



航天器控制原理

第27讲 航天器物理仿真 技术

西北工业大学 航天器控制原理


主讲：刘 睿

西北工业大学 精确制导与控制研究所





内容概要

- 1、卫星控制系统仿真的对象
 - 2、卫星控制系统仿真分类
 - 3、航天器物理仿真技术
- 
- 航天器物理仿真MOOC

1、卫星控制系统仿真的对象

目前开展科学试验有两种途径：
一是在客观世界的原型上进行

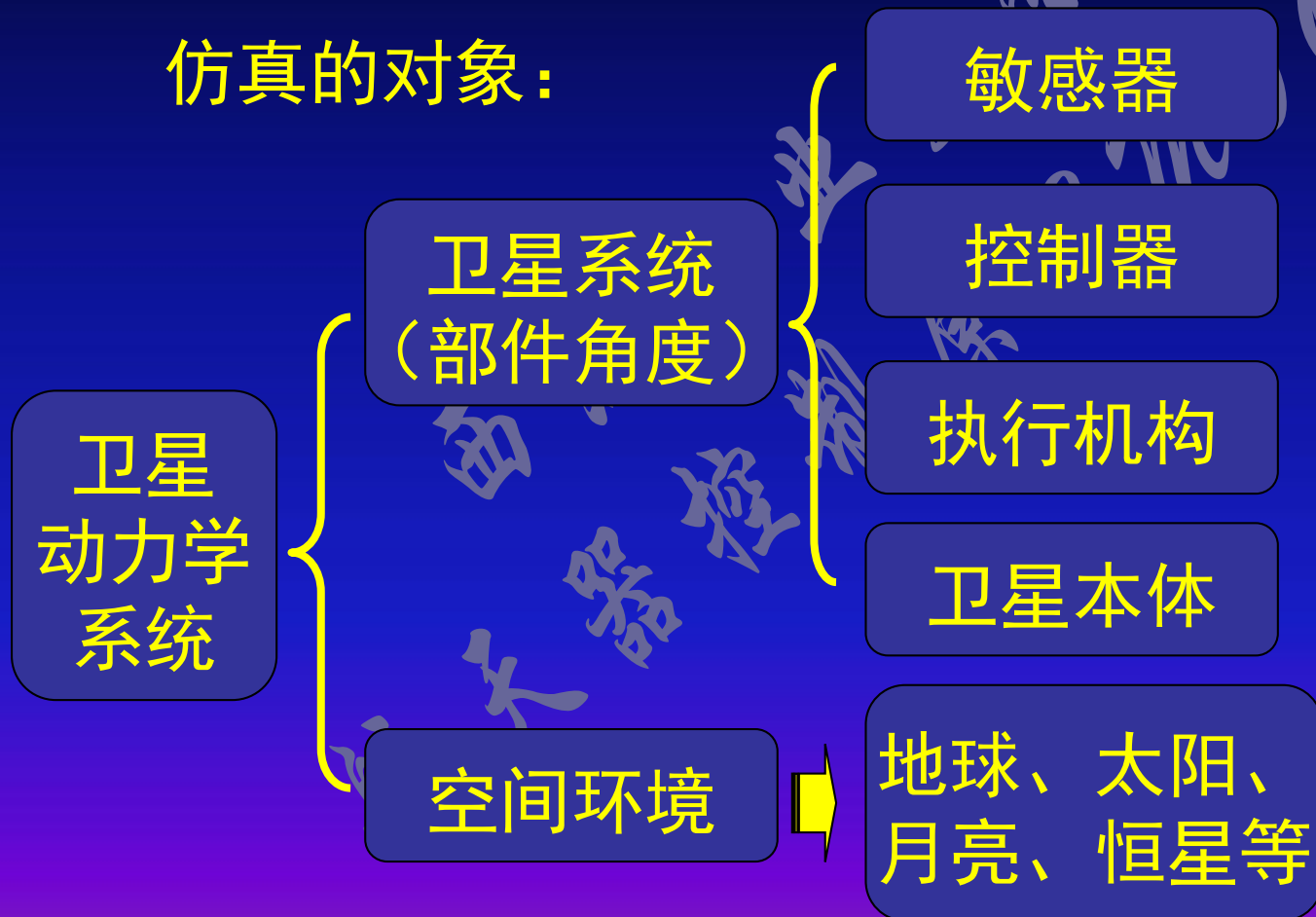
飞机或火箭的飞行试验

