

新型高精度的陀螺力传感器

王德荣 秦积遐

(中国科学院力学研究所)

一、引言

陀螺仪在航空、航海上作为导航系统的稳定装置已人所共知，而十多年前由西德发明家Herr, J. Wöhrle利用陀螺仪的进动原理，将陀螺仪成功地应用在工业上的称重，在西德、美国、日本已商品化，制成超精密台秤，并用于大型油罐内液体重量的测量及自动化过程物料的称量等。陀螺力传感器是优于目前工业上所用的应变式力传感器，由于它的原理新颖，具有

独特优点，精度高可达 $1/100000 \sim 1/1000000$ ，理想的线性，无滞后，不受振动温度的影响，在恶劣环境下能长期稳定工作，因此近年来在我国已开始被人们所重视。

本文主要介绍陀螺力传感器的原理、构造、特点及应用前景。

二、工作原理及构造

见图1(a)表示为一个三自由度陀螺仪，由外环、内环及转子组成，外环悬挂

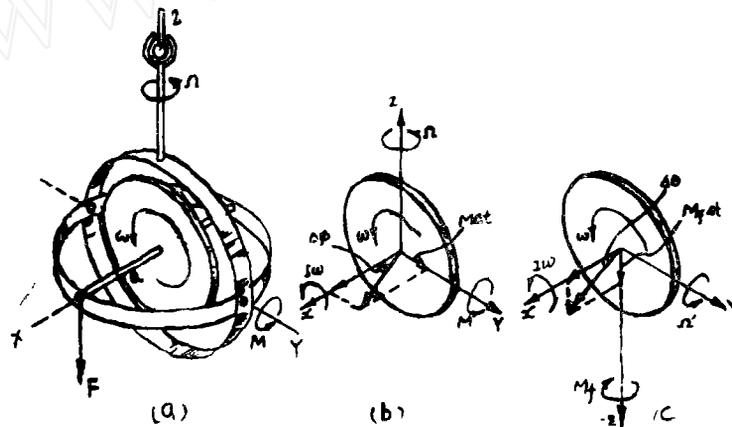


图1

着上下两个特殊轴承，它可绕正轴旋转，内环在外环内可绕Y轴旋转，转子是固定在内环轴上可绕X轴旋转。该装置的一个重要特性是三个轴均可自由转动，而互相

垂直，且对旋转体中心平衡。

陀螺仪转子是以一定角速度 ω 旋转，当在陀螺仪内环上作用一个力 F （其作用方向与转子旋转轴垂直，与外环中心距离

本文于1987年3月收到

为 a)，产生绕 Y 轴作用的力矩 $M = Fa$ ，此时内环并不转动，而是陀螺仪将以角速度 Ω 绕 Z 轴旋转，这就是陀螺仪的进动，此装置就是利用了陀螺仪的这种进动原理。

按照牛顿运动定律，在一个质点上作用一个力矩后，它的直线动量等于质量乘速度，

直线动量变化 = 力 × 时间

若一个力矩作用旋转体上，角动量等于惯性矩乘角速度

角动量的变化 = 力矩 × 时间，即 $M\Delta t$

设 ω ：转子的角速度
 I ：转子的惯性矩 } 角动量 = $I\omega$

M ：作用于内环绕 Y 轴的转动力矩

见图 1 (b) 转子角动量 $I\omega$ 为沿 X 轴向量， $M\Delta t$ 为沿 Y 轴的向量，按右手螺旋定则给出向量的方向， $M\Delta t$ 必须等于转子角动量变化。转子的新角动量可用平行四边

形向量相加方法求得，即 $I\omega$ 和 $M\Delta t$ 的合成向量是以平行四边形的对角线表示，也就是说，在 Δt 时间内，转子的旋转轴转动了一个角度 $\Delta\varphi$ ，即绕 Z 轴产生转动，其进动角速度为：

$$\Omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

$$\Delta\varphi \approx \text{tg}\Delta\varphi = \frac{M\Delta t}{I\omega} \text{ 或 } \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{M}{I\omega}$$

$$\text{当 } \Delta t \text{ 足够小时, } \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}$$

