

单自由度陀螺浮子结构热应力和热变形的初步探讨

陆 贤 睦

(上海交通大学)

摘要: 本文对三种常见的液浮陀螺单自由度陀螺浮子的结构型式, 通过热应力和热变形的分析和计算, 认为整体结构型式的浮子, 对陀螺马达重心位置的热稳定性最好。

一、概 述

陀螺浮子组件是液浮陀螺的关键部件, 对浮子组件的基本要求除了几何形状的对称性、质量分布的均匀性、各向等弹性变形之外, 还应包括对温度变形的稳定性。陀螺马达重心位置的不稳定性将引起浮子组件质量分布的不稳定性, 它是影响陀螺漂移精度的因素之一。本文从陀螺浮子的热应力和热变形角度出发, 探讨陀螺浮子组件结构设计的合理性。

为了便于分析计算, 先对现有陀螺浮子组件的结构型式作简要介绍, 并假定在结构材料相同的条件下, 对浮子组件在温度场中的热应力和热变形进行计算和分析比较。

常见的浮子结构方案有下列三种, 见图 1。

1. 方案一: (图 1-a) 陀螺马达 (1) 安装在浮子框架的杆子 (2) 上, 外面再套上圆筒 (3) 加以密封。因马达是个发热元件, 其热量将通过马达定子轴传给杆子, 再由杆子传递到浮子两端盖, 经过氟油放热。浮子圆筒套在框架外面, 用环氧树脂与杆子密封连接, 内外的温度分布不均匀将使杆子和圆筒产生热应力和热变形, 这将影响马达重心位置的稳定性, 从而引起陀螺随机漂移和各次启动的重复性。

2. 方案二: (图 1-b) 陀螺马达安装在叉形框架上, 工作时, 马达的热量将使框架自由伸长, 杆子上又不受应力。其传热方式仍与方案一相似, 马达的热量全部由杆子传递到圆筒的一端。

3. 方案三: (图 1-c) 陀螺马达直接安装在圆筒上的整体结构方案。由于浮子圆筒中部有一条较厚的

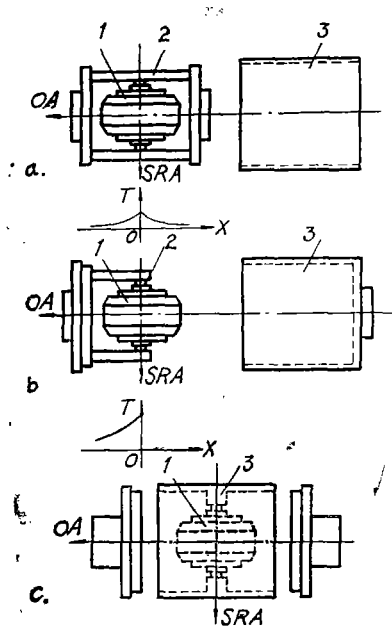


图 1

环，使马达热量直接传到圆筒上。

二、浮子结构热应力和热变形的分析与计算

为了研究陀螺马达的热稳定性，必须对上述三种结构型式的受热情况、温度分布及热应力与热变形的大小进行分析计算。

1. 陀螺马达的发热量

陀螺马达是一个发热元件，其功率为

$$P = \sqrt{3} u I \cos \varphi$$

式中 u ——马达电源电压 ($u = 40$ 伏)；

I ——马达工作电流 ($I = 0.15$ 安培)；

$\cos \varphi$ ——磁滞马达的功率因数 ($\cos \varphi = 0.5$)；于是

$$P = \sqrt{3} \times 40 \times 0.15 \times 0.5 = 5.2 \text{ 瓦}$$

其中用于克服风阻的约占 $1/4$ ，实际上只有

$(1 - 1/4)P = \frac{3}{4} \times 5.2 \text{ (瓦)} = 3.9 \text{ 瓦}$ 的功率产生通过马达定子轴传递的热量。根据焦耳—楞次定律：

$$Q = KP$$

式中 Q ——马达工作时，单位时间内产生的热量 (卡/秒)；

K ——热功当量， $K = 0.24$ 卡/焦耳；

P ——马达的有功功率 (1 瓦 = 1 焦耳/秒)；

于是 $Q = 0.24 \times 3.9 = 0.936$ (卡/秒)。

2. 通过杆子传递的热量

从图 1-a 可以看出，马达的热量分别由定子轴两端传给杆子，又通过杆子中点传给圆筒的两端。这样对于从杆子中点到杆子端部的热量传递，其中 $1/4$ 由马达定子轴通过杆子传到浮筒端部，而把马达在杆子中点的热源，看作是点热源，这样就可以归结为长度有限的杆的传热问题。(见图 2)。

