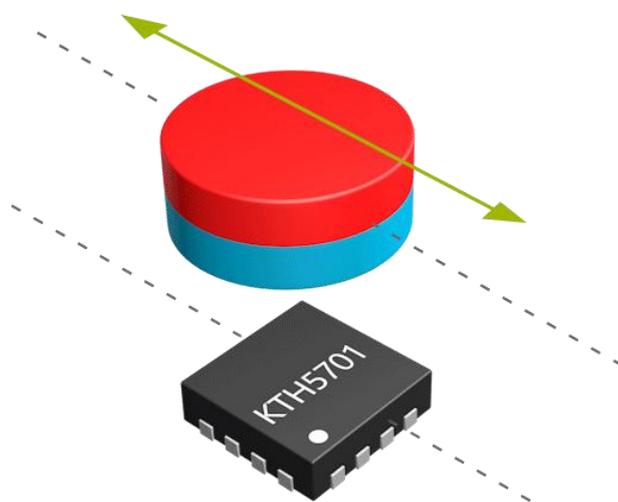


线性结构应用笔记



关于本文档

范围和目的

本文简要介绍了昆泰芯3D磁传感器在线性结构方面的应用和评估算法。

目录

1 3D磁传感器的线性检测应用	3
1.1 3D霍尔线性移动测量原理	3
2 应用算法说明	6
2.1 片内角度计算参考代码说明	7
2.2 片外角度计算参考代码说明	8
3 如何根据实测数据得到拟合函数，并进行数据处理	9
3.1 片外角度计算数据拟合说明	10
3.2 参考代码说明	13
3.3 另一种磁场情况	14
3.4 片内角度计算方式	15
3.5 片内角度输出参考代码说明	16
4 低功耗应用及系统唤醒实现方法	17
4.1 三种测量模式功耗模式说明	17
4.2 三种模式的应用方式推荐	18
4.3 各类滤波参数对功耗的影响	19

1 3D磁传感器的线性检测应用

KTH5701是一款低功耗数字输出的3D霍尔芯片，能够测量来自X，Y，Z三个方向的磁场。与磁铁结合使用，芯片可以通过检测外部磁场来感知结构件的位移信息。用户可选择SPI或I2C与芯片进行数据交互。在大多数需要检测线性位移的应用场景下，本芯片的使用需要与合理充磁方向的磁铁、合理的磁铁摆放位置相结合。3D霍尔的线性应用和通常的线性霍尔使用方式不一样。通常情况下的线性霍尔是使用单一轴磁场来检测结构件的移动距离，比如检测垂直芯片表面的某一轴磁场与距离的变化关系，而3D霍尔的线性应用检测，使用芯片感受到的两轴磁感应强度，对磁铁与芯片之间的夹角进行计算，检测距离更广，检测精度更高。KTH5701内部集成了CORDIC算法，能够根据寄存器内的配置，利用监测到的磁场数据，直接输出所需平面的磁场夹角，不需要主机外部进行额外计算。

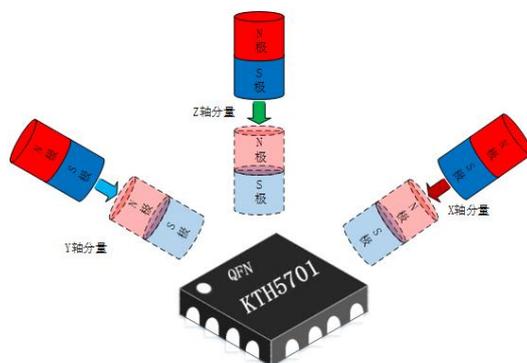


图1 三轴磁场测量敏感方向

1.1 3D霍尔线性移动测量原理

以下给出的原理说明均基于磁仿真结果。

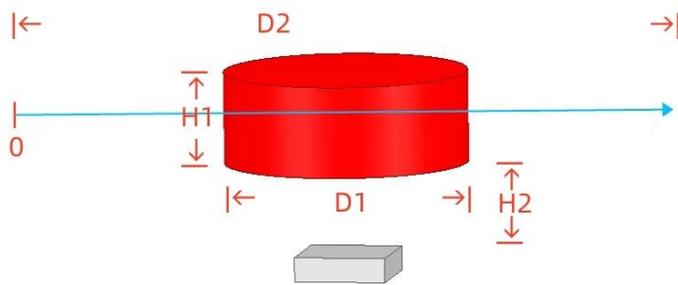


图 2

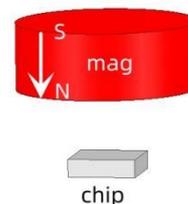


图 3

标号	说明	尺寸 (单位: 毫米)
D1	磁铁直径	8
D2	当前模型检测的位移长度	18
H1	磁铁高度	3
H2	芯片上表面与磁铁下表面距离	5

如图 2 所示为一种线性位移检测结构的简化模型。磁铁的充磁方向与尺寸信息见如下图 3 与表 1，使用直径为 8mm，高度为 3mm，沿着轴向充磁的饼状磁铁。以如图 2 所示，磁铁随着结构件的移动，从最左侧的 0 刻度处，共移动 18mm 至蓝色箭头标志的终点，该移动距离以芯片的中心轴对称，左右各 9mm。

