

磁阻传感器在导航系统中的应用

Michael J. Caruso

霍尼韦尔公司

摘要

当今大多数导航系统使用某种型号的罗盘来确定航向。使用地球磁场，以磁阻(MR)传感器为基础的电子罗盘可以分辨好于 0.1 度的旋转角度。本文将讨论使用 MR 传感器的简易八指针罗盘，同时还将讨论使用 MR 传感器制作 1 度罗盘的方法。本文中介绍了用来纠正罗盘倾斜角度和附近铁质材料干扰的补偿技术。

简介

几个世纪以来，人们在导航中一直使用磁罗盘。虽然有资料显示早在二千多年前，中国人就开始使用天然磁石—一种磁铁矿来指示水平方向，但罗盘的发明者还是无人知晓。看来也许是 12 世纪的地中海海员最先在海上使用了磁罗盘 [1]。当今的平衡式指针罗盘只是稍微改变了这项早期发明。先进技术生产出了状态稳定的电子罗盘，这种罗盘以 MR 磁传感器和加速度原理的倾斜传感器为基础。电子罗盘具有许多优于常规“指针”型或常平罗盘的长处，例如：抗冲击性和抗振性，对杂散磁场效应的补偿以及与电子导航系统的直接接口。本文将讨论两类罗盘—基本的八指针罗盘与 1 度罗盘。

地球磁场

地球的磁场强度大约为 0.5 至 0.6 高斯，并且具有一个平行于地球表面的成份，它始终指向磁北。这是所有磁罗盘的制作基础，此处的关键词是“平行于地球表面”和“磁北”。

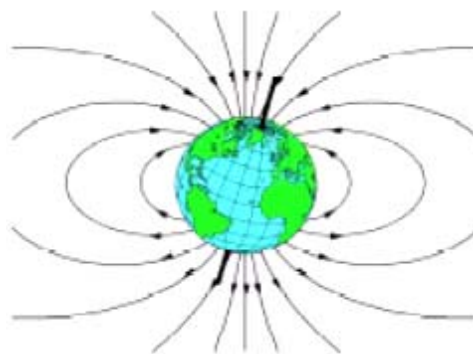


图 1-地球磁场与真北

地球磁场可用图 1 中所示的双极模型模拟表示。该图图示了北半球中地球磁场向下指向北方，在赤道处它水平指向北方，并且在南半球中向上指向北方。在任何情况下，地球磁场的方向始终指向磁北。被用来确定罗盘方向的正是这磁场中平行于地球表面的分量。磁场与地球表面的夹角被称为磁倾角或倾角(见图 2)。在北半球中，磁倾角大约为朝北 70°。在确定方位角或罗盘指向时只使用地球磁场的 X 和 Y 分量。地球磁场的垂直部分忽略不计。

术语磁北指的是地球磁极位置，大约与真北或地理正北偏差 11.5 度。真北位于地球自转轴线上，在地图上由子午线标出。在地球不同位置上，磁北与真北可偏差±25 度或如图 3 所示更大的偏差。这种偏差被称为磁偏角，可根据以地理位置为基础的查找表确定。