设在离杆子左端 x 处取出一长度为 dx 的单元体，于是可写出该单元体的热平衡方程式：

$$Q' - Q'' = dQ \dots \dots \dots (1)$$

根据傅立叶定律：

$$Q' = -\lambda f \frac{dT}{dx},$$

$$Q'' = -\lambda f \frac{d}{dx} \left(T + \frac{dT}{dx} dx \right)$$

因此，

$$Q' - Q'' = dQ = -\lambda f \frac{d^2 T}{dx^2} dx \dots \dots (2)$$

式中 λ ——杆子导热系数；

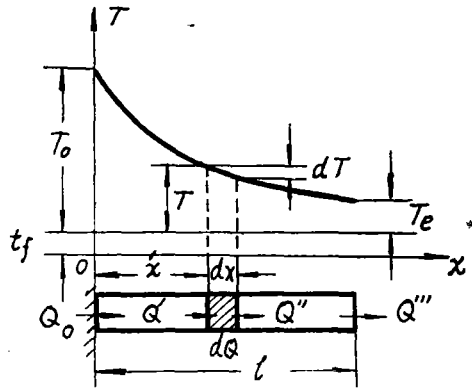


图 2

f ——杆子的截面积;

图中 t_f ——杆周围介质的温度;

另一方面, 通过杆子表面放热的热量为

$$dQ = -\alpha_1 u T dx \dots\dots\dots (3)$$

式中 α_1 ——杆子向周围介质的放热系数;

u ——杆子截面的周长;

令(2)式和(3)式相等,

$$\lambda f \frac{d^2 T}{dx^2} dx = \alpha_1 u T dx$$
$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{\alpha_1 u}{\lambda f} T = m^2 T \dots\dots\dots (4)$$

这里

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_1 u}{\lambda f}} \text{ [厘米}^{-1}\text{]}$$

如果 α_1 与 x 无关, 则 m =常数。那么, 二阶一次微分方程(4)的解将具有下列形式:

$$T = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \dots\dots\dots (5)$$

积分常数 C_1 和 C_2 的数值取决于各边界条件, 一种实用的近似边界条件是:

在 $x = 0$ 处, $T = T_0$,

于是 $T_0 = C_1 + C_2 \dots\dots\dots (6)$

当 $x = l$ 时, 依靠导热沿杆传到杆子右端的热量 Q''' , 由于接触传热而传入圆筒端部的氟油中, 假定放热面积等于杆子面积, 即杆子右端直接向氟油放热, 于是

$$-\lambda f \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=l} = \alpha_2 f T_l \dots\dots\dots (7)$$

式中 α_2 ——杆子的右端直接向氟油放热时的放热系数, 这里要考虑到由于面积近似而增加的数值。从(5)式可得:

$$T_l = C_1 e^{ml} + C_2 e^{-ml} \dots\dots\dots (8)$$

于是 $\left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=l} = C_1 m e^{ml} - C_2 m e^{-ml} \dots\dots\dots (9)$

将(8)式和(9)式代入(7)式, 得到

$$C_1 m e^{ml} - C_2 m e^{-ml} = -\frac{\alpha_2}{\lambda} (C_1 e^{ml} + C_2 e^{-ml}) \dots\dots\dots (10)$$

联立(6)式和(10)式解之, 则得 C_1 和 C_2 的值:

$$C_1 = T_0 \frac{\left(1 - \frac{\alpha_2}{m\lambda} \right) e^{-ml}}{e^{ml} + e^{-ml} + \frac{\alpha_2}{m\lambda} (e^{ml} - e^{-ml})} \dots\dots\dots (11)$$

$$e_2 = T_o \frac{\left(1 + \frac{\alpha_2}{m\lambda}\right) e^{m l}}{e^{m l} + e^{-m l} + \frac{\alpha_2}{m\lambda} (e^{m l} - e^{-m l})} \dots\dots\dots (12)$$

将 (11) 式和 (12) 式代入 (5) 式, 最后得到

$$T = T_o \frac{\left(1 + \frac{\alpha_2}{m\lambda}\right) e^{m(l-x)} + \left(1 - \frac{\alpha_2}{m\lambda}\right) e^{-m(l-x)}}{e^{m l} + e^{-m l} + \frac{\alpha_2}{m\lambda} (e^{m l} - e^{-m l})} \dots\dots\dots (13)$$