二是用原型代替物(模型)试验

仿真

1、卫星控制系统仿真的对象

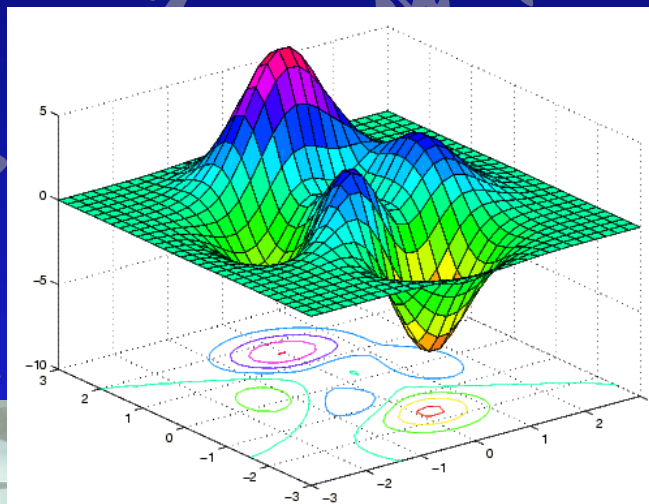
仿真的对象：



2、卫星控制系统仿真的分类

根据所介入模型的不同，将仿真方法分为两类：

- 数学仿真
- 物理仿真





数学仿真

是在计算机上对卫星动力学系统的数学模型进行实验。模型包括：

(1) 空间环境模型

(地球卫星：地球引力场、磁场、太阳辐射压、日月引力摄动、大气阻力等；行星际或恒星际飞船：其它星体影响因素)