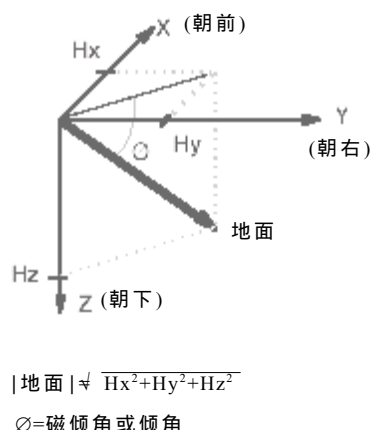


图 2-X、Y、Z 坐标中的地球磁场

准确地找到罗盘航向或方位角的关键是两个步骤：1) 确定地球磁场的水平分量的 H_x 和 H_y ；2) 增加或减去适当的磁偏角，以纠正真北方位。

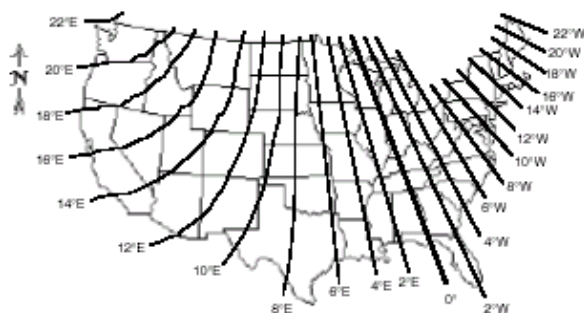


图 3-用来纠正真北方位的磁偏角

磁传感原理

当今，有几种类型的电子罗盘可供选择：磁通门、磁阻式、磁感应式以及其它类型。导航系统常见的磁罗盘是磁通门传感器，它由一套环绕磁心的线圈组成，该磁心配有励磁电路，可测量分辨率小于 1 毫高斯的磁场。这类传感器提供低成本的磁场探测方法；它们体积偏大、易碎、响应时间慢。有时候，动作中的磁通门传感器可以有 2-3 秒的输出响应时间，当导航高速行驶的汽车或无人驾驶飞机时，这读出滞后现象是无法接受的。

另一种磁传感器是磁阻(MR)传感器。这种传感器由透磁合金薄带(NiFe 磁膜)制成，这种透磁合金薄带的电阻性随磁场的发生变化而变化。这种传感器具有一条很明确的灵敏度轴线，并作为集成电路批量生产。最近的 MR 传感器可以显示 0.1 毫高斯以下的灵敏度，固态的小尺寸封装，且响应时间小于 1 微秒，这些 MR 传感器使行驶中的汽车获得可靠的磁场读数，其读取速率高达 1,000 次每秒。

本文余下部分将讨论使用磁阻传感器检测以电压输出表示的地球磁场特征和强度，传感器还将检测任何杂散磁场或叠加在地球磁场上的磁场偏差。磁传感器输出将含有 X、Y 和 Z 轴分量作为我们导航参考：X 轴分量是指向前看方向，Y 轴分量是指向右看方向，Z 轴分量如图 2 所示。

罗盘设计



在导航系统中有多种形式的罗盘供使用。在这里我们将讨论两种使用磁阻传感器的形式-八点罗盘和 1 度罗盘。

八点罗盘-一种简易的八点罗盘指示主要的极点(N, S, E, W)和中间极点(NE, NW, SE, SW)。该类罗盘可用于驾驶员需要知道大致行进方向时基本的自动使用。在这应用场合，磁传感器可被缩减为只使用 X 和 Y 轴的双轴传感器。汽车通常行驶在水平表面上，不包括任何小山或深穴，这样 X 和 Y 传感器可直接测量地球的 H_x 和 H_y 磁场。罗盘可安装在仪表板上，板上的 X 轴直指前方，Y 轴指向左方。关于汽车对地球磁场的磁效应当前不予考虑。

设计罗盘时，可将其分成八个区域，用来指示主要方向。为了分析磁阻传感器的响应，在汽车作环状行进时，如图 4 所示标出 X 和 Y 输出值。我们已知道地球磁场始终指向北面，就可以在 X 轴(和汽车)直接指向北面时，开始进行分析。因为此时地球磁场中没有指向左面或西面的部分，所以 X 输出值将为最大值，且 Y 输出值为零。当汽车按顺时针

方向驶向东面时，X 轴将减小为零，而 Y 轴将减至其最大负值。当汽车继续以顺时针方向驶向正南面时，X 轴将减至其最大负值，而 Y 轴将还原为零。图 4 显示了这结果，以及 X 和 Y 轴的完整环形循环过程。磁力计的 X 和 Y 输出值可用 $\cos(\varnothing)$ 和 $\sin(\varnothing)$ 函数表示，其中 \varnothing 表示方位角，指磁北。

