

用于低价位的罗盘系统的磁传感器的应用

概要

这里介绍的是一种决定航向的方法，包括：俯仰、横滚、以及车辆的磁特性的影响。使用固态磁传感器和倾斜传感器，可以组成一套低价位的罗盘系统，如今，商用飞机使用的姿态和航向参考系统，花费几万美元，对于一般的飞行，或小的私人飞机，费用则太大了，这里所描述的罗盘系统，将提供航向，俯仰和横滚，其精度达到 1° ，或更好，此系统的不足，在于输出受加速度和转弯影响，对于此问题的解决方案，在本文结尾有描述。

背景知识

地球的磁场强度为 0.5-0.6 高斯，与地平面平行，永远指向磁北极，磁场大致为两极模式：在北半球，磁场指向下，赤道附近指向水平，在南半球，磁场指向上。无论何地，地球磁场的方向的水平分量，永远指向磁北极，由此，可以确定罗盘系统的方向。

传统的飞行器，通过 3 个角度：航向，俯仰和横滚，定义了姿态参数，这些角度，都是参考本地水平面，即：垂直于地球重力矢量的平面。

航向，在当地的水平面上，瞬时针方向测量，与真实北极（地球的两极轴）的夹角。

俯仰，飞行器的纵向轴和当地的水平面之间的夹角。

横滚，关于飞行器的纵向轴的角度，是当地的水平面与实际飞行姿态之间的夹角。

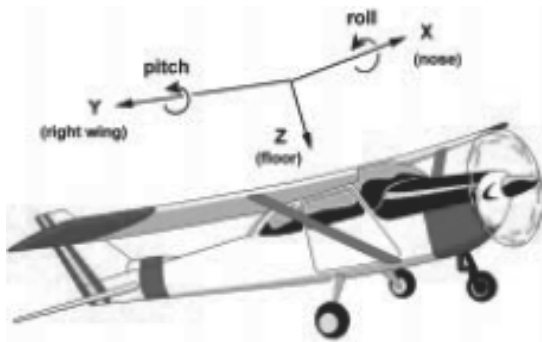


Figure1-Coordinate direction (X,Y,Z)and attitude orientation(roll, pitch)on an aircraft.

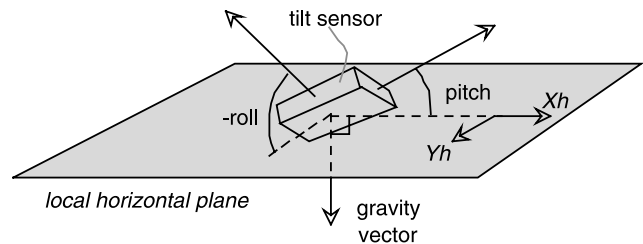


Figure2-Tilt ssenso angles are referenced to the local horizontl plane defined by gravity.

本地的水平面，是相对于地球重力矢量而言（见图 2），如果罗盘置于本地的水平面上，则俯仰和横滚角均为 0 度，航向角为： $\text{Heading} = \arctan(Y_h/X_h)$

其中， X_h 和 Y_h ，为地球水平磁场分量。当飞行器旋转时，航向角相对于磁北极变化了 0° 到 360° ，如果此时罗盘倾斜了，则必须利用倾斜角度（俯仰和横滚角），三个磁场分量（ X ， Y ， Z ），来计算航向角。

倾斜角度的测量

得到俯仰和横滚角的方法之一，是使用倾斜传感器来感知重力的方向。

通常的测量设备包括：加速度计，电解倾斜传感器和机械结构的水平环。还有一种确定当地水平面的方法，是使用陀螺仪随时保持惯性导航。

陀螺仪是一种用来精确测量角度变化的仪器，一些科技可用来制成陀螺仪，如：旋转轮，振动结构和激光环。输出信号与转动角速度成正比。使用陀螺仪的一个主要缺点是输出的时飘。通过周期的校正，时飘可以被补偿，从而提供高精度的俯仰、横滚和航向角度。陀螺在商用飞行器上是标准的导航仪器，在加速度环境下可以很好工作。与倾斜传感器相比较，陀螺既体积大又昂贵。

倾角传感器有许多类型和尺寸。其中水平环倾角传感器，由安装成直角的两个环组成，很象一个双摆钟。装有水平环的罗盘，要与当地水平面保持悬空状态，以得到俯仰与横滚角度。水平环的机械结构，对振动和冲击很敏感，在移动后要花几分钟来稳定，这种罗盘只能得到两轴磁信号。因为在稳定状态下得不到俯仰和横滚角度，既然通过罗盘平台来定向，这些罗盘无法对环境的铁磁物质影响做补偿。

