编号	θ	d	a	α	关节限位
1	θ_1	0	a_1	-90°	$-180^\circ \sim 180^\circ$
2	θ_2	0	a_2	0	$-135^\circ \sim 135^\circ$
3	θ_3	0	a_3	0	$-135^\circ \sim 135^\circ$
4	θ_4	0	a_4	90°	$-135^\circ \sim 135^\circ$
5	θ_5	d_5	0	0	$-180^\circ \sim 180^\circ$

* 指导老师：张冠宇

项目类型：大学生创新训练项目（2017B65630）

$$T_{i-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \sin(\alpha_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & -\cos(\theta_i) \sin(\alpha_i) & a_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

上式中:

T_{i-1} : 坐标系 i 到 $i+1$ 的坐标变换矩阵

d_n : 相邻两个关节 X_i, X_{i+1} 轴之间的距离;

a_n : 相邻两个关节 Z_i, Z_{i+1} 轴之间的距离;

θ_i : X_i 和 X_{i+1} 两轴之间的夹角, 以绕 Z 轴右旋为正方向;

α_i : Z_i 和 Z_{i+1} 两轴之间的夹角, 以绕 X 轴右旋为正方向。

$${}^nT_m = \begin{bmatrix} n & o & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

上式中

$p=[p_x, p_y, p_z]^T$ 是末端执行器相对基座坐标系的位置向量。 $n=[n_x, n_y, n_z]^T$, $o=[o_x, o_y, o_z]^T$, $a=[a_x, a_y, a_z]^T$ 是末端执行器相对基座坐标系的位姿向量。

根据初始状态下的机械手, 选择图 1 所示的 D-H 坐标系和表 1 中机械手参数, 把正运动学模型建立出来, 如图 2。

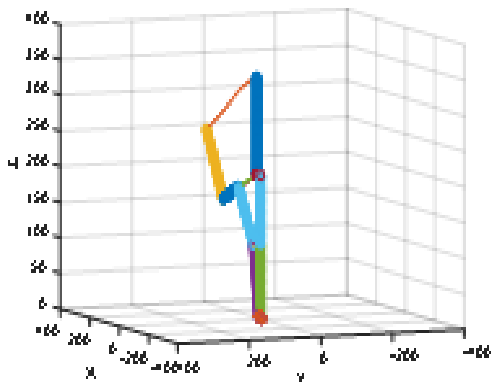


图 2 关节运动轨迹仿真
Figure 2 Joint motion trajectory simulation

2. 优化目标函数

本文研究的对象是六自由度机械臂, 每一个关节的舵机速度恒定且可知, 机械臂末端处的坐标系是旋转系, 所以第五个关节的变化不会影响末端的变化, 进而可以忽略。

2.1 约束条件

(1) 关节约束: 遗传算法实际要规划是关节角度, 所以遗传算法要在产生种群个体和对种群个体进行编码时考虑到关节角的正负限位。正负限位如上表 1 表示。

(2) 空间位置约束:

$$F1 = \sqrt{(x - x_f)^2 + (y - y_f)^2 + (z - z_f)^2}$$

式中: 机械臂末端实时点 (x, y, z) 和目标点 (x_f, y_f, z_f)

$F1$ 为两点之间误差

(3) 杆长物理约束:

$$l_{\min} \leq l_{cur} \leq l_{\max}$$

(4) 式中: l_{\max} 为初始位姿机械臂末端到基座坐标系的原点的距离, l_{cur} 为机械臂末端到基座坐标系原点的实时运动距离, l_{obj} 为终止位置机械臂末端到基座坐标系原点的距离。

2.2 适应度函数

为了找到机械臂能够到达目标点且所花费时间最短的一组关节角, 由以上分析的各种约束条件, 可以将适应度函数设定为:

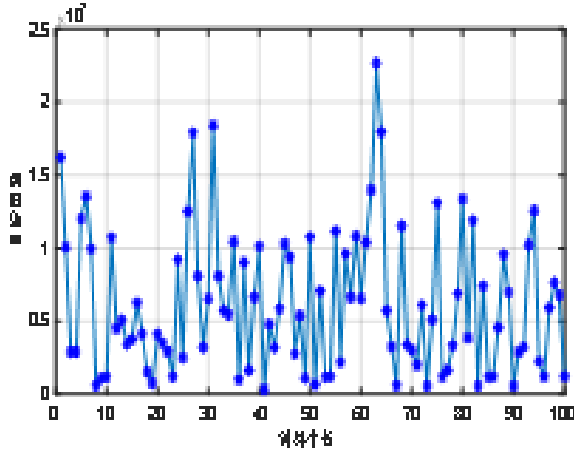
$$Fit = \begin{cases} \alpha \max(|q_1/a_1|, |q_2/a_2|, |q_3/a_3|, |q_4/a_4|) + \beta F1 & l_{obj} \leq l_{cur} \leq l_{\max} \\ \alpha \max(|q_1/a_1|, |q_2/a_2|, |q_3/a_3|, |q_4/a_4|) + \beta F1 + \gamma & \text{else} \end{cases}$$

本文中优化的是机械臂运动时间, 但优化运动时间的前提是机械臂末端必须到达目标点, 所以适应度函数中的权系数应满足 $\beta \geq \alpha$, 权重系数越大, 说明其越重要, 要优先考虑。式子中的 γ 为一个常数, 可以根据寻优效果来进行调整。

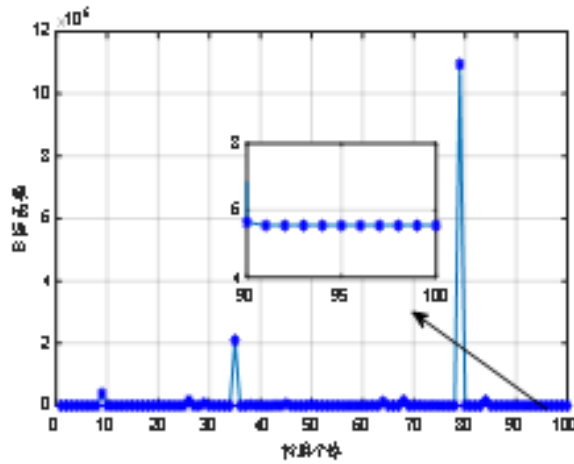
3. 基于遗传算法优化轨迹

本文经过多次仿真验真对遗传算法进行寻优, 以 $N=100$ 为遗传算法的种群规模, 使用二进制编码, 遗传代数 $g=500$, 重组交叉概率 0.7, 变异概率 0.5。同时, 不断调整权重系数, 最后确定权重系数 $\alpha=1$, $\beta=100$, β 比 α 大的多的原因是在机械臂末端接近目标点时罚函数变得很小, 为了使误差尽可能的小, 所以需要一定程度上放大误差, 使目标函数相对较大。而当关节角不满足约束条件下, 为了淘汰种群的这些, 需要使其评估适应度相对较小, 所以可以在目标函数后面加一个较大常数 γ ,

本文中取 $\gamma=1000$, 之所以不直接让目标函数等于一个较大常数, 是为了使种群个体的多样性有所提高, 从而加快收敛速度。运用 Matlab 对上述流程进行设计, 分析机械臂时间最短路径的仿真结果。仿真结果如下图 3、4 所示:



(a)

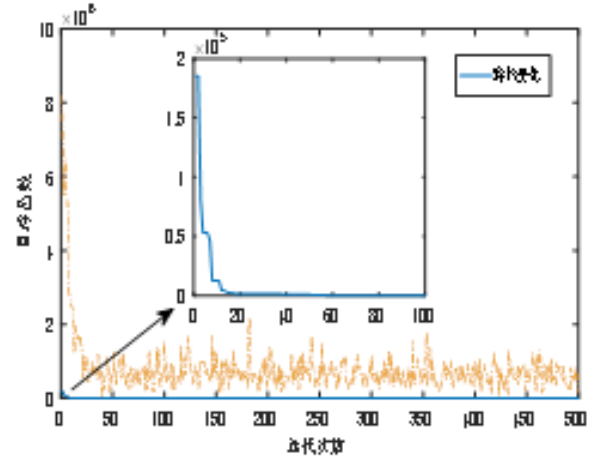


(b)

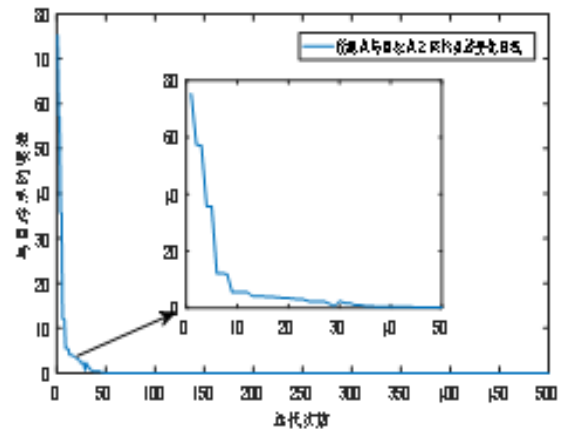
图 3 (a) GA 算法第 1 代种群个体目标函数分布 (b) GA 算法第 500 代种群个体目标函数分布

Fig. 3(a) Distribution of individual objective function of the first generation population of GA algorithm (b) Distribution of individual objective function of the 500th generation of GA algorithm

图 3 (a) 为遗传算法寻优的第 1 代种群个体的目标函数分布, 从图中可以看出, 目标函数随机分布, 呈现无序性。随着遗传代数的增加, 遗传算法逐渐收敛, (b) 为到第 500 代时, 目标函数已经大部分集中于某一数值, 验证了遗传算法的收敛性。



(a)



(b)

图 4 (a) 遗传算法性能追踪 (b) 迭代过程中误差变化
Figure 4 (a) Genetic Algorithm Performance Tracking (b) Error variation during iteration

从图 4 (a) 中可以看出, 本文中所论述的遗传算法性能优越, 收敛很快, 可以满足机械臂轨迹规划设计要求。从图 4 (b) 中可以得出, 随着迭代次数的增加, 机械臂末端越来越接近于目标点, 最终基本稳定于目标点处。通过 Matlab 编程仿真, 最后得出一组最优解。

4. 结论

本文首先仿真分析了机械臂正运动学, 搭建六自由度机械手正运动学模型。其次, 对六自由度机械手采用遗传算法进行路径规划。由仿真分析可知, 采用遗传算法可以提高轨迹规划的速度和高效性, 为机械臂轨迹规划提供了参考及借鉴。

参考文献

1. 胡友忠. 基于动力学的机械臂最优轨迹规划[D]. 浙江大学, 2016.
2. 彭代慧, 邹显春, MATLAB2013 实用教程, 北京高等教育出版社, 2014.8, 221 P.

3. Reynoso-Mora P, Chen W, Tomizuka M. On the time-optimal trajectory planning and control of robotic manipulators along predefined paths[C]// American Control Conference. IEEE, 2013:371-377.
4. 张秀林. 基于遗传算法的机械臂时间最优轨迹规划[D]. 兰州理工大学, 2014.
5. 周高峰,朱强,MATLAB 工程基础应用教程[M]机械工业出版社,北京.2015.1:207.

基于小波变换和模极大值法的 癫痫发作检测与分析*

刘光达；王依萌；胡秋月；马孟泽；蔡 靖

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院)

摘要：癫痫是大脑神经元突发性异常放电导致大脑功能障碍的一种慢性疾病。癫痫发作的检测可以利用对脑电信号中的癫痫特征波—棘波的检测和分析来实现。本研究提出了基于小波变换和模极大值法的棘波检测方法。对癫痫脑电信号在一定尺度内进行连续小波变换，应用模极大值算法及细化算法对脑电信号奇异点进行检测，得到奇异点的模极大值作为提取的棘波嫌疑点，再通过功率谱密度分析和空间曲面拟合筛选得到最终的棘波特征波，判断癫痫是否发作。实验验证，本算法检测效果较好，诊断准确率可达 92.5% 以上，为癫痫发作的检测提供了一种有参考价值的方法。

关键词：癫痫发作；脑电信号；棘波；小波变换；模极大值法

Detection and Analysis of Epileptic Seizure Based on Wavelet Transform and Modulus Maximum Approach

LIU Guangda; WANG Yimeng; HU Qiuyue; MA Mengze; CAI Jing

(College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: Epilepsy is a chronic disorder of brain dysfunction caused by sudden abnormal discharge of brain neurons. The detection of epileptic seizure can be achieved by the detection and analysis of spike waves. In this paper, a method of detection based on wavelet transform and modulus maximum is proposed. First, it uses the continuous wavelet transform of epileptic eeg signals in a certain scale to divide the frequency bands. Second, it applies the modulus algorithm and refining algorithm to detect singular points of eeg signals, which are taken as the suspect points of spike waves. Finally, through screening based on power spectral density analysis and space surface fitting, the final characteristic spike waves are detected to determine whether the epileptic seizure occurs. The verification experimental results indicate the efficiency and reliability of the proposed method with a diagnostic accuracy as high as 92.5%. It provides a valuable reference method for epileptic seizure detection.

Key words: epileptic seizure, eeg signal, wavelet transform, modulus maximum method

0 引言

癫痫 (epilepsy) 即俗称的“羊角风”或“羊癫风”，是大脑神经元突发性异常放电，导致短暂的大脑功能障碍的一种慢性疾病。由于癫痫导致的脑部异常放电的起始部位和传递方式的不同，癫痫发作复杂多变，常表现为发作性运动、感觉、自主神经、意识及精神障碍；癫痫发作类型可分为：全面性发作、部分性发作、继发全面性发作；临床细划分为：全面强直-阵挛性发作、失神发作、强直发作、肌阵挛发作等症状，常伴有不同程度的意识障碍、肌肉痉挛等现象。癫痫病作为一种慢性疾病，长期频繁的发作导致患者的身心、智力受到严重的影响。由于癫痫发病的突然性，患者容易出现摔伤、烫伤、溺水、交通事故等；癫痫是大脑功能障碍的一种，癫痫患者会出现记忆障碍、智力下降、性格改变等严重的认知障碍，最后逐渐丧失工作能力甚至生活能力。除此以外，癫痫的危害还体现在精神上的危

害，癫痫患者经常被社会歧视，在就业、婚姻、家庭生活等方面均遇到困难，患者精神压抑，身心健康受到极大的影响。鉴于癫痫病症病发的普遍性和危害性，对癫痫的致病机理、临床检测和病灶定位成为研究的重点和难点。

癫痫疾病的诊断主要通过临床病史和脑电图检查，棘波作为癫痫特征波，其检测对判断是否患有癫痫具有决定意义。近年来，随着信号分析处理和计算机辅助智能诊断技术在医疗领域的迅速发展，促进了癫痫的相关研究。研究主要有两个方向：(1)用信号分析的方法直接对脑电进行分析，找到脑电信号某些参数的差异来进行预测，例如，Manish N. Tibdewal^[1] 等人基于方差和多重熵对癫痫/非癫痫脑电信号进行统计分析，从而完成对癫痫脑电信号的检测识别。朱东升^[2]通过对患者头部进行核磁共振扫描，并对其进行基于傅里叶变换的功率谱分析，与正常脑电信号进行对比得到癫痫发作的脑电特征。徐亚宁^[3]运用快速傅里叶变换对正常人和癫痫发作期的脑电信号进行对比分析，在频域上对癫痫信号

* 指导老师：刘光达

项目类型：大学生创新训练项目 (2017A65295)

进行识别。王鹏翔^[4]等人采用基于小波变换的癫痫脑电特征波识别算法,实现对信号的分析。由于脑电信号属于多组分非平稳伪随机信号,傅里叶变换与其适应性不好,故其预测准确率不高;(2)用信号分析的方法与机器学习分类算法相结合来对癫痫信号进行处理,例如, Morteza Behnam^[5]等设计了一种基于癫痫模极大值模式的癫痫发作特异性小波,其对捕获的脑电信号进行建模,通过 AdaBoost 分类器实现癫痫发作的检测与分类。Shivnarayan Patidar 和 Trilochan Panigrahi^[6]采用基于 TQWT 的 Kraskov 熵的分析方法对癫痫脑电信号进行单特征检测,并利用最小二乘支持向量机(LS-SVM)分类器对癫痫和非癫痫脑电信号进行分类。赵建林^[7]等通过小波分析与支持向量机 SVM 分类器对正常脑电与癫痫脑电进行分类。韩敏^[8]通过正常人和癫痫病患者发作期的脑电信号的对比分析,用 SVM 的方法进行分类来判断癫痫是否发作。李牧潇^[9]运用了基于样本熵与极限学习机的方法,对脑电信号进行多层小波分解后,提取所需脑电信号并求其样本熵作为特征向量,再运用极限学习机算法进行分类识别。在不过拟合的情况下,特征向量的维度越高,算法的分类精度越高,但上述方法仅使用了一种特征参数。同时 SVM 和极限学习机分类算法对于非线性分类没有一个通用的解决方案,故其准确率也不是很高。

基于以上问题,本文提出了基于小波变换和模极大值算法的癫痫检测方法。相对于 SVM 等经典算法,小波变换模极大值算法得到的结果准确率更高、检测效果更好。本研究使用的癫痫脑电实验数据来源于美国麻省理工大学 CHB 癫痫病患数据库。

1 癫痫特征波提取

1.1 脑电信号的癫痫特征波

人体脑电信号是脑神经细胞电生理活动在大脑皮层或头皮表面的总体反映。脑电信号中包含了大量的生理与疾病信息,临床中将脑电信号根据不同的频率主要分为 4 个频带,分别为慢波、 α 波、快波及中快波。棘波和尖波是根据其波形相比信号的其他部分显著尖锐的特征分类的,棘波和尖波突出于背景活动,有别于形成其他的背景活动的波和节律。

典型的癫痫特征波即由棘波、尖波和慢波组成,常见的有棘波、尖波、棘-慢复合波和尖慢复合波等(如图 1 所示)。

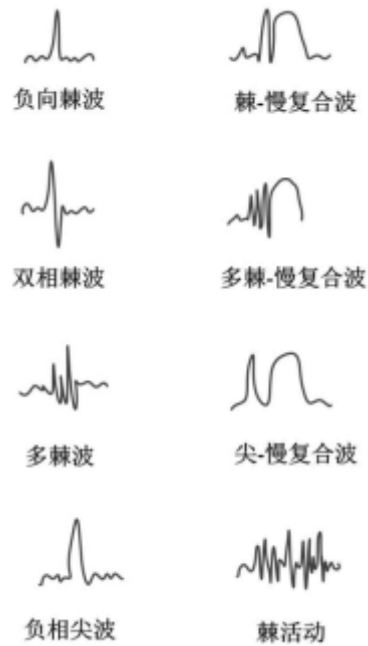


图 1 典型的癫痫脑电图特征波

Fig.1 Typical epilepsy EEG characteristic wave

其中,棘波,是一种阵发性的异常脑电图的基本形式,一般时限为 20~70ms,其波形较为陡峭,一般处于负相波形,部分处于正相波形,有时还会处于双相或者三相波形。棘慢复合波是接着棘波出现的时长为 200~500ms 的慢波。而尖波与棘波类似,但时长比棘波更长,两者都是负相和双相性,一般也有三相性,尤其是高波幅的正相波较多。尖慢复合波为慢波接着尖波出现形成的复合波,尖波时长多为 80~120ms,接着尖波的慢波时长大约为 500~1000ms^[10]。

癫痫脑电信号含有显著的棘波特征波,故对棘波进行识别,从而实现癫痫脑电信号的特征提取的方法具有可行性和可靠性。本研究通过小波变换和模极大值检测对棘波进行识别。

1.2 特征提取

小波分析是一种非常有效的信号时频分析方法,它将时域的一维信号变换至时间/尺度的二维空间,对于处理时变信号具有独特的优越性。

连续小波变换过程(CWT)^[11]可以由下式表示:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \int_0^T \left(\Psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \cdot s(t) \right) dt \quad (1-1)$$

其中 a 为变换尺度参数, b 为时移参数, s 为原信号, t 为记录时间, T 为原信号时间长度, $\Psi(a, b, t)$ 为母小波函数。小波变换系数的矩阵形式 $W_{a,b}$ 可由下式得到,其中 a_{\max} 为最大变换尺度:

$$W_{a,b} = W(a, b) | (a, b \in N) \wedge (a \in [1, a_{\max}]) \wedge (b \in [1, T]) \quad (1-2)$$

当变换尺度 a 较小时^[3],中心频率较高,带宽较宽, $W_{a,b}$ 中高频分量更多;反之, a 较大时,中心频率较低,带宽较窄, $W_{a,b}$ 中低频分量更多。而棘波是脑电波中相对高频的成分,其信息更有可能出现在小尺度层次上。

模极大值算法是一种基于小波分析的算法, 在小波分析的基础上对信号进行奇异点判断与分析。本文采用细化算法计算模极大值列^[11]。细化算法函数的表达式为:

$$\text{LcMx}_{a,b} = \begin{cases} 1 | \frac{\partial(w(a,b))^2}{\partial b} = 0 \\ 0 | -(\frac{\partial(w(a,b))^2}{\partial b} = 0) \end{cases} \quad (1-3)$$

$$a, b \in N \wedge (a \in [1, a_{\max}]) \wedge (b \in [1, T]); a, b \in N^{\wedge}$$

忽略“ $\text{LcMx}(a,b) | (T-a \leq b) \vee (b \leq a)$ ”缺口处以及角落处的局部最大值, 有下式:

$$\text{LcMx}_{a,b} = \begin{cases} 1 | (\frac{\partial(w(a,b))^2}{\partial b} = 0) \wedge (a < b < T - a) \\ 0 | -(\frac{\partial(w(a,b))^2}{\partial b} = 0) \vee (T - a \leq b) \vee (b \leq a) \end{cases} \quad (1-4)$$

$$a, b \in N \wedge (a \in [1, a_{\max}]) \wedge (b \in [1, T]);$$

最终, 小波模极大值系数可由下述公式得到, 其中 W^{abs} 为绝对小波系数矩阵:

$$\text{WTMM}_{a,b} = W^{\text{abs}}_{a,b} * \text{LcMx}_{a,b} \quad (1-5)$$

$$a, b \in N \wedge (a \in [1, a_{\max}]) \wedge (b \in [1, T]);$$

结合小波变换与模极大值法, 选取小尺度的小波模极大值系数 $\text{WTMM}_{a,b}$ 作为特征波。又因为随尺度 a 减小, 小波时窗变窄, 低频成分能量将逐渐降低, 而高频成分能量不会降低。故通过分析各个尺度小波模极大值系数 $\text{WTMM}_{a,b}$ 的变化情况, 可以筛选出特征波中的棘波嫌疑点, 将棘波与高频分量分离。

2 实验分析

为验证算法的有效性, 本实验使用的癫痫脑电数据来源于美国权威的 CHB-MIT Scalp EEG Database (<https://www.physionet.org/pn6/chbmit/>)^[12,13]。该数据库记录癫痫患者发作期的脑电图, 记录共 23 个文件, 来自 22 名受试者 (5 名男性, 3-22 岁; 17 名女性, 年龄在 1.5-19 岁)。所有信号都以 256Hz 采样率、16 位分辨率进行采样。大多数文件包含 23 个 EEG 信号 (少数情况下为 24 或 26)。此外, 该数据记录已进行了初步处理, 去除环境干扰及眼迹干扰等噪声, 并且已经标明了发作期的时间节点, 可直接应用于癫痫数据分析。

根据统计数据显示, 癫痫致病灶位置最常见于电极网络的额极和前颞、中颞、后颞区域, 对应的电极 Fp1 、 Fp2 、 F7 、 F8 、 T3 、 T4 、 T5 、 T6 (采用国际 10-20 系统的 EEG 电极位置) 共 8 个电极, 故在实验中采用这 8 个电极中的数据进行特征波提取。下述实验以 Fp1 通道为例。

首先将数据库中的原始脑电信号分割成数据长度为 1024 个数据点的区段。以数据库中的 chb01

病例为例, 选取发作期区段中、随机一个数据长度为 1024 个数据点的区段进行实验。对其中一个区段进行小波分析, 分解级数为 10 级, 抽样率为 256, 迭代次数为 6。以 db4 小波为基小波, 其母小波函数图如图 2。

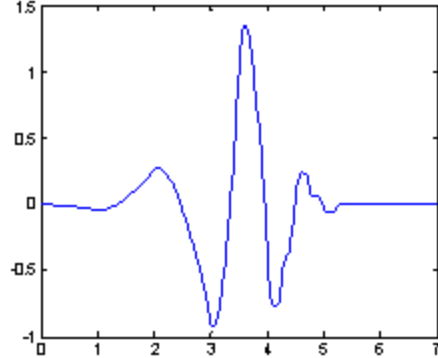


图 2 db4 母小波函数

Fig.2 Db4 mother wavelet function

小波分析后, 以通道 Fp1 为例, 部分层次的结果如图 3。

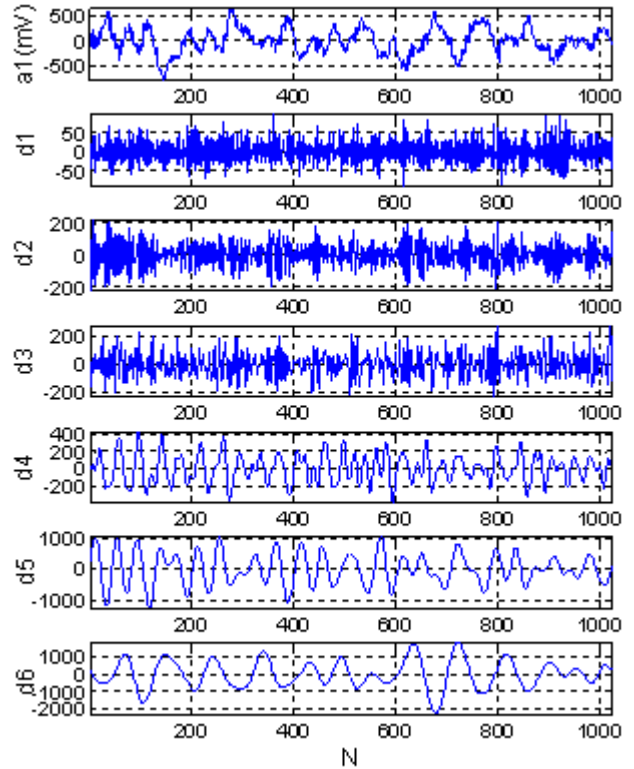


图 3 小波分析后部分层次的波形图

Fig.3 Waveform analysis of partial levels after wavelet analysis

再对小波变换结果矩阵中每个小波细节层次按 2 中步骤进行模极大值计算, 由公式 (1-5) 检验奇异点, 得到模极大值波列结果如图 4 所示。

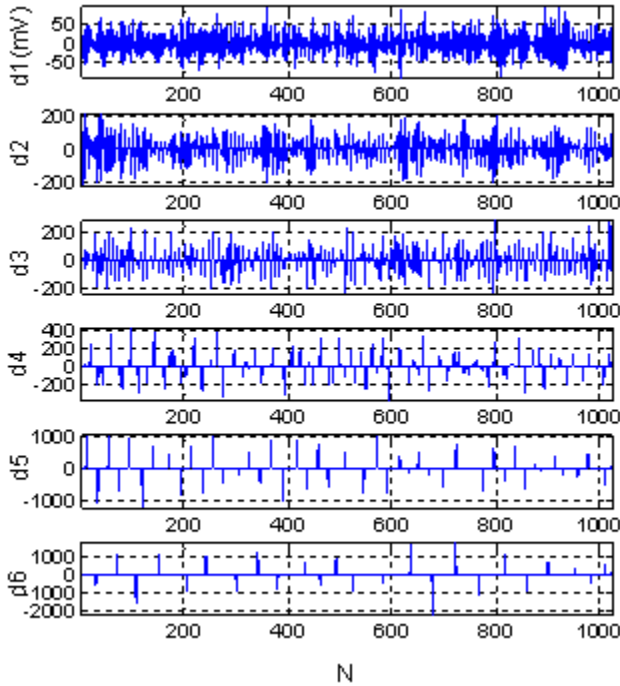


图 4 模极大值波列波形图

Fig.4 modulus maxima wave train waveform

进一步对奇异点模极大值波列频带间的变化趋势进行统计分析,以筛选出怀疑棘波值点。识别算法如下:

- (1) 设定一阈值 $\varepsilon > 0$, 对于 $1 \leq a \leq 6$ 、任意点数 $1 \leq x \leq 1024$, 若有 $|WTMM(a, x)| < \varepsilon$, 则令 $WTMM(a, x) = 0$;
- (2) 对于 $1 \leq a \leq 6$, 令 $WTMM(a, 1) = WTMM(a, 1024) = 0$, 降低由于区段边缘包含不完整特征波而造成的误判的错误率;

- (3) 由于棘波的时长多为 20~80ms 之间, 结合本数据库的采样率, 棘波怀疑点的大量信息更有可能出现在 d1, d2, d3 三个层次上, 故取特征波为:

$D(x) = p_1 * WTMM(1, x) + p_2 * WTMM(2, x) + p_3 * WTMM(3, x)$, 其中 p_1 、 p_2 、 p_3 为分配权重;

- (4) 用相关法计算功率谱密度列, $(2\Phi-1)$ 点的自相关函数序列:

$$\hat{R}_D(\varphi) = \frac{1}{1024} \sum_{x=0}^{1023} D_N(x) D_N(x + \varphi);$$

- (5) 功率谱密度:

$$\hat{S}_D(e^{j\omega}) = \sum_{\varphi=-(\Phi-1)}^{\Phi-1} \hat{R}_x(\varphi) e^{-j\omega\varphi};$$

- (6) 用移动最小二乘法对复合波列 $D(x)$ 和功率

谱密度列 $\hat{S}_D(e^{j\omega})$ 进行空间曲面拟合分析;

- (7) 由 x 点拟合曲面的曲率 H_x 及曲率微分 dH_x 确定该点对 $[-0, 0]$ 区间内高频成分做出的贡献度 $M(x)$ 。设定一阈值 $\omega > 0$, 若有 $M(x) < \omega$, 则令 $D(x) = 0$;

- (8) 根据以上检测得到的癫痫棘波嫌疑点所处位置附近的波形特征: 宽度、最大斜率, 进一步确定其是否为棘波点, 最终筛选得到棘波值列 $D_f(x)$ 。

由此得到拟合曲面结果下图所示, 图 5 为棘波嫌疑点的拟合曲面, 图 6 为非棘波嫌疑点的拟合曲面。

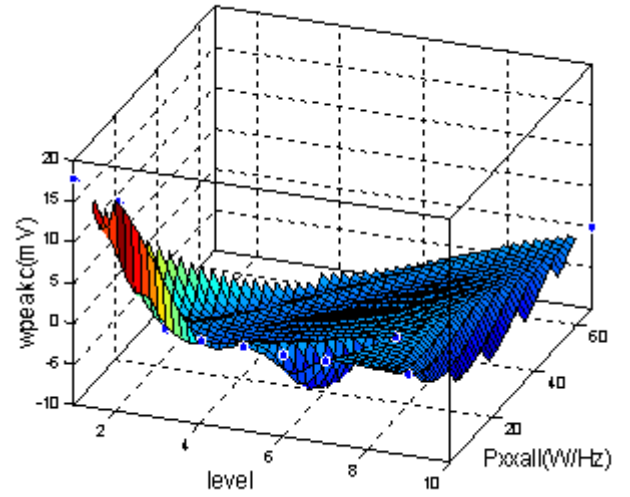


图 5 棘波嫌疑点拟合曲面

Fig. 5 Spike wave suspect point fitting surface

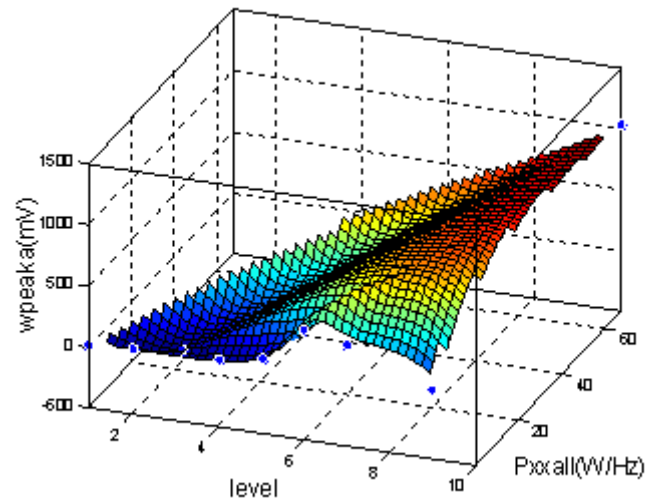


图 6 非棘波嫌疑点拟合曲面

Fig.6 Non-spike suspect point fitting surface

最后通过上述部分对特征值波列的筛选, 得到检测出的棘波值列, 提取出的棘波值列与原始脑电信号的对比如图 7。其中原始脑电信号来源于病例 Chb01/、001 号信号中 Fp1 通道的 0.5s~4.5s 处, 共 1024 个样点。A 为经该检测算法提取到的棘波值列, B 为原始脑电信号。

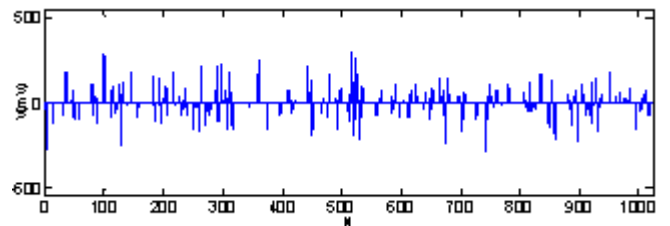


图 A 提取的棘波值列

(A) Extracted spike value column

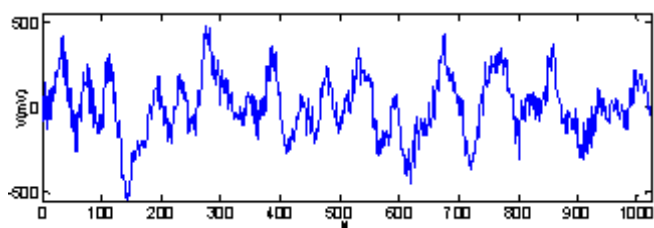


图 B 原始脑电信号
(B) Original EEG signal

图 7 提取的棘波值列与原始脑电信号的对比图
Fig.7 Comparison of the extracted spike value column with the original EEG signal

对 19 例癫痫患者脑电棘波的检测,根据患者被检测时的状态分为发作期和发作间期两个数据集,得到了高的棘波识别率,结果如表 1 所示。

表 1 19 例癫痫患者的误检比率
Table 1 False detection ratio of 19 patients with epilepsy

病例	发作状态	棘波个数	假阳性	漏检	误检	误检比率(%)
Chb01/	发作期	103	0	0	0	0
Chb02/	发作期	106	6	2	8	7.5
Chb03/	发作期	98	4	1	5	5.1
Chb04/	发作间期	0	0	0	0	0
Chb05/	发作期	87	3	3	6	7.0
Chb06/	发作间期	0	0	0	0	0
Chb07/	发作期	101	3	2	5	4.9
Chb08/	发作期	91	3	1	4	4.3
Chb09/	发作期	82	2	0	2	2.4
Chb10/	发作期	94	1	3	4	4.2
Chb11/	发作期	104	2	5	7	6.7
Chb12/	发作间期	1	0	0	0	0
Chb13/	发作期	79	2	1	3	3.7
Chb14/	发作期	103	4	2	6	5.8
Chb15/	发作间期	0	0	0	0	0
Chb16/	发作期	95	0	1	1	1.0
Chb17/	发作期	88	0	0	0	0
Chb18/	发作期	102	2	1	3	2.9
Chb19/	发作间期	4	0	0	0	0

由以上结果可以看出,小波变换-模极大值检测法可以有效地对棘波个数进行检测。对不同的脑电信号,由于个体差异、干扰等因素,准确率不同。与专家检测的棘波个数相对比,其准确率在 19 例样本中最低也可达 92.5%。可见该系统对棘波位置与个数的辨识能力强。发作期和发作间期两个数据集检测到的棘波个数的分布如图 8 所示。并采用统计学原理对棘波个数数据进行单方差分析,结果如图 9 所示。

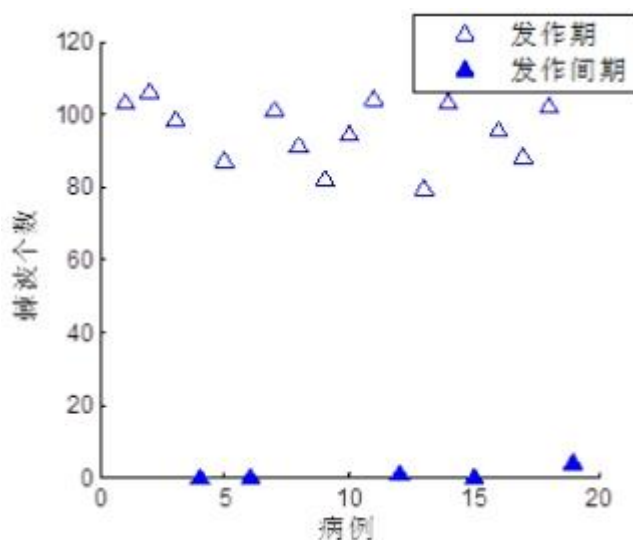


图 8 发作期与发作间期测得棘波个数分布图
Fig.8 The number of spikes measured during the attack period and the interictal interval

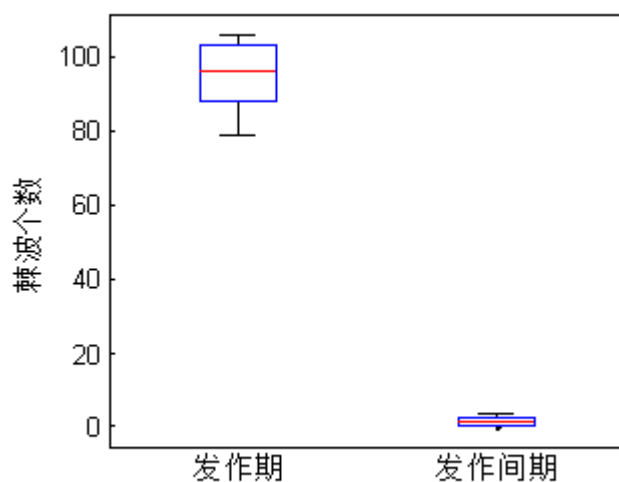


图 9 发作期与发作间期测得棘波个数箱线图
Fig. 9. Spiral number box line graph measured during the attack period and the interictal interval

通过观察棘波个数分布图和单方差分析图,可得出以下结论:对于固定长度的原始信号,本系统检测到的癫痫发作期及发作间期的脑电信号棘波个数有明显的差别。癫痫患者发作期的棘波个数比例明显高于发作间期,可以将发作期及发作间期样本分开,这印证了本系统检测到的棘波个数可以作为判断癫痫是否发作的依据。

3 结论

本研究将小波变换和模极大值算法结合适应了脑电信号非平稳、多组分的特征,研究了多种特征参数对脑电癫痫信号的影响,并在模极大值法中,运用了细化函数这一简单、高效、高精度的算法。通过分析和实验验证采用小波分析结合模极大值算法对脑电信号进行分析时,诊断准确率在 92.5%以

上, 效果理想。

本研究可以在临床上帮助医生更好的对癫痫患者进行更好的诊断, 可以帮助癫痫高危人群及时得到专业医护人员的救治, 降低死亡率。下一步工作是对癫痫病灶进行定位, 并尽可能实现对癫痫病发作的预测。

参考文献

1. Manish N. Tibdewal,Himanshu R. Dey,Manjunatha Mahadevappa,AjoyKumar Ray,Monika Malokar. Multiple entropies performance measure for detection and localization of multi-channel epileptic EEG[J]. Biomedical Signal Processing and Control,2017, 38: 158-167.
2. 朱东升. 癫痫信号分析及病灶定位[D].燕山大学,2016.
3. 徐亚宁.基于小波变换的 EEG 信号癫痫棘波检测[J].桂林电子科技大学学报,2008, 28(03):197-199.
4. 王鹏翔,张兆基.小波变换下的脑电信号癫痫特征波识别算法研究[J].信息与电脑(理论版),2017, 17:63-65.
5. Morteza Behnam,Hossein Pourghassem. Seizure-specific wavelet (Seizlet) design for epileptic seizure detection using CorrEntropy ellipse features based on seizure modulus maximas patterns[J]. Journal of Neuroscience Methods,2017, 267: 84-107.
6. Shivanarayan Patidar,Trilochan Panigrahi. Detection of epileptic seizure using Kraskov entropy applied on tunable-Q wavelet transform of EEG signals[J]. Biomedical Signal Processing and Control,2017,34 : 74-80.
7. 赵建林,周卫东,刘凯,蔡冬梅.基于 SVM 和小波分析的脑电信号分类方法 [J]. 计算机应用与软件,2011,28(05):114-116.
8. 韩敏,孙卓然.基于小波变换和 AdaBoost 极限学习机的癫痫脑电信号分类 [J]. 计算机应用,2015,35(09):2701-2705+2709.
9. 李牧潇. 癫痫脑电信号自动检测的研究[D].郑州大学,2014.
10. 汪春梅. 癫痫脑电信号特征提取与自动检测方法研究 [D].华东理工大学,2011.
11. Andrejs Puckovs,Andrejs Matvejevs.Wavelet Transform Modulus Maxima Approach for World Stock Index Multifractal Analysis[J].Information Technology and Management Science,2012,15:76-86.
12. Goldberger AL, Amaral LAN, Glass L, Hausdorff JM, et al. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals.Circulation .2018,101(23):e215-e220.
13. Shoeb,Ali Hossam.Application of Machine Learning to Epileptic Seizure Onset Detection and Treatment[D]. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, September 2009.

