

§ 3.9 陀螺式

工作原理 在航天、航空、航海等方面，为测量运动体的姿态角，往往采用三自由度陀螺仪。这主要是应用了它能保持在空间自身转轴而方位不变的特性。陀螺式角度传感器也称

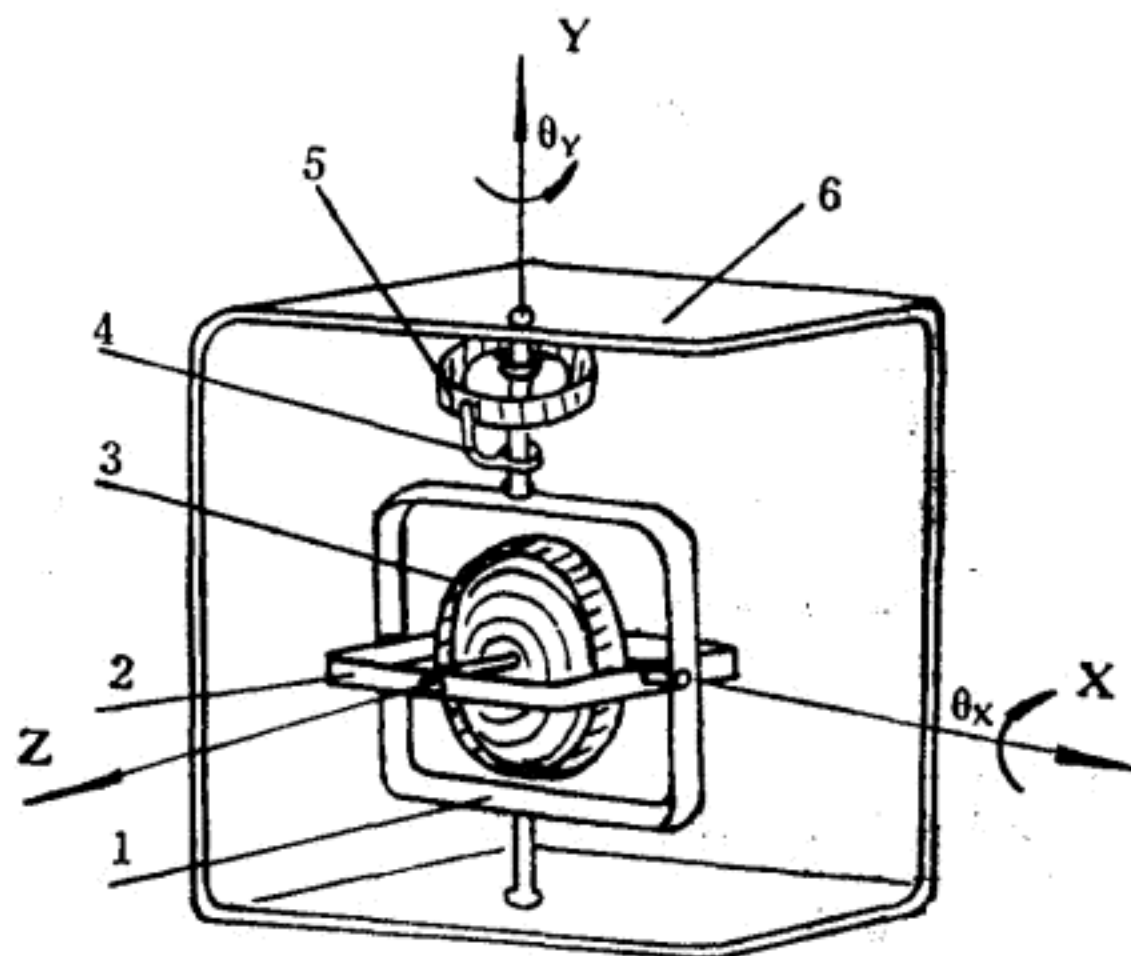


图 3.9.1 陀螺式角度传感器

1. 外环 2. 内环 3. 转子 4. 电刷 5. 电位器 6. 壳体

为陀螺仪。它的原理结构如图 3.9.1 所示。电刷固定在外环轴上。电位器固定在壳体上。壳体与被测物连接。当壳体随运动物体转动一个角度时，电刷在电位器上就有一个角位移，电位器相应位置上就有一个电压信号输出，即电位器输出的电压信号与被测量物体的转角成正比。

根据上述的原理，可以在内环轴上装上电刷（电位器同样装在壳体上），则可以测量出另一个方位角。如对一个飞行体来讲，用一只陀螺传感器可以同时测出俯仰、倾斜角。这就要求采用摩擦力极小的特殊轴承，使用无力矩的导流

引线将电流引到电气元件和陀螺马达上，还必须有很高的平衡质量，使用无力矩的远距离传输装置。

实际使用中往往只在外环上装电刷，只测量一个角度。这样只要保证内环轴上没有附加

力矩, 那么外环轴上就有足够的测量精度。

陀螺仪的技术方程式为

$$\begin{cases} J_x \ddot{\theta}_x + H \dot{\theta}_y = M_x \\ J_y \ddot{\theta}_y - H \dot{\theta}_x = M_y \end{cases} \quad (3.9-1)$$

