

学 号： 2017211846

密 级： 公开

合肥工业大学

Hefei University of Technology

# 本科毕业设计（论文）

UNDERGRADUATE THESIS



类 型： 设计

题 目： 电动推杆中角度传感器模块的设计与验证

专业名称： 通信工程

入校年份： 2017 级

学生姓名： 石磊

指导教师： 吴从中 副教授

学院名称： 计算机与信息学院（人工智能学院）

完成时间： 2021 年 6 月

---

合 肥 工 业 大 学

本科毕业设计（论文）

电动推杆中角度传感器模块的设计与验证

学生姓名：\_\_\_\_\_石磊\_\_\_\_\_

学生学号：\_\_\_\_\_2017211846\_\_\_\_\_

指导教师：\_\_\_\_\_吴从中 副教授\_\_\_\_\_

专业名称：\_\_\_\_\_通信工程\_\_\_\_\_

学院名称：\_\_\_\_\_计算机与信息学院（人工智能学院）\_\_\_\_\_

2021 年 6 月

---

**A Dissertation Submitted for the Degree of Bachelor**

**Design and Verification of Angle Sensor Module in  
Electric Push Rod**

By  
Shi Lei

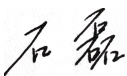
Hefei University of Technology  
Hefei, Anhui, P.R.China  
Month 6, Year 2021

---

## 毕业设计（论文）独创性声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文）是本人在指导教师指导下进行独立研究工作所取得的成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的内容外，设计（论文）中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得合肥工业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。对本文成果做出贡献的个人和集体，本人已在设计（论文）中作了明确的说明，并表示谢意。


毕业设计（论文）中表达的观点纯属作者本人观点，与合肥工业大学无关。

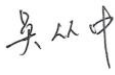
毕业设计(论文)作者签名：  签名日期： 2021 年 6 月 4 日

## 毕业设计（论文）版权使用授权书

本学位论文作者完全了解合肥工业大学有关保留、使用毕业设计（论文）的规定，即：除保密期内的涉密设计（论文）外，学校有权保存并向国家有关部门或机构送交设计（论文）的复印件和电子光盘，允许设计（论文）被查阅或借阅。本人授权合肥工业大学可以将本毕业设计（论文）的全部或部分内容编入有关数据库，允许采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编毕业设计（论文）。

（保密的毕业设计（论文）在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名： 

指导教师签名： 

签名日期： 2021 年 6 月 4 日

签名日期： 2021 年 6 月 4 日

---

## 摘 要

角度传感器广泛应用于电动阀门的角度控制，亦可以用于电机驱动的往复运动器件的行程控制，本课题的目标就是针对电动推杆设计一种基于角度传感器的角度检测系统，用于间接检测推杆的实际行程。通过减速机构将推杆行程转换为 $0-360^{\circ}$ 的角度。根据需求本文首先确定了用能感应磁场角度的感应芯片 MT6816 作为感应器件，用单片机作为数据处理与控制器，用脉宽调制信号（PWM 方式）控制模拟电流信号输出的设计方案，在充分查阅资料与分析的基础上完成了电路原理设计、PCB 版制图以及软件编程，并进行了实验验证，实验结果表明本次设计的角度检测系统实现了 $0-360^{\circ}$ 的角度检测量程，分辨率为 $0.5^{\circ}$ 的精度，实现了角度信号 RS485 数字方式输出与 $4-20\text{mA}$ 的模拟信号输出，全部指标均满足设计要求。另外对模拟信号输出进行了线性分析与精度校准。

**关键词：** MT6816；单片机；角度传感器

---

## ABSTRACT

Angle sensor is widely used in the angle control of electric valve, and can also be used in the stroke control of motor-driven reciprocating motion devices. The goal of this project is to design an angle detection system based on angle sensor for the electric push rod, which is used to detect the actual movement of the push rod indirectly. The stroke of the push rod is converted into an angle of 0-360° through the deceleration mechanism. According to the requirements, this dissertation first determines the design scheme of using the induction chip MT6816 which can induce the magnetic field angle as the induction device, using the microcontroller unit (MCU) as the data processing and controller, and using the pulse width modulation signal (PWM mode) to control the analog current signal output. On the basis of full access to information and analysis, the circuit principle diagram design, PCB drawing and software programming are completed. The experimental results show that the designed angle detection system achieves the angle detection range of 0-360°, and the resolution is 0.5°, and the RS485 digital output and 4-20mA analog output of angle signal are realized. All indexes meet the design requirements. In addition, the linear analysis and accuracy calibration of analog signal output are carried out.

**KEYWORDS:** MT6816;MCU; Angle sensor

---

# 目 录

1 绪论.....	1
1.1 课题背景与意义.....	1
1.2 课题需求与指标.....	1
2 准备知识.....	2
2.1 智能传感器概述.....	2
2.2 RS485 概述.....	2
2.3 单片机概述.....	3
3 硬件设计.....	4
3.1 硬件组成.....	4
3.1.1 硬件模块框图.....	4
3.1.2 模块功能简介.....	4
3.2 角度传感器模块.....	5
3.2.1 功能说明.....	5
3.2.2 电路原理分析.....	5
3.3 单片机模块.....	6
3.3.1 单片机简介.....	6
3.3.2 电路原理分析.....	6
3.3.3 程序下载模块.....	7
3.4 数码管显示模块.....	7
3.4.1 功能说明.....	7
3.4.2 电路原理分析.....	8
3.5 电流生成模块.....	8
3.5.1 功能说明.....	8
3.5.2 硬件仿真.....	8
3.5.3 电路原理分析.....	10
3.6 RS485 模块.....	11
3.6.1 功能说明.....	11
3.6.2 电路原理分析.....	12
4 软件设计.....	13

---

4.1 程序流程.....	13
4.2 系统初始化.....	14
4.2.1 SPI 接口功能的初始化.....	14
4.2.2 数码管 I/O 口初始化.....	14
4.2.3 PWM 功能初始化.....	14
4.2.4 串口 2 的初始化.....	15
4.3 角度数据读取与处理.....	16
4.3.1 角度数据读取原理.....	16
4.3.2 角度数据的处理.....	17
4.4 角度数据的显示.....	18
4.5 PWM 方波的生成.....	19
4.5.1 方波生成原理.....	19
4.5.2 方波生成流程.....	20
4.6 串口 2 的角度数据发送.....	20
4.6.1 数据发送的思路.....	20
4.6.2 数据发送的流程.....	21
5 系统验证实验和成果展示.....	22
5.1 电路板展示.....	22
5.2 角度范围指标验证.....	22
5.3 角度精度指标验证.....	24
5.4 模拟输出验证.....	25
5.5 无磁场情况测试.....	26
5.6 角度-输出电流线性度测试.....	27
6 总结与展望.....	28
6.1 毕设总结.....	28
6.2 毕设展望.....	28
参考文献.....	29
致谢.....	30



---

## 插图清单

图 3.1	系统硬件模块框图.....	4
图 3.2	角度传感器模块的原理图.....	5
图 3.3	控制模块原理图.....	6
图 3.4	程序下载模块原理图.....	7
图 3.5	数码管显示模块原理图.....	8
图 3.6	模拟输出模块硬件仿真原理图.....	9
图 3.7	信号发生器的配置.....	9
图 3.8	方波占空比-输出电流仿真线性度测试结果图.....	10
图 3.9	模拟输出模块原理图.....	10
图 3.10	数字输出模块原理图.....	12
图 4.1	程序流程图.....	13
图 4.2	角度数据读取原理.....	16
图 5.1	电路板正面实物图.....	22
图 5.2	检测角度为 0 度.....	22
图 5.3	串口调试软件接收到数据 0.....	23
图 5.4	检测角度为 360 度.....	23
图 5.5	串口调试软件接收到数据 16384.....	23
图 5.6	检测角度为 180.0 度.....	24
图 5.7	串口调试软件接收到数据 8192.....	24
图 5.8	检测角度为 180.5 度.....	24
图 5.9	串口调试软件接收到数据 8215.....	25
图 5.10	使用万用表验证模拟输出.....	25
图 5.11	电路板在无磁场情况下的截图.....	26
图 5.12	串口调试软件在无磁场情况下接收到的提示.....	26
图 5.13	实际角度-输出电流线性测试结果图.....	27

---

## 表格清单

表 4.1	角度数据寄存器格式.....	17
表 5.1	通过数十次实验测得的角度-电流数据对 .....	27

# 1 绪论

## 1.1 课题背景与意义

电动推杆是将电机的转动转化为推杆的直线往复运动的一种电动驱动装置。可作为各种简单或复杂工艺过程的执行机构，实现远程控制、集中控制或自动控制。作为运动驱动单元经常应用于工业阀门、机械装卸等场景。

电动推杆是一种位移执行和位置控制机构。工作时通过控制推杆的位移和运动方向打开或关闭阀门。在推杆运行过程中输出其位置信息，再与控制中心通信，以控制阀门的开关程度。

目前市场工业电动推杆大部分采用低成本的直流电机，不具备精确的位置控制能力。虽然有国内机构正在研究，但在位置控制精度方面不够理想。国外也有类似产品，但是结构较复杂，制作工艺有难度，代价较高昂。因此，希望能设计一种在位置控制方面精度高、能满足用户需求、制作不复杂且代价较低的电动推杆装置。

通过在工业电动推杆基础上加装角度传感器来控制与记忆推杆的位置，期望解决现在电动推杆在位置控制方面存在的精度问题。本设计并不负责角度系统与电动推杆的配合使用，只负责设计出角度检测电路并进行验证。

## 1.2 课题需求与指标

本设计是针对电动推杆的行程检测，电动推杆会通过减速机构将有效行程转换为角度，所以只需要检测角度即可知推杆行程或位置，考虑到容差一般要求最大行程对应的角度要小于  $360^\circ$ ，检测角度精度取决于推杆位置的控制精度，按照 1 毫米位置控制精度与减速比则角度检测  $0.5^\circ$  的分辨率即可完全满足要求，因此将角度传感器的检测量程约定为  $0-330^\circ$ ，角度检测精度约为  $0.5^\circ$ ，另外，要求提供数字信号输出与模拟信号输出两种接口，模拟输出 4-20mA 电流模拟信号，4 毫安对应  $0^\circ$ ，20 毫安对应  $330^\circ$ ，数字输出接口符合 RS485 通信协议规范。