基于OpenCV的疲劳驾驶系统研究*

林思玉¹；施书通²；赵宏伟^{3,4}；陈长征⁴

(1. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院；2. 吉林大学 通信学院；3. 吉林大学 计算机科学与技术学院 4. 应用光学国家重点实验室，吉林省，长春市)

摘要：基于疲劳驾驶系统使用过程中应满足的稳定性、实时性及可用性要求，本文提出了一种基于 OpenCV 平台的快速定位人眼方法。具体实施过程中采用先定位人脸再定位人眼的方法，从而缩小人眼定位范围，利用对图像的灰度化处理有效地削弱光线在识别过程中产生的干扰。在人眼识别过程中由于使用传统 Adaboost 算法容易产生误检，因此本文提出了几种新型的 Haar 特征用于进行特征选择，实验结果表明具有较高的识别率。为后续的疲劳驾驶研究打下良好的基础

关键词：Haar 特征 Adaboost 算法 人眼检测

Research on Fatigue Driving System Based on OpenCV

LIN Si-yu¹;SHI Shu-tong²;ZHAO Hong-wei^{3,4};CHEN Chang-zheng⁴

(1. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University; 2. College of Communication Engineering, Jilin University; 3. Department of computer science and technology, Jilin University; 4. Department of computer science and technology, Jilin University, Changchun, China)

Abstract: This paper proposes a human eye recognition algorithm based on Haar-like feature and adaboost classifier to solve the problem that traditional human eye detection technology have in low recognition rate and long training time. The first thing to do is to position the face. After the face is positioned successfully, we use the upper half part of the face image to further locate the human eye. Then the haar features are extracted and the human eye classifier is trained by using adaboost algorithm. This experiment shows that method used in the paper has higher recognition rate than the traditional adaboost algorithm and effectively reduces the interference effect of light in the recognition process.

Key words: Haar feature Adaboost eye Detection

0 前言

统计分析，每年由疲劳驾驶导致的交通事故约 83000 起，如何采用相应技术手段来预防疲劳驾驶的问题显得至关重要。随着机器视觉的发展，以及传统接触式疲劳检测技术对驾驶员正常驾驶具有诸多干扰等因素，目前的检测技术开始趋向于非接触式疲劳预警系统，其中对人眼状态的判断是疲劳检测的重要部分。OpenCV 平台是 Intel 公司开发的数字图像处理和计算机视觉软件，规模小、效率高，广泛适用于研究者进行二次开发。本文所研究内容都是基于 OpenCV 平台下，通过使用 adaboost 算法来实现快速人眼定位，便于后续的疲劳状态判定。

1 人脸检测

1.1 Adaboost 算法

Adaboost 算法是由 Freund 和 Schapire 根据在线分配算法提出的，此种算法是基于 Boosting 上改进过来的一种迭代算法，克服了 Boosting 算法对弱学

习先验知识的要求^[1]可以实时检测且准确度较高，受外界环境的干扰较小。Adaboost 算法基本思想是通过比较大量分类能力不强的弱分类器的错误率来赋予各分类器不同的权重，再通过一定的方法叠加起来，构建强分类器，基于此种方法可以高精度、快捷识别目标位置。^[2]

1.2 图像处理

灰度处理及灰度拉伸：彩色图像中的每个像素的颜色有 R、G、B 三个分量决定，每个分量中有 255 个值可取，像素点颜色变换范围大。当 R=G=B 时形成一种特殊的彩色图像——灰度图像一个像素点的变化范围为 255 种。由于彩色图像对于人脸识别^[3]并无较明显的视觉效果由此将图像转变为灰度图像可以达到减小计算量的目的。灰度拉伸将灰度图像进行拉伸使之覆盖较大的取值区间，提交图像对比度，增亮光强的区域，减弱光线弱的区域，从而使图像边缘更加明显。减弱光照对识别过程中的影响。

1.3 分类器训练

人脸检测目前的研究大致分为三类，一类是基

* 指导老师：赵宏伟
项目类型：2017 年机器人项目校级二类

于人脸特征的方法肤色特征、人脸边缘特征等方法，但上述方法易受外界噪声干扰。第二类是模板匹配法，第三类是基于统计的检测方法如神经网络法及支持向量机等，需要收集大量的样本数据，耗时长，且识别率不高。本文选用 OpenCV 平台自带的 adaboost 程序训练分类器把从人脸样本中提取的 haar 特征所构成的弱分类器级联成强分类器，程序运行方便，高效。

利用 OpenCV 训练 Haar 特征分类器，需要提供所要识别特征的相应正例样本图片和反例样本图片^[4]，正样本主要采集驾驶员处于在不同光线、不同表情、身体倾斜程度不同等情况下对多角度脸部拍摄的照片约 200 张，并统一好尺寸。再使用大约两倍数量的非人脸照片作为负样本，其中负样本中尽量含有正样本部分的背景，以使快速分离出正样本中非目标部分。下一步载入正负样本，持续进行迭代判断，直到构建好所需要的强分类器。

2 人眼定位

2.1 haar 特征

Haar 特征即灰度矩形特征。其计算方法为将灰度化得到图像分为黑白两部分。计算过程采用积分图的方法，积分图仅需遍历一次即可得出特征值，大大提高了计算速度。白色矩形与黑色矩形的积分图之差即为 Haar 特征值。利用 Haar 特征进行人眼判断的特征分类准确度较高，同时有着对样本需求低、训练速度快等优点。常用 haar 特征图如下^[5]

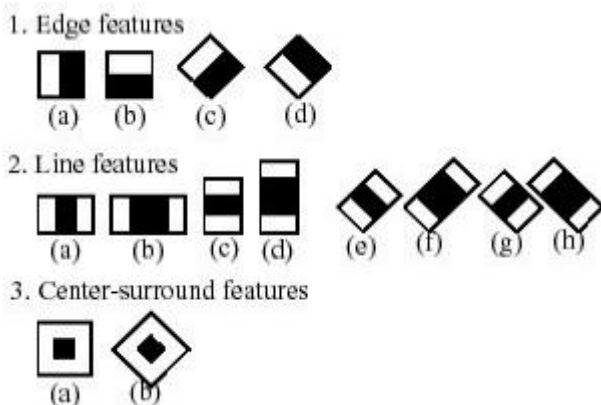


图 1 常用 Haar 特征

Fig.1 Feature prototypes of haar-like.

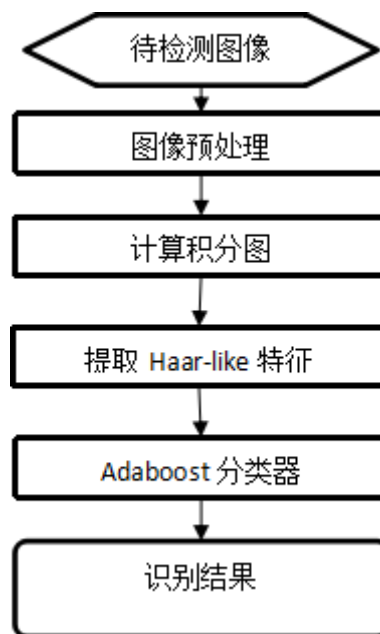


图 2 人眼训练流程图

Fig.2. Human eye training flow chart

2.2 改进 haar-like 特征

人眼检测目前主要有积分投影、灰度模板，基于 Hough 变换和模板匹配四种。眼睛目标较比人脸要小，若直接检测人眼，外界干扰影响比较大。本文的人眼定位采用基于人脸检测基础上进行定位的方法。同时为了便于快速定位，首先先对人脸识别图像取上半部分处理，这样处理后缩小了目标范围，消除了嘴部等在识别过程中产生的干扰。类 Haar 特征是由 Viola 等人在人脸检测系统中引入的一种简单矩形特征^[6]。Lienhart 等人在 Viola 的算法基础上提出了扩展的类 Haar 特征，能够有效地改善系统的识别性，同时不会对识别速度产生大的影响。本文基于人脸的五官分配以及各器官的灰度特征不同，提出如下图五种新型矩形特征^[7,8]来提取人眼特征用于构造人眼分类器分类器，通过 Adaboost 级联成强分类器对人眼进行检测。检测阶段会产生与检测对象同样大小的检测窗口在输入图像上滑动，如果检测过程中发现目标特征满足所设定的扩展矩形特征，可以确定为目标位置。

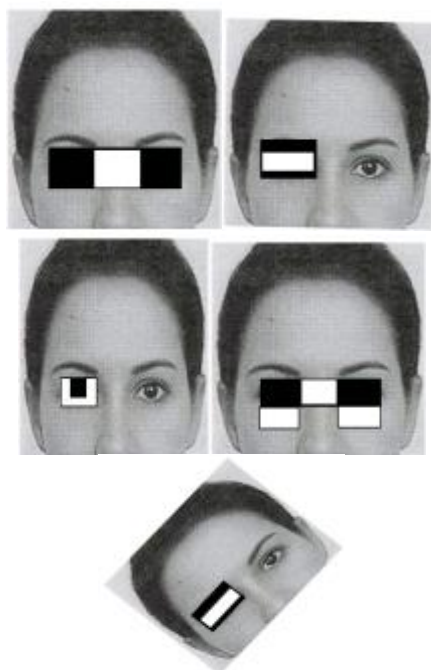


图3 改进 haar-like 特征
Fig.3. Improved haar-like features

2.3 人眼检测结果



图4 强光下定位人脸及人眼结果
Fig.4. positioning human face and eye results with strong light



图5 弱光下定位人脸及人眼结果
Fig.5. positioning human face and eye results with weak light

2.4 识别结果

实验结果表明, 对于在人体姿态偏离镜头幅度不大的情况时本实验方法可以较快的定位到人脸及人眼, 无论在强光还是弱光下准确度都比较高, 有

效地克服了光线干扰因素, 稳定性好。但是在人脑发生大幅度偏转时, 人眼识别容易发生错检。

3 结束语

本文研究的是疲劳驾驶环境中的快速人眼定位, 考虑到驾驶室环境, 该系统应满足不干扰驾驶员操作、矫正光线及其他环境因素^[9]影响等要求。因此本文首先采用 Adaboost 算法构建的分类器对人脸进行定位检测, 并对图像进行相应灰度处理有效地排除了光照等环境因素的干扰, 大大提高了本系统的稳定性与可用性。并通过先定位人脸再定位人眼的方法, 进一步减少了人眼定位所需计算时间, 从而增强本系统的实时性。实验表明, 本实验过程中提出的新型 Haar 特征相比于传统 Haar 特征也具有较高的准确度, 且算法简单具有较高的实用性。但本实验还仍存在一些不足, 比如对于驾驶员的身体发生大幅度偏转时, 不能准确的检测到人脸。同时对于疲劳驾驶检测的研究, 还需要对瞳孔进一步进行精确定位。为此还需要多加改进, 下一步的研究方向是如何进一步精确定位瞳孔并确认疲劳状态。

参考文献

1. 李扬, 曹著明. 基于肤色和 AdaBoost 算法的人脸检测[J].现代计算机: 专业版, 2017 (55): 77-80
2. 董彩超. 基于 Haar-like 特征的表情识别和时效性分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.
3. 张艳梅. 基于人眼跟踪分析的疲劳驾驶检测的研究与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
4. 陈胜勇, 刘盛. 基于 OpenCV 的计算机视觉技术实现 [M]. 北京: 科学出版社, 2008:65-68
5. Viola and Jones, "Rapid object detection using a boosted cascade of simple features", Computer Vision and Pattern Recognition, 2001
6. Lienhart R, Maydt J. An extended set of Haar-like features for rapid object detection [A]. The IEEE International Conference on Image Processing [C]. New York, USA, 2002, 1: 900-903
7. 姚瑶. 基于视觉的疲劳驾驶预警系统[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
8. 龙伶敏. 基于 Adaboost 的人脸检测方法 & 眼睛定位算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
9. Thomas S M, Chan Y T. A simple approach for the estimation of circular arc centre and its radius [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 45(3): 362-370.

基于红外扫描的人体定位风扇*

刘赛坤；曲子恒；毛安来

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 长春 130022)

摘要：电风扇具有操作简便，安全可靠等特点。针对传统电风扇的一些缺点，加入多种传感器进行智能化改造，以 STC89C52 单片机为核心，利用步进电机控制风扇摆动，在风扇摆动的过程中，利用红外传感器在环境中识别人体，根据 DS18B20 采集到的室温自动调节风扇转速，达到智能化效果。

关键词：单片机 控制系统 智能 红外

Human positioning fan based on infrared scanning

Liu Saikun; Qu Ziheng; Mao Anlai

(College of Instrument Science and Electrical Engineering, Jilin University)

Abstract: The electric fan has the characteristics of simple operation, safety and reliability. Aiming at some shortcomings of traditional electric fan, a variety of sensors are added to carry out intelligent transformation. STC89C52 single chip microcomputer is used as the core, and stepper motor is used to control the fan swing. In the process of fan swing, infrared sensor is used to identify human body in the environment, and the fan speed is automatically adjusted according to the room temperature collected by DS18B20. Intelligent effect.

Key words: Singlechip Control system Intelligence Infrared

0 前言

随着科学的发展和人们生活水平的提高，产品趋向于自动化、智能化、环保化、人性化。近年来，空调价格水平不断下降，越来越多的人开始使用空调，对电风扇行业是个不小的冲击，但是空调的强大的功能是以高耗能、封闭空间为代价的^[1]。相比之下，电风扇通风较好且功耗低仍是很大的一个优势，我们所设计的智能定位风扇就是在这样的背景下进行。本设计是对温度进行实时监测，当温度低于设定下限温度时，系统自动关闭风扇转动，当温度上升到下限温度以上时，风扇以较低转速进行转动；当温度高于设定上限温度时，系统启动风扇进行高速旋转。当检测到人体时，会启动风扇摇头功能。

1 系统设计

1.1 系统整体设计

系统整体框图如图 1 所示本系统以 STC89C52 单片机为核心，单片机主要完成对外界环境温度信号的采集、处理、显示等功能。采用 DS18B20 传感器，对外界环境温度进行数据采集，利用长距离 DS18B20 测量人体体表温度，将检测到的温度转化为数字信号，单片机对输入的数字信号进行分析处

理。通过 HC-SR501 人体感应模块将人体信号传输到计算机进行处理^[2]，通过 uln2003 电机驱动模块驱动 24BYJ48 步进电机转动模拟风扇摆动。

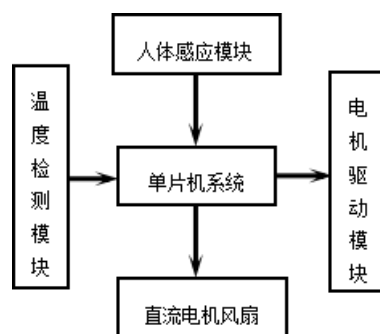


图 1 系统整体框图

Fig. 1. System Block Diagram.

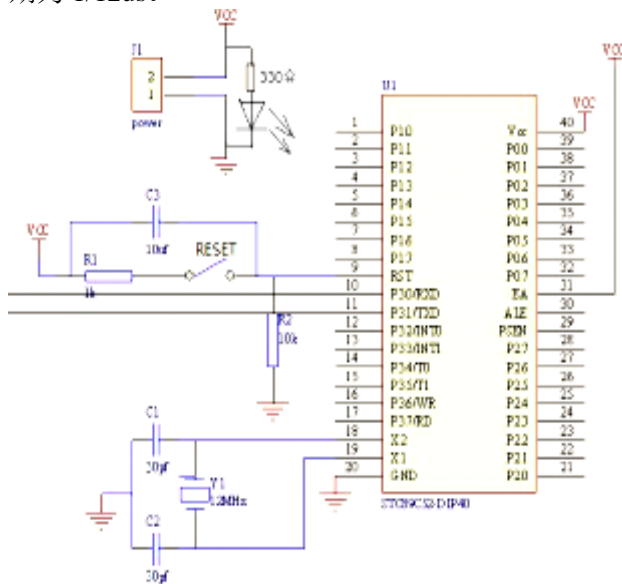
1.2 单片机系统

采用 STC89C52 单片机作为整个系统的核心，单片机最小系统包括单片机、复位电路、时钟电路构成，如图 2^[3]。STC89C52 单片机的工作电压范围：4V-5.5V，所以通常给单片机外界 5V 直流电源。连接方式为单片机中的 40 脚 VCC 接正极 5V，而 20 脚 VSS 接电源地端。复位电路就是确定单片机的工作起始状态，完成单片机的启动过程。单片机接通电源时产生复位信号，完成单片机启动确定单片机起始工作状态。单片机在时钟电路工作以后，在 RESET 端持续给出 2 个机器周期的高电平时就可以完成复位操作^[3]。本设计采用的是外部手动按键复

* 指导老师：杨鸿渊

项目类型：大学生创新训练项目（2017B65625）

位电路,需要接上拉电阻来提高输出高电平的值。时钟电路就是振荡电路,是向单片机提供一个正弦波信号作为基准,决定单片机的执行速度。XTAL1 和 XTAL2 分别为反向放大器的输入和输出,外接石英晶体振荡器的振荡频率为 12MHZ,一个振荡周期为 1/12us。



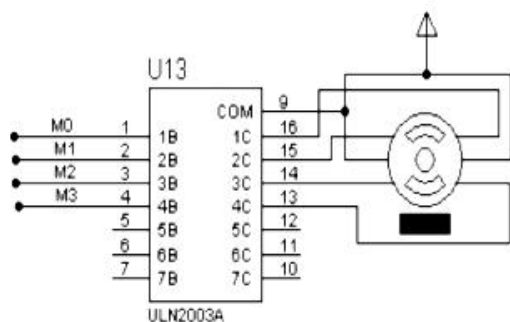


图 5 电机驱动模块 ULN2003
Fig. 5. Motor Drive Module ULN2003

2 软件设计

系统软件设计主要使用 C 语言编程，在 uVision4 uVision4 环境下调试完成。主要包括主控程序模块，步进电机驱动模块程序，直流电机调速模块程序，温度采集模块程序和显示模块程序。

根据 DS18B20 数字温度传感器进行初始化时序、读时序和写时序^[8]分别可编写 3 个子程序：初始化子程序、写子程序、读子程序。

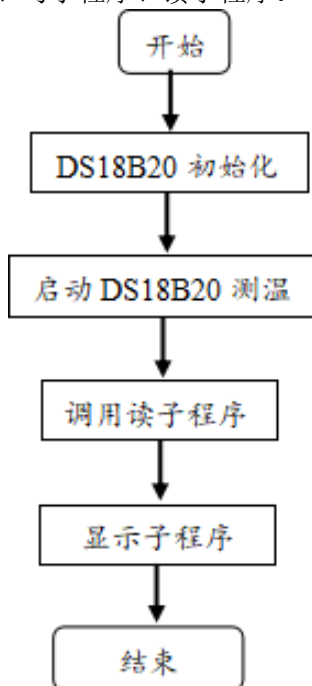


图 6 DS18B20 模块程序流程图
Fig.6. DS18B20 program flow chart.

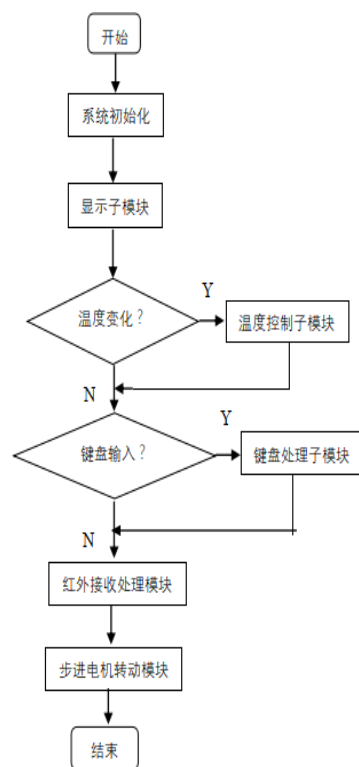


图 7 系统软件流程图
Fig.7. System Software Flow Chart.

3 测试与结论



图 8 系统实物图
Fig.8. System physical diagram.

相关参数	
可识别距离	<0.5m
温度精度	0.1℃
步距角	0.9°

图 9 相关参数

Fig.9. Related parameters.

通过实际测试，步进电机带动风扇与 HC-SR501 旋转，当检测到人体存在时，停止旋转，风扇以人体为中心摇头，摆动角度为 90 度；可根据环境温度自动调节风扇转速，温度值精确到小数点后一位，当温度低于设定下限温度时，系统自动关闭风扇转动，当温度上升到下限温度以上时，风扇以较低转速进行转动；当温度高于设定上限温度时，系统启动风扇进行高速旋转，达到智能化运行效果。

4 总结

本次设计实现了对风扇的智能化控制。对传统电风扇的一些缺点进行智能化改造。以红外传感器在环境中能识别人体为关键点，用 51 单片机为核心，利用步进电机搭载红外传感器并控制风扇摆动，在风扇摆动的过程中，扫描到人体的大致位置，再利用 DS18B20 采集到的室温自动调节风扇转速，达到实时调控效果。

参考文献

1. 蒙建源,胡玲艳. 人体感应智能风扇的模型设计与测试[J]. 电子测试,2017,(01):15+17.
2. 徐志刚, 黄涛.基于单片机的智能风扇 [J] .电子设计工程, 2016, 24 (11): 154-156, 159.
3. 何立民.单片机应用系统设计[M].北京:清华大学出版社.2006.
4. 马云峰, 单片机与数字温度传感器 DS18B20 的接口设计[J].计算机测量控制, 2007,10(4): 278—280.
5. 王苏.直流电机 PWM 调速研究及单片机控制实现[J].机电工程技术,2008(11):82-84+95+110.
6. 李振兴,谭洪,李开成,等.基于热释电红外传感器的人体追踪电机控制的应用[J].电测与仪表,2017,54(10): 108-112.
7. 郑振杰,江衍焱,游德智.单片机结合 ULN2003 驱动步进电机[J].电机技术,2010(06):44-46.
8. 明德刚. DS18B20 在单片机温控系统中的应用[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2006,(01)

公共自行车防护系统设计*

贺小丹; 魏 玮; 张小龙

(吉林大学, 仪器科学与电气工程学院, 长春 130012)

摘要: 近年来, 公共自行车在各大城市已经获得了广泛的应用, 但是实时监控其状态仍是一件困难的事情。因此设计一套具备实时性的公共自行车防护系统具有重要意义。本系统采用 SW-18010P 震动传感器采集震动信号, 由 51 单片机进行数据处理并控制报警模块发出警报。同时采用红外扫描对管实时扫描自行车后轮, 当检测到异物时, 单片机控制串口摄像头开启, 拍摄照片。照片通过 SIM900 模块传输至远程桌面, 利用 LabVIEW 调用 MATLAB 程序对图片进行处理并计算原图与接收到的图片的相似度。当相似度小于预定值时, 系统发出警报。结果表明该系统易于维护、功耗低、电路简易, 具有较好的实时性。

关键词: 震动传感器 红外扫描对管 GPRS 数字图像处理

Design of Public Bicycle Protection System

He Xiaodan; Wei Wei; Zhang Xiaolong

(College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: In recent years, public bicycles have been widely used in major cities, but it is a difficult thing to monitor its status in real time. So it is important to design a system to monitor the status of the public bicycles in real time. After collecting the vibration signal by the SW-18010P vibration sensor, the 51 MCU processes the data and controls the alarm module. At the same time, the infrared scanning tubes scan the rear wheel of the bicycle in real time. If foreign object is detected, the serial port camera will be controlled to take photos and then transfer the photos to a remote desktop through the SIM900 module. After that, the LabVIEW software processes the image data automatically. An alert is issued when the similarity is less than the expected value. The result shows that the system is easy to maintain and has low power consumption with simple circuit and good real-time performance.

Key words: Vibration sensor Infrared scanning tube GPRS Digital image processing

0 前言

随着社会的发展以及人民生活水平的提高, 交通堵塞、雾霾等逐渐成为制约各大城市进一步发展的巨大问题。因此, 公共自行车作为一种清洁环保、方便快捷的交通工具逐渐走进千家万户。公共自行车的广泛使用虽然为居民的出行带来了便利, 但同时也带来了巨大的监管难题, 例如自行车车身破坏、后轮上私锁等等。公共自行车防护系统可以实时监控公共自行车的状态, 当系统检测到公共自行车状态异常时, 可以及时发出警报, 其实时性强、可靠性高、便于工作人员进行维护与管理。本文旨在对公共自行车防护系统的设计, 将红外扫描技术、GPRS 技术与数字图像处理技术相结合, 实现对公共自行车的监管与维护。

1 系统总体设计

系统总体设计包括采集模块、控制模块、图像采集传输模块、数据处理模块、报警指示模块。系统总体框图如图 1 所示。

首先震动传感器采集震动信号, 当检测到公共自行车车身震动时, 控制报警指示模块发出警报。同时, 红外扫描对管实时检测自行车后轮是否有异物, 当初步判断有异物时, 51 单片机控制报警指示模块发出指示信号并向 STM32 单片机发出控制信号启动图像采集传输模块, 最终由数据处理模块处理采集到的图像数据。

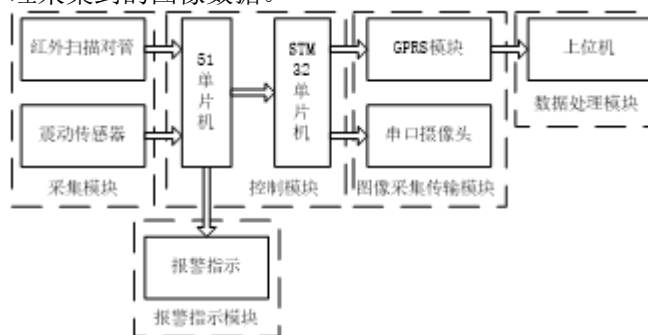


图 1 系统总体框图

Fig.1 System block diagram

2 硬件设计

2.1 震动报警电路

SW-18010P 震动传感器在未检测到震动时输出

* 指导老师: 李春生

项目类型: 大学生创新训练项目 (2017B65628)

端输出高电平,检测到震动时输出端输出低电平。将该传感器的输出端与单片机某一管脚直接相连,通过单片机检测该管脚的状态。当检测到高电平时,指示灯熄灭;当检测到低电平时,指示灯亮起从而达到指示环境中是否有震动发生的目的。

该传感器可用于各种检测震动发生的场合,具有灵敏度高、数字开关量输出、尺寸小等优点。震动报警电路如图 2 所示。

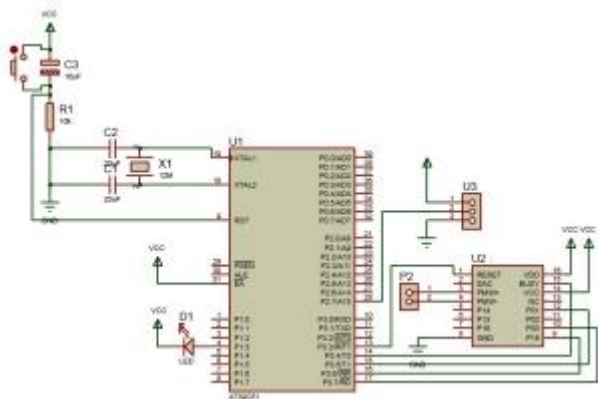


图 2 震动报警电路

Fig.2 Vibration alarm circuit

2.2 红外扫描电路

红外接收管的接收角度为 37° 左右,本系统采用 6 对红外扫描对管进行检测。红外发射管持续发射红外线,当没有异物遮挡时,红外接收管检测到红外信号,OUT 端口输出低电平;当有异物遮挡时,红外接收管未检测到红外信号时,模块上的绿色指示灯点亮,同时 OUT 端口输出高电平^[1]。

该红外扫描对管具有探测范围可调、灵敏高等优点,可应用于小车避障、红外探测等场合^[2]。红外扫描电路如图 3 所示。

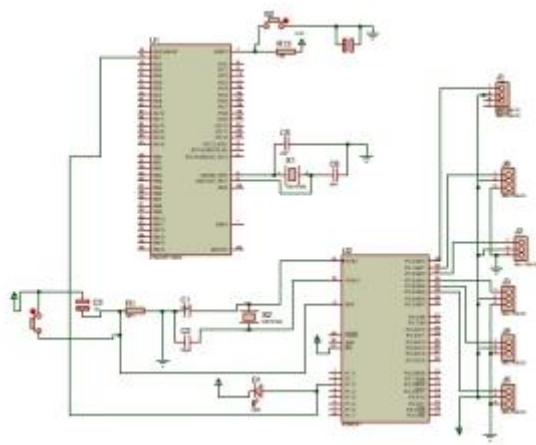


图 3 红外扫描电路

Fig.3 Infrared scanning circuit

2.3 图像采集传输模块

2.3.1 图像采集

OV2640 是 CMOS 类型数字图像传感器。该传感器体积小、工作电压低。输出图像的数据格式支持 YUV(422/420)、YCbCr422、RGB565 以及 JPEG

格式,若直接输出 JPEG 格式的图像可大大减少数据量,方便网络传输。

OV2640 采取逐行读取像素的方法。行输出时序为当 HREF(行同步信号)变高后,在每一个 PCLK 时钟输出一个字节图像数据;帧输出时序为当 HREF 输出高电平时开始读取一行像素点,当 HREF 输出低电平时不操作,重复操作即可读取一帧图像。

读取的数据流以 0XFF,0XD8 开头,以 0XFF,0XD9 结束,将此间数据保存为.jpg 格式^[3]。

2.3.2 图像传输

GPRS 是一种基于 GSM 系统的无线分组交换技术,支持特定的点对点和对多点服务,以“分组”的形式传送数据。该技术具有 56~115Kbps 的传输速度,有 850/900/1800/1900MHz 四个频段,内置 TCP/IP 协议透明传输,可用于长距离通信或控制^[4]。本系统应用 AT 指令作为 GPRS 模块与 STM32 单片机之间的连接与通信指令^[5]。图像采集传输模块电路如图 4 所示。

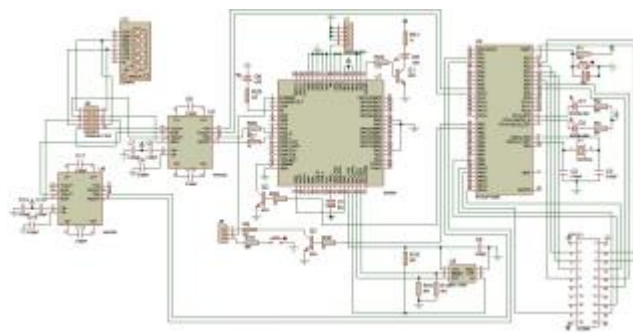


图 4 图像采集传输模块

Fig.4 Image acquisition and transmission module

3 软件设计

3.1 数字图像处理程序

一个指定路径的彩色图片文件在 MATLAB 中的存储方式为一个三维数组,分别存储每个像素点的位置信息及颜色信息^[6]。利用 MATLAB 软件提供的 fspecial 函数得到 sobel 算子模板,然后分别对图片的红色、绿色、蓝色分量进行 x、y 方向的 sobel 算子滤波,得到的值分别记为 Rx、Ry、Gx、Gy、Bx、By^[7]。

定义向量:

$$\mathbf{u} = \frac{\partial R}{\partial x} \mathbf{r} + \frac{\partial G}{\partial x} \mathbf{g} + \frac{\partial B}{\partial x} \mathbf{b} \quad (1)$$

$$\mathbf{v} = \frac{\partial R}{\partial y} \mathbf{r} + \frac{\partial G}{\partial y} \mathbf{g} + \frac{\partial B}{\partial y} \mathbf{b} \quad (2)$$

定义变量:

$$g_{xx} = \mathbf{u} \bullet \mathbf{u} = \left| \frac{\partial R}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial G}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial B}{\partial x} \right|^2 \quad (3)$$

$$gyy = \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} = \left| \frac{\partial R}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial G}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial B}{\partial y} \right|^2 \quad (4)$$

$$gxy = \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = \frac{\partial R}{\partial x} \frac{\partial R}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial x} \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial B}{\partial y} \quad (5)$$

则颜色变化率最大的方向的角度

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2gxy}{(gxx - gyy)} \right] \quad (6)$$

在 θ_1 方向上颜色变化率的值

$$F(\theta_1) = \left\{ \frac{1}{2} [(gxx + gyy) + (gxx - gyy) \cos 2\theta_1 + 2gxy \sin 2\theta_1] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

由于正切函数具有周期性, 因此需要旋转 90° 再次计算得出 θ_2 、 $F(\theta_2)$ 。选取 $F(\theta_1)$ 、 $F(\theta_2)$ 中颜色变化率最大的值, 利用`mat2gray`函数将所有颜色变化率最大的值所组成的矩阵转化为灰度图像, 该灰度图像即为原图像的边缘^[8]。

为了能够判断出两幅图片的差异之处, 将两幅图片的边缘灰度图像对应相减, 灰度相同的像素点相减之后得 0, 显示为黑色, 灰度不同的像素点相减之后为一非零实数, 显示为数字相对应的灰度。若相减之后的结果为一负实数, 在数组中的存储值也为零, 显示黑色。因此将图一减图二得到的灰度图片与图二减图一得到的灰度图片对应相加, 得到的二维数组中所有近似为零的值的个数占图片像素总数的百分比即为两幅图片的相似度。相似度越大表示两幅图中对应位置颜色相似的像素点越多, 即两幅图的差异越小; 相似度越小表示两幅图中对应位置颜色相似的像素点越少, 即两幅图的差异越大。流程图如图 5 所示。

