



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

航天器控制原理



冯冬竹

电话: 13389281325

邮箱: dzhfeng@xidian.edu.cn

空间科学与技术学院 导航控制系



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

目录

CONTENTS

01

绪论

02

航天器的轨道与轨道力学

03

航天器的姿态运动学和动力学

04

航天器姿态控制系统的组成与分类

05

航天器的被动姿态控制系统

06

航天器主动姿态稳定系统



航天器的被动姿态控制系统

01

自旋卫星的稳定性和章动性

02

自旋卫星的章动阻尼

03

双自旋卫星稳定系统

04

重力梯度稳定系统

05

重力梯度稳定卫星的天平动阻尼

06

重力梯度稳定系统的伸展杆

07

其他被动姿态稳定系统



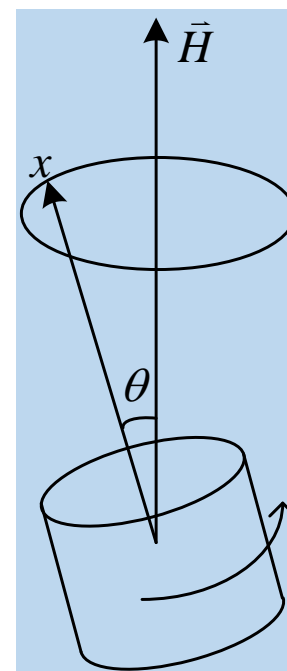
第二讲 · 自旋卫星的章动阻尼

- 01 被动章动阻尼器
- 02 主动章动阻尼



- 引起章动的因素是星箭分离、起旋、消旋、太阳帆板展开、轨道修正时喷气产生的干扰力矩以及空间环境对航天器产生的各种干扰力矩。

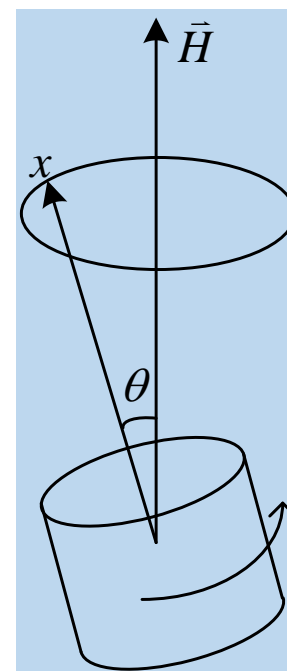
$$\omega_y = \omega_y(0) \cos \Omega t + \frac{\dot{\omega}_y(0)}{\Omega} \sin \Omega t$$
$$\omega_z = \omega_z(0) \cos \Omega t + \frac{\dot{\omega}_z(0)}{\Omega} \sin \Omega t$$





- 章动存在将使自旋轴产生圆锥运动。
- 消除章动，使自旋轴、转速 $\vec{\omega}$ 和动量矩 \vec{H} 重合，是自旋卫星控制的重要任务。

$$\omega_y = \omega_y(0) \cos \Omega t + \frac{\dot{\omega}_y(0)}{\Omega} \sin \Omega t$$
$$\omega_z = \omega_z(0) \cos \Omega t + \frac{\dot{\omega}_z(0)}{\Omega} \sin \Omega t$$





- 章动阻尼按是否使用星上能源分为被动章动阻尼和主动章动阻尼两种形式。
- 被动章动阻尼通过被动章动阻尼器来吸收衰减章动能量，主动章动阻尼则是在星上设置控制系统。



