

无温控液浮陀螺

宋立成

李才生

(空间中心总体部)

(五二九厂)

前言

长寿命三轴稳定的轨道飞行器对仪表功耗有苛刻的要求。失重状态为取消液浮陀螺的温控创造了有利条件。不要温控既可大大降低陀螺的功耗，又可大大延长仪表的寿命。

本文一方面介绍了我们在无温控液浮陀螺方面所做的工作。另一方面阐明了取消温控的原理和必要性。

一、自由落体轨道飞行器上陀螺的特点

应用于空间飞行器上的陀螺，由于任务不同，所处的力学环境不同，大致可分为下述两类：

第一类 用于轨道飞行器和远程空间飞行器上的陀螺。它们处于失重状态，力学环境平稳。对这一类陀螺突出的要求是功耗低、寿命长。

第二类 用于要求作快速机动飞行的飞船上，作为跟踪指向的捷联式陀螺。它不只处在单纯的失重状态，有时还要经受大的过载。对这一类陀螺的要求是各项漂移系数要小，加矩速率要大。

从国内实际情况看，无论在目前，还是今后相当长的时期内，主要需要上述第一类陀螺，也就是应用于自由落体轨道飞行器上的陀螺。这一类陀螺有以下特点：

1. 捷联式应用

由于一般的轨道飞行器和行星际探测器所承受的角速率小（在4度/秒以下）。飞行器本身就相当于一个稳定平台。因此陀螺捷联式组装就能轻而易举地胜任姿控的要求。这与运载火箭上的捷联式陀螺在性能要求上是有很大区别的。

捷联式应用与平台式相比，有很多优点：省去了平台框架及与此有关的一系列部件；从而也提高了可靠性；成本低；重量、功耗都比较小。

2. 工作于失重状态

虽然由于运载工具的加速和星弹分离时的冲击，使飞行器在作轨道飞行前承受很大的过载，但这时星载陀螺不工作。捕获模式中，陀螺或者不工作；或者参予捕获，但时间短，精度要求不高（主要由光学敏感器件完成捕获）。所以陀螺主要工作在自由飞行的失重状态。

陀螺输出角速度 Ω 的数学模型为

$$\begin{aligned} \Omega = & D_F + \sigma_d \\ & + D_I a_I + D_S a_S + D_O a_O \\ & + D_{II} a_I^2 + D_{SS} a_S^2 + D_{OO} a_O^2 \\ & + D_{IS} a_I a_S + D_{OS} a_O a_S + D_{IO} a_I a_O \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

其中 D_F : 与加速度无关的常值漂移系数;

D_I 、 D_S 、 D_O : 与加速度成正比的漂移系数。注脚表示所处的陀螺座标轴: I 为输入轴, S 为自旋轴, O 为输出轴;

D_{II} 、 D_{SS} …… D_{IO} : 与加速度平方成正比的漂移系数 (注脚含意同上);

a_I 、 a_S 、 a_O : 加速度 (注脚含意同上);

σ_d : 随机漂移。

各个漂移系数又都有独立的均方根误差 (随机误差): D_F 有均方根误差 σ_{D_F} ; D_I 有均方根误差 σ_{D_I} ……。因此陀螺总的漂移

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{D_F}^2 + \sigma_d^2 + \sigma_{D_I}^2 a_I^2 + \sigma_{D_S}^2 a_S^2 + \dots\dots\dots + \sigma_{D_{SS}}^2 a_S^2 a_S^2 + \dots\dots\dots + \sigma_{D_{IS}}^2 a_I^2 a_S^2 + \dots\dots\dots} \quad (2)$$

其中除 σ_{D_F} 和 σ_d 外, 其余九项都与加速度有关。

在加速度场中, 各项漂移系数均可能存在。而在失重状态, 因为加速度为零, 于是只有 σ_{D_F} 和 σ_d 两项, 所以

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{D_F}^2 + \sigma_d^2} \dots\dots\dots (3)$$