得出陀螺仪绕 Z 轴进动的角速度

$$\Omega = \frac{M}{I\omega} = \frac{Fa}{I\omega}$$

$$\text{或 } M = \Omega \times I\omega$$

Ω ：初始进动角速度

ω ：转子角速度 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ ，当转子转

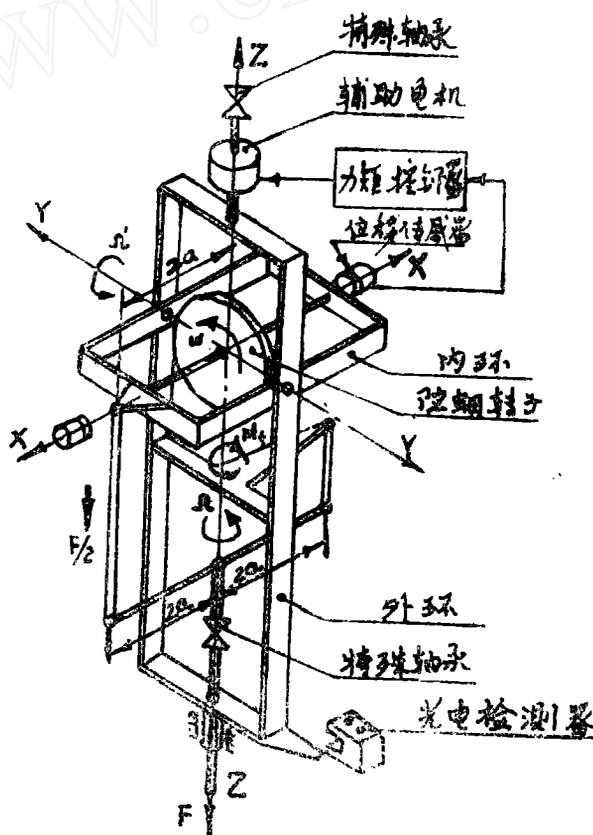


图 2 陀螺力传感器结构示意图

速 n 恒定时, 则 $I\omega$ 为常数。因此从上式可看出 Ω 是直接与作用力矩成比例, 这就是陀螺力传感器的基本物理关系。用光电方法精确测量 Ω , 就可得知 F 值, 也可用数字直接显示重量值 (公斤或吨)。

陀螺转子是一个 40W 的同步电动机, 用石英晶体控制的电源来驱动, 旋转速度 n 为 1940 转/分。未知载荷 F 是通过特殊轴承和交叉弹簧连接到杠杆 (长 $4a$) 的中心, 杠杆的一端与外环连接, 另一端用杠杆悬挂在内环靠近转子的一端轴承上 (见图 2), 将力传递到内环上。

由于作用在内环上的载荷 $F/2$, 产生了绕 Y 轴的作用力矩 M , 则陀螺仪将绕外环 Z 轴旋转产生进动作用。

当绕 Z 轴旋转的上下两个特殊轴承上有摩擦力存在时 (见图 1(c)), 该摩擦力矩 M_f ($M_f \Delta t$ 向量是沿 Z 轴的负方向), 引起陀螺仪附加的进动, 即转子的旋转轴转动了一个角度 $\Delta\theta$, 绕 Y 轴产生转动, Ω' 为第二进动角速度, 结果使转子的旋转轴向下倾斜。为了消除摩擦力的影响, 用位移传感器来检测下倾程度, 并给出讯号至力矩控制器, 调节辅助电动机进行反馈控制, 准确地抵消特殊轴承的摩擦影响, 使转子的旋转轴仍保持原来水平位置。

三、特点

1. 在作用力方向没有位移, 而是在与其垂直的方向产生旋转, 即陀螺仪的进动垂直于作用力。进动的角速度与作用力成比例, 是线性关系, 力增加时则角速度增大, 当去掉载荷旋转马上停止。

2. 高精度

灵敏度: 陀螺力传感器精度 $1/100000$, 灵敏度为 $1/1000000$;

直线性: 在原理上具有绝对的线性;