## 2 准备知识

### 2.1 智能传感器概述

智能传感器是一种当它感测到了某个特定的输入（如光、热、声、磁场、运动、触摸等）时会执行一些预定义操作的传感器。智能传感器带有微处理器，这些预定义操作是由微处理器执行的，因此任何将传感器和微处理器结合在一起的工具皆可称为智能传感器。要成为智能传感器，传感器和处理器必须属于同一物理单元。智能传感器的功能是检测外部的物理模拟信号，该信号经过智能传感器的处理后以数字信号通过自带的通信接口输出给外部系统（如单片机），并且能够执行外部系统发送给自身的逻辑操作和指令，此操作相对于普通的传感器来说是智能的。

智能传感器通常具有基本的元素感测、励磁控制、信号放大、模拟滤波、数据转换、自补偿、数字信号处理及数字通信等功能。智能传感器可实现高精度的数据采集和高可靠性的数据传输，且具有一定的编程自动化能力。

### 2.2 RS485 概述

RS485 是 EIA 定义的标准系列中功能最广泛的通信标准，因为它在以下四个方面均表现出色：

- 一、可直接连接数据终端设备，无需调制解调器
- 二、在网络结构中可连接多个数据终端设备
- 三、能够进行更远距离的通信（相较于 RS232）
- 四、能够以更快的速率进行通信（相较于 RS232）

所以，RS485 是当前在多个节点相互通信的数据采集和控制应用中广泛使用的通信接口。

RS485 传输线使用的是差分信号，RS485 接收器比较两条线之间的电压差，而不是信号线上的绝对电压电平。这样防止了接地回路（通信问题的常见根源）的存在。此外，RS485 通信中的双绞线增加了通信的抗扰性，可以抵抗噪声的影响。如果需要较高的抗噪能力，则通常使用双绞线和屏蔽线的组合。差分信号和通信线路的扭曲允许 RS485 以比 RS232 更长的通信距离进行通信。使用 RS485 时，通讯距离可达 1200m。与非差分连接相比，差分信号线还允许更高的比特率。因此，RS485 可以克服 RS232 的实际通信速度限制。当前生产的 RS485 驱动器可以达到 35 mbps

的比特率。

RS232 是进行半双工通信的接口。RS485 的压摆率是不确定的。为了避免在较长的电缆上反射，必须使用适当的端接电阻器。

RS485 是唯一能够将同一网络中的多个发送器和接收器互连的接口。当使用输入电阻为  $12\text{k}\Omega$  的默认 RS485 接收器时，可以将 32 个设备连接到网络。当前可用的高阻 RS485 输入允许将该数目扩展到 256。还可以使用 RS485 中继器，从而可以将节点数增加到数千个，跨越数公里。

RS485 用作许多众所周知的接口标准（包括 Profibus 和 Modbus）的电气层。因此，RS485 将会在未来得到广泛使用。

### 2.3 单片机概述

单片机，其英文名称为 MicroController Unit，简称 MCU。

单片机通常由处理器，存储器和 I/O 输出引脚组成，具有定时器、计数器、PWM 发生器、ADC/DAC 等功能外设。为了方便与其他外设通信，单片机通常具有串行端口（UART）和串行外围接口（SPI）。

单片机用于自动控制的产品和设备，例如汽车引擎控制系统，植入式医疗设备，遥控器，办公机器，电器，电动工具，玩具和其他嵌入式系统。与使用单独的微处理器，存储器和输入/输出设备的设计相比，通过减小尺寸和成本，单片机使数字控制更多的设备和过程变得经济高效。通常单片机内部会集成控制模拟系统所需的模拟组件，以方便与其他模拟电子器件交互。在物联网的背景下，单片机作为网络的边缘设备，通过各种传感器感测物理世界的各种状态和数据，是一种经济且流行的数据收集方式。

### 3 硬件设计

#### 3.1 硬件组成

##### 3.1.1 硬件模块框图

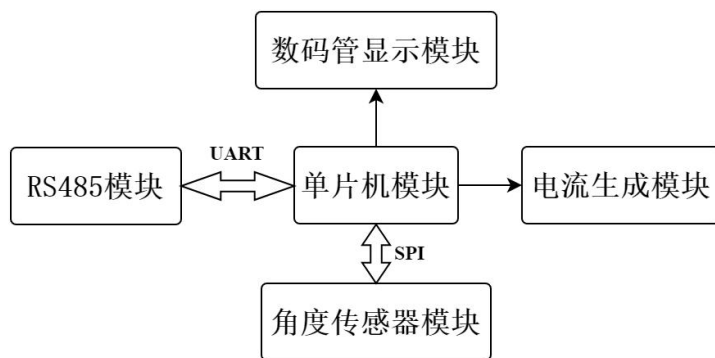


图 3.1 系统硬件模块框图

##### 3.1.2 模块功能简介

本硬件设计分为五个模块。

**角度传感器模块：**选用 MT6816 芯片。该芯片可感应周围磁场方向并编码为角度数据存储在相关寄存器中。其属于角度检测系统的输入。

**单片机模块：**选用 STC12C5A60S2 单片机。负责角度检测系统的调度和控制。

**数码管显示模块：**选用四位共阳极数码管。负责显示角度数据。

**电流生成模块：**设计模拟电路实现。输出大小范围为 4-20mA 的模拟电流，对应 0-330° 的角度数据。

**RS485 模块：**选用 MAX485 芯片。输出数字形式的角度数据。

单片机模块通过 SPI 接口从角度传感器模块获取角度数据，并对角度数据进行处理，处理后的角度数据送数码管数码管显示，电流生成模块将负责将角度数据映射为电流信号输出，RS485 模块将角度数据以数字形式输出。

## 3.2 角度传感器模块

### 3.2.1 功能说明

MT6816 角度传感器芯片会随着平行于芯片表面磁场的旋转，输出相应的经过编码的 0-360° 角度数据。MT6816 属于智能传感器，感测到磁场方向的角度数据会将其以数字形式存储在其 16 位寄存器中。单片机可通过 SPI 接口读取该芯片内部计算的角度数据。相比于传统霍尔传感器，MT6816 角度传感器对磁场方向更敏感，更便于角度的测量。此外，该芯片可检测周围的磁场强度，若磁场强度太低会输出警告数据，提示当前读取的角度数据不可靠。

### 3.2.2 电路原理分析

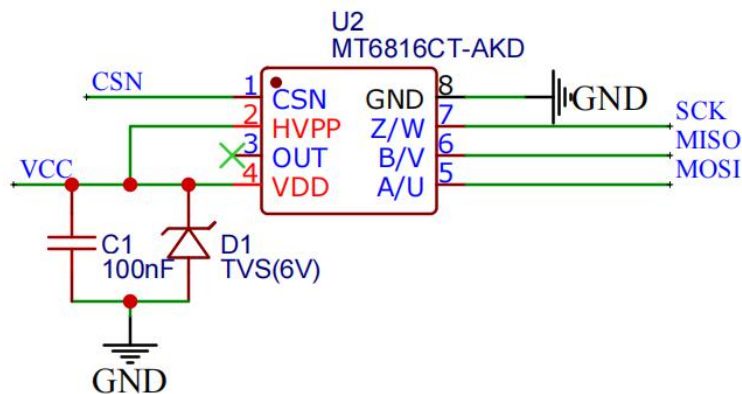


图 3.2 角度传感器模块的原理图

单片机通过 4 线 SPI 接口与角度传感器连接。如图，CSN 是单片机对角度传感器的片选信号线。若单片机将该引脚置低电平，则代表单片机请求与角度传感器通信；SCK 是单片机输出至角度传感器的时钟信号线；MOSI 是自单片机输出至角度传感器的数据线；MISO 是自角度传感器输出至单片机的数据线。

VDD 引脚接有 0.1 $\mu$ F 的电容，其作用为滤除直流电压 VCC 存在的纹波，使电压更稳定。TVS 二极管亦是起稳压的作用。它还起到保护电路的作用，防止角度传感器的内部电压反馈影响 VCC 的电压值。

首先，单片机将 CSN 引脚电平置低，开始与角度传感器通信。接着，单片机通过 MOSI 数据线向角度传感器发送其存储角度数据的寄存器的地址数据。然后，角度传感器从单片机指定的寄存器中取出角度数据并通过 MISO 数据线发送给单片机。最后，单片机接收到角度数据并进行数据处理。

### 3.3 单片机模块

#### 3.3.1 单片机简介

STC12C5A60S2 单片机属于 51 系列单片机。其具有两个串口、4 个定时器等资源，内部集成 SPI 接口，2 路 PWM。其便于电机控制，且价格便宜。

#### 3.3.2 电路原理分析

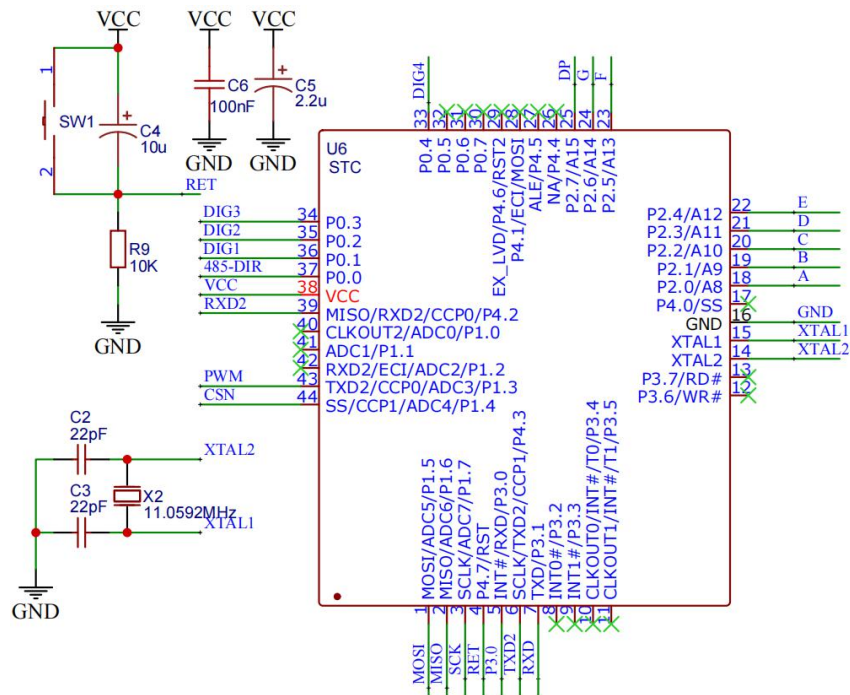


图 3.3 控制模块原理图

电容 C5 是带有极性的钽电容，作用是稳压。贴片钽电容相较于直插式体积更小，节省电路板空间。电容 C6 是普通电容，用于滤除电源电压的纹波。

复位电路与 MCU 的引脚 RST 相连接。复位方式使用的是外部 RST 引脚复位。该复位电路会让系统在上电启动的时候复位一次，当按键按下时候系统也会复位。

外部晶振电路与单片机的引脚 XTAL1, XTAL2 相连接。外部晶振电路为单片机的运行提供稳定的时钟脉冲，晶振 X2 的主频为 11.0592MHz，该频率可方便串口通信中波特率的设置。C2、C3 两个电容选取 22pF 是为了满足电路的谐振条件。

