

基于 iGMR 原理角度传感器 TLE5012B 应用指南

何喜富

(英飞凌科技(中国)有限公司 传感器高级应用工程师)

1. TLE5012B 简介

TLE5012B 角度传感器基于 iGMR 技术，可检测平行于封装表面磁场 360° 变化。可应用于汽车和工业领域里转角位置检测如方向盘转角，电机位置等。

TLE5012B 内部集成角度计算模块，可以将原始值 (sine 和 cosine) 进行数字处理后输出绝对角度。集成自动标定和温度补偿功能，在温度范围和寿命周期里可以达到 1° 精度。汽车级认证，可工作在 -40°C 至 150°C 范围。

TLE5012B 具备极其精确的角度分辨率 (15bit) 以及快速的信号处理能力和较短的延时/更新率，极其适合精确测定高动态应用中的转子位置。同时 TLE5012B 具有先进的诊断功能及安全特性，确保了产品高可靠性。

1.1 iGMR 原理

所谓磁阻效应是指导体或半导体在磁场作用下其电阻值发生变化的现象，巨磁阻效应在 1988 年由彼得·格林贝格 (Peter Grünberg) 和阿尔伯·费尔 (Albert Fert) 分别独立发现，他们因此共同获得 2007 年诺贝尔物理学奖。研究发现在磁性多层膜如 Fe/Cr 和 Co/Cu 中，铁磁性层被纳米级厚度的非磁性材料分隔开来。在特定条件下，电阻率减小的幅度相当大，比通常磁性金属与合金材料的磁电阻值约高 10 余倍，这一现象称为“巨磁阻效应”。

如图 1 所示，基于巨磁阻效应的传感器其感应材料主要有三层：即参考层 (Reference Layer 或 Pinned Layer)，普通层 (Normal Layer) 和自由层 (Free Layer)。参考层具有固定磁化方向，其磁化方向不会受到外界磁场方向影响。普通层为非磁性材料薄膜层，将两层磁性材料薄膜层分隔开。自由层磁场方向会随着外界平行磁场方向的改变而改变。

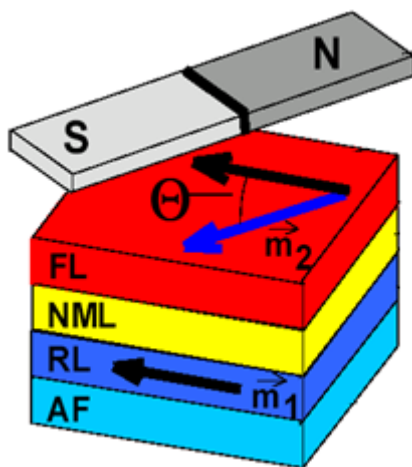


图 1：巨磁阻磁性感应层结构

巨磁阻阻值由自由层和参考层之间磁场方向夹角决定，当自由层磁化方向和参考层磁化方向相同时，巨磁阻阻值最小。反之，当自由层磁化方向和参考层磁化方向相反时，巨磁阻阻值最大。

巨磁阻效应可以用量子力学解释，每一个电子都能够自旋，电子的散射率取决于自旋方向和磁性材料的磁化方向。自旋方向和磁性材料磁化方向相同，则电子散射率就低，穿过磁性层的电子就多，从而呈现低阻抗。反之当自旋方向和磁性材料磁化方向相反时，电子散射率高，因而穿过磁性层的电子较少，从而呈现高阻抗。

1.2. iGMR 角度检测原理

如图2所示为巨磁阻角度传感器感应单元结构，由两组惠斯通电桥构成，分别为反映外界磁场余弦变化的 V_x 巨磁阻感应单元和反映外界磁场正弦变化的 V_y 巨磁阻感应单元。 V_x 和 V_y 巨磁阻感应单元结构类似，只是参考层磁化方向不同。使用全桥结构的好处是可以获得两倍信号幅值以及消除温度效应影响。