(2) 卫星轨道姿态运动学和动力学

(3) 导航、制导与控制系统






数学仿真

最关键的问题是能建立精确反映系统性能的数学模型，两种途径：

- 理论建模
- 试验建模

一个复杂动力学系统建模常常需要两种方法并用，理论模型不仅需要通过试验取得相关参数，也有待于通过试验验证和修正。





数学仿真

数学仿真的局限性：

(1) 数学模型很难精确概括实际系统的全部细节，而某些细节的局部误差可能使系统性能发生质的变化；

(2) 某些环境或干扰对部件性能的影响很难建立准确的数学模型。






物理仿真

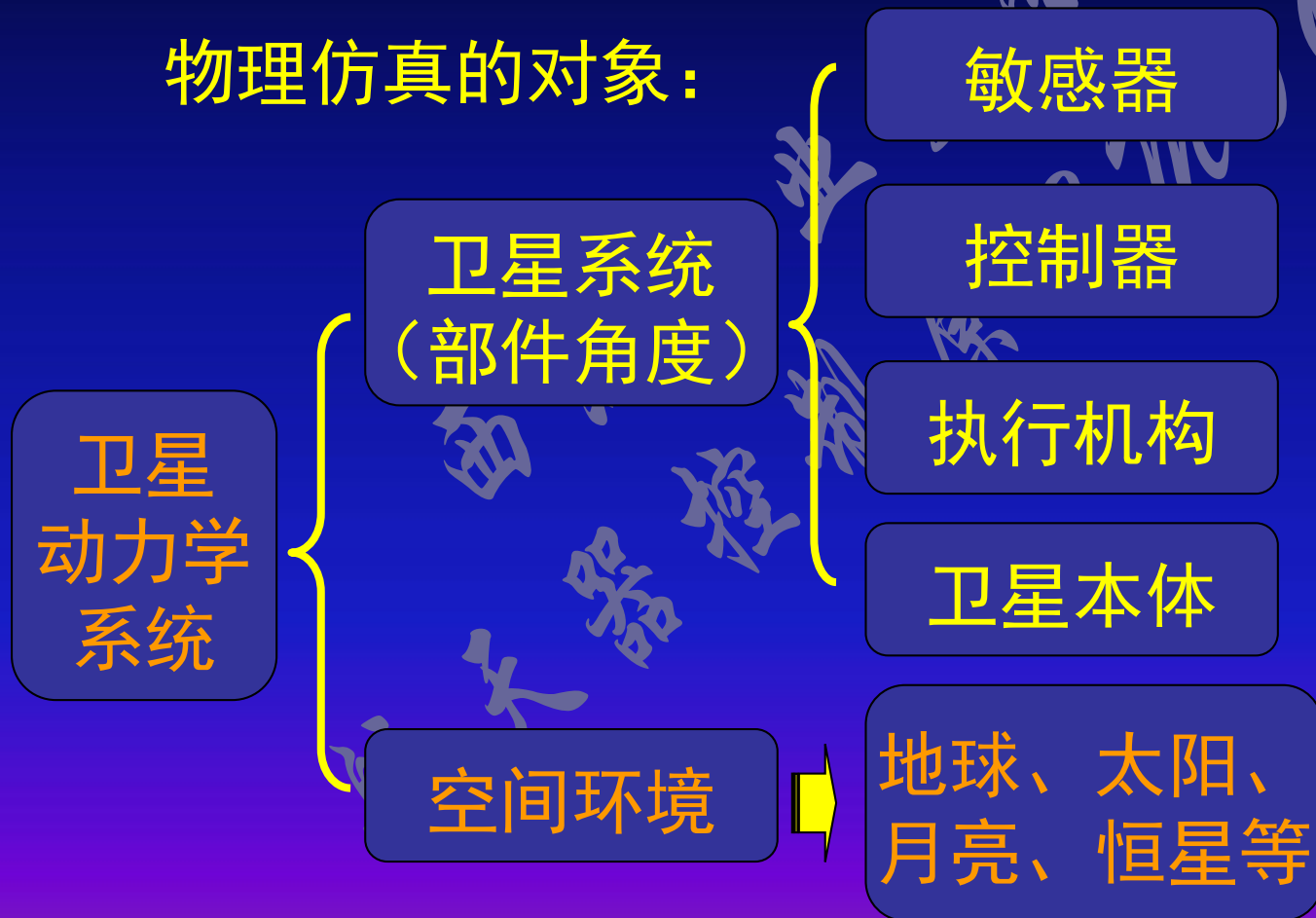
将卫星动力学系统(包括: 敏感器、控制器、执行机构、卫星本体、空间环境)整体或部分用硬件来实现;