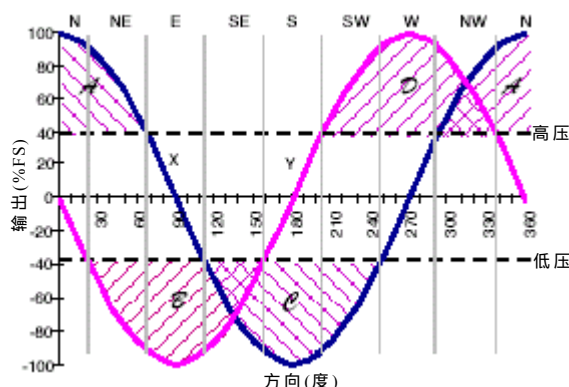


图 4-360°旋转的磁输出值 X 和 Y

图 4 的 X 和 Y 曲线可划分为八个区域，表示四个主要极点和四个中间极点。可将这些曲线组合在一起后以表示每一区域。为判定罗盘的 8 个航向则需要两个转折点、上转折点和下转折点。可通过获得 X 和 Y 的满量程(FS)值来确定转折点，如下所示：

$$\text{上转折点} = 100 * \sin(22.5^\circ) (\%FS) = 38\%FS \quad (1)$$

$$\text{下转折点} = -100 * \sin(22.5^\circ) (\%FS) = -38\%FS$$

可使用电压比较器检测上转折点和下转折点电平，以便将 X 和 Y 曲线分为四个区域：A，B，C 和 D。可通过组合 A，B，C 和 D，及使用 Boolean 逻辑门、四个比较器和图 5 所示的双轴磁传感器，来确定罗盘的八个指针。这电路需要一个灵敏度为 1-2 毫高斯的双轴磁传感器。磁滞和磁线性度必须小于 1-2%FS，并有好的重复性。在使用该种设计时，必须考虑三个限制因素：1) 因没有倾斜补偿功能，所以罗盘必须保持水平，2) 附近应没有铁质材料，以免产生磁干扰，3) 很难将磁偏角添加到该设计中。在以下讨论 1 度罗盘时，也要考虑这三个限制因素。

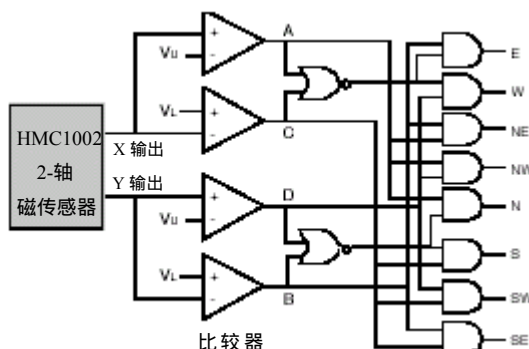


图 5-八点罗盘电路

1 度罗盘-一些导航系统不仅仅只要求使用八点指示。例如，全球定位系统(GPS)已得到一个采用先进技术在显像地图上跟踪汽车位置的结果，其精确度小于 10 米。这些系统依靠与四个卫星的遥测接触，有时还借助于系统无线电塔。确定位置时，能与这四个卫星保持在一条瞄准线上是十分必要的。城市和隧道中需要备用系统，这样在短时间死区时仍可以维持这定向过程。这正是精度更高的罗盘能帮助 GPS 型导航系统的地方。在丢失 GPS 信号的过程中，了解汽车速度和行进方向就能保持对汽车进行正确的跟踪。可以采用陀螺仪来维持行进方向，但低成本的 MR 型罗盘则是最佳选择。对于这些系统，所希望的罗盘精度为 1 度。