单片机上电后，通过 SPI 接口从角度传感器模块获取原始的高精度角度数据，且角度范围为 0-360°。接着，单片机通过串口 2 发送该原始的高精度角度数据给 RS485 模块。然后，单片机将高精度角度数据转换为精度为 0.5° 的低精度角度数据，



且角度范围缩减为  $0-330^{\circ}$ 。之后，单片机通过普通 I/O 口驱动、控制数码管模块显示该低精度角度数据。最后，单片机将级别为 660 的低精度角度数据通过 PWM 功能映射成同样具有 660 级别的方波信号，方波信号通过改变占空比参量来达到 660 级映射，接着，不同占空比的方波信号会驱动电流生成模块输出同样具有 660 级别的模拟电流信号，该电流信号代表着低精度角度数据。

### 3.3.3 程序下载模块

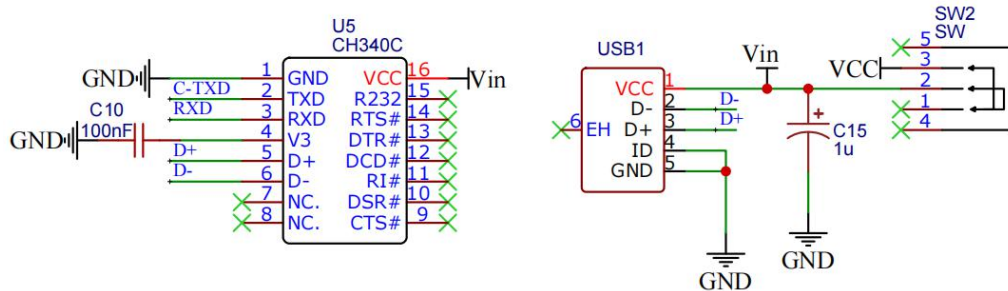


图 3.4 程序下载模块原理图

标号为 USB1 的器件是 Micro-USB 接口芯片，PC 机通过 D+、D- 引脚向单片机传输程序数据。CH340C 芯片可实现 USB 转串口，且内置时钟，无需外部晶振。其连接了 Micro-USB 接口芯片与单片机的串口 1。由此，PC 机可通过单片机的串口 1 将程序代码烧写进单片机的程序存储器。此外，单片机亦可通过串口 1 发送程序运行时的数据状态来调试程序。C10 和 C15 为退耦电容。

当开关处于 OFF 状态时，用户在点击烧写程序按钮后拨动开关至 ON 状态，程序才会烧写进单片机中。这是 51 单片机的冷启动下载。

## 3.4 数码管显示模块

### 3.4.1 功能说明

将单片机模块处理得到的精度为  $0.5^{\circ}$  的角度数据通过数码管模块实时显示，以验证角度传感器模块是否工作。

### 3.4.2 电路原理分析

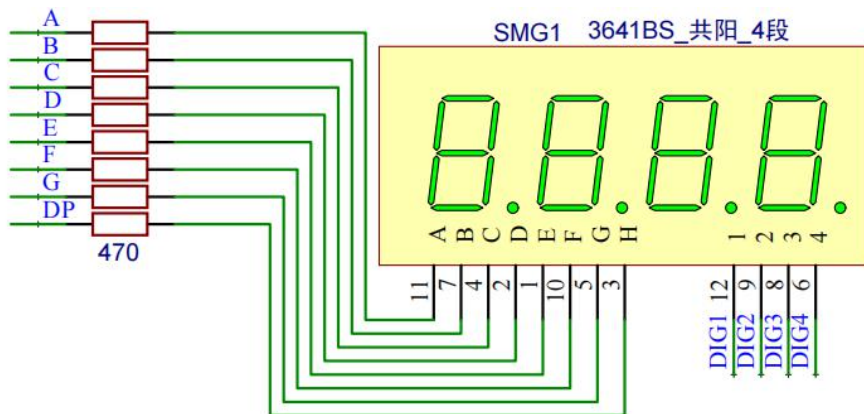


图 3.5 数码管显示模块原理图

数码管显示模块的主要器件是 3641 共阳极四位数码管。8 个阻值为  $470\ \Omega$  的限流电阻是为了防止烧坏数码管里的发光二极管。数码管的标号 A、B、C、D、E、F、G、DP 代表段码，标号 DIG1、DIG2、DIG3、DIG4 代表位码。

利用人眼的视觉暂留现象，让四位数码管显示角度数据。取出角度数据的百位数字交给数码管的第一位显示，取出角度数据的十位数字交给数码管的第二位显示，取出角度数据的个位数字交给数码管的第三位显示，取出角度数据的小数位数字交给数码管的最后一位显示。因为角度数据是精度为  $0.5^\circ$  的浮点数，所以需点亮第三位数码管的 DP 端。

## 3.5 电流生成模块

### 3.5.1 功能说明

单片机模块将处理得到的范围为  $0-330^\circ$ 、精度为  $0.5^\circ$  的角度数据线性映射为 PWM 方波的占空比参量。单片机输出具有该占空比的方波至电流生成模块。电流生成模块将该方波信号经过低通滤波器转换为模拟电压信号，再将模拟电压信号通过运放和三极管电路转换为模拟电流信号。该模拟电流的电流值应与 PWM 方波的占空比参量以及精度为  $0.5^\circ$  的角度数据皆为线性映射关系。即角度值若从  $0$  度线性变化到  $330$  度，那么生成电流的电流值会从  $4\text{mA}$  线性变化为  $20\text{mA}$ 。

### 3.5.2 硬件仿真

一般在涉及模电的电路搭建中，不做仿真而直接搭建实物电路的做法是有风险

的。所以事先在硬件仿真软件（Proteus）中进行了硬件仿真。

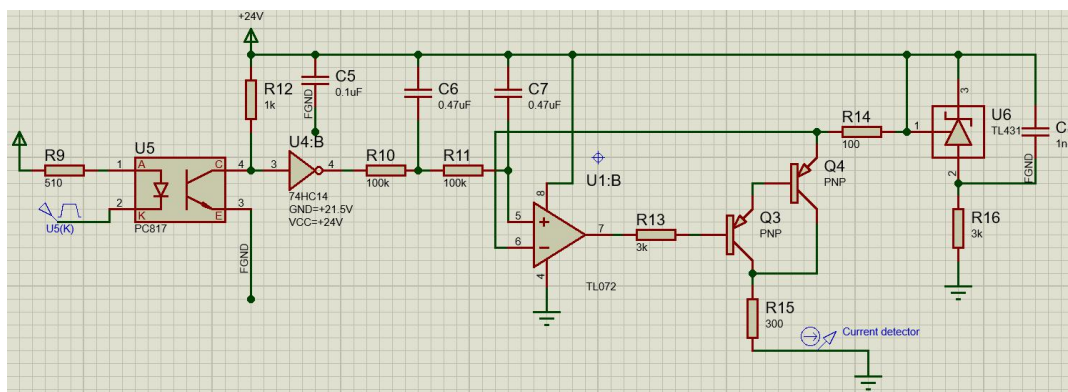


图 3.6 模拟输出模块硬件仿真原理图

该电路的原理稍后会进行讲解，现在介绍一下仿真的具体步骤。

上图中最左边的标号为“U5(K)”的器件是一个仿真信号发生器，双击它，进行如下设置：

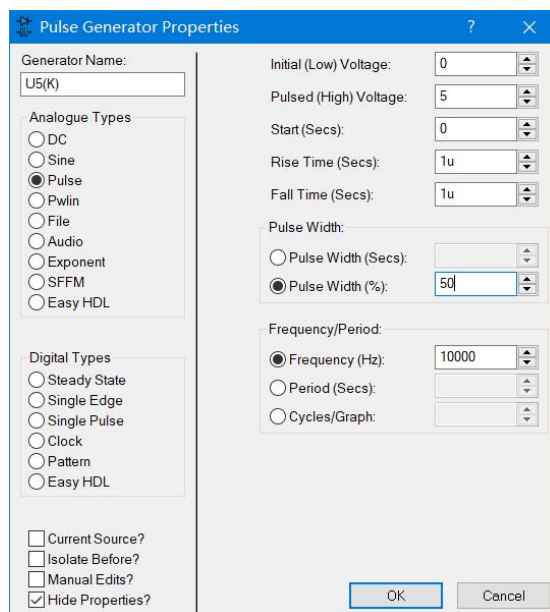


图 3.7 信号发生器的配置

在 Analogue Types 中选择 Pulse(脉冲方波), Initial Voltage 设为 0V, Pulsed Voltage 设为 5V。这是因为单片机输出的 PWM 方波的高电平是 5V，低电平为 0V。最重要的设置参数是 Pulse Width(%)占空比。通过从 0 到 100 不断改变占空比的值，再观察图 3.6 中标号为“current detector”的电流探针的值，记录“占空比-电流值”形式的键值对，再通过 MATLAB 软件绘出以占空比为自变量，电流值为因变量的折线图。