一个已研制出来的复杂卫星控制系统在上天之前有必要在地面对它做出综合性能的定量评价, 物理仿真是系统性能鉴定和优化设计的手段。



3、航天器物理仿真技术

物理仿真的对象：






航天器物理仿真技术

物理仿真中，卫星本体的模型由运动模拟器来实现；

运动模拟器是用来模拟卫星运动的仿真设备，分为两类：

- 转台
 - 气浮台
- 

转台

转台仅能模拟卫星的姿态运动；
根据用途不同转台分为单轴、两
轴、三轴几种形式。

单轴转台



转台

卫星仿真主要用三轴转台，敏感器安装在转台内框的安装平台上，就能测量转台的姿态变化；

三轴转台各个框架的运动受仿真计算机的控制。




三轴转台



转台

用转台来模拟卫星姿态运动时，
可以将控制系统执行机构和姿态敏感器硬件接入到仿真回路，需要借助仿真计算机完成：

- (1) 解算航天器动力学和运动学模型，进行坐标变换；
 - (2) 通过接口接收航天器控制系统执行机构输出的控制指令；
 - (3) 控制转台运动。
- 




气浮台

气浮台作为卫星运动模拟器，用来模拟卫星刚性本体；

卫星动力学和运动学的仿真完全由气浮台来实现，不需要仿真计算机解算；

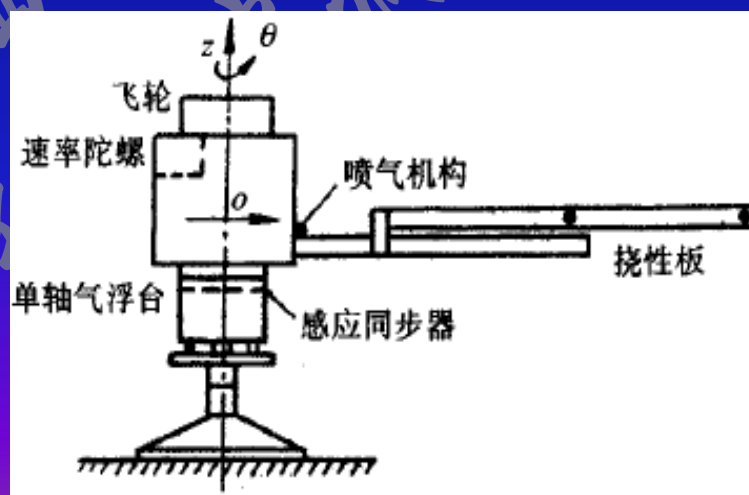
执行机构、敏感器、有效载荷、挠性帆板等直接安装在气浮台上。



气浮台

利用气浮台进行物理仿真是航天器特有的仿真方法。当高压气体从底座通入时，在空气轴承与轴承座之间形成一层气膜，使台体浮起，实现无摩擦相对运动。

挠性卫星
物理仿真
系统






气浮台

气浮台主要用来研究难于建立精确数学模型的部件对控制系统性能的影响，例如飞轮的干摩擦、斜装轮的三轴耦合、太阳帆板挠性等；

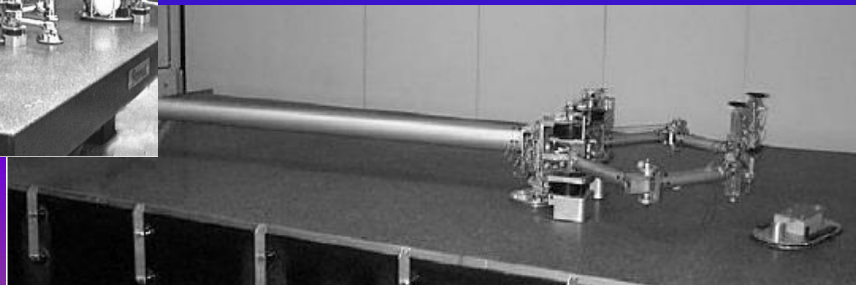
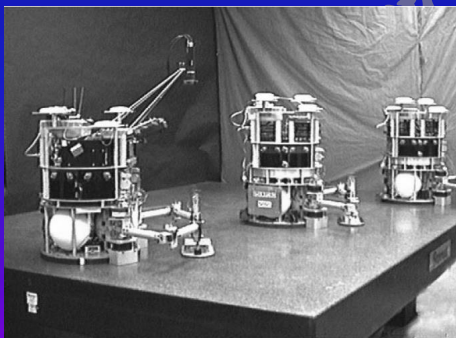
气浮台可以分为三大类：