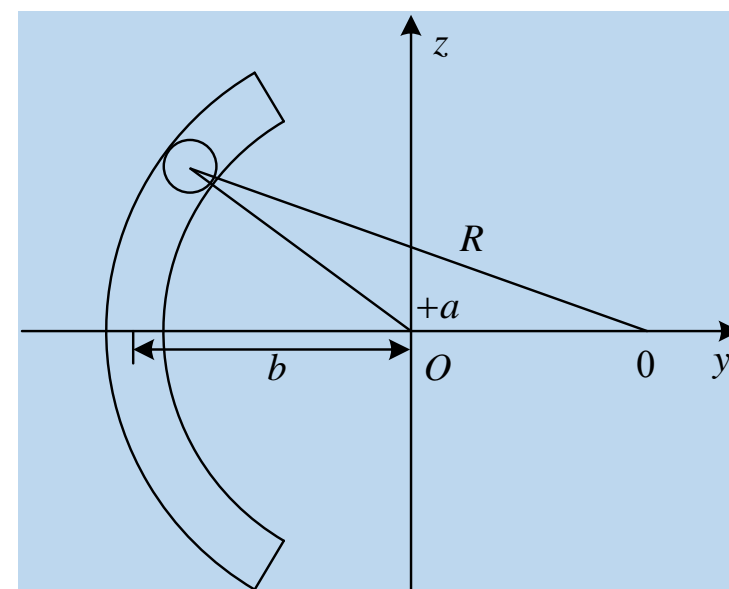
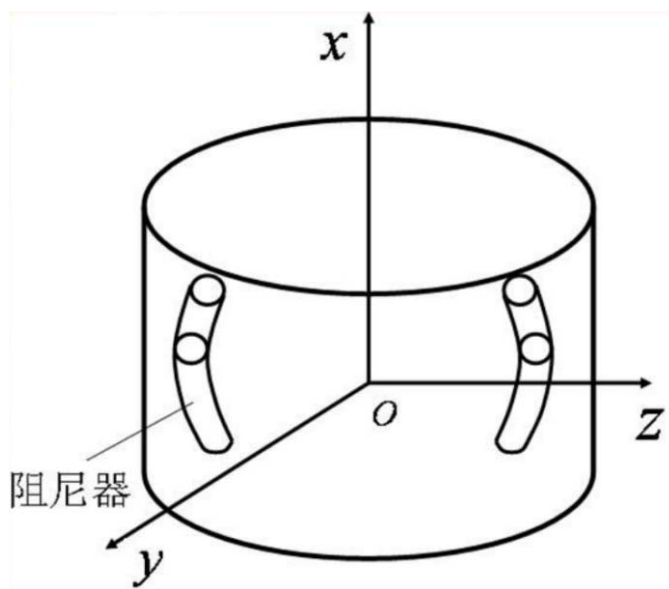
- 在被动章动阻尼器内装有阻尼块，此阻尼块与航天器壳体之间是悬浮的或者是弹性联接的。当航天器自旋轴作圆锥运动时，航天器内各点的离心力不断地变化，阻尼块将在阻尼器内部产生相对运动。
- **工作原理：**利用阻尼块的相对运动耗散星体章动的动能，起到阻尼航天器的横向角速度，达到消除章动角的目的。



- **阻尼块的形式**：有固体或液体等；
- **阻尼块支撑的形式**：有轴承、悬挂或封闭容器；
- **阻尼的方式**：有利用黏性气体内部摩擦、黏性液体内部摩擦、机械摩擦、或磁-涡流等；
- **恢复力的方式**：有利用离心力或机械弹簧等。

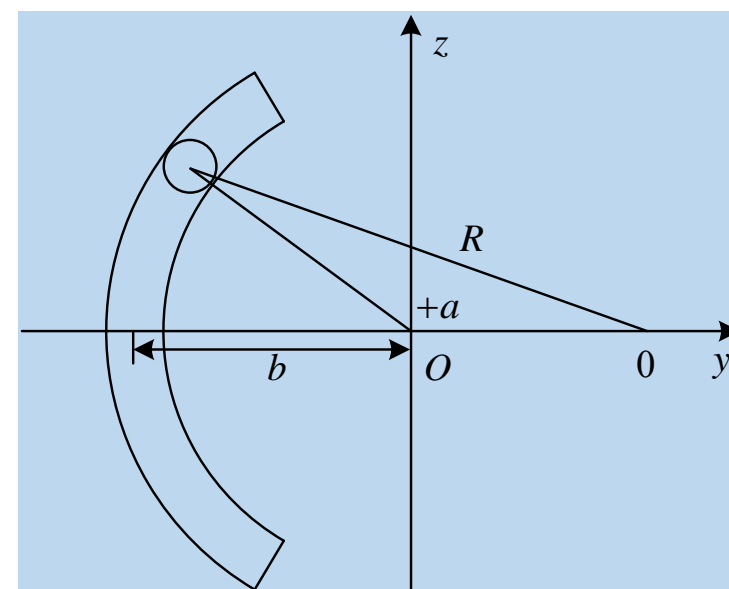
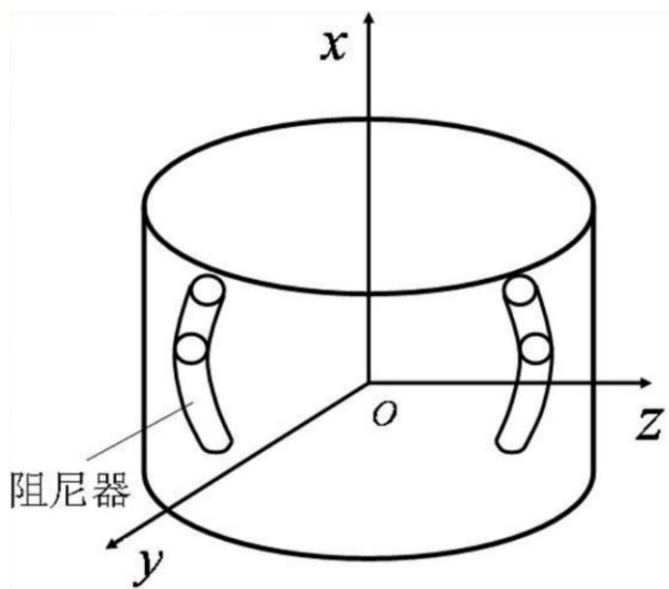