如果令 $x = l$, 就可以从 (13) 式求出杆子右端的温度 T_1 , 即

$$T_1 = \frac{\partial T_o}{e^{m l} + e^{-m l} + \frac{\alpha_2}{m\lambda} (e^{m l} - e^{-m l})}$$

因为 $\frac{1}{2} (e^{m x} - e^{-m x}) = shmx$; $\frac{1}{2} (e^{m x} + e^{-m x}) = chmx$; $(e^{m x} - e^{-m x}) / (e^{m x} + e^{-m x}) = thmx$,

所以
$$T_1 = \frac{T_o}{chml + \frac{\alpha_2}{m\lambda} shml} \dots\dots\dots (14)$$

另外由杆子传入外界的热量等于通过杆子左端 ($x = 0$) 处所传递的热量, 由 (5) 式可得:

$$\begin{aligned} Q &= -\lambda f \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = -m\lambda f (C_1 e^{m x} - C_2 e^{-m x})_{x=0} \\ &= -m\lambda f (C_1 - C_2) \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

将 (11) 式和 (12) 式代入 (15) 式, 则得:

$$\begin{aligned} Q &= -m\lambda f \left\{ T_o \frac{\left(1 - \frac{\alpha_2}{m\lambda}\right) e^{-m l}}{e^{m l} + e^{-m l} + \frac{\alpha_2}{m\lambda} (e^{m l} - e^{-m l})} \right. \\ &\quad \left. - \left[T_o \frac{\left(1 + \frac{\alpha_2}{m\lambda}\right) e^{m l}}{e^{m l} + e^{-m l} + \frac{\alpha_2}{m\lambda} (e^{m l} - e^{-m l})} \right] \right\} \\ &= m\lambda T_o f \frac{\frac{\alpha_2}{m\lambda} + thml}{1 + \frac{\alpha_2}{m\lambda} + thml} \end{aligned}$$

即
$$T_o = \frac{Q \left(1 + \frac{\alpha_2}{m\lambda} + thml\right)}{m\lambda f \left(\frac{\alpha_2}{m\lambda} + thml\right)} \dots\dots\dots (16)$$

于是可得杆子两端温度差的计算公式:

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_o - T_i \\ &= \frac{Q \left(1 + \frac{\alpha_2}{m\lambda} thml \right)}{m\lambda f \left(\frac{\alpha_2}{m\lambda} + thml \right)} - \frac{T_o}{chml + \frac{\alpha_2}{m\lambda} shml} \\ &= \frac{Q \left(1 + \frac{\alpha_2}{m\lambda} thml \right)}{m\lambda f \left(\frac{\alpha_2}{m\lambda} + thml \right)} \left(1 - \frac{1}{chml + \frac{\alpha_2}{m\lambda} shml} \right) \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

利用(17)式即可计算出杆子两端的温度差。

3. 浮子结构的温度差、热应力和热变形的计算

(1) 三种浮子结构型式的温度差计算:

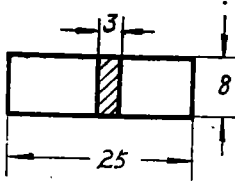


图 3

(a) 图 1—*a* 的型式: (图 3) 假定马达的热量从马达定子轴同时向四个杆子的端部传递, 对于每一根杆子只有 1/4 的马达发热量产生温升, 即

$$\begin{aligned} Q_a &= \frac{1}{4} Q = \frac{1}{4} \times 0.936 \\ &= 0.234 \text{ [卡/秒]} \end{aligned}$$

由 (17) 式:

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_o - T_i \\ &= \frac{Q \left(1 + \frac{\alpha_2}{m\lambda} thml \right)}{m\lambda f \left(\frac{\alpha_2}{m\lambda} + thml \right)} \left(1 - \frac{1}{Chml + \frac{\alpha_2}{m\lambda} shml} \right) \end{aligned}$$

式中 α_2 —— 杆子右端的放热系数, 考虑氟油是静止的液体及放热面积是一个近似面积, 故取 $\alpha_2 = 20$ [大卡/米·小时·℃] = 5.56×10^{-4} [卡/厘米·秒·℃];

λ —— 杆子导热系数, $\lambda = 175$ [大卡/米·小时·℃] = 0.486 [卡/厘米·秒·℃];