为得到 1 度精度的罗盘，需要一台能可靠地分辨 0.1 度角度变化的磁传感器。这类传感器还必须具有低的磁滞 ($<0.05\%FS$)，高的线性度 ($<0.5\%FS$ 误差)，而且是可重复的。X 和 Y 平面中的磁场一般在 200 至 300 毫高斯范围内 - 在赤道处更大 - 在两极较小。可运用下列方程式：

$$\text{方位角} = \arctan(y/x) \quad (2)$$

估算出所需的磁力计分辨率。要想分辨 200 毫高斯磁场 0.1° 的变化，需要大于 0.35 毫高斯的磁灵敏度。现在，我们可用固态的 MR 传感器，它能可靠地分辨 0.07 毫高斯信号，并具有 5 倍余度的检测灵敏度。

使用图 6 所示的简易磁传感器时，可用水平面中的 X 和 Y 输出值计算出方位角。运算正切函数在大于 180° 时是有效的，并不允许 $Y=0$ 的除法运算，我们可以运用下列方程式：

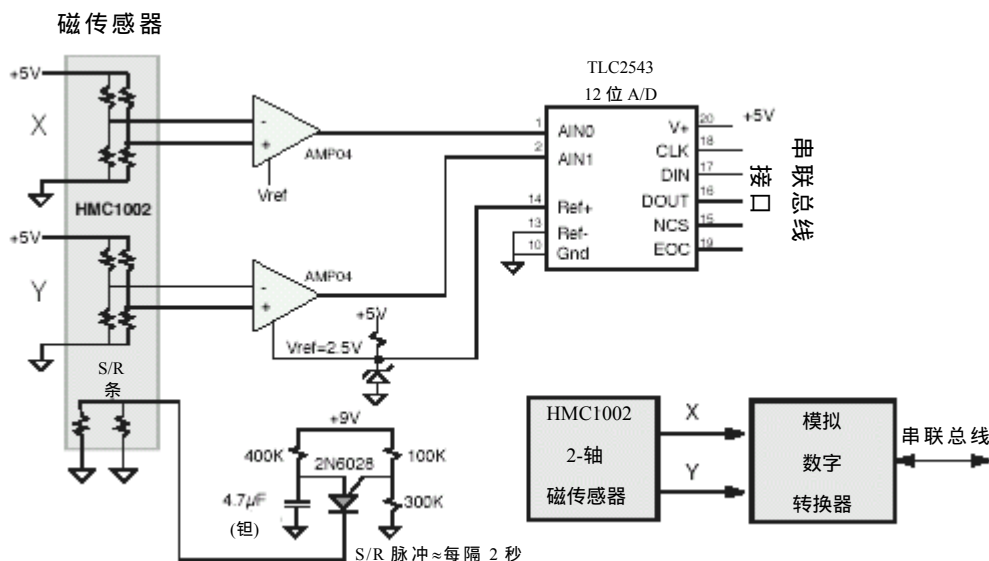


图 6-无倾斜补偿的 1 度罗盘系统

方位角($x=0, y<0$)= 90.0 (3)

方位角($x=0, y>0$)= 270.0

方位角($x<0$)= $180-[\arctan(y/x)*180/\pi]$

方位角($x>0, y<0$)= $-[\arctan(y/x)*180/\pi]$

方位角($x>0, y>0$)= $360-[\arctan(y/x)*180/\pi]$

图 6 所示的设置/复位(S/R)电路是一个电流脉冲发生器，用来消除过去的磁效应和温度漂移效应[4]。串联总线输出可以很容易地连接至低成本的微处理器，用于方位角计算。方程式(3)在相对于磁北(HNorth)的正向上提供了 0° 至 360° 的方位角，见图 7。在本示例中，对倾斜和附近铁质材料对方位角的干扰结果没有补偿。