用于低价位的罗盘系统的磁传感器的应用

低成本的倾斜传感器，如两轴电解和双轴加速度计，可以直接测量俯仰和横滚角度。液体填充的电解倾斜传感器，类似于一个玻璃套管，当传感器改变角度时，通过电极来监控液体运动。固态加速度倾斜传感器，通过机电电路（如图 2）来测量地球重力强度。这两种传感器很类似，它们都有两个测量与水平面的夹角的单轴组件。信号调理电路，用来得到与倾角成正比的输出信号。这些传感器可被用于捷联装置，因为它们没有移动或摆动部件，可用于车辆应用。

图 3

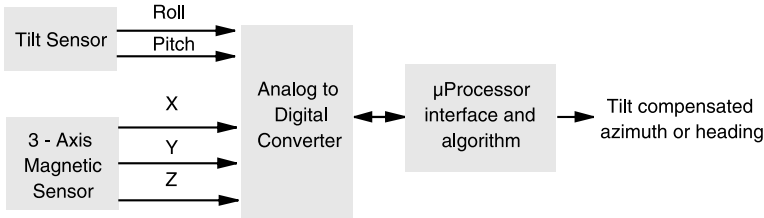


Figure 3—Compass system block diagram.

罗盘系统

一个捷联罗盘，要得到航向输出做定向用，那么，此罗盘系统至少要有三个轴磁传感器和一个二轴倾斜传感器（如图 3）。进行航向计算，要求有三轴磁分量数据（X，Y，Z），这样，航向可以数字化的旋转到水平面上。通过公式 1，Xh 和 Yh 可以得到航向值。

公式 2，θ 是横滚角，φ 是俯仰角，再加上 X，Y，Z 三轴磁分量，可得到（Xh，Yh）。若没有用此公式，会有大的误差输出。

$$\begin{aligned} X_h &= X * \cos(\phi) + Y * \sin(\theta) * \sin(\phi) - Z * \cos(\theta) * \sin(\phi) \\ Y_h &= Y * \cos(\theta) + Z * \sin(\theta) \end{aligned} \tag{2}$$

为简便计算，可以将 sin 和 cos 计算表存入内存中。公式 1 中的 arcTan，考虑到角度的 4 个象限，计算公式可改为公式 3：

航向角 for(Xh<0)=180-arcTan(Yh/Xh)
 for(Xh>0,YH<0)=arcTan(Yh/Xh)
 for(Xh>0,YH>0)=360-arcTan(Yh/Xh)
 for(Xh=0,YH<0)=90
 for(Xh=0,YH>0)=270

图 4

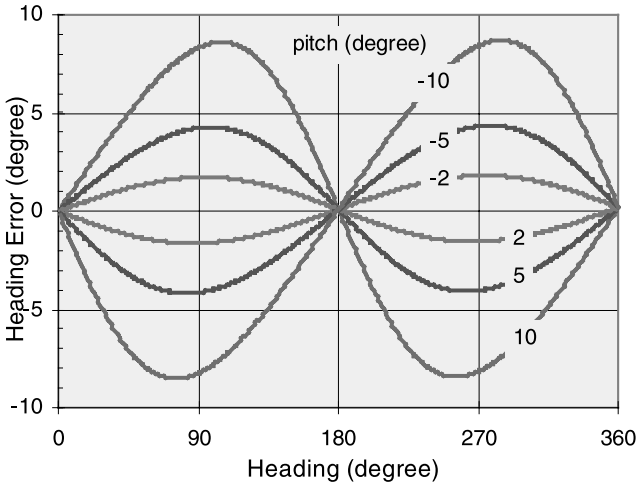


Figure 4— 由于未进行倾角补偿，倾斜导致的航向误差(磁倾角 = 40°)

磁罗盘的误差分析

如果对一个罗盘系统的误差要求优于 1° ，则消除由倾角传感器和磁传感器带来的误差，确定需要的信号处理等级，都是十分重要的，特别是，航向精度由以下因素影响：

- A/D 转换的分辨率
- 附近的铁质材料
- 磁传感器误差
- 罗盘的倾斜误差
- 温度影响
- 地球磁场的变化

A/D 转换的分辨率

欲使罗盘精度达到 1° ，要使磁传感器能可靠的分辨率 0.1° 的角度变化，传感器需具有低磁滞（ $<0.08\%FS$ ），高线性度（ $<0.05\%FS$ ）和可重复性，在 X-Y 水平面上，磁场分量的典型值为 200mG，赤道多一些，极地少一些。根据航向公式，可以大致推算出需要的 A/D 转换的分辨率，假如磁传感器的误差可以允许在 0.1° ，则：

