

# 基于 STM32 的磁编码器的设计

陈文浩 朱礼尧 迟涵文 刘 雯 赵志永 邓仕杰 黄彤津

(杭州电子科技大学 电子信息学院 杭州 310018)

**摘要:** 选用巨磁阻传感器作为敏感元件,设计一款基于 STM32 微控制器的磁编码器。由正交放置在圆柱状磁体下方的 4 个巨磁阻传感器输出两路正交电压信号,该电压信号经过调理电路滤波、放大,采用 STM32 微处理器对放大后的两路电压信号进行模数转换,然后对转换后的数字量进行校正、辩向和查表等来完成信号处理,输出准确的旋转角度值,并根据需要灵活选择合适的编码器输出方式。试验结果表明,磁编码器具有较高的检测精度以及实时性。

**关键词:** STM32 微处理器;磁编码器;巨磁阻传感器;算法运算

**中图分类号:** TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.40

## The design of magnetic encoder based on giant magneto-resistance

Chen Wenhao Zhu Liyao Chi Hanwen Liu Wen Zhao Zhiyong Deng Shijie Huang Tongjin

(Electronics and Information Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** A Giant Magneto-Resistance (GMR) sensor was selected to design a magnetic encoder based on STM32 microcontroller. Dual orthogonal voltage-signals were generated by four GMR sensors which were orthogonally placed in the bottom of a columned magnet. And the two voltage signals were filtered and amplified through conditioning circuit, and converted into digital signals in STM32 chip. Rotational angle value would be accurately displayed after determined the quadrant, look-up table and performed arithmetic operation. And the output of the magnetic encoder can be flexible to choose as needed. The results showed that the magnetic encoder had a high detection accuracy and real-time.

**Keywords:** STM32 microprocessor; magnetic encoder; giant magneto-resistance; arithmetic operation

## 1 引言

编码器是一种重要的数字式传感器<sup>[1-2]</sup>,它与数字信号处理技术、计算机控制测量技术相结合,能够对运动机械实现及时、快速、准确的检测与控制<sup>[3]</sup>。

光电编码器技术比较成熟,精度和分辨率比较高<sup>[4-6]</sup>,光电编码器在粉尘、油、烟以及水的环境中工作时,受到干扰极大甚至导致其无法工作。其使用寿命受环境温度的影响极大,使用寿命有限,码盘抗冲击和振动性能差;结构以及定位组装复杂,成本高;高分辨率而小型化实现困难。

磁编码器是以磁为传输介质的一种新型编码器<sup>[7]</sup>。与光电编码器相比,磁编码器能够在恶劣环境(如粉尘、油、烟及水等恶劣等)工作而不会受影响其测量精度,同时不受冲击及振动的影响,具有优异的抗恶劣环境性能。磁编码器的机械结构简单、响应速度快、制造成本低易于微型化,但精度和分辨率不高。

文献[8-9]采用标定查表的方式进行信号处理,实现了小型化,并在一定程度上提高了分辨率,单算法中存在一定的误差。

而多磁极式编码器,其磁鼓制造工艺复杂,靠增加磁极数来提高分辨率,或通过优化充磁磁鼓的磁场分布,采用细分技术提高其分辨率,由于磁鼓制作的工艺、漏磁以及磁信号存在高次谐波等因素,分辨率的提高有一定的限制<sup>[10]</sup>。

针对传统的单对磁极编码器的分辨率和精度低的问题,本文给出一种基于磁编码器的设计方法,将算术运算求解角度和查表相结合,采用 STM32 芯片进行信号处理,实现 12 位分辨率的角度输出。

## 2 磁编码器的设计

磁编码器主要由单磁极对磁鼓、巨磁阻磁头、调理电路和机械机构构成。单磁极对磁鼓与编码器转子连

接,当转子带动磁鼓旋转时,会引起周围磁场进行周期性变化,安装在磁鼓下方的巨磁阻磁头相应地输出与磁场强度成线性关系的正弦信号。采用4个巨磁阻磁头成正交放置在磁鼓下方,其摆放位置如图1所示,巨磁阻磁头的调理电路输出两路成 $90^\circ$ 相位差的正弦信号,输出信号经过调理电路放大滤波处理后,由STM32微处理器进行A/D转换成数字信号进行运算处理后,通过串口输出转子旋转角度和方向,其基本原理如图2所示。