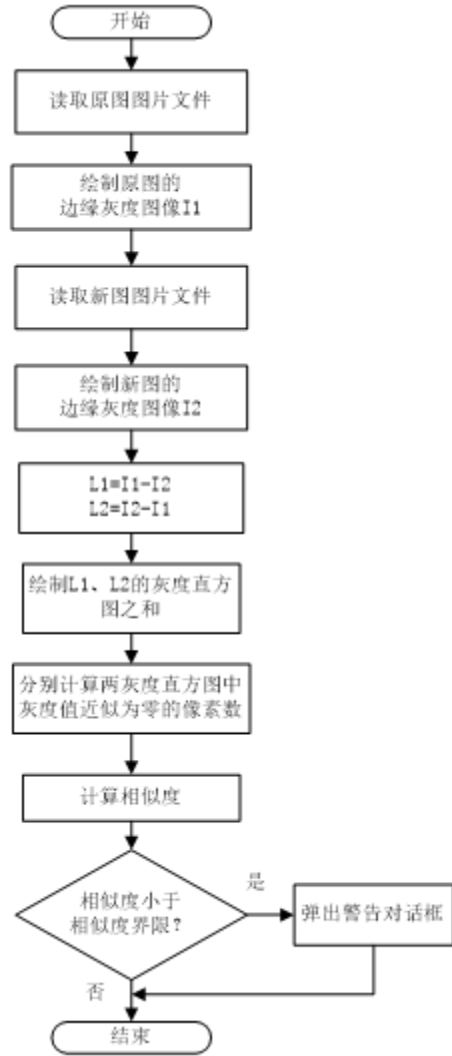


图 5 流程图

Fig.5 Flow chart

3.2 LabVIEW 上位机程序设计

利用 MATLAB Script 节点, 在节点中编辑 MATLAB 程序或者直接调用已经存在的 MATLAB 文件^[9]。该节点对输入、输出数据的类型有明确的要求。为使 LabVIEW 程序中的变量与 MATLAB 程序中的变量相匹配, 程序中存在一系列相应的有关数据类型转换的控件及程序。用该方法实现 LabVIEW 与 MATLAB 的混合编程简单实用, 但依然要依靠 MATLAB 的运行环境。利用 MATLAB 节点可以方便地完成数字图像处理功能, 同时设计友好的人机交互界面, 满足系统功能的要求^[10]。MATLAB 节点程序如图 6 所示。

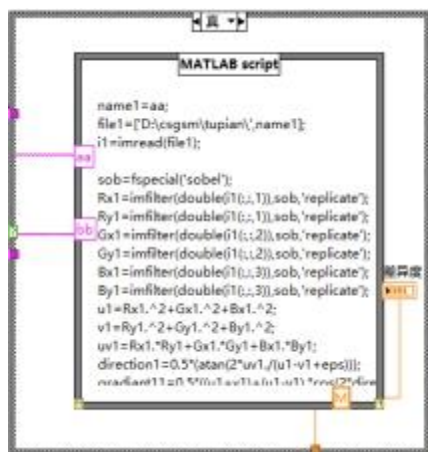


图 6 MATLAB 节点
Fig.6 Matlab script

固定原图的文件名为 01.jpg,以 01 为起始数,在 while 循环结构中利用反馈节点产生随循环次数依次加一的等差数列,这些数字再分别与'.jpg'相连组成文件名。利用“判断文件是否存在”控件判断

MATLAB 所需进行处理的图片文件是否存在,若存在,则执行 labview 调用 MATLAB 程序进行数字图像处理;若不存在,则等待下一张图片传输至上位机。系统界面如图 7 所示,整体程序如图 8 所示。



图 7 系统界面
Fig.7 System interface

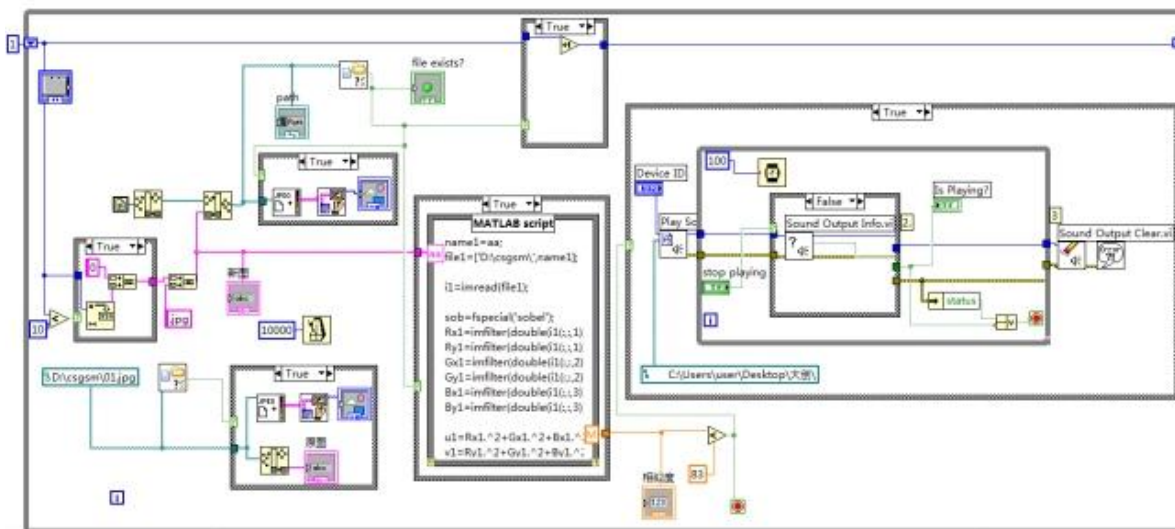


图 8 整体程序
Fig.8 Overall program

4 测试结果

经过不断的调试与改进,本系统最终完成了预期目标。系统上电后,当公共自行车车身发生剧烈震动时系统报警指示灯亮起同时播放警告提示音;当公共自行车车身没有震动发生时系统报警指示灯熄灭,不播放警告提示音。当红外扫描模块初步检测到自行车后轮有异物时,串口摄像头拍摄后轮当前状态的图片并将图像数据通过 GPRS 模块传输至远程桌面^[11]。LabVIEW 调用图片文件通过 MATLAB 算法计算接收到的图片与原图的相似度,当相似度小于预定值时程序发出警报^[12]。

两张未上锁的自行车后轮图片如图 9 所示,其边缘图像差分后的灰度直方图如图 10 所示。

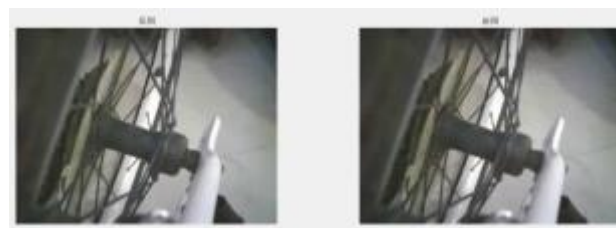


图 9 拍摄的照片
Fig.9 Photos

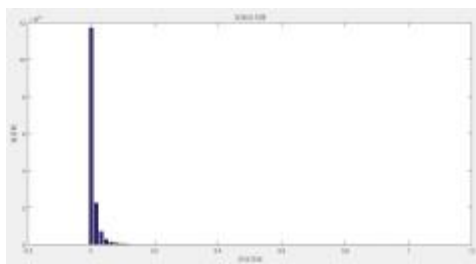


图 10 灰度直方图

Fig.10 Grayscale histogram

一张未上锁的自行车后轮与已上锁的自行车后轮图片如图 11 所示,其边缘图像差分后的灰度直方图如图 12 所示。

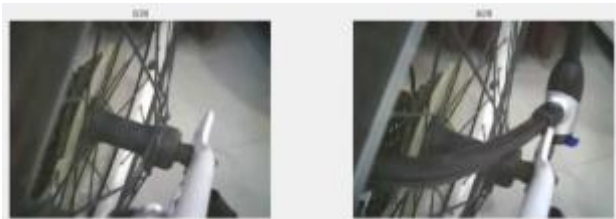


图 11 拍摄的照片

Fig.11 photos

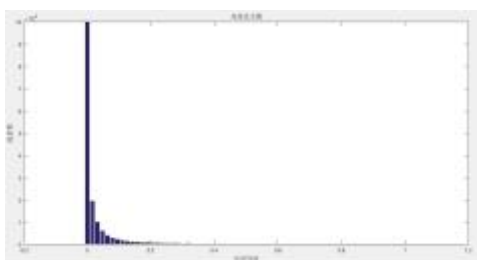


图 12 灰度直方图

Fig.12 Grayscale histogram

经过不断的测试,可得在相同条件下,拍摄的两张都未上锁的自行车后轮图片的相似度为 95.7%,而一张上锁的自行车后轮图片与另一张未上锁的自行车图片相似度为 83.9%。因此,可以设定图片相似度界限为 90.0%,当系统检测到原图与新图的相似度大于 90.0%时,系统不发出警报,否则,发出警报以提醒工作人员。警报现象如图 13 所示。



图 13 警报

Fig.13 Alarm

异物时系统发出警报提示音。

本文设计的公共自行车防护系统能实时监测公共自行车的状态,对于自行车出现的剧烈震动、后轮上私锁的情况,能及时发出警报并将情况发送至管理人员。本系统功耗低、实时性强、方便使用、能减少不必要的人力投入,有效保障社会财产安全、减少公共财产损失,具有很大的实际意义。

参考文献

1. 唐渊,周汝,段武斌,刘臻. 基于单片机控制的红外线与超声波混合避障智能小车[J]. 中国设备工程.2018(12):179-180.
2. 彭美定,邓鹏. 基于单片机的智能红外避障小车设计[J]. 无线互联科技.2017(03):74-76+104.
3. 张昊,陆广胜,郝菁华. 基于串口摄像头图像比对的一种人体传感器设计[J]. 电子技术与软件工程.2014(19):97.
4. 姜其师. 基于 GPRS 的通用无线数据采集控制系统设计与实现[D]. 郑州大学.2012.
5. 崔波亮,王耀南,王磊,陈斯斯. 基于 GPRS 无线传输的图像监控终端实现[J]. 计算机测量与控制.2008,16(12):1865-1867.
6. 刘丽,苏赋,田芳,卢阿娟. 基于 Matlab 的图像感兴趣区域提取[J]. 现代电子技术.2013,36(08):117-120.
7. 韦炜. 常用图像边缘检测方法及其 Matlab 研究[J]. 现代电子技术.2011,34(04):91-94.
8. 涂望明,魏友国,施少敏. MATLAB 在数字图像处理中的应用[J]. 微计算机信息.2007(06):299-300+23.
9. 李宁,张元培,朱立军. 在 LabVIEW 中使用 MATLAB 脚本节点[J]. 仪器仪表标准化与计量.2003(05):17-19.
10. 徐明,于业明. LabVIEW 中 MATLAB 的调用[J]. 山东理工大学学报(自然科学版).2005(04):92-95.
11. 冯胜. 基于 GPRS 的无线图像传输系统的设计与实现[D]. 天津大学.2016.
12. 胡佑兰,彭天好,朱刘英. MATLAB 和 LabVIEW 混合编程及在控制系统中的应用[J]. 机床与液压.2009,37(10):209-212.

5 结语

公共自行车防护系统使用震动传感器采集震动信号,当检测到公共自行车车身震动时,控制报警指示模块发出警报。同时,红外扫描对管实时检测自行车后轮是否有异物,当初步判断有异物时启动图像采集传输模块,最终由数据处理模块处理采集到的图像数据,当计算结果表明自行车后轮上出现

基于磁阻传感器的三分量水面磁测装置*

唐 汇；肖 蕊；张再熠

(吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林长春 130000)

摘要：本文设计了一种基于各向异性磁阻传感器、陀螺仪、高精度ADC、GPS模块、WIFI模块以及STM32 微处理器的三分量水面磁测装置。设计了传感器模块、姿态测量模块、信号采集模块及上位机软件。该磁测装置可通过水面拖拽式工作实现水下铁磁性物质的磁异常检测，具有体积小，功耗低，精度高等优点。

关键词：磁阻传感器；三分量；姿态校正；LabVIEW

Three – component magnetic measurement apparatus on water surface based on magnetoresistive sensor

TANG hui , XIAO rui, ZHANG zai-yi

(College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: Electronic system of water surface three-component magnetometer based on magnetoresistive sensor, gyroscope, high-precision ADC, GPS module, WIFI module, STM32 microprocessor was designed. The sensor module, the attitude measurement module, the signal acquisition module and the software were given. The three-component magnetic measurement apparatus can detect the magnetic anomaly of the underwater ferromagnetic material through the dragging work on the water surface, and has the advantages of small volume, low power consumption and high precision.

Key words: Magnetoresistive sensor; Three-components; Gesture correction; LabVIEW

0引言

磁法勘探是地球物理勘探的一个重要分支，它能够利用地下岩矿石的磁性差异，达到探测地下地质结构，寻找矿产资源和解决水文、工程地质问题和环境监测等问题^[1]。近年来海洋开发和海底环境的探测，越来越受到人们的重视和关注，将磁法勘探应用于水中，可达到搜寻水下废弃军火，定位飞机残骸，寻找水下船只，达到净化水域的目的。

磁场测量大致分为总场测量和矢量测量。随着地质找矿和地质工程问题的要求越来越高，传统单一的总场磁测已不能满足地质勘探要求，矢量测量可获得更丰富的地磁场信息，有效减少反演中的多解性，有助于对磁性体的定量解释，提高地下矿体探测分辨率和定位精度，成为地球物理磁法勘探的主要发展方向之一。

目前，磁测装置主要分为质子旋进式与光泵式两种基本类型，但只能进行总场测量且受磁场梯度影响较大^[2]。而本文设计的三分量水面磁测装置，利用磁阻传感器作为磁探头进行磁场矢量测量，相比于质子旋进式和光泵式磁测装置能够获得丰富的磁场参数，具有体积小，成本低的优点。该装置能够进行无线数据传输，具有效率高，速度快，数据量大的优点。

1系统工作原理

本系统采用各向异性磁阻传感器 HMC1001/1002 组合成三轴磁阻传感器作为磁测装置的磁探头，进行磁场信号检测；利用高精度高灵敏度的 AD7799 进行信号的采集和处理；利用 STM32 作为微处理器对信号进行处理和分析。同时利用陀螺仪 MPU6050 作为姿态测量模块对磁探头行进过程中的偏转角度进行校正，使磁探头保持在正确的方向上连续测量；利用 GPS 模块读取磁探头地理位置；最后利用 WIFI 模块将所有测得数据传输到上位机中，从而完成水下铁磁性物质的三分量磁场强度的测量。通过上位机软件对测量结果进行存储与综合分析。本文设计的三分量水面磁测装置结构框图如图 1 所示。

* 指导老师：赵静

项目类型：大学生创新训练项目（2017A65300）

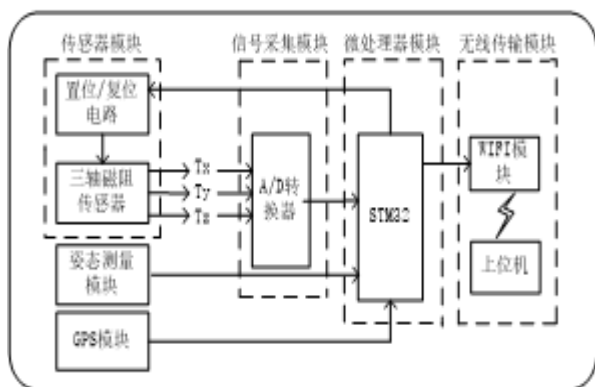


图 1 系统结构框图

Fig. 1. System block diagram

2 硬件电路设计

2.1 传感器模块设计

传感器模块由磁阻传感器以及置位/复位电路构成。HMC1001 与 HMC1002 相互垂直, 构成三轴磁阻传感器, 通过载体对 x, y, z 轴三个方向磁场强度的测量完成对水下铁磁性物质的磁场测量, 其磁场测量范围为 $\pm 2Gs$ 。为使 HMC1001/1002 在 2 高斯的量程内对磁场的灵敏度达到更高的分辨率, 需设计置位复位 (S/R 脉冲) 电路来消除磁畴干扰以便达到高灵敏度和重复读数的要求。传感器探头结构图如图 2 所示。

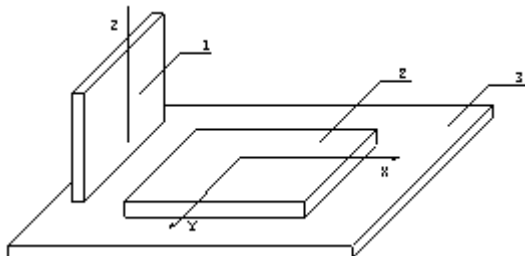


图 2 传感器探头结构图

Fig. 2. Sensor probe structure

图中 1—HMC1001 ; 2—HMC1002 ; 3—载板。

2.2 姿态测量模块设计

本装置的姿态测量模块主要利用 MPU-6050 作为磁探头终端, 记录磁探头在水面移动过程中姿态角的变化, 将此数据传送到微处理器中进行分析以及后续算法处理, 从而完成对三轴姿态的角度测量及姿态校正, 保证磁测装置获得更加准确的磁测数据。姿态测量模块原理电路如图 3 所示。

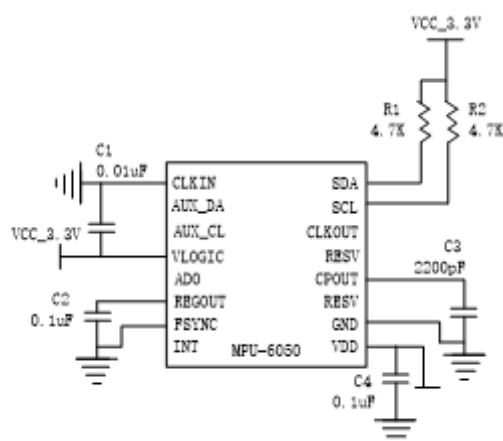


图3 姿态测量模块原理电路图

Fig. 3. Schematic circuit diagram of attitude measurement module

2.3 信号采集模块设计

为保证三分量磁力仪的高精度高灵敏度特性,应选用高精度的AD芯片。本文选用 24 位高精度 $\Sigma-\Delta$ 型AD7799 作为信号采集,其内部集成了低噪声仪表放大器,因此无需将测得信号再次送入放大电路;又由于内部含有的 3 个差分模拟输入,正匹配了HMC1001/1002 的三通道信号输出,可实现数据的同步采集;而其自校准的功能,也可消除零点误差和温度漂移的影响。A/D转换电路图如图3所示。

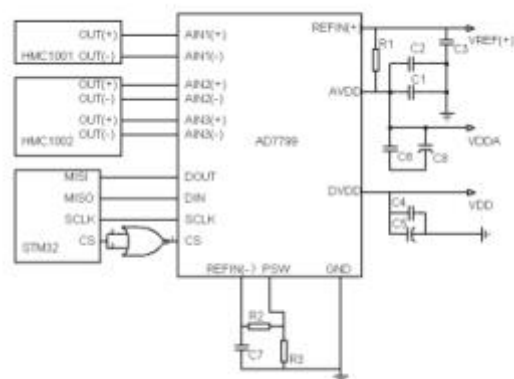


图 4 A/D转换电路图

Fig. 4.A / D conversion circuit diagram

三轴磁阻传感器与AD模拟电源采用+3.3V电源供电，外部参考电源V_{ref}经过两个精密电阻分压，构成比例采样电路；为降低数字部分对模拟部分的干扰，AD的数字电源可以采用+5V供电。

2.4 姿态校正算法设计

由于拖拽式水面磁探头在水面上行进时会出现因水流、风向改变造成的偏转,为保证磁场测量的准确性,必须要及时进行姿态测量与姿态校正。常见的姿态解算主要方法有:欧拉法、方向余弦法以及四元数法。而四元数法相比于另外两种方法更加适用于三轴输入情况,且其计算精度高、实时性较好、理论完善,故本装置采用四元数法进行姿态测量与

校正^[3]。

本系统采用基于四元数的姿态解算得到载体的姿态角, 四元数基本思路为: 一个坐标系统绕坐标轴的多次旋转可以等效为绕某一转轴旋转一定的角度。可以用一个四元数 q 来表示转轴的方向和转角的大小为

$$q = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k \quad (1)$$

(1) 四元数的初始化

载体的初始角度可以由高精度的指南针计算出来, 得到载体相对地理坐标系的初始姿态角度俯仰角 θ_0 和偏航角 ψ_0 翻滚角 γ_0 。

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\psi_0}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \cos \frac{\gamma_0}{2} + \sin \frac{\psi_0}{2} \sin \frac{\theta_0}{2} \sin \frac{\gamma_0}{2} \\ \cos \frac{\psi_0}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \sin \frac{\gamma_0}{2} - \sin \frac{\psi_0}{2} \sin \frac{\theta_0}{2} \cos \frac{\gamma_0}{2} \\ \cos \frac{\psi_0}{2} \sin \frac{\theta_0}{2} \cos \frac{\gamma_0}{2} + \sin \frac{\psi_0}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \sin \frac{\gamma_0}{2} \\ \sin \frac{\psi_0}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \cos \frac{\gamma_0}{2} - \cos \frac{\psi_0}{2} \sin \frac{\theta_0}{2} \sin \frac{\gamma_0}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2) 四元数更新

对四元数更新的本质就是求解四元数微分方程

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{1}{2} Q(t) \omega(t) \quad (3)$$

其中 $\omega = 0 + \omega_x \vec{i} + \omega_y \vec{j} + \omega_z \vec{k}$, ω_x 、 ω_y 、 ω_z 为 MPU6050 输出的原始三轴角速度数据。将上式写成矩阵形式, 可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

四元数的微分方程解法有很多, 比如龙哥库塔算法、牛顿法、毕卡算法等^[4]。根据单片机精度要求, 采用二阶龙格库塔法精度较高且计算量较小。

$$\begin{cases} K_1 = \frac{1}{2} \omega(t) q(t) \\ K_2 = \frac{1}{2} \omega(t + \Delta t) [q(t) + \Delta t \cdot K_1] \\ q(t + \Delta t) = q(t) + \frac{\Delta t (K_1 + K_2)}{2} \end{cases} \quad (5)$$

(3) 将二阶龙格库塔方程代入求解四元数微分方程为:

$$\begin{bmatrix} q_0(t + \Delta t) \\ q_1(t + \Delta t) \\ q_2(t + \Delta t) \\ q_3(t + \Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{\omega_x}{2} \Delta t & -\frac{\omega_y}{2} \Delta t & -\frac{\omega_z}{2} \Delta t \\ \frac{\omega_x}{2} \Delta t & 1 & \frac{\omega_z}{2} \Delta t & -\frac{\omega_y}{2} \Delta t \\ \frac{\omega_y}{2} \Delta t & -\frac{\omega_z}{2} \Delta t & 1 & \frac{\omega_x}{2} \Delta t \\ \frac{\omega_z}{2} \Delta t & \frac{\omega_y}{2} \Delta t & -\frac{\omega_x}{2} \Delta t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

再对微分方程归一化处理:

$$q_i = \frac{\hat{q}_i}{\sqrt{\hat{q}_0^2 + \hat{q}_1^2 + \hat{q}_2^2 + \hat{q}_3^2}} \quad (7)$$

其中 $\hat{q}_0 \hat{q}_1 \hat{q}_2 \hat{q}_3$ 为更新后的四元数。

(4) 四元数与欧拉角的转化

由公式 1 求反函数可以得到俯仰角 θ 和偏航角 ψ 翻滚角 γ :

$$\begin{cases} \theta = -\arcsin(2(p_1 p_3 - p_0 p_2)) \\ \psi = \arctan\left(\frac{2(p_1 p_2 - p_0 p_3)}{p_0^2 + p_1^2 - p_2^2 - p_3^2}\right) \\ \gamma = \arctan\left(\frac{2(p_2 p_3 - p_0 p_1)}{p_0^2 + p_3^2 - p_1^2 - p_2^2}\right) \end{cases} \quad (8)$$

校正矩阵 C: 俯仰角 θ 和偏航角 ψ 翻滚角 γ

$$C = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 & T_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta \\ \cos \psi \sin \theta \sin \gamma - \sin \psi \cos \gamma \\ \cos \psi \sin \theta \cos \gamma + \sin \psi \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \sin \psi \cos \theta \\ \sin \psi \sin \theta \sin \gamma + \cos \psi \cos \gamma \\ \sin \psi \sin \theta \cos \gamma - \cos \psi \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} -\cos \theta \\ \cos \theta \sin \gamma \\ \cos \theta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (12)$$

3 软件设计

3.1 微控制器软件设计

本装置下位机部分采用 STM32 作为磁测装置的微处理器, 具有高性能, 实时性强, 低功耗, 便于低电压操作等优点, 同时还易于开发。微处理器模块与其他各个模块协同工作紧密联系。例如, 姿态测量模块将磁探头在水面翻滚的实时数据的各姿态参数: 翻滚角 α 、俯仰角 β 、方位角 γ , 以及各轴的加速度和角速度测得值, 通过四元数的姿态解算法, 将探头姿态角送入单片机。信号采集模块将磁探头测得的磁场模拟量转换成数字量送给微处理器模块, 同时微处理器模块将载体坐标系的磁场三分量通过三维旋转坐标变换, 变换到地理坐标系,

通过无线传输模块的传输进行远程显示^[5]。同样的，GPS 模块得到的实时准确定位，也可由无线传输模块到手机端或电脑端，进行数据的深入分析与处理。下位机软件流程图如图 5 所示。

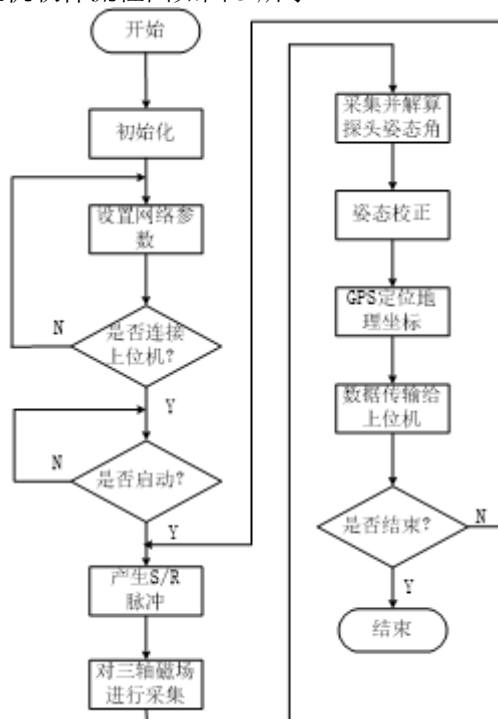


图 5 微控制器软件流程图

Fig. 5. Microcontroller Software Flow Chart

3.2 上位机软件设计

磁测装置的上位机软件采用 LabVIEW 编程实现。软件具有与 WIFI 的连接与启动、网口参数设置、磁测装置的地理位置、姿态角显示、磁场强度波形显示以及数据的存储等功能。

基于磁阻传感器的三分量水面磁测装置的控制界面主要由控制区和显示区组成。控制区主要包括系统的操作按键和网口参数设置，显示区显示的内容包括磁场强度的实时测量值及连续记录波形图、姿态角以及磁测装置的地理位置等。LabVIEW 上位机界面如图 6 所示。

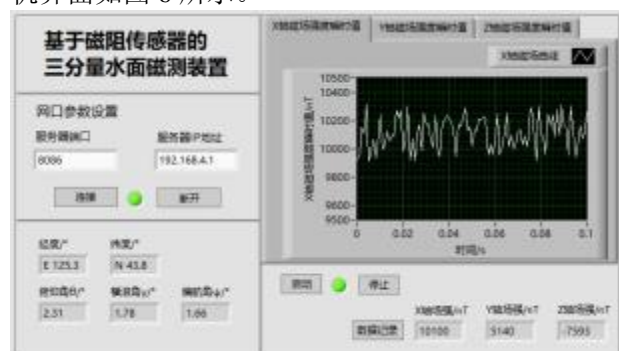


图 6 LabVIEW 控制界面

Fig.6. LabVIEW Control Interface

其中，LabVIEW 上位机界面中 x 轴磁场强度指

的是磁测装置正北方向磁场强度的测得值；y 轴磁场强度指的是磁测装置正东方向磁场强度的测得值；z 轴磁场强度指的是磁测装置正下方向磁场强度的测得值。

4 实验结果

4.1 测试结果及分析

系统参数测试实验在实验室环境下测试，温度为 25.10℃。使用 1m 长的信号屏蔽线进行磁探头与微处理器的连接，以减少空间磁场信号的干扰。实测磁测系统性能指标数据如表 1 所示。

表 1 系统参数测试

TABLE I SYSTEM PARAMETER TEST		
性能参数	典型值	单位
灵敏度	20	nT
线性度	2.3	%FS
线性测量范围	-200000—+200000	nT
工作温度	-35—+85	℃
工作功耗	0.6	W

4.2 野外试验

基于磁阻传感器的三分量水面磁测装置主要依靠水面拖拽测量来检测水下铁磁性物质的磁场分布情况。下面在消除固定磁场的情况下进行实验，测量确定铁磁性物质的三分量磁异常值。

在磁屏蔽的实验室内，取 100cm×100cm×100cm 的正方体水槽，注水至水面高度达到 80cm。取直径为 3.2cm，高 0.6cm 的圆柱体磁铁放在水槽中，进行实验测量。磁测试验测量示意图如图 7、图 8 所示。

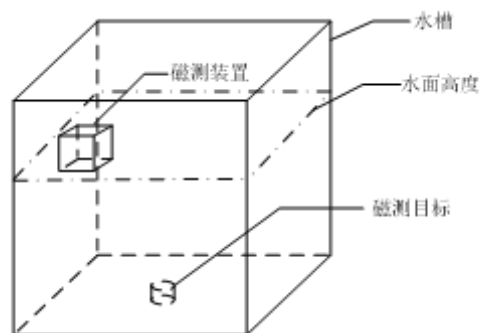


图 7 磁测实验立体示意图

Fig.7. a three-dimensional schematic diagram of the magnetic test

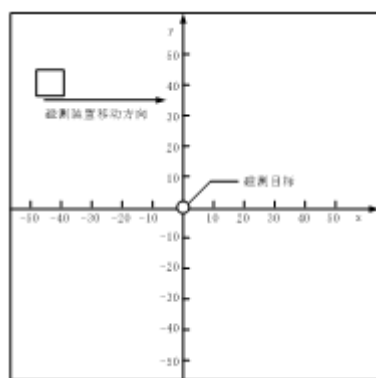


图 8 磁测实验示意图

Fig.8. Schematic diagram of magnetic test

实验中从水槽中央正对的边沿处开始以 5cm 为移动单位进行平行移动, 直至移动到另一边沿, 共测得 20 组数据, 经过多次重复测量后利用 matlab 处理数据, 以测量距离和三分量磁异常值分别作为横纵坐标, 并绘制磁场分布图如图 9 所示。

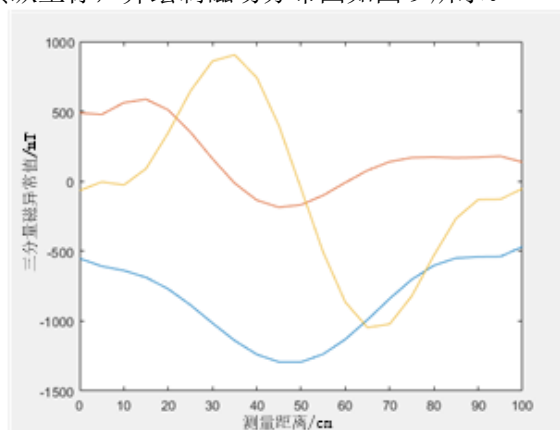


图 9 磁场分布图

Fig.9. Magnetic field distribution map

在 MFC 框架下, 进行三维成像绘制, 得到数据与图 9 数据相吻合, 说明本磁测装置可提供有效正常的磁异常数据。

5 结论

本文设计了一个基于磁阻传感器的三分量水面磁测装置, 通过水面拖拽式测量实现地理坐标系下的三分量磁场数据采集, 磁测范围可达 $\pm 2\text{Gs}$; 采用了无线传输模块, 将移动测量的磁场实时值记录并传输, 连续工作时间可达 24h; 利用 S/R 脉冲电路提高了工作精度, 磁测灵敏度优于 20nT。另外该磁测装置体积较小, 极具便携性, 能够方便可靠的进行水面磁测工作。

该装置能够实现对水下铁磁性物质的磁场检测, 并能将实验数据远程传输到手机端或电脑端。这对水下磁性物质的探测以及水下磁场分布情况的检测

也具有重要意义。

参考文献

1. 黄孔耀, 章雪挺, 周巧娣, 唐勇. 近海底三分量磁力仪的电子系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2009(07):26-29.
2. 武修文, 张松勇, 薛圻蒙. 基于磁通门与加速度传感器的三分量磁力仪研究[J]. 现代电子技术, 2013, 36(22):96-98.
3. 张荣辉, 贾宏光, 陈涛, 张跃. 基于四元数法的捷联式惯性导航系统的姿态解算[J]. 光学精密工程, 2008(10):1963-1970.
4. 张梦影, 曾成, 狄素素, 王云瑞. 多传感器滤波融合的惯性定位算法[J]. 电子技术应用, 2017, 43(10):86-88+98.
5. 吴登云. 磁阻三分量磁力仪的研制[D]. 吉林大学, 2009.

基于蓝牙技术的无导联线动态心电图仪设计*

周路佳; 段荣宙; 董唯昊

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 长春 130026)

摘要: 为满足亚健康人群在居家情况下实时方便的监测心电情况, 本文将传统方式下电极贴与心电图机间的导联线去除, 由心电采集集成芯片 ads1191 采集两路心电信号 (RA 和 LA), 通过 SPI 方式传输至 MSP430F2132, 经蓝牙模块配对后将信号传至上位机, 实现心电信号的采集与分析处理。通过低通滤波滤除工频干扰、通过二阶差分方法实现对心电波形中 R 波位置的监测, 从而求得所需心率值。在实现心电仪基本功能的前提下, 避免了导联线对采集结果的干扰, 保证数据的准确传输。所选芯片体积小、功耗低, 在 1000mAh 的电池供电下, 系统可连续工作 48h, 可保证佩戴者在 3-4m 范围内正常的数据传输, 满足日常佩戴的需要。

关键词: 医疗卫生器械; 动态心电图仪; SPI; 蓝牙; 二阶差分; 无导联线

Research on bluetooth-based unwired dynamic electrocardiograph

Zhou Lujia; Duan Rongzhou; Dong Weihao

(College of Instrument science and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: In order to monitor Ecg signal of sub-healthy people in a real-time way, the research used the integrated chip of ads1191 to collect two heart signals (RA and LA), which was transmitted to the MSP430F2132 via SPI and then to the computer by bluetooth technology. The required heart rate was obtained by using low-pass filter to eliminate interference signal, and using the second order difference method to monitor the position of R wave in the ecg waveform. Instead of using lead wire between Electrode patch and electrocardiograph, this research avoids interference caused by it effectively, and meets the needs of daily wear for its smaller size and lower power. Under the battery power supply of 1000mAh, the system can work continuously for 48h, ensuring the wearer's normal data transmission within the range of 3-4m.