$Error=0.1^{\circ}=Heading=arcTan(Yh/Xh)$ ，则 $Yh/Xh=1/573$

也就是说，Yh/Xh 比率的 1/573 的变化，会导致航向 0.1° 变化，若使用 9 位 A/D 转换器，分辨率为 1/512。即多于 9 位的 A/D 转换器，可以满足 200mG 范围内， 0.1° 的误差要求，既然(X,Y)磁场强度范围为 $\pm 200mG$ ，则 A/D 转换器应大于 10 位，考虑到硬磁环境和象赤道附近的大磁场水平分量，磁场强度可考虑为 $\pm 800mG$ 。A/D 转换器应大于或等于 12 位。

一个 12 位 A/D 转换器，可以在 $\pm 800mG$ 范围内，分辨率为 0.39mG.(1.6G/4096)

磁传感器误差

如今的固态磁阻传感器，可以很可靠的分辨小于 0.07mG 的磁场。

磁传感器的其他参数的测量误差应该优于 0.5° ，才能使总体航向精度为 1° ，这些参数包括传感器噪声，线性度，磁滞，重复性误差，磁传感器的任何增益误差和偏移，在硬磁校正时，都可以被补偿掉，不必考虑。

磁传感器若能提供小于 0.5mG 的磁场误差，对应的航向误差为 0.14° 。

参数	典型误差值	磁场误差	航向误差
噪声（带宽=10Hz）	85uG	85uG	$<0.01^{\circ}$
线性度	0.05%FS	0.2mG	0.06°
磁滞	0.08%FS	0.32mG	0.09°
重复性	0.08%FS	0.32mG	0.09°
总体误差值		0.49mG	0.14°

(FS=400mG，此参数是参考 HMC1021/22 磁传感器的)

温度误差

传感器的温度系数也会影响到航向精度，包括温度漂移和灵敏度温度系数。

灵敏度温度系数表现为温度变化时，传感器的输出增益的变化（如右图），磁传感器的两个轴向(X,Y)，有匹配的灵敏度温度系数，即，温度引起的输出变化，在 X 轴向的分量，和在 Y 轴向的分量，是成正比的。因此，在航向的计算中，此因素可以是互相抵消掉；
[Azimuth= $arcTan(Y/X)$]

例如，温度变化引起 Y 读数变化 12%，X 读数也会变化 12%，对航向无影响。

磁传感器的温度漂移是不匹配的，会对航向输出有直接影响，有许多数字和模拟电路技术，可以对此补偿一个简单的方法是用 Set/Reset，可以消除温飘，整流偏移电压，和运放偏移电压及运放的温度漂移。

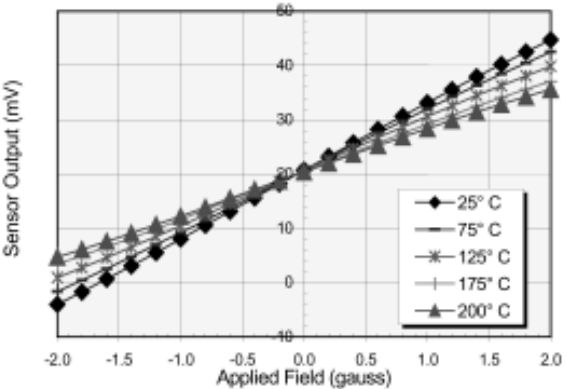


图 5 - 磁传感器的输出，在不同温度下，都交叉于一点

磁罗盘的误差分析

一个磁传感器被置位，再被复位后的输出曲线，请参考下图，Set/Reset 模式的实现，是通过一个交流耦合驱动器，产生一个双向电流脉冲（图 7）。这两个曲线是对称的，有一个相同的截距，如图 6 示的偏移 -3mV，此偏移来自于制造过程中的电阻不对称，可以通过减法运算消除掉；首先，施加 Set 脉冲，测量出 $H_{applied}$ ，和输出 V_{set} （图 7），然后，施加 Reset 脉冲，记录 V_{reset} ，将 V_{set} 减去 V_{reset} ，可消除 V_{os} ：

$$V_{reset} = S * H_{applied} + V_{os}; V_{reset} = -S * H_{applied} + V_{os}; \Rightarrow V_{set} - V_{reset} = S * 2 * H_{applied}$$