式中 J_x —内环组件绕内环轴的转动惯量;
 J_y —外环组件绕外环轴的转动惯量;
 $\dot{\theta}_x, \ddot{\theta}_x$ —绕内环轴的角速度、角加速度;
 $\dot{\theta}_y, \ddot{\theta}_y$ —绕外环轴的角速度、角加速度;
 M_x —绕内环轴作用于陀螺仪外力矩;
 M_y —绕外环轴作用于陀螺仪外力矩。

当不考虑陀螺仪转动惯量 J_x, J_y 对运动的影响时, 则可以得到

$$\begin{cases} H \dot{\theta}_y = M_x \\ -H \dot{\theta}_x = M_y \end{cases} \quad (3.9-2)$$

或者采用 ω_x, ω_y 代替 $\dot{\theta}_x, \dot{\theta}_y$ 则上式变为

$$\begin{cases} H \omega_y = M_x \\ -H \omega_x = M_y \end{cases} \quad (3.9-3)$$

式 (3.9-2) 或式 (3.9-3) 就是陀螺仪的运动方程式。其中第二式负号所表示的意思是: 当外力矩绕外环轴正向作用 M_y 时, 陀螺仪将产生绕内环轴的负方向进动 (ω_x)。

对式 (3.9-1) 进行拉氏变换, 则有

$$\begin{cases} J_x S^2 \theta_x(S) + H S \theta_y(S) = M_x(S) \\ J_y S^2 \theta_y(S) - H S \theta_x(S) = M_y(S) \end{cases} \quad (3.9-4)$$

式中 S —拉普拉斯运算子。

根据上式画出的三自由度陀螺仪的方框图如图 3.9.2 所示。

由图可以看出, 绕外环轴作用的外力矩 M_y , 一方面引起陀螺仪绕外环轴转动, 使之出现转角 θ_y , 另一方面还引起陀螺仪绕内环轴转动, 使之出现转角 θ_x 。而绕内环轴作用的外力矩 M_x , 一方面引起陀螺仪绕内环轴转动, 使之出现转角 θ_x , 另一方面还引起陀螺仪绕外环轴转动, 使之出现转角 θ_y 。即由于陀螺角动量 H 的存在, 使陀螺仪绕内、外环轴的转动有了耦合的作用。进一步分析可以知道,

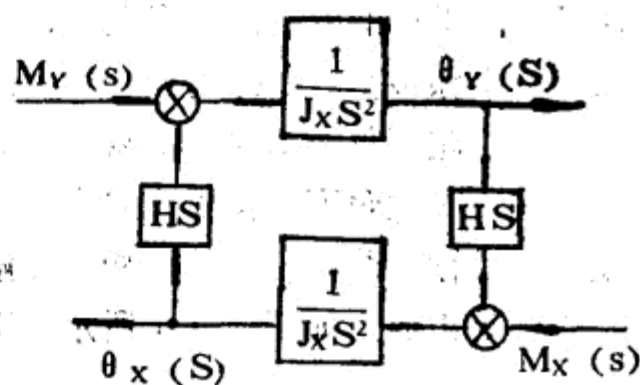


图 3.9.2 三自由度陀螺仪方框图

这种耦合作用的实质是使绕外环轴作用的外力矩产生绕内环轴的进动, 绕内环轴作用的外力矩产生绕外环轴的进动(进动特性)。

为了减小由进动引起的漂移误差, 在设计和工艺上应采取相应措施。下面我们将讨论漂移误差产生的原因和应采取的措施。

1. 由摩擦力矩引起的漂移误差

当内、外环轴采用滚珠轴承或宝石轴承支承、输电装置采用滑环装置、输出装置采用电位器结构时, 在工作时都会产生摩擦力矩。该力矩的方向与陀螺仪的转动方向相反, 大小与接触正压力、接触点半径及摩擦系数有关。它是一个随机干扰力矩, 所引起的漂移也是随机

漂移。

摩擦力矩引起的漂移在总漂移里占有很大比例，因此只有减小这项漂移才能提高陀螺仪的精度。在选择轴承时要精度高、摩擦系数小；对输电装置和信号输出装置的电刷回转半径要求小，压力要适中，光洁度要高。