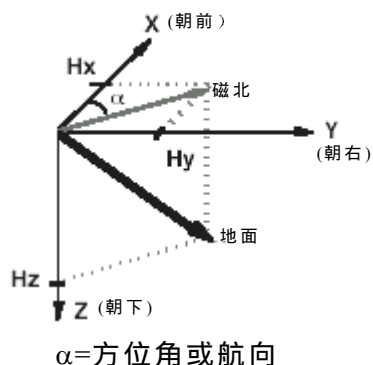


图 7-X-Y 平面中确定的方位角

对倾斜的补偿-大多数情况下不总是将罗盘限制在平面和水平面上，它们通常用手安装在飞机或不平整地面上的汽车上。由于罗盘并不总是水平于地球表面，这使得确定方位角，或行进方向变得更加困难。由倾斜角产生的误差很大程度上取决于倾斜角的大小。纠正罗盘倾斜的典型方法是使用倾角仪或倾斜传感器，确定横滚角和俯仰角。术语横滚和俯仰通常用在航空学上：横滚是指围绕 X 或前进方向的旋转，俯仰是指围绕 Y 或左-右方向的旋转(见图 8)。

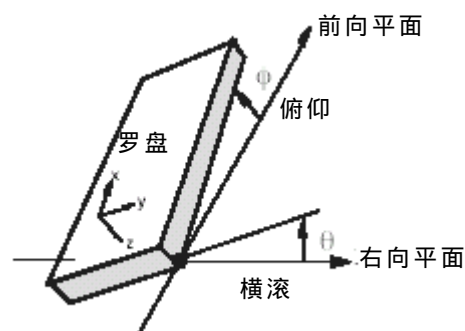


图 8-以地球水平面为基准的罗盘倾斜

常见的液体充填式倾斜传感器类似于一个玻璃“套管”，在传感器改变角度时，它使用电极监控液体运动。还可以使用更加新式的固态加速计或倾斜传感器，该传感器用机电电路[5]测量地球的重力场。这些设备的输出是一个与倾角等量的电信号。在安装罗盘的过程中，必须仔细地将倾斜传感器与 X, Y, Z 磁轴对准。一些制造商提供如图独立电路板的倾斜传感器，这些传感器可以提供作为输出值的横滚角和俯仰角。

为对罗盘的倾斜作补偿，了解横滚和俯仰状况只是成功的一半。此时，磁力计必须依赖于所有的三条磁轴线(X, Y, Z)，这样，地球磁场可以完全转回到水平方向。图 8 展示了以观察者或汽车的朝右或朝前水平方向为基准的罗盘的横滚角(θ)和俯仰角(ϕ)。运用下列旋转方程式可以将 X, Y 和 Z 磁场强度读数换算回到水平面(X_H, Y_H):

$$\begin{aligned} X_H &= X \cdot \cos(\phi) + Y \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) - Z \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\phi) \\ Y_H &= Y \cdot \cos(\theta) + Z \cdot \sin(\theta) \quad (4) \\ \text{方位角} &= \arctan(Y_H/X_H) \end{aligned}$$

只要 X 和 Y 磁场强度读数是在水平面中，就可使用方程式(3)确定方位角。为了加快处理旋转运算，可以将 sine 和 cosine 查找表存储在程序存储器中，以减少运算时间。

图 9 显示了配有串行总线接口，并具有倾斜补偿的罗盘方块图。确定了方位角后，就可以根据工作的地理区域，采用偏差校正找到真北的位置。

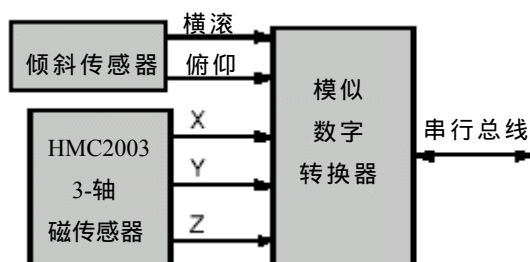


图 9-有倾斜补偿的罗盘系统

附近铁效应的补偿-当罗盘在没有任何铁质金属的空旷区域内工作时，不会对地球磁场产生任何干扰。然而事实上，罗盘都被安装在附近很可能存在铁质材料的汽车、飞机和平台里。铁质金属效应(铁、镍、钢、钴)将会干扰或弯曲地球磁场，这会改变罗盘方向。这种效应可看作是地球磁场中增加的一个磁场。如果把罗盘牢固地装在汽车里，就可算出铁效应，并把它从磁场强度读数中减去。