Key words: medical equipment; dynamic electrocardiograph; SPI; bluetooth technology; second-order difference; no lead wire

0 前言

由于患心脏病的人群大幅度增加, 而心脏病难以治愈且具有突发性的特点^[1], 因此, 对心电信号的长期监测具有重要的临床价值。动态心电图仪是一种可长时间随身佩戴、记录心电数据以作为临床诊断依据的仪器。然而传统的心电监测设备体积大、价格昂贵^[2], 病人需与监测设备之间连接多根导联线才能获取所需的心电信号。导联线的存在会让病人行动不便, 特别是居家情况下。另外, 由于行动造成导联线扯动, 还会导致电极贴的松动或脱落, 从而产生一定干扰或使心电信号记录中断, 影响采集到的信号质量^[3]。

为改善传统动态心电图仪存在的一些问题, 本文提供了一种无导联线、基于蓝牙技术传输心电信号的动态心电图仪的设计方案, 即用无线传输方式实现心电信号的发送与接收, 代替传统的导联线, 避免了由于传统导联线的扯动引起的上述诸多问题, 且做到了充分为患者考虑, 使患者在正常的工作生活中就能随时随地监测心电情况。

1 系统整体结构设计

基于蓝牙技术的无导联线动态心电图仪具备以下几个模块: 电极贴连接模块、心电采集模块、主控单元模块、无线传输模块和电源管理模块。整个仪器结构如图 1 所示。由心电采集专用芯片 ADS1191 采集两路心电信号 (RA 和 LA), 该芯片通过 SPI 传输方式与微控制器相连, 经过微控制器 MSP430 的分析处理, 将心电信号通过蓝牙模块发送给数据接收端 (如电脑), 进行心电信号的存储分析判断 (如心率的读取与报警、R 波位置判断)。

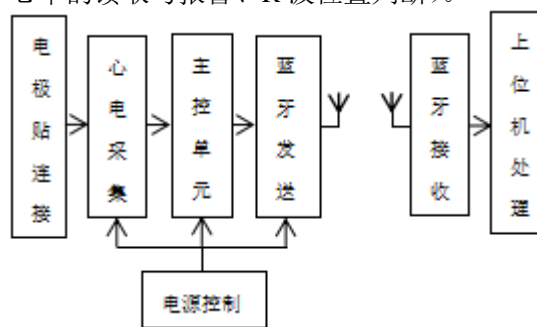


图 1 系统整体结构框图

Fig.1 block diagram of the whole system structure

注: RA: 胸骨右缘第四肋间; LA: 胸骨左缘第四肋间^[4]

* 指导老师: 凌振宝

项目类型: 大学生创新训练项目 (2017A65303)

2 硬件电路设计

2.1 电极贴连接模块

选用通用 AgCl 心电电极片，直径 55mm。

2.2 心电采集模块

心电采集电路一般包括前置放大电路、滤波电路、主放大电路、电平升压电路以及 AD 转换电路。其中，前置放大电路实现信号的差分放大，滤波电路去除基线漂移、工频干扰等噪声，主放大电路以及电平提升电路则用来进一步放大信号^[5]。但考虑到系统的便携性要求，故选用心电采集专用高集成度芯片 ADS1191。

ADS1191 为每个通道提供了高度灵活的输入多路复用器，可以独立与内部生成的信号连接来进行测试。其面积约为 5mm*5mm，每通道功率低至 335uW，包含了便携式、低功率医疗心电图，运动和健身应用所需的所有功能，如高增益、高输入阻抗、高共模抑制比、低噪声、低漂移。

2.3 主控单元模块

对于动态心电仪这类可穿戴式心电设备而言，功耗和体积是芯片选择最需要考虑的两个方面^[6]。因 MSP430F2132 共有 28 个引脚，在同系列单片机中体积更小，符合设计产品便携性的要求，故选择此型号单片机作为主控单元。其与 ADS1191 的连线图如图 2 所示。

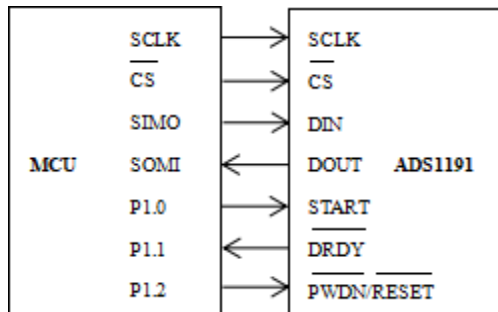


图 2 主控模块与 ADS1191 连接示意图

Fig.2 schematic diagram of connection between main control module and ADS1191

MSP430F2132 与 ADS1191 之间以 SPI 方式通信，选取 P3.1、P3、2、P3、3 作为 SPI 通信接口（由于只针对 ADS1191，片选信号可不接），由单片机的 P1.0 置 START 引脚为高电平，启动转换；由 P1.1 读取 DRDY 引脚，其变为低电平表示数据转换已完成并正在等待读取。PWDN/RESET 为芯片复位/休眠引脚。

2.4 蓝牙发送模块

蓝牙技术是一种支持短距离通信的低成本无线传输应用技术^[7]。选用带有低功耗模式的 PW-01 蓝牙模块，其与 MSP430 的连接线路如图 3 所示。MSP430F2132 的 P3.4 与 P3.5 和蓝牙模块对应的接收、发送端口相连接。

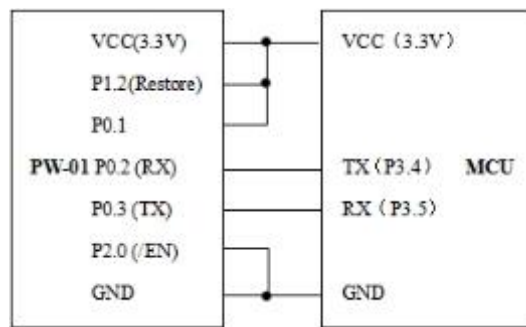


图 3 蓝牙模块与主控单元模块连接示意图

Fig.3 schematic diagram of connection between bluetooth module and master control module

将 PW-01 的 P1.2 与 VCC 相连，使能蓝牙模块工作；将 PW-01 的 P2.0 与 GND 相连，使蓝牙模块正常工作（而不是处于低功耗模式下）。

2.5 蓝牙接收模块

将 PW-01 蓝牙模块与 USB To TTL 模块相连接，使接收到的数据传送至上位机。

2.6 电源控制模块

基于以下优点，选用锂电池供电：

- (1) 比能量高：具有高储存能量密度，即单位体积内储存电能多。在所需相同电能的情况下，所需电池体积小，适用于可穿戴式便携设备。
- (2) 使用寿命长：性能衰减更缓慢。
- (3) 具有良好的安全性能，对工作环境要求比较低^[8]。

3 系统软件设计

3.1 系统软件流程图

系统上电后对心电采集芯片 ADS1191、SPI、蓝牙进行初始化操作，随后由 MSP430F2132 发送指令使 ADS1191 开始采集，ADS1191 将数据进行放大、滤波等处理，经 SPI 通信方式传输至单片机，采集回来的心电信号再次经过 MSP430F2132 处理，由串口发出，在保证蓝牙连接成功的前提下将数据发送至上位机进行信号的处理与波形的绘制。为实现整个系统的低功耗性，心电数据的发送和接收都由中断触发。系统软件流程图如图 4 所示。

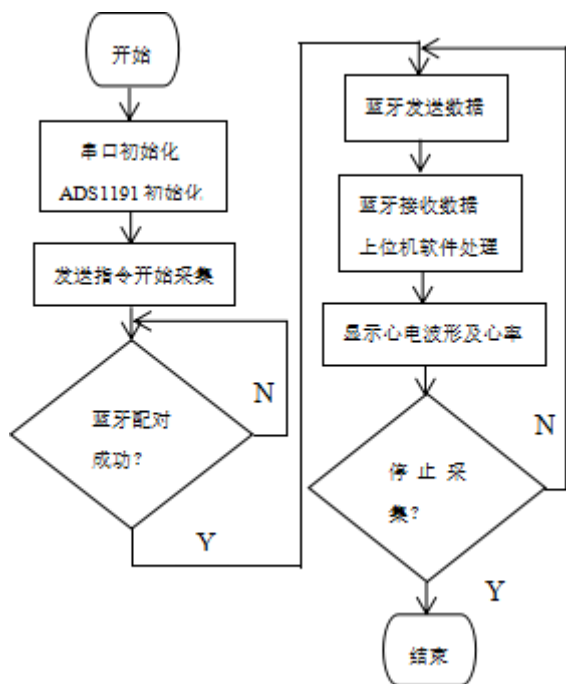


图4 系统软件流程图
Fig.4 system software diagram

3.2 ADS1191 流程图

依据 ADS1191 官方芯片手册对其进行初始化操作。ADS1191 初始化流程图如图 6 所示。此处选用内部时钟。ADS1191 有两种读取方式：①RDATA（连续读取）：运行该模式时，寄存器只需设置一次，不需后续重新配置。该模式将转换数据放入输出寄存器，可以直接移出；②RDATA：转换周期之间需更改或读取寄存器值。由于需要连续地对心电信号进行采集，以此来观察心电信号的特征，故采取连续读取模式。

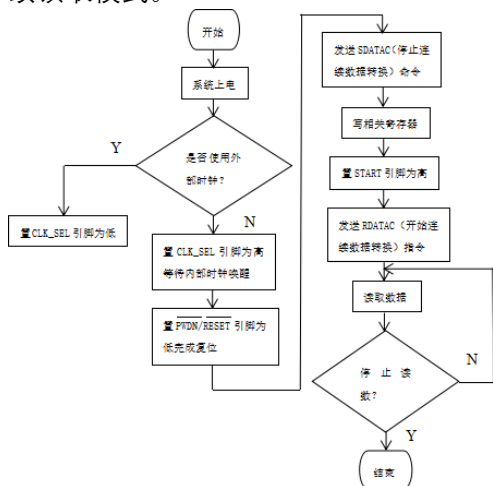


图5 ADS1191 初始化流程图
Fig.5 initial flow chart of ADS1191

注：由芯片手册知，上述指令发送后，需经过一定的时钟周期才能生效，因此在指令之间需要增加延时。

4 心电信号处理设计

LabVIEW 是一个图形化的以测试测量为主要应用的软件开发平台，它为工程研究提供了使用简单方便，界面友好的开发环境^[9]。

LabVIEW 的开发软件工具需要三个部分，分别是程序前面板、框图程序和图标/连接端口。程序前面板的作用等同于真实仪表的前面板，并且可以在程序前面板上制定数值和显示输出的数据，同时控制和显示的图标能在前面板上出现；框图程序由节点和数据连线构成，相当于传统程序中的源代码；图标/连接端口等同于传统编程语言中子程序的参数。

4.1 滤除工频干扰

通过对心电信号的频谱分析可得心电信号在各波形处的频率成分：QRS 波形在 3-40HZ 这一频带，P 波和 T 波处于 0.5-10HZ^[10]。由于本系统为实现便携性，未考虑右腿驱动的连接，只需准确的检测出所需的 R 波个数等信息计算出心率即可，故可不考虑基线漂移的影响，仅需要考虑主要的干扰项：工频干扰。

工频干扰是由于测量环境周围存在电磁辐射产生的，电磁辐射干扰以 50HZ 工频为主要成分。综上所述，选用截止频率为 45HZ 左右的低通滤波器来滤除工频干扰。

4.2 检测 R 波位置

在整个心电图中，R 波是最为明显且最容易识别的，而动态心电图的基本功能——心率的检测，正是依据 R 波的个数得到的，因此，检测 R 波的位置至关重要。

对 R 波位置的检测，采用的主要方法有差分阈值法、小波变换法和神经网络等^[11]。其中，差分阈值法凭借计算速度快且容易实现的优点受到广泛应用。基本思路为，心电信号 R 波最高点的位置对应着二阶差分极小值点的位置，通过计算得出一段时间内二阶差分的极小值点，并根据这些极小值点确定 R 波的搜索区间，在此区间内搜索到的信号幅值极大值就是 R 波所在位置^[12]。将 R 波的每个位置组合成一个数组，从而得到一段时间内 R 波的个数。

4.3 心率计算

心率（每分钟心脏跳动次数）主要是通过检测到的 R 波个数和进行检测所用的时间经过计算得出。并且根据正常人的心率快慢给出了心率过快或者缓慢的限制，给予提示。

5 实验结果及分析

本系统采用 LabVIEW 作为上位机，其前面板如图 6 所示，可正常显示采集回的心电波形及心率，且当心率不在正常范围内时，具有报警功能。

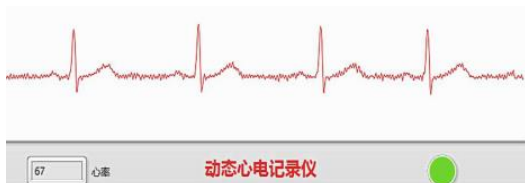


图 6 上位机界面

Fig.6 upper computer software

为了更清晰地对比两者差异,得出结论,现用本系统和迈瑞 iMEC 10 病人心电监护仪对两名测试者(A、B)在不同时间段(早、中、晚)进行心率测试,其结果如表 1、表 2 所示。

表 1 A 测试者心率测试情况对比

Table 1 Heart rate test comparison of A tester

测试者	测试时间	测试仪器	心率	误差
A	早晨	仪器 1	72	1.36%
		仪器 2	73	
	中午	仪器 1	75	0
		仪器 2	75	
	晚上	仪器 1	74	1.33%
		仪器 2	75	

表 2 B 测试者心率测试情况对比

Table 2 Heart rate test comparison of B tester

测试者	测试时间	测试仪器	心率	误差
B	早晨	仪器 1	78	2.50%
		仪器 2	80	
	中午	仪器 1	85	1.16%
		仪器 2	86	
	晚上	仪器 1	82	1.20%
		仪器 2	83	

注:仪器 1 表示本系统,仪器 2 表示迈瑞 iMEC 10 病人心电监护。

由表 1、表 2 并结合人体生理情况可得,早上刚起来时的心率最低,中午正常,晚上大脑开始处于休息状态,心率也会降低。本设计系统可完成正常的心率计算,与迈瑞 iMEC 10 病人心电监护仪的误差不超过 2.50%。

经测试,在 3.3V 供电模式下,蓝牙连接时,用毫安表测得透传电流为 12.41mA,ADS1191 和 MSP430F2132 的电流为 8.35mA,共计 20.76mA,采用容量为 1000mAh 的电池对系统进行供电,可保证 2 天内不间断工作。采用蓝牙 4.0 通讯协议,可使传输距离在 3-4m 内无数据丢失,保证在家庭活动范围内,随时随地进行心电监测。

6 结论

本设计从用户佩戴体验出发,着眼于整个系统的低功耗、便携性。通过选用低功耗芯片 MSP430F2132 和 PW-01 蓝牙模块的低功耗模式来实现系统低功耗;通过选用小体积功能模块、以 RA 和 LA 作为心电采集芯片 ADS1191 的两路输入来实现系统便携性;上位机软件实现了心电波形的绘制

和心率的显示,并增加了心率异常报警功能。

整个系统以精简的结构实现了心电仪的基本功能,在 1000mAh 的电池供电下,系统可连续工作 48h,可保证佩戴者在 3-4m 范围内正常的数据传输,满足日常佩戴的需要。但由于焊接工艺及滤波方面的原因,使采集回来的心电波形仍带有少量毛刺,且心率计算存在少量偏差,有待进一步优化改进。

参考文献

1. 陈伟伟,高润霖,刘力生,朱曼璐,王文,王拥军,吴兆苏,李惠君,顾东风,杨跃进,郑哲,蒋立新,胡盛寿.《中国心血管病报告 2017》概要[J].中国循环杂志,2018,33(1): 1-8.
2. 宋含.心电 Holter 系统的无线数据传输设计 [D].长沙:中南大学信息物理工程学院,2009.
3. 凌振宝,李姝妍,张铭,李东时.基于 ZigBee 技术的无导线动态心电监测仪设计[J].电子技术应用,2015,41(08): 66-69.
4. 李淑园,吴水才,宾光宇,宾光宏,蔡宝龙.可穿戴式无线低功耗心电记录仪的设计与实现 [J].中国医疗设备,2015,30(03): 21-23,30.
5. 李淑园.可穿戴式智能心电设备的研究[D].北京:北京工业大学生命科学与生物工程学院,2015.
6. 徐步威.基于 Android 系统的心电采集显示系统设计[D].成都:电子科技大学电子工程学院,2013.
7. 彭保基.基于蓝牙及 Android 的便携式心电仪的设计与实现[D].长春:吉林大学通信工程学院,2014.
8. 江浙敏.锂电池的发展趋势及发展方向预测[J].科技尚品,2016,88(01): 7-7.
9. 苏娜.虚拟仪器 LabVIEW 的发展与应用[J].计算机光盘软件与应用,2013,16(23): 131-132.
10. 彭飞武,熊平,蔡晓珠,刘建庭,傅伟.论心电信号检测中的噪声与干扰及其消除方法[J].医疗卫生装备,2007,28(09): 72-74.
11. 黄越.一种便携式动态心电监测系统的研究与开发[D].长春:吉林大学仪器科学与电气工程学院,2013.
12. 王步青,王卫东.基于 LabVIEW 的虚拟心电分析仪中的 R 波检测算法研究 [J].科学技术与工程,2006,6(21): 3401-3404.

基于克里金插值的 EEG 二维成像最优化分析*

胡纪锋；刘锋华；蒙坚发

(吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林长春 130026)

摘要：脑电信号 (EEG) 由大脑皮层神经细胞产生，蕴含着大量的生理与疾病信息，用脑电成像的方法进行分析，在临床医学方面有着极为广泛的应用和重要的意义。本文采用基于高斯模型的半变异函数的普通克里金插值方法进行脑电成像研究，考虑实际情况下块金值 C_0 是不为零的，当样本间距 h 固定时，在拟合协方差函数基础上获得变差距离 a 与块金值 C_0 的函数关系，并结合普通克里金插值均方差函数获得均方差趋近于零时 a 与 C_0 的最优解。利用最优情况下的 a 与 C_0 进行插值，实现 EEG 二维成像最优化，并应用于有关脑疾病的临床医学分析与研究。
关键词：脑电信号；2D 成像；普通克里金插值；半变异函数；均方差

Kriging Interpolation Based EEG 2D Imaging Optimization Analysis

Jifeng Hu, Fenghua Liu, Jianfa Meng

(College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Jilin Changchun 130026, China)

Abstract: Electroencephalogram (EEG) is produced by cerebral cortical neurons and contains a lot of information on physiology and disease. Using EEG imaging methods, it has extremely wide application and important significance in clinical medicine. Using the ordinary Kriging interpolation method based on Gaussian model semi-variogram, considering the actual situation, the nugget value C_0 is not zero. When the sample interval h is fixed, the variation distance a is obtained based on the fitting covariance function. The relationship between the nugget value C_0 and the ordinary Kriging interpolation mean square error function are used to obtain the optimal solution of a and C_0 when the mean square error approaches zero. In this paper, we propose a 2D EEG signal imaging method based on ordinary Kriging interpolation. Interpolate a and C_0 in the optimal situation to achieve optimal EEG 2D imaging.

Key words: EEG signal two-dimensional imaging ordinary Kriging interpolation semivariogram mean square error

0 引言

脑电信号 (Electroencephalography EEG) 是脑神经细胞群产生的微弱的非平稳伪随机生物电信号，含有丰富的大脑活动状态信息。随着近些年信息技术的发展，脑电信号处理技术发展加快，运用脑电信号进行脑电成像分析并应用于临床研究越来越成为研究的重点，脑电成像可以直观的显示大脑活动状态，对于脑血管疾病、脑积水、脑肿瘤等病灶的定位^[1-3]，以及癫痫，中风等疾病发作时脑电成像的特点^[4-5]的临床医学研究有很重要的意义。

1989 年，LEE S H 与 KO H W、YOO S K 等人开发了一台带有 IBM PC AT 的电脑脑电图成像系统，他们采用反距离加权插值的方法，使每个插值点的权重与其最近的四个点的距离成反比，实现了脑电成像^[6]。2011 年，Yang Qi 和 Wang Xiaofeng 等人借助混合效应多项式回归模型的统计分析方法，成功实现了用高密度脑电图来描述次最大肌肉收缩时脑电成像中相应动态源的变化^[7]。2015 年，Paul Fergus 和 David Hignett 等学者对于癫痫病症进行了研究，结果表明，在大多数情况下使用 k-最近邻点插值法可以有效提高灵敏度，并且误差也较小^[8]。2017 年

印度学者 Taran Sachin 和澳大利亚学者 Siuly Siuly、土耳其学者 Sengur A 等人使用 IMF1 的径向基核函数对不同运动图像任务的脑电信号进行分类，该方法与现有的方法相比，在分类准确度，灵敏性等方面展现了更好的性能^[9]。

在以上研究的基础上，本文对基于高斯模型变异函数的普通克里金插值算法进行优化分析，在运用数据拟合理论的基础上建立了变异函数各参量之间的函数关系，并结合模型的均方误差给出了优化的普通克里金的变异函数模型取值规范。

1 脑电成像算法分析

1.1 普通克里金插值

克里金插值是法国统计学家 Matheron 首先提出 [10-12] 的一种对有限区域内的区域化变量进行无偏最优估计的空间插值算法。

克里金插值法中的普通克里金法具有下列约束条件：

$$E[Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})] = 0 \quad (1)$$

$$\text{Var}[Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})] = 2\gamma(\mathbf{h}) \quad (2)$$

* 指导老师：蔡靖

项目类型：大学生创新训练项目 (2017B65614)

式中 $Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})$ 、 $Z(\mathbf{x})$ 分别为 $\mathbf{x}+\mathbf{h}$ 与 \mathbf{x} 位置处的实测值, $\gamma(\mathbf{h})$ 为距离 \mathbf{h} 对应的半变异函数。

由 n 个样本点的实测值 $Z(\mathbf{x}_i)$ 可得到待测点 $Z^*(\mathbf{x}_0)$ 的估计值:

$$Z^*(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(\mathbf{x}_i)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$
(3)

式中 λ_i 为权重系数。

则估计值的方差为:

$$S = \text{Var}[Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)] = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(\mathbf{h}_i) + L$$

$$(\mathbf{h}_i = \mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_i)$$
(4)

其中 L 为在约束条件下求估计值方差极小值时引入的拉格朗日乘数。

利用普通克里金法由 n 个脑电信号样本点的实测值得到 N 个待测点的估计值 ($N > n$), 并利用估计值进行脑电成像, 选用 N 个待测点估计值方差的平均值可由公式(5)计算:

$$\bar{S} = \sum_{l=1}^N S_l / N = \left(\sum_{l=1}^N \sum_{i=1}^n \lambda_{il} \gamma(\mathbf{h}_{il}) \right) + \sum_{l=1}^N L_l / N$$
(5)

做为脑电成像准确度的评判标准, 当 $\bar{S}=0$ 时即认为是最优脑电成像。

1.2 半变异函数模型与优化关系确定

由公式(4)与公式(5)式可以看出半变异函数 $\gamma(\mathbf{h})$ 对 \bar{S} 待测点估计值的方差有很大影响, 半变异函数用来表征区域的空间变异结构, 一个区域的半变异函数定义为:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \text{Var}[Z(\mathbf{x})] - C(\mathbf{h})$$

$$C(\mathbf{h}) = \text{Cov}[Z(\mathbf{x}+\mathbf{h}), Z(\mathbf{x})]$$
(6)

实际运用中为了简化计算, 通常选用下列半变异函数模型。

高斯模型:

$$\gamma(\mathbf{h}) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-(\mathbf{h}/a)^2} \right]$$

$$C(\mathbf{h}) = C_1 e^{-(\mathbf{h}/a)^2}$$
(7)

指数模型:

$$\gamma(\mathbf{h}) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-\mathbf{h}/a} \right]$$

$$C(\mathbf{h}) = C_1 e^{-\mathbf{h}/a}$$
(8)

球型模型:

$$\gamma(\mathbf{h}) = C_0 + C_1 \left[1.5(\mathbf{h}/a) - 0.5(\mathbf{h}/a)^3 \right] (0 \leq \mathbf{h} \leq a)$$

$$\gamma(\mathbf{h}) = C_0 + C_1 (\mathbf{h} > a)$$

$$C(\mathbf{h}) = C_1 \left[1 - 1.5(\mathbf{h}/a) + 0.5(\mathbf{h}/a)^3 \right] (0 < \mathbf{h} \leq a)$$
(9)

式中块金值 C_0 是由样本误差和短距离的变异性引起的半变异函数的偏差, 相关尺度 a 表示当样本之间的距离大于等于此距离时, 各样本相互独立, $C_0 + C_1 = \text{Var}[Z(\mathbf{x})]$, 称为基台值。

可以得出 C_0 与 a 的取值决定了 \bar{S} 的取值。经过比较, 本文选用高斯模型, 因此在高斯模型下使

$$\bar{S} = \left(\sum_{l=1}^N \sum_{i=1}^n \lambda_{il} (C_0 + C_1 [1 - e^{-(\mathbf{h}_{il}/a)^2}] \right) + \sum_{l=1}^N L_l / N = 0$$
(10)

的 C_0 与 a 的值即为高斯模型的最优值。

1.3 相关尺度 a 与块金值最优值获取

对于 n 个样本点, 以任意两个样本点之间的距离 \mathbf{h} 作为横坐标, 以由 (6) 式 C_0 中 $C(\mathbf{h})$ 求出的值作为纵坐标, 进行二次曲线拟合, 即可得到取样区域的近似半变异函数, 拟合结果如图 1 所示:

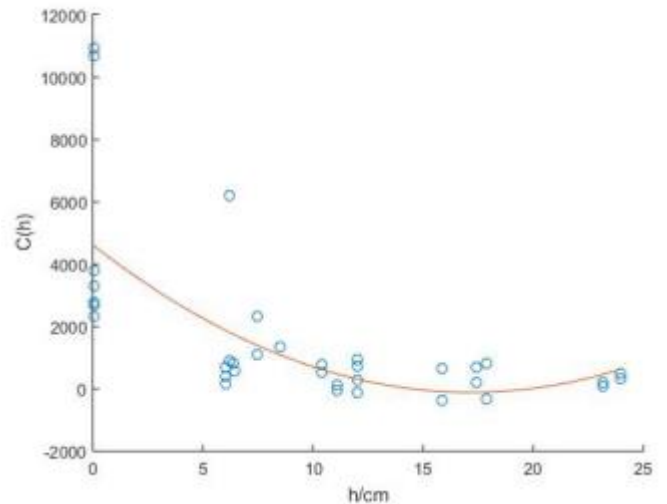


图 1 二次拟合曲线

Fig.1 Quadratic fitting curve

拟合多项式如下:

$$C(\mathbf{h}) = m_2 h^2 + m_1 h + m_0$$
(11)

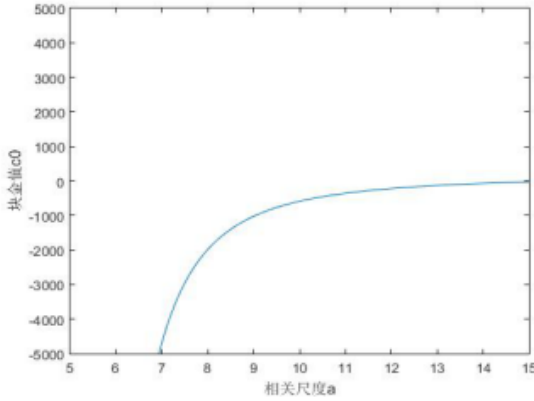
联立 (7) 和 (11) 可得 a 与 C_0 的关系

$$C_0 = Var[Z(x)] - \frac{(m_2 h^2 + m_1 h + m_0)}{e^{-\frac{h^2}{a^2}}} \quad (12)$$

对于不同的距离 h , a 和 c_0 有相似的关系, 因此取所有 h 的平均值 h_0 带入上式, 得到最优的 a 和 c_0 的关系:

$$C_0 = Var[Z(x)] - \frac{(m_2 h_0^2 + m_1 h_0 + m_0)}{e^{-\frac{h_0^2}{a^2}}}$$

a 与 C_0 的关系曲线如图 2 所示:



图

2 $a-C_0$ 关系曲线

Fig.2 $a-C_0$ Relationship curve

联立 (10) 与 (12) 式

$$C_0 = Var[Z(x)] - \frac{(m_2 h_0^2 - m_1 h_0 + m_0)}{e^{-\frac{h_0^2}{a^2}}}$$

$$\bar{S} = \left(\sum_{l=1}^N \sum_{i=1}^n \lambda_{li} (C_0 + C_1 [1 - e^{-\alpha_i h_i^2}]) \right) + \sum_{l=1}^N L_i / N = 0 \quad (13)$$

即可求出 C_0 与 a 的最优值。

利用最优化的 a 与 C_0 进行优化的普通克里金插值, 并用此插值结果进行脑电成像, 用于临床疾病的分析研究。

2 脑电信号采集系统

如图 1 所示为脑电信号采集系统框图, 主要由采集电极, 前置滤波放大单元、模数转换单元、微处理器单元、蓝牙通信单元、上位机信号处理单元组成。

采集电极安放位置参考国际 10—20 系统电极放置法, 八个采集电极 Fp1、Fp2、Fz、Cz、P3、P4、O1、O2 同时采集脑电信号, 信号经由前置滤波放大单元滤去高频段的噪声, 并将信号放大。模数转换单元将八通道的模拟脑电信号转换为数字信号, 微处理器单元负责接收此数字信号并将其通过

蓝牙通信传输到上位机中进行信号的处理。

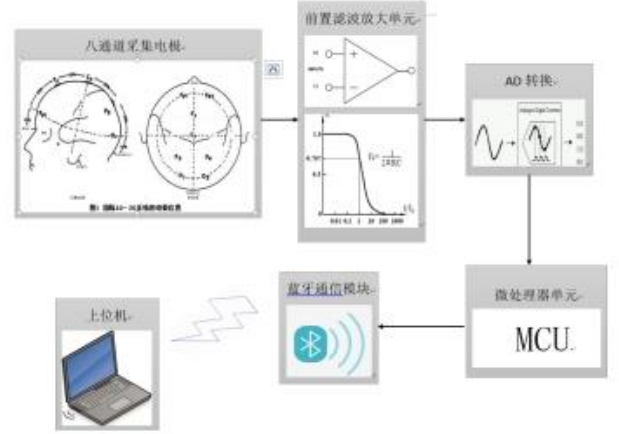


图 3 系统框图

Fig.3 system block diagram

3 实验及结果分析

3.1 原始脑电信号

由采集系统采集 Fp1、Fp2、Fz、Cz、P3、P4、O1、O2 点的相对于耳垂的原始电压值脑电信号如图 4 所示:

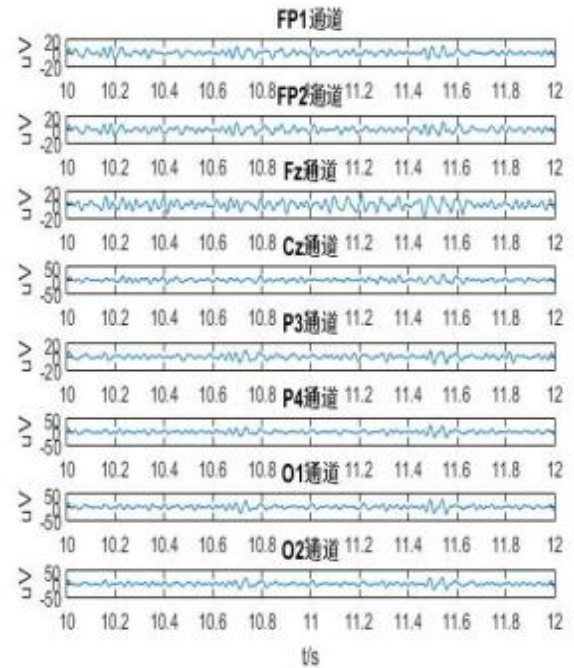


图 4 原始脑电信号

Fig.4 EEG signal

3.2 测量电极坐标

为了进行脑电 2D 成像, 以国际 10-20 电极安放标准中的 C_z 为极点, 以 C_z 点到眉间的弧线为极轴建立极坐标系, 极径为电极安放点到原点的大脑弧面距离, 极角为电极安放点与极点相连线段在极点所在平面的投影与极轴的夹角。

将人的大脑近似为一个球面, 假设某两个电极 Fp1 与 Fz 的球面坐标分别为 r_1, θ_1, ϕ_1 与 r_2, θ_2, ϕ_2 ,

那么两者之间的球面距离，即弧长 l 可以用如下方程组求：

$$x=r \sin \theta \cos \phi$$

$$y=r \sin \theta \sin \phi$$

$$z=r \cos \theta$$

$$d=\sqrt{\left(x_1-x_2\right)^2+\left(y_1-y_2\right)^2+\left(z_1-z_2\right)^2}$$

$$2 r^2 \cos \theta=2 r^2-d^2$$

$$l=2 \pi r \theta / 360$$

建立平面直角坐标系，将极坐标点转换为直角坐标点并平移到第一象限内。即可得到电极安放位置坐标图，如图 5 所示：

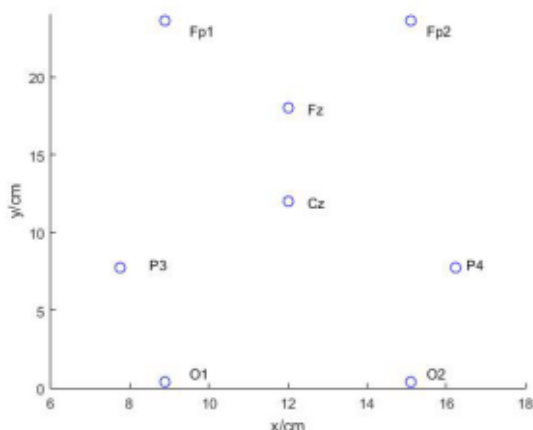


图 5 测量电极坐标图

Fig.5 Measuring electrode coordinate chart

3.3 半变异函数模型选择

普通克里金插值中变异函数模型的选取对插值的无偏性具有重要意义。图 6，图 7，图 8 分别是变异函数模型为高斯模型，指数模型，球形模型时的脑电成像结果及对应的误差分布。

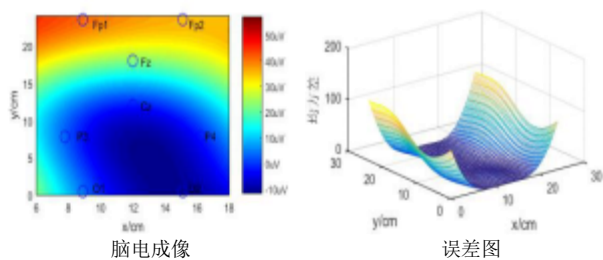


图 6 高斯模型脑电成像及误差图

Fig.6 2D-EEG Imaging of Gaussian model and variance distributions map

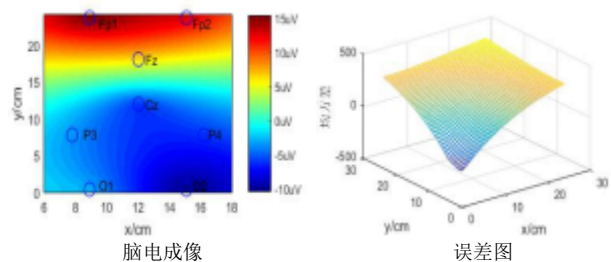


图 7 指数模型脑电成像及误差图

Fig.7 2D-EEG Imaging of Exponential model and variance distributions map

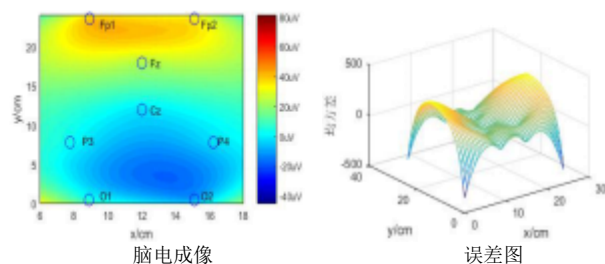


图 8 球形模型脑电成像图及误差图

Fig.8 2D-EEG Imaging of Spherical model and variance distributions map

模型待测点估计值方差的分布情况如图 9-10 所示：

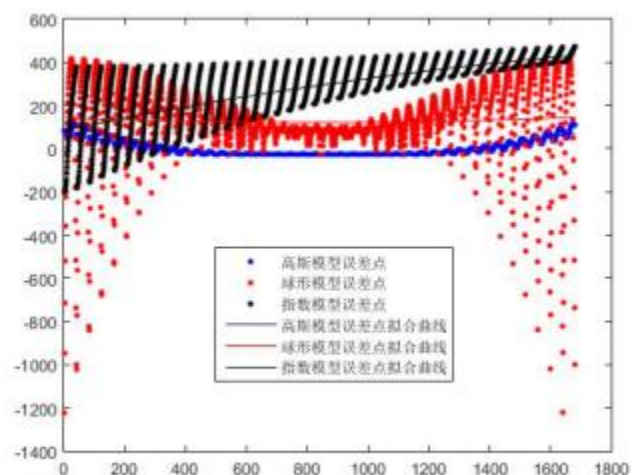


图 9 方差散点图

Fig.9 Variance scatter plots and fitting curves of different models

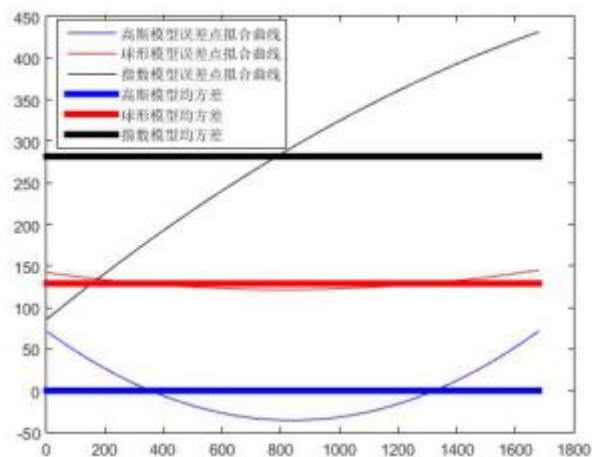


图 10 不同半变异函数模型插值点误差曲线

Fig.10 fitting curves and MKV of different models

从图中可以看出，高斯模型每个待测点的估计值误差均在零附近，且平均误差明显低于其他两种模型，因此本文进行普通克里金插值优化分析时选用的半变异函数模型为高斯模型。

3.4 最优值确定

当取不同值时，由式（4）可以得到

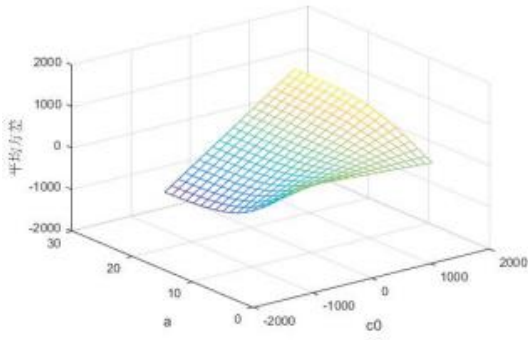


图 11 平均方差

Fig.11 MKV distribution

由式 (12) 可以得到

图 13 中曲面与曲线交点即反映了当平均误差 \bar{S} 趋近于 0 时的相关尺度 a 与块金值 c_0 的最优值。

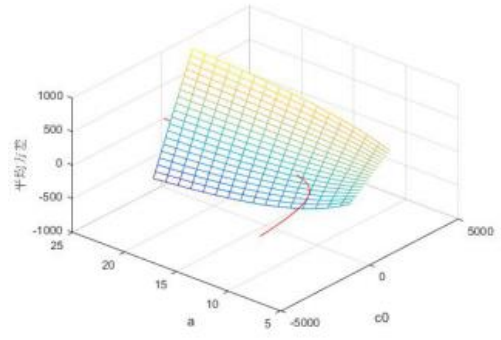


图 12 当平均克里金方差趋近于零时 a 与 c_0 的取值情况

Fig.12 The intersection of the surface and the curve reflects the optimal value of the correlation length a and the nugget c_0 when the MKV \bar{S} approaches zero.