传感器的灵敏度（S）被表示为 mV/gauss，此方法也同时消除了运放偏移，传感器偏移的温飘，以及运放的温飘，此方法是非常有效的，且易于实现。

使用此方法，可使磁读数受温度的影响控制在小于 0.01%/°C，即超过 50°C 的温度变化，航向精度影响小于 0.29°。

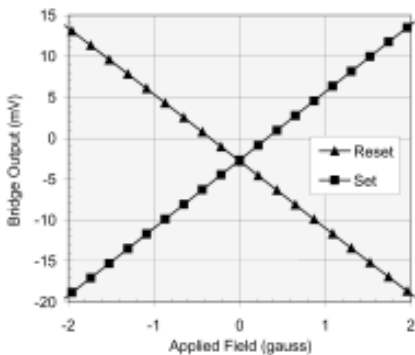


Figure 6—Set and reset output transfer curves.

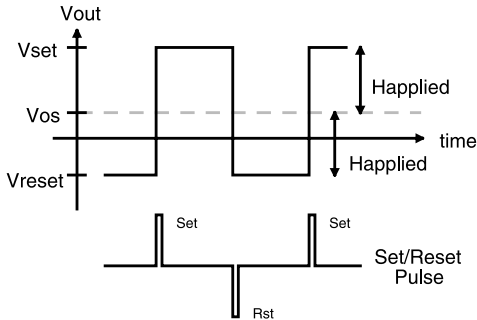
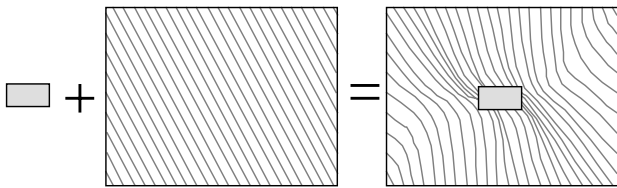


Figure 7—Set and reset effect on sensor output (V_{out}) show the peak-to-peak level is $2 * H_{applied}$.

附近的铁质材料

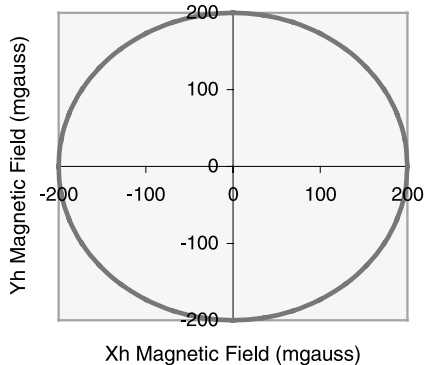
既然航向是以地球水平面上的（ X_h, Y_h ）为基础，磁传感器必须能测量这些值，且排除附近的磁源或干扰，干扰的大小取决于平台的材质，连接头，和罗盘附近的铁质。

当一个铁质放在一个磁场中，会产生干扰（如图 8），铁质可能是附近的铁螺钉，或安装支架，等，在研究附近的磁干扰的影响前，我们可以先观察一个理想的，无干扰的输出曲线，当两轴磁传感器在水平磁场中旋转时，输出是一个以（0，0）为圆心的圆（右图 9），此时，输出的航向会线性的从 0 到 360 变化。



铁质物体 + 单一磁场 = 磁场干扰

图 8 - 铁质物体在单一磁场中的干扰



磁干扰可分为两类：硬铁和软铁干扰。

硬铁干扰产生于永久磁铁，和被磁化的金属，或罗盘平台上的钢。这些干扰会保持大小恒定，与罗盘的相对位置固定，而与罗盘指向无关，硬铁干扰在罗盘输出的每个轴向加了一个定值，输出曲线图的圆心被移动了（如图 10），对于航向的影响则是一个周期性的误差，如图 11。

要消除硬铁干扰，磁输出的圆心偏移必须得到，通常是将罗盘和平台旋转一周，得到圆上的足够的点再得到圆心偏移，一旦找到（ X, Y ）偏移会存在内存中，每次罗盘读数时都会减去此偏移，因此，航向计算时可以消除硬铁干扰。

软铁干扰来源于地球磁场和罗盘附近的任何磁性材料之间的相互作用，象硬铁材料一样，软金属也干扰地球的磁力线，不同点是，软磁的干扰程度，与罗盘的方向有关，图 12 描述了软铁对磁场值的影响，图 13 显示了软铁干扰下的罗盘航向输出，即：2 个周期的误差曲线。