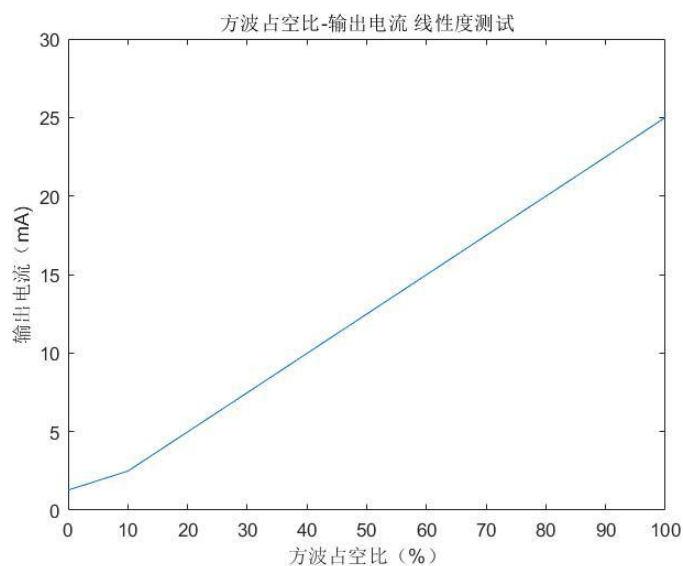


图 3.8 方波占空比-输出电流仿真线性度测试结果图

上图的仿真结果具有两个重要信息，一是在方波占空比较小时（大概小于 10%）会电流的输出出现非线性失真的情况，说明在后续编程工作时应该避免让方波占空比过小；二是观察输出电流的覆盖范围大约为 3-25mA，该电流范围覆盖要求的指标 4-20mA，说明该仿真电路符合指标要求。

### 3.5.3 电路原理分析

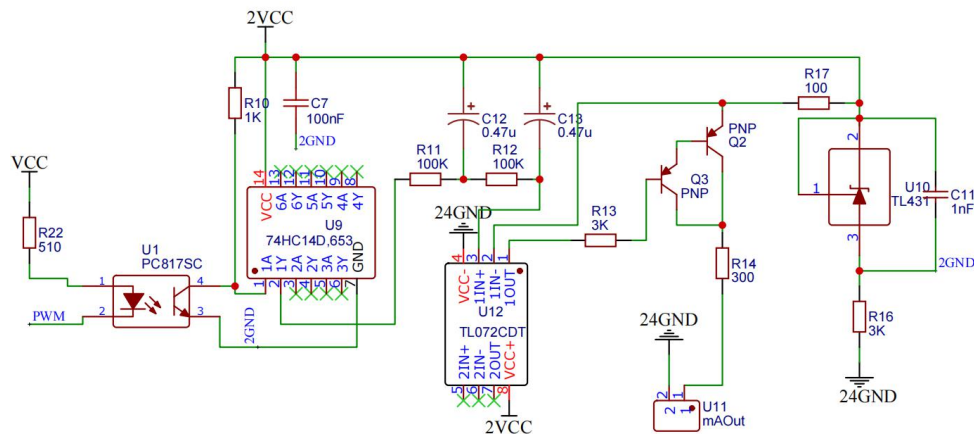


图 3.9 模拟输出模块原理图

PC817 为线性光耦，在模拟输出模块中作为耦合器件，完全隔离电流生成模块与单片机模块，使其相互不产生影响。因为，单片机模块使用的是 5V 电源，而电流生成模块使用的是 24V 电源。24V 电源是工业应用场景中常用的电源，驱动能力比 5V 电源更强。此外，信号经过光耦会发生反相；

74HC14 为 6 路施密特触发反相器。该施密特触发反相器在电路的作用主要有两个：一、方波信号在经过光耦时发生了反相，为了消除这种影响，让信号通过反相器再次反相；二、施密特触发器能提高方波信号的跳变沿的陡峭程度和减轻方波可能存在的噪声抖动程度；

TL072 为运算放大器。在电路中，该运放作为互阻型放大器将模拟电压信号转换为模拟电流信号。使用运放的优势在于其输出不受输出端接入负载的影响；

TL431 是稳压源，其输出的稳压降为 2.5V。所以，“2GND”网络标号处的电压大小为 21.5V。在模拟输出模块中，高电平为 5V，低电平为 0V 的方波信号在 PC817、施密特反相器和 TL431 的配合下转换成了高电平为 24V，低电平为 21.5V 的方波信号。主要器件及其功能介绍完毕，接下来分析生成 4-20mA 电流的电路原理。

首先单片机输出的 PWM 方波（高电平为 5V、低电平为 0V）经过光耦和反相器的两次反相以及 TL431 稳压源的反馈作用，输出仍是 PWM 方波，且占空比不变，但该方波的高电平为 24V，低电平为 21.5V。这里，方波的占空比参量根据角度数据值线性映射的，代表了变化的角度数据值。

然后该方波经过由电阻 R11，电容 C12，电阻 R12，电容 C13 组成的二次无源低通滤波器网络转换为模拟电压，这个过程类似于 DAC（数模转换）。之后该模拟直流电压经过互阻型运放（TL072）转换为模拟直流电流。该模拟直流电流再经过由 Q2、Q3 两个 PNP 型三极管组成的复合型 PNP 型三极管放大为范围为 4-20mA 的模拟直流电流，并从接线端子输出。该三极管从基极输入，从集电极输出，属于共射极放大器，具有较大的电流增益。通过调整电路参数如电阻 R17 使该三极管工作在线性区，保证整个电路的数据转化过程是线性的，从而输出的模拟直流电流就能与角度数据保持线性映射关系。

### 3.6 RS485 模块

#### 3.6.1 功能说明

单片机将从角度传感器模块接收到的角度数据通过串口 2 发送给 RS485 模块，RS485 模块再将该角度数据以数字形式发送给外界。

### 3.6.2 电路原理分析

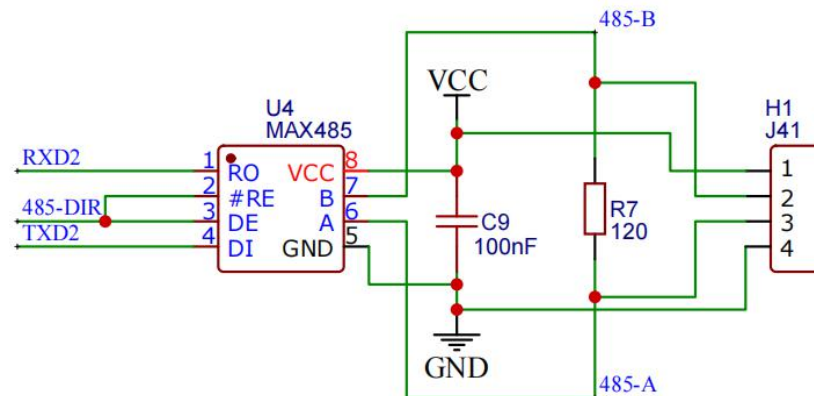


图 3.10 数字输出模块原理图

MAX485 是用于 RS-485 通信的低功耗收发器。采用半双工通讯方式，它完成将 TTL 电平转换为 RS-485 电平的功能<sup>[1]</sup>。MAX485 内部含有一个驱动器(Driver)和接收器(Receiver)；RO 端为接收器输出，DI 端为驱动器输入。#RE 和 DE 端分别为接收和发送的使能端，当#RE 为逻辑 0 时，器件处于接收状态；当 DE 为逻辑 1 时，器件处于发送状态。

电阻 R7 为匹配电阻。电容 C9 是为了滤除直流电源的纹波。

MAX485 的 RO 和 DI 端分别与单片机串口 2 的 RXD2 和 TXD2 相连。单片机通过一个普通 I/O 引脚 485-DIR 控制 MAX485 对角度数据的发送。通过串口 2 发送角度数据时，首先将 485-DIR 引脚置高电平让 MAX485 处于发送状态，MAX485 芯片随后接收到串口 2 发送的角度数据，该角度数据是二进制比特流。当 MAX485 接收到比特 1 时，就让 A 端输出电压比 B 端输出电压高；当 MAX485 接收到比特 0 时，就让 B 端输出电压比 A 端输出电压高。由此，角度数据以比特流方式向外部接收单位发送。