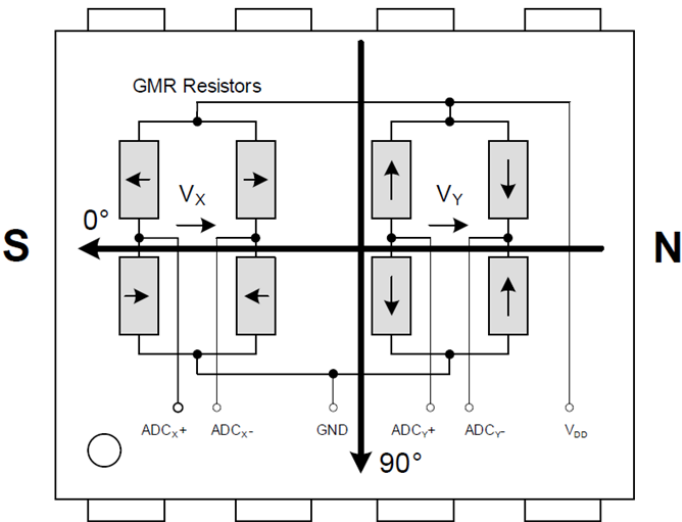


图 2：巨磁阻惠斯特桥

当安装在转轴上磁铁随着转轴旋转时，巨磁阻感应单元 V_x 和 V_y 能够检测出平行于其表面的外界磁场变化，并分别输出余弦和正弦信号。磁场信号经过 AD 转换，然后通过传感器内部 **CORDIC** (**CO**ordinate **R**otation **D**igital **C**omputer) 模块进行反正切计算，得到所需要角度值，最后通过不同信号协议输出角度等信息。

2. 通讯协议

TLE5012B 支持多种通讯协议，即 SSC (Synchronous Serial Communication) 协议，PWM (Pulse-Width-Modulation) 协议，SPC (Short-PWM-Code，兼容 SENT 协议) 协议，HSM (Hall Switch Mode) 模式以及 IIF (Incremental Interface) 协议。

TLE5012B SSC 为三线制协议，允许双向通讯，兼容 SPI 协议。可以通过 SSC 协议读取 TLE5012B 内部寄存器数据（如角速度、角度原始数值、温度等）以及

配置寄存器（如解析度、自动标定，工作模式等）。SSC 允许高速数据传输，波特率为 8Mbit/s。一个总线上最多允许 4 个 TLE5012B 进行通讯。SSC 通讯距离较短，建议在 30cm 以内，所以适合板间通讯。

PWM通讯协议为单向通讯方式，解析度为12bit，有四种工作频率，即：0. 2KHz，0. 5KHz, 1KHz以及2KHz，可通过SSC接口配置工作频率。占空比代表角度信息，其中占空比在0-6. 25%以及93. 75-100%区间用于诊断。占空比在6. 25%-93. 75%区间代表角度。PWM通讯距离可到5m。

SPC 协议兼容 SENT 协议，连续的两个下降沿之间的时间长度代表着 4bit 数据。不同的是 SPC 允许双向通讯，且通讯时 MCU 需要给 TLE5012B 发送一个触发信号以唤醒其传输角度信息。除角度信息外，还可传输温度信息。可通过 SSC 接口配置解析度为 12bit 或者 16bit。一个总线上最多允许 4 个 TLE5012B 进行通讯。SPC 通讯距离可到 5m。

HSM模式可模拟三个霍尔开关，用于电机块换向。HSM包含三个单向通讯接口，默认极对数为5，可通过SSC接口配置极对数等参数。

IIF协议可用于模拟光电编码通讯，包含IFA, IFB以及IFC三条单向通讯信号。可以取代光电编码器，用于高速电机位置检测。IIF增量编码信号为输出占空比 50%的矩形波，每一个波形代表最小角度解析度，可以通过SSC接口配置成9 bit（每一圈512个脉冲信号）到12 bit（每一圈4096个脉冲信号）解析度，MCU通过计算IIF 信号脉冲数可以知道电机位置信息。

TLE5012B出厂时预标定了寄存器配置，用户可以在不作修改或者很少修改寄存器配置情况下使用。TLE5012B主要有四种版本，即：TLE5012B E1000 SSC+IIF；TLE5012B E3005 SSC+HSM；TLE5012B E5000 SSC+PWM；TLE5012B E9000 SSC+SPC。用户可以根据需要选择合适版本，限于篇幅，本文主要介绍SSC和IIF协议。