磁罗盘的误差分析

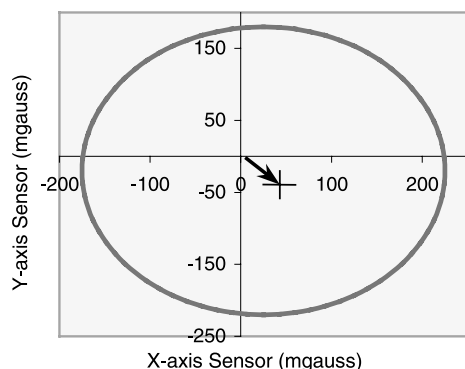


Figure 10—Hard iron offsets when rotated horizontally in the earth's field.

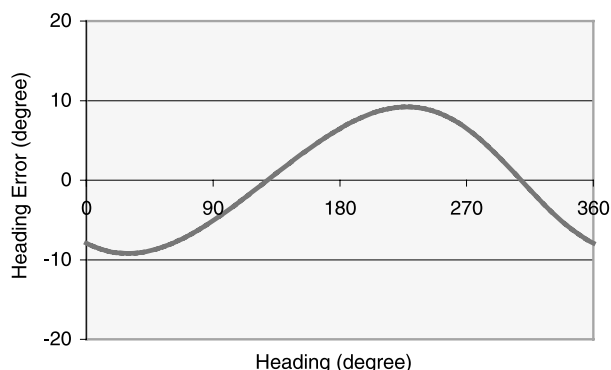


Figure 11—Heading error due to hard iron effects known as single-cycle errors.

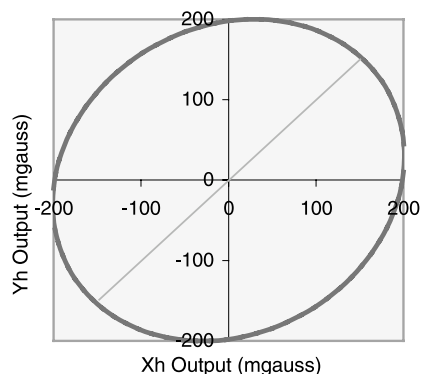


Figure 12—Soft iron distortion when rotated horizontally in the earth's field.

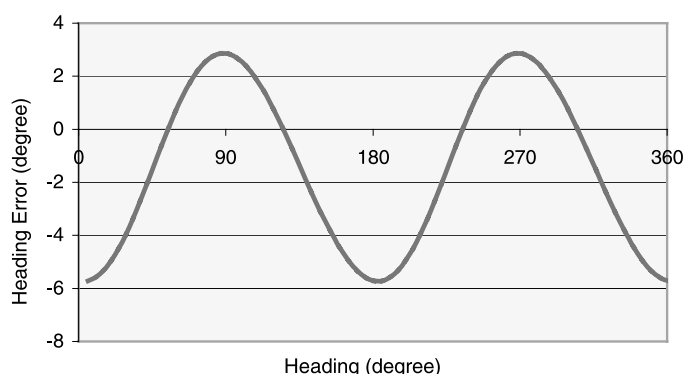


Figure 13—Heading error due to soft iron effects known as two-cycle errors.

对软铁干扰的校正,稍微有些麻烦,需要有些计算,一种方法是消除软铁效应,即:将读数旋转45°,标记出主轴,将椭圆形改为圆形,然后,将读数反转45°,得到如图9所示的圆形输出图。

车辆内大多数的铁质材料,都有硬铁特性,最好的方法是移去罗盘附近的所有软铁物质,只处理硬铁干扰,也可以在进行任何软磁/硬磁补偿前,对罗盘附近的平台进行消磁。

一些罗盘生产商提供了硬铁和软铁干扰的校正方法,每种方法都需要将罗盘平台移动,以从罗盘周边的磁空间采样,校正过程可以是很简单的将罗盘的平台指向3个已知的方向,或将它带滚动和俯仰地移动一圈,或24个指向,军舰不可能做24点校正,但手持平台却可以,如果罗盘在校正过程中,仅能采集水平面上的磁场分量,则倾斜导致的航向误差无法补偿,若已知一些航向,则可绘出航向误差倾斜,从而提高航向精度。