3.5 结果分析

图 13 列出了在正常静默状态下, 相关尺度 a 与块金值 c_0 取位于最优解附近的值时测试者的 2D 脑电成像情况及对应的误差分布图:

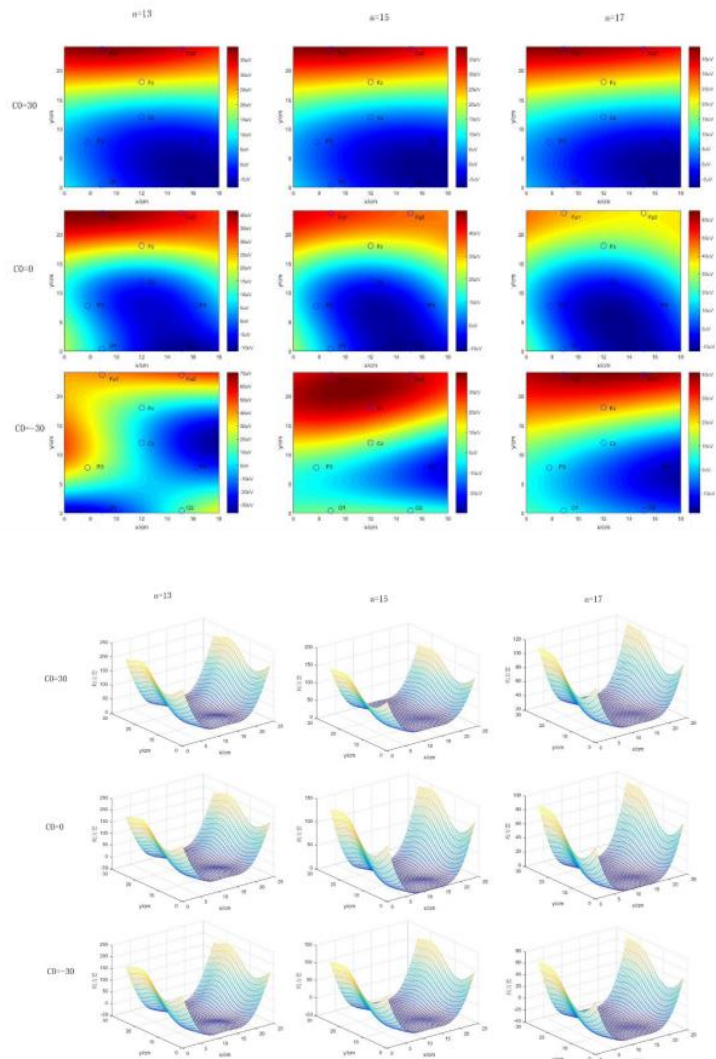


图 13 脑电成像及误差

Fig.13 2D -EEG Imaging and variance distributions map

上述图形对应的均方差值如表 1 所示:

表 1 不同 a 与 C_0 对应的平均克里金方差
Table 1 The corresponding MKV in the above figure

	$a=13$	$a=15$	$a=17$
$C_0=30$	74.7711	56.4347	45.5476
$C_0=0$	48.7676	28.7943	16.9354
$C_0=-30$	22.7640	1.1540	-11.6768

在以上实验的基础上采用逐次逼近的方法, 可以得到均方差趋近于 0 时的最优的 a 和 C_0 值。

图 14 为身体健康的成年男性测试者在 a 和 C_0 取最优值即均方差趋近于 0 时的值时所绘制的 2D 脑电成像与误差分布图:

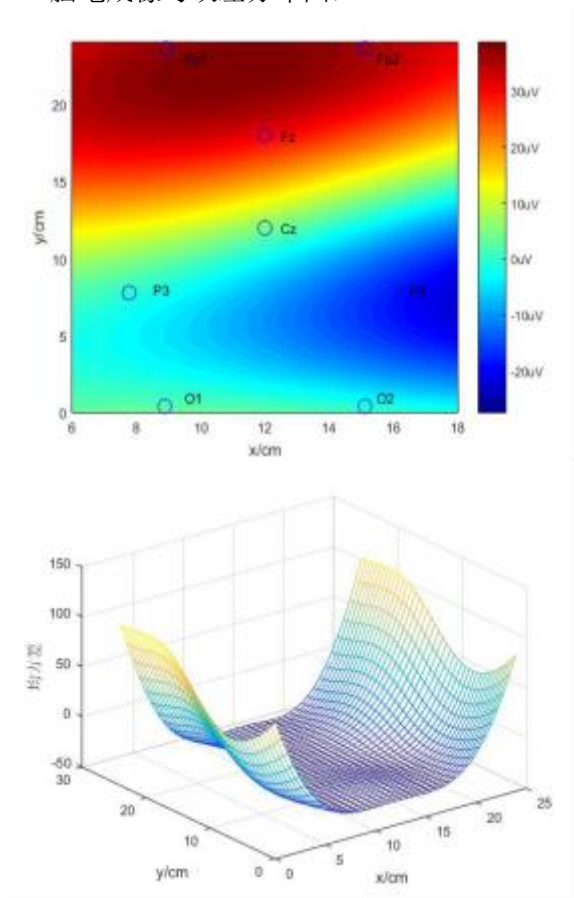


图 14 优化脑电成像及误差

Fig14 optimal 2D-EEG Imaging and variance distributions map

4 结束语

在均方差趋近于零的约束条件下, 对高斯模型半变异函数的参数 a 和 C_0 的函数关系进行最优解求取, 实现了基于高斯模型半变异函数的普通克里金插值的优化分析, 实验结果表明, 采用逐步逼近的方法平均方差几乎趋近于零。

参考文献

1. 张志锁, 黄平, 张继芬. 缺血性脑血管疾病 BEAM、EEG、CT 对比分析[J]. 中风与神经疾病杂志, 1996(01): 27-28.
2. Seo, Jong-Geun; Kang, Kyunghun; Jung, Ji-Young. Idiopathic Normal Pressure Hydrocephalus, Quantitative EEG Findings, and the Cerebrospinal Fluid Tap Test: A Pilot Study[J]. JOURNAL OF CLINICAL NEUROPHYSIOLOGY. 2014, 31(6): 594-599.
3. 张爱玲. 脑电地形图在脑肿瘤诊断中的应用研究[J]. 世界中西医结合杂志, 2012, 7(05): 441-442.
4. Del Felice, Alessandra; Storti, Silvia Francesca; Manganotti, Paolo. Sleep affects cortical source modularity in temporal lobe epilepsy: A high-density EEG study[J]. CLINICAL NEUROPHYSIOLOGY. 2015, 126(9): 1677-1683.
5. Antelis, Javier M; Montesano, Luis; Ramos-Murguialday, Ander; Birbaumer, Niels; Minguez, Javier. Decoding Upper Limb Movement Attempt from EEG Measurements of the Contralesional Motor Cortex in Chronic Stroke Patients[J]. IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING. January 2017, 64(1): 99-111.
6. Lee SH, Ko HW, Yoo SK, Kim WK, Lee HS, Lee HY. Development of a computerized EEG imaging system

- with a personal computer. Yonsei Med J. 1989 Mar;30(1):45-53.
7. Yang Qi,Wang Xiaofeng,Fang Yin,Siemionow Vlodek,Yao Wanxiang,Yue Guang H.Time-dependent cortical activation in voluntary muscle contraction[J].The open neuroimaging journal,2011 Dec,5:232-9.
8. Paul Fergus,David Hignett,Abir Hussain,Dhiya Al-Jumeily,Khaled Abdel-Aziz.Automatic Epileptic Seizure Detection Using Scalp EEG and Advanced Artificial Intelligence Techniques[J].BioMed Research International,2015,986736.
9. Taran Sachin,Sharma Dheeraj,Siuly Siuly,Sengur A.Features based on analytic IMF for classifying motor imagery EEG signals in BCI applications [J].Journal of the International Measurement Confederation,February 2018,116:68-76.
10. Davis John C.Statistics and Data Analysis in Geology[M].New York:John Wiley&Sons,2002:57-61
11. 李 莉,胡建平.克里金插值算法在等高线绘制中的应用 [J].天津城市建设学院学报,2008,14(1):68-71
12. 宣 腾,李锦辉,李典庆,宋磊.基于普通克里金法的勘探位置优化方法[J].武汉大学学报,2016,49(5):714-39
13. Lee SH, Ko HW, Yoo SK, Kim WK, Lee HS, Lee HY.Development of a computerized EEG imaging system with a personal computer. Yonsei Med J. 1989 Mar;30(1):45-53.
14. Yang Qi,Wang Xiaofeng,Fang Yin,Siemionow Vlodek,Yao Wanxiang,Yue Guang H.Time-dependent cortical activation in voluntary muscle contraction[J].The open neuroimaging journal,2011 Dec,5:232-9.
15. Paul Fergus,David Hignett,Abir Hussain,Dhiya Al-Jumeily,Khaled Abdel-Aziz.Automatic Epileptic Seizure Detection Using Scalp EEG and Advanced Artificial Intelligence Techniques[J].BioMed Research International,2015,986736.
16. Taran Sachin,Sharma Dheeraj,Siuly Siuly,Sengur A.Features based on analytic IMF for classifying motor imagery EEG signals in BCI applications[J].Journal of the International Measurement Confederation,February 2018,116:68-76.

三分量磁测系统数据采集存储模块设计*

陶 毅

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 长春 130022)

摘要: 三分量磁测方法利用三分量磁力仪测量地磁场分量信息, 与传统的总场测量相比, 可获得更丰富的地磁场信息, 有效减少反演中的多解性, 有助于对磁性体定量解释, 进而达到查明地质构造、寻找矿产资源和解决水文、工程地质问题 and 环境监测等问题。

关键词: 三分量 地磁勘探 STM32 AD SD

Design of data acquisition and storage module for three component magnetic measurement system

Tao Yi

(School of Instrument Science and electrical engineering, Jilin University, Changchun 130022)

Abstract: Compared with the traditional total field measurement, the three-component magnetometer can obtain more abundant geomagnetic field information, effectively reduce the multi-solution in inversion, help to quantitatively interpret the magnetic body, and then to identify geological structure, look for mineral resources and solve hydrology problems. Problems of engineering geology and environmental monitoring.

Keywords: three component geomagnetic exploration STM32 AD

0 前言

在国外, 已有加拿大、俄罗斯两国研发了井中磁力仪, 但他们共同的缺点是仪器笨重, 并且只能测量井下磁场的总场值, 而不能测量其水平和垂直分量, 这对于精确定位异常磁场位置是十分不利的^[1-2]。

三分量磁力仪在我国的发展, 近十余年, 在一些方面和国际水平差距增大。我国三分量磁测技术在 20 世纪 70 至 80 年代曾一度处于世界领先水平, 但仪器研制长期停留在二三十多年前的低精度水平, 而国外已有高精度产品问世。我国目前所生产的三分量磁力仪垂向分量观测精度仅为士 100 nT 至士 150nT, 水平分量更低, 仅能用于强磁异常探测。例如国内重庆地质仪器厂研制的 JCX-3 型三分量磁力仪, 虽然已经是在 JCX-1, JCX-2 型有两个自由度的垂向系统基础上改进的, 克服了 JCX-1, JCX-2 型仪器的一些弱点、采用了三分量测量, 但是它仍然存在着一些致命的弱点, 如系统故障率特高、灵敏度低等, 它的主要技术指标, 如 X, Y 磁敏元件转向差<400nT, Z 磁敏元件转向差<300nT、测量倾角和方位角的范围及精确度等都远远不能满足实际勘测中的需求^[2]。

1 设计内容及要求

(1).设计基于 stm32 的数据显示程序,包括三分量, 磁倾角, 磁偏角的显示。

(2).设计基于 stm32 的数据采集程序设计,通过 spi 通信, 完成 AD 模块的串行数据的采集。

(3).设计基于 stm32 的数据存储程序, Stm32 将采集的数据存储到 sd 卡中。

(4).完成程序模块的整合, 并调试使各程序模块相互兼容。

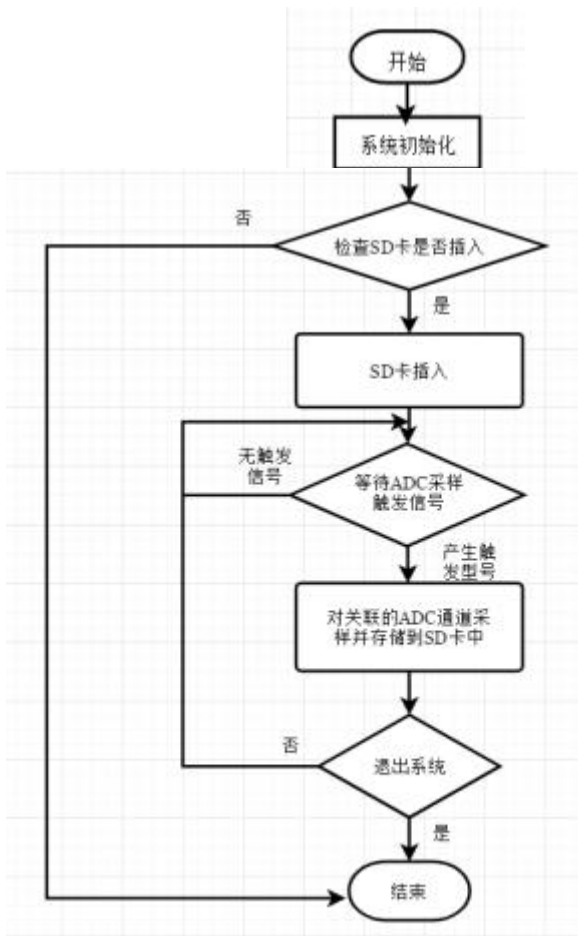
2 总体设计方案

STM32F407ZGT6 单片机是一款基于 Cortex-M4 内核的增强型处理器, 工作频率可以达到 168MHz, 其内部具有 3 个 12 位的 ADC 采用通道, 每个 ADC 共用了多达 21 个外部通道接口, 可以实现单次或连续外部数据采样^[3-7]。SD 卡是目前最常用的大容量数据存储介质, 支持 2 种操作模式: SDIO 模式和 SPI 模式。SPI 模式通常可以采用 MCU 自带的 SPI 接口或者用普通的 I/O 口模拟 SPI 通讯, STM32 具有一个 SPI 接口, 能够对 SD 卡快速进行数据读写系统硬件部分主要有 ADC 采样调理电路和 SD 卡硬件连接电路组成。为了提高数据的精确度, 需要给 STM32 提供了一个外部电压基准源。此外, 外部传感器输入电压可能与 ADC 采样范围之间存在电压跨度不相等的情况, 往往并不能直接输入到 MCU 的 AD 采样引脚, 需要对信

* 指导老师: 赵静
项目类型: 2018 校级培育

号进行调理,使传感器与 ADC 的组合达到最好的精度。结合以上两种考虑,使用外部基准电压^[8~12]。

3 实现过程



以 FAT32 文件系统格式进行文件创建及信息储存,必须将 SD 卡格式转换成 FAT32 文件系统格式,这就是 SD 卡的初始化。在确定 SD 卡通信正常后即开始初始化,其过程包括:读取原有 FAT 表、查找空间簇并确定起始簇号、将新的 FAT 表写回 SD 卡、读取目录项信息、将文件信息赋给文件信息结构体、将新的目录写回到 SD 卡,初始化完成后即可进行 SD 卡的读写操作。

```

while(SD_Init())
{
    LCD_ShowString(30,150,200,16,16,"SD Card Error!");
    delay_ms(500);
    LCD_ShowString(30,150,200,16,16,"Please Check!");
    delay_ms(500);
}
exfuns_init();
f_mount(fs[0],"0:",1);
res=f_mount(fs[1],"1:",1);
if(res==0X0D)
{

```

```

    LCD_ShowString(30,150,200,16,16,"Flash Disk Formatting...");
    res=f_mkfs("1:",1,4096);
    if(res==0)
    {
        f_setlabel((const TCHAR *)
        "1:ALIENTEK");

        LCD_ShowString(30,150,200,16,16,"Flash Disk Format Finish");
    }else
    LCD_ShowString(30,150,200,16,16,"Flash Disk Format Error ");
    delay_ms(1000);
}
LCD_Fill(30,150,240,150+16,WHITE);
while(exf_getfree("0",&total,&free))
{
    LCD_ShowString(30,150,200,16,16,"SD Card Fatfs Error!");
    delay_ms(200);
    LCD_Fill(30,150,240,150+16,WHITE);
    delay_ms(200);
}

```

AD 采样信号出发后向 SD 卡触发写命令,命令中包含写地址,写地址必须与 SD 卡物理地址相对应,SD 卡接收到数据后验证地址,并进行 CRC 校验,发出响应命令。在 SD 卡初始化后,创建一个以通道命名的文本格式文件,用结构指针 fnew 关联该文本文件,再次操作文件就是通过结构指针来完成。具体方法是在获取当前日期后将其转换为字符串类型并在字符串末尾加上“.text”,然后利用 f_open()函数创建,在文件的首行,写入标题信息(通道名称)。然后关闭文本格式文件,完成了系统的初始化,等待 ADC 采样时刻的到来。

```

res=f_open(&fil1,"0:/CHR1.txt",FA_CREATE_ALWAYS|FA_WRITE);
f_close(&fil1);
res=f_open(&fil2,"0:/CHR2.txt",FA_CREATE_ALWAYS|FA_WRITE);
f_close(&fil2);
res=f_open(&fil3,"0:/CHR3.txt",FA_CREATE_ALWAYS|FA_WRITE);
f_close(&fil3);
delay_ms(20);

```

在 AD 触发信号到来时,记录上述信息。采样通道记录 ADC 的输入引脚名称,采样名称为该采样通道所对应的数据形式,如压力、温度等,采样数据为单精度类型,将其转换为字符串类型并保留小数点后五位再赋给相应指针,触发模式则表示该采样数据以何种形式采集,包括定时触发、外部按键触发等。为了使数据在文本格式中的排列整齐规范,利用 sprintf 函数将结构体各个指针所指向的字符串按照指定宽度存放到 text File Buffer[]字符串数组中。

```

sprintf(dataTemp, "%.3f \r\n",ADC_Vol);
sprintf(dataTemp2, "%.3f \r\n",ADC_Vol2);
sprintf(dataTemp3, "%.3f \r\n",ADC_Vol3);

res = f_open(&fil1,"0:/CHR1.txt", FA_WRITE
| FA_OPEN_ALWAYS);
res = f_open(&fil2,"0:/CHR2.txt", FA_WRITE
| FA_OPEN_ALWAYS);
res = f_open(&fil3,"0:/CHR3.txt", FA_WRITE
| FA_OPEN_ALWAYS);
if ( res == FR_OK )
{
    f_lseek(&fil1, f_size(&fil1));
    res = f_write(&fil1, &dataTemp,
sizeof(dataTemp), &bw1);
    printf( "\r\n ?????? \n" );
    f_close(&fil1);

```

```

    f_lseek(&fil2, f_size(&fil2));
    res = f_write(&fil2, &dataTemp2,
sizeof(dataTemp2), &bw2);
    printf( "\r\n ?????? \n" );
    f_close(&fil2);

```

```

    f_lseek(&fil3, f_size(&fil3));
    res = f_write(&fil3, &dataTemp3,
sizeof(dataTemp3), &bw3);
    printf( "\r\n ?????? \n" );
    f_close(&fil3);
}

```

在每次写完 SD 卡后需要关闭文件待下次写时再重新打开。新写入的数据应当紧接上次文件的末尾再另起一行,利用 `f_lseek(&fnew, f_size(&fnew))` 函数可以得知当前文件的大小,获得指针偏移值,使再次写入的字符串接着文件的末尾,而不用再计算累计写入的字节总和。

```

res = f_open(&fnew, sample_date,
FA_OPEN_ALWAYS |FA_WRITE);
if(res!=FR_OK)
while(1);
else
{
res = f_lseek(&fnew, f_size(&fnew));
if(res!=FR_OK)
while(1);
else
{
res = f_write(&fnew,text File Buffer,
sizeof(text File Buffer), &bw);
if(res!=FR_OK)
while(1);
}
}
f_close(&fnew);

```

4 测试分析与结论



图1 系统整体图

Figure 1 the whole system

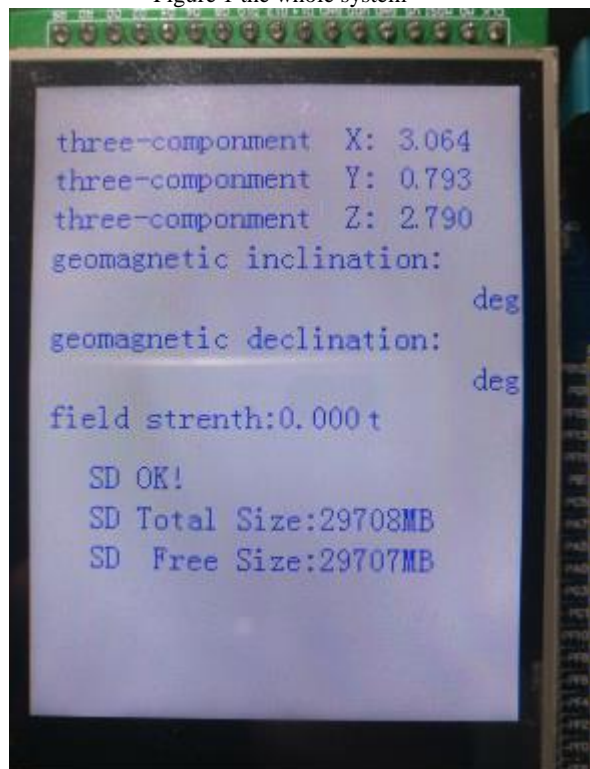


图2 LCD屏显示情况

Figure 2 LCD screen display case

图二可以看到,系统可以完成 ADC 采集电压数据的实时显示,包含三个通道,可以显示 SD 卡情况,包含设计要求全部类容。

名称	修改日期	类型	大小
CHR1		TXT 文件	2 KB
CHR2		TXT 文件	2 KB
CHR3		TXT 文件	2 KB

图3 TXT文件夹创建情况

Figure 3 TXT folder creation

将采集完毕后,将 SD 卡插入电脑,从图 3 可以看到,系统成功创建了三个 TXT 文件夹。



图4 三个通道数据存储情况

Figure 4 three channel data storage conditions

分别打开三个通道对应 TXT 文件夹, 可以看到对应数据正是三个通道采集的电压。

5 总结与展望

SD 卡作为目前一种大容量的数据存储备, 在嵌入式系统中应用越来越广泛。本文利用 STM32 实现了通过 SPI 与 ADC 通信, 通过 SDIO 接口与 SD 卡进行数据传输, 创建文本格式, 并提出了数据的管理方式, 方便数据管理, 具有较高的实用价值。但是, ADC 采样的精度还不够高, 这主要是因为外部传感器输入电压可能与 ADC 采样范围之间存在电压跨度不相等的情况, 往往并不能直接输入到 MCU 的 AD 采样引脚, 需要对信号进行调理, 使传感器与 ADC 的组合达到最好的精度。结合以上考虑, 可以采用专用芯片如 TI 公司的 REF2030 为 ADC 采样和运放调理电路提供基准电压。

参考文献

1. 李昂. STM32 的 AD 转换程序与应用(一)[N]. 电子报, 2017-10-01(009).
2. 杨福杏. 基于 PIC 单片机的磁通门传感器数据采集与修正[D]. 武汉大学, 2017.
3. 霍亮生, 李岳峰, 赵雄, 刘辉. 基于 STM32 的自动进样器研制[J]. 分析仪器, 2017(02): 7-13.
4. 杜佳良, 丁亚东, 赵俊杰. 基于 STM32 的 AD 采集与 SD 卡数据存储[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(12): 235-237.
5. 王晨辉, 吴悦, 杨凯. 基于 STM32 的多通道数据采集系统设计[J]. 电子技术应用, 2016, 42(01): 51-53+57.
6. 杨立身, 张安伟, 王磊, 魏兰. 基于 STM32 的 μ C/GUI 外置 spi flash 字库研究与实现 [J]. 液晶与显示, 2015, 30(02): 290-295.
7. 刘智勇, 陈鹏飞, 宿磊, 廖广兰. 基于 STM32 芯片的 U 盘 /SD 卡文件传输技术研究 [J]. 现代电子技术, 2014, 37(18): 107-109.
8. 邵青. 基于 STM32F4x9 的 LCD 显示设计方案[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2014, 14(06): 82-83.
9. 孟强. 基于 STM32 的数据采集系统设计[D]. 南京林业大学, 2014.
10. 陶海军, 张一鸣, 曾志辉. 基于 AD7606 的多通道数据采集系统设计[J]. 工矿自动化, 2013, 39(12): 110-113.
11. 郝雯, 沈金鑫, 梅成. 基于 STM32 单片机的存储式数据采集系统设计[J]. 电子设计工程, 2013, 21(17): 80-82.
12. 宋敬卫, 付广春, 马献国. 基于 STM32 的多路电压采集研究[J]. 电子世界, 2013(12): 55-56.

基于单目视觉的尺寸测量技术研究*

张天龙； 仲点石； 宫靖萱

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 长春 130026)

摘要：随着世界科技的迅速发展，工业领域对产品制造的精细化，产品外型设计的要求越来越严格，对加工、装配精度要求越来越高，而且多数情况下要求在生产和使用现场进行实时检测。本设计是基于单目视觉测量技术，开发出一套视觉类高精度测量系统。通过光学测头与被测物体接触，采集光学测头上的特征点，通过图像处理进行特征点优化提取，得到特征点的空间坐标。系统可在现场搭建，实现在线测量。

关键词：单目视觉 图像处理 测量 光学测头

Rrsearch on dimensional measurement technique based on single-camera vision

Zhang TianLong; Zhong DianShi; Gong JingXuan

(College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: With the rapid development of science and technology, the industrial field has become increasingly refined in product manufacturing, stringent in product appearance design, high requirements on machining and assembly accuracy, and in most cases, real-time testing is required in the production. This design is based on the monocular vision measurement technology and develops a set of visual precision measurement system. The feature points of the optical probe are collected through the contact between the optical probe and the object under test. The feature points are optimized and extracted through image processing to obtain the spatial coordinates of the feature points. The system can be set up on site to realize on-line measurement.

Key words: Single-camera vision The image processing Measurement Optical probe

0 前言

随着世界科技的迅速发展，航空、航天、军工及民用领域大型和巨型产品制造的精细化，产品外型设计越来越复杂，对加工、装配精度要求越来越高，而且多数情况下要求在生产和使用现场进行实时检测。现代检测技术是工业发展的基础，测量精度和效率在一定程度上决定了制造业乃至科学技术的发展水平。现在技术要能够适应快速发展的制造业，根据先进制造业技术发展的要求，以及精密测量技术自身的发展规律，不断的拓展新的测量原理和测试方法^[1]。

视觉测量方法是一种轻巧便捷的测量技术，并且有着测量精度高、可实现在线检测等优点，满足了现代工业生产中对测量精度和测量范围等的需求。越来越多的应用于产品质量检测和参数测量方面。常见的视觉测量方法主要有单目视觉测量、双目视觉测量、结构光视觉测量等。双目视觉可以达到较高的精度，但是较单目视觉具有结构复杂、测量时间长的缺点。结构光视觉测量的抗干扰能力强，但测量系统的标定比较困难。相较之下单目视觉具有结构简单，灵活度高等优点，克服了目前大多数视觉坐标测量系统无法测量遮挡表面、高光表面和测量范围小、不便于现场在线测量等缺陷^[1]。

1 系统总体设计与光学测头工艺

1.1 系统构成

本文设计的单目视觉测量系统的硬件部分由辅助测量棒、CCD 相机、蓝牙构成；软件部分由计算机编程实现，包括图像处理和上位机设计。采用蓝牙模块实现辅助测量棒和计算机之间的通讯，实现辅助测量棒无线遥控 CCD 相机拍照，计算机调节辅助测量棒特征点个数和发光强度。CCD 相机将采集到的图像传输给计算机，由计算机编程处理得到测量点的坐标。

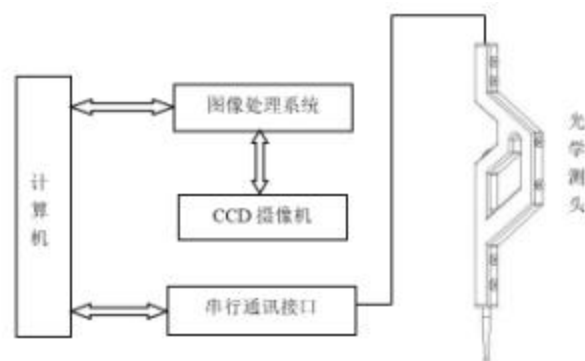


图1 单目视觉测量系统

Fig.1 Monocular vision measurement system

1.2 光学测头工艺

* 指导老师：刘长英

项目类型：大学生创新训练项目（2017B65608）

传统的光学测头上亮点由标记的 LED 点光源组成, 由于点光源发光的均匀性以及关于亮点中心的对称性较差, 点光源成像中心的提取成为限制系统精度提高的重要因素。为了降低周围环境给采集图像带来的噪声, 光学特征点采用 SE3470 红外发光二极管, 配合对应波长的滤光片, 可滤去可见光的干扰, 提高测量系统的精度和稳定性。图 1.2.1 为红外发光二极管 SE3470 的光电特性曲线图, 图示表明在其有效的发光电流范围内, 发光强度与发光电流近似成正比, 可通过调节电流调节其发光亮度。

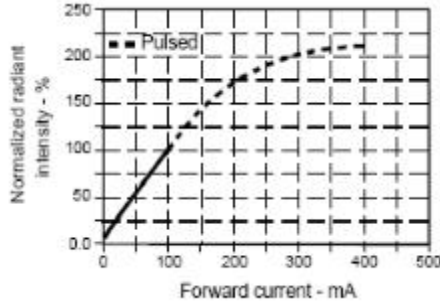


图 2 SE3470 发光强度与电流关系曲线

Fig.2 The relation curve of SE3470's Luminescence intensity and current

在对被测点进行测量的过程中, 需要手动操作测头使其与被测物接触, 为了方便操作且保证测量精度, 测头的材料要求质量轻且形变小, 碳纤维材料刚性强、质量轻并且与不锈钢相比其膨胀系数很小, 这些性能让它成为制作测头首选材料。采用六个红外发光二极管作为特征点, 与测头存在已知的约束关系。

2 图像处理

2.1 特征点的提取

2.1.1 图像分割之阈值分割法

为了获得特征点在图像坐标系下的二维坐标, 需要使特征点和背景分离, 本文采取一种最基本的图像分割方法——阈值化图像分割法。其基本原理是选取一个或多个处于灰度图像范围之中的灰度阈值, 将图像中各个像素的灰度值与阈值比较, 根据比较的结果将图像中的对应像素分成两类或多类, 从而把图像划分成互不重叠的区域集合, 达到图像分割的目的。

2.1.2 最大类间方差法

最大类间方差法又称大津法, 简称 Otsu, 是由日本学者大津提出的一种基于全局的二值化算法, 可以自动选取阈值, 其阈值选取准则是使目标区域和背景区域两个区域的类间方差最大, 从而使错分概率最小^[2]。

利用分辨率为 $M \times N$ 的摄像机采集光学特征点图像。设 $f(x, y)$ 为 (x, y) 像素点灰度值, 若阈值为 T , 图像中 $f(x, y) < T$ 的像素点有 N_a 个, $f(x, y) > T$ 的

像素点有 N_b 个, 两个类别所占总数的比例分别是 ω_a 和 ω_b , 灰度值为 i 的像素点占总数比例 ω_i , 则:

$$\omega_a = \frac{N_a}{M \cdot N} = \sum_{i=0}^{T-1} \omega_i = \omega(T) \quad (1)$$

$$\omega_b = \frac{N_b}{M \cdot N} = \sum_{i=T}^{255} \omega_i = 1 - \omega(T) \quad (2)$$

$$N_a + N_b = M \cdot N \quad (3)$$

$$\omega_a + \omega_b = 1 \quad (4)$$

设两个类别的平均灰度值分别为 μ_a 和 μ_b , 总平均灰度值为 μ , 则:

$$\begin{cases} \mu_a = \frac{1}{\omega_a} \sum_{i=0}^{T-1} i \omega_i = \frac{\mu(T)}{\omega_a} \\ \mu_b = \frac{1}{\omega_b} \sum_{i=T}^{255} i \omega_i = \frac{\mu - \mu(T)}{1 - \omega_a} \\ \mu = \omega_a \cdot \mu_a + \omega_b \cdot \mu_b \end{cases} \quad (5)$$

定义类间方差为:

$$\sigma_B^2 = \omega_a (\mu_a - \mu)^2 + \omega_b (\mu_b - \mu)^2 = \omega_a \omega_b (\mu_a - \mu_b)^2 \quad (6)$$

则类间方差等价公式可以表示为:

$$\sigma_B^2 = \omega_a \omega_b [\mu_a - \mu_b]^2 = \frac{[\mu \omega(T) - \mu(T)]^2}{\omega(T)[1 - \omega(T)]} \quad (7)$$

可见类间方差是一个与 T 有关的变量, 采用遍历的方法可得到使类间方差最大的阈值 T , 该阈值即为最佳阈值, 选取这个阈值能够最好的将特征点从背景区域中提取出来。

2.2 基于双三次插值的高斯曲面拟合定位算法

2.2.1 高斯曲面拟合定位算法

高斯曲面拟合定位算法是一种利用特征点图像内所有像素点信息进行特征点定位的一种算法, 其充分利用了特征点的灰度分布信息, 对特征点图像的对称性要求小, 具有较强的抗干扰能力, 定位精度高。其基本原理如下^[3]:

假设光学特征点的二维灰度图像中坐标位置 (x, y) 的像素点灰度值为 $f(x, y)$, 将其利用二维高斯函数可以表示为:

$$f(x_i, y_i) = G \cdot e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\left(\frac{x_i - x_0}{\sigma_x} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{x_i - x_0}{\sigma_x} \right) \left(\frac{y_i - y_0}{\sigma_y} \right) + \left(\frac{y_i - y_0}{\sigma_y} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

式中: G 为高斯分布的幅值, $\rho = \frac{K}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}}$ 是高斯函数相关系数; (x_0, y_0) 是高斯函数极值点坐标; σ_x 和 σ_y 分别为 x 、 y 方向上的标准差。

对(8)式两边同时取对数, 展开平方项整理, 然后两边同乘以 $f(x, y)$, 得:

$$f \ln(f) = f_1 + f_2 x + f_3 y + f_4 xy + f_5 x^2 + f_6 y^2 \quad (9)$$

式中:

$$f_1 = \ln(G) - \frac{x_0^2}{2(1-\rho^2)\sigma_x^2} + \frac{\rho x_0 y_0}{(1-\rho^2)\sigma_x \sigma_y} - \frac{y_0^2}{2(1-\rho^2)\sigma_y^2} \quad (10)$$

$$f_2 = \frac{x_0}{(1-\rho^2)\sigma_x^2} - \frac{\rho y_0}{(1-\rho^2)\sigma_x \sigma_y} \quad (11)$$

$$f_3 = \frac{y_0}{(1-\rho^2)\sigma_y^2} - \frac{\rho x_0}{(1-\rho^2)\sigma_x \sigma_y} \quad (12)$$

$$f_4 = \frac{\rho}{(1-\rho^2)\sigma_x \sigma_y} \quad (13)$$

$$f_5 = -\frac{1}{2(1-\rho^2)\sigma_x^2} \quad (14)$$

$$f_6 = -\frac{1}{2(1-\rho^2)\sigma_y^2} \quad (15)$$

将图像中 n 个像素点的坐标及灰度值代入得矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} f_1 \ln(f_1) \\ f_2 \ln(f_2) \\ \vdots \\ f_n \ln(f_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 & f_1 x_1 & f_1 y_1 & f_1 x_1 y_1 & f_1 x_1^2 & f_1 y_1^2 \\ f_2 & f_2 x_2 & f_2 y_2 & f_2 x_2 y_2 & f_2 x_2^2 & f_2 y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_n & f_n x_n & f_n y_n & f_n x_n y_n & f_n x_n^2 & f_n y_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

对应向量式可写为:

$$b = Af \quad (17)$$

计算过程中使用远大于6组数据对光学特征点质心进行定位, 所以就会产生一个超定方程组, 根据线性代数知识可知: 一般情况下超定方程组是没有精确解的, 需要在以范数为约束条件来求方程组的最小二乘解。通过基于约束的最小二乘法解方程

$$x_0 = -\frac{f_3 f_4 - 2f_2 f_6}{4f_5 f_6 - f_4^2} \quad (18)$$

$$y_0 = -\frac{f_2 f_4 - 2f_3 f_5}{4f_5 f_6 - f_4^2} \quad (19)$$

(x_0, y_0) 即为光学特征点的中心位置坐标。

2.2.2 双三次插值

特征点成像中心是通过基于约束的最小二乘法来确定的, 因此通过在特征点成像区域内利用双三次插值细分方法来增加有效像素点个数, 进一步提高特征点的定位精度。

双三次插值法的基本原理是通过选取待求像素临近的 4×4 个像素点通过选取插值基函数来拟合数据^[4], 如图所示

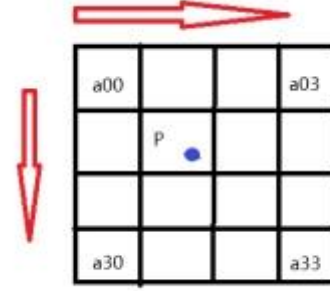


图2 双三次插值

Fig.2 Bicubic Interpolation

不仅考虑到了周边像素点自身像素值的影响因子, 还在待求像素值中纳入相邻点之间像素的像素值变化率的影响。双三次插值法是通过如下双三次(BiCubic)基函数来进行数据拟合的^[4], 其中 $a=0.5$:

$$S(\omega) = \begin{cases} 1 - 2|\omega|^2 + |\omega|^3 & |\omega| < 1 \\ 4 - 8|\omega| + 5|\omega|^2 - |\omega|^3 & 1 \leq |\omega| \leq 2 \\ 0 & |\omega| > 2 \end{cases} \quad (20)$$