2.1 SSC 协议

TLE5012B SSC数据传输方式为半双工，因此当和四线制SPI接口通讯时，MCU SPI接口数据发送和数据接收脚需要同时连接到TLE5012B data脚上。当TLE5012B向MCU传输数据时，MCU的数据发送脚需要拉高。反之，当MCU向TLE5012B发送命令时，MCU的数据接收脚需要拉高。

SSC传输信息包含命令，数据以及安全信息。信号传输时CSQ需要拉低，并提供SCK信号。可以通过SSC协议读取以及配置TLE5012B内部寄存器数据。如图3所示为MCU通过SSC读取TLE5012B内部寄存器角度信息。MCU向TLE5012B发送8021_H，经过t_{wr_delay}延迟后，TLE5012B会返回角度信息及状态信息。

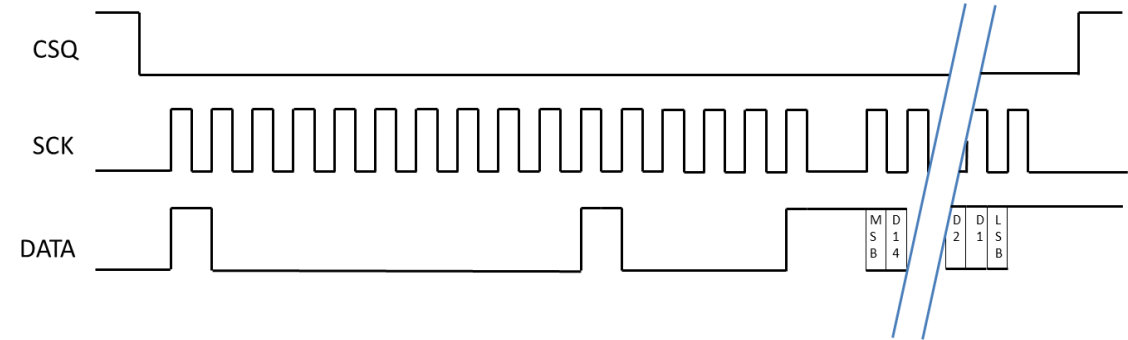


图 3：读取角度信息

如图4所示为MCU通过SSC配置TLE5012B内部寄存器MOD_2。MCU发送命令5081_H，修改MOD_2寄存器内容为809_H。经过twr_delay延迟后，TLE5012B会返回状态信息。当安全信息传输完毕后，下一个数据传输前片选信号CSQ需要退出然后再拉低。

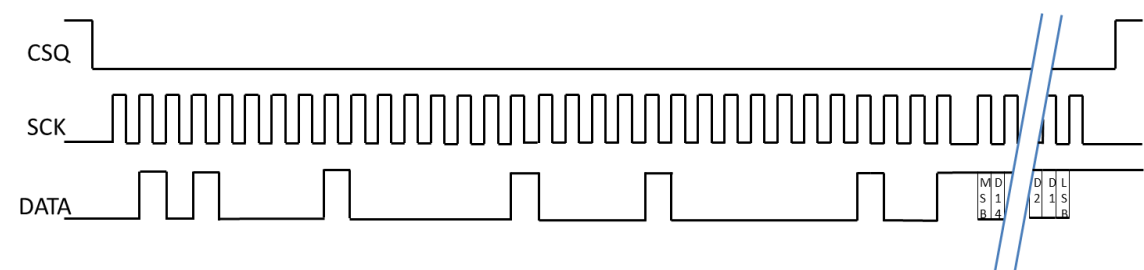


图 4：寄存器配置

为了保证配置信息准确无误，可以在写入数据前先读取所需要配置寄存器内容，再配置该寄存器，最后再读一遍配置内容确认是否正确。

SSC传输数据里安全信息包括CRC校验，每一组新的数据传输都会产生新的CRC校验。TLE5012B CRC校验基于J1850总线规范，需要注意的是进行CRC校验时需要包含发送的命令以及接收到的数据。