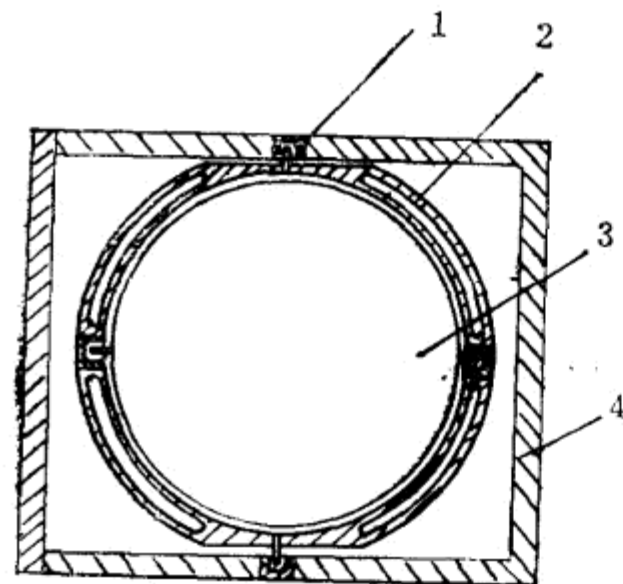


图 3.9.3 液浮陀螺结构原理图
1. 宝石轴承 2. 外环 3. 内环 4. 壳体

为了减小摩擦力矩，可以采用液浮、气浮支承方法。下面简单介绍一下液浮陀螺的情况。图3.9.3是液浮陀螺结构原理图。它的内环做成空心球形密封浮子，外环为圆环形结构。球形浮子内装有陀螺电机。环架用宝石轴承支承。仪表壳体内充满液体，将整个活动系统悬浮起来，并且使其重心与浮心重合。这就要求浮球的重量尽量轻，液体的浮力尽量大。实际上达到全液浮是很困难的，往往是半液浮的状态。

对浮液的要求是比重大、粘度低、粘度温度系数小，化学稳定性高、温度膨胀系数小、导热性好、导电率低、无霉性。目前常用的是硅油。

2. 由不平衡力矩引起的漂移误差

工艺上要求对内(外)环组合件进行静平衡，即内环组合件的质心位于内环轴上，外环组合件的质心位于外环轴上。实际质心总是或多或少偏离环轴。这就是静不平衡。当在重力场或基座有加速度作用时，就会产生不平衡力矩。这个力矩就是与加速度成比例的、有规律的漂移。

为了减小由温度变化引起零件尺寸变化而使质心偏离，往往在常温静平衡后，还要进行高、低温的静平衡检查。也可以在环架上采用双金属片的方法进行温度补偿。

设计上应保证陀螺仪有足够的刚度，以避免由于大加速度引起结构变形、质心偏离、对框架产生力矩、引起漂移误差。

对长时间工作的陀螺漂移误差(又称漂移率)是一个很严重的误差。这要求从设计、工艺等方面来减小漂移率，以提高仪表精度。

各类航空陀螺仪对漂移率的要求见表 3.9.1。

结构 陀螺角度传感器主要由陀螺马达、万向支架、信号输出装置、制锁机构、接触组、输电装置及壳体等组成。如图 3.9.1 所示。下面介绍各组件特征。

1. 陀螺马达

它由定子和转子组成，是一部三相异步电机。转子高速旋转(一般大于 25000 转/分)，产生的陀螺力矩使陀螺仪具有定轴性。

2. 万向支架

它由内环组件和外环组件组成。它与陀螺马达构成陀螺仪的主体，形成空间三个旋转自由度。

3. 信号输出装置

在图 3.9.1 中指的是电位器、电刷。它们的作用是输出直流信号。

4. 制锁机构

表 3.9.1 航空陀螺仪对漂移率的要求

仪表类型	对漂移率要求 度/小时
速率陀螺	150~ 10
陀螺地平仪	30~ 10
航向陀螺仪	12~1
惯导陀螺仪	0.01~0.001

陀螺角度传感器都采用电气制锁机构。不工作时将万向支架锁紧，工作时开锁，使传感器处于自由状态。

5. 接触组

接触组主要提供传感器“开锁”、“制锁”的电压信号。

6. 输电装置

它由导电环和电刷组成。为了给陀螺马达供电，必须将电流从壳体引入外环，再由外环引入内环，最后引入定子绕组。电位器的信号输出也要经过这条路线(外环→内环→壳体)，因此要求输电装置一是不应限制环轴的位移，二是不产生作用到在各环轴的附加力矩。

主要性能 下面我们介绍一种目前常用的陀螺角度传感器已达到的一些主要指标。

1. 测量范围： $\pm 30 \sim \pm 70^\circ$ ；
2. 漂移率：2度/分；
3. 陀螺马达动量矩： $2400 \sim 2500 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}$ ；
4. 输出特性的线性误差： $\pm 2\%$ ；
5. 输出特性的重复性误差： $\pm 1.5\%$ ；
6. 工作温度范围： $-40 \sim +55^\circ\text{C}$ ；
7. 马达启动时间：不大于60秒。启动电流不大于1.5 A；
8. 使用电源(供马达使用)： $40 \pm 2 \text{ V}$ ，频率 $500 \pm 5 \text{ Hz}$ ；
直流电源： $\pm 27 \pm 2 \text{ V}$ (供给电磁铁)；
直流电源： $6 \pm 0.2 \text{ V}$ (供给电位器)。

上面介绍的陀螺角度传感器，一般又称为机械(电气)陀螺。由于它存在摩擦和静不平衡，因此精度不是很高。如果采用液浮或气浮可以大大提高精度。目前在惯导方面使用的静电、压电陀螺虽有许多优越性，但有不少技术问题尚未完全解决。