- 阻尼器由一对圆弧形弯管组成，弯管装在星体的子午面内，称为**子午面阻尼器**；或装在平行于赤道面的平面内，称为**赤道面阻尼器**。



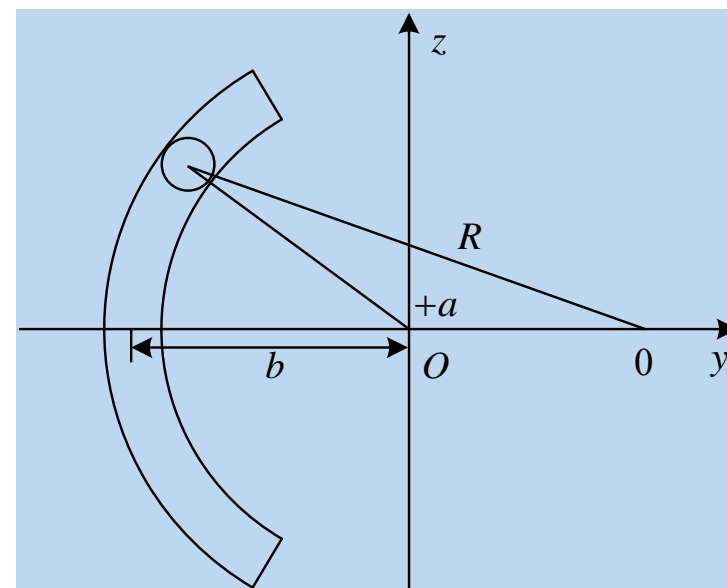
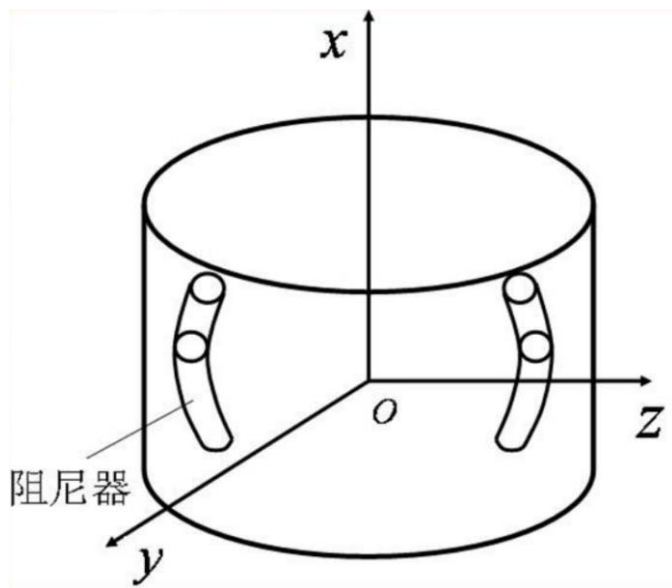


- 弯管的凹面朝着自旋轴，并且圆弧的等分线垂直于自旋轴并和自旋轴相交。管内有一球作为阻尼块，球的直径略小于管子的内径。





- 当星体只有自旋时，球停留在管子的对称中心；当星体有章动时，球将被迫来回滚动。阻尼是黏性液体或气体阻尼。利用阻尼力所做的功来耗散章动的功能，使章动角逐渐衰减。
- 管中球阻尼器主要缺点是有剩余章动角，这是滚动摩擦造成的。





