

核磁共振陀螺仪（Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope）

曹铭耘^{1*}

摘要

时至今日，惯性导航技术受到了越来越多的重视。陀螺仪作为惯性导航系统的核心元件，相关的开发工作始终没有停止。核磁共振陀螺仪作为一种新型的陀螺仪，具有其它种类陀螺仪无法比拟的优势。其较小的体积使得将惯性导航装备于小型装置成为可能。长久以来，核磁共振陀螺仪受制于稳恒弱静磁场的技术瓶颈，实用价值较低。直到科学家提出使用两种元素来消除对静磁场的依赖，才使得核磁共振陀螺仪的实用化成为可能。

关键词

惯性导航 陀螺仪 核磁共振 两种元素

¹ 上海交通大学致远学院

² 上海交通大学自然科学研究院

* 邮箱地址: caomingyun@sjtu.edu.cn

1. 惯性导航基本原理 [1]

1.1 何为导航 [2]

定义：确定一个物体相对于某一参考坐标系或坐标网格位置和速度的过程。

1.2 何为惯性导航

定义：惯性导航属于自主式导航系统，即仅依靠装置自身搭载的仪器进行导航，而不借助任何外部传递的信息。它是一种通过测量飞行器的加速度，并实时地对数据进行积分处理，得到飞行器的速度以及位置的技术。惯性导航系统一般由以下几部分组成：

1.3 惯性导航系统的组成

1. 加速度计。用于测量航行体的运动加速度。通常应有 2 3 个，并安装在三个坐标轴方向上。
2. 陀螺稳定平台。为加速度计提供一个准确的坐标基准，以保持加速度计始终沿三个轴向测量加速度，同时也使惯性测量元件与航行体的运动相隔离。
3. 导航计算机。用来完成诸如积分等导航计算工作，并提供陀螺施矩的指令信号。
4. 控制显示器。用于输出显示导航参数，还可进行必要的控制操作，如输入初始数据等。
5. 电源及必要附件。

1.4 惯性导航系统的基本工作原理

在使用惯性导航的过程中，主要是利用一种称作加速度计的仪表测量载体的加速度，利用陀螺稳定平台模仿当地水平面、建立一个空间直角坐标系，三个坐标轴分别指向东向 e 、北向 n 及天顶方向 u ，通常称为东北天坐标系。在载体运动过程中，利用陀螺仪跟踪当地水平面，三个轴向始终指向东北天方向。在这三个轴上分别安装三个加速度计，将这三个方向的加速度进行积分，便可以得到这三个方向的速度。

$$\begin{aligned}v_e(t_k) &= v_e(t_0) + \int_{t_0}^{t_k} a_e dt \\v_n(t_k) &= v_n(t_0) + \int_{t_0}^{t_k} a_n dt \\v_u(t_k) &= v_u(t_0) + \int_{t_0}^{t_k} a_u dt\end{aligned}\quad (1)$$

通常，载体在地球上的位置用经度、纬度和高程来表示，通过对速度积分就可得到。

$$\begin{aligned}\lambda &= \lambda_0 + \int_{t_0}^{t_k} \dot{\lambda} dt \\L &= \phi_0 + \int_{t_0}^{t_k} \dot{L} dt \\h &= h_0 + \int_{t_0}^{t_k} \dot{h} dt\end{aligned}\quad (2)$$

其中， λ_0, L_0, h_0 为载体的初始位置； $\dot{\lambda}, \dot{L}, \dot{h}$ 分别表示经度、纬度和高程的时间变化率，可由运动

速度计算得到，即

$$\begin{aligned}\dot{\lambda} &= \frac{v_e}{(N+h)\cos L} \\ \dot{L} &= \frac{v_n}{M+h} \\ \dot{h} &= v_u\end{aligned}\quad (3)$$

其中，M，N 分别代表地球椭球的子午圈，卯酉圈曲率半径。若将地球近似为一个半径为 R 的球体，那么 M=N=R。

1.5 惯性导航主要仪器介绍 [3]

1.5.1 陀螺仪

利用陀螺仪的进动性以及定轴性，可以起到导航的作用。陀螺仪的自由度定义为自转轴可绕其自由旋转的正交轴的个数。通常使用的陀螺仪自由度为 1 或 2。

衡量陀螺仪精度高低的参量是陀螺仪漂移率，即陀螺仪干扰力矩的作用下，产生的漂移进动角速度。陀螺仪可按照精度如下表分类：

表 1. 陀螺仪的分类

按精度分类	
分类	精度要求
超高精度陀螺仪	$10^{-6} - 5 \times 10^{-4} (^{\circ}/h)$
中高精度陀螺仪	$5 \times 10^{-4} - 10^{-1} (^{\circ}/h)$
低精度陀螺仪	$> 10^{-1} (^{\circ}/h)$