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_1 u}{\lambda f}}$$

α_1 —— 杆子向周围氮气的放热系数, 取

$$\alpha_1 = 50 \text{ [大卡/米·小时·℃]} = 1.39 \times 10^{-3} \text{ [卡/厘米·秒·℃];}$$

u —— 杆子周长, $u = 2(0.3 + 0.8) = 2.2$ [厘米];

f —— 杆子截面积, $f = 0.3 \times 0.8 = 0.24$ [厘米²];

l —— 杆子长度, $l = 2.5$ [厘米];

计算

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_1 u}{\lambda f}} = \sqrt{\frac{1.39 \times 10^{-3} \times 2.2}{0.486 \times 0.24}} = 0.162 \text{ [厘米}^{-1}\text{];}$$

$$ml = 0.162 \times 2.5 = 0.405;$$

$$m\lambda = 0.162 \times 0.486 = 0.079$$

查表: $chml = ch0.405 = 1.08$; $shml = sh0.405 = 0.41$;

$$thml = th0.405 = 0.38;$$

则杆子两端的温度差为:

$$\begin{aligned} \Delta T_a &= \frac{Q \left(1 + \frac{\alpha_2}{m\lambda} thml \right)}{m\lambda f \left(\frac{\alpha_2}{m\lambda} + thml \right)} \left(1 - \frac{1}{chml + \frac{\alpha_2}{m\lambda} shml} \right) \\ &= \frac{0.234 \left(1 + \frac{5.56 \times 10^{-4}}{0.079} \times 0.38 \right)}{0.079 \times 0.24 \left(\frac{5.56 \times 10^{-4}}{0.079} + 0.38 \right)} \left(1 - \frac{1}{1.08 + \frac{5.56 \times 10^{-4}}{0.079} \times 0.41} \right) \\ &= 2.6^\circ\text{C} \end{aligned}$$

(b) 图1-b的型式: 马达的热量从定子轴向二根杆子传递, 对于每一根杆子, 则只有 $\frac{1}{2}$ 的马达发热量产生温升, (假定结构尺寸与图3所示相同), 则

$$Q_s = \frac{1}{2} Q = \frac{1}{2} \times 0.936 = 0.468 \text{ [卡/秒]},$$

根据 (17) 式, 也可算得杆子两端的温度差为:

$$\Delta T_b = 5.2^\circ\text{C}.$$

(c) 图1-c的型式: 这种结构型式与图1-a、1-b的差别较大, 其马达传热部分的结构如图(4)所示。假定马达的 $\frac{1}{2}$ 热量传给一个轴承座, 再由轴承座传到浮子圆筒上。各参数计算如下:

$$Q_s = \frac{1}{2} Q = 0.468 \text{ [卡/秒]};$$

$$u = 4 \times 1.1 = 4.4 \text{ [厘米]};$$

$$f = 1.1^2 - \frac{\pi \times 0.7^2}{4} = 0.83 \text{ [厘米}^2\text{]};$$

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_1 u}{\lambda f}} = \sqrt{\frac{1.39 \times 10^{-8} \times 4.4}{0.486 \times 0.83}} = 0.12 \text{ [厘米}^{-1}\text{]};$$

$$ml = 0.12 \times 1 = 0.12;$$

$$m\lambda = 0.12 \times 0.486 = 0.058;$$

查表: $chml = ch0.12 = 1.007$; $shml = sh0.12 = 0.12$;

$$thml = th0.12 = 0.119;$$

则马达定子轴上的温度差为:

$$\Delta T_c = \frac{0.468 \left(1 + \frac{5.56 \times 10^{-4}}{0.058} \times 0.119 \right)}{0.058 \times 0.83 \left(\frac{5.56 \times 10^{-4}}{0.058} + 0.119 \right)} \left(1 - \frac{1}{1.007 + \frac{5.56 \times 10^{-4}}{0.058} \times 0.12} \right)$$

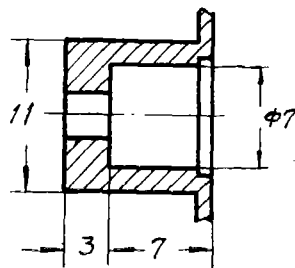


图4

$$= 0.546^{\circ}\text{C} \approx 0.5^{\circ}\text{C}$$

(2) 三种浮子结构型式的热应力和热变形计算:

对于图 1 所示的三种浮子结构型式, 圆筒的受力和传热情况基本相同。圆筒周围是 60°C 的粘性氟油, 是一个均匀而且稳定的温度场。当杆子端部与圆筒都达到 60°C 时, 杆子和圆筒都要受热而自由伸长, 但由于杆子上还存在温度差, 所以杆子受热而伸长与圆筒不同, 然而圆筒与杆子端部用环氧固定在一起, 既要受热而伸长, 又要相互约束。

杆子受热而自由伸长为 $\alpha_1 l (T_1 - t_f + \Delta T_1)$ 。圆筒的自由伸长为 $\alpha_2 l (T_2 - t_f + \Delta T_2)$ 。
(α_1, α_2 为线膨胀系数) 杆子上有温度差, 圆筒上无温度差, 圆筒伸长少, 则杆子受到压缩而缩短, 圆筒受拉而伸长。因压应力的作用, 杆子的缩短量为 $\sigma_1 l / E_1$ 。结果使杆的自由伸长量减少, 其最终伸长量为:

$$\alpha_1 l (T_1 - t_f + \Delta T_1) + \sigma_1 l / E_1$$

同理, 圆筒除了自由伸长 $\alpha_2 l (T_2 - t_f + \Delta T_2)$ 外, 还因受杆子拉伸而使伸长量增加 $\sigma_2 l / E_2$, 其最终伸长量为:

$$\alpha_2 l (T_2 - t_f + \Delta T_2) + \sigma_2 l / E_2$$

由于杆子和圆筒在端面上固接在一起, 因此其伸长量应该相等, 即:

$$\begin{aligned} \alpha_1 l (T_1 - t_f + \Delta T_1) + \sigma_1 l / E_1 \\ = \alpha_2 l (T_2 - t_f + \Delta T_2) + \sigma_2 l / E_2 \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

另外, 杆子中的压缩力是 $\sigma_1 f_1$, 圆筒中的拉伸力为 $\sigma_2 f_2$, 假定无其他外力作用, 那么处于平衡状态的两力必须相等, 即

$$\sigma_1 f_1 = -\sigma_2 f_2 \dots\dots\dots (19)$$

联立 (18)、(19) 二式, 即可解为:

$$\sigma_1 = - \frac{\alpha_1 E_1 [(T_1 - t_f + \Delta T_1) - (\alpha_2 / \alpha_1) (T_2 - t_f + \Delta T_2)]}{1 + (f_1 E_1 / f_2 E_2)} \dots\dots\dots (20)$$

$$\sigma_2 = - (f_1 / f_2) \sigma_1 \dots\dots\dots (21)$$

式中 $T_1 = T_2 =$ 平衡温度 $= 60^{\circ}\text{C}$;

t_f —— 周围介质温度, $t_f = 25^{\circ}\text{C}$;

ΔT_1 —— 杆子两端的温差;

ΔT_2 —— 圆筒两端的温差, $\Delta T_2 = 0^{\circ}\text{C}$;

$\alpha_1 = \alpha_2 =$ 铝的线膨胀系数 $= 23.5 \times 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$

f_1 —— 杆子截面积, $f_1 = 0.24$ [厘米²];

f_2 —— 圆筒截面积, $f_2 = \frac{\pi}{4} (4.2^2 - 4^2) = 1.29$ [厘米²];

$E_1 = E_2 = 7 \times 10^9$ [牛顿/厘米²]

对于图 1-a 的型式, 杆子和圆筒分别受到 σ_1 和 σ_2 的应力, 由 (19)、(20) 式可算得:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= - \frac{\alpha_1 E_1 [T_1 - t_f + \Delta T_1] - (\alpha_2 / \alpha_1) (T_2 - t_f - \Delta T_2)}{1 + (f_1 E_1 / f_2 E_2)} \\ &= - \frac{23.5 \times 10^{-6} \times 7 \times 10^9 [(60 - 25 + 2.6) - (1)(60 - 25 + 0)]}{1 + (0.24 \times 7 \times 10^9 / 1.29 \times 7 \times 10^9)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= -427.7 \text{ [牛顿/厘米}^2\text{]} \\
 \sigma_2 &= -(f_1/f_2)\sigma_1 = -(0.24/1.29)(-427.7) \\
 &= 81.3 \text{ [牛顿/厘米}^2\text{]};
 \end{aligned}$$

对于图 1—*a* 的型式,除了杆子和圆筒分别受到压应力 σ_1 和拉应力 σ_2 外,还存在由于马达定子轴受热伸长而使杆子弯曲变形。马达定子轴的伸长为:

$$l_{z_0} = \alpha_3 l_3 (T - t_f)$$

式中 α_3 ——定子轴的线膨胀系数,对 2Cr13,

$$\alpha_3 = 10.2 \times 10^{-6} \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]};$$

l_3 ——定子轴工作长度, $l_3 = 2.2$ 厘米;