图 10 显示了罗盘在水平面里作圆形旋转时的 X 和 Y 磁场强度读数。在本示例中，地球磁场没有受到铁的干扰，读数取自霍尼韦尔 HMR2300 智能型数字磁力计，其中每个计数代表 67 微高斯。在 X 和 Y 平面中的地球磁场强度值读到 2800 个计数，约为 190 毫高斯。当用 X 和 Y 读数作图时，就形成一个圆，其中心在 0,0 点处。可用图 10 所示的方程式(3)对每个读数确定一个方位角。此图显示了在旋转过程中根据 X 和 Y 方向的 sine 和 cosine 输出值。

如果将磁力计安装在汽车上，发动机和车体的影响将会干扰地球磁场。驾驶汽车作环形运动就会产生如图 11 所示的曲线。请注意，这里的 X、Y 图不是一个圆(有点椭圆)，而它偏移 0,0 点为 -480 和 -795 个计数。这偏移和椭圆效应是汽车对地球磁场固定干扰的结果。这干扰可系统地确定，并可将它们应用于随后的 X, Y 读数中，以消除汽车的影响。

为补偿汽车的干扰，可确定两个定标因数 X_{sf} 和 Y_{sf} ，来将椭圆改为圆。于是可计算偏移值 X_{off} 和 Y_{off} ，将圆中心定在 0,0 原点。在对汽车干扰作补偿时，用来计算方位角的 X, Y 值，如下：

$$\begin{aligned} X \text{ 值} &= X_{sf} \cdot X \text{ 读数} + X_{off} \quad (5) \\ Y \text{ 值} &= Y_{sf} \cdot Y \text{ 读数} + Y_{off} \end{aligned}$$

这里，定标因数 X_{sf} 和 Y_{sf} 定标了每个读数，将椭圆改变成一个圆，并且 X_{off} 和 Y_{off} (偏移)值将中心移回至 0,0 原点。图 12 显示了这补偿结果，该结果应与图 10 中的“无干扰”曲线进行比较。

