

地磁场模型仿真与分析

黄婧丽¹ 王文龙² 马世全³ 张翔宇¹

1.海军航空大学青岛校区 山东 青岛 266041

2.海军潜艇学院 山东 青岛 266041

3.崂山实验室 山东 青岛 266041

【摘要】：地磁场是一个矢量场，是地球固有资源，为航海、航空、航天提供了天然坐标系，本文对常用的符号和坐标系进行了说明，得到了坐标系之间的转换矩阵。阐述了磁传感器工作机制以及通过它确定飞行器姿态的基本原理。简要介绍了地磁场的构成，分析了各种地磁场成分的特征，并指出主磁场以及地壳异常场是飞行器姿态估计可利用的主要成分，同时它们也有各自适合的不同应用场合。对于主磁场和异常场，介绍了相关的地磁场模型。最后针对 IGRF 进行了仿真实验，为后续导航的验证提供了实验数据。

【关键词】：地磁导航；坐标系转换；地磁场模型

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.040

1 引言

基于地磁矢量观测确定近地卫星三轴姿态和角速率的方法已经发展起来。这与地磁观测方案本身的许多特点是分不开的。为了满足较为精确的导航与姿态估计需求，需要有高精度地磁场模型提供基准数据。为此本文分析了各个常用参考坐标系，地磁传感器的基本测量原理，并对地磁场模型进行了仿真分析，为后续高精度的地磁导航奠定了坚实基础。

2 坐标系说明及坐标系转换

在讨论飞行器姿态运动之前，下面首先介绍与本文相关的坐标系及它们之间的坐标变换关系。

2.1 坐标系说明

描述飞行器姿态运动的参考坐标系主要有以下几种：

(1) 地心惯性坐标系

地心惯性坐标系相对于惯性空间固定，与地球自转无关。

(2) 地球坐标系

地球坐标系也称为地心固连坐标系，与地球固连，坐标轴的空间指向随地球的转动而转动。它有两种形式，即地球直角坐标系和地球大地坐标系。

(5) 平台坐标系

平台坐标系表示为 O_{x_p, y_p, z_p} （简称 p 系）。在平台式惯导系统中，该坐标系描述的是真实平台（物理平台）所指向的坐标系；在捷联惯导系统中，由于没有真实的物理平台存在，该坐标系描述的是数学平台。

理想平台坐标系与载体坐标系的原点都是以重心为原点，载体坐标系与理想平台坐标系的相对位置定义了俯仰角 θ 、偏航角 ψ 、倾斜角 γ 。

俯仰角 θ ：载体纵轴 y_b 和水平面之间的夹角，水平向上逆时针旋转至 y_b 为正。偏航角 ψ ：载体纵轴 x_b 和水平面之间的夹角，水平向上逆时针旋转至 x_b 为正。

倾斜角 γ ：载体轴 y_b 与通过 x_b 轴的铅垂线之间的夹角。

(6) 载体坐标系

载体坐标系是与载体固联并且定义在携带导航系统的载体内，简称 b 系，用 O_{x_b, y_b, z_b} 表示。对于捷联惯导而言，导航系统三个惯性传感器的测量轴与载体坐标系三个坐标轴是一致的。

2.2 坐标系之间的转换

(1) 地球直角坐标系到地理坐标系

设为地球表面的一点 P 在地球坐标系，也就是地球直角坐标系下的经度为 λ 、纬度为 φ 。地球直角坐标系和地理坐标系之间的变换矩阵为：

$$C_e^a = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \\ \cos \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda & \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (7)$$

(2) 地心惯性系到地理坐标系

地球坐标系相对于地心惯性系统 z 轴以 ω_e 的角速率匀速转动，所以地心惯性系到地理坐标系的变换可以先从地心惯性系变换到地球坐标系，再通过地球坐标系变换到地理坐标系：