如下图 3、图 4、图 5 仿真结果所示，芯片检测到的 X 轴磁感应强度几乎为 0，Y/Z 轴磁感应强度在如图横线所标志的位置上，同一磁场强度对应了结构件的多个位置，即芯片检测到的磁感应强度无法与结构件位移一一对应，会出现参照错误，检测距离也会减小。

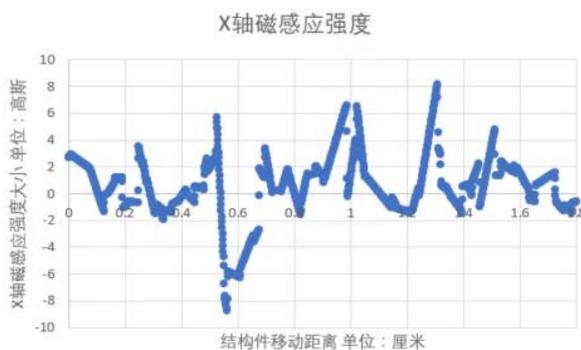


图 3

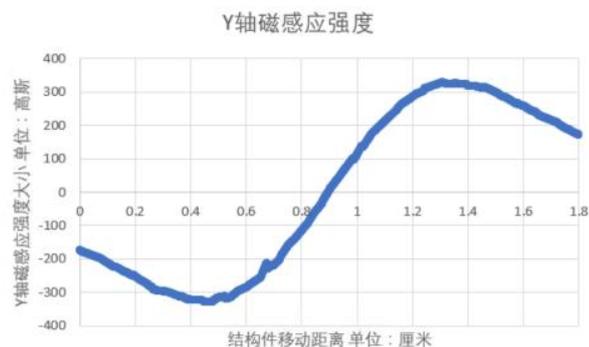


图 4

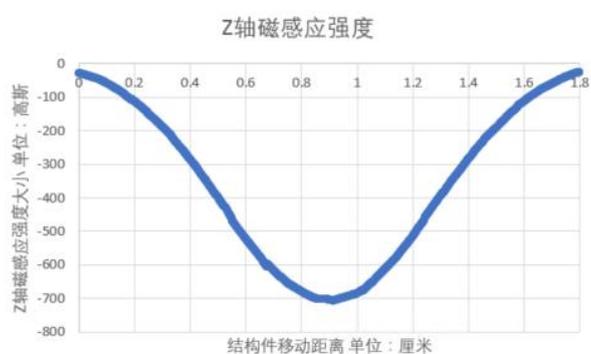


图 5

因此可以结合芯片检测到的 Y、Z 两轴的磁感应强度，计算得到磁铁与结构件之间的位移夹角 θ 来检测结构件的位置移动，如图 6 所示。

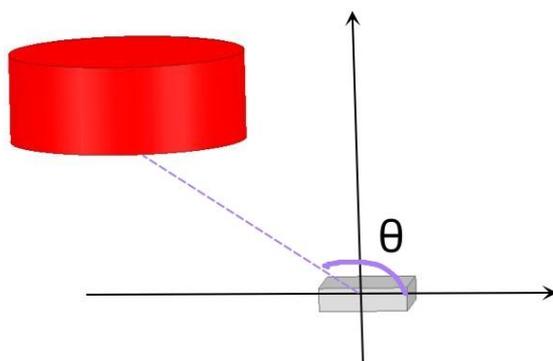


图 6

如图 7 所示，使用公式 1，由 Y、Z 两轴磁感应强度计算得到夹角 θ 来标识结构件的位移，可知，夹角 θ 与位移有一一对应的关系。并得到对应的函数关系（图 7 红色方框内即为夹角 θ 与位移的对应关系函数）。