- (1) 气浮平台
 - (2) 转动气浮台
 - (3) 复合气浮台
- 

气浮平台

气浮平台

气浮平台由平台和漂浮体组成，漂浮体可进行两自由度的平动，也可进行一自由度垂直于台面的转动。






气浮平台

气浮平台的台面通常是玻璃或花岗岩制成，有很高的水平度和平滑度；

大多数情况下，漂浮体自带气体用以产生高压空气垫；

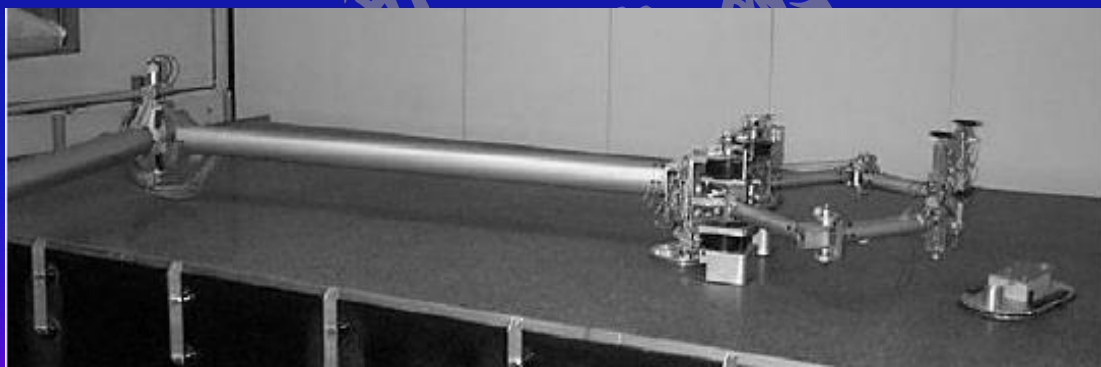
主要用于研究编队飞行、空间抓捕、交汇对接近程导引阶段控制等问题。



斯坦福大学空间机器人实验室 的两链接机械臂

机械臂和目标体可以在光滑花岗岩台面上自由移动 ($1.8\text{m} \times 3.7\text{m}$)

用来研究机器人在轨接近、服务和维修工程中的一些问题

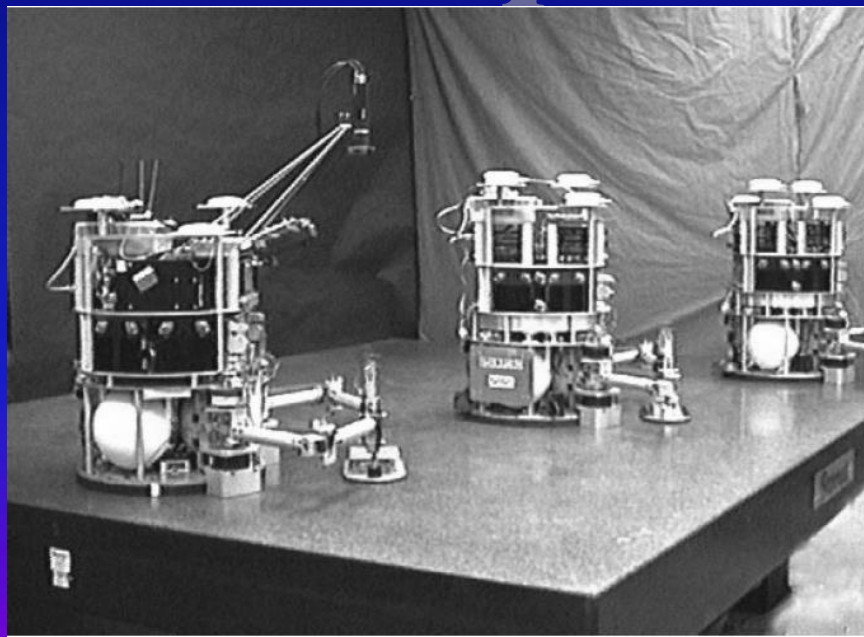


气浮平台举例

斯坦福大学编队飞行实验台

该气浮台包括三个自由飞行的
空间机器人，一个装推力器，两
个装推力器+飞轮

大理石平台 ($2.7\text{m} \times 3.7\text{m}$)