(3) 导航坐标系到载体坐标系

由导航坐标系 n 变换到飞行器载体坐标系 b，可以按偏航角 ψ 、俯仰角 θ 和滚动角 γ 的顺序把导航系的坐标轴转三次，

再先绕 y 轴旋转 90° ，再绕 z 轴旋转 90° ：

3 三轴磁强计工作原理

磁强计是以磁场为基准，测量飞行器姿态的敏感器件。而磁强计本身是用来测量空间环境中磁场强度的。由于地球周围每一点的磁场强度都可以由地磁场模型事先确定，因此利用飞行器上磁强计测得的信息与之对比便可以确定出飞行器相对于地磁场的姿态。为磁强计的测量系统，包括传感器、电源、转换器和显示系统。

磁强计由于具有质量小，性能可靠，消耗功率低，工作温度范围宽以及没有活动部件等特点，得到了广泛应用。同时值得注意的是，某点地磁场强度与该点距地心距离的3次方成反比，这使得在中、高轨道（轨道高度大于 1000km ）上地磁场强度很弱，以致飞行器内部的剩余磁矩可能会超过地磁场的影响，这时地磁场便不能作为测量基准，因此磁强计的应用还受到飞行器轨道高度的限制。

4 地磁场及地磁场模型

由于通过地磁场确定飞行器姿态时需要将磁强计的测量值与已知的地磁场模型比对，因此地磁场模型也是飞行器姿态确定的关键因素之一。

4.1 地磁场成分特点分析

近代研究指出，地磁场是由主磁场、外源磁场和异常场三个部分组成。

主磁场由磁偶极子场、大陆磁场以及长期变化三个部分组成。目前认为，主磁场是由核内电流对流形成，因此它是一种内源场。

外源磁场是指源于地球外部并叠加在主磁场上的各种短周期变化的磁场。它只占地磁场很小的一部分，不到 1% ，但组成比较复杂。主要可以分成两类：一类是周期性规律变化，如日变等；另一类是偶然发生时间短暂的复杂变化，主要包括磁暴和磁扰。

磁异常，在消除了各种短周期磁场变化以后，实测地磁场与主磁场之间存在的差异称为磁异常。通常，异常场在空间上变化丰富，时间上却非常稳定。时间尺度是以地质年代来计算，比正常场的长期变化要慢得多。由于地壳异常场的分布范围是有限的，所以一般描述全球大尺度磁场分布的球谐分析不再适用，而延伸出来的球冠谐分析、矩谐分析等则较为有效。磁异常在地球表面的分布具有区域性，随着离地面高度的增加而逐渐衰减，典型的范围大约数十公里，强度占地磁场总强度 4% 以上。

因此可以基本认为，在一段较长时间里（一般为五到十年），异常场和主磁场都只是空间位置的函数，与时间没有关系，是地磁导航中可以利用的主要元素。由于主磁场波长很大，

因此适合高度较高的飞行器。磁异常场是由地壳的表面分布和局部地理特征，比如矿产、人造磁场、岩石等产生的，有长期的稳定性，空间变化明显，适合高度较低的飞行器。

4.2 地磁场模型

根据地磁场不同成分的不同特点，学者们进行了大量的研究，建立了能够描述相应磁场特征的模型，它们主要分为两大类：全球地磁场模型和局域地磁场模型。下文介绍了相应较成熟的几种。

(1) IGRF 模型

IGRF 为比较典型的在全球尺度上描述地磁场的模型。目前，已有大部分文献采用了这种模型作为导航以及姿态估计的观测方程进行研究。

(2) 局域地磁场模型

局部区域的地磁测量密度要高于全球磁测密度，所以局域地磁场模型精度更高。局部区域地磁场模型可以由实测数据通过数值拟合或者符合位场理论的方法建立，但是拟合结果只能向内计算插值，外推预测值不准确。同时，磁测量结果呈带状分布，插值计算之前必须先将数据进行网格化处理，引入了二次误差，影响精度。因此，使用符合位场理论的模型描述局部区域地磁场将是一种更合理的方法。常用的描述局部区域的模型有以下两种：

① 矩谐模型

1981年，Allredge 指出在直角坐标系中求解拉普拉斯方程的方法，即矩谐分析（RHA, Rectangular Harmonic Analysis）。由此得到的矩谐级数包含水平方向的三角函数、垂直方向的指数函数。它是通过构建区域平面来近似球面，在矩形区域中进行谐分析，不同阶的系数刻画不同波长磁场，精度较高。但是，RHA 的固有缺陷是它是针对较小区域。同时应该指出，由于矩谐模型描述的是小尺度区域下的地壳异常场，地壳异常场空间上变化比较丰富，时间上基本不变。因此，矩谐模型有着较高的精度。但是随着高度的增加，异常场会消失在背景场中，因此它只适合中低空飞行器，对于卫星等航天器已不能使用。