$$\theta = \arctan \frac{By}{Bz} = ATAN2(Bz, By)$$

公式 1

注：分母 Bz 不能为 0，在使用过程中，应根据实测磁场值来确定，两轴磁场哪一轴作为分母。

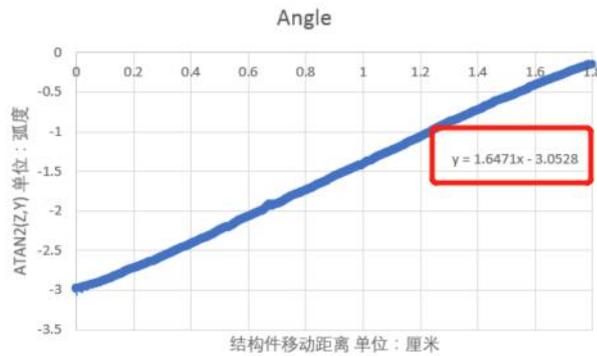


图 7

2 应用算法说明

由1.1的原理解释可知，本应用主要是要得到磁铁与芯片之间的夹角 θ 与结构件位移Distance之间的对应关系。

因此可以先使用仿真技术，或者根据结构件实际的输出情况，得到三轴磁感应强度随结构件距离变化图（如下图8所示为1.1中结构件图2的仿真数据图）。

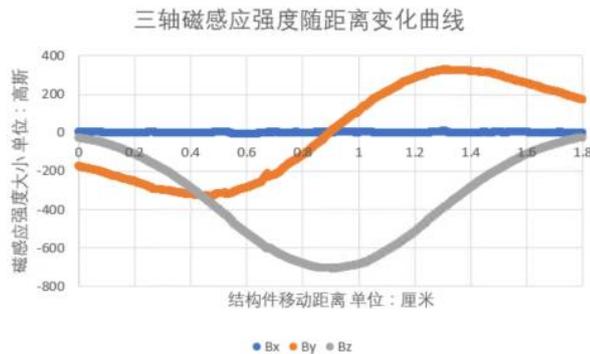


图8

也可以结合结构件实物，得到KTH5701输出的三轴磁感应强度随着结构件距离变化的曲线关系图。观察得到符合如图8所示的By与Bz的变化关系，即可使用该两轴计算得到磁场夹角。（如果芯片与磁铁之间的摆放位置不同，可能使用的不是YZ两轴夹角，而是XZ或XY两轴夹角，可以根据实测数据得到，并且改变参考代码中相应的配置即可）

我们提供两种计算方式的参考代码，如下图9所示，并且在1.2.1与1.2.2中对这两种参考代码分别进行解释说明。

- 片内角度计算参考代码
- 片外角度计算参考代码

图9

2.1 片内角度计算参考代码说明

由 1.1 可知，该结构件仿真得到的三轴磁感应强度变化曲线中，By 与 Bz 两轴的输出数据可以用来计算夹角 θ 。并得出磁铁与芯片之间的夹角 (θ) 与结构件位移 (Distnce) 之间的对应函数。

而 KTH5701 中集成有 CORDIC 算法，能直接输出 XY/XZ/YZ 三个平面上的磁感应强度夹角。根据该应用的需求我们将 28 寄存器中的 AplaneSel 配置为 1，即芯片输出 YZ 平面磁场角度值（详见 KTH5701datasheet）。

即为参考代码 ■ 片内角度计算参考代码，初始化函数中的如下配置。

```
void KTH57XXRegInitial(void)
{
    KTH57XXWriteRegister (0x5430, 28); //输出YZ平面角度
    KTH57XXWriteRegister (0x0002, 29);
    KTH57XXWriteRegister (0x8000, 30);
}
```

再按照如下所示步骤

- 初始化 IIC 地址 `KTH57XXInitial(A1_GND, A0_GND);`
- 将芯片配置为 YZ 平面角度输出，如下图所示，蓝色方框内为将芯片配置为角度输出，红色方框内为将芯片配置为 YZ 平面角度输出。KTH5701 的 TABZ 输出模式，可以直接输出芯片检测到的所选平面角度值，如将寄存器 0x1C 中的 AplaneSel 位配置为 0，则芯片当前输出的位 XY 平面角度值。其他配置详见 KTH5701 datasheet 中 AplaneSel 的相关描述。

```
void KTH57XXRegInitial(void)
{
    KTH57XXWriteRegister (0x5430, 28); //输出YZ平面角度
    KTH57XXWriteRegister (0x0002, 29);
    KTH57XXWriteRegister (0x8000, 30);
}
```

• 开启睡眠唤醒模式，该模式下芯片的测量功耗更低，并且发送一次命令后，芯片会以一定频率自行检测磁场，无需多次发送检测命令

```
sta = KTH57XXWakeupSleep(0X0f);
```

• 根据以上配置，每 2ms 芯片完成一次测量，主机即可对数据进行回读

```
HAL_Delay(2);
//当前芯片的配置下，每2ms完成一次测量，具体的完成时间与magn0sr,temp0sr,digCtrl有关
KTH57XXDataRead(0X0f);
```

• 根据 KTH5701datasheet 中的 TABZ 数据回读方式，处理得到的角度信息。

```
Angle = ( DataReadFrame[3] << 8) + DataReadFrame[4]; //角度
angleYZ = Angle * 360.0 /65536 / 180 *3.14; //计算得到YZ平面角度的弧度值
```

• 根据仿真曲线得出的 θ 与 Distnce 之间的对应关系，输出结果（该函数为图 7 方框中所画出的函数，也可由实测数据得到）。

```
distanceOut = ( angleYZ + 3.0528 ) / 1.6471; //由仿真结果或校准实测数据得到的弧度值与距离之间的函数，单位：厘米
```

2.2 片外角度计算参考代码说明

```
KTH57XXInitial(A1_GND, A0_GND);
```

- 初始化 IIC 地址
- 将芯片配置为磁场输出模式

```
void KTH57XXRegInitial(void)
{
    KTH57XXWriteRegister (0x1430, 28);
    KTH57XXWriteRegister (0x0002, 29);
}
```

• 开启睡眠唤醒模式，该模式下芯片的测量功耗更低，并且发送一次命令后，芯片会以一定频率自行检测磁场，无需多次发送检测命令

```
sta = KTH57XXWakeupSleep(0X0f);
```

- 根据以上配置，每 2ms 芯片完成一次测量，主机即可对数据进行回读

```
HAL_Delay(2);  
//当前芯片的配置下，每2ms完成一次测量，具体的完成时间与magnOsr, tempOsr, digCtrl有关  
KTH57XXDataRead(0X0f);
```