□ 自旋卫星的转动动能:

$$E_k = \frac{1}{2} \bar{H} \cdot \bar{\omega} = \frac{1}{2} (I_x \omega_x \bar{i} + I_t \bar{\omega}_t) \cdot (\omega_x \bar{i} + \bar{\omega}_t) = \frac{1}{2} (I_x \omega_x^2 + I_t \omega_t^2)$$

$$\tan \theta = \frac{I_t \omega_t}{I_x \omega_x}$$

$$\tan \gamma = \frac{\omega_t}{\omega_x}$$

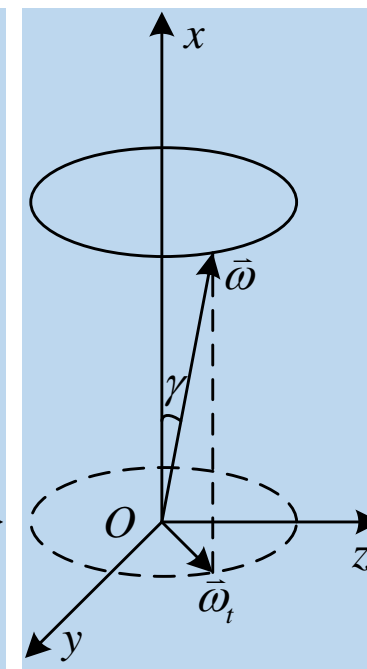
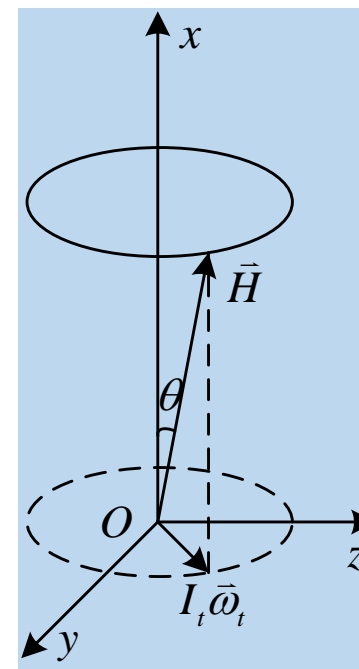


$$\sin \theta = \frac{I_t \omega_t}{H}$$

$$\cos \theta = \frac{I_x \omega_x}{H}$$

$$\sin \gamma = \frac{\omega_t}{\omega}$$

$$\cos \gamma = \frac{\omega_x}{\omega}$$





$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2} H \omega \left(\frac{I_x \omega_x^2}{H \omega} + \frac{I_t \omega_t^2}{H \omega} \right) \\ &= \frac{1}{2} H \omega \left(\frac{I_x \omega_x}{H} \frac{\omega_x}{\omega} + \frac{I_t \omega_t}{H} \frac{\omega_t}{\omega} \right) \\ &= \frac{1}{2} H \omega (\cos \theta \cos \gamma + \sin \theta \sin \gamma) \end{aligned}$$



$$E_k = \frac{H^2}{2I_x} \left(1 + \frac{I_x - I_t}{I_t} \sin^2 \theta \right)$$



□ 自旋卫星转动能量耗散速率：

$$\dot{E}_k = \frac{dE_k}{dt} = \frac{H^2}{I_x} \left(\frac{I_x - I_t}{I_t} \right) \dot{\theta} \sin \theta \cos \theta$$

- 若 $\dot{E}_k < 0$ ，即当 $I_x > I_t$ 时，必有 $\dot{\theta} < 0$ ，这样章动角 θ 将减小，直到章动消失($\theta = 0^\circ$)，对应最小能量状态。
- 这也正是对称自旋卫星绕最大惯量轴旋转时，被动章动阻尼能消除章动的根据。



□ 自旋卫星转动能量耗散速率：

$$\dot{E}_k = \frac{dE_k}{dt} = \frac{H^2}{I_x} \left(\frac{I_x - I_t}{I_t} \right) \dot{\theta} \sin \theta \cos \theta$$