2.2 IIF 协议

TLE5012B E1000 有两种 IIF 工作模式，即 A/B Mode 以及 Step/Direction Mode。如图 5 所示为 A/B Mode，其中 IFA 和 IFB 输出脉冲代表角度信息，两个信号相位相差 90°。根据 A 相位是否超前 B 相位判定电机转动方向。IFC 代表零点位置。

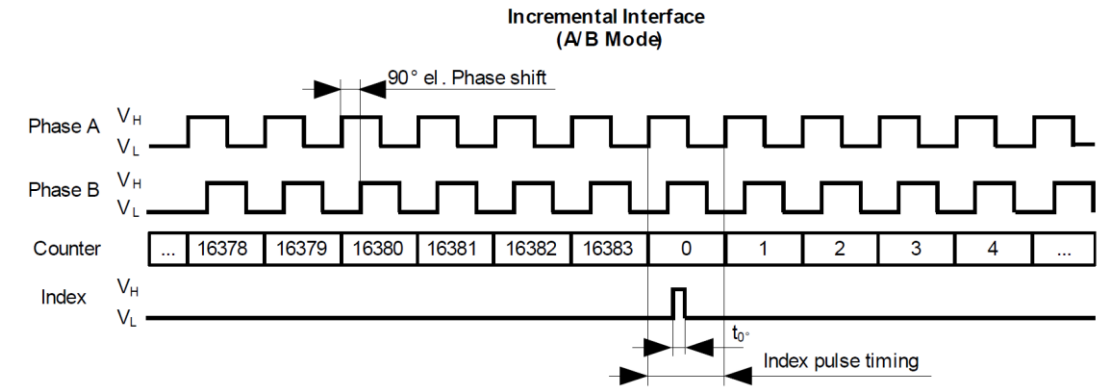


图:5: A/B Mode

TLE5012B E1000 默认 IIF 协议为 A/B Mode，可以通过 SSC 配置为 Step/Direction Mode。如图 6 所示为 Step/Direction Mode，其中 IFA 输出增量信号代表角度信息，IFB 代表方向信息，而 IFC 代表零点位置。

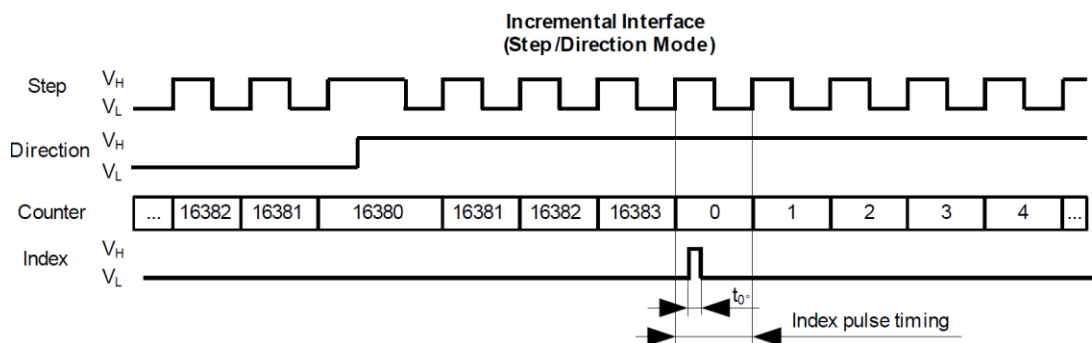


图:6: Step/Direction Mode

TLE5012B 内部 14 位计数器 (IIF_CNT) 可用于增量编码计数, 能够记录一整圈从 0 到 16383 个脉冲, 可用于 MCU 和传感器之间数据同步。取决于内部寄存器设置(IIF 解析度 9bit~12bit), 同步时 IIF_CNT 需减掉 2 至 5 个 LSB 数据。

当 TLE5012B E1000 上电后, 电机还没有开始转动, TLE5012B IIF 脚会输出一定脉冲数, 此为 TLE5012B E1000 启动特性, MCU 通过计算脉冲数可获得 TLE5012B 起始位置绝对角度信息。