在同一平台上,硬铁和软铁会随着位置不同而不同,罗盘必须长期固定安装在平台上,才能得到有效的校正,一个特别的校正,只对罗盘的某一位置有效,若罗盘在同一位置,但方向改变,则需要新的校正。磁通门罗盘是无法进行校正的,因此,这就是捷联,或固态的磁传感器的优点。如果只要求重复性,而不要求精度,也可以使用未经过校正的罗盘。

罗盘的倾斜误差

由传感器的倾斜引起的航向误差,有些依赖于地理位置。在赤道,倾斜误差是不重要的,因为地磁力线是严格的处于水平面上,它提供了较大的Xh和Yh读数,Zh值很小,靠近地磁场的两极地区,倾斜误差就特别重要,因为Xh和Yh很小,Zh大,倾斜误差主要依赖于这些读数。倾斜传感器也有偏移,增益误差,和温度影响需要考虑,在硬/软铁校正过程中,这些不会被补偿,因为硬/软铁

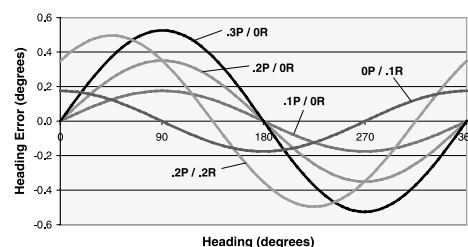


Figure 14—Heading error due to roll and pitch tilt errors (.2P/.2R = .2° error in pitch and roll).

磁罗盘的误差分析

校正就是为了磁传感器的。在安装后，漂移误差可以置 0，同样，温飘，线性，重复性，磁滞和轴交叉影响都是很重要的，对于航向计算来说，倾斜传感器的误差通常是在所有误差中比重最大。

对于误差 1° 的罗盘，倾斜传感器的分辨率 0.1° 是比较理想的，由倾斜传感器导致的总体误差应小于 0.5°，图 14 的曲线显示了不同的曲线传感器对航向的影响，图中，0.3° 的俯仰角误差，且无横滚角误差，导致了 0.5° 的航向的误差。

地球磁场的变化

考虑航向精度，还需要考虑磁偏角，众所周知，地球的两磁极的连线和地球自转轴之间有 11.5° 的夹角，而且在地球的不同地方，磁北极方向和地理北极方向之间，都有不同的角度差值；磁偏角，有时，此差值大到 25°，在航向计算中，需要将此差值减去或加上，通过全球的地磁偏角地图或 GPS 加上 IGRF 模式，都可得到当地的磁偏角（IGRF 是国际地磁参考区域）

罗盘安装

罗盘的精度很大程度依赖于它的安装，罗盘依靠地球磁场来提供航向角，任何外来的磁源带来的磁场扰动，都应该被补偿，磁源包括：永磁体，马达，电流（直流或交流），和磁金属，如钢或铁，将罗盘远离它们，可以大大降低它们的影响，通过校正，也可以对它们的一些影响做补偿，然而，不可能补偿随时变化的磁场；如磁金属的运动产生的干扰，或附近电线的不可预料的电流，从马达或喇叭来的干扰，减少干扰的最好办法是距离，而且，决不要将罗盘放在磁屏蔽金属盒中。

加速度影响

罗盘的任何加速度，都影响倾斜或加速度计输出，会导致航向误差。飞机的转弯，会导致倾斜传感器受离心力的影响，罗盘航向输出则有误差。然而，对大多数应用，加速度都很小，或影响时间很短，此时，磁罗盘是很有用的导航工具，惯导系统，适用于不允许有航向误差的场合下，但其重量，价格和功耗，都至少 10 倍于捷联罗盘。

结论

这里讨论的低成本罗盘，可达到 1° 精度要求，其内部，是由 1 个三轴磁阻传感器和 1 个两轴电解液倾斜传感器，12 或 14 位 A/D，信号调理电子和一个微处理器，航向精度误差可分类为：

磁传感器误差	0.14°
温度影响	0.29°
信号调理	0.05°
+ 倾斜传感器误差	0.50°
= 总体误差	0.98°

必须注意，罗盘不要离变化的磁干扰和软铁材料位置太近，有时也要对罗盘附近的扬声器和高电流导体进行屏蔽。这种罗盘，在加速度和转弯时，会出现暂时的航向误差，一旦这些作用消失，航向精度会恢复，使用捷联罗盘，无需考虑精度漂移，因为航向是依赖真实的地球磁场，此罗盘抗冲击和震动，功耗非常小，且体积很小。