## 4 软件设计

### 4.1 程序流程

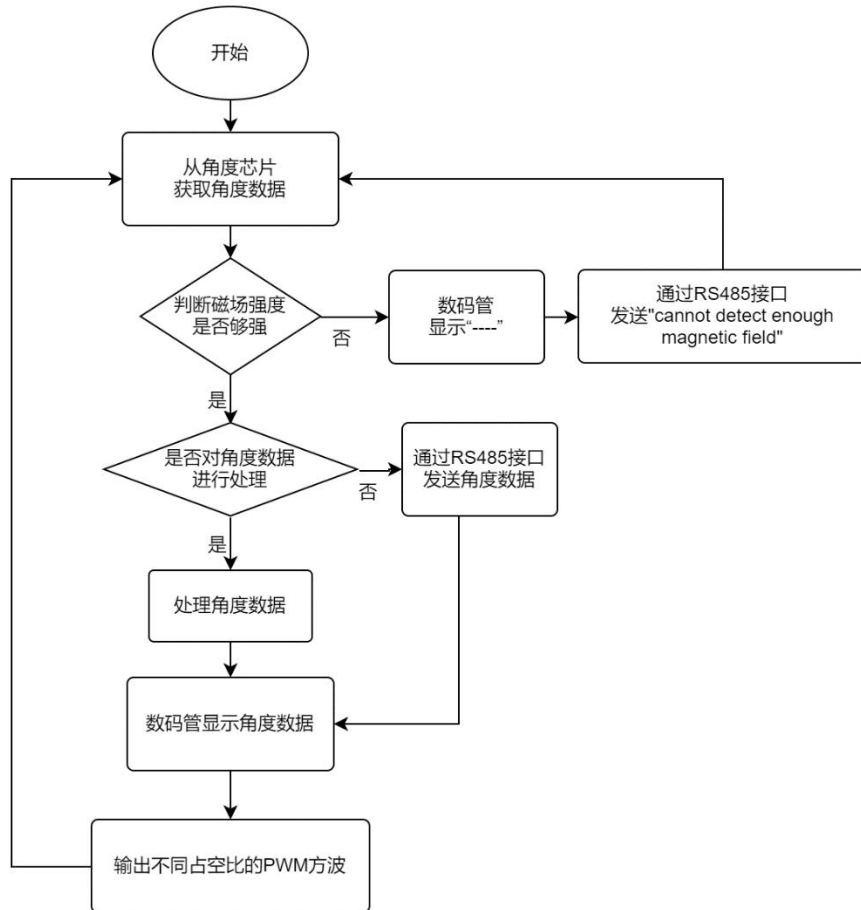


图 4.1 程序流程图

首先，单片机通过 SPI 接口从角度传感器 MT6816 中获取二进制角度数据，该数据有一个比特位用来指示角度传感器周围是否有足够的磁场强度。

如果有足够的磁场强度，即代表角度传感器感测到了可靠的磁场角度数据。接着如果单片机不对角度数据进行处理，因为角度数据本身就是数字形式，那么会被单片机直接通过 RS485 接口发送出去。如果对角度数据进行处理，那么就把原始高精度角度数据转换为精度为  $0.5^\circ$  的低精度角度数据。然后通过数码管显示处理后的角度数据。最后将处理得到的范围为  $0\sim 330^\circ$ 、精度为  $0.5^\circ$  的角度数据线性映射为 PWM 方波的占空比参量，根据不同的角度数据输出不同占空比的 PWM 方波。生成的 PWM 方波经过电流生成模块输出与角度数据保持线性映射关系的模拟电流。流

程走完回到第一步。

如果没有足够的磁场强度，就让数码管显示四条横杠，然后通过 RS485 接口发送字符串 “cannot detect enough magnetic field”。流程走完回到第一步，继续监听角度数据的读取。

## 4.2 系统初始化

因为系统使用了单片机的 SPI 接口、PWM 功能、串口 2、I/O 口以及中断等资源，所以需进行相应资源的初始化。

### 4.2.1 SPI 接口功能的初始化

将 SPI 控制寄存器 SPCTL<sup>[2]</sup>的 SSIG<sup>[2]</sup>位设为 1，以让 SPCTL 的 MSTR<sup>[2]</sup>位来确定单片机在 SPI 通信中是主机还是从机；

将 SPCTL 的 SPEN<sup>[2]</sup>位设为 1，以使能 SPI 接口功能；

将 SPCTL 的 DORD<sup>[2]</sup>位设为 0，以让数据的 MSB（最高位）最先发送，这是为了与角度传感器的 SPI 设置一致；

将 SPCTL 的 MSTR<sup>[2]</sup>位设为 1，以将单片机设为 SPI 通信中的主机；

将 SPCTL 的 CPOL<sup>[2]</sup>位设为 1，CPHA<sup>[2]</sup>位设为 1，以设置 SPI 的模式为模式 3，即 SPI 时钟信号 SCK 在空闲时为高电平、在 SPI 数据线上传输的数据会在 SCK 的前时钟下降沿驱动，在后时钟上升沿采样。这也是为了与角度传感器的 SPI 模式一致；

将 SPCTL 的 SPR1<sup>[2]</sup>位设为 1，SPR0<sup>[2]</sup>位设为 0，以设置 SPI 时钟信号的脉冲频率为单片机主频的 64 分频，频率过低或过高都会导致 SPI 通信故障；

将中断允许寄存器 IE2<sup>[2]</sup>的 ESPI<sup>[2]</sup>位设为 1，以允许 SPI 接收中断。这是为了让单片机能够接收从角度传感器传输的角度数据。

### 4.2.2 数码管 I/O 口初始化

将 P0 端口模式寄存器 P0M1<sup>[2]</sup>的第 1, 2, 3, 4 位设为 0，P0M0<sup>[2]</sup>的第 1, 2, 3, 4 位设为 1，以将 P0.1、P0.2、P0.3、P0.4 引脚设为强推挽输出模式。这是为了让数码管的位码引脚能输出使数码管亮起的驱动电流。

### 4.2.3 PWM 功能初始化

将 P1 端口模式寄存器 P1M1<sup>[2]</sup>的第 3 位设为 0，P1M0<sup>[2]</sup>的第 3 位设为 1，以将



P1.3 引脚设置为强推挽输出模式。这是为了让 P1.3（CCP0）引脚具有输出 PWM 方波的能力。

将 PCA 控制寄存器 CCON<sup>[2]</sup>的 CF<sup>[2]</sup>位设为 0，以清零 PCA 计数器溢出标志位，这是为下一次 PCA 计数器溢出做准备。当 PCA 计数器溢出时，CF 会由硬件置位。

将 CCON 的 CR<sup>[2]</sup>位设为 0，以关闭 PCA 计数器。

将 CCON 的 CCF0<sup>[2]</sup>位设为 0，以清零 PCA 模块 0 中断标志，这是为进入下一次计数值匹配中断函数做准备。当 PCA 计数器出现匹配或捕获事件时该位由硬件置位。

将中断优先级控制寄存器高 IPH<sup>[2]</sup>的 PPCAH<sup>[2]</sup>位设为 1、中断优先级控制寄存器低 IPL<sup>[2]</sup>的 PPCAL<sup>[2]</sup>位设为 1，以让 PCA 中断使用最高优先级。这是因为 PCA 中断触发的频率较其他中断更高，若不让 PCA 中断使用最高优先级，那么其他中断如 SPI 接收中断的发生会抢占 PCA 的工作时间，导致 PCA 功能的崩溃。

将 PCA 模式寄存器 CMOD<sup>[2]</sup>的 CIDL<sup>[2]</sup>位设为 0，以让 PCA 计数器在 MCU 的空闲模式下也能继续工作，保证 PWM 方波生成的连续性。

将 CMOD 的 CPS2<sup>[2]</sup>位设为 1，CPS1 位设为 0，CPS0 位设为 0，以选择 PCA 计数的脉冲源为系统时钟（主频）。

将 PCA 比较/捕获模式寄存器 CCAPM0<sup>[2]</sup>的 ECOM0<sup>[2]</sup>位设为 1，以允许比较器功能。

将 CCAPM0 的 MAT0<sup>[2]</sup>位设为 1，以在 PCA 计数值与模块的比较/捕获寄存器的值匹配时置位 CCON 寄存器的中断标志位 CCF0，从而触发 PCA 中断。

将 CCAPM0 的 TOG0<sup>[2]</sup>位设为 1，以在 PCA 计数器的值与模块的比较/捕获寄存器的值匹配时将使 CCP0 脚电平翻转，这是形成周期方波信号的关键。

将 CCAPM0 的 ECCF0<sup>[2]</sup>位设为 1，以使能 CCF0 中断。

将 PCA 基本计数器的低 8 位 CL<sup>[2]</sup>和高 8 位 CH<sup>[2]</sup>都复位为 0，以保证计数值是从 0 开始的。

#### 4.2.4 串口 2 的初始化

将辅助寄存器 AUXR<sup>[2]</sup>的 BRTR<sup>[2]</sup>位设为 1，以允许独立波特率发生器运行。因为串口 2 只能使用独立波特率发生器作为波特率发生器。

将 AUXR 的 S2SMOD<sup>[2]</sup>位设为 1，以使串口 2 的波特率加倍。

将 AUXR 的 BRTx12<sup>[2]</sup>位设为 0，以使独立波特率发生器每 12 个时钟计数一次。

将串口 2 的控制寄存器 S2CON 的 S2SM0 位设为 0、S2SM1 设为 1，以指定串口的工作方式为方式 1。因为该方式 Baud rate 可以变化，通信更易于变通。

方式 1 的波特率计算公式<sup>[2]</sup>为：

$$BaudRate = (2^{S2MOD}/32) \times (BRT's \text{ Spillover rate})$$

$$BRT: Baud \text{ Rate Timer}$$

且 BRT 的溢出率的计算公式<sup>[2]</sup>为：

$$BRT's \text{ Spillover Rate} = System \text{ Clock}/12/(256 - BRT_{Reload})$$

设置串口 2 的波特率为 9600，结合上述两个公式得到 BRT 独立波特率发生器的装载值计算公式如下：

$$BRT_{Reload} = (256 - System \text{ Clock}/12/16/9600)$$

最后，将中断允许寄存器 IE2 的 ES2<sup>[2]</sup>设为 1，以使能串口 2 中断。

### 4.3 角度数据读取与处理

#### 4.3.1 角度数据读取原理

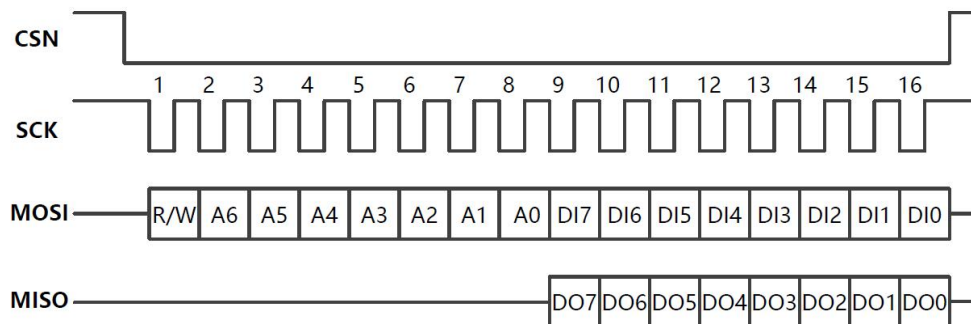


图 4.2 角度数据读取原理

如上图<sup>[3]</sup>，MOSI 代表单片机发送数据给角度传感器。R/W 位是读/写控制位，将其设为 1，角度数据 DO7~DO0 会从角度传感器里被读出。角度数据存储的地址为 0x03，0x04<sup>[3]</sup>的两个寄存器里，A6~A0 代表寄存器的地址。