稳定性好, 因为没有滞后

响应时间: $3 \sim 10$ 秒。

3. 高可靠性

从结构上保证了在作用力方向没有位移, 杠杆的支点摩擦耗小。由于仪器全部数字电路, 消除了电的干扰。

4. 不受外界振动的影响: 共振频率是 $15 \sim 20$ Hz, 对一般机械振动 $4 \sim 6$ Hz, 几乎不受影响。

5. 温度特性好: 对周围温度的变化影响非常小。能在恶劣环境下长期稳定工作。

6. 检测讯号为数字式, 可直接打印或接计算机, 还能远距离传送检测讯号。

四、应用前景

1. 可制成超精密台秤: 西德 Wohwa 公司制成了秤量 1000 kg 分辨率为 10 g, 1 米 $\times 1$ 米的平台形超精密台秤。日本大和株式会社 GR1—100 型高精度称重装置, 其秤量为 30 kg 以上, 精度为 $1/15000$, 分辨率为 $1/100000$ 。

2. 可检测大型油罐内液体的重量: 西德 Wohwa 公司的产品, 能检测直径 22 米高 11 米油罐最大容量为 4000 吨, 分辨率为 0.1 吨。

测量方法是基于阿基米德原理, 测量浸在油罐液体中物体所受的浮力, 这里使用的被浸物体是一个表面被抛光有着高精度直径的金属管, 比重比液体大, 被吊装在油罐的底部 (见图 3)。液体重量

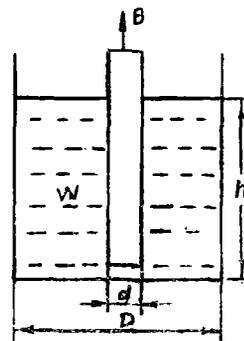


图 3

$$W = \text{体积} \times \text{密度} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot h \cdot \rho \quad (1)$$

在金属管向上浮力 $B =$ 排出液体的重量

$$B = \frac{\pi d^2}{4} h \cdot \rho \quad (2)$$

(2)被(1)除得

$$\begin{aligned} \frac{B}{W} &= \frac{1/4\pi d^2 \cdot h \cdot \rho}{1/4\pi(D^2 - d^2) \cdot h \cdot \rho} \\ &= \frac{d^2}{(D^2 - d^2)} \end{aligned}$$

$$\text{如此 } B = \frac{d^2}{(D^2 - d^2)} \times W = KW \quad (3)$$

(K为常数)

h : 液面高度; ρ : 液体密度; W : 液体重量; B : 浮力; d : 金属管直径; D : 油罐直径, d 、 D 两者必须精确地已知; 从(3)式可看出浮力 B 与油罐内液体重量 W 成比例, 与液体密度 ρ 无关。金属管的材料如果同罐体材料相同的话, 浮力 B 与温度无关, 以上是这种测量方法的最大优点。

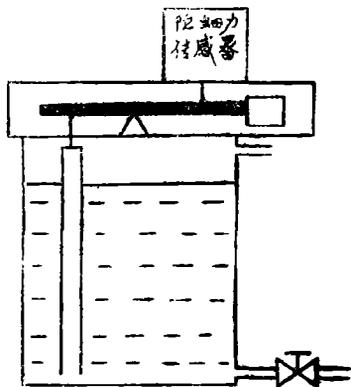


图 4

图 4 表示用杠杆把金属管与陀螺力传感器连接在一起, 使金属管保持在油罐的底部, 以保证垂直方向的稳定性。被测量力是加在金属管上的向上浮力, 直接显示油罐内液体的重量或远距离传送。

在瑞士已使用, 将陀螺力传感器直接安装在油罐的顶部, 具有防爆的密封罩内, 系统的精度是优于 0.02%, 而一般的系统所使用的体积计或液面检测器给出精度只在 0.5~1% 之内。直接显示重量值, 并可将多个油罐内液体重量值远距离传输到中心计算机, 只需一人管理, 减少了劳动力, 每年可节约多于 20000 英镑。

3. 高精度自动配料、混合的称量和控制,

对 1000kg 测量精度为 20g, 在工业上是需要的, 过去的测量技术如机械台秤测量精度为 100g 是不能满足要求, 而陀螺力传感器是可以达到上述要求。

4. 对液体流量计进行标定。

由于陀螺力传感器具有独特优点, 对工业上称重及各项领域中力的测量, 在原理、技术上有很大突破, 能推动称重, 力测量向高精度、长期稳定可靠和动态方向发展。

参 考 文 献

1. R.A.Lolley, Measurement and Control 12, 9(1979) 382—386
2. 内野久则, 计测技术 2(1984) 51—57
3. John L.G.Beaumont, Weightech' 2 (1981) 47—62