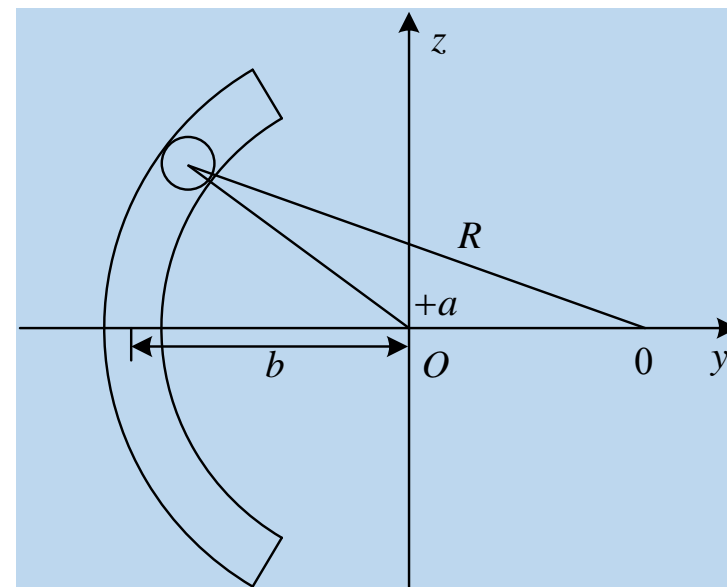
- 当 $I_x < I_t$ 时，必有 $\dot{\theta} > 0$ ，则章动角 θ 将不断增大，直到物体绕其横轴旋转(平旋, $\theta = 90^\circ$)，这也对应于最小能量状态。
- 这也正是当卫星存在非刚性能量耗散时，绕最小惯量轴的旋转不稳定的理论根据，而且也说明当自旋卫星绕最小惯量轴旋转时，被动章动阻尼不可能消除章动。



□ Ox 为自旋轴，当星体章动时，小球在管内发生移动，小球对卫星所做的微功为：

$$dW = -k\dot{x}dx$$

➤ 阻尼力的幅值 $f = k\dot{x}$ ， k 为阻尼系数； dx 为小球相对于其平衡位置的微位移； \dot{x} 为小球的瞬时速度。



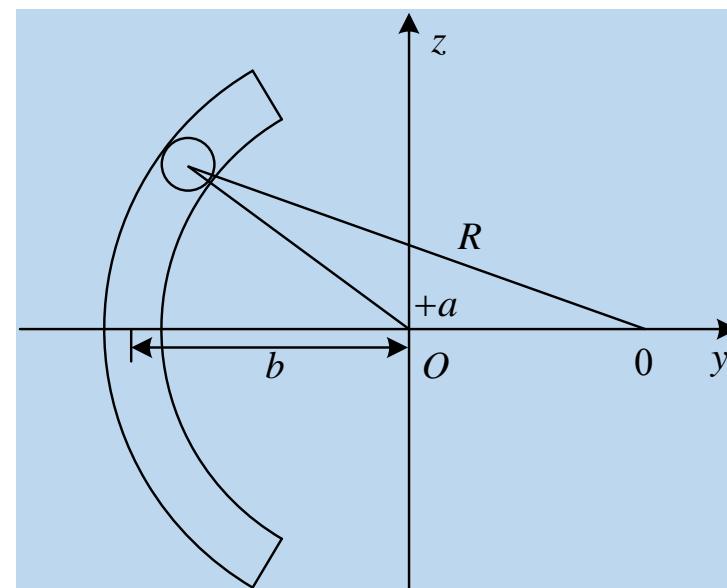


$$dW = -k\dot{x}dx \quad \longrightarrow \quad dW = -k\dot{x} \frac{dx}{dt} dt = -k\dot{x}^2 dt$$

□ 积分得到小球每一个往返周期中的平均做功：

$$W_{av} = -\frac{k}{T} \int_0^T \dot{x}^2 dt$$

➤ T 为阻尼器运动的周期。





□ 每一周期中的平均做功量等于动能改变量，

$$W_{av} = \dot{E}_k$$

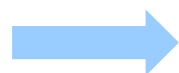

$$W_{av} = \frac{H^2}{I_x} \left(\frac{I_x - I_t}{I_t} \right) \dot{\theta} \sin \theta \cos \theta = \dot{E}_k \approx \frac{H^2}{I_x} \left(\frac{I_x - I_t}{I_t} \right) \theta \dot{\theta}$$

$$|\theta| \ll 1$$



□ 积分:

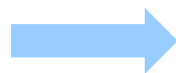
$$W_{av} = -\frac{k}{T} \int_0^T \dot{x}^2 dt$$



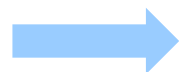
$$W_{av} = -\theta^2 F(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$$