首先，单片机发送字节 0x83 给角度传感器，表示想从角度传感器的地址为 0x03 的角度数据寄存器读出高 8 位角度数据，接着角度传感器就会通过 MISO 线发送该寄存器存储的字节数据 DATA1 给单片机。接着，单片机发送字节 0x84 给角度传感器，表示想从角度传感器的地址为 0x04 的角度数据寄存器读出低 8 位角度数据，接着角度传感器就会通过 MISO 线发送该寄存器存储的字节数据 DATA2 给单片机。

单片机通过 SPI 接口发送字节数据 DATA 的具体过程：

第一，先将 SPI 状态寄存器 SPSTAT 的 SPIF 位标志、WCOL 位标志通过写“1”清零，为传输数据做准备。SPIF 为 SPI 传输完成标志，WCOL 为 SPI 写冲突标志；

第二，把 DATA 赋值给 SPI 数据寄存器 SPDAT；

第三，等待 SPIF 标志位置 0，即等待 SPI 接口数据发送完成；

第四，再将 SPIF 和 WCOL 标志通过写“1”清零，为下一次 SPI 数据接收或发送做准备。

在单片机发送字节数据 0x83、0x84 给角度传感器后，若角度传感器成功将角度数据发送给单片机，那么就会触发单片机的 SPI 中断函数，单片机通过 SPI 接口接收角度数据是在中断函数里进行的，接收的步骤如下：

第一，进入 SPI 中断函数；

第二，将 SPDAT 里接收到的字节数据赋给某个变量；

第三，将 SPIF 和 WCOL 标志通过写“1”清零，为下一次 SPI 数据接收或发送做准备。

所以，角度数据读取的总体流程如下：

第一，单片机发送字节数据 0x83 给角度传感器，角度传感器将地址为 0x03 的寄存器中存储的高 8 位角度数据发送给单片机，从而触发 SPI 中断函数，在中断函数中将该高 8 位角度数据使用 int 型全局变量 DATA1 存储；

第二，单片机发送字节数据 0x84 给角度传感器，角度传感器将地址为 0x04 的寄存器中存储的低 8 位角度数据发送给单片机，从而触发 SPI 中断函数，在中断函数中将该低 8 位角度数据使用 int 型全局变量 DATA2 存储；

#### 4.3.2 角度数据的处理

下表为角度数据寄存器的格式<sup>[3]</sup>：

表 4.1 角度数据寄存器格式

寄存器地址	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
0x03	Angle<13:6>							
0x04	Angle<5:0>						No_Mag_Warning	PC

初始化 int 型全局变量 DATA\_ANGLE，将通过角度读取获取的高 8 位角度数据 DATA1 左移 8 位与低 8 位角度数据 DATA2 相或后赋值给 DATA\_ANGLE，之后再

DATA\_ANGLE 右移两位。此时 DATA\_ANGLE 在数值上等于上表中的 Angle[13:0]。然后通过下面的公式<sup>[3]</sup>计算出绝对角度 angle。

$$\text{angle} = \frac{\sum_{i=0}^{13} \text{Angle} \langle i \rangle \cdot 2^i}{16384} \cdot 360^\circ \quad (1)$$

表 4.5 中的 No\_Mag\_Warning 位是一个用来表明是否有足够的磁场强度的诊断位<sup>[3]</sup>。当 MT6816 不能检测到足够的磁场强度时，该比特就会设为 1。单片机通过检测该比特就可以知道角度芯片附近是否有足够的磁场，如果该比特是 0，那么就提取角度数据；如果该比特是 1，那么直接忽略收到的角度数据。

由此，角度数据处理的流程如下：

第一，通过角度读取流程得到了高 8 位角度数据 DATA1 和低 8 位角度数据 DATA2；

第二，单片机检测 DATA2 中的 No\_Mag\_Warning 位，如果该位为 1，表明角度传感器检测不到足够的磁场，获取的角度数据是无效，因此回到第一步；如果该位为 0，表明 MT6816 检测到足够的磁场，角度数据有效，继续执行第三步；

第三，单片机从 DATA1 和 DATA2 中提取角度数据 Angle[13:0] 赋给 DATA\_ANGLE，并利用公式(1)计算得到角度值 angle。

#### 4.4 角度数据的显示

单片机控制数码管的段码引脚和位码引脚的 12 个 I/O 口，以驱动四位数码管显示精度为 0.5° 的角度数据。

角度数据 angle 的精度约为 0.02°，因为实际应用中如此的高精度没有必要，遂将该角度精度进行压缩转换，得到角度精度为 0.5 度的角度数据 angle\_current。

在数码管显示模块原理图中，P2 端口对应数码管的段码引脚，标号 DIG1-4 的引脚对应数码管位码引脚。为了方便数码管显示角度数据，遂针对段码维持一个硬编码数组，数组的索引下标对应数码管显示的数字。硬编码数组如下：

```
unsigned char code AscLed[10] =
    {0xC0,0xF9,0xA4,0xB0,0x99,0x92,0x82,0xF8,0x80,0x90};
```

当磁场强度足够时，数码管利用动态扫描的方法显示角度数据 angle\_current，原理如下：

第一，从角度数据 angle\_current 取出百位数字 bai，给 P2 端口赋值 AscLed[bai]，

并且将位码 DIG1 设为 1，其余位码设为 0，点亮百位数码管，延时约 20ms；

第二，从角度数据 `angle_current` 取出十位数字 `shi`，给 P2 端口赋值 `AscLed[shi]`，并且将位码 DIG2 设为 1，其余位码设为 0，点亮十位数码管，延时约 20ms；

第三，从角度数据 `angle_current` 取出个位数字 `ge`，给 P2 端口赋值 `AscLed[ge]` 并与 `0x7F` 相与（点亮小数点），并且将位码 DIG3 设为 1，其余位码设为 0，点亮个位数码管，延时约 20ms；

第四，从角度数据 `angle_current` 取出小数位数字 `xs`，给 P2 端口赋值 `AscLed[xs]`，并且将位码 DIG4 设为 1，其余位码设为 0，点亮小数位数码管，延时约 20ms；

当磁场强度不够时，数码管会显示四个横杠。其显示原理为：定义数码管显示横杠图像的硬编码为 `0xBF`，并将其赋值给 P2 端口，将位码 DIG1-4 全部置 1。

## 4.5 PWM 方波的生成

### 4.5.1 方波生成原理

生成 PWM 方波是为了让电流生成模块输出 4-20mA 的模拟电流。PWM 方波连接了两个变量，一个是角度数据 `angle_current`，一个是模拟电流。角度数据的测量范围是  $0-330^{\circ}$ ，精度为  $0.5^{\circ}$ ，所以整个角度域有 660 个级别。为了让输出的模拟电流也拥有 660 级别，必须让位于中间变量的 PWM 方波也拥有 660 个级别。所以选择 12 位 PWM，12 位 PWM 拥有 4096 个级别的占空比，这表示从角度变量映射到模拟电流变量是绝对可靠的。

首先定义 PWM 的周期 `PWM_DUTY` 为 4096，其代表为 PCA 所选择的时钟脉冲个数。然后定义 `PWM_high` 变量来保存 PWM 输出高电平的 PCA 时钟数，定义 `PWM_low` 变量来保存 PWM 输出低电平的 PCA 时钟数。PWM 的周期 `PWM_DUTY` 等于 `PWM_high` 加上 `PWM_low`。通过变化 `PWM_high` 的值可以生成任意占空比的 PWM 方波。

PCA 计数值初始值为 0，而且比较/捕获寄存器数值初始值亦为 0，所以在程序刚开始时，PCA 的计数值就与比较/捕获寄存器数值发生匹配，又因为 CCP0 引脚默认输出电平为低电平，在匹配事件发生时 CCP0 输出取反为高电平，同时发生比较匹配中断。

自定义 CCP0 映射寄存器 `CCAP0_tmp`，并初始化为 0，该寄存器是为了方便给 PCA 捕捉/比较寄存器 `CCAP0` 赋值的。在比较匹配中断里判断 CCP0 引脚输出的电

平，此时是高电平，遂给 CCAP0\_tmp 加上 PWM\_high 变量，然后将 CCAP0\_tmp 分别赋值给低 8 位 CCAP0L 和高 8 位 CCAP0H。

跳出中断后，PCA 计数值从 0 开始增加，当 PCA 计数值增加到 PWM\_high 的数值时，PCA 的计数值又与比较/捕获寄存器数值发生匹配，又因为 CCP0 引脚此时输出电平为高电平，在匹配事件发生时 CCP0 输出取反为低电平，同时发生比较匹配中断。注意这里高电平的持续时间即为 PWM\_high 代表的时钟脉冲数。

再次进入比较匹配中断里，先判断 CCP0 引脚输出的电平，此时是低电平，就给 CCAP0\_tmp 加上 PWM\_low 变量让其变为 PWM\_DUTY，然后将 CCAP0\_tmp 分别赋值给低 8 位 CCAP0L 和高 8 位 CCAP0H。

跳出中断后，PCA 计数值从 PWM\_high 开始增加，当 PCA 计数值增加到 PWM\_DUTY 的数值时，PCA 的计数值又与比较/捕获寄存器数值发生匹配，又因为 CCP0 引脚此时输出电平为低电平，在匹配事件发生时 CCP0 输出取反为高电平，同时发生比较匹配中断。注意这里低电平的持续时间即为 PWM\_low 代表的时钟脉冲数。至此，循环形成，输出方波。

#### 4.5.2 方波生成流程

第一，通过校准 PWM\_high 的值，找出电流生成模块输出约 4mA 电流对应的 PWM\_high 的值，经过实验该值约为 955；再找到模拟输出模块输出约 20mA 电流对应的 PWM\_high 的值，经过实验该值约为 3646；

第二，将[955,3646]区分均分为 660 级，对应于角度数据的级别，且每个级别的数值约为 4。通过公式（ $pwm=955+angle\_current*2*4$ ）计算得到 PWM 输出高电平的 PCA 时钟数，将 PWM\_high 的值设为 pwm；

第三，将 CR 设为 1 以开启 PCA 计数，CCP0 引脚开始输出占空比为 PWM\_high/PWM\_DUTY 的 PWM 方波，方波经过电流生成模块后输出对应大小的模拟电流。