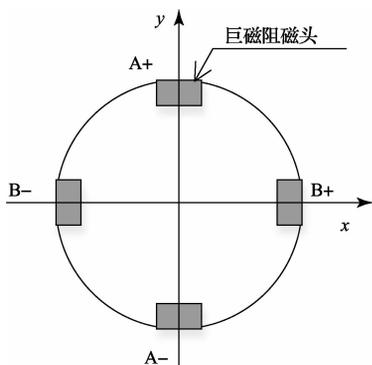


图1 传感器放置位置

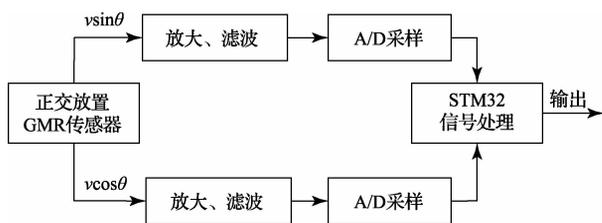


图2 磁编码器原理

## 2.1 GMR传感器的磁敏感特性分析

磁敏感传感器是磁编码器的重要组成部分,磁敏感器件的性能是影响磁编码器分辨率高低的重要因素。目前,磁敏感传感器主要包括霍尔(HALL)传感器、各向异性(AMR)传感器以及巨磁阻(GMR)传感器3个类型。巨磁阻传感器相对于其他两类磁敏感传感器,具有较宽的测量范围、灵敏度高、体积小、温度稳定性好、能耗低的特点。因此,选用东方微磁公司的VA100F4作为磁编码器的检测磁头,其传感器输出的特性如图3所示。

VA100F4的磁场测量范围为 $\pm 0.4\text{ T}$ ,从图3中可以看出,在其测量范围内,VA100F4输出电压与磁场强度呈良好的线性关系。而超出此范围后,VA100F4的输出电压变化缓慢,出现饱和现象,因此,巨磁阻磁头检测的磁场控制在 $\pm 0.4\text{ T}$ 范围内。

VA100F4的分辨率为 $32\text{ nT}$ ,如果传感器所测磁场的范围为 $\pm 0.4\text{ T}$ ,那么磁编码器的精度达到最高值为 $360^\circ / (0.4\text{ T} \times 2 / 32\text{ nT}) = 2.88\text{E}-5^\circ$ 。由于A/D采样模块位数的限制,不可能达到如此高的精度。选用12位A/D模块能基本满足各个场合的需求,磁编码器的最高精度限制在 $360 / 4096 = 0.08789^\circ$ 。也可以根据需求选择更高精度的A/D模块。在设计时,要保证所选用巨磁阻传感器的测量精度大于或等于A/D的精度。为保证足够的裕量,令VA100F4的测量精度大于或等于 $0.08789^\circ / 10 = 0.008789^\circ$ 。此时,在VA100F4上所施加磁场的范围应大于或等于 $360^\circ \times 32\text{ nT} / 0.008789^\circ = 1.31\text{E}-3\text{ T}$ ,即保证VA100F4输出电压的峰峰值大于或等于 $100\text{ mV} / 0.4\text{ T} \times 655\text{ }\mu\text{T} = 0.16375\text{ mV}$ 。此外,要尽量拓宽巨磁阻感应磁场变化范围,使其输出较大的电压范围,以减小噪声、温度等对测量精度的影响,通过改变磁鼓的充磁强度以及调节巨磁阻传感器与磁鼓的间距调整所感应磁场强度。