➤ $F(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \triangleq F$ 是系统参数的函数。

$$W_{av} = \frac{H^2}{I_x} \left(\frac{I_x - I_t}{I_t} \right) \theta \dot{\theta}$$



$$\frac{H^2}{I_x} \left(\frac{I_x - I_t}{I_t} \right) \theta \dot{\theta} + \theta^2 F = 0$$



$$\dot{\theta} + \frac{F\theta}{\frac{H^2}{I_x} \left(\frac{I_x}{I_t} - 1 \right)} = 0$$



$$\dot{\theta} + \frac{F\theta}{\frac{H^2}{I_x} \left(\frac{I_x}{I_t} - 1 \right)} = 0 \quad \longrightarrow \quad \dot{\theta} + \frac{\theta}{\Upsilon} = 0$$

➤ Υ 为系统的阻尼时间常数。

$$\Upsilon = \frac{H^2}{FI_x} \left(\frac{I_x}{I_t} - 1 \right)$$

□ 解：

$$\theta = \theta_0 e^{-t/\Upsilon}$$

➤ θ_0 为初始章动角。



- 如果由于自旋卫星内部的能量耗散而不是外力矩使章动完全消除，即 $\bar{\omega}_t = 0$ ，则由于动量矩守恒，卫星的自旋角速度将增加。
- 设卫星初始自旋角速度为 ω_{x0} ，初始横向角速度为 ω_{t0} ，则初始动量矩的大小 H 可以表示为：

$$H = \left[(I_x \omega_{x0})^2 + (I_t \omega_{t0})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$



□ 章动消除后，自旋角速度为 ω_f ，而 $\omega_t = 0$ ，因此：

$$H = I_x \omega_f = \left[(I_x \omega_{x0})^2 + (I_t \omega_{t0})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

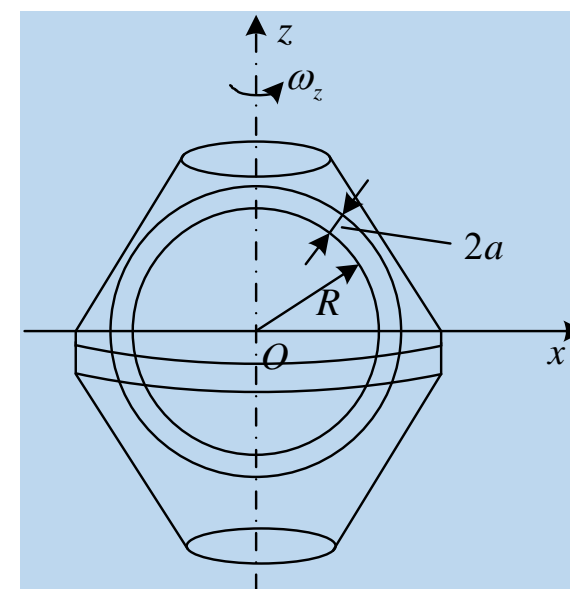


$$\omega_f = \left[\omega_{x0}^2 + \left(\frac{I_t}{I_x} \right)^2 \omega_{t0}^2 \right]^{\frac{1}{2}} > \omega_{x0}$$

➤ 表明由于章动阻尼，卫星的自旋角速度将增大。

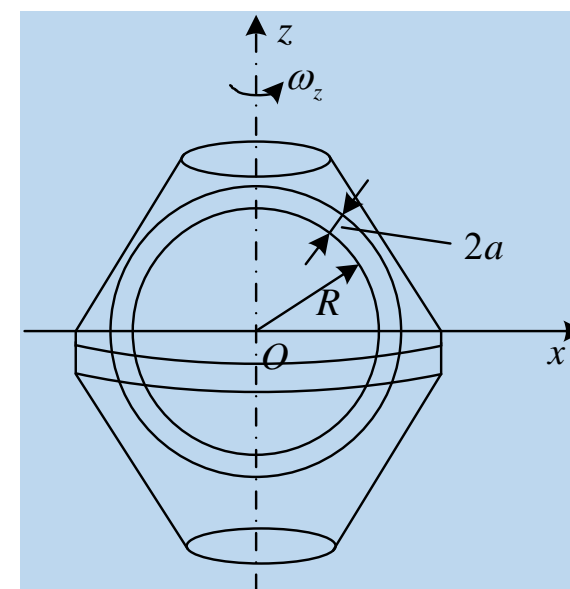


- 液体环阻尼器有两种：环面垂直于自旋轴或平行于自旋轴。前者用于早期高速自旋的卫星上。由于一系列的因素，自旋速率不宜过高，因此采用环面平行于自旋轴的阻尼器，提高阻尼效率。
- 环的形状有圆形、方形或U字形，环内充满或只充部分黏性液体。