- 根据 KTH5701datasheet 中的 TXYZ 数据回读方式，处理得到的磁感应强度信息。

```
t = ( DataReadFrame[1] << 8) + DataReadFrame[2];  
x = ( DataReadFrame[3] << 8) + DataReadFrame[4] - 32768;  
y = ( DataReadFrame[5] << 8) + DataReadFrame[6] - 32768;  
z = ( DataReadFrame[7] << 8) + DataReadFrame[8] - 32768;
```

- 由 Y、Z 两轴磁感应强度，通过片外算法计算得到夹角 θ 的弧度值

```
angleYZ = atan2(y,z); //计算得到yz平面角度的弧度值
```

注：atan2 函数在不同的参数定一下，计算结果可能不同，如 Excel 中该函数的定义为 atan2(X 坐标, Y 坐标)，而单片机数学库中该函数的定义为 atan2(Y 坐标, X 坐标)，应该根据函数的定义正确填入变量值。满足 $\theta = \arctan \frac{By}{Bz}$ 即可。

- 根据仿真曲线得出的 θ 与 Distnce 之间的对应关系，输出结果（该函数为图 7 方框中所画出的函数，也可由实测数据得到）。

```
distanceOut = ( angleYZ + 3.0528 ) / 1.6471; //由仿真结果或校准实测数据得到的弧度值与距离之间的函数，单位：厘米
```

3 如何根据实测数据得到拟合函数，并进行数据处理

由 1.1 可知，在磁铁移动的过程中，芯片检测到的 YZ 平面磁感应夹角 θ ，与磁铁的移动距离 Distnce，是一一对应的关系，因此我们可以根据实测所得数据，得到 θ 与 Distnce 的一元函数。在使用的过程中，只要将芯片当前检测到的磁感应夹角 θ ，带入该一元函数进行计算，就能得到当前的位置，即 Distance。

下面将描述如何得到该一元函数。

注：以下磁感应强度数据出自仿真模型。在芯片实际的使用过程中，三轴

磁感应强度大小应满足 datasheet 上标明的阈值范围。

以下说明为片外角度计算方式的处理方法，如果采用片内角度计算方式，跳过前两步即可。

3.1 片外角度计算数据拟合说明

• 将芯片输出的三轴磁感应强度值 (Bx By Bz)，与位移标定值 (Distance) 保存下来，在 Excel 中画成如图 10 所示的图形。

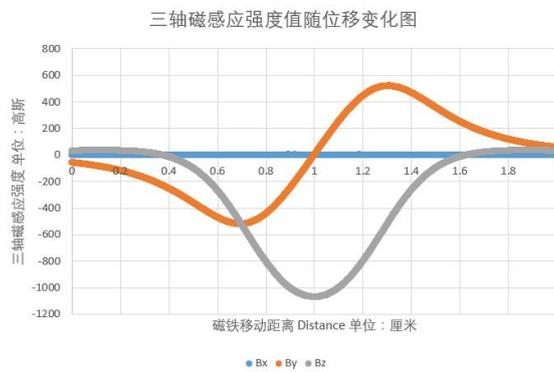


图 10

• 如图 10 所示，可以使用 By 与 Bz 两轴磁感应强度来计算 θ 与 Distance 的一元函数。使用公式 $\theta = \arctan \frac{By}{Bz} = ATAN2(Bz, By)$ ，计算得到 θ 。以 Distance 为横坐标， θ 为纵坐标画图，得到图 11 所示 θ 随位移变化图。

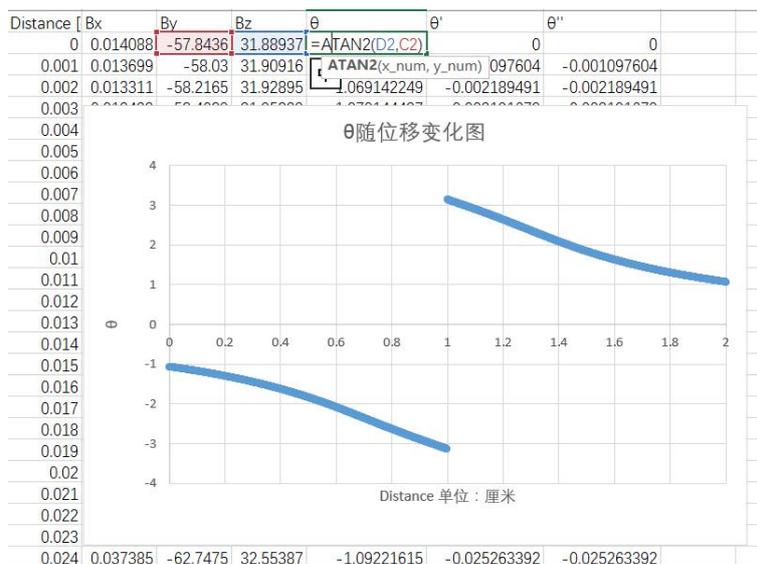


图 11

• 将 Distance 与 θ 在 Excel 中画成如图 12 所示曲线。根据结构和位移长度的不同，实测得到的曲线图，可能是如图 12 所示的某一部分。如图 13 中，被红色方框，或蓝色方框选择的。如果是图 13 蓝色方框内所示的不分段曲线，可以跳过下一步。