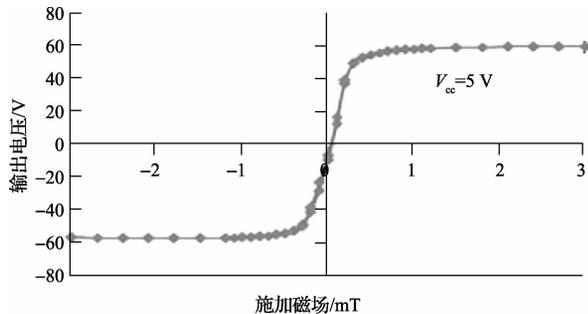


图3 VA100F4输出特性

## 2.2 信号调理电路的设计

由于巨磁阻VA100F4其输出的电压信号较小,只有三十多mV,无法进行模数转换成数字信号,并带着一定的高频噪声。为了后续信号采集及数字化,因此需要设计信号调理电路对巨磁阻传感器的输出信号进行放大滤波。信号调理电路包括放大器电路和滤波电路,如图4所示。选用单电源供电的仪表放大器AD623构建信号调理电路,对传感器的输出信号进行放大,并根据需要调节可调电阻 $R_1$ 以选择电压信号的放大倍数,该放大器的共模抑制比大于 $100\text{ dB}$ ,能较好地抑制共模噪声。OPA1612是低功耗精密放大器,一个封装中包含2个放大器,其中一个放大器用作电压跟随器为AD623提供基准电压,使其放大后的信号处于后级A/D模块的测量范围内;另一个放大器用作单位增益的一阶有源低通滤波器,对放大后的信号通过低通滤波器滤波及功率增强,滤波器的截止频率约为 $4\text{ kHz}$ 。

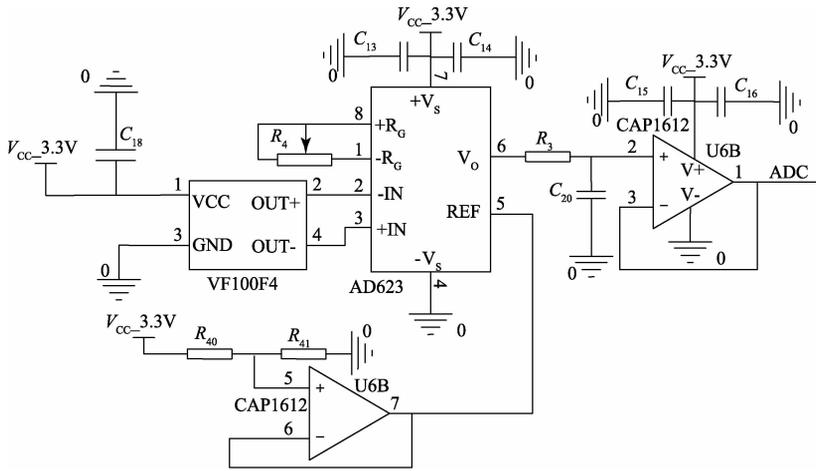


图 4 信号调理电路

### 2.3 供电电路设计

磁编码器的所有元器件(包括 STM32 微处理器)皆可在 3.3 V 的供电电压下正常工作。选用 AMS1117 设计稳压电路,其电压输入范围为 4.75~12V,输出 3.3 V,为整

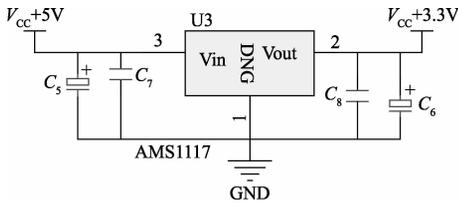


图 5 ASM1117 稳压电路

个系统提供稳定的电源,其电路图如图 5 所示。

### 2.4 A/D 模数转换及信号处理

选用微控制器 STM32F103C8T6 进行模拟电压信号的采集及处理,其内部包含两个独立的逐次逼近型的 12 位 A/D 转换器,采样速率最高可达 1 MHz。STM32F103C8T6 的最小系统原理图如图 6 所示。其微控制器采集的两路信号分别为 A 相信号和 B 相信号,其波形如图 7 所示。在图 7 中,两路模拟电压信号为相位相差 90° 的正弦信号,由 STM32F103C8T6 内部 A/D 模块采样后转换成相应的数字信号,并进行角度的计算求解。