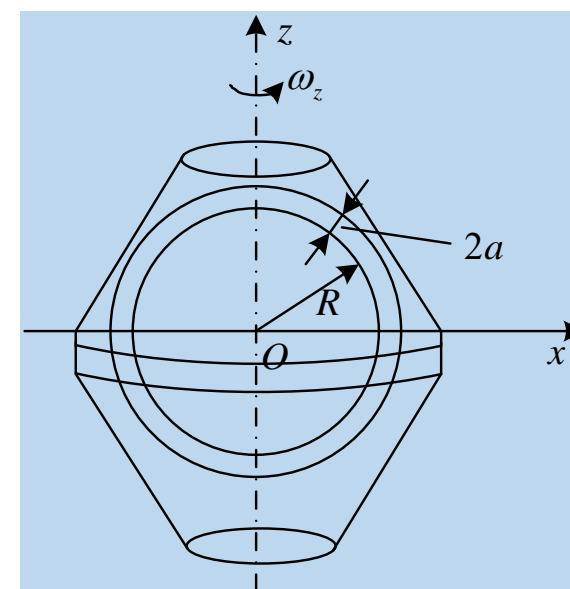


- 星体章动时，液体在环内周期性地来回流动，利用液体内部的黏滞剪切力矩来耗散章动能量。





- 液体环阻尼器没有弹簧特性，不能储存能量，因此没有谐振特性，阻尼效率较差，只能用于激励频率较高的场合。
- **优点：**阻尼器内部没有机械活动部件，可靠性很高，剩余章动角很小；安装部位比较灵活，只要求球面平行于自旋轴。





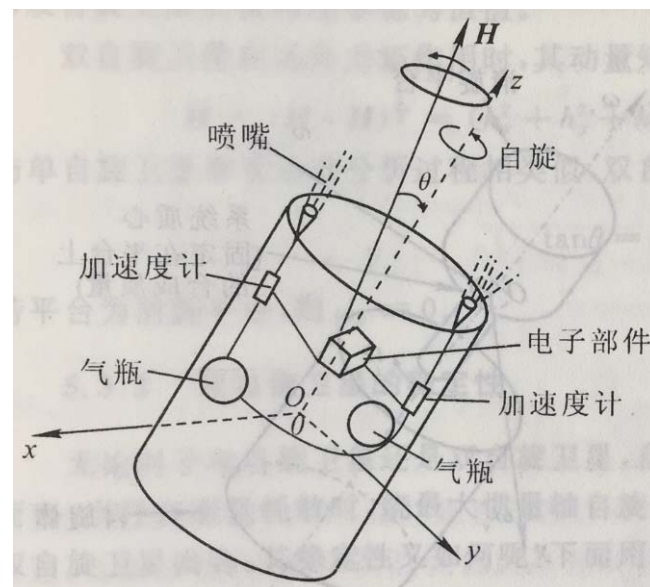
- 设计一个被动章动阻尼器应满足下列要求：
 - 阻尼器单位质量产生阻尼效果大；
 - 剩余章动角小；
 - 星体转速变化和星体内部质量与温度的变化对阻尼效果影响小；
 - 阻尼器要便于安装，而且希望对安装的部位和安装精度没有严格的要求；
 - 具有线性阻尼特性。
- ✓ 一种阻尼器不可能都具备上述所有性能，要根据星体具体情况，如惯量、自旋转速、要求阻尼的时间、剩余章动角以及飞行程序等综合因素来设计阻尼器以实现这些性能。



- 航天器在某些情况下，如上面级火箭在转移轨道上，可能绕最小惯量轴自旋。当存在能量耗散时，星体自旋轴最终将偏离动量矩矢量方向。
- 如果能量耗散足够地慢，则自旋轴偏离动量矩矢量的发散也很慢，其性能是可以接受的。反之，如果能量消耗充分快，则自旋轴可能严重偏离动量矩矢量，从而导致入轨误差大到不可接受的程度。表征这种偏离的度量就是章动角。