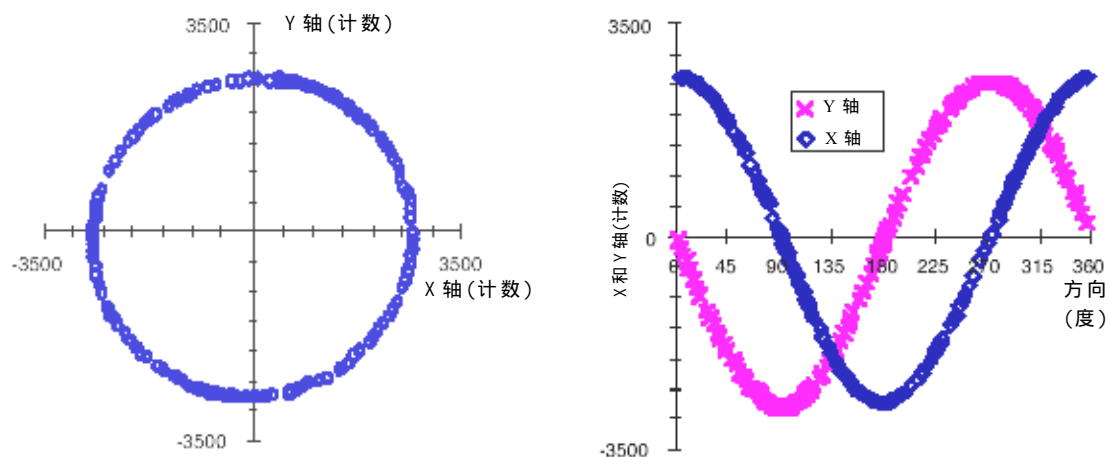


图 10-在水平面中 360°旋转无干扰时的磁力计读数

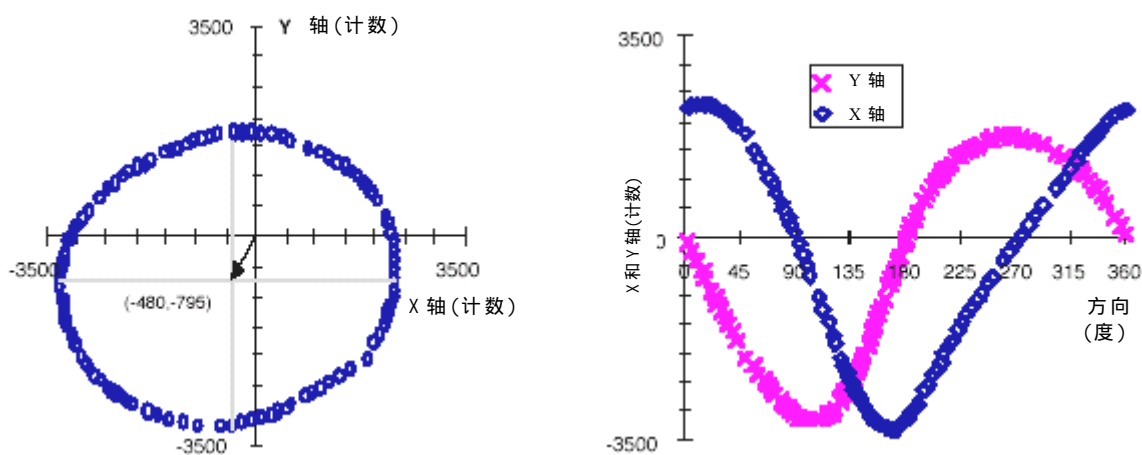


图 11-在水平面中 360°旋转汽车发动机/车体干扰时的磁力计读数

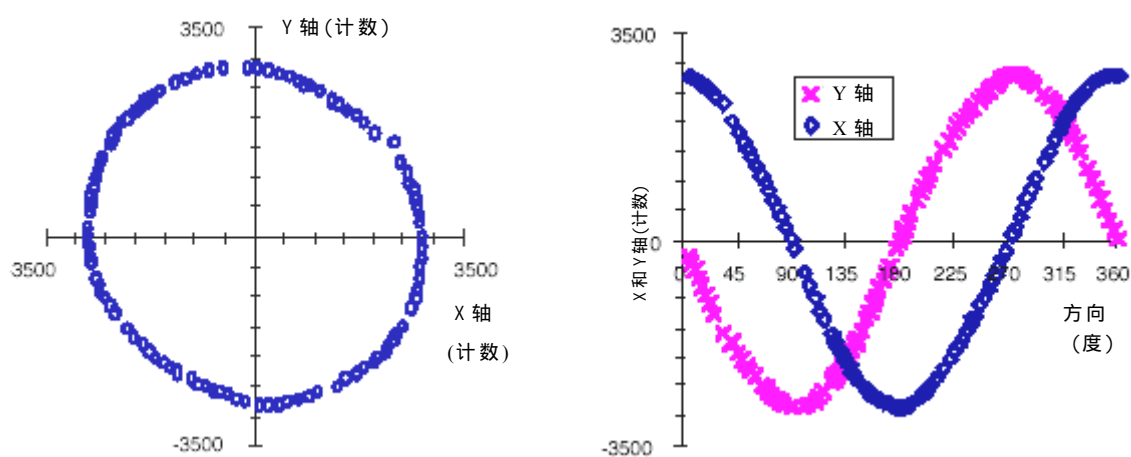


图 12-在水平面中 360°旋转对汽车发动机/车体干扰作补偿时的磁力计读数

可使用简单的标定(校准)方法来确定偏移和定标因数:

- 把罗盘安装在汽车里,并在水平面上驾车作环形运动。
- 找出 X 和 Y 磁力读数的最大和最小值。
- 用这四个数值确定 X 和 Y 定标因数(Xsf, Ysf),以及零偏移值(Xoff, Yoff)