因此失重状态中的陀螺性能要比引力场中的提高很多。失重时马达功耗也有明显的下降。

在这里要强调的是: 失重将使液浮陀螺的“中性悬浮”完全成为多余。这一点将在第二节着重讨论。

3. 要求功耗低

随着空间科学的发展, 要求飞行器的飞行时间越来越长。这就不能主要靠蓄电池供电了。长寿命卫星只有靠太阳能电池从日光不断获得能量。但太阳能电池阵的单位面积出力有限。所以要求星上一切用电装置的功耗越小越好。而液浮陀螺常是星上的“电老虎”。对一个热设计不太好的液浮陀螺来说, 它占星上总功耗的比重有时多达30~50%。因此降低陀螺功耗是星上节能的迫切要求。然而目前功耗小的陀螺, 如挠性陀螺尚未普遍应用, 国内尚处在研究阶段。国外大量使用的仍是液浮式单自由度速率积分陀螺。国内现阶段也是这种陀螺应用于空间的希望最大。但它的功耗, 即使在进行了很好的热设计以后, 也要在10瓦上下。其中马达功耗与温控功耗约各占一半。三轴稳定卫星如果考虑一个斜装备分, 则要有四个陀螺, 功耗总共40瓦。

星载仪表的功耗过大, 往往引起恶性循环。例如要满足陀螺过大的功耗要求, 就得加大太阳能电池阵的面积。这就使卫星惯量增大, 气动阻力增加, 导致控制精度下降。为达到原有姿控精度, 就需要增大飞轮的惯量、增加卸载次数。这又导致功耗进一步增加。

二、空间用液浮陀螺取消温控的原理及其好处

液浮陀螺的出现, 把陀螺的精度从每小时几度提高到0.01度/小时~0.0001度/小时。提

高的原因是实现了“中性悬浮”，使框架轴上的摩擦力矩极大地减小。但浮液的比重要随温度波动而变化。常用的聚三氟氯乙烯油的比重—温度系数约为 1.7×10^{-3} 克/厘米³/度（摄氏）。为使浮子保持悬浮，必须使液温维持在悬浮点不变。所以一般来说，提高它的温控精度是提高陀螺精度的关键措施之一。

但这种重力与浮力相等，维持悬浮状态的概念是对重力场（加速度场）而言的。当陀螺工作在抛物线轨道上时，地球引力完全被离心力所抵消。在远离地面的轨道上，卫星各个部件与地球的距离可以认为是相等的。因此各部件的引力加速度也可以认为是相等的。从而在一个尺寸有限的卫星内重力梯度可以忽略不计。例如在230公里高空，每升高一米，重力加速度只减少 2.77×10^{-6} 米/秒²。对一个直径不足0.1米的陀螺，浮子与壳体间的重力差就更微不足道。由此可见：在作自由飞行的飞行器中，不加入人为约束力（如螺栓压紧力，弹簧拉力等）的两物体之间不存在压力。显然，陀螺浮子的轴颈和轴承之间在地面时存在的压力，在飞行轨道上将完全消失。因此，液体的悬浮作用在空间飞行器上也完全成为多余的了。液体随温度只有密度变化，而没有比重变化。因此原来为使浮子保持中性悬浮的温控也就可以取消了。

有人认为陀螺加上温控是必然的趋势，取消温控则不可理解。这是在不了解温控本质的情况下的误解。以挠性陀螺为例，本来不用温控是它的优点之一。可是在精度一时上不去时，国内也有人主张加上温控。但这不是挠性陀螺原理所必须的。这是由于诸如热匹配不好，磁钢温度系数过大或磁性不稳定等缺陷所造成的地面测试中随机漂移过大。加上温控后精度也确有提高。然而温控却消除不了缺陷本身。结果反而失去了挠性陀螺功耗低的特点。这只能说是一种得不偿失的措施。

对于空间的液浮陀螺，在实践中也证明了可以取消温控。美国曾用零加速度的抛物线轨迹飞行装置进行试验，一次飞行可保持30秒钟的失重状态。结果表明：在失重时不存在对加速度敏感的一切误差项。1971年登火星的水手号飞船上用三个无温控速率积分陀螺。捷联工作方式，模拟闭路，精度可达0.5度/小时（ 3σ ）。

在我们的工作中，对一个在悬浮温度下出厂精度为 $\sigma_s = 0.3$ 度/小时的高增益陀螺进行测试。当温度偏离悬浮点 10°C 时， σ_s 仍不超过1度/小时（见图1）。而且还有潜力。常值漂移系数 D_F 随温度下降而变大，温度系数约为0.05度/小时/ $^\circ\text{C}$ （见图2）。