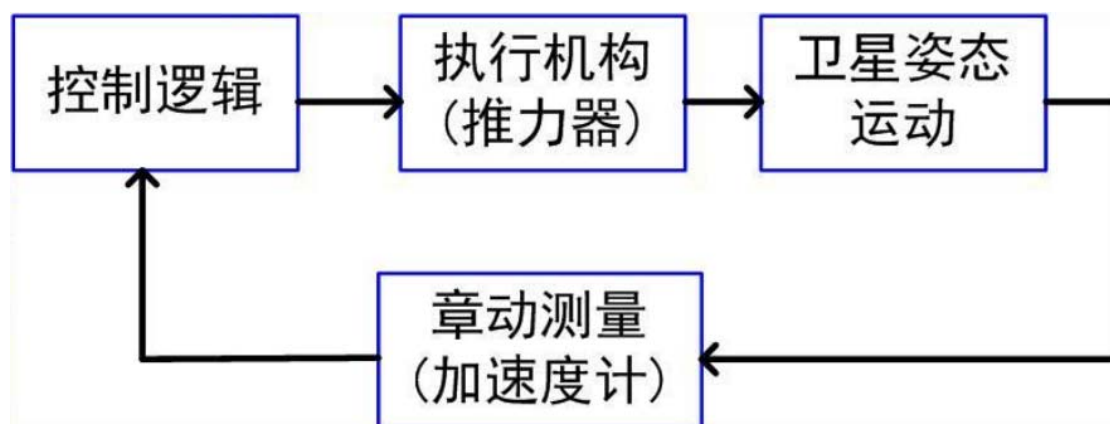
- ❑ 主动章动阻尼是一个闭环控制系统，它包括姿态测量章动敏感器和改变航天器动量矩的执行机构。
- ❑ 章动敏感器一般可以采用速率陀螺、加速度计、太阳敏感器、红外地平仪和磁强计等，然后进行信息处理，提供有关章动角的信息。
- ❑ 一般采用喷气执行机构，控制系统可以是星上闭环控制或者通过地面站遥控。





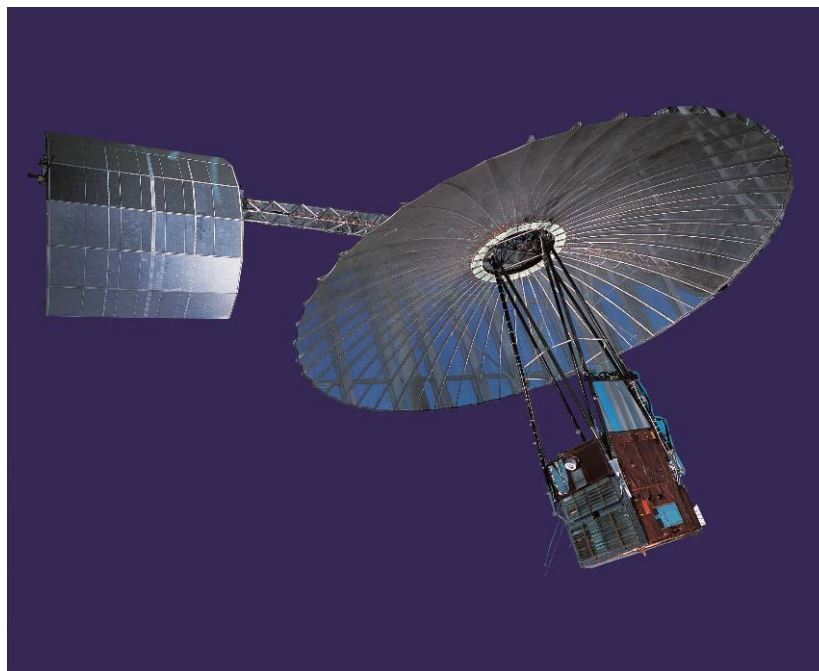
□ 主动控制章动的方法：

- ✓ 首先，由敏感器检测到章动的存在，确定章动运动相对于自旋体固定坐标系的相位和幅度。
- ✓ 其次，敏感器输出信号通过阈值检测，放大，并转换为喷气命令。
- ✓ 最后，轴向推力器每章动周期点火一次，点火持续时间为章动周期的某个分数，使其产生的横向力矩与章动运动方向相反，以减小残存的横向动量矩，从而减小章动角。





- 美国应用技术卫星ATS-4和ATS-5在过渡轨道是自旋稳定的。这两颗卫星是细长形的，在自旋状态下，当发生章动时，这章动是不收敛（不稳定）的，为此必须加主动章动阻尼系统。





- 国际通信卫星IV号和VI号也采用主动章动控制，一般采用互为独立的双套系统，即两个加速度计、两个喷管。一方面互为备份，另一方面加强主动章动控制效果。





□ 主动章动阻尼是基于喷气执行机构(推力器)的主动姿态控制系统。



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY



THANKS



13389281325



dzhfeng@xidian.edu.cn