通过此公示可以计算插值点的权值, 然后利用

公式计算插值点像素的灰度值 $f(x, y)$:

$$f(x, y) = A \cdot B \cdot C \quad (21)$$

其中: $x = i + u, y = j + v$ ($0 < u, v < 1$)

$$A = \begin{bmatrix} S(1+v) \\ S(v) \\ S(1-v) \\ S(2-v) \end{bmatrix}^T \quad (22)$$

$$B = \begin{bmatrix} f(i-1, j-1) & f(i-1, j) & f(i-1, j+1) & f(i-1, j+2) \\ f(i, j-1) & f(i, j) & f(i, j+1) & f(i, j+2) \\ f(i+1, j-1) & f(i+1, j) & f(i+1, j+1) & f(i+1, j+2) \\ f(i+2, j-1) & f(i+2, j) & f(i+2, j+1) & f(i+2, j+2) \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$C = \begin{bmatrix} S(1+u) \\ S(u) \\ S(1-u) \\ S(2-u) \end{bmatrix} \quad (24)$$

即可得到插值点的像素值。

3 CCD 相机标定

传统的相机标定方法具有较高的精度, 但是其对设备的要求较高, 操作过程也比较繁琐。自标定方法虽然操作简单, 但是结果精度并不高, 本文选

取张正友标定法克服了这两者的缺点同时又兼备二者的优点,在介绍标定方法前先介绍下从物体到图像之间的转换,其摄像机模型如图所示:

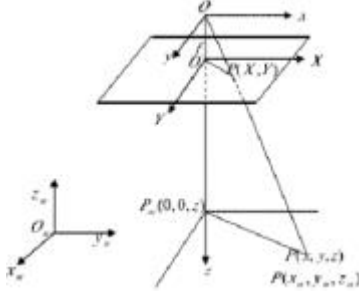


图3 摄像机模型

Fig.3 Camera model

主要经历的坐标系如下:

三维世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$: 以辅助测量棒为参照的摄像机外部三维世界坐标系。

摄像机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$: 以摄像机光心为坐标系的原点, CCD 像平面到原点的距离 f , 即理想成像系统的有效焦距, 坐标系的轴与光轴重合。

像平面坐标系 $O - uv$: 在 CCD 像平面建立的二维坐标系, 原点在像平面左上角, u 轴和 v 轴组成坐标系, 前者为水平轴, 后者为垂直轴, 方向向右、向下。

摄像机图像坐标系 $O' - X' Y'$: 该二维坐标系也设置在 CCD 像平面上, 其中光轴与像平面的交点定义为原点 O' , X 轴、 Y 轴分别平行于 x 、 y 轴。

下面介绍表的标定过程中坐标系变换算法:

3.1 刚体变换(从世界坐标系到摄像机坐标系)

世界坐标系中任意一点转换到摄像机坐标系中的点, 可以由一个旋转矩阵 R 以及一个平移矩阵 t 来描述, 则存在如下刚体变换公式:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + t \quad (25)$$

其中 R 为 3×3 的旋转矩阵, t 为一个三维平移向量, 化为齐次坐标形式:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

3.2 透视投影(摄像机坐标系到理想图像坐标系)

透视投影是将摄像机坐标系下的坐标转化到摄像机图像坐标系下的坐标的一种方法, 利用弱透视成像模型即假设所有特征点深度信息相同, 则根据 POS 算法, Pose from Orthograohy and Scaling, 比例正交投影迭代变换算法, 可知投影点与相面点满足如下比例关系:

$$\frac{f}{z_c} = \frac{x_c}{X_c} = \frac{y_c}{Y_c} \quad (27)$$

其中, 是摄像机图像坐标系下的坐标, 则将上面的关系式化成齐次坐标式为:

$$Z_c \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

3.3 数字化图像(理想图像物理坐标系到图像像素坐标系)

摄像机图像坐标系的原点, 也就是光轴与像平面的焦点在理想情况下应该是位于图像的中心点, 但是由于相机制造工艺的限制, 一般都有偏离。若摄像机图像坐标系 (x, y) 与原点图像坐标系 (u, v) 中的坐标为 (u_0, v_0) , 像平面上每一个像素点在 x 轴, y 轴方向上的物理尺寸为 dx, dy , 则图像中任意一个像素点在两个坐标系中满足如下关系:

$$\begin{cases} u = \frac{x_c}{dx} + u_0 \\ v = \frac{y_c}{dy} + v_0 \end{cases} \quad (29)$$

化为齐次坐标与矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

由式 (27)、(29) 和 (30) 可以得到一个三维空间坐标点到实际图像像素坐标点的映射, 如下:

$$\begin{aligned} Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \beta & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \tilde{x}_w \end{aligned} \quad (31)$$

M_1 、 M_2 分别是摄像机标定的内外参数, 其中 M_1 为相机的内参数, M_2 为外部参数, 包括旋转矩阵和平移矩阵。

M_1

4 实验与数据分析

基于 matlab 平台设计了操作界面图,由此界面可以看出可以通过软件控制摄像机的打开、控制曝光时间、采集图像、质心提取、距离计算的功能。能够通过蓝牙通讯调节发光点的亮度。

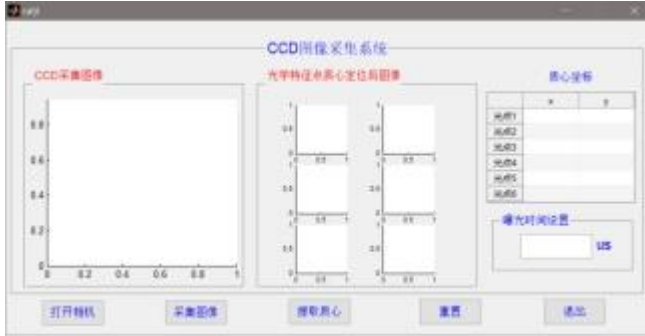


图4 上位机 GUI 界面

Fig.4 GUI interface for upper computer

系统完成后,对测量系统进行测试,对一物体上下表面各取一点分别测取 20 组数据,结果如下:

表1 400mm 量块沿平行于 X_c 轴方向测量

Table 1 400mm standard gage measurement oriented in parallel X_c (mm)

	400mm 标准量块		
	第 1 组	第 2 组	第 3 组
1	400.01	400.03	399.99
2	400.03	399.99	400.02
3	400.00	400.02	400.04
4	400.02	400.07	399.99
5	400.04	400.03	399.93
6	399.98	400.08	400.01
7	400.05	399.98	399.98
8	400.02	400.03	399.97
平均值	400.02	400.03	399.99
标准差	0.02	0.04	0.03
U_{95}	0.06	0.11	0.07

表2 400mm 量块沿平行于 Y_c 轴方向测量

Table2 400mm standard gage measurement oriented in parallel Y_c (mm)

	400mm 标准量块		
	第 1 组	第 2 组	第 3 组
1	400.04	400.03	399.96
2	400.03	400.07	400.01
3	400.01	400.04	400.04
4	400.06	400.01	400.05
5	400.02	400.07	400.02
6	400.01	400.06	400.08
7	400.05	400.03	400.04
8	400.07	400.05	400.06
平均值	400.04	400.05	400.03
标准差	0.02	0.02	0.04
U_{95}	0.08	0.09	0.11

经过实验测量标准量块的尺寸,精度达到 0.01mm,结果满足要求。

5 结论

本文研究了一种基于光学测头的单目视觉测量原理的测量系统,完成光学测头的设计制作,实现特征点发光强度可调节。控制相机的曝光时间,达到特征点最优提取。提出一种基于光学测头的视觉测量算法,深入研究了单目视觉测量原理并提出利用正交迭代算法求解位置关系矩阵,最终利用求解的旋转和平移矩阵计算出被测点的空间坐标。为了进一步提高整个系统的测量精度,实现对光学特征点质心的亚像素定位,提出了利用基于双三次插值的高斯曲面拟合算法定位光学特征点的质心。利用 Matlab 对本文提出的算法进行程序编写,设计 GUI 界面,控制摄像机进行图像采集并处理,最终获得测量结果。通过对实验结果的分析,验证了测量系统的可行性。

参考文献

1. 刘长英,大尺寸单目视觉测量关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
2. 齐丽娜,张博,王战凯.最大类间方差法在图像处理中的应用[J].无线电工程,2006(07):25-26+44.
3. 吕瑞,王军伟,邵响.基于双线性插值的高斯曲面拟合定位算法研究[J].机床与液压,2013,41(03):83-85.
4. 王会鹏,周利莉,张杰.一种基于区域的双三次图像插值算法[J].计算机工程,2010,36(19):216-218.

基于 51 单片机的无线电能传输系统的设计*

周志鹏；徐佳辉；刘香江；许得锋

（吉林大学 仪器科学与电气工程学院）

摘要：本设计主要利用电磁耦合原理，通过初、次级线圈的电磁感应来实现电能的传输。基于此种方式的无线电能传输系统主要由三大部分组成，即能量发送端、感应线圈、能量接收端。当发射线圈中通入交变电流后，该电流将在线圈周围介质中形成交变磁场，接收线圈在交变磁场中产生感应电动势进而供电给移动设备或者电池。该装置以发射模块和接收模块为核心，通过 51 单片机产生 PWM 波经过推挽传至驱动管 MOSFET，并经整流电路将直流电变为高频交流电实现无线电能传输。

关键词：电磁感应 无线充电 谐振耦合

Design of Radio Energy Transmission System Based on 51 Single Chip Microcomputer

ZHOU Zhi Peng; XU Jia Hui; LIU Xiang Jiang; XU De Feng

(College of instrument Science and electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: This design mainly uses the principle of electromagnetic coupling to realize the transmission of electric energy through the electromagnetic induction of the primary and secondary coils. The radio energy transmission system based on this method is mainly composed of three parts, namely, an energy transmitting end, an induction coil, and an energy receiving end. When an alternating current is applied to the transmitting coil, the current will form an alternating magnetic field in the medium surrounding the coil, and the receiving coil generates an induced electromotive force in the alternating magnetic field to supply power to the mobile device or battery. The device takes the transmitting module and the receiving module as the core, and the PWM wave generated by the 51 single-chip microcomputer is transmitted to the driving tube MOSFET through push-pull, and the direct current is converted into high-frequency alternating current through the rectifier circuit for wireless transmission.

Keywords: Electromagnetic induction Wireless charging Resonant coupling

0 前言

现今几乎所有的电子设备，如手机，MP3 和笔记本电脑等进行充电的方式主要是一端连接交流电源，另一端连接便携式电子设备充电电池的有线电能传输。这种方式有很多不利的地方，首先频繁的插拔很容易损坏主板接口，另外使用不正确也可能带来触电的危险。因此，非接触式感应充电器在上个世纪末期诞生，凭借其携带方便、成本低、无需布线等优势迅速受到各界关注。目前无线充电的技术已经开始在手机中运用，由于无线传输的距离越远，设备的耗能就越高。^[1]要实现远距离大功率的无线电能转换，就需要克服设备的高耗能问题。所以，实现无线充电的高效率能量传输，是无线充电器普及需要解决的首要问题，另一方面是建立统一的标准，使不同型号的无线充电器与不同的电子产品之间能匹配。

磁谐振耦合无线电能传输技术的理论基础是“耦合模理论”。假如能量发射装置与接收装置的谐振频率相同，发射器在这个特定的谐振频率下产生交变磁场，^[2]发射装置在交变磁场中先产生自谐振，并产生频率相同的交变磁场，当接收装置靠近发射装置时，也会产生自谐振，接收装置不断积聚能量并传给负载，这样就可以实现能量的无线传输，电路的总体拓扑图如图 1 所示。

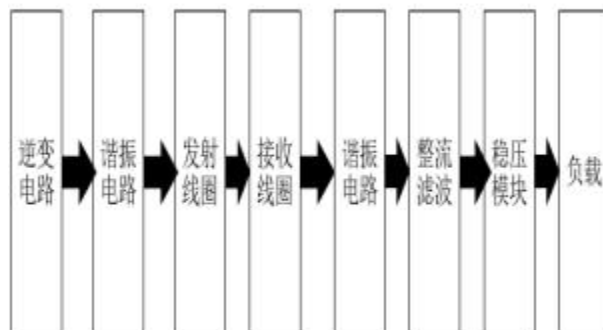


图 1 电路的总体拓扑图

Fig.1 The overall circuit topology

1 实验方案

1.1 总体方案介绍

1.2 波形发生电路方案选择

* 指导老师：段清明

项目类型：大学生创新训练项目（2017B65645）

方案一：利用石英晶体振荡器,此振荡器是根据石英晶体片的压电效应制作成的。这种石英晶体片在外加交变电场的作用下会产生机械振动,当交变电场的频率与石英晶体的固有频率相同时,振动变得很强烈,这就是晶体谐振特性的反应。^[3]虽然石英晶体振荡器产生的方波频率稳定性高,但是不容易调节频率。

方案二：利用 51 单片机产生占空比可调的 PWM 信号,利用单片机在比较模式下输出的脉宽调制 (PWM) 波来实现 D/A 转换的工作原理。

方案三：利用 NE555 时基电路产生 PWM 信号,把一个二极管和电位器添加到异部模式运转的 555 定时器上,就能产生一个带有可调效率系数的宽频调制器,此方案可以产生 1 到 500KHZ 的波形。此方案频率调节简单,电路简单,缺点是功耗太大。

综合考虑以上三种方案,选择方案二。

1.3 谐振电路方案选择

方案一：采用串联谐振电路,由变频电源、励磁变压器、电抗器和电容分压器组成,电容与电抗器构成串联谐振连接方式;分压器并联在试验品上,用于测量试验品的谐振电压,并输出过压保护信号,通过调试输出信号经过激励变压器耦合传输给串联谐振回路。

方案二：采用并联谐振电路,在电阻、电容、电感并联电路中,出现电路端电压和总电流同相位的现象,叫做并联谐振,其特点是：并联谐振是一种完全的补偿,电源无需提供无功功率,只提供电阻所需要的有功功率,发生谐振时,电路的总电流最小,而支路电流往往大于电路中的总电流,为了进一步在发射端提高发射效率,根据高频电路里的知识可以知道,当电路处在谐振状态下线圈发射的效率最大,其谐振频率为 f 。

通过计算, $f=85\text{KHZ}$ 。(其中线圈电感 $L=46\mu\text{H}$, 并联电容为 304PF)

综合考虑以上两种方案,选择方案二。

1.4 驱动电路方案选择

方案一：驱动电路由缓冲器、电阻及一对小功率开关三极管对管组成。当控制信号为低电平时,同向缓冲器输出低电平, a 点电位为低电位,双极型三极管的基极电位为低电位,流过 NPN 型三极管的基极电流近似为零,三极管截止,相当于集电极与发射极间串联大电阻,而流过 PNP 型三极管的电流迅速达到饱和,三极管饱和导通,P 沟道绝缘栅场效应管的栅极近似接地,三极管截止;^[4]当控制信号为高电平时,同向缓冲器输出高电平, a 点电位为高电位,双极型三极管对管的基极电位为高电位,流过 NPN 型三极管的基极电流迅速达到饱和,三极管饱和导通,而流过 PNP 型三极管的基极电流近似为零,三极管截止,绝缘栅场效应管的栅极电位近似等于 +9V,场效应管导通。电阻是集电极开路同向缓冲器 U 的上拉电阻,电阻的作用是与功率三极管基极相连,在基极回路中形成电流驱动三极管,三极管是电流控

制器件,饱和时流过的电流很大,如果驱动电流不够,电压就会上升,如果驱动电流足够,饱和压降很小,开关频率效果不好,且速度较慢。^[5]

方案二：利用 MOS 管驱动, MOS 管具有极强的大电流和大功率处理能力、极低的导通内阻、极低的栅极电荷、良好的抗雪崩击穿能力、较强的驱动能力。场效应管是该装置的核心,在介绍该部分工作原理之前,先简单解释一下 MOS 场效应管的工作原理。MOS 场效应管也被称为 MOS FET,即 Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor(金属氧化物半导体场效应管)的缩写。它一般有耗尽型和增强型两种。本文使用的是增强型 MOS 场效应管,分为 NPN 型和 PNP 型。NPN 型通常称为 N 沟道型,PNP 型通常称 P 沟道型。对于 N 沟道型的场效应管其源极和漏极接在 N 型半导体上,同样对于 P 沟道的场效应管其源极和漏极则接在 P 型半导体上。对于场效应管,其输出电流是由输入的电压(或称场电压)控制,即可以认为输入电流极小或没有输入电流,这使得该器件有很高的输入阻抗。

采用 MOS 管 IRF540 构成驱动电路,因为 IRF540 开关管开启时间为 4nS,关闭时间为 3nS,理论上开关频率可以达到几十兆,并且功耗低,通过电流大,符合设计要求。

综合考虑以上两种方案,选择方案二。

1.5 接收线圈电路方案选择

方案一：全桥整流,图 2 为全桥整流的结构图:

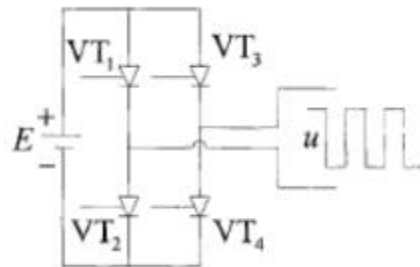


图 2 全桥逆变电路

Fig.2 Full-bridge inverter circuit

电子系统的正常运行离不开稳定的电源,除了在某些特定场合下采用太阳能电池或化学电池作电源外,多数电路的直流电是由电网的交流电转换来的,此种直流电源的组成以及各处的电压波形如图 2 所示。直流电源由电源变压器、整流电路、滤波电路、稳压电路组成。整流电路利用二极管的单向导电性组成整流电路,可将交流电压变为单向脉动电压。^[6]

整流(和滤波)电路中既有交流量,又有直流量。对这些量经常采用不同的表述方法:输入(交流)——用有效值或最大值;输出(直流)——用平均值;二极管正向电流——用平均值;二极管反向电压——用最大值,此设计比较复杂。

方案二：半桥整流,半桥整流是将桥式整流的两个二极管连接在一起,用两个半桥整流电路可组成一个桥式整流电路,一个半桥也可以组成变压器

带中心抽头的全波整流电路。用两只二极管，利用变压器线圈的中心抽头形成对称回路。此结构简单，成本低，结构图如图 3 所示：

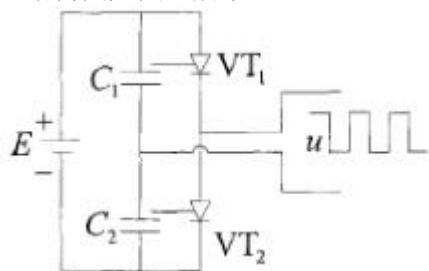


图 3 半桥逆变电路

Fig.3 Half-bridge inverter circuit

综合考虑以上两种方案，选择方案二。

1.6 线圈的选择与论证

方案一：选用空心铜管。空心铜管方便且一般都有成品，但是规格和大小不好计算，而且价格较高。

方案二：选用漆包线。漆包线绕法由个人需要决定，并且可以通过理论计算来决定环绕的圈数，而且这种铜丝方便购买，不用后也方便回收，可以减少资源的浪费。

综合考虑以上两种方案，方案二更简单方便，所以选择方案二。

1.7 单片机的选择与论证

方案一：51 单片机，它是目前市面上最常见的单片机，很多单片机开发板都是以 51 单片机为基础来进行升级的，所以 51 单片机更大众化，资源也很丰富，此单片机处理能力强大，体积很小，很适宜焊接，功能也是无比的强大，但是缺点是比较耗能，内存也比较小，对于一些复杂的大型运算比较吃力。

方案二：MSP430 单片机，它是美国德州仪器公司为单片机爱好者开发的一款单片机，处理能力也很出色，功能也很强大，最主要特点是它的功耗十分小，但是价格比较昂贵，并且使用较复杂，对于一些要求不高的用户来说，51 单片机更实用。

综合考虑以上两种方案，选择 STM 系列的 89C51 单片机。

2 理论分析

2.1 电磁谐振耦合无线电能传输系统的理论基础

电磁谐振耦合无线电能传输系统的基本理论是麦克斯韦电磁场理论，下面将从理论出发分析电磁谐振耦合无线电能传输过程中磁场的传播途径和方式。麦克斯韦电磁场理论认为运动的电荷或者交变的电场在其周围能够产生磁场；而交变的磁场又能够产生电场。图 4 是螺旋线圈周围磁场的分布图，H 表示磁场强度，当螺旋线圈中通过交变电流时线圈的周围将产生交变磁场。磁场强度随线圈距离减小而增大。

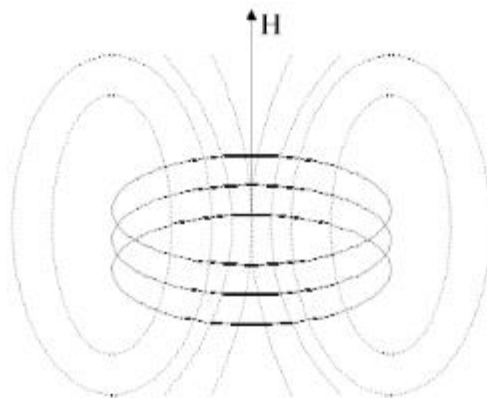


图 4 螺旋线圈周围磁场分布

Fig.4 Magnetic field distribution around a spiral coil

将发射线圈看作高频发射源，x 为接收线圈到发射线圈中心的距离，传输系统两个线圈周围磁场的分布情况如图 5 所示。将高频发射源周围的磁场分为两大区域--近场区和远场区。近场区距离发射线圈中心 $\lambda/2\pi$ (λ 为电磁波波长)，远场区距离发射线圈中心 $\lambda/2\pi$ 到无穷远。磁场强度和电场强度在近场区范围内没有明确的比例关系，但两者在远场区范围却有一定的比例关系。通常情况下，在高电压、小电流的场合，电场强度远大于磁场强度；而在低电压、大电流的场合，磁场强度远大于电场强度。^[7]

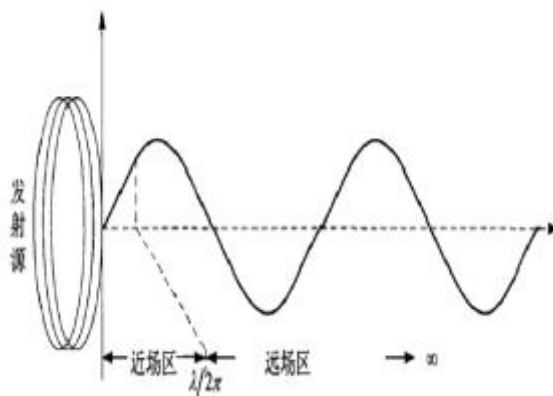


图 5 近场和远场区域的划分

Fig.5 division of near and far field regions

2.2 无损耗系统两谐振器模式的耦合

磁场谐振耦合无线电能传输的理论基础是耦合模型理论(CMT)。假设模拟信号为 $a_1(t)$ 和 $a_2(t)$ ，

固有频率为 ω_1 和 ω_2 ，系统无损耗，当两个谐振器之间耦合时，我们能够得到方程(1)：

$$\begin{cases} \frac{da_1(t)}{dt} = j\omega_1 a_1(t) + jk_{12} a_2(t) \\ \frac{da_2(t)}{dt} = j\omega_2 a_2(t) + jk_{21} a_1(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中 k_{12} 和 k_{21} 是两模型的耦合因数，然而根据能量守恒我们可以知道，随着时间的变化，能量逐渐趋于 0，由此我们可以知道：

$$\frac{d}{dt} (|a_1|^2 + |a_2|^2) = 0 \quad (2)$$

因为 $a_1(t)$ 和 $a_2(t)$ 可以设置为任意值，耦合关系为：

$$k_{12} = k_{21}^* = k \quad (3)$$

由方程(1)-(3)我们可以得知：

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right)^2 + |k_{12}|^2} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \pm \Omega_0 \quad (4)$$

2.3 有损耗系统两谐振器模式的耦合

考虑一般实际系统中存在损耗，所以如果把耦合模型联系到当前无线电力系统中是很容易的，据此可以得到下面的耦合微分方程：

$$\begin{cases} \frac{da_s(t)}{dt} = (j\omega_s - \Gamma_s) a_s(t) + jk_{SD} a_D(t) \\ \frac{da_D(t)}{dt} = (j\omega_D - \Gamma_D) a_D(t) + jk_{DS} a_s(t) \end{cases} \quad (5)$$

其中 $a_s(t)$ 和 $a_D(t)$ 表示信号源和设备的模式信号， $\omega_{s,D} = 2\pi f_{s,D}$ 是各自的角频率， $|K_{SD} = K_{DS}|$ 是耦合因素， $\Gamma_{s,D}$ 是各自的衰减率，解方程组可以得：

$$\begin{cases} L(a_s(t)) = \frac{jk_{SD} a_D(0) + a_s(0)(s + \Gamma_D - j\omega_D)}{(s + \Gamma_s - j\omega_s)(s + \Gamma_D - j\omega_D) + k_{SD} k_{DS}} \\ L(a_D(t)) = \frac{jk_{DS} a_s(0) + a_D(0)(s + \Gamma_s - j\omega_s)}{(s + \Gamma_s - j\omega_s)(s + \Gamma_D - j\omega_D) + k_{SD} k_{DS}} \end{cases} \quad (6)$$

这里我们只考虑线圈 S 和线圈 D，发射和接受的单匝线圈暂不考虑，同时假设线圈 S 和线圈 D 完全相同，同时该系统在开始传递能量时，线圈 S 的能量为 1，在这种形式下，我们可以非常容易地讨论谐振情况与非谐振情况下线圈的能量传递。

2.3 无线传输系统工作原理分析及效率计算

把直流变为交流，通过电磁感应原理，使接收端产生对应的交流，然后利用整流电路将交流电变为直流电再驱动相应的设备。

系统的输入功率和输出功率可通过 $P_{in} = U_{dc} \times I_{dg}$ 、 $P_{out} = U_i^2 / R_i$ 两式进行计算，其中

U_{dc} 、 I_{dg} 分别为逆变器的输入电压和电流， U_i 为 u_i 的有效值，通过测量多组数据并计算，可得输出功率、传输效率随距离的变化曲线。效率的计算公式

$$\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} \times 100\%$$

为：效率

3 电路设计

3.1 电源转换电路设计

由于系统采用 12V 直流供电，而单片机的供电电压为 5V，所以需要把 12V 电压转换为 5V 电压，本设计采用三端正向稳压电路，芯片型号为 7805，电路图如图 6 所示：

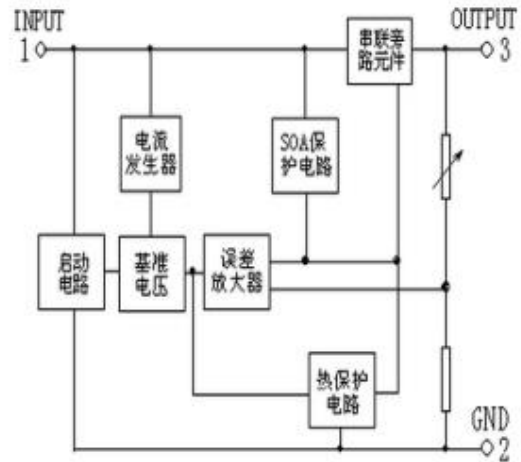


图 6 正向稳压电路

Fig.6 Forward voltage regulator
7805 是 TO-220 封装，能提供多种固定的输出

电压，应用范围较广，内含过流、过热和过载保护电路，带散热片工作时，输出电流可达 1A。虽然是固定稳压电路，但改变外接元件，可获得不同的电压和电流，电压转换电路如图 7 所示。

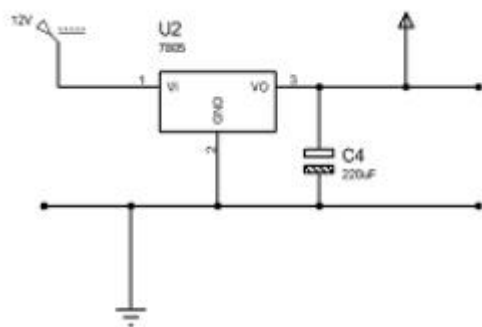


图 7 电压转换电路

Fig.7 Voltage conversion circuit

3.2 接收电路设计

接收电路只需将接收线圈感应到的能量进行转换，因此设计起来比较简单。而负载充电时需要直流电流以及电压，因此需要将感应线圈接收到的能量转换成直流电，所以需在整体电路的最后一级加上整流滤波电路。接收电路如图 8 所示。

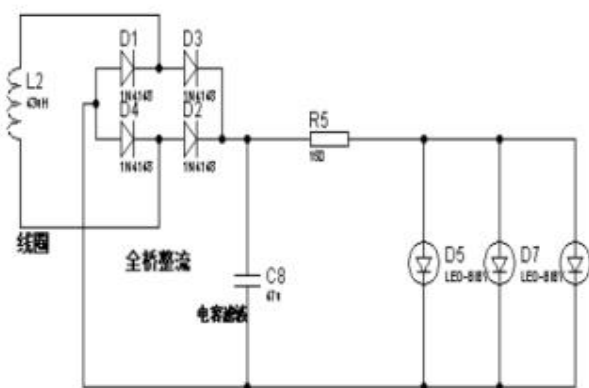


图 8 接收电路

Fig.8

3.3 感应线圈设计

本设计采用半径为 0.2mm 的铜芯线圈绕制而成，感应线圈直径约为 15cm，绕线共计 34 圈左右，经过测试其电感约为 43μH 左右。采用这样的设计的理由如下：a.线圈不能绕太少，因为太少的话电感不够大。b.线圈也不能绕太多，因为若线圈绕制过多，电路在并联谐振时会由于谐振频率较高导致其感抗过大，导致电路中产生的电流较小，产生的磁场强度必然也就小。^[8]结合实际情况，我们制作的线圈如图 9 所示：

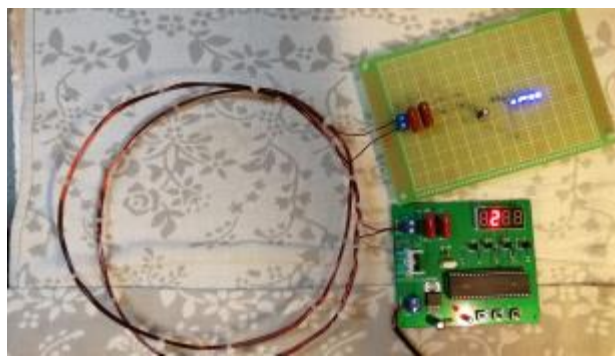


图 9 感应线圈

Fig.9 Induction coil

4 测试结果

4.1 距离范围测试

本系统接收端采用 6 个额定功率为 1W 的 LED 灯作为负载，并设定 NE555 输出振荡信号的频率约为 440KHz。

当发射线圈与接收线圈之间的距离发生变化时，磁场强度的大小也会发生变化，因此输出电压的大小也会随着改变，即当发射线圈与接收线圈之间距离增大时，磁场变弱，输出电压减小。在距离每次递增 1cm 的高度的情况下，测得输出电压、输出电流及输出功率的大小如下表 1 所示

表 1 测试数据

Table 1

线圈距离 (cm)	输出电压(V)	输出电流 (mA)	输出功率 P(W)
0	11.6	158	1.833
1	11.5	75.9	0.873
2	11.5	42.3	0.486
3	11.0	28.6	0.315
4	10.5	16.9	0.177
5	10.5	9.2	0.097
6	10.1	5.1	0.051
7	8.7	3.0	0.026

由上表可知：随着线圈距离的增大，输出电压、输出电流以及输出功率都在随之降低。

5 总结与展望

5.1 总结

本文以实现中程距离的无线电能传输为目标，采用电磁谐振耦合式无线能量传输技术，运用理论与实验相结合的方法，以实现距离、效率、功率最大化为设计目的，研究并设计了一款无线电能传输系统。本文详细介绍了电磁谐振耦合无线电能传输系统中发射电路、传输电路和接收电路的方案选择与设计，对发射电路中各个模块以及模块的功能、设计原理都做了详细的阐述，对接收电路中整流、滤波和稳压电路也做出了详细的说明，总体来说，这次设计取得了预期的效果，实现了预期的功能，

当然还有很多值得改进的地方，这需要我们不断地学习并完善。

5.2 展望

由于作者的相关理论水平以及精力、时间有限，在如下方面还存在不足，以待进一步研究。

(1) 没有考虑电路的控制，所制作的充电器为一个开环系统，接收端对发射端没有反馈，当系统负载变化时，系统的负载特性会发生变化，因此需要进一步分析系统的负载特性。

(2) 本装置中流经到导线的电流较大，电阻、二极管、三极管都为耗能元件，因此器件上的损耗较大。可通过合理设计电路结构，选取合适的元器件，减少整个系统的能量损耗，以提升整个系统的效率。

参考文献

1. 张茂春, 王进华, 石亚伟. 无线电能传输技术综述[N]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2009, 26 (04): 485-488.
2. 夏晨阳. 感应耦合电能传输系统能效特性的分析与优化研究[D]: (博士学位论文). 重庆: 重庆大学, 2010.
3. 范明. 谐振耦合式电能无线传输系统研究[R]: (硕士学位论文). 太原: 太原理工大学, 2012.
4. 童诗白等. 模拟电子技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
5. 黄辉, 黄学良, 谭林林等. 基于磁场谐振耦合的无线电力传输发射及接收装置的研究, 电工电能新技术, 2011, 30 (01): 32-35.
6. 潘力. 一种无线电能传输系统的设计[D]. 成都: 电子科技大学电子工程学院, 2013.
7. 张峰, 王慧贞. 非接触感应能量传输系统中松耦合变压器的研究[J]. 电源技术应用, 2007, 10(4): 54-58.
8. 王欢. 基于无芯 PCB 变压器的无线充电系统的研究 . 西安电子科技大学硕士学位论文, 2010, 1.

基于虚拟仪器的晶体管特性图示仪设计*

解来斌；王兴达；刘 旭

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院)

摘要：以虚拟仪器技术及思想为基础，设计了一款晶体管特性图示仪，配合通用的计算机、数据采集卡及上位机，可以实现对各种类型晶体管特性曲线的实时绘制。其中上位机使用 LabVIEW 软件编写，数据采集使用国产数据采集卡斯迈科华 USB-4220。经测试，所设计的晶体管特性图示仪可以测量简单低频率的 BJT，具有一定输出功率，绘制出的曲线与官方提供的特性曲线接近。

关键词：虚拟仪器 晶体管 LabVIEW 特性曲线

Design of Transistor Characteristic Graphic Instrument Based on Virtual Instrument

XieLaibin; WangXingda; LiuXu

(School of Instrument Science and electrical engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: Based on the virtual instrument technology and ideas, this article designs a transistor characteristic grapher. With the common computer, data acquisition card and host computer, real-time rendering and observation of various transistor characteristic curves are realized. The host computer was written using LabVIEW software, and the data acquisition was done using the domestic data acquisition Casmercohua USB-4220. After testing, the meter can measure BJT with a certain output power. The drawn curve is close to the characteristic curve provided by the official.