1.5.2 加速度计

加速度计的种类有很多，主要使用的加速度计是液浮摆式加速度计和挠性加速度计。由于这不是本文所关注的重点，因此不再详细介绍。

2. 核磁共振陀螺仪 [4]

2.1 基本原理

自旋的原子核会产生磁矩 $\vec{\mu}$ ，磁矩的取向与自旋轴方向一样，是任意的（从量子力学的角度分析，是量子化的）。而外加一个稳恒磁场之后，每一个自旋原子核就会绕着与磁场方向相同的转轴进行进动。一般称该进动为 RLarmor 进动。

拉莫尔进动的角速度 $\omega_L = -\gamma B_0$ 。其中， γ 为旋磁比，只与原子核自己的性质有关。根据核磁共振的基本原理，如果给体系施加一个与 B_0 方向正交的交变磁场，当其频率恰好为 ω_L 时，会发生核磁

共振现象。当装置转动的角速度为 ω 时，核磁共振陀螺仪的光电检测器检测到的转动角速度为 ω_j ，那么 $\omega = \omega_j - \omega_L = \omega_j + \gamma B_0$ 。

由于实验室中使用的磁场（1-10T）中，larmor 进动的频率在 10-100MHz 的量级上，而地球的旋转频率大概是 $7.27 \times 10^{-5} \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这个数值要比实验室中普通的 Larmor 频率小 12-13 个数量级。因此，我们要求获得很小的静磁场才能达到实验室的要求。为了解决这个不匹配的问题，一般采用如下几种解决方式：（1）利用低温超导体提供均匀稳定的低磁场（当前技术较难实现）（2）选用两种不同的核子作为工作物质抵消漂移的影响。我主要介绍第二种。

2.2 双原子核的 larmor 进动 [5]

如果两种核子的旋磁比分别为： γ_1, γ_2 ，那么在相同的磁场下，我们可以得到两个公式：

$$\begin{aligned}\omega_{obs1} &= \gamma_1 H_0 - \omega_r \\ \omega_{obs2} &= \gamma_2 H_0 - \omega_r\end{aligned}\quad (4)$$

联立两个方程，得到：

$$\omega_r = \frac{\omega_{obs2} \times \frac{\gamma_1}{\gamma_2} - \gamma_{obs1}}{1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_2}}\quad (5)$$

这样，不需要知道 H_0 即可知道 ω_r 。（注： ω_r 为装置旋转的角频率）

2.3 信号探测的基本原理

利用核磁共振产生的自由感应衰减信号（Free Induction Decay），可以测量两种原子各自的进动角速度（ ω_1, ω_2 ）。原子磁矩在静磁场中进行拉莫尔进动时，如果我们给它们一个合适频率、合适长度的脉冲信号，就会发生核磁共振现象。脉冲信号经过后，由于原子之间的相互碰撞与热运动，系统的总磁矩会随着时间的演化而逐渐回复到原来的值。我们可以利用一个次级线圈来探测磁场的变化。通过电磁感应，把磁信号转化为电信号。在这么一个驰豫时间之内，我们就可以探测到一个振荡衰减的信号，如下图所示：

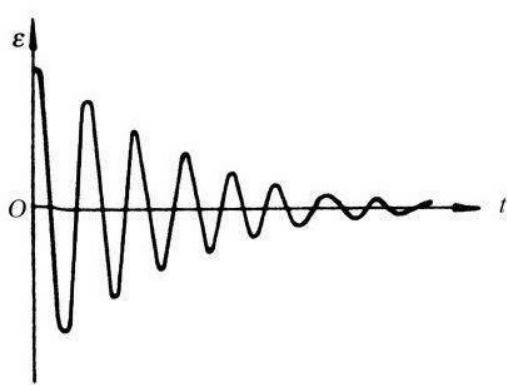


图 1. Free Induction Decay

通过 FFT (Fast Fourier Transform) 技术, 我们就可以得到原子进动的角频率, 进而计算出装置转动的角速度。

参考文献

- [1] 李旷振 杨宝利苏中, 李擎. 惯性技术.
- [2] 王新龙. 惯性导航基础.
- [3] 吉春生姜璐, 于远治. 陀螺仪在导航中的应用及其比较.
- [4] E. A. Donley. *Nuclear Magnetic Resonance Gyroscopes*.
- [5] 于远治姜璐. 常见几种陀螺仪的比较及应用分析.