### 4.6 串口 2 的角度数据发送

#### 4.6.1 数据发送的思路

单片机的串口 2 将角度数据 DATA\_ANGLE 发送给 RS485 模块以输出数字形式的角度数据。

首先定义一个串口 2 发送中断标志位 B\_TI2 并初始化为 0。

在串口 2 发送中断函数中，首先判断串口 2 控制寄存器 S2CON 的发送中断请求标志位 S2TI 是否为 1。如果为 1 的话就说明模块开始发送数据了，然后马上清除 S2TI 以备下次硬件置位，然后再将自定义的 B\_TI2 置为 1。

在串口 2 发送数据函数中，首先将 B\_TI2 置为 0，再将要发送的字节数据赋值给串口 2 的数据缓冲寄存器 S2BUF，之后让程序等待 B\_TI2 变为 0。数据发送完成后，就会触发中断函数，在中断函数中会将 B\_TI2 置为 1，表明数据发送成功，从而结束发送数据函数的阻塞等待。之后在将 B\_TI2 置为 0，为下一次数据发送做准备。

#### 4.6.2 数据发送的流程

如果磁场强度不够，那么单片机会通过串口 2 给 RS485 模块发送一串提示字符串：“cannot detect enough magnetic field”，表示未检测到足够的磁场；如果磁场强度足够，那么单片机会通过串口 2 给 RS485 模块发送角度数据 DATA\_ANGLE。

角度数据会以 ASCII 码的字符串形式发送，步骤如下：

第一，通过串口 2 依次发送字符'D'、'a'、't'、'a'、'='；

第二，先获取 DATA\_ANGLE 万、千、百、十、个位上的数字，然后依次加上字符'0'并通过串口 2 发送；

第三，通过串口 2 依次发送 0x0d（回车键）和 0x0a（换行键），以换行显示角度数据。

## 5 系统验证实验和成果展示

### 5.1 电路板展示

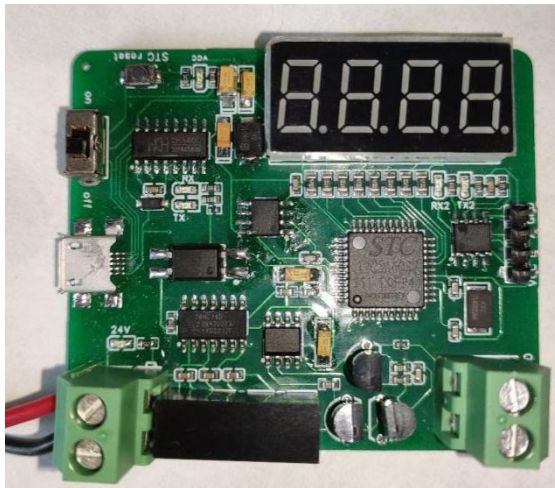


图 5.1 电路板正面实物图

最左边的接线端子接入 24V 电源。最右边的接线端子输出 4-20mA 电流。排针的 A、B 引脚是 RS485 模块的输出。4 位数码管左下方的 8 脚黑色芯片是角度传感器 MT6816，我们需要将磁铁放置在其正上方以进行验证。

### 5.2 角度范围指标验证

为了验证 RS485 信号代表的角度数据是否成功发送，使用 RS485 转 USB 工具将 RS485 模块与 PC 端的 USB 接口连接。打开 PC 端的串口调试软件。

为了验证角度检测范围达到 0-360°，首先旋转磁铁至 0°。验证结果如下：

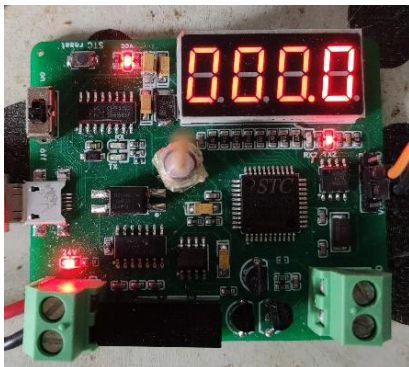


图 5.2 检测角度为 0 度



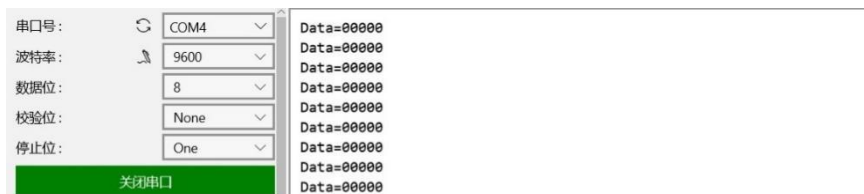


图 5.3 串口调试软件接收到数据 0

此时，磁场方向为 0 度，数码管显示为“000.0”，表明单片机读取角度数据成功。串口调试软件接收到字符串“Data=00000”，根据公式（1）计算：

$$angle = \frac{0}{16384} \times 360^\circ = 0^\circ$$

上式表明 RS485 模块亦成功输出数字形式的角度数据。

接着，旋转磁铁角度为 360 度，验证结果如下：

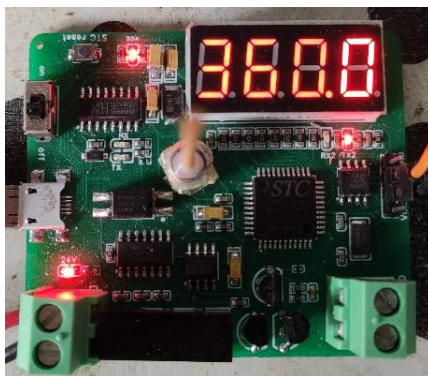


图 5.4 检测角度为 360 度

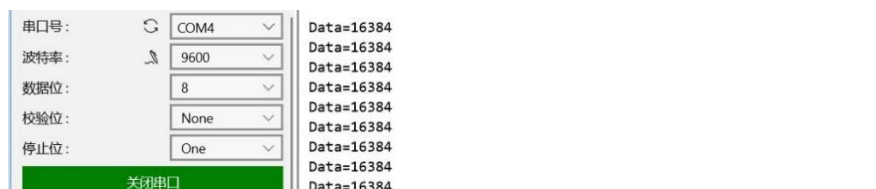


图 5.5 串口调试软件接收到数据 16384

此时，磁场方向为 360 度，数码管显示为“360.0”，表明单片机读取角度数据成功。串口调试软件接收到字符串“Data=16384”，根据公式（1）计算：

$$angle = \frac{16384}{16384} \times 360^\circ = 360.0^\circ$$

上式表明 RS485 模块亦成功输出数字形式的角度数据。

由上面的实验验证可知，本设计的角度检测范围 0-360 度的指标已实现。

### 5.3 角度精度指标验证

为了验证角度精度达到  $0.5^\circ$ ，首先旋转磁铁至  $180.0^\circ$ 。验证结果如下：

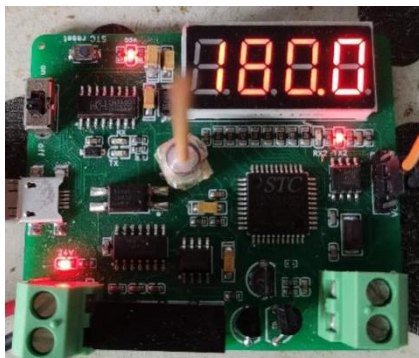


图 5.6 检测角度为  $180.0^\circ$  度



图 5.7 串口调试软件接收到数据 8192

此时，磁场方向为  $180^\circ$ ，数码管显示为“ $180.0$ ”，表明单片机读取角度数据成功。串口调试软件接收到字符串“Data=8192”，根据公式（1）计算如下：

$$angle = \frac{8192}{16384} \times 360^\circ = 180.0^\circ$$

上式表明 RS485 模块成功输出数字形式的角度数据。

接着，将磁铁顺时针旋转  $0.5^\circ$ ，验证结果如下：

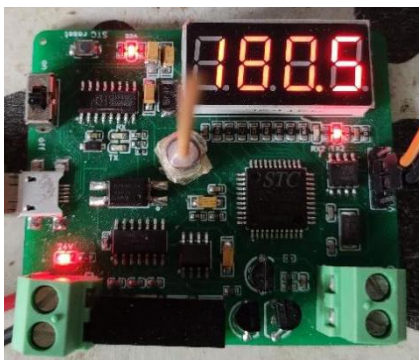


图 5.8 检测角度为  $180.5^\circ$  度

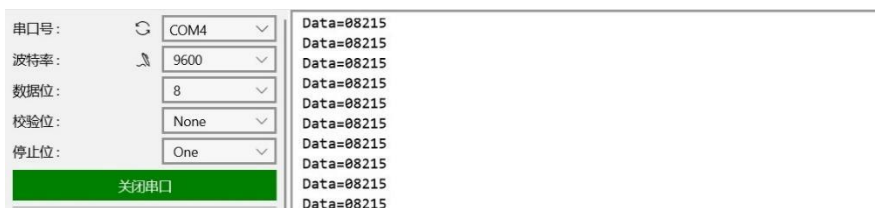


图 5.9 串口调试软件接收到数据 8215

此时，磁场方向为 180 度，数码管显示为“180.5”，表明单片机读取角度数据成功。串口调试软件接收到字符串“Data=8215”，根据公式（1）计算：

$$angle = \frac{8215}{16384} \times 360^\circ \approx 180.5^\circ$$

上式结果表明 RS485 模块成功输出数字形式的角度数据。

由上面的实验验证可知，本设计的角度精度指标达到 0.5 度。

#### 5.4 模拟输出验证



图 5.10 使用万用表验证模拟输出

如上图所示，万用表的正负极接入输出 4-20mA 电流的接线端子。为了测量直流电流，将黑色旋钮指向直流 20mA 量程。在 MT6816 芯片上方放置圆形磁铁，芯片感应到场强足够的磁场。此时，4 位数码管显示磁铁的角度为 142.0°，万用表测得此时的电流值为 10.84mA。

根据角度和电流的线性映射原理计算理论电流值为：

$$I = \left( \frac{16mA}{330^\circ} \right) \times 142.0^\circ + 4mA \approx 10.88mA$$