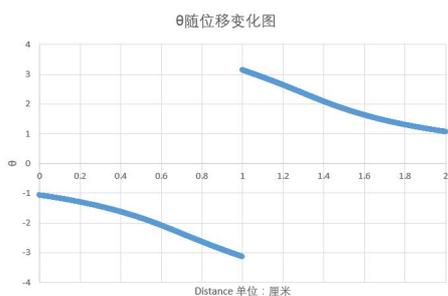


图 12

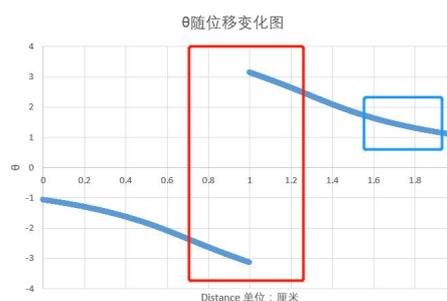


图 13

• 接下来将图 12 分段函数统一成一条曲线。

如图 14 所示

记 Distance= 0 时， $\theta_0' = 0$

则 $\theta_n' = \theta_n - \theta_0$

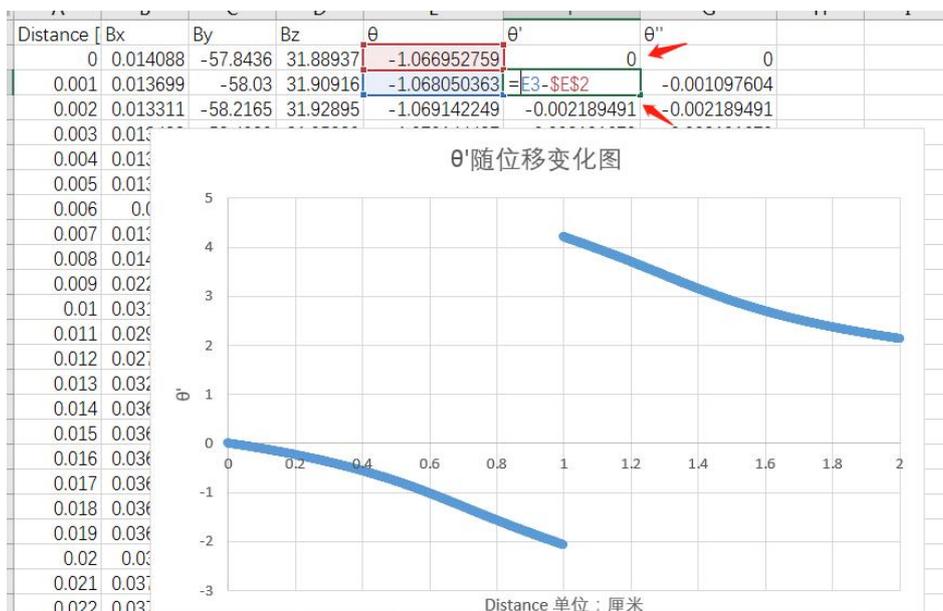


图 14

• 如图 15 所示加入判断条件

$$\theta' > 0, \theta'' = -\pi * 2 + \theta'$$

$$\theta' < 0, \theta'' = \theta'$$

$$\theta' = 0, \theta'' = 0$$

可以得到如图 15 所示，一条连贯的直线

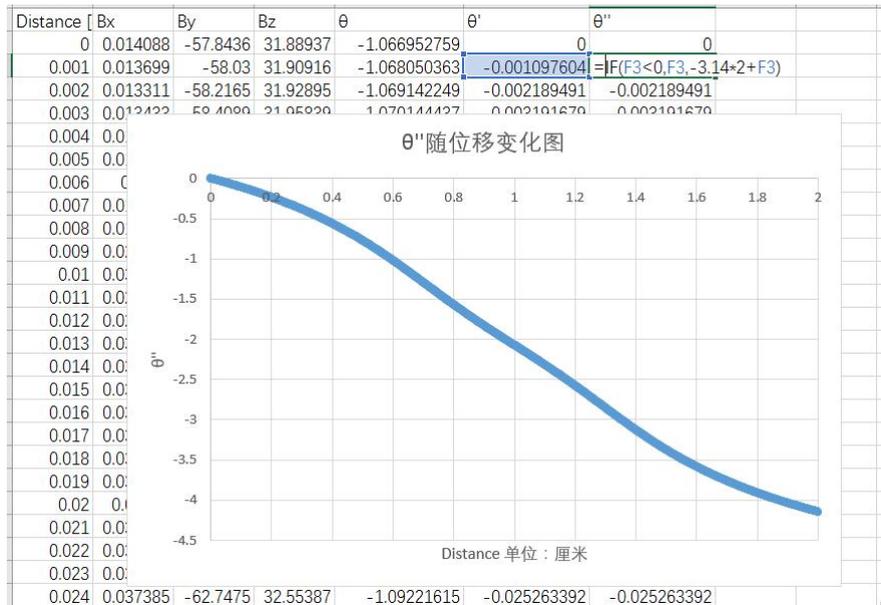


图 15

- 如图 16 所示点击该直线，并添加趋势线



图 16

- 在趋势线格式设置中显示趋势线公式，如图 18 所示，图表上会显示趋势线公

式，该公式即为 θ'' 与Distance关系公式。



图 17

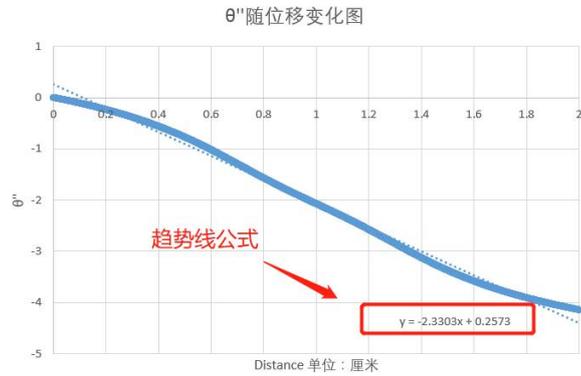


图 18

• 那么在读取芯片的三轴磁感应强度数据后，只要按照如上所示步骤

1. 使用 $\theta = \arctan \frac{B_z}{B_y} = ATAN2(B_y, B_z)$ ，计算得到 θ 值
2. 根据以上步骤，计算得到 θ'
3. 将 θ' 代入图 18 中的趋势线公式，即 $\theta'' = -2.3303 * DiStance + 0.2573$ ，即

$$Distance = \frac{\theta'' - 0.2573}{-2.3303}$$

，就能得到所需位移值。

• 即记 Distance=0 时的 θ 值为 θ_0 。芯片当前检测到的角度值为 θ 。