Key words: virtual instrument transistor LabVIEW characteristic curve

0 引言

晶体管的发明是科技领域上一件具有里程碑意义的事，在晶体管出现之前，电子设备使用的均为真空电子管，与真空电子管相比，晶体管具有体积更小，功耗更低，放大倍数更大，开关频率更高，可靠性更高，便于集成化，无需预热即可工作的优点。由于晶体管的种种优势，不就它便取代了在技术上已接近瓶颈的真空电子管，现在，晶体管已广泛应用到人们生产生活中的各个领域，成为电子、电气科学中最重要一种元件之一。晶体管是一种半导体器件，在电路中主要起到放大、开关、稳压、整流和检波的作用，从广义上讲，晶体管包括基于半导体材料生产的一切电子电气元件，其中包括二极管、三极管、可控硅等等，但通常人们所说的晶体管则多指三极管 BJT。

双极型晶体管（Bipolar Junction Transistor，简称 BJT）由两个相反的 PN 结组成，根据极性的差异可分为 NPN 型管和 PNP 型管，根据所用制成材料不同可分为硅管和锗管。双极型晶体管是一种电流型控制器件，通过微弱的基级电流来控制相对较大的集电极电流，由于这种小电流控制大电流的作用，可将其看作电流放大器件，放大倍数从几十倍

到几千倍不等。

双极型晶体管作为较早使用的器件，是我们学习各类电能器件的基础，所以我们最先计划对 BJT 进行研究。

晶体管特性图示仪是一种专门的仪器，用于直观地观测晶体管的各种特性曲线，如输出特性曲线，输入/转移特性曲线等^[1]。鉴于晶体管在现代电子、电气领域的地位，其测量仪器的重要程度便不间可知。

上世纪 70 年代，我国上海无线电二十一厂在该厂 JT1 型电子管特性图示仪原理基础上，成功研制 QT2 型晶体管特性图示仪，80 年代，XJ4810 为代表的一批图示仪问世，进一步提升了国产晶体管特性图示仪的测量范围与精度。现在，晶体管特性图示仪正朝着智能化、虚拟化的方向发展，许多厂商已将嵌入式计算机内置到图示仪当中，使图示仪的功能和实用性得到了更大的提升。基于此，我们设计了基于虚拟仪器的晶体管特性图示仪。

1 技术简介及研究目标

1.1 虚拟仪器技术

虚拟仪器（Virtual Instrument）技术是利用高集成度的模块化硬件电路和设备，结合高效且灵活的

* 指导老师：张秉仁

项目类型：大学生创新训练项目（2017B65631）

软件来实现各种传统仪器仪表的功能^[2]。虚拟仪器的概念最早由美国国家仪器公司（National Instruments, 简称 NI 公司）提出, 随后便引起了一场传统仪器仪表测量技术的大变革, 使得计算机技术以不可阻挡的态势进入了测量仪器领域, 开创了电子测量领域‘软件既是仪器’的先河^[3]。虚拟仪器的组成部分主要有三个: 计算机作为基本载体; 软件作为整个仪器的核心; 高性能的 A/D 采集及信号调理电路作为关键环节。常见的虚拟仪器结构如图 1 所示。



图 1 常见虚拟仪器结构框图

Fig.1 Common virtual instrument structure block diagram

虚拟仪器主要有以下几个优点:

(1) 性能高

与传统仪器的嵌入式控制器相比, 虚拟仪器所使用的计算机或工作站完全继承了以现成的 PC 技术的优点, 在运算速度、各种任务处理上有明显的优势^[4]。

(2) 体积小, 集成度高

与传统测量仪器的分立式不同, 虚拟仪器技术对每一种设备的要求只是一个主体计算机和少许外围电路, 虽然一台计算机在占用空间和价值上往往会大于一台传统仪器, 但通过使用适当的总线协议, 可以让一台计算机同时控制多个外围硬件电路工作, 用户可以根据需求增添或减少硬件电路。

(3) 组合灵活, 拓展性强, 新品研发周期短

不同于传统仪器开发中的每台设备独立开发, 虚拟仪器的开发只需要遵循相同的总线协议, 在该基础上进行适当的软、硬件开发, 就能以极低的成本对现有设备进行改进, 或是进行某种新产品的研发^[5]。

1.2 LabVIEW

LabVIEW 是由 NI 公司推出的一种程序开发环境, 与一般的开发环境所使用基于文本的编译语言不同, LabVIEW 所使用的是图形化编译语言 (G 语言), 这种编程语言使程序变得生动形象, 也更加便于人们理解, LabVIEW 编程所产生的是后缀为 VI 的文件, LabVIEW 也可将编辑出的程序生成独立的可执行文件, 供开发人员直接将程序生成为独立的仪器面板^[6]。LabVIEW 编程界面和其程序控制前面板分别如图 2、图 3 所示。

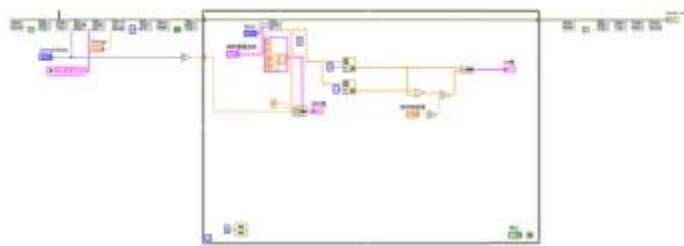


图 2 编程界面

Fig.2 Programming interface

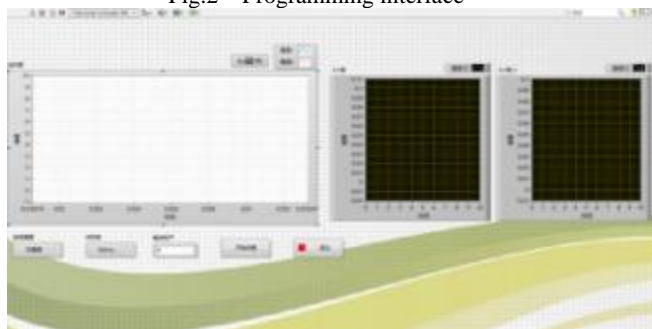


图 3 前面板

Fig.3 The front pane

1.3 研究目标

研制一款基于虚拟仪器技术的晶体管图示仪, 在精度和功率范围上要求不是很高, 在体积上远远小于传统图示仪, 结合数据采集卡和装有 LabVIEW 软件的计算机即可直观地看到晶体管转移特性曲线。

测量曲线类型: BJT 输入特性曲线、BJT 输出特性曲线

主要工作:

硬件上, 搭建出能分别产生电流、电压阶梯波和同步扫描电压的信号发生装置, 信号幅值可调且具有一定的带载能力; 搭建下位机及通信系统, 能够接收上位机指令并对硬件电路进行参数设置。

软件上, 使用 LabVIEW 编写上位机, 通过网口与下位机控制器通信, 控制图示仪各项参数, 能够接收采集卡采集的数据并在屏幕上以曲线形式显示; 编写下位机程序, 产生测量晶体管所需的各种波形, 控制电路中的开关器件, 更改电路测量模式及信号幅值。

2 图示仪整体方案

图示仪基本结构如图 4 所示, 计算机通过网口与硬件电路通信, 控制电路工作各项参数, 硬件电路负责发生信号并对信号进行调理、放大, 而后施加给被测管, 被测管的各项参数通过 USB4220 采集卡采集, 并通过 USB 口传送回计算机, 进行处理与显示, 从而完成对晶体管的测量。

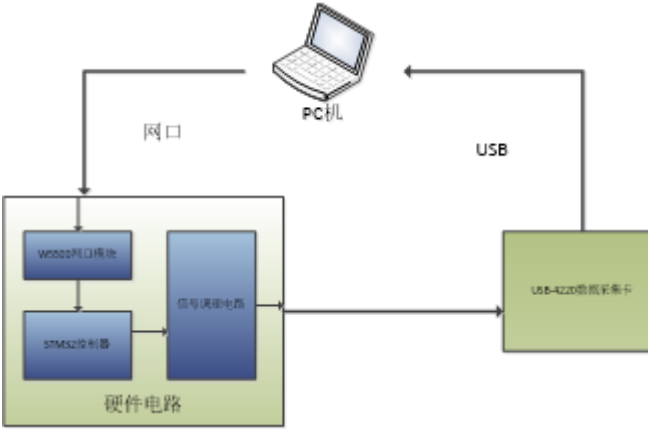


图 4 图示仪基本结构

Fig.4 Basic structure of the graphic instrument

2. 1 软件部分方案

(1) 上位机方案

上位机用 LabVIEW 软件编写，主要分为两部分：硬件电路控制、接收并处理采集卡传回的数据。USB4220 采集卡出厂资料中已包括详细的模块子VI，这些功能模块子 VI 使用调用动态链接库（dll 文件）的方式实现功能，不便于用户进行修改，但是用户可以根据需要将这些函数进行相应的组合以实现不同的功能，再配合 LabVIEW 内部的其他函数以达到数据接收、处理、显示的目的^[7]。



图 5 LabVIEW 中的 TCP 函数

Fig.5 TCP functions in LabVIEW

(2) 下位机方案

下位机的控制器选用了 STM32F103ZET6 型号控制器，STM32 系列控制器是 ST 公司推出的高性能、低功耗、低成本嵌入式微控制器，基于 ARM cortex-M 内核。本设计中选用的 STM32F103ZET6 型号控制器含有两路 D/A 通道，可用于同时产生阶梯信号和扫描信号^[8]。

2. 2 信号调理电路方案

信号调理电路结构如图 6 所示，STM32 产生的阶梯信号经由比例可调的同相放大电路放大到指定幅值，其中放大倍数调节是通过模拟开关芯片 CD4051 选取不同接入电路电阻实现，而模拟开关芯片的控制使能端则是由 STM32 的 I/O 口来控制，

从而实现了用程序控制电路参数。阶梯信号经同相放大电路放大后，根据测量的是 NPN 管或 PNP 管来决定是否进入反相电路，进入电压-电流转换电路，而后进入功率放大电路。净功率放大后的信号便可作为输出信号施加到被测晶体管上^[9]。集电极电压扫描信号原理与阶梯信号的处理方式大致相同，只是少了电压电流转换的环节，在此不再赘述。

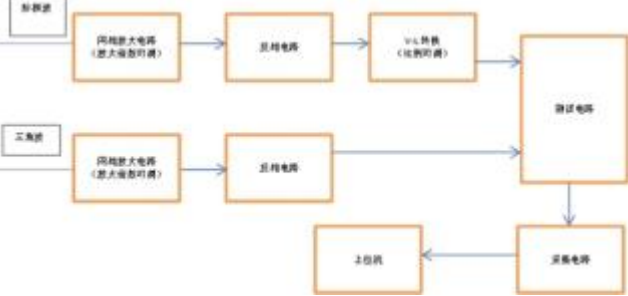


图 6 硬件电路结构图

Fig.6 Hardware circuit diagram

2. 3 采集卡选取

本设计中选用的采集卡为斯迈科华 USB-4220 数据采集卡，该系列为通道同步采样，同时该采集卡具有超低底噪和高精度。USB-4220 型号具有 12 位的分辨率和最高 500K 的采样率^[10]，足够满足设计需求，采集卡如图 7 所示。



图 7 斯迈科华 USB-4220 采集卡

Fig.7 Smaikohwa usb-4220 acquisition card

2. 4 BJT 测量及采集

图示仪可测量 BJT 的输出曲线及转移曲线，每种曲线的测绘对应着不同的测量电路，也对应着不同的信号采集电路。

BJT 输出特性曲线测绘如图 8 所示，发射机接地，基级施加阶梯电流信号，集电极连接限流电阻，限流电阻另一侧施加与基级阶梯电流信号同步的‘三角波’电压信号，此处的三角波为异形三角波，在过零点时会有一小段时间停留在零值。这是因为绘制输出特性曲线时，需要分别在基级施加不同的驱动电流时绘制集电极电压-电流曲线，基级驱动电流从一个值变为另一个值时，集电极电压要处于零点，而实际信电路中，基级阶梯电流值不可能一瞬间转变，需要一个过渡时间，而当使用图 9 所示的

三角波作为集电极信号时，由于三角波的零点只有一瞬间，很可能会造成基级信号切换时，集电极电压没处于零点，使绘制出的输出特性曲线簇相邻的曲线间存在‘连线’。而改用图 8 的波形，则可以保证基级阶梯信号切换时集电极电压始终处于零点，从而消除‘连线’现象。测量时，CH2 直接采集出集电极电压，作为 X 轴物理量；CH1 与 CH2 差值除以 R 得到集电极电流，作为 Y 轴物理量。

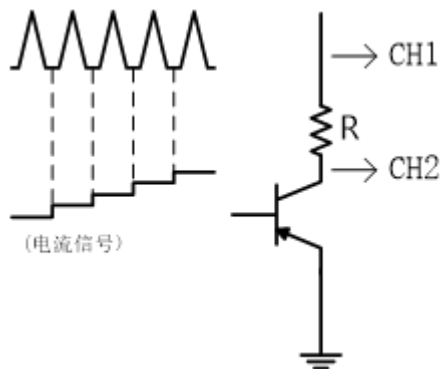


图 8 BJT 输出特性测绘
Fig.8 BJT output characteristic mapping

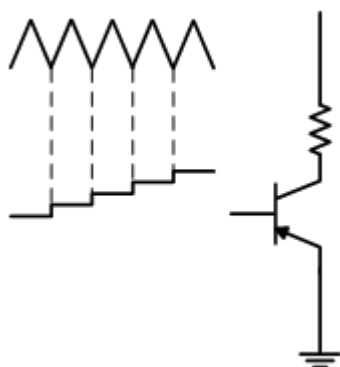


图 9 使用一般三角波测绘
Fig.9 Use general triangular wave mapping

3 图示仪结构设计

3.1 硬件电路（信号调理部分）

(1) 放大倍数可控的同相放大电路

由 STM32 产生的阶梯信号和扫描信号最大幅值只有 3.3V，若想要使信号幅值更高，需要进行放大，且放大倍数需要上位机控制。图 10 为放大倍数可控的同相放大电路。图中 CD4051 是一款模拟开关芯片，根据 A、B、C 三个管脚的电平信号不同选择 CHAN0 至 CHAN7 中一个通道接至 COM 管脚。假设芯片选定通道外接电阻为 R，则电路放大倍数

$$A_v = 1 + \frac{R}{R_{33}}$$

计算式为。电路中，R33 为 10K，分别赋予 R25 至 R32 不同的阻值，即可使电路获得不同的放大倍数，从而使输出信号获得不同的电压幅值。

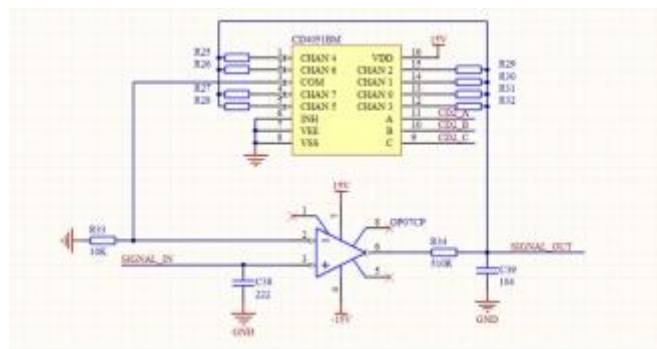


图 10 可调同相放大电路

Fig.10 Adjustable in phase amplifying circuit

由于 CD4051 供电电压为 15V，所以若使能端 A、B、C 判定为高，需要输入 15V 电压，STM32 的 GPIO 口输出电压只有 3.3V，因此需要设置驱动电路。驱动电路结构如图 11 所示，以 CD2_A 端口为例，当 STM32 相应管脚输出高时，Q5 导通，CD2_A 接地输出低电平；当 STM32 输出低电平时，Q5 截止，CD2_A 通过 10K 上拉电阻接到 15V，输出近似 15V。

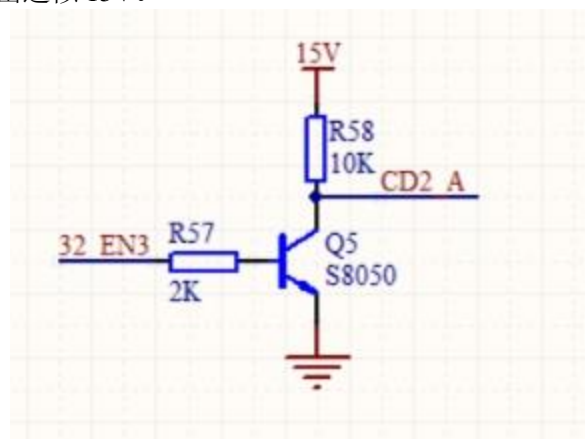


图 11 CD4051 使能端驱动电路

Fig.11 CD4051 enable terminal driver circuit

(2) 反相放大电路

经同相放大线路输出的信号为正电压信号，若测量 PNP 型 BJT 或 P 型 MOSFET，需要负电压信号，这时就需要反相放大电路将信号取反。反相电路结构如图 12 所示，取 R35=R36=10K，则输入输出关系为 $U_{out} = -U_{in}^{[11]}$ 。

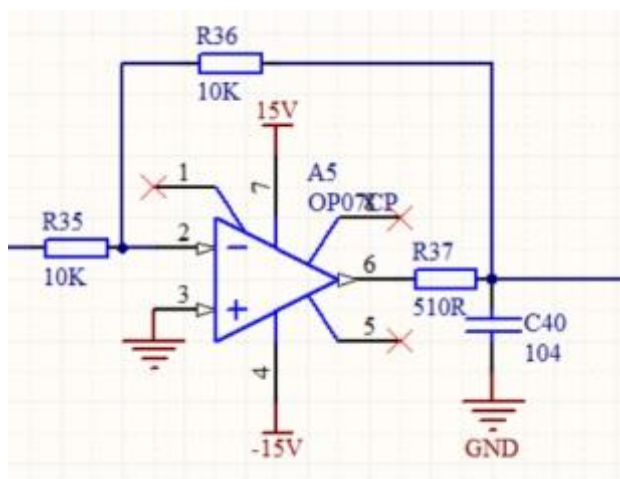


图 12 反相电路

Fig.12 Reverse phase circuit

(3) 电压-电流转换电路

由于 BJT 是电流控制型晶体管，所以其基级阶梯信号应该为电流信号，故应该设置一个电压-电流转换电路。电压-电流转换电路如图 13 所示，取 $R33=R34=R35=R36=10K$ ，有 $U_i=U_1-U_2$ ，假设 CD4518 接入电阻为 R ，根据运放‘虚断’，有

$$I_o = \frac{U_1 - U_2}{R} = \frac{U_i}{R}$$

可见， R 一定时，输出电流与输入电压呈线性关系，同时，还可使 CD4518 选取不同阻值的电阻来调节输出电流范围，以适应不同型号的 BJT^[12]。

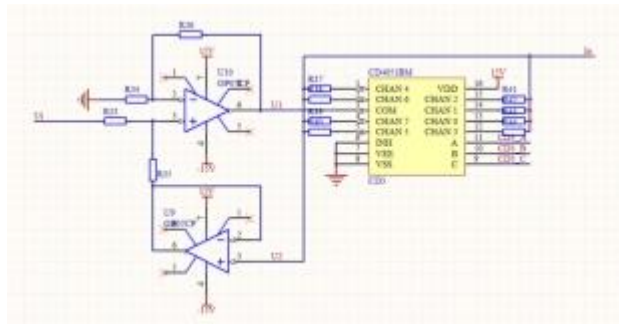


图 13 电压-电流转换电路

Fig.13 Voltage current conversion circuit

(4) 电路中的滤波处理

本电路中由于信号是使用 STM32 的 D/A 产生，所以初始信号中几乎没有杂波干扰，但电路中使用的开关电源芯片会对运放的供电电压产生高频噪声影响，频率大约 500KHz，所以需要进行一些常规的滤波处理。

①运放电源的处理：电路中使用的运算放大器 OP07 供电电压为 $\pm 15V$ ，设计中在每个运放的正负电源管脚均并联了 $100nF+10\mu F$ 电容，用来滤除运放电源的高频杂波。

②信号噪声处理：由于运放电源及各种因素，信号中不可避免会掺入噪声，因此在每个电路环节的输出端都进行了 RC 滤波处理（或者是直接并联对地电容，视情况而定）。

3.2 上位机软件

信号采集部分结合采集卡 USB-4220 自带资料，使用厂家提供的采集卡操作函数，可以直接采集到任意通道的数据并绘制该通道波形图。但是本设计使用的不是以时间为横坐标的图像，以输出特性曲线为例，横坐标为集电极-发射机（漏极-源极）电压，纵坐标为集电极（漏极）电流，所以需要将两个通道上的信号整合为一组数据并输出在同一个图像上。LabVIEW 中‘XY 图’控件可以实现该功能，将两组独立数据通过‘捆绑’函数组合为簇，输入到‘XY 图’控件中，即可将该数据以独立点或连线的形式显示在图像中。

3.3 下位机软件

该部分程序框图对 STM32 接收到网口传来的数据后进行解码，并对相应的 GPIO 引脚进行置位，以控制信号调理电路拓扑结构。当电路结构更改完毕后，进入信号发生模块，测绘晶体管时，上位机发送指令，下位机根据指令内容发生波形。

4 工作结果分析

系统搭建完成后，需要首先观察产生的两路同步信号是否达到要求，然后再进行测量。观察两路信号可以直接使用示波器，也可以使用 USB-4220 采集卡，波形如图 14。三角波以及阶梯波噪声小，信号同步较好，达到要求，完全符合需要。

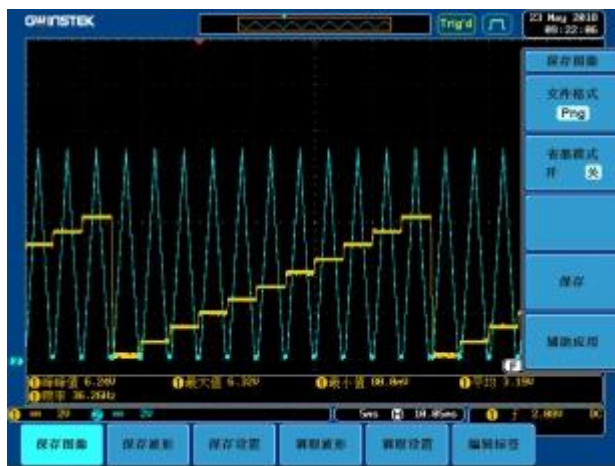


图 14 同步信号波形

Fig.14 Synchronous signal waveform

5 结论

本设计提供了一种晶体管图示仪的设计思路并初步实现里晶体管器件特性测量与曲线绘制，测试数据真实，但还有以下不足。

首先，本系统可以测量较小功率晶体管特性曲线，输出电压范围可发到 $\pm 15V$ ，电流范围最大可以达到 2A，但相比传统图示仪功率还是小了很多。为了达到便携的目的，暂不继续进行大功率、高电压方向的拓展。后续工作可以加入一些附加模块，

例如拓宽输出电压范围、增大信号输出电流强度，以测量更大功率的晶体管。

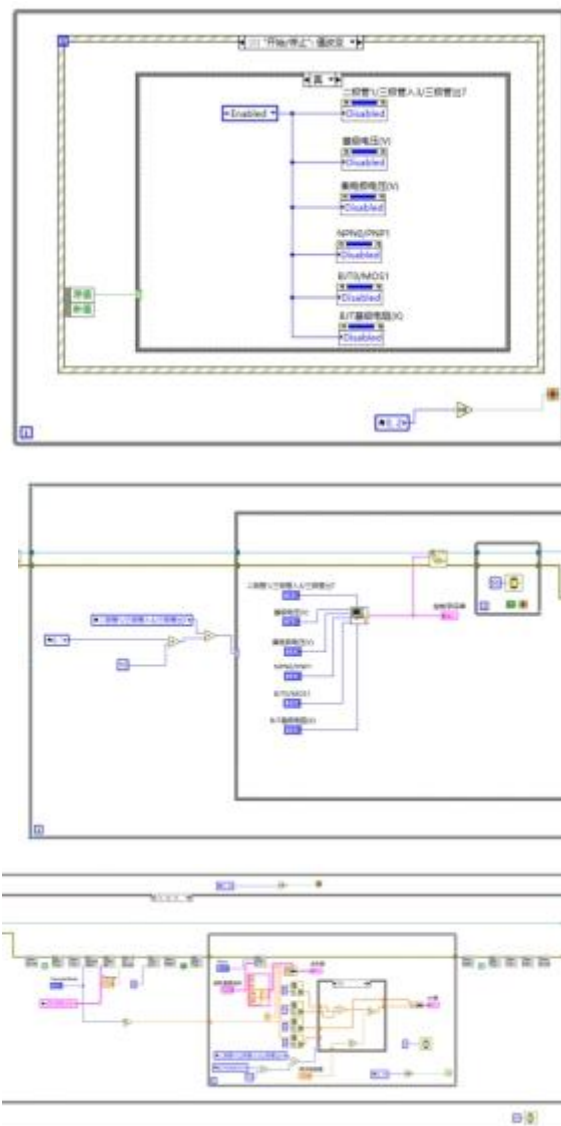
其次，本系统只是直观展示了晶体管的特性曲线，并没有对数据进行其他处理，无法直接看到晶体管的各种参数及放大倍数等。后续工作可以在上位机中加入一些数据处理，便于更直观、更全面地展示被测管的特性。

最后，由于时间关系，本系统使用了成品数据采集卡，没有发挥电路中 STM32 模数转换模块的功能，若想进一步提高系统集成度或便携性，可以考虑用 STM32 直接采集数据，但需要在上、下位机通信上做一些改进，以实现采集数据的实时上传与显示。

参考文献

1. 方尚侠. 基于 LabVIEW 和 USB 接口的虚拟晶体管特性图示仪[D]. 电子科技大学, 2006.
2. 刘俊. 基于虚拟仪器的晶体管特性测试仪的研究[D]. 重庆大学, 2008.
3. 赵中义著. 半导体管特性图示仪原理、维修、检定与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1994.
4. 袁渊, 古军. 虚拟仪器基础教程[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2002..
5. 刘俊. 基于虚拟仪器的晶体管特性测试仪的研究[D]. 重庆大学, 2008..
6. 侯国屏, 叶齐鑫. LabVIEW7.1 编程与虚拟仪器设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
7. Mukesh Kumar, Mansav Joshi, Sanjeev Sharma. Design and Implementation of Embedding Web Server for Real Time Data Acquisition and Logging System[J]. International Journal of Computer Applications, 2012, 42(11): 13-16.
8. National Instruments Corporation. LabVIEW User Manual. Reference Materials, 2003
9. 戴逸松. 电子系统噪声及低噪声设计方法[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1984.
10. Deshpande S G, Jenq-Neng H. A real-time interactive virtual classroom multimedia distance learning system[J]. Multimedia, IEEE Transactions on. 2001, 3(4): 432-444.
11. National Instruments Corporation. Using NI-VISA 3.0 to Control USB Device. Reference Materials, 2005.
12. 梁志国, 朱济杰. 数据采集系统动态噪声的评价方法[J]. 现代计量测试, 1999, (3): 23-26.

附录A 上位机部分程序框图



附录B 下位机核心程序代码

```
int main(void)

{
    uint16_t len;
    u32 data=0;
    u32 i;
    int a=0;
    int b=0;
    int c=0;

    delay_init();           //延时函数初始化
```



```

NVIC_PriorityGroupConfig(NVIC_PriorityGroup_2);
// 设置中断优先级分组 2

Dac1_Init();           //DAC1 初始化
Dac2_Init();           //DAC2 初始化

RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_GPIO, ENABLE); //使能 PG 端口时钟

GPIO_InitStructure.GPIO_Pin =
GPIO_Pin_0|GPIO_Pin_1|GPIO_Pin_2|GPIO_Pin_3|
GPIO_Pin_4|GPIO_Pin_5|GPIO_Pin_6|GPIO_Pin_7|
GPIO_Pin_8|GPIO_Pin_9|GPIO_Pin_10;
//PG.0~10 端口配置
GPIO_InitStructure.GPIO_Mode =
GPIO_Mode_Out_PP;      //推挽输出
GPIO_InitStructure.GPIO_Speed =
GPIO_Speed_50MHz;      //IO 口速度为 50MHz
GPIO_Init(GPIOG, &GPIO_InitStructure);
//根据设定参数初始化 GPIOG.10

initBSP();
reg_wizchip_spi_cbfunc(0,0);
reg_wizchip_spiburst_cbfunc(0,0);
Reset_W5500();
setNetwork();
uart_init(9600); //串口初始化为 9600

Dac2_Set_Vol(0);      //初始输设置为 0
Dac1_Set_Vol(0);
//GPIOG->ODR&=0X0000;
//GPIOG->ODR|=0X0400;    //GPIOG 初始化幅赋值
GPIO_SetBits(GPIOG,GPIO_Pin_10);

while(1)
{
switch(getSn_SR(0))
{
// 获取 socket0 的状态
case SOCK_INIT:           //
Socket 处于初始化完成(打开)状态
listen(0);// 监听刚刚打开的本地端口, 等待客户端连接
break;
case SOCK_ESTABLISHED:
// Socket 处于连接建立状态
if(getSn_IR(0) &
Sn_IR_CON)
{
setSn_IR(0,
Sn_IR_CON); // Sn_IR 的 CON 位置 1,
通知 W5500 连接已建立

```

```

} // 数据回环测试程序: 数据从上位机客户端发给 W5500, W5500 接收到数据后再回给客户端
len=getSn_RX_RSR(0);
if(len>0)
{
recv(0,buffer,len);
// W5500 接收来自客户端的数据, 并通过 SPI 发送给 STM32
W5500_print("%d\r\n",data);
data=0;
for(i=0;i<len;i++)
{
data=data*10+(buffer[i]-48);
}
GPIOG->ODR&=0X0000;
GPIOG->ODR|=data; //
继电器以及模拟开关控制位
}
break;
case SOCK_CLOSE_WAIT:
// Socket 处于等待关闭状态
close(0);
// 关闭 Socket0
break;
case SOCK_CLOSED:
// Socket 处于关闭状态
socket(0,Sn_MR_TCP,local_port,Sn_MR_ND);
//打开 Socket0, 并配置为 TCP 无延时模式, 打开一个本地端口
break;
}

switch((data>>11)&0x07) //判断波形输出类型
{
case 0: //000 无输出
Dac2_Set_Vol(0); //base
Dac1_Set_Vol(0);
GPIO_SetBits(GPIOG,GPIO_Pin_10);
break;
case 1: //001, 二极管测量模式
Dac2_Set_Vol(0); //base
Dac1_Set_Vol(0);
delay_us(150);
for(b=0;b<3001;b=b+10)
{
//collector 输出扫描信号

```

```

        Dac1_Set_Vol(b);
    }
    for(b=3000;b>=0;b=b-10)
    {
        Dac1_Set_Vol(b);
    }
    delay_us(150);
    break;
    case 3:                //011, 三极管输
入、转移特性测量模式
        Dac1_Set_Vol(3000);
//collector 输出恒定电压
        Dac2_Set_Vol(0);
        delay_us(150);
        for(b=0;b<3001;b=b+10)
        {
            Dac2_Set_Vol(b);
        }
        for(b=3000;b>=0;b=b-10)
        {
            Dac2_Set_Vol(b);
        }
        Dac2_Set_Vol(0);
        delay_us(150);
    break;
    case 7:                //111, 三极管
输出特性测量
        for(a=0;a<11;a++)    //阶梯信
号 and 扫描信号同步发生
        {
            c=a*300;
            Dac2_Set_Vol(c);    //基级阶
梯信号
            Dac1_Set_Vol(0);    //集电
极扫描信号
            delay_us(150);
            for(b=0;b<3001;b=b+20)
            {
                Dac1_Set_Vol(b);
            }
            for(b=3000;b>=0;b=b-20)
            {
                Dac1_Set_Vol(b);
            }
            Dac1_Set_Vol(0);
            delay_us(150);
        }
    break;
}
}

```

磁法探雷机器人*

赵鑫宇；马 智；崔鑫超

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院， 长春 130022)

摘要：对于二战后的余雷问题，世界各国都在积极寻求解决方案，但目前的探雷手段往往都存在着探雷效率不高，误报率多的问题，本文通过对当前国内外探雷技术和探雷手段的分析，采用磁法探雷，将 HMC 系列芯片组合成三轴磁阻传感器搭载轮式机器人上进行野外的地雷探测，通过 WIFI 技术进行可视化定位，并将地雷的具体位置通过 GPS 发送到上位机软件。实现了对模拟雷状物较高的发现率，并降低了误报的概率。实验结果能够成功发现地雷预警并将具体位置显示在上位机软件上。

关键词：磁阻传感器 地雷勘探 磁阻传感器 三分量 GPS 定位

The Detection Robot by Magnetic Method

Xinyu Zhao, Zhi Ma, Xinchao Cui

(Jilin university instrument science and engineering institute, changchun, 130021)

Abstract: Through the analysis of current domestic and foreign mine detection techniques and mine detection methods, magnetic detection is used to combine HMC series chips into a three-axis reluctance sensor on a wheeled robot for field mine detection. Through WIFI technology for visual positioning, and the specific location of mines sent to the host computer software through GPS. The experimental results can successfully discover the landmine warning and show the specific location on the host computer software.

Keywords: magneto-resistive sensor mine exploration magneto-resistive sensor three-component GPS positioning

0 前言

磁法探雷是目前有效的探雷手段之一，也是目前各国的研究方向之一，本实验主要通过 HMC 系列芯片组合成三轴磁阻传感器进行地雷探测，用轮式机器人带动采集模块进行野外地雷探测，发现并确定地雷的具体位置。通过机器人上的摄像头反馈实时信息，用上位机软件控制机器人的移动，进行数据采集，将采集到的数据经过处理分析，判断是否发现可疑金属地雷，并迅速在上位机软件上发出警报反馈当前位置信息。

1 硬件电路模块设计

1.1 采集模块功能

机器人的采集部分主要是测量地下表层的磁场，并判断这个磁场大小是否处在地雷外壳材料的范围，以此来判定地雷的位置。

磁阻传感器采用新型薄膜磁阻传感器 HMC1001、HMC1002 研制出一种三分量磁阻传感器，可以对地下磁场磁感应强度及磁感应强度的水平分量和垂直分量进行测定^[1]。这类磁阻传感器是 4 元件惠斯顿电桥配置，将磁场信号转变成差分输出电压信号，传感磁场低至 30u 高斯^[2]。这类传感

器具有低成本、高灵敏度的特点^[3]。

信号采集芯片选用美国模拟器件公司新型高精度，宽动态范围 AD7799，它是一个 3 通道 24 位的 ADC，通常适用于低频，高精度的工业级转换。可以直接测量传感器输出的微弱直流信号，内含可编程的增益放大器，其转换精度可以达到 24 位无误码^[4]。

1.2 测量磁场要素

为了方便观测和研究磁场，我们把地磁场分解成几个地磁要素。

在直角坐标系中，其 x 轴为地理北，Y 轴为地理东，Z 轴方向垂直向下。在研究任意一点磁场时，通常把这一点作为直角坐标系的原点 O，这一点的磁场称为总向量 T。T 在水平地表水平面上的投影为地磁场的水平分量 H。T 在 Z 轴的投影为地磁场的垂直分量 Z，T 与 H 的夹角 D 称为磁倾角，H 在 X 轴上的投影 X 为地磁场的北向分量，H 在 Y 轴的投影 Y 称为地磁场的东向分量，H 与 X 的夹角称为磁偏角。所以，地磁要素主要包含七个量 T，H，Z，X，Y，D，A^[5]。

这些要素的关系如下：

* 指导老师：赵静

项目类型：大学生创新训练项目（2017B65627）

$$\begin{aligned} Z &= T \sin D; \\ H &= T \cos D; \\ Z &= H \tan D; \\ Y &= H \sin A; \\ X &= H \cos A; \\ T &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}; \end{aligned}$$

1.3 磁电阻效应

磁电阻(MR)效应指的是导体或半导体在磁场的作用下其电阻值发生变化的现象^[6]。

对磁性金属铁钴镍及其相关合金来说,当外加磁场方向与磁体内部的磁化方向平行时,金属的电阻值几乎不变;当外加磁场方向偏离金属的内部磁化方向时,金属的电阻值减小,这就是强磁金属的各向异性磁阻效应。

各向异性磁阻传感器的基本单元是：将一种长而薄的坡莫合金用半导体工艺沉积在硅衬底上制成，当沿坡莫合金的长度方向通以一定的直流电，在垂直电流方向上外加一个磁场时，坡莫合金的电阻值会发生较大变化，利用这一变化来测量磁场的大小和方向^[7]。

它的变化公式服从下式:

$$\rho(\alpha) = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos^2 \alpha$$

坡莫合金薄膜的电阻率 ρ 依赖于磁化强度(M)和电流 (I) 方向的夹角。

1.4 三分量磁阻传感器的设计

为使三分量磁阻传感器中三个磁敏电阻的磁感应方向互相垂直,对芯片的放置方式的要求是成 90 度角垂直摆放, HMC1001、HMC1002 型磁阻传感器核心是惠斯通电桥,坡莫合金具有各向异性磁电阻效应,当电桥电阻的阻值改变时会导致传感器的输出的电压发生改变^[8];其内部有两个铝制的环状电流带 (SET/RESET STRAP),通过对环状电流带施加置位复位电流可以修正传感器的灵敏度,也可以置位和复位输出电压的极性。

本实验采用的磁阻传感器是利用磁性薄膜各向异性磁阻效应（AMR）工作原理^[10]。

当通电磁性薄膜置于不同的外加磁场中时, 薄膜电阻将会发生改变。电桥供电电源会驱动薄膜中的电流, 当空间磁场为零, 四片薄膜电阻阻值均为 R ; 当外界施加变化磁场时, 薄膜的磁化状态发生变化, 磁化方向将会顺着电流方向改变, 其中的两片薄膜电阻减小, 另外两片薄膜的磁化方向与电流方向相反, 电阻值增大。线性范围内输出的电压与被测量的磁场值成正比。

$$\Delta U_0 = (\Delta R / R) * U_B$$

$$\Delta U_0 = U_B * M * S^T$$

式中 R 为半导体薄膜电阻 S 为磁阻传感器灵敏度 M 为外加磁场值, 从而得出

$$M = \Delta U_D / (U_R * S)$$

即输出电压信号与外加磁场成正比。

磁信号采集电路将磁阻传感器测得的三个磁场分量 Z、Y、X 分别与 AD7799 的通道 1、2、3 相连，然后将 AD7799 转换后的数字量送至 STM32 单片机进行后续的分析处理；同时将两个磁阻敏感传感器的置位复位带相连，这样可获得相同的置位复位信号，保持置位复位时序上的同步。即将 HMC1002 的 S/R-(A) 与 HMC1002 的 S/R+(B) 相连，HMC1001 的 S/R- 与 HMC1002S/R-(B) 同时接地，在 HMC1001 的 S/R+ 与 HMC1002S/R+(A) 端同时施加相同的 S/R 脉冲。HMC1001 和 HMC1002 的信号输出 X、Y、Z 三个分量分别接到 AD7799 的三个输入通道上，AD7799 有自校准等功能，能够自动消除零点误差和满量程误差，并且减弱温度漂移的影响。

下图是 AD7799 的内部结构, 内部由模拟多路开关、输入缓冲器、可编程增益放大器、一体化调制器、可编程数字滤波器、9 个状态控制寄存器、串行接口、以及时钟发生器等组成。

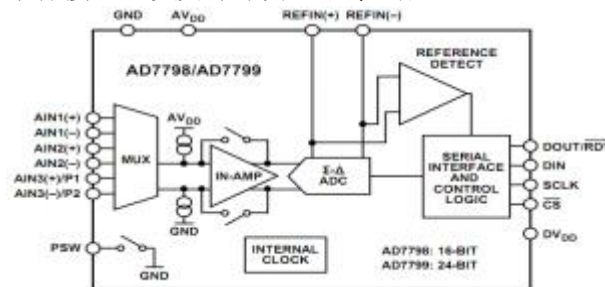


图 1 AD7799 的内部结构

Figure 1 The internal structure of AD7799

1.5 置位复位模块

由于在实验过程中,外加磁场足够强时,传感器的易磁化轴将会发生跳变,传感器的特性也会发生反转,若没有置位复位功能则传感器的测量值就会变得不精确,导致误差较大。因此在实际电路中,采用置位复位脉冲生成一个外部强恢复磁场,用单片机来控制 MOS 管的开通和关断来对电容进行充放电,从而产生强磁场使磁畴的极化方向达到统一,这样既可以提高传感器灵敏度,同时可以消除温度漂移所带来的影响。