可以看到实际值与理论值之间有 0.04mA 的误差。这是因为方波的占空比是整数

值，而对应的电流值却是浮点值，两者之间的映射会存在一定的量化误差。

### 5.5 无磁场情况测试

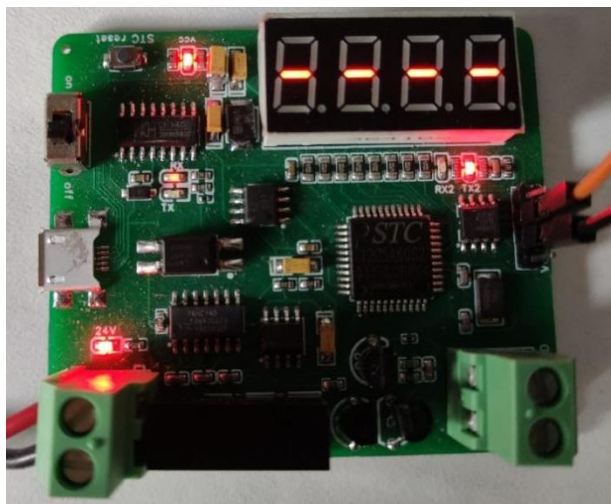


图 5.11 电路板在无磁场情况下的截图

如图，MT6816 芯片上方没有放置磁铁，此时数码管显示四个横杠表明没有足够的磁场强度。

此时，串口调试软件显示如下：

```
cannot detect enough magnetic field  
cannot detect enough magnetic field  
cannot detect enough magnetic field
```

图 5.12 串口调试软件在无磁场情况下接收到的提示

磁场强度不够的情况下 RS485 模块会发送字符串“cannot detect enough magnetic field”给工业现场的其他 RS485 接收端。

## 5.6 角度-输出电流线性度测试

为了验证角度数据和输出电流之间符合线性关系，通过多次旋转磁铁并同时记录数码管显示的角度数据和万用表显示的电流数据，列表如下：

表 5.1 通过数十次实验测得的角度-电流数据对

角度(° )	电流(mA)	角度(° )	电流(mA)	角度(° )	电流(mA)	角度(° )	电流(mA)
0	4.00	91.0	8.38	161.0	11.73	270.0	16.98
8.5	4.39	93.5	8.50	177.0	12.51	295.5	18.20
16.0	4.75	100.0	8.81	185.0	12.90	320.0	19.38
19.0	4.90	113.0	9.45	194.0	13.33	323.0	19.54
22.0	5.04	115.0	9.52	234.5	15.27	326.0	19.66
31.0	5.48	138.5	10.68	240.0	15.54	333.0	20.00
40.5	5.94	142.0	10.84	244.0	15.74		
66.5	7.20	147.0	11.06	257.5	16.38		
77.5	7.75	150.5	11.25	261.0	16.57		

当电流生成模块输出 20mA 大小的电流，理论上此时的磁场角度应为 330.0°，但实际上此时的磁场角度为 333.0° 理论与实际的误差是由于量化误差导致的。因为 PWM 方波的占空比是由整数值表示的，而电流值是浮点数，从整数值映射到浮点值会产生量化误差。

按照表 5.1 数据在 MATLAB 软件中做线性度测试结果如下：

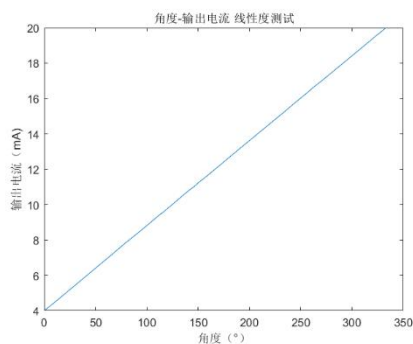


图 5.13 实际角度-输出电流线性测试结果图

由上图可知，角度数据与输出电流之间符合线性关系，验证成功。

## 6 总结与展望

### 6.1 毕设总结

首先，通过调研市场上各种电动推杆，得出目前市场上大多数电动推杆不具备精确的位置控制能力。遂本课题通过设计角度传感器模块并期望未来能在电动推杆上集成此模块，如此电动推杆能通过减速机构将位置数据转换为角度数据从而检测推杆的位置信息。

接着，根据系统的设计指标确定毕设用到的单片机芯片类型、角度传感器芯片类型、RS485 芯片类型及数码管的类型。确定好使用的类型之后，再收集对应芯片的数据手册。通过仔细阅读数据手册，确定相关硬件的原理图。对应电流生成模块的模拟电路，先在 Proteus 软件里进行了硬件仿真，确定该模拟电路对于不同的占空比的方波输入能够输出范围包括 4-20mA 电流值的电流。

原理图制作完成后，开始进行 PCB 布板以确定实物电路图的连线、封装和尺寸大小，接着购买相关元器件进行硬件焊接，成功制作出能正常工作的系统电路板。

最后，进行软件编程和调试，涉及到单片机如何通过 SPI 接口获取角度数据以及角度数据的处理。软件部分的难点就是如何将范围为 0-330°、精度为 0.5° 的角度数据线性映射为 4-20mA 的电流。解决办法是先将角度数据映射为方波的不同占空比值，接着不同占空比的方波经过电流生成模块输出符合预期的电流值。

本次毕设涉及到硬件电路设计和单片机 C 语言编程的知识，且各项指标皆满足课程要求。

### 6.2 毕设展望

目前，本设计只是设计出角度传感器模块，并没有集成在电动推杆上，也就是说无法达到精确控制推杆行程的目的。在未来，期望通过在电动推杆的减速机构中加装磁铁和本设计的角度传感器模块来将推杆的位置数据转化为角度数据，并对角度数据进行感测，从而达到对推杆位置的精确控制。若约定 1mm 的位移对应与 0.5° 的角度偏移，那么本系统可以控制 660mm 的位置范围以及 1mm 的位移精度，应用前景是向好的。

## 参考文献

- [1] Wiki. RS-485 协议标准[EB/OL].<https://zh.wikipedia.org/wiki/EIA-485>,2021.
- [2] 宏晶科技.STC12C5A60S2 单片机数据手册[EB/OL].  
<http://www.stcmicro.com/datasheet/STC12C5A60S2-cn.pdf>,2021.
- [3] MagnTek.磁性传感器芯片 MT6816 数据手册  
[EB/OL].[http://www.magntek.com.cn/upload/MT6816\\_Rev.1.3.pdf](http://www.magntek.com.cn/upload/MT6816_Rev.1.3.pdf),2019.
- [4] 钟炜.基于以太网的电动执行器设计和开发[D].江苏:苏州大学硕士论文,2007.
- [5] 李哲.基于 CTMU 的血糖仪的软件设计与实现[D].四川:电子科技大学硕士论文,2014.
- [6] 常旭.逆变式 MAG 焊机数字化控制技术研究[D].江苏:江苏科技大学,2010.
- [7] 余瑞芬.传感器原理[M].北京:北京航空工业出版社,1995.
- [8] 彭君.传感器与检测技术[M].陕西:西安电子科技大学出版社,2003.
- [9] 汪卓飞.一种高精度角度传感器研究[D].浙江:浙江工业大学硕士论文,2009.
- [10] Wiki. Microcontroller[EB/OL]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcontroller>,2021.
- [11] 博客园 isAndyWu.SPI 接口扫盲 SPI 定义/SPI 时序(CPHA  
CPOL)[EB/OL].<https://www.cnblogs.com/isAndyWu/p/9543249.html>,2021.
- [12] Maxim.MAX485 数据手册[EB/OL].  
[https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1487-MAX491\\_cn.pdf](https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1487-MAX491_cn.pdf),2021.
- [13] H. Witschnig, A. Morici, B. Schaffer, J. Zimmer .A fully monolithic integrated anisotropic magnetoresistance based angle sensor for automotive[J].IEEE,2013.
- [14] Nandapurkar Kishor Bhaskarrao, Chandrika Sreekantan Anoop, Pranab Kumar Dutta. A Novel Linearizing Signal Conditioner for Half-Bridge-Based TMR Angle Sensor[J].IEEE,2021.
- [15] Thorben Schütte, Klaus Jünemann, Karl-Ragmar Riemschneider. Tolerance Compensation based on Gaussian Processes for Angle Measurements with Magnetic Sensor Arrays[J]. IEEE.,2020.



## 致谢

本论文是在指导老师吴从中的指导下完成的。

本次毕业设计大概花了我两个月的时间。刚开始的时候对自己的课题毫无了解，不相信自己能够完成这次毕业设计。后来通过和吴从中导师的 QQ 问答逐渐了解了设计一个单片机系统大概的流程，渐渐地回忆起大二时候学习过的单片机课程，也渐渐地回忆起自己曾经和同学们合作开发过一个温度传感器单片机系统，遂也渐渐地拾回了能完成这次毕业设计的信心。

如果没有吴老师对我的问题的耐心和悉心解答，我完成不了此次毕业设计和论文；如果没有吴老师及时地指出我的原理图和 PCB 版图的漏洞和错误，我完成不了此次毕业设计和论文；如果没有吴老师慷慨地给我提供 24V 电源和其他电子器件，我完成不了此次毕业设计和论文。所以，对于吴从中导师在我毕业设计和论文上提供的帮助，我表示由衷的感谢！

通过与吴从中导师的交流，我大概明白了本设计的基本流程。首先，需要策划整个设计的基本方案，比如你准备采用哪些芯片，你凭借哪些特性来选择这些芯片的。方案制定的差不多了，就可以开始使用 EDA 软件设计硬件的原理图和 PCB 版图了。这期间你还要将你的 PCB 版图打包给相关公司让他们制作电路板，自己购买你需要的电子器件，自己焊接。硬件的工作完成后，就剩软件的工作了。通过查阅单片机的数据手册，编写相应的程序，然后烧写到单片机里。当然不可能一次成功，你需要烧写上百次才可能得到一个满意的结果。在这上百次的烧写中，我明白了一个非常重要的行事法则：将大问题分解一个个小问题逐个击破。当你看到了一个庞大复杂的问题时，通过不断解决小问题，我的设计最终完成了。

我还要感谢我的同班好友杨志彬。如果没有他在硬件焊接方面对我的帮助和在软件调试时的点拨，我可能会绕很长一段弯路。

作者：石磊

2021 年 5 月 18 日