$$\theta' = \theta - \theta_0$$

$$\theta' > 0, \theta'' = -\pi * 2 + \theta'$$

$$\theta' < 0, \theta'' = \theta'$$

$$\theta' = 0, \theta'' = 0$$

$$\text{则 } Distance = \frac{\theta'' - 0.2573}{-2.3303}$$

，即为所求的位移值。

3.2 参考代码说明

1. 测量得到初始位置，即 Distance = 0 处的角度值 θ_0 。

```
#define ANGLE_ZERO 2.6 //Distance = 0 时的角度初始值
```

2. 计算得到当前磁感应强度弧度值。

```
angleYZ = atan2(z,y); //计算得到YZ平面角度的弧度值
```

3. 根据 $\theta' = \theta - \theta_0$ 计算得到 θ'

```
angleYZ1 = angleYZ - ANGLE_ZERO;
```

4. 依据以下公式得到 θ''

$$\theta' > 0, \quad \theta'' = -\pi * 2 + \theta'$$

$$\theta' < 0, \quad \theta'' = \theta'$$

$$\theta' = 0, \quad \theta'' = 0$$

```
if( angleYZ1 > 0)
{
    angleYZ2= -3.14*2 + angleYZ1;
}
else if(angleYZ1 < 0)
{
    angleYZ2= angleYZ1;
}
else
{
    angleYZ2= 0;
}
```

5. 根据 $Distance = \frac{\theta'' - 0.2573}{-2.3303}$ 计算得到所需位移值。

```
distanceOut = ( angleYZ2 - 0.2573 ) / (-2.3303);
```