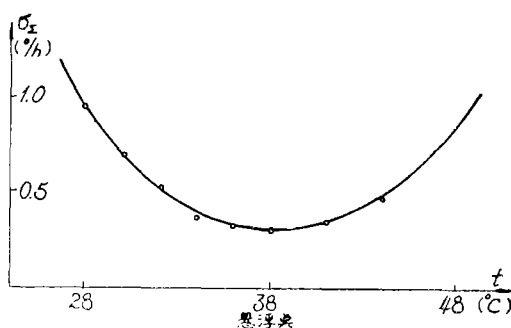


图1 无温控液浮陀螺的漂移—温度关系

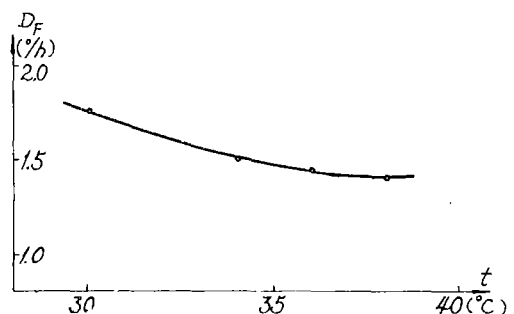


图2 常值漂移系数—温度曲线

取消温控后最直接的好处当然是功耗大为降低（见表1），省去了温控线路，提高了可靠性。

表1 功耗比较

	单个陀螺的功耗 (瓦)	四陀螺系统功耗 (瓦)
有温控	10	40
无温控	5	20

取消温控的第二个好处是可以延长陀螺的寿命。国外的经验数据表明,工作温度每下降10℃,由于各种化学反应过程的放慢,陀螺寿命可增加一倍。对于有温控的常规陀螺,由于要防止最高环境温度时失控和减小热阻以节约温控功耗,必须使工作温度高出环境温度较多。例如最高环境温度只有30℃,而陀螺的工作温度在60℃。取消温控后,陀螺工作的最高温度是最高环境温度加上马达温升(温升不超过10℃),也即工作温度不超过40℃。由此可见,工作温度比有温控时降低了20℃以上。如果60℃时陀螺寿命为3000小时,理想情况下40℃时寿命便增加到12000小时。

三、无温控液浮陀螺的设计、测试问题

1. 由于工作在失重状态

浮子的静平衡设计不再是主要考虑因素了。但陀螺不可能在失重状态下标定,所以一般的静平衡仍有必要。否则由于摩擦使标定时随机误差较大,不能反映出空间工作时的实际精度。

2. 必须设计成低阻尼高增益陀螺

浮液对浮子的阻尼作用在空间与地面是同样的。取消温控后,浮液的粘度随温度而变化。聚三氟氯乙烯陀螺油的温度每下降11℃,粘度 η 增大一倍(见图3)。陀螺阻尼间隙中的液体阻尼系数 C 与 η 成正比。所以环境温度变化 $\pm 11^\circ\text{C}$,阻尼系数 C 将在其标称值(一般为地面确定的悬浮点)的一半到二倍范围内变动。这会使陀螺回路的动态性能很差:低温时若是过阻尼,到高温时 C 减小了4倍,就可能成为欠阻尼,系统可能因振荡而无法工作。