T 、 t_f ——分别为 60°C 和 25°C ;

于是 $l_{z_0} = 10.2 \times 10^{-6} \times 2.2(60 - 25) = 0.785 \times 10^{-3}$ [厘米]

定子轴的伸长和杆子上由温差而产生的压应力,将使杆子产生横向不稳定弯曲变形,它将引起马达重心的位移。

对于图 1—*b* 的型式,杆子上虽有 5.2°C 的温度差,但因杆子可以自由伸长,杆子上不受应力。马达定子轴的伸长则与图 1—*a* 相同,因此也将引起马达重心的位移。

图 1—*a* 及图 1—*b* 的杆子将有 8μ 的弯曲变形。

对于图 1—*c* 的型式,马达定子轴受热而伸长,将使圆筒的直径发生变形。定子轴的伸长是定子轴工作长度的伸长与轴承座的伸长之和,即

$$\begin{aligned}
 l_{z_0} &= \alpha_3 l_3 (T - t_f) + \alpha_2 2l_4 (T - t_f + \Delta T_c) \\
 &= 10.2 \times 10^{-6} \times 2.2(60 - 25) + 23.5 \times 10^{-6} \times 2 \times 1(60 - 25 + 0.5) \\
 &= 2.453 \times 10^{-3} \text{ [厘米]},
 \end{aligned}$$

圆筒受热后在直径方向上的伸长,可看作把圆筒沿圆周方向的伸长再折算到直径上来,于是可用下式计算:

$$\begin{aligned}
 l_d &= \frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi(4.2 + 4)}{2} \times \alpha_2 (T - t_f) \right] \\
 &= 4.1 \times 23.5 \times 10^{-6} (60 - 25) = 3.372 \times 10^{-3} \text{ [厘米]},
 \end{aligned}$$

由于圆筒直径的伸长大于定子轴的伸长,定子轴固定在圆筒直径上,最终使圆筒在直径方向上的缩小量为

$$\begin{aligned}
 l_d - l_{z_0} &= 3.372 \times 10^{-3} - 2.453 \times 10^{-3} \\
 &= 0.919 \times 10^{-3} \text{ [厘米]},
 \end{aligned}$$

这样,圆筒可能变成椭圆,其长轴与短轴之差为 9μ 。

为了了解浮子温度变形的实际情况,我们在恒温室内(20°C),在空气中,利用 Taylor-Hobson 圆度仪对浮子圆筒进行了圆度测量。测量结果表明,在马达启动前与马达启动半小时之后(此时马达和浮子圆筒已基本上处于热稳定状态),测得圆筒中部的圆度差为 $2.3\mu - 1.9\mu = 0.4\mu$,而且短轴方向是在马达定子轴的方向,圆筒变形是对称的。

三、简单的结论

分析比较上述三种浮子结构的受热变形情况,可以看出,图 1—*a* 和图 1—*b* 型式的杆子

由于质量分布和几何尺寸不可能完全均匀和对称,且刚度也较差,定子轴的伸长,将使杆子产生不对称的弯曲变形,而且不论定子轴采用什么材料制造,变形始终无法避免。图1—c型式的温度变形将使圆筒产生椭圆,但由于圆筒刚度比较大,试验证明,变形是对称的。这种变形可以通过选用与圆筒线膨胀系数相匹配的材料(如锰钢,其线膨胀系数为 $22.8 \times 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$,与铝接近),就可使温度变形接近于零。因此,从马达重心位置的热稳定性考虑,可以认为图1—c型式的整体结构浮子是较为理想的方案。陀螺漂移测试表明,采用这种结构型式的浮子,陀螺各次启动零点的重复性是比较好的。

参 考 文 献

- [1] 上海交大,“液浮单自由度速率陀螺设计研制总结”,1981。
- [2] W. 里格利,“陀螺仪理论、设计及试验技术”,国防工业出版社,1978。
- [3] M. A. 米海耶夫,“传热学基础”,高等教育出版社,1959。
- [4] 竹内洋一郎,“热应力”,科学出版社,1977。
- [5] A. W. 劳伦斯,“捷联式陀螺仪设计”,国防工业出版社,1973。
- [6] Г. А. 斯洛缅斯基,“陀螺仪生产与试验文集”,国防工业出版社,1974。