即: 起始位置绝对角度=脉冲数 $\times 180^\circ / 2^{11}$ 式 2-1

起始位置脉冲最大数目在 180° 位置, 此时有 2048 个脉冲。如果 IFA 相位在 IFB 相位之前, 则该角度在 0° 和 180° 之间。如果 IFB 相位在 IFA 相位之前, 则角度在 180° 和 360° 之间。起始位置脉冲结束后, TLE5012B 进入正常工作模式。

3. TLE5012B 设计

3. 1. 机械结构设计

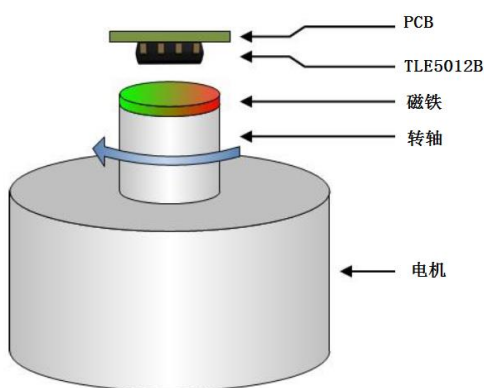


图 7: 电机位置检测方案

如图 7 所示为 TLE5012B 用于电机转子位置检测方案, 可以用于替代光电编码器、旋转编码器或者霍尔开关。磁铁装配在电机转轴上, 安装有 TLE5012B 传感器的 PCB 固定在电机上, 磁铁中心正对着位于 TLE5012B 中心的巨磁阻感应区域。当电机工作时, 转轴带动磁铁转动, 传感器能够检测到平行于其封装表面的

磁场变化。这种方案优点是电路以及机械结构设计简单，成本低，空间小。相比于光电编码器，TLE5012B 还具有不易受灰尘、油污等污染优点。和基于霍尔原理的磁性角度传感器相比，基于巨磁阻原理的 TLE5012B 精度更高。

为了减小由安装或者生产带来的误差如 PCB 安装、芯片贴片、磁铁装配以及转轴径向跳动等因素导致的额外系统误差，尽量选择直径较大的磁铁，且安装时磁铁中心尽量正对着 TLE5012B 芯片中心巨磁阻感应区域。

3.2. 磁路设计

TLE5012B 需要工作在合适的磁场强度范围，在 -40°C 至 150°C 温度范围内建议外部平行磁场强度为 30mT 至 50mT 范围。因此设计磁路时需要确保工作气隙范围内磁场满足要求。由于巨磁阻传感器检测的是平行磁场，因此垂直于封装表面的磁场 B_z 对巨磁阻传感器没有影响。可以用磁通计检测磁路磁场强度，如图 8 所示。

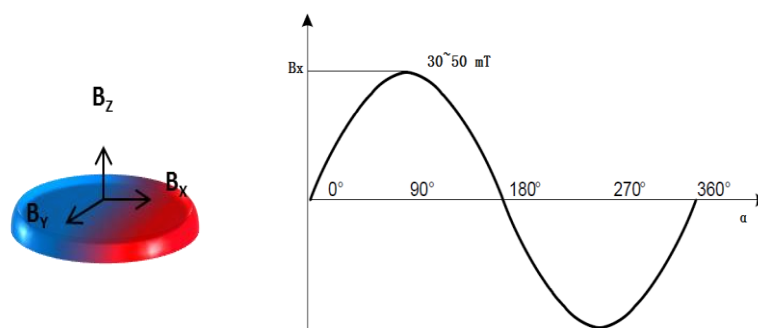


图 8：工作磁场范围

外部磁场强度过小或者过大都会增加额外的角度误差。当外部磁场强度太弱时，不足以驱动自由层磁化方向很好地对齐外部磁场方向。当外部磁场强度太强时，会影响到参考层磁化方向。外界磁场强度过强并不会造成芯片的损坏，只是会影响检测精度，当外界磁场强度恢复到规定范围内时，检测精度又能够恢复到正常范围。

影响磁路磁场强度因素主要有磁性材料，尺寸和厚度等。为了减小误差，在全温度范围内其磁性尽可能稳定。理论上可以选择稀土材料如钐钴或者钕铁硼等，也可以选择铁磁性材料。综合考虑温度特性，磁场特性等，推荐使用 SmCo5 材料。一种推荐磁路设计参数如下：