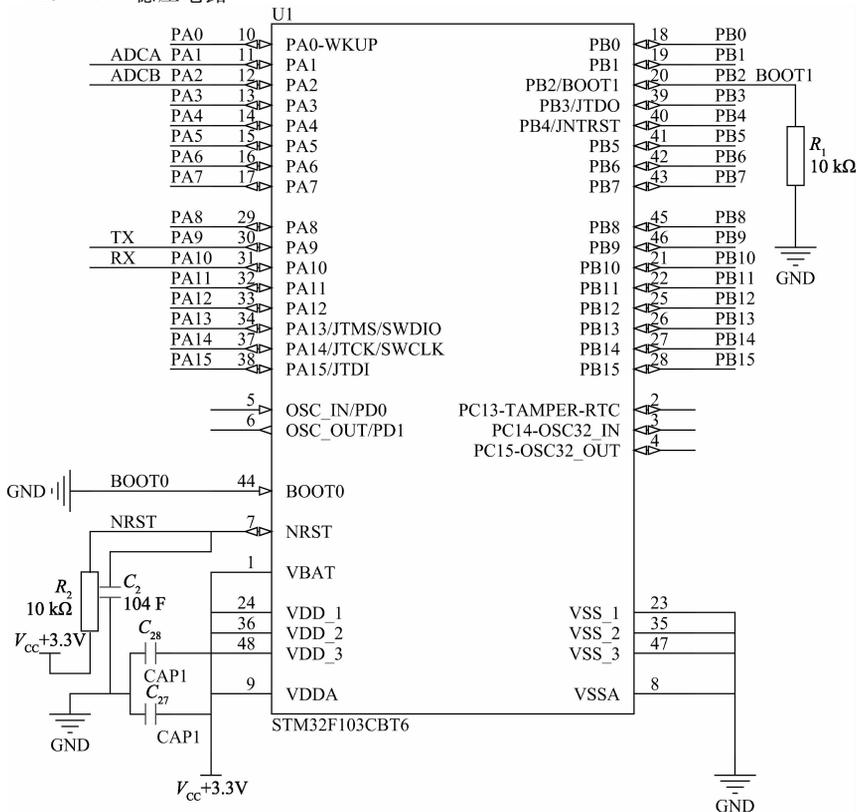


图 6 STM32 最小系统

微控制器 STM32 将转换后的数字信号进行处理时,为了提高编码器测量的精度,将编码器磁鼓的转角( $0^\circ \sim 360^\circ$ )区域划分成四个卦限,如图 7 所示,在不同的卦限选择选择性度较好的信号作为最终的输出信号,并通过函数库求取角度。在 II 和 IV 卦限选择 A 相信号作为采样信号,在 I 和 III 卦限选择 B 相信号作为采样信号。假设 A 相信号电压最大值为  $V_{A\_MAX}$ ,最小值为  $V_{A\_MIN}$ ,则平均值  $V_{Average\_A} = (V_{A\_MAX} + V_{A\_MIN}) / 2$ ,峰-峰值  $V_{A\_pp} = V_{A\_MAX} - V_{A\_MIN}$ 。同理,假设 B 相信号电压最大值为  $V_{B\_MAX}$ ,最小值为  $V_{B\_MIN}$ ,则平均值  $V_{Average\_B} = (V_{B\_MAX} + V_{B\_MIN}) / 2$ ,峰-峰值  $V_{B\_pp} = V_{B\_MAX} - V_{B\_MIN}$ 。当 A 相信号瞬时采样电压为  $V_A$  时,磁鼓在当前所旋转的角度  $\theta$  的余弦值:

