

# 姿态测量系统设计方案

## 1 概述

姿态测量系统（以下简称 AHRS），实时测量运动载体的三维角速率、三维线加速度以及地磁强度分布情况，通过相应的数学运算以及数据融合后输出运载体的三维姿态角，在需要的情况下输出三维角速率以及三位线速率。

## 2 系统应用分析

### 2.1 应用范围以及性能

AHRS 是以牛顿运动三大定律为基础，并与现代 MEMS 技术相结合的高科技产物。

AHRS 可以提供三维姿态信息，并且具有体积小、重量轻、成本较低等优点，已经成为多种应用场合不可或缺的设备，如地质灾害监测用无人机、电影航拍直升机、稳定云台、卫星动中通、卫星静中通、电力监测无人机、摩登大楼状态监测、轨道监测、大坝监测、人体姿态测量、仿真类游戏平台等一系列场合。现在以 MEMS 器件生产的 AHRS 可以到达  $0.1^\circ$  的航向精度，并且可以通过采用相应的补偿算法得到更高的精度；当 AHRS 以光纤陀螺为敏感器件时，可以提供短期  $0.001^\circ$  的航向精度。

MEMS—AHRS 具有很高的产出投入比，以动态长时航向  $0.2^\circ$  精度的 AHRS 为例，其市场售价一般为 10W 左右，一般由三只精度为  $30^\circ/h$  的 MEMS 陀螺以及三只精度为  $1mg$  的加速度传感器，一只民用 GPS 以及一只垂直陀螺，整体硬件成本  $\leq 2W$ 。

MEMS—AHRS 在飞机模型或其他高端玩具市场也得到了广泛使用，并且通过采用价格为十几元的 MEMS 陀螺仪就可以生产出价格为几百至上千元的产品。

## 2.1 姿态精度需求分析

## 2.2 陀螺仪的选定

选定陀螺仪后，在此后的改进阶段尽量不对其进行更改减少硬件开发周期成本。基于上述考虑陀螺仪尽量选择可以实现 $0.1^\circ$ 精度的产品。

从成本方面考虑，所设计的 AHRS 采用 MEMS 陀螺仪。MEMS 陀螺仪又分数字式以及模拟式两种，它们各有特点，如表 1：

表 1 数字式与模拟式 MEMS 陀螺仪性能比较

	优点	缺点	备注
数字陀螺仪	天然数字接口；部分内部加入温度补偿；直接输出角度率信息。	通信协议闲置了硬件的选择；难进行二次标定补偿。	
模拟陀螺仪	接口通用性好；灵敏度高；便于二次标定补偿。	需要专业设备支持标定补偿。	

初步选定数字陀螺仪，它是一款单轴陀螺+三轴加速度传感器的 SPI 数字口输出的陀螺仪，其性能如表 2：

表 2 性能参数表

参数名称	量值	单位	备注
系统供电	5/3.3	V	混合供电
陀螺量程	±100	$^{\circ}/s$	
陀螺零位误差	±1	$^{\circ}/s$	
陀螺零偏稳定性	<1	$^{\circ}/h$	
陀螺灵敏度	50	$LSB/(^{\circ}/s)$	
陀螺G值敏感系数	±1	$(^{\circ}/s)/g$	
加速度传感器量程	±2	$g$	
加速度传感器灵敏度	1800	$LSB/g$	13 位数据
加速度传感器零位	0		
系统数据更新率	2000	HZ	
系统 SPI 时钟速率	0.1 ~ 8	MHZ	

选用这款陀螺主要原因是关注到它的陀螺零偏稳定性 $<1^{\circ}/h$ ,加上其相对低廉的价格,无疑具有很高的性价比。但是也具有它的具有缺点:

- 数字式输出,限制了硬件的选择;
- 数据更新率固定,不宜调节;
- 灵敏度不高。

### 2.3 磁传感器的选定

霍尼韦尔公司的磁阻传感器是各向异性的磁阻传感器,它首先采用磁阻敏感原理,由长而薄的玻莫合金薄膜制成磁阻敏感元件。采用标准的半导体工艺,将薄膜附着在硅片上,由四个磁阻组成惠斯通电桥,除了电桥电路外,传感器的芯片上有两个磁耦合的电流带:偏置电流带和置位复位电流带。这两个电流带是霍