剩磁 B_r 为 0.9T ，充磁方向为径向充磁，磁极对数为 1 对，直径 10mm ，厚度 1.7mm 。工作气隙（磁铁表面距离传感器表面）为 2.5mm （确保磁场强度在工作范围内时传感器可工作在更大气隙）。

3.3. 电路设计

如图9所示为TLE5012B E1000 版本应用电路，其余版本参考电路详见数据手册。TLE5012B和MCU相连，可以通过SSC接口或者IIF接口获取TLE5012B角度等信息。TLE5012B E1000 IIF 接口（IFA, IFB以及IFC）默认为push-pull接口，可通过SSC配置寄存器设置为open-drain接口，此时输出接口和供电电源之间需相应增加上拉电阻。

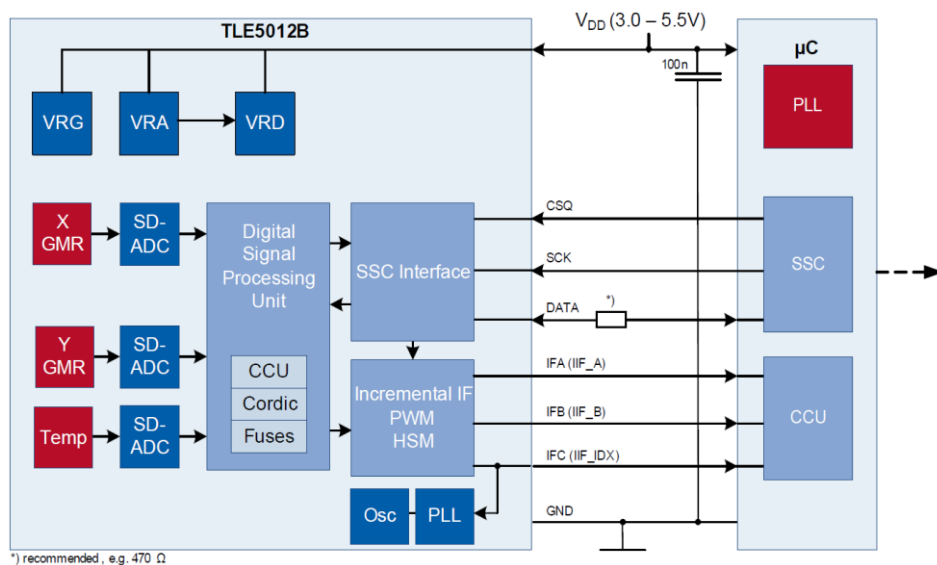


图 9：应用电路

SSC和IIF协议通讯距离较短，对于需要长距离传输情况，可以将信号进行差分处理，一种可行的电路设计如下：

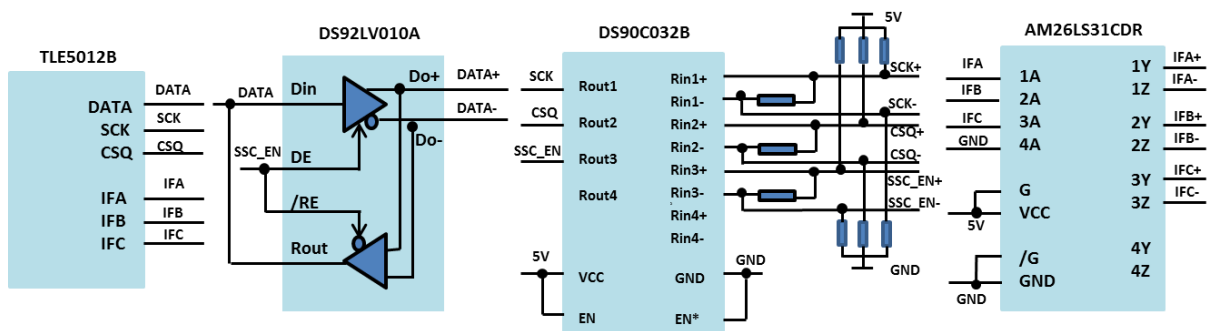


图 10：差分电路

4. 电机位置信息

4.1 位置信息

正如前文所述，TLE5012B 能够检测平行于其封装表面磁场 360 度变化，其检测原理为通过检测外界磁场方向和芯片内部巨磁阻感应单元参考层磁化方向之间夹角来感应角度。当外部磁场方向如图 2 所示时 TLE5012B 检测到角度为零度，需要注意的是此时反映的零点为磁场零点，而非电机的机械零点。即当传感器转动时其输出的角度是相对于磁场零点而言，而非相对于电机的机械零点。