② 球冠谐模型

1985年 Haines 提出了球冠谐分析法（简称为 SCHA）。它是在一个以地面球冠（也可是任意高度的球冠）为底，向上无限延伸的球面锥体中求解拉普拉斯方程。当区域大到不能用平面来近似代替时，球冠谐分析是一种有效的手段。但是，球冠谐分析相对复杂，待定系数的个数十分庞大，在矩谐模型能够满足精度的条件下该模型不是最好的选择。

综上所述，在选择地磁场模型时应充分考虑应用场合，由实际飞行器决定。对于工作高度较高的飞行器，如高空无人机、临近空间飞行器以及低轨卫星等可以采用全球地磁场模型作

为基准,而高度较低的普通飞行器则可采用局域地磁场模型,精度、可靠性也更高。

5 IGRF 仿真分析

目前相当一部分地磁导航方法将 IGRF 模型作为导航的参考基准。因此,如何通过 IGRF 得到任意坐标点的地磁场三分量值将是一项必须掌握的关键技术。因为 IGRF 的球谐系数是在半径为 R_0 的参考球中推导出来的,所以为提高地磁场计算精度,需要考虑地球的扁率。地球表面是一个椭球面而非标准圆球面,因此需要对测点进行地理坐标变换和地磁分量变换。在可以根据 IGRF 模型获得地磁场值之后,即可将 TAM 测量值

与之比对得到飞行器当前姿态。

6 结论

本文对常用的符号和坐标系进行了说明,得到了坐标系之间的转换矩阵。阐述了 TAM 工作机制以及通过它确定飞行器姿态的基本原理。简要介绍了地磁场的构成,分析了各种地磁场成分的特征,并指出主磁场以及地壳异常场是飞行器姿态估计可利用的主要成分,同时它们也有各自适合的不同应用场合。对于主磁场和异常场,介绍了相关的地磁场模型。最后针对 IGRF 进行了仿真实验,为后续导航的验证提供了实验数据。

参考文献:

- [1] 贺梅艳,强建科,孙嘉明,黄永刚,张雅坤,陆凯旋,邓超凡,张宇豪,李小强.中国境内地磁场长期变化趋势及影响[J].地震地磁观测与研究,2025,v.46;No.279(02):164-172.
- [2] 胡贵,刘喆,刁斌斌,于瑞丰,吴华鹏,张富磊.考虑地下磁矿脉影响的井眼方位角校正方法[J].石油化工高等学校学报,2025,v.38;No.172(02):54-61.
- [3] 牛超,魏一苇,李鸿儒,李夕海,曾小牛,刘继昊,杜爱民.一种新的地球变化磁场组合预测模型(英文)[J].Applied Geophysics,2025,22(03):600-610+891-892.
- [4] 谷宇,任政勇,陈超健,杨聪,尹亮,徐立楠,汤井田,李建华.地球磁场探测卫星探测全球大尺度洋流速度的可行性[J].地球物理学报,2025,68(09):3490-3502.
- [5] 刘乐超,王文博,王雅鹏,谭开文,刘畅.基于 IGRF-NGDC 移去恢复法的虚拟地磁台站建模[J].科技与创新,2025,No.281(17):26-29.
- [6] 沈成,王正涛,甘亦乐,张仕泽.地磁偶极子和多极子发电机对流模式差异分析[J].地球物理学报,2025,68(09):3477-3489.
- [7] 李云红,李昀媿,李仕博,安瑜鑫,胡颖捷,张朝朝,刘旺红.改进泰勒多项式建模的区域地磁基准图构建[J].深圳大学学报(理工版),2025,v.42;No.194(05):615-623.
- [8] 郭娇娇,杨宾锋,纪晓琳,曹海霞,郭宁宁.基于地磁特征提取的搜索导航研究[J].空军工程大学学报,2025,v.26;No.153(04):75-81+88.