尼韦尔公司的专利，省去了外加线圈的需要。制造过程中，敏感轴被设置为沿薄膜长度的方向，这样可导致电阻值的最大变化。

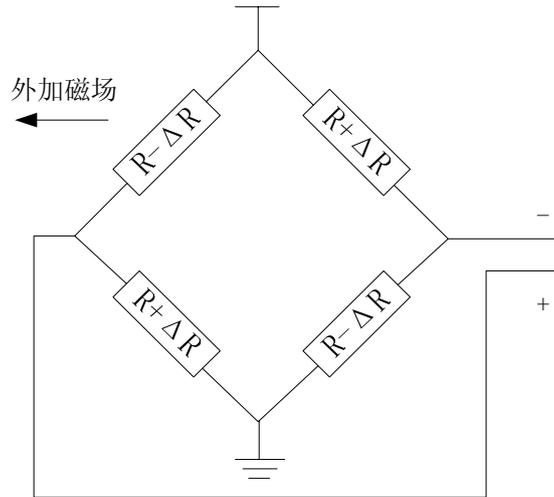


图 1 惠斯通电桥结构

磁阻元件被设计封装成一维和二维敏感方式，其中二维敏感方式是封装在一起且相互垂直的双磁场传感器。电桥的供电电压为  $V_b$ ，当电阻中有电流时，在外加磁场作用下，使得两个相对放置的电阻的阻值减小  $\Delta R$ ；另外两个相对放置的电阻阻值增大  $\Delta R$ 。如图 1 所示，计算可得惠斯通电桥的输出为：

$$\Delta U_{out} = (\Delta R / R) V_b$$

AHRS 初步选用霍尼韦尔公司生产的磁阻传感器 HMC1053 三轴磁阻传感器测量外部磁场，主要是因为它不但体积小、功耗低，而且在宽达  $\pm 6\text{gauss}$  的磁场范围内具有很高的灵敏度和分辨率，灵敏度和分辨率分别为  $1\text{mV/V/gauss}$  和  $120 \mu\text{gauss}$ 。

## 2.4 二次电源设计

AHRS 中有  $+5\text{V}/+3.3\text{V}/+2.5\text{V}/+1.8\text{V}$  等多种电源需求，并且作为一种测量设备对电源的精度以及稳定性有比较高的要求，因此需要选择适中的电源模块。

现今的电子产品中一般采用开关电源，线性稳压等方式，它们的优缺点如表 3。

表 3 线性稳压与开关电源性能比较

规格	线性稳压	开关电源
线路调整率	0.02%–0.05%	0.05%–0.1%

负载调整率	0.02%–0.1%	0.1%–1.0%
输出纹波	0.5-2mvRMS	10-1400mVRMS
输出电压范围	10%	20%
效率	40%–55%	60%–95%
功率密度	0.5 W/cu.in	2W-10W/cu.in
瞬态回复	50us	300us
保持时间	2ms	34ms

虽然线性稳压器件的效率与功率密度不大，但对于 AHRS 这种有模拟器件的测量系统而言，电源的输出纹波才是最重要的，从这方面考虑，二次电源由线性稳压器件组成。

## 2.5 处理芯片的选定

AHRS 需要运行大量的算法程序，并且数据类型对其精度也会造成很大的影响。采用 ARM 或者 DSP 构架的数据处理单元会很大的增强系统性能。

ARM 构架与 DSP 构架比较如表 4。

	优点	缺点	备注
DSP	数据处理能力强。	价格高；接口较少；编程复杂度高。	
ARM	成本低；功耗小；编程复杂度较为容易；接口丰富。	多为定点型处理器。	

AHRS 系统存在三个 SPI 接口的数字陀螺仪，并且在实际应用中还需要提取 2 路附带的 SPI 加速度传感器数据，此外还有三路 AD 数据。

一般航天用姿态测量系统采用 TMS320VC33 作为处理芯片，但是为了增强数据实时性以及实现信息通信，会采用 FPGA 提取传感器数据以及模拟通信接口。

DSP+FPGA 构架的产品无疑增加了产品的价格，ARM 构架作为另一种方案，它具有广泛的外设，相对低廉的价格以及不俗的运算能力，十分适合民用 AHRS 的开发。

备选 ARM 系列性能如表 5 所示

	主要特点
ARM10E	哈弗结构，六级流水线；有 IEEE 浮点处理能力；DMA 控制器；SPI 接口；AD 接口；最高时钟 325MHZ。
ARM11	哈弗结构，七级流水线；DMA 控制器；SPI 接口；AD 接口；最高时钟 500MHZ。
M3	哈弗结构，六级流水线；DMA 控制器；SPI 接口；AD 接口；最高时钟 32MHZ；功耗极低。

## 2.5 输出接口及数据格式

AHRS 采用 RS232 异步串行接口，采用 115200 波特率。

数据格式待定（需商讨）

## 2.6 系统硬件设计

系统硬件框图如图 2:

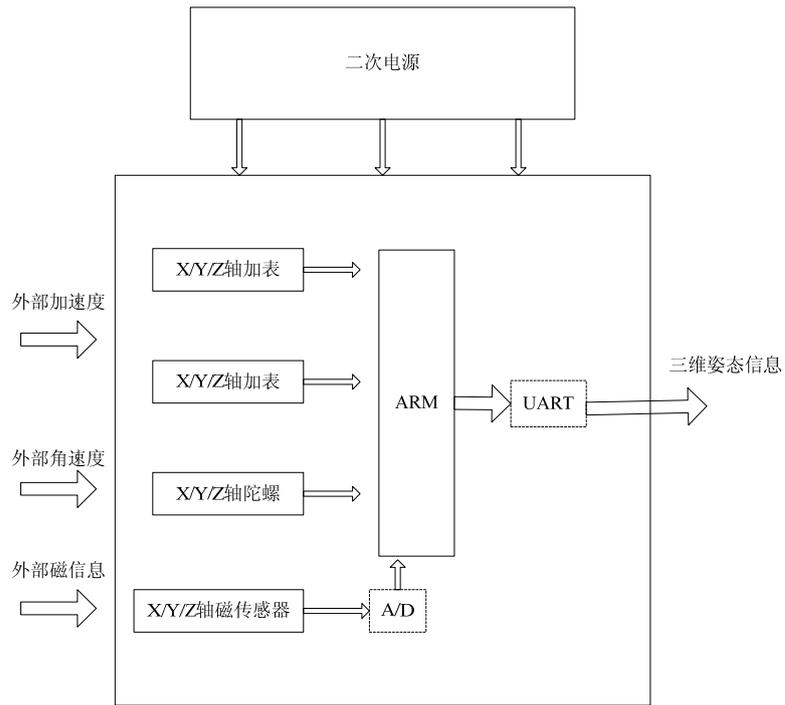


图 2 AHRS 系统硬件框图

AHRS 敏感三轴角速率、三轴线加速度以及三轴磁信息，其中陀螺仪以及加速度传感器是 SPI 接口，采用单总线结构与 ARM 通信，通过片选的方式提取三轴信息；ARM 通过 A/D 采集三轴磁传感器信息。再获取这些数据之后，ARM 通过特定的算法（姿态转移矩阵、数据融合）解算出三维姿态，并通过 UART 发送出去。

## 2.7 系统软件设计

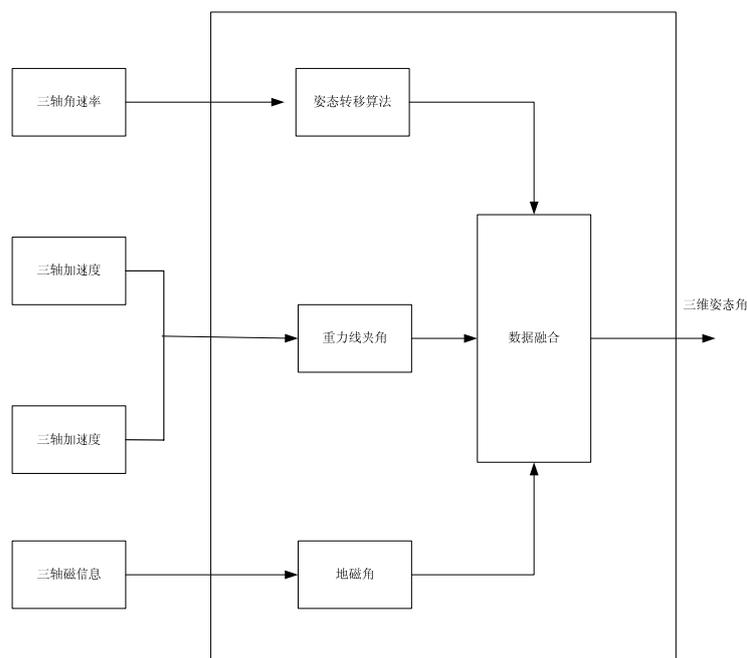


图 3 系统软件框图

三轴角速率是组成姿态转移矩阵最基本元素，在理论上只需要有三轴角速率就可以解算出姿态转移矩阵，但是由于陀螺的误差累计效应，通过姿态转移矩阵计算出的姿态角会随着时间而发散。

三轴加速度计在静止的情况下，可以感知有效重力场，并且通过反正弦或反余弦求的相对于重力垂线的角度。但是必须说明的是，通过加速度传感器获得的最多只要滚转角和俯仰角，并且想要保证测量的精度就必须是在静止情况下。现在在我们所设计的 AHRS 系统中，通过对称布置的加速度传感器，通过加速度相减的方式可以极大的消除向心加速度，使得加速度传感器在低动态情况下也可以提供比较精确的姿态数据。

三轴磁传感器感应地磁信息，与加速度传感器并按照一定的转化公式获取三维姿态角。

应当注意到，这三种获得姿态信息的方式都有其弊端，陀螺仪有积累误差，加速度动态性能差，磁传感器容易受干扰，因此最终 AHRS 系统通过特定的算法(KF/最小二乘法)对三者数据进行融合再创造，可以提高测量精度。