要改善动态性能,就需要把阻尼降低,增益提高。其理由如下。

单自由度液浮式积分陀螺的传递函数为

$$\frac{\beta}{T} = \frac{1}{JS^2 + CS}$$

$$= \frac{1/J}{S(S + C/J)}$$

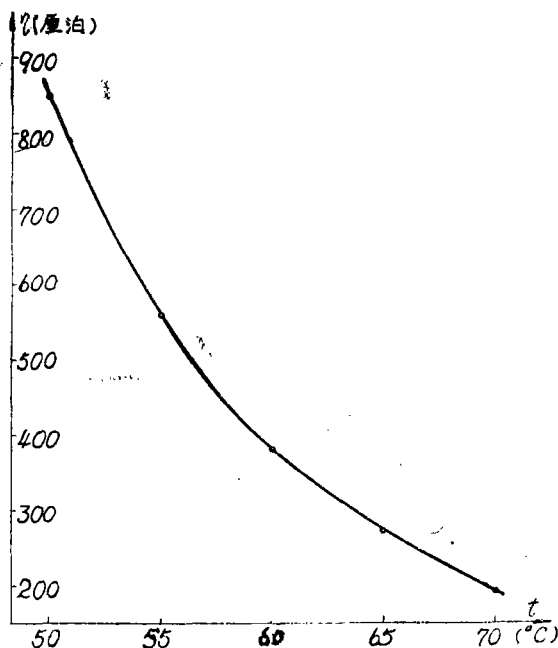


图3 常用陀螺油粘温曲线

$$= \frac{1/J}{S(S+1/\tau)} \dots \dots \dots (4)$$

- 其中 β : 浮子转角;
 T : 加在浮子轴上的力矩;
 C : 浮子阻尼系数;
 $\tau = J/C$: 浮子时间常数;
 J : 浮子绕输出轴的惯量。

当陀螺组成速率回路后, 方块图如图 4。

- 图中 ω_I : 输入角速率;
 H : 陀螺转子角动量;
 T_o : 陀螺力矩;
 S_{sg} : 角度传感器比例系数;
 S_K : 放大器放大系数;
 S_{tg} : 力矩马达的力矩系数;
 T_{tg} : 力矩马达输出力矩。

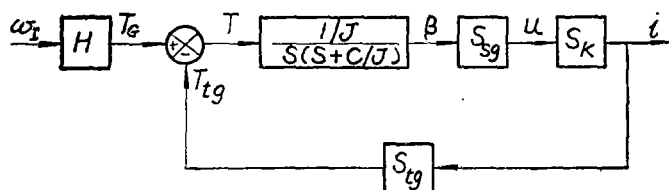


图 4 液浮陀螺速率回路方块图

作为积分陀螺, 它的开环传递系数, 也即陀螺增益 $= \frac{H}{C}$ 。

常规的温控陀螺的阻尼系数 C 较大, 从而增益较低。如果延用这种较大 C 值作为无温控陀螺的标称值, 则在 $\pm 11^\circ\text{C}$ 环境温度范围内, C 变化的绝对值很大。对一个 $H/C = 1$, $\tau = 0.001$ 秒的常规陀螺, 它的开环极点 C/J 的标称值为 -1000 弧度/秒, 则开环极点的变动范围在 -500 弧度/秒—— -2000 弧度/秒 (见图 5)。

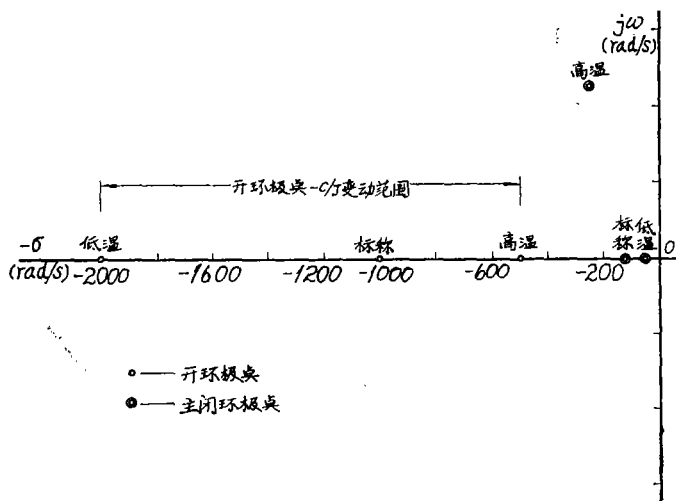


图 5 常规陀螺的根轨迹与温度的关系

如果把常规的稠油改为稀油, 粘度很低, C 很小, 增益很大。这种低阻尼高增益的参数选择, 可以使开环极点的变动范围缩小很多。例如我们设计的无温控陀螺, 换成稀油后, 开环极点 C/J 的标称值 (图 6):

$$[C/J]_{\text{标称}} = -18 \text{ 弧度/秒};$$

变动范围:

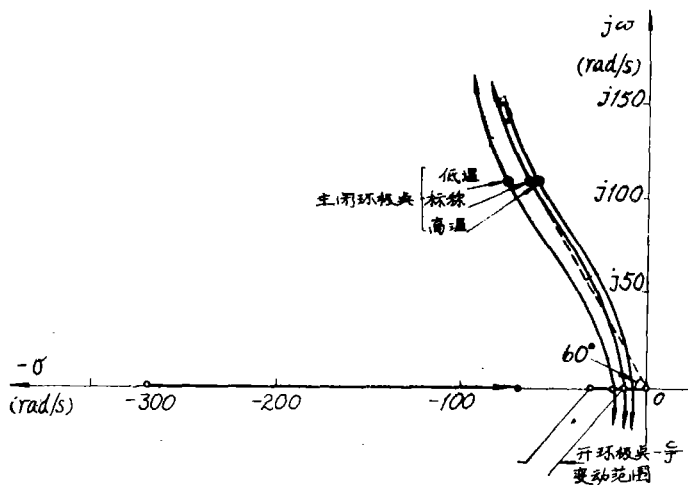


图6 高增益陀螺根轨迹图

$$[C/J]_{\text{高温}} = -12 \text{ 弧度/秒,}$$

$$[C/J]_{\text{低温}} = -30 \text{ 弧度/秒.}$$

(由于稀油工作段曲线比较平缓, 所以这里的 C/J 变化不是一倍关系。这对回路动特性是有利的)。

由此可见: C 减小后, 使开环极点的变动范围大大缩小, 由原来的 1500 弧度/秒减到18 弧度/秒。这表明对温度不大敏感了。这就是采用高增益的原由。

3. 回路校正问题

高增益可以使得动特性不大随温度变。但是它的阻尼比 ξ 无论在低温或高温都很小。为了获得较好的动态响应, 必须把阻尼比提高到0.4~0.8之间。所以要在前向回路中加进一个微分网络。例如: 当校正回路的传递函数为

$$G(S) = \frac{S + 70}{S + 230}$$

时, 便得到图6的根轨迹。主闭环极点的变动范围很小, 阻尼比也较接近:

$$\xi_{\text{高温}} = 0.42,$$

$$\xi_{\text{标称}} = 0.50,$$

$$\xi_{\text{低温}} = 0.53.$$

这就成为一个动态响应与温度基本无关的力矩反馈式速率陀螺。

4. 结构问题

无温控液浮陀螺的机械结构一般可以利用成熟的常规陀螺。在进行系统设计后提出对阻尼液的要求和校正网络参数。但必须注意, 结构不能原封不动地照搬。工作温度下降后, 陀螺马达轴承的润滑剂粘度应作相应的改变。否则会引起较大的轴承噪声, 甚至会使马达失步。工作温度下降后, 原先在高温下设计的轴承预载力可能增大, 因此需要重新计算。

5. 测试方法

通常用滚转法测定陀螺的漂移。这种方法由于引进了重力加速度 g 在各轴投影的随机变化, 使随机漂移较大。而对空间应用的陀螺来说, 工作在 $g=0$ 的轨道上。为了与使用状态相

一致，建议用受 g 影响很小的“八位置法”进行测试。这在资料〔4〕中讨论了，这里不再细述。

四、无温控液浮陀螺的某些使用问题。

1. 只能工作于闭环速率方式。

没有温控时，阻尼系数 C 变化很大，致使增益 H/C 成比例地变化。所以陀螺不能用充油间隙的机械阻尼获得准确的角度输出。也即无温控液浮陀螺不能工作在开路的积分方式。而必须通过力矩器闭路，由力矩器电流得到一个正比于输入角速度的信号，即成为一个速率工作方式的积分陀螺。速率输出信号经电子积分器后便可得到角位置输出。位置信号和速率信号同时给出，往往是姿控系统所希望的。

2. 对陀螺进行零位补偿时，与 g 有关的量都不要补偿。因为它们在空中将自然消失。

3. 对指令速率标度系数 S_r 要在工作温度范围内进行分段标定。在轨道飞行期间，根据测得的陀螺温度采用相应的标定值。

4. 由于油的 η 很低，浮子各个方向的阻尼都很小，因此在测试、安装等过程中要非常小心，以防损坏宝石轴承。

参 考 文 献

1. NASA CR—113572: “Intermediate Accuracy Integrating Gyroscopes Design Criteria Monograph”.
2. NASA SP—8096: “陀螺敏感器在空间飞行器上的应用”