$$\cos\theta_1 = 2(V_A - V_{Average\_A}) / V_{A\_pp}$$

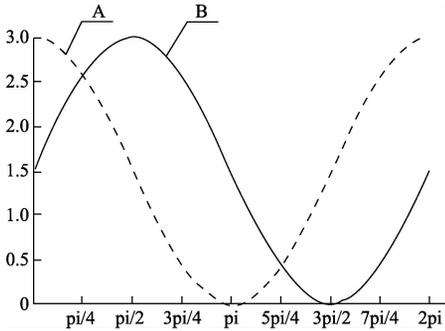


图 7 调理电路输出的信号

并通过 STM32 固件库中的  $\text{acos}()$  (反三角函数) 函数求解  $\theta$  值。从而,  $\theta_1 = \text{acos}(2 * (V_A - V_{Average\_A}) / V_{A\_pp})$ 。当 B 相信号瞬时采样电压为  $V_B$  时,磁鼓当前所旋转的角度  $\theta$  的余弦值  $\cos\theta_2 = 2 * (V_B - V_{Average\_B}) / V_{B\_pp}$ ,通过 STM32 固件库中的  $\text{acos}()$  (反三角函数) 函数求解  $\theta$  值。从而求得,  $\theta_2 = \text{acos}(2(V_B - V_{Average\_B}) / V_{B\_pp})$ 。当  $\cos\theta$  接近于 -1 和 1 时,  $d(\theta)/d(\cos\theta)$  趋于无穷大,即  $\cos\theta$  微小的变化,都会引起  $\theta$  值很大的变化,因此会使得磁编码器在测量  $0^\circ$  和  $180^\circ$  附近角度时,测量精度变差,且容易受干扰。 $\cos\theta$  接近于 0 时,  $d(\theta)/d(\cos\theta) = 1$ ,  $\theta$  值变化均匀,此时测量角度精确,抗干扰强。因此,为了准确获取磁鼓转动的角度,将转角范围( $0^\circ \sim 360^\circ$ )分成四个卦限,在不同的卦限中,将两路信号分成采样信号和辅助信号,即在不同的卦限中选择线性度好的信号为采样信号;另一路为辅助信号,用来判断编码器转子转动的方向,编码器转子转动角度求解方法如表 1 所示。当,  $V_A - V_{Average\_A} > V_{A\_pp} / \sqrt{2}$  转角处于 I 卦限;当  $V_B - V_{Average\_B} > V_{B\_pp} / \sqrt{2}$  时,转角处于 II 卦限;  $V_{Average\_A} - V_A > V_{A\_pp} / \sqrt{2}$  时,转角处于 III 卦限;  $V_{Average\_B} - V_B > V_{B\_pp} / \sqrt{2}$  时,转角处于 IV 卦限。由于  $\text{acos}()$  函数只能求得  $0^\circ \sim 180^\circ$  区段的值,因此,根据  $V_A$  与  $V_B$  的瞬时采样电压值判断磁鼓旋转到哪个卦限,并根据电压值确定采样电压和辅助电压,从而确定编码器转子转动的角度。微控制器求解转角的软件流程图如图 8 所示。

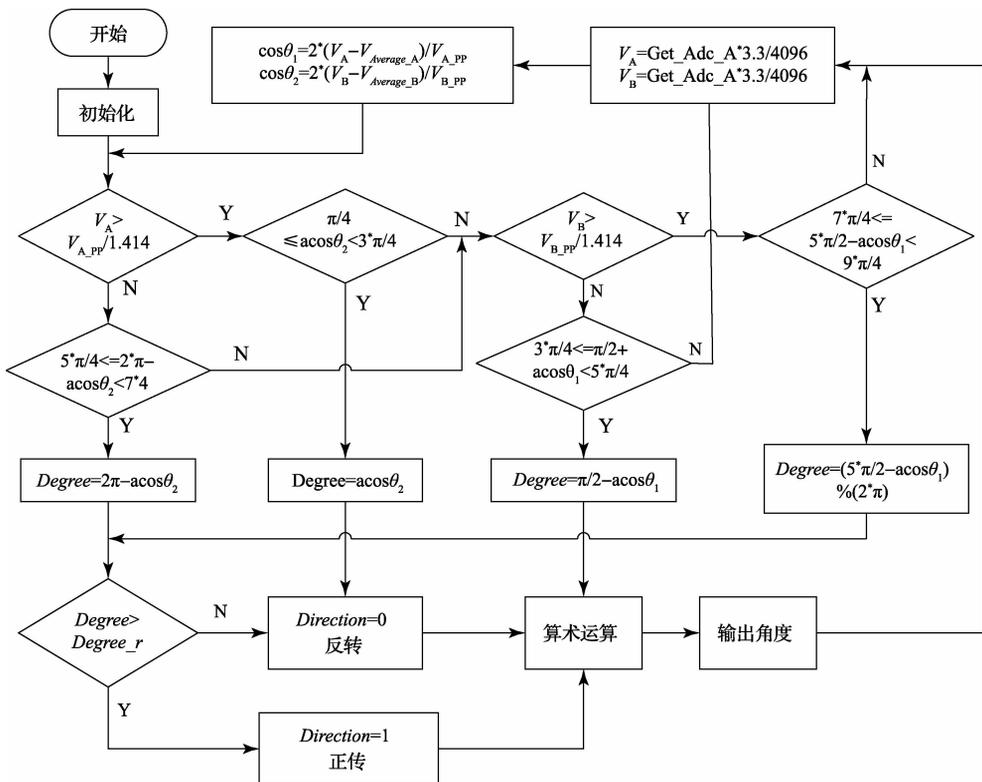


图 8 编码器程序流程

表 1 各个区段旋转角度取值

区段(°)	45~135	135~225	225~315	315~45
采样信号	$V_A$	$V_B$	$V_A$	$V_B$
辅助 ADC	$V_B - V_{Average\_B} > V_{B\_pp} / \sqrt{2}$	$V_{Average\_A} - V_A > V_{A\_pp} / \sqrt{2}$	$V_{Average\_B} - V_B > V_{B\_pp} / \sqrt{2}$	$V_A - V_{Average\_A} > V_{A\_pp} / \sqrt{2}$
角度(°)	$\text{acos}\theta$	$\text{acos}\theta + \pi/2$	$2\pi - \text{acos}\theta$	$5\pi/2 - \text{acos}\theta$