## 附录 A 磁阻传感器姿态测量计算公式

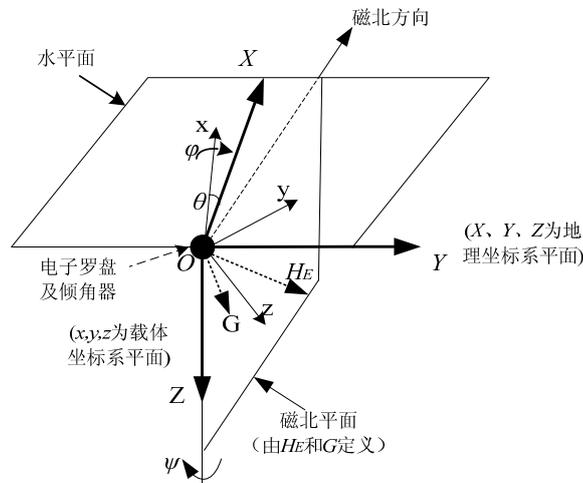


图 7 载体坐标系和参考平面

地球的磁场强度为  $0.5\sim 0.6\text{Gauss}$ ，无论何地，与地球表面平行的地磁场水平分量总指向地磁北极，这是所有磁罗盘的制作基础。如图 8 所示：

X 和 Y 轴在水平面内，Y 轴向右且垂直于 X 轴，Z 轴铅垂向下。X 轴为前进的方向，其与地磁北极的夹角定义为偏航角  $\alpha$ ，与地理北极的夹角定义为真北偏航角  $\psi$ ，根据上述可知， $\psi = \alpha \pm D$ ，其中 D 为磁偏角。

如果能够用磁传感器测出 X 和 Y 方向的磁场强度分量，则偏航角为：

$$\alpha = \arctan(H_Y / H_X) \quad (\text{式 1})$$

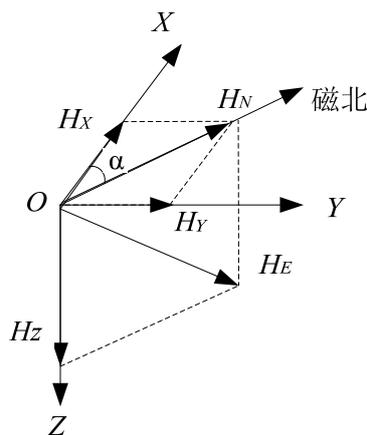


图 8 在 XY 平面内定义的偏航角

考虑到反正切函数的值域  $\alpha \in [0, 180^\circ]$ ，且  $H_X \neq 0$ ，则在  $0\sim 360^\circ$  范围内可用式 2 来计算：

$$\alpha = \begin{cases} 90, & (H_x = 0, H_y < 0) \\ 270, & (H_x = 0, H_y > 0) \\ 180 - [\arctan(H_y / H_x)] \times 180 / \pi, & (H_x < 0) \\ -[\arctan(H_y / H_x)] \times 180 / \pi, & (H_x > 0, H_y < 0) \\ 360 - [\arctan(H_y / H_x)] \times 180 / \pi, & (H_x > 0, H_y > 0) \end{cases} \quad (2)$$

上述即为载体处于水平状态时偏航角的测定原理。

然而，电子罗盘通常是安装在飞行器、船舶、陆地车辆等设施上，处于动态环境中。因此，电子罗盘工作中并非总处于水平状态，这就使其应用大受限制。为了解决上述问题，现在常用的方法有两种：一种方法是用机械万向节使磁传感器始终处于水平面内，以保证用式 2 计算偏航角的精度；另一种方法称为捷联式或电子平衡式电子罗盘，由三轴磁传感器和倾角器组成，根据倾角器测得的俯仰角和横滚角以及磁传感器测得的三个方向的磁场强度，通过坐标变换算出地磁场在水平方向上的分量，也就可用式 2 计算偏航角。

倾角传感器测出的俯仰角和横滚角分别为  $\theta$  和  $\phi$ ，电子罗盘中磁传感器测出  $x, y, z$  轴的地磁场强度分量分别为  $H_x, H_y, H_z$ 。先绕  $y$  轴使坐标系  $xyz$  旋转  $\theta$ ，再绕  $x$  轴使坐标系  $xyz$  旋转  $\phi$ ，这样  $xoy$  平面便与水平面重合。

$$\text{令 } R_{pitch} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad R_{roll} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}$$

则可得：

$$\begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} = R_{roll} R_{pitch} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta & \cos \phi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

于是有：

$$\begin{cases} H_x = H_x \cos \theta - H_z \sin \theta \\ H_y = H_x \sin \phi \sin \theta + H_y \cos \phi + H_z \sin \phi \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

将上述算得的  $H_x, H_y$  代入式 2 中即可算出偏航角  $\alpha$ 。