3.3 另一种磁场情况

如果磁铁的充磁方向与 3.1 中所示的不同，则在结构件移动的过程中，检测到的磁场曲线会与 3.1 不同，可能出现如下图 19 所示情况。

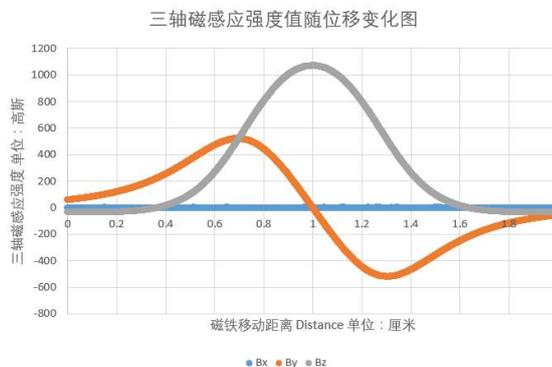


图 19

按照 3.1 所述步骤。

- 计算 $\theta = \arctan \frac{B_z}{B_y} = ATAN2(B_y, B_z)$

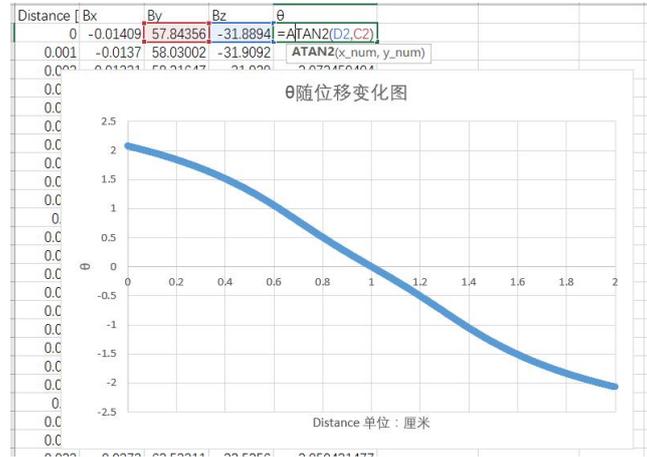


图 20

- 如图 20 所示，YZ 平面磁感应强度夹角 θ 随位移变化图，已经是一条不分段的直线，则无需对 θ 角进行处理。如图 21，直接输出拟合函数即可。

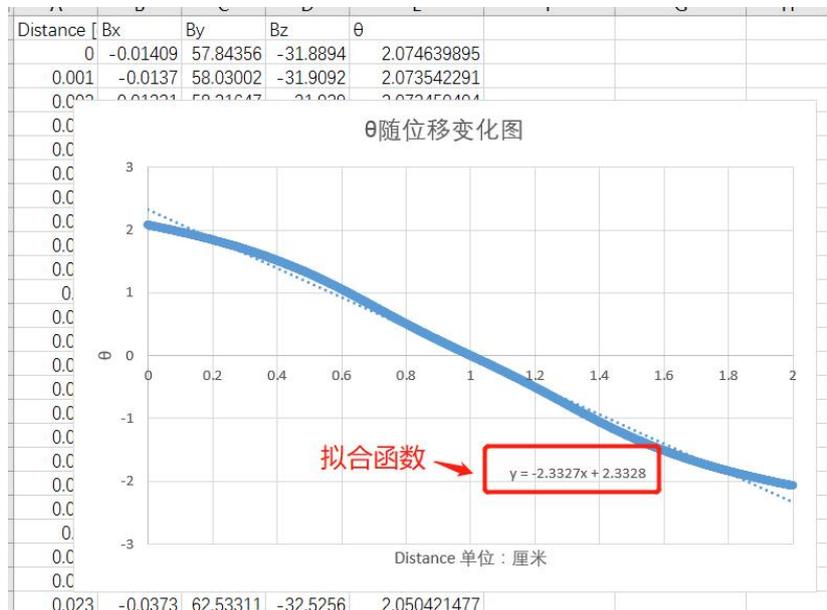


图 21

3.4 片内角度计算方式

KTH5701 的 TABZ 输出模式，可以直接输出芯片检测到的所选平面角度值，

如将寄存器 0x1C 中的 AplaneSel 位配置为 0, 则芯片当前输出的位 XY 平面角度值。其他配置详见 KTH5701 datasheet 中 AplaneSel 的相关描述。

因为已经直接从芯片输出了平面角度, 可以略过 3.1 中, 由公式 1 $\theta = \arctan \frac{B_z}{B_y} = ATAN2(B_y, B_z)$ 计算得到 θ 这一步, 直接以 DiStance 为横坐标, θ 为纵坐标画图后, 继续接下来的拟合函数计算步骤。

3.5 片内角度输出参考代码说明

1. 测量得到初始位置, 即 Distance = 0 处的角度值 θ_0 。

```
#define ANGLE_ZERO 2.6 //Distance = 0 时的角度初始值
```

6. 计算得到当前磁感应强度弧度值。

```
Angle = ( DataReadFrame[3] << 8) + DataReadFrame[4]; //角度  
angleYZ = Angle * 360.0 / 65536 / 180 * 3.14; //计算得到YZ平面角度的弧度值
```

7. 根据 $\theta' = \theta - \theta_0$ 计算得到 θ'

```
angleYZ1 = angleYZ - ANGLE_ZERO;
```

8. 依据以下公式得到 θ''

$$\theta' > 0, \quad \theta'' = -\pi * 2 + \theta'$$

$$\theta' < 0, \quad \theta'' = \theta'$$

$$\theta' = 0, \quad \theta'' = 0$$

```
if( angleYZ1 > 0)  
{  
    angleYZ2 = -3.14*2 + angleYZ1;  
}  
else if(angleYZ1 < 0)  
{  
    angleYZ2 = angleYZ1;  
}  
else  
{  
    angleYZ2 = 0;  
}
```

9. 根据 $Distance = \frac{\theta'' - 0.2573}{-2.3303}$ 计算得到所需位移值。

```
distanceOut = ( angleYZ2 - 0.2573 ) / (-2.3303);
```

4 低功耗应用及系统唤醒实现方法

许多用户对系统处于不工作状态时，对本芯片及系统有低功耗的需求。KTH5701 芯片集成有一种测量模式叫做唤醒睡眠模式，即在这种模式下，芯片能够检测到外部磁感应强度的变化，并且在检测到的变化量达到设定阈值时，会拉高芯片的 INT 脚，并且功耗低于持续感应模式。

KTH5701 的功耗与滤波参数的配置，使用时主控采用的测量模式，测量时的待机时长等等参数有关，以下对如何在芯片的使用过程中，调节功耗进行说明。

滤波参数设置的越大，芯片输出的测量数据就越精确，功耗越高。

与滤波参数有关的寄存器有：寄存器 28 中的 temp0sr, magn0sr, digCtrl

待机时长设置的越大，芯片的功耗越低，但测量频率也随之降低。

待机时长的设置寄存器为：寄存器 29 中的 measTime

4.1 三种测量模式功耗模式说明

在相同的测量频率下，不同模式的测量功耗如下所示。芯片配置为：

位名	temp0sr	magn0sr	digCtrl	measTime
配置值（十六进制）	1	1	1	1

测量模式	采样频率	功耗
持续感应		0.314mA
唤醒睡眠	50Hz	0.256mA
单次测量		0.255mA

如上表所示，在相同的采样频率下，单次测量模式下所产生的功耗最低。以下对三种测量模式的区别做出说明。

如将芯片设置为相同的的采样频率，比如50Hz，即每20ms芯片完成一次测量，并且输出测量数据。但在某些滤波深度寄存器的设定下，芯片完成一次测量的时间并不需要20ms，那么完成一次测量后这个时候芯片处于不测量的状态。以上三种模式功耗有所不同，就是这个不测量状态下，芯片的功耗会有所不同。