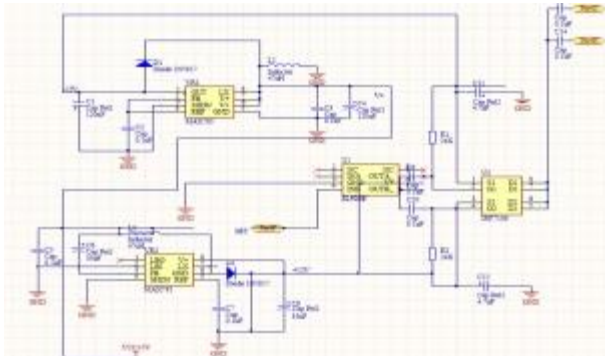


图2 置位复位电路

Figure 2 Set reset circuit

1.6 电源模块

对于机器人来说，电源模块是他在工作时至关重要的一部分，首先电源要提供稳定的无抖动的电源信号，保证各个部分都能在额定电压下稳定运行，其次才可以进行准确的测量与处理。电源模块可以将输入的电压转换成各器件所需要的标准电压如 +5V、+3.3V。

在采集电路因芯片 IRF7106 需要用到正负 12v 的电压来对电容进行充放电，以产生幅值为 24v 的尖脉冲。所以，在实际设计中采用了 MAX761 来转换产生 +12v 电压，此电路的工作原理为：电路中 L 为储能电感，LX 管接内部 N_Channel FET 的漏极，D 为快恢复二极管。当内部场效应管导通时，电感 L 储能，一直持续到场效应管关断，电感开始通过二极管 D 释放能量，给电容充电。

MAX761 输入电压范围为 2~16.5V，输出电压为 12V，内置 1A 的 MOSFET，应用时需要较低的能量，V+ 由内部电阻分压与参考电压比较，将电压值稳定在 12V 输出。

各部分总电路图如下：

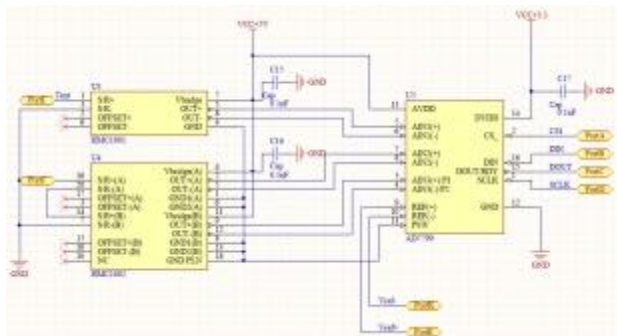
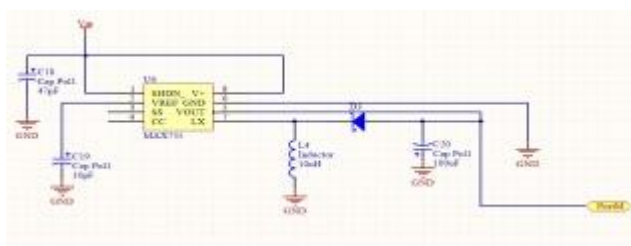


图 3 AD7799 连接图

Figure 3 AD7799 connection diagram

对于 -12v 电源，采用 MAX765 来进行设计，转



换原理同上，在此不再赘述。

电路图如下

图 4 电源电路

Figure 4 Power circuit

1.7 AD 采集模块

AD 采集模块属于采集部分的重要组成，分为 AD 初始化、采集测量和读写数据。

初始化和采集测量通过配置 AD7799 内部的寄存器、模式寄存器和通信寄存器。

模式寄存器是用来对 AD7799 的工作极性进行校对，通过桥路输出信号范围来设置 AD7799 内部的放大增益，同时选择它的信号输入通道。U/B 位

选择单极性或双极性，根据磁阻传感器的桥路电压输出决定了 AD7799 选择双极性输入。G2、G1、G0 位用来设置 AD7799 内部增益，因为桥路满量程输出电压 > 64mv，所以通过 KEIL 编程选择 32 倍增益，BUF 位为 1 时选择内部缓冲，为使输入电压波动小、电流大，CH x 选择三通道采集来进行 X 轴、Y 轴、Z 轴三个分量的数据输入。

配置寄存器高四位 MD x 对 AD7799 的运行模式进行设置，在初始化时进行 0 校正和内部满量程校正，同时配置成连续测量模式；FS3-FS0 决定 AD7799 的转换速率，这里采用 16HZ 的转换速率进行采集。

1.8 动作模块

机器人是由 Arduino 编程的可移动小车，可以通过上位机软件控制机器人的行进和方向控制并通过 wifi 视频连接到上位机进行远距离观测，从而确定地雷的具体方位。

Arduino 是目前较为流行的基于单片机系统开发平台，具有使用简单、功能多样、价格低廉等优点。本次实验中采用 Arduino UNO R3 控制板结合 WIFI 模块、720P 高清摄像头配合 2 自由度转向平台完成动作部分的设计，其控制的上位机软件兼容 win7 win8 win10 64 位系统^[11]。

1.9 实验使用的 GPS

本实验 GPS 部分的主要功能如下：

实现物体的远距离定位，通过单片机接收 GPS 模块的数据进行处理，得到在发生警报时可疑地雷的位置和时间信息。

通过位置解算及定位精度算法基于 ARM 的 GPS 定位模块使其具有远距离定位的能力。把数据接收装置安装在待跟踪的物体上，接收装置通过接受 GPS 模块产生的信号解析待跟踪物体的定位信息，并将打包后的数据传递到 stm32 单片机上，得到待测物体的时间和地位信息（经度、纬度和海拔高度等）再通过蓝牙装置发送到上位机上，从而得到机器人的定位信息^[12]。

GPS 定位模块由数据接收装置和数据处理装置组成。数据接受装置有 GPS 接收机、无线射频模块和电源。数据处理装置由潜入时 ARM 微处理器和外围电路构成。

本实验 GPS 模块选用以串口为通讯解控的通用型模块，波特率为 115200，数据位为 8 位，无校验位，1 个停止位，数据以 ASCII 码形式传输^[13]。

1.10 影响 GPS 定位精度的因素

GPS 定位中存在着几种误差影响其定位精度，主要有：

1. 卫星钟差，包括卫星与卫星间存在的钟差和卫星与接收机之间时间不一致存在的钟差，从而造成在计算接收机与卫星之间距离的不准确和伪距不准确，影响定位精度；

2. 电离层误差，在信号的传递过程中，从一种介质进入另一种介质时会产生折射，使计算接收

机与卫星之间的距离加大;

3. 星历误差, 星历是卫星运行的轨迹图, 星历误差指的是卫星没有按着一定的轨迹运行, 从而导致计算接收机与卫星之间的距离不准确;

4. 接收机误差, 接收机接收数据可能会出现数据丢失等问题, 不能够保证接收到的信息都是准确无误的^[14]。

目前针对 GPS 数据处理的算法有最小二乘法、粒子滤波算法、卡尔曼滤波器等算法^[15]。

1.11 GPS 数据的解析

GPS 由 3 个区段所组成: 卫星星座(空间区段) 功能是为 GPS 接收机提供固定频率的导电电文、地面控制/检测网络(控制区段) 的目的主要是对 GPS 卫星星座的控制以及检测 GPS 卫星星座是否工作在正常状态、用户接收设备(设备区段) 通常是指 GPS 接收机, 在定位模块中应用^[16]。

GPS 接收机属于全球定位系统的用户接收设备。

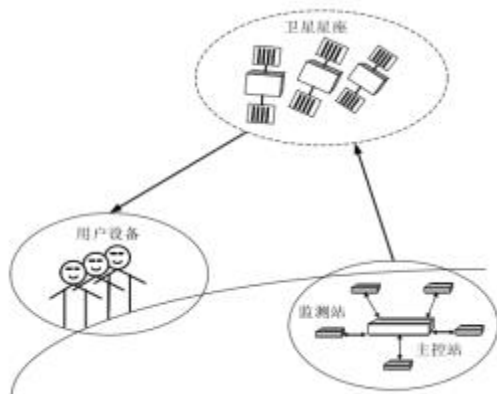


图 5 数据接收装置图

Figure 5 Data receiving device diagram

针对 GPS 数据的解析:

本实验中采用\$GPGGA 格式的语句, 其标准格式为:

\$GPGGA,(1),(2),(3),(4),(5),(6),(7),(8),(9),M,(10),M,(11),(12)*hh(CR)(LF)

式中各个符号代表的含义:

- (1) 定位 UTC 时间, 类型为 double;
- (2) 维度 (ddmm.mmmm) 类型为 double;
- (3) 北纬或南纬 (N/S), 类型为 char;
- (4) 精度 (ddmm.mmmm) 类型为 double;
- (5) 东经或西经 (E/W), 类型为 char;
- (6) 质量因子 0 代表没有定位;
- (7) 可使用卫星数, 类型为 int;
- (8) 水平精度因子;
- (9) 天线高程, m, 类型为 double;
- (10) 大地椭圆面相对海平面高度;
- (11)(12) 一般不用。(CR)(LF) 为回车和换行^[17]。

1.12 蓝牙模块

蓝牙技术是一种无线通信技术, 工作频段是在全球通用的 2.4GHz ISM 频段, 其采用快速确认和跳频方案, 从而使蓝牙具有良好的抗干扰能力和系

统稳定性^[18]。蓝牙技术可实现小范围内的无线连接和微网自主组网的通信技术^[19]。

本实验应用外部 STM32 单片机通过主机控制接口对蓝牙模块进行开发配置, 使蓝牙模块和电脑进行无线通信, 传回需要的数据和发送相应的控制信息。

常用的蓝牙模块内集成了基带控制器, 数据存储, 程序存储器, 射频接口和外界通信的 I/O 口。

其中射频模块完成混频、滤波、功率放大等功能, 负责将接收到的高频信号 (2.4GHz) 解调为中频信号传送给蓝牙基带控制器, 并将蓝牙基带控制器发出的低中频信号调制为 2.4GHz 的高频信号并发射出去^[20]。其中的 RAM 用于蓝牙通信中数据的处理、暂存。内部 Flash 加载蓝牙模块底层硬件的协议以及对蓝牙模块开发的程序^[21]。

蓝牙模块具有的功能是在出厂时处理器上加载的蓝牙协议决定的, 其片上运行的蓝牙协议大体上主要分为三类: 1. 标准的 HCI、2. 串口功能、3. 集成应用程序^[22]。标准的 HCI 即蓝牙芯片上没有加载应用协议, 但是可通过 HCI 接口对蓝牙模块进行开发, 从而实现蓝牙协议里某些特定的功能^[23]。其串口功能将蓝牙模块看成一个无线串口设备, 模拟 RS232 功能, 通过在蓝牙模块上加载了串口仿真协议 RFCOMM。集成应用程序是蓝牙模块上集成了某些应用功能^[24]。

本实验采用的是 HC05 蓝牙模块, 工作电压为 3.3v, 串口波特率选择为 115200b/s^[25]。蓝牙芯片与单片机通过串口进行通信, 同时蓝牙模块通过串口与 pc 机通讯, 两个蓝牙模块间进行无线通信, 用蓝牙串口调试软件可通过 AT 指令对蓝牙芯片进行控制^[26], 蓝牙模块串口通信的设计步骤: 初始化 HC05 蓝牙芯片、查询周边可用的蓝牙地址、发送请求、允许建立蓝牙连接、传输数据、断开连接。

实验中将检测到的报警信号和 GPS 接收到的时间位置信息通过蓝牙无线传输到上位机。

2 软件设计

本实验微控制器选用 STM32F103VET6 型最小系统板。

STM32F103xE 增强型系列产品集成了工作频率为 72MHz 的高性能 32 位 ARM Cortex-M3 RISC 内核、高速嵌入式存储器 (Flash 存储器和 SRAM 的容量分别高达 512k 和 64k 字节), 和 2 条 APB 总线的增强型 I/O 与外设^[27]。

本实验程序基于 KEIL MDK5 的 IDE 集成开发环境, 调试器使用 JLINK, 固件库使用 ST 官方 3.5.0 版本的库^[28]。

在设计时分别进行蓝牙传输、GPS 定位、ADC 采集、延时处理、USART 配置等模块程序的研究开发, 最后集合在一起, 形成最终程序, 进行实验调试。

3 数据处理方法

将实验测得的数据通过蓝牙传输回后进行相应的数据处理, 首先将传回的 X Y Z 轴 4 位 16 进制数转化为 10 进制数便于处理, 之后进行相应的环境和温度补偿, 基于实验的环境和温度, 查找相关数据在 20 至 25 摄氏度范围内进行软件精度补偿, 基于无实验物体的采集数据对基本磁场数据进行补偿, 不同环境下要重复校准才能保证数据接近真实值。补偿数据如下:

在 20 到 25 摄氏度范围内

$$X = X_{CE} + 1817(nT);$$

$$Y = Y_{CE} + 23340(nT);$$

$$Z = Z_{CE} + 40572(nT);$$

其中 CE 为测量值, XYZ 分别对应 Hx, Hy, Hz。

在本实验环境内实测环境磁场干扰较小相对待测物的磁场, 环境磁场造成的干扰可以忽略不记。综合上述处理数据处理如下:

$$H_{xout} = H_x * 1.2 - 5554$$

$$H_{yout} = H_y + 4880$$

$$H_{zout} = H_z + Z_{OFF}$$

$$Z_{OFF} = \tan a * (|X_{max}| + |X_{min}|) / 2 - (Z_{max} + Z_{min}) / 2;$$

其中 a 为地磁倾角。

4 调试结果及分析

对机器人进行相关精度测试, 对运算结果进行温度补偿和环境磁场补偿, 从而改善磁测的精度和准确率, 降低误报, 提高灵敏度。

对同一待测物以不同的路线方式探测, 结果都能够发现并报警, 传回的位置信息一致; 对于两个待测物为直径 15cm 圆形时, 将其分别摆放在不同的位置可以分别探测到, 但若将其叠放在一起, 或是有部分重合的放在一起, 往往只能探测到一个待测物, 致使准确率降低; 对于多个待测物的情况当待测物分离较远在 20cm 以上时可以分别探测到, 其他叠放情况将是准确率大大降低, 但鉴于实际情况下埋雷的位置和个数, 在同一垂直方向埋多个雷的情况是少见的, 所以针对这种情况下的失误率是在当前精度所允许的范围内的。同时这也是接下来面临的问题和改进的方向, 提升探测精度、降低误报率。

5 结论

采集模块在研究三分量磁阻传感器的结构和特性的基础上, 利用磁阻传感器构建磁场信号检测部分, 采用高精度 AD 芯片 AD7799 对信号进行采集

和处理, 通过单片机 STM32F103VET6 作为微处理器对数字信号进行分析处理, 对相关模块做出相应控制^[29]; 在硬件设计调试通过的基础上, 应用 KEIL 软件设计系统主程序, 实现数据采集, GPS 定位, 蓝牙发送等功能, 在完成采集部分的基础上采用 ARDIUNO 单片机设计机器人的移动部分, 做到通过上位机软件控制机器人的前进、后退、左右移动、旋转摄像头的角度等功能。并且能在一定程度上测得埋藏不深的金属地雷模拟物体, 返回其当前 GPS 信息, 发出警报。

参考文献

1. 王雪飞, 宋成. 辅助型 GPS 定位系统关键技术研究, 2009.2.
2. HONEYWELL, CROSSAXISEFFECTFORAMRMAGNETICSENSORS, <http://www.honeywell-sensor.com.cn>, 2004
3. Kardach.J. Bluetooth architecture overview . IntelTechnology Journal Q2, 2000
4. Arnold Gum, Mario Proietti, Dan Hoskins, B. Ohm. E911 Roundtable[J]. GPS World. 2002.
5. 林继鹏, 王君, 凌振宝. HMC1001 型磁阻式传感器及应用. 2002
6. 马宪民, 闫立超. 基于 USB 接口的; 蓝牙无线模块设计. 2004.4
7. 王君, 吴登云. 磁阻三分量磁力仪的研制. 2009.6
8. HONEYWELL, 1-and 2-AXIS Magnetic Sensors HMC1001 /1002 HMC1021/1022, <http://www.honeywell-sensor.com.cn>, 2004
9. ANALOGDEVICE, AD7798/AD7799 DATASHEET, <http://www.analog.com>, 2005
10. 田东. 基于磁阻传感器的三维磁场测量系统的设计. 2010
11. 李峰, 徐涵. 基于蓝牙的心电采集和传输系统设计与实现. 2012.11
12. 蔡睿妍. Arduino 的原理及应用, 2012.8
13. 张群, 杨絮, 张正言. 蓝牙模块串口通信的设计与实现. 2012
14. RASHID R A, YUSOFF R. Bluetooth performance analysis in personal area network (PAN) [J] . RF and Microwave Conference , 2006
15. 景军, 马晓玉. 基于 STM32 和蓝牙 4.1 的便携式心电采集分析系统探究. 2016.5
16. 鲁远耀, 白玉柱. 基于嵌入式的 GPS 定位与导航技术研究. 2011
17. 陆振林, 张明慧. 基于蓝牙技术的智能车实时检测系统的研究. 2010
18. 郑优讯, 李纵伯. 基于 STM32 微处理器的 GPRS 数据传输技术的研究. 2012
19. 庄奕祺, 李振荣. 基于蓝牙的无线通信芯片关键技术研究. 2010.4
20. 谭浩强. C 程序设计 (第三版). 北京: 清华大学出版社, 2005.
21. 周洪利, 赵霄. 基于单片机的蓝牙接口设计及数据传输的实现. 2008.6
22. Honeywell. 1- and 2-Axis Magnetic Sensors HMC1001 /1002 //1021 /1022 [EB / OL]. [2011 - 5]. <http://www.honeywell.com>.
23. Bluetooth TM, Specification Volume 1 Specification of the Bluetooth System Core, Version 1.1. 2001

24. 孙笠森, 岳凤英, 李永红. 基于磁阻传感器的数字式磁强计. 刘丽, 刘晓的设计. 2014.1
25. Bluetooth specifications Version 2. 0 + EDR. 370-650. <http://www.docin.com/p-57455142.html> [DB/OL].
26. 孟强, 徐慧. 基于 STM32 的数据采集及显示系统的设计. 2013.5
27. 刘文诒, 于铁军. 基于 ARM 的 GPS 定位系统设计与实现. 2014.5
28. 李永红, 赵圣飞. 基于 STM32 的数据采集存储系统的设计与实现. 2014.5
29. 张武杰, 南亦民. 基于 STM32F103VB 的应用编程技术的实现. 2009.10

小尺寸零件外形尺寸参数视觉测量技术研究*

马健行；李 天；陈仁亮

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 长春 130012)

摘要：针对利用结构光传感器测量规则小尺寸工件过程中数据处理问题，为快速、实时、准确得到被测工件尺寸与位置信息，项目组提出一种基于 MATLAB 图像处理的测量方法处理数据的方法，同时为便于实际应用，项目组设计一套基于西门子 S7-200 的控制系统和一套基于 MATLAB 图形用户界面（GUI）的应用软件。最终实验结果表明：系统运行稳定，运行速度快，测量精度可达到 1mm。满足实际应用需求。

关键词：结构光视觉 图像处理 尺寸测量 MATLAB/GUI

Research on visual measurement technology of dimension parameters of small size parts

MaJianxing ; Li Tian; ChenRenliang

(College of instrument Science and electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: For the issue of Data processing in the process of measuring regular small-sized workpieces using structured light sensors, in order to get the measured workpiece size and position information quickly, real time and accurate, the project team proposed a method for processing data based on the measurement method of MATLAB image processing. For the practical application, the project team designed a control based on Siemens S7-200. The system and a set of application software based on the MATLAB graphical user interface (GUI). The final experimental results show that the system runs stably, the running speed is fast, and the measurement accuracy can reach 1mm, which meet the actual application needs.

Key words: Structured light vision, Image processing, Dimension measurement, MATLAB/GUI

0 前言

在现代工业生产中，涉及到各种各样的产品质量检验，很多情况下需要一种非接触式而又精确高效的测量方法来满足生产质量检测的需求，相较于传统的测量方法，可以节约大量的时间与人力，有很高的经济效益。视觉测量系统由结构光发射器、摄像机、图像采集和处理系统以及硬件支持系统组成。实现原理是将线光源发出的激光线移动，结构光受被测物体表面信息的调制而发生形变，利用摄像机采回发生形变的结构光，与系统的结构参数对比结合分析，来实现对物体的三维测量^[1]。

利用结构光原理组成的视觉测量系统在一些对测量系统有特殊要求的环境下具有较高的应用价值，目前被广泛应用于医学、交通监测、工业等方面。

相较于目前国内外工业体系中应用的视觉测量系统^[2]，本系统在测量要求精度高、外形尺寸小、形状复杂（被测参数多）等的器件测量中更具有优势。

1.平台功能与设计思路

为实现系统的一体化，平台必须包括通信、算

法集成、人机交互等功能，同时满足常规应用软件的基本三特征：简单性、习惯性、一致性^[3]。具体实现功能如下：

（1）设计平台可与传感器 SJG-200，光栅尺等外设硬件通信，传输反馈数据，保证传输数据的准确性和实时性。

（2）界面集成自主开发图像处理算法，实现圆形与矩形的识别^[4]；可得到被测工件尺寸、位置信息，并实时保存。

（3）界面具有良好的人机交互性能，为用户提供可视化区域，便于用户迅速得到所需信息。

1.1 界面具体布局设计

检测系统由三部分组成，第一部分是 PLC 控制步进电机驱动结构光传感器 SJG-200 扫描被测工件取得被测工件尺寸、位置信息；第二部分是 PC 与光栅尺和结构光传感器通信，接收测量信息，实现实时通信功能；第三部分是基于 MATLAB/GUI 设计界面实现图像处理，鉴别信息保存，可视化显示等功能。检测系统的总体结构图如下：

* 指导老师：刘长英

项目类型：大学生创新训练项目（2017B65616）

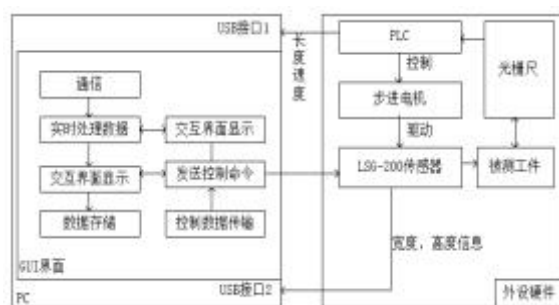


图1 图像处理模块

Fig.1 Image processing module

通信模块布局如下:

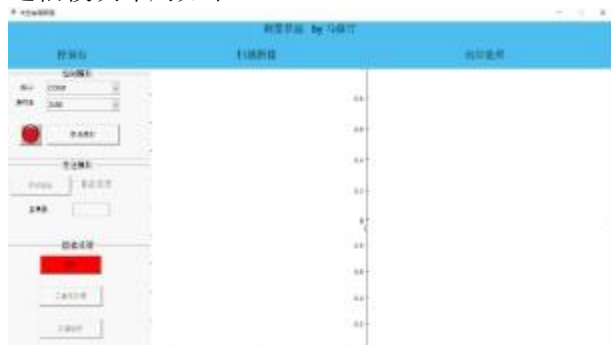


图2 通信模块

Fig.2 Communication module

图像处理模块布局如下:



图3 图像处理模块

Fig.3 Image processing module

2.图像处理算法

2.1 基于 Hough 变换确定圆心

对于圆心 (X_i, Y_i) 半径为 r 的圆直角坐标为:

$$(a - X_i)^2 + (b - Y_i)^2 = r^2 \quad (1)$$

其上每一点 (X_i, Y_i) 在三维空间中对对应于一个圆锥, 则圆边界上点在三维坐标系中相交于点 (a, b, r) [5]

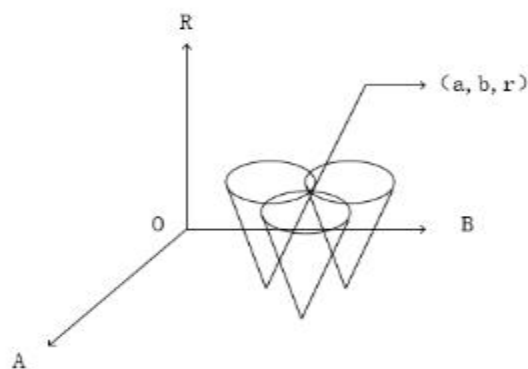


图4 直角坐标系中圆边界点在空间坐标系的表示

Fig.4 The boundary point of a circle on a Cartesian coordinate system is represented in the Space coordinate system

传统 Hough 变换首先量化该圆, 在每个量化单元设置一个累加器, 将映射到圆周上的点对应的量化单元累加。从零开始递增直到图像平面所能容纳的上限。每次递增都有一平面映射与之对应, 得到一个三维的累加器阵列^[6]。当所有变换完成后, 对所有累加器的值进行统计。其中最大累加器对应坐标便是检测前景图圆心^[7]。根据其检测原理估计运行时间:

$$\sum_0^R 2r_0 T = R(R+1)T \quad (2)$$

其中 r_0 为前景点给定半径, R 为半径变化范围, T 为每次检测时间。

假设有 M 个边界点, 总共检测时间为^[8]:

$$t_{all} = MR(R+1)T \quad (3)$$

可看出耗时巨大, 且占用过多内存, 不符合软件设计原则。

因此项目组提出改进方法, 在得到经过初步处理的点云后, 经过消噪、二值化、边界提取等过程后, 得到边界位置信息^[9]。

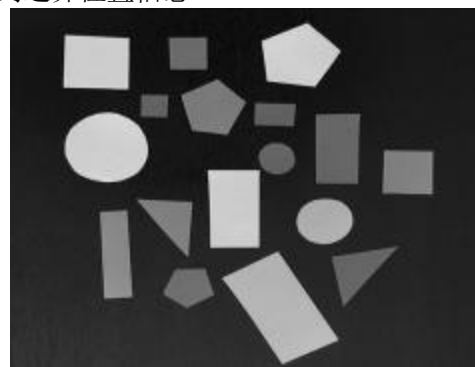


图5 原图像

Fig.5 Original image

考虑圆形固有特点: 到圆心距离等于半径的直线是圆的切线。因此每一个前景点位置信息加上方向特性后, 可以确定一条经过圆心的直线, 通过设定合理的阈值, 统计前景点聚集度, 所有的前景点经过 Hough 变化后的直线聚集于一点, 便是所测圆心^[10]。

该算法通过:

$$\begin{cases} a = x - r \cos \theta \\ b = y - r \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

确定圆心，其中 $\theta = \tan^{-1} \frac{\nabla_y}{\nabla_x}$ ， ∇_y, ∇_x 为梯度^[11]。将原图像中的边缘点，映射到参数空间 A-B-R 中， θ 和 r 都取一定的范围和步长，通过内循环 θ 外循环 r ，将空间的点映射到参数空间中，判断超过阈值的聚集点，在参数空间中寻找圆心^[12]。经过处理后确定圆心如下：

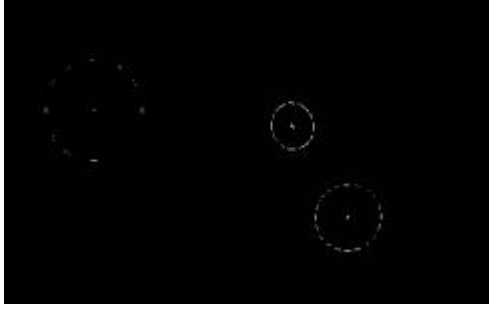


图 6 圆心
Fig.6 Center

经过最小二乘法拟合结果如下：

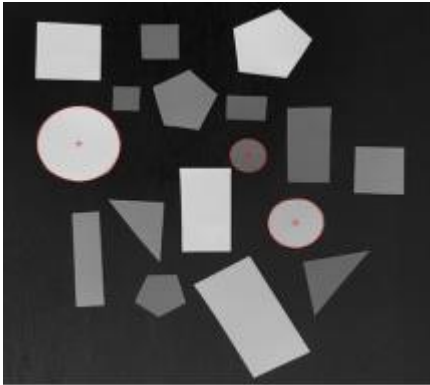


图 7 拟合后的圆
Fig7 Fitted circle

2.2 检测矩形算法

本文选取检测矩形方法是根据矩形自身固有特性^[13]：矩形中心点到边界距离中，与四个顶点距离是最大值，与边界中心点距离是最小值。

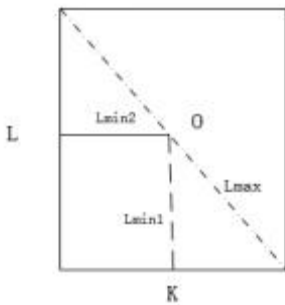


图 8 示意图
Fig.8 Schematic

算法如下：

- (1) 对图像进行预处理。

- (2) 确定连通域，并标注连通域中心。
- (3) Canny 检测被测区域内连通域的边界，并进行细化^[14]。

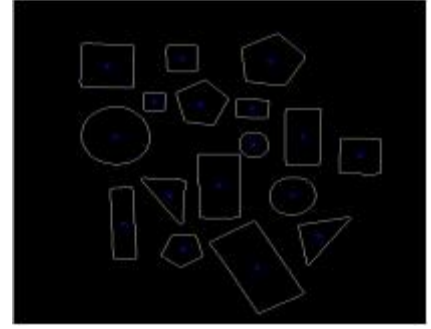


图 9 初步处理的图像

Fig.9 Preliminary processed image

- (4) 利用cart2pol函数得到中心与边界坐标之差的极坐标形式^[15]：

$$[\theta, \rho] = \text{cart2pol}(\Delta y, \Delta x) \quad (5)$$
- (5) 建立 $\theta - \rho$ 坐标系，将每个连通域坐标关系绘制于该坐标系中，寻找波峰和波谷（分别对应于中心点距离顶点距离 L_{max} 和中心点距离边界中心距离 L_{min1}, L_{min2} ）^[16]。
- (6) 设立合适阈值，筛选矩形，计算矩形尺寸信息^[17]。

计算矩形长宽信息：

$$\begin{cases} L = 2\sqrt{L_{max}^2 - L_{min2}^2} \\ K = 2\sqrt{L_{max}^2 - L_{min1}^2} \end{cases} \quad (6)$$

筛选部分结果如下：

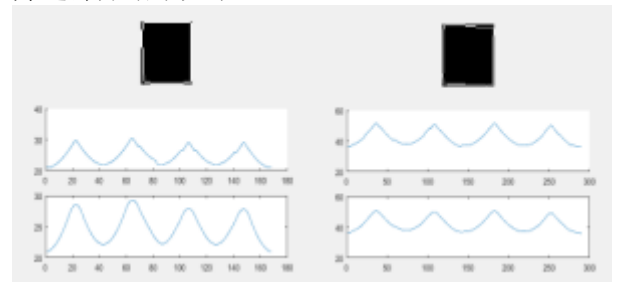


图 10 经过筛选后的矩形及其 $\theta - \rho$ 关系
Fig10 Filtered rectangles and its relationship of $\theta - \rho$

3. 计算结果与比较

为验证项目组设计测量系统的可靠性和实用性，对三个独立物体进行测量。

三个物体实际尺寸：

圆柱 1：半径/高：1.25cm/0.370cm

圆形 2：半径/高：0.95cm/0.668cm

长方体：长/宽/高：8.10cm/2.1cm/1.0cm
 项目组经过测量得到如下部分结果：

表 1 圆柱 1 尺寸信息

Table.1 Cylinder 1 size information

测量次数	半径 (cm)	高 (cm)
1	1.23	0.40
2	1.22	0.38
3	1.22	0.38

表 2 圆柱 2 尺寸信息

Table.2 Cylinder 2 size information

测量次数	半径 (cm)	高 (cm)
1	0.98	0.70
2	0.97	0.68
3	0.97	0.68

表 3 长方体尺寸信息

Table.3 Cuboid size information

测量次数	长 (cm)	宽 (cm)	高 (cm)
1	8.08	2.04	1.02
2	8.12	2.07	1.03
3	8.11	2.08	1.01

通过对小尺寸零件外形尺寸参数视觉测量技术的研究,可实现对小尺寸零件外形尺寸参数的测量,通过对点云数据的处理,达到预期的各项指标,三维扫描系统测量精度为 0.01cm,测量范围为 10cm*5cm*5cm。

4.结论

4.1 项目结果

1. 系统方面。本项目硬件部分采用螺纹式直线轨道配合电机带动传感器运动,光栅尺辅助测量,外设控制箱控制硬件部分动作,同时作为硬件部分与 PC 通信的中介^[18]。硬件系统设计合理,运行稳定可靠,设计采用模块化思路,可达到硬件系统迅速组装、拆卸,便于应用。
2. 软件方面。本项目组采用 MATLAB 作为上位机设计平台,虽然 MATLAB 在 UI 设计方面存在短板,但是由于 MATLAB 良好的图像处理性能,间接的提高整个系统的精度^[19]。通过自主设计的物体识别算法和物体尺寸计算,在准确识别物体形状的同时能够以 0.1mm 的精度得到被测工件的实际尺寸,满足实际需求。
3. 整体配合。本项目核心软件是 MATLAB, MATLAB 必须实时处理传感器传输数据并处理,但是由于 MATLAB 自身局限性,很难做到与硬件部分达到实时通信。因此必须通过中间控制箱来间接达到通信,项目组编写函数访问 PLC 的内存读取其高速计数器内容同时通过串口通信函数实现与传感器的通信,达到整个系统软硬件配合工作。

4.2 未来展望

尽管本项目组在基于结构光的零件尺寸测量技术方面取得了一定的成果,但是由于本人的专业知

识有限,对于机器视觉的零件尺寸测量还存在很多问题有待解决,工件尺寸测量精度仍有提升的空间,测量过程的实时性也有待改善。下面对需要解决的问题进行归纳。

1. 处理时间。测量一个 10CM 的工件需要整个时间约为 3 分钟,虽然精度满足实际需求,但时间上存在较大问题。客观来讲,项目组采用基恩士 LJG-200 传感器传输数据速度存在上限,在配合步进电机运动时,为保证测量精度,需要步进电机降低转动速度来匹配数据处理速度,这也直接增加了系统的处理时间。硬件桎梏了处理时间。未来项目组计划优化算法,尽量缩短系统扫描过程,加快数据处理过程。
2. 通信稳定性。上文提到, MATLAB 与硬件部分通信需要通过中间控制箱作为中介,因通信过程过于复杂,通信的稳定性降低。在实际测试中,偶尔会出现 PC 访问 PLC 内存出现故障等问题,降低了系统的健壮性^[20]。项目组计划 PC 和硬件系统的直接通信减少数据传递环节,保证通信渠道稳定性同时,可间接提高数据传输精度。

经过近几年国内外学者的研究,机器视觉的零件尺寸测量技术得到了迅速的发展,这种测量方法仍然存在着较大的研究与应用空间。我们相信随着科学技术的不断发展,本文遇到的问题将会得到顺利解决。

参考文献

1. 朱先锋. 基于双目视觉的工件尺寸三维测量[D]. 浙江海洋学院, 2014.
2. 刘建伟, 梁晋, 梁新合, 等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 126-134.
3. 杨建华. 基于线结构光视觉传感器的三维表面测量系统关键技术研究[D]. 广东工业大学, 2013.
4. 邹定海, 叶声华, 王春和, 等. 用于在线测量的视觉检测系统[J]. 仪器仪表学报, 1995, 16(4): 337-340.
5. B G Batchelor, D W Braggins. Commercial vision systems in computer vision [J]. Theory and Industrial Applications, 1992: 405-452.
6. WANG Z, SHEN M. Serial communication program development based on Matlab GUI [J]. Modern Electronics Technique, 2010(9): 38 — 41. (王战军, 明. 基于 Matlab GUI 的串口通信编程实现 [J]. 现代电子技术
7. 鲁光泉等. 基于链码检测的直线段检测方法 [J]. 计算机工程, 2006, 32 (14): 1~3. Lu Guangquan, Xu Hongguo, et al. Line segment detection based on chain code detection [J]. Computer Engineering, 2006, 32 (14): 1~3.
8. LUO H. Study notes of Matlab GUI design [M]. 2nd ed. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2011: 87 — 673. (罗华飞. Matlab

- GUI 设计学习手记 [M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社)
9. F. Keceki, H. H. Nagel. Machine vision based estimation of pose and size parameters from a genetic work piece description [J]. IEEE Tran On robotics an Automation, 2001, 3:2159-2164.
 10. 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 电子工业出版社, 001.
 11. S.Sirkis, T. J. Lim, Displacement and Strain Measurement with automated Grid Methods [J]. Experimented Mechanics, December 1991:382-388.
 12. F.Mokhtarian, R.Suomela. Robust image corner detection through curvature scale space [J].IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1998, 20(12):1376-1381.
 13. A Bandera, C Urdiales, et al. Corner detection by means of adaptively estimated curvature function [J]. Electronics Letters, 2000, 36:124-126.
 14. P Reche, C Urdiales, et al. Corner detection by means of contour local vectors [J].Electronics Letters. 2002, 38(14):699-701.
 15. C Urdiales, C Trazegnies, et al. Corner detection based on adaptively filtered curvature function [J]. Electronics Letters, 2003, 39(5):426-428.
 16. D J Langride. Curve encoding and the detection of discontinuities [J]. CVGIf, 1982, 20(1):58-71.
 17. 姚建平, 宇波. 圆柱形零件高度自动检测系统设计. 长江大学学报 (理工卷), 010, ol.6(7): 315~317
 18. 段德山. 工件非接触检测中机器视觉的研究与应用 [J]. 北京: 北京邮电大学, 2007
 19. 曲萌萌, 元宗. 图像处理技术在基片尺寸自动检测中的应用. 机械工程与自动化, 009, Vol.10(3): 131~133
 20. 李正大. 基于图像处理的小尺寸精密测量研究 [J]. 西安: 西安电子科技大学, 2008