2.5 输出方式

采用 STM32 微处理器采集调理电路放大滤波后的模拟电压信号,经过处理后计算出编码器转子转动的角度信息,并根据需要选择磁编码器的输出方式是绝对式还是增量式。

当采用增量式输出时,选用 STM32 的 3 个引脚作为输出端,输出三组方波脉冲 A、B 和 Z 相。A、B 两组方波相位差为 90°,可根据方波的相位关系判断编码器转子旋转方向,Z 相波形用作基准点定位,当编码器每转一圈,Z 相输出一个方波。其输出波形如图 9 所示。

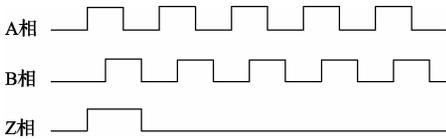


图 9 增量式输出波形示意

当采用绝对式输出时,选用 STM32 的十个引脚作为输出端,输出十位二进制数。在编码器转子的任意位置,都可读出编码器转子位置对应的二进制码信息,其精度为  $360/2^{10} = 0.35^\circ$ 。

由于 STM32 位处理器具有很强的可编程性,采用串口通行标准 RS422 输出磁编码器的角度信息。由于串口 RS422 采用四线制,具备单独的发送与接收通道,不需考虑数据传输方向,且能够实现检测信号的长距离传送。

3 测试结果与分析

对磁编码器进行测试时,将磁编码器的转子通过联轴器与步进电机的转子相连,通过电脑串口发送指令的方式控制步进电机转子转动的角度,来测量磁编码器的精度。

在调试时,先调整两个仪表放大器 AD623 的参考电压为 1.7 V。然后调整磁鼓与两个巨磁阻传感器的径向间隙,在磁编码器旋转时,其调理电路输出电压信号的峰-峰值约为 3 V。

通过串口发送指令控制步进电机以角速度  $\omega$  旋转时,两个巨磁阻传感器会输出呈 90° 相位差的两路正弦波,其输出的波形如图 10 所示。为了方便读出磁编码器输出的角度信息,设计一个角度显示界面如图 11 所示。为了测

试磁编码器的分辨率和精度,采用 1800 线的标准光电编码器作为基准进行校准。光电编码器、磁编码器和步进电机通过联轴器连接,其输出角度如表 2 所示。实验结果表明,在一个周期内,编码器的输出精度达大于 12 位,即  $0.066^\circ$ 。

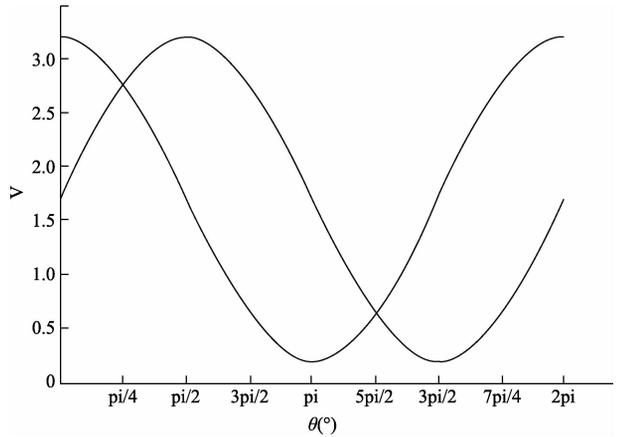


图 10 信号调理电路输出波形



图 11 编码器角度输出界面

表 2 编码器角度测量数据

磁编码器理论输出角度(°)	磁编码器实际输出角度(°)	光电编码器输出角度(°)	误差(°)
0.00/360	0.00	0.0	0
45	45.052	45	0.052
90	89.956	90	0.044
135	135.034	135	0.034
180	179.955	180	0.045
225	225.065	225	0.065
270	269.934	270	0.066
315	315.056	315	0.056

(下转第 30 页)