这个不进行测量的状态，如果芯片被设置为持续感应模式或者唤醒睡眠模式，我

们称之为待机时间，对应的功耗为KTH57系列数据手册中写的待机功耗（ $I_{DD,STBY}$ 或 $I_{DD,WAKE_STBY}$ ）。即持续感应模式下的待机功耗为 $61.7 \mu A$ （ $I_{DD,STBY}$ ），唤醒睡眠模式下的待机功耗为 $2.4 \mu A$ （ $I_{DD,WAKE_STBY}$ ）。芯片处于待机状态时仍然保留了一部分功能，比如唤醒睡眠模式下，如果磁场阈值达到设定值，会对芯片的INT脚进行拉起等等。而单次测量模式下，芯片进行一次测量完毕后，就进入空闲状态，这个状态和芯片上电，读取完OTP内容后的稳定状态是一致的，此时对应的功耗为KTH57系列数据手册中写的空闲状态功耗（ $I_{DD,IDLE}$ ） $1.4 \mu A$ 。

所以在50HZ测量频率的设定下，即芯片需要在20ms内完成一次测量的设定下，芯片处于正在测量时的功耗，三种模式都相同。而芯片处于不测量的状态时，单次测量模式的功耗 < 唤醒睡眠模式的功耗 < 持续感应模式的功耗。

4.2 三种模式的应用方式推荐

由1.3.1可知，持续感应和唤醒睡眠两种模式功耗更高，但是使用这两种模式时，芯片只需要发送一次使芯片开始测量的命令后，芯片就会按照设定的频率自主对磁感应强度进行测量，后续主控只需要设定读取测量命令的频率即可。

单次测量状态下，芯片的功耗会更低，但每完成一次测量之后就进入空闲，不会自主的按照一定的频率进行测量，也就是说主控要同时控制发送单次测量模式命令和读取测量命令的频率。

唤醒睡眠模式有一个特殊功能，所谓的唤醒睡眠并不是指芯片会睡眠，而是芯片可以通过检测外界磁场的变化来产生一个脉冲，从而唤醒外部系统。比如在某些应用场景下，系统和位移结构件都不需要被使用，则可以让系统进入休眠状态，并设置一个外部中断口检测外部来的脉冲。当结构件再次被使用时，芯片周围的磁感应强度一定会发生变化，当这个变化量满足芯片寄存器中设定的阈值时，则芯片的INT脚会产生一个高电平，即可以用这个高电平来唤醒休眠的系统。

假设以下应用场景，用户使用了一段时间后，把产品放置一旁，经过一段时间后再次使用产品。那么可以在用户使用时，采用单次测量模式，根据自己的需要修改测量频率，结构件长时间不动后，将芯片设置为唤醒睡眠模式，并且将系统休眠，这样会大大降低产品处于静置状态时的功耗。然后用户再次移动结构件，芯片检测到外部磁场发生变化，INT脚产生高电平信号唤醒系统，将芯片退出唤醒睡眠模式，进入单次测量。然后重复上述过程。

需要注意的是，芯片处于持续感应模式或唤醒睡眠模式时，如果需要对芯片寄存器进行修改，或进入其他模式，都需要先发送空闲模式命令，否则无法修改。

4.3 各类滤波参数对功耗的影响

滤波参数设置的越大，芯片输出的测量数据就越精确，功耗越高。

与滤波参数有关的寄存器有：寄存器 28 中的 tempOsr, magnOsr, digCtrl 降低芯片的测量频率同时也是一种减少功耗的有效办法。

下面以单次测量模式为例，给出不同测量频率，或不同滤波参数下的功耗比例。

测量模式	magnOsr	tempOsr	digCtrl	采样频率	平均功耗
单次测量	1			50HZ	0.36mA
	2				0.62mA
	3				1.14mA
	1			100HZ	0.72mA
	2				1.23mA
	3				2.28mA
	1			150HZ	1.08mA
	2				1.85mA
	3				3.42mA
	1	1	2	200HZ	1.44mA
	2				2.47mA
	3				-
	1			250HZ	1.79mA
	2				3.09mA
	3				-
	1			300HZ	2.15mA
	2				3.711mA
	3				-
1			350HZ	2.51mA	
2				-	

Application Note	低功耗、高精度3D Hall传感器	
3		-
1		2.86mA
2	400HZ	-
3		-
1		3.23mA
2	450HZ	-
3		-
1		3.58mA
2	500HZ	-
3		-

注：- 代表当前设定下，无法满足所需的频率要求。

由以上表格可知，测量频率越快，或者滤波深度设置越大，芯片的功耗越高。