$X_{sf}=1$ 或 $(Y_{\text{最大}}-Y_{\text{最小}})/(X_{\text{最大}}-X_{\text{最小}})$ (6)
以较大的数值为准

$Y_{sf}=1$ 或 $(X_{\text{最大}}-X_{\text{最小}})/(Y_{\text{最大}}-Y_{\text{最小}})$ 以较大的数值为准

$X_{off}=[(X_{\text{最大}}-X_{\text{最小}})/2-X_{\text{最大}}]*X_{sf}$ (7)

$Y_{off}=[(Y_{\text{最大}}-Y_{\text{最小}})/2-Y_{\text{最大}}]*Y_{sf}$

下列示例说明如何确定补偿值。将罗盘安装在汽车里,汽车在空的停车场内作环形运动。磁力计上的 X 和 Y 磁场读数(15,000 Count=1 高斯)被读出,最小和最大读数如下:

X 最小=-3298 X 最大=2338

Y 最小=-3147 Y 最大=1763

因为 $(Y_{\text{最大}}-Y_{\text{最小}})/(X_{\text{最大}}-X_{\text{最小}})<1$, 则根据方程式(5)设置定标因数(Xsf)为 1,接着将 X 读数量程除以 Y 读数量程,确定出 Y 定标因数(Ysf)

$X_{sf}=1$

$Y_{sf}=(X_{\text{最大}}-X_{\text{最小}})/(Y_{\text{最大}}-Y_{\text{最小}})=1.15$

将最大读数减去最小读数,取所得差值的一半,并用定标因数 Xsf 和 Ysf,计算出偏移校正值。

$X_{off}=[(X_{\text{最大}}-X_{\text{最小}})/2-X_{\text{最大}}]*X_{sf}=480$

$Y_{off}=[(Y_{\text{最大}}-Y_{\text{最小}})/2-Y_{\text{最大}}]*Y_{sf}=795$

存储这些数值,并将它们应用到每个倾斜补偿读数 X_H 和 Y_H 中。在方位角计算方程式(3)中用来确定罗盘方向的 X 值和 Y 值的数值如下:

X 值= X_H+480

Y 值= $1.15*Y_H+795$

结 论

罗盘方向根据水平面中的地球磁场确定,在罗盘系统中,每一个磁力计读数必须首先进行倾斜校正,然后必须对每个读数作附近铁质材料干扰效应的补偿。一旦对罗盘读数作了倾斜补偿,或对附近铁质材料干扰作了校正,就应该用磁偏角调节磁北至真北。

磁阻传感器为建立罗盘导航系统提供了固态解决办法。它们具有高的灵敏度,好的重复性,体积小,因而产生高的补偿精确度,并易于装入在磁传感器中。除了本文介绍的倾斜和铁金属干扰补偿技术外,还有许多其它技术。补偿方法取决于应用要求:精确度、分辨率、速度、尺寸和成本。

参 考

- [1] Grant, George A., 和 Klinkert, John, 船用罗盘, 2d ed (1970)。
- [2] Barber, G.W., 和 Aarott, A.S., 罗盘调节的历史和磁性, IEEE Trans. 杂志 1998 年 11 月
- [3] Olson, Gregory J., et al, Nongimbaled 固态罗盘, 固态传感器和执行器公司, 1994 年 6 月
- [4] 磁传感器的设置/复位脉冲电路, 霍尼韦尔应用注释, AN-201
- [5] 以微机械加速计为基础的双轴倾斜传感器, Mike Horton, Charles Kitchin, 传感器杂志, 1996 年 4 月

从 SI(国际单位制)至高斯的单位换算:

1Tesla=10⁴ 高斯=10⁹gamma=7.96×10⁵A/m,

1nTesla=10 微高斯=1 gamma=7.96×10⁻⁴A/m

Honeywell

帮助你控制自己的世界

固态电子设备中心

霍尼韦尔公司

12001 State Highway 55

Plymouth, MN 55441 2-98 900212