TLE5012B 能够同时反映绝对角度信息和相对角度信息。获取绝对角度信息方法有两种：即通过 SSC 方式，或者利用 TLE5012B E1000 启动特性。利用 SSC 方式可以获得实时的绝对角度信息，而需要注意的是，TLE5012B E1000 启动特性结束后进入正常工作模式，此时获得的角度信息为相对角度。

4.2 零点位置标定

在没有将传感器磁场零点和电机机械零点对齐之前，传感器磁场零点并不一定等于电机的机械零点，因此传感器反映的角度均是相对于磁场零点而言。如果需要标定传感器零点位置，可以通过下面两种方式进行。

4.2.1 SSC 方式标定零点

传感器接线方式参考图 9，具体操作步骤如下：

1. 将电机位置定位到所需要的机械零点位置。
2. 通过 SSC 接口读取寄存器 AVAL 寄存器里数值，例如假设此时 AVAL 里数值为 $1FFE_H$ ，角度值为 90° 。
3. 移除 AVAL 寄存器里 3 位 LSB 角度值，获得 12bit 角度。即 $1FFE_H$ 移除 3 位 LSB 后变成 $3FF_H$ 。
4. 通过 SSC 接口读取 ANG_BASE 寄存器数值。例如假设此时 ANG_BASE 数值为 072_H 。
5. 将 ANG_BASE 数值减去步骤 3 里获得新的 AVAL 数值即 $072_H - 3FF_H = C73_H$ ，并将该值存储到 MCU 里 EEPROM 中。
6. 每次 TLE5012B 上电后，将存储在 MCU EEPROM 里 AVAL 数值写入到 TLE5012B ANG_BASE 中。

通过以上步骤，便可以完成电机零点位置标定。需要注意的是由于 TLE5012B 不具备存储能力，因此每次上电以后均需要将外部 EEPROM 存储的 AVAL 数值写入到 TLE5012B ANG_BASE 中。

4.2.2 IIF 方式确定零点

在不通过 SSC 方式对 TLE5012B 零点标定情况下，还可以利用 IIF 协议中 IFC 信号找到磁场零点，再利用该信号和机械零点比较从而找到两者之间角度偏移量。当电机转动到磁场零点时，TLE5012B E1000 的 IFC 脚会发一个脉冲信号，代表磁场零点位置。根据磁场零点和机械零点相对位置信息可以求出偏移量，当需要相对于机械零点的绝对位置信息时，可以通过补偿该偏移量求得。

另外一种方式是利用 TLE5012B 硬启动以及 IIF 启动特性。正常情况下 TLE5012B 上电启动时间最长为 7 ms，然后进入 IIF 启动特性模式，起始位置角度数据传输过程约需 2.1ms。在没有通过 SSC 对 TLE5012B 寄存器配置情况下，IIF 启动特性反映的绝对角度是相对于磁场零点而言，换言之即需要经过约 9.1 ms 后 TLE5012B E1000 进入正常工作模式，这时才可以通过 SSC 配置其寄存器方式使其硬启动来快速重启（最长约需 0.5 毫秒）。所谓硬启动，即通过 SSC 协议先配置 S_BIST 为 0，接着配置 AS_RST 为 1。当 TLE5012B 硬启动后，TLE5012B 能够快速重启，然后再通过 SSC 协议配置 ANG_BASE。通过这种方式后当 TLE5012B E1000 再次进入 IIF 启动特性模式时所获得的绝对角度信息便是相对于电机机械零点的绝对角度。

参考资料：

1. TLE5012B Datasheet
2. TLE5012B register setting appnote
3. TLE5012B user manual