气浮平台举例

西北工业大学精确制导与控制 研究所-大理石平台和智能卫星漂 浮体模拟器

卫星相对运动、编队控制验证

6m×9m平台

推力器+飞轮

精确控制

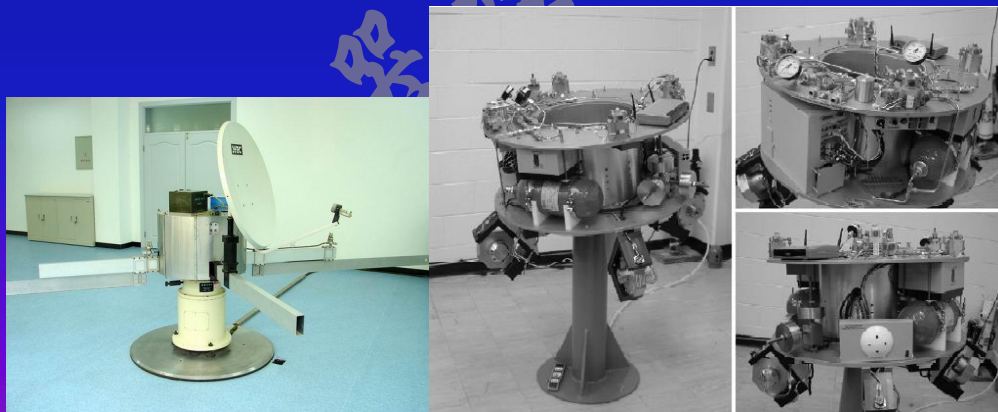


气浮平台举例

转动气浮台

转动气浮台

转动气浮台具有固定基座，可进行单轴或三轴转动，分为单轴气浮台和三轴气浮台两种。



单轴气浮台

单轴气浮台的台体仅能围绕垂直支撑面的轴旋转。



单轴气浮台适用性分析

由航天器姿态动力学方程可知，航天器绕其俯仰轴的运动是近似独立的，故单轴气浮台主要用于模拟卫星俯仰轴的运动。

航天器线性化姿态动力学方程：

$$\begin{cases} M_x = I_x \ddot{\phi} + (I_y - I_z - I_x) \dot{\psi} + (I_y - I_z) \omega_0^2 \phi \\ M_y = I_y \ddot{\theta} \\ M_z = I_z \ddot{\psi} - (I_y - I_z - I_x) \dot{\phi} + (I_y - I_z) \omega_0^2 \psi \end{cases}$$

单轴气浮台适用性分析

当航天器各轴惯量基本相同，而且忽略轨道角速度耦合作用时；

或者航天器绕中心引力体旋转的轨道角速度很小，例如同步轨道；

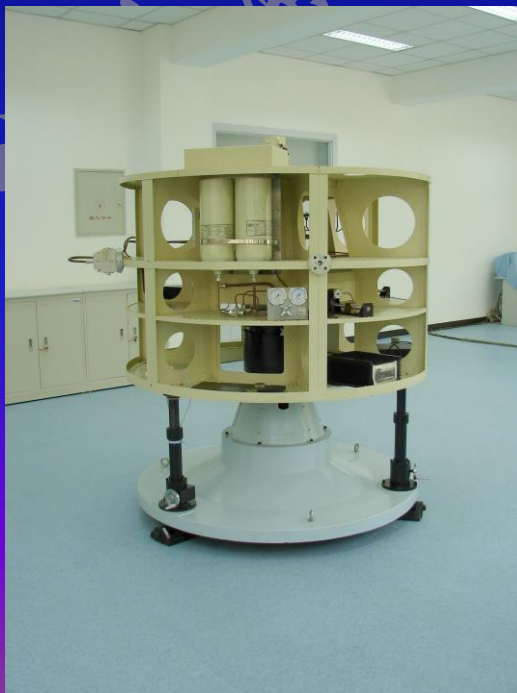
可以得到解耦动力学方程

$$\begin{cases} M_x = I_x \ddot{\phi} \\ M_y = I_y \ddot{\theta} \\ M_z = I_z \ddot{\psi} \end{cases}$$

三个通道运动是独立的，也可用单轴气浮台进行实验

三轴气浮台

三轴气浮台是在单轴转动的基础上又增加了绕平行于支撑面的本体轴的转动。



三轴气浮台



三轴气浮台

世界各国的三轴气浮台可按结构不同分为三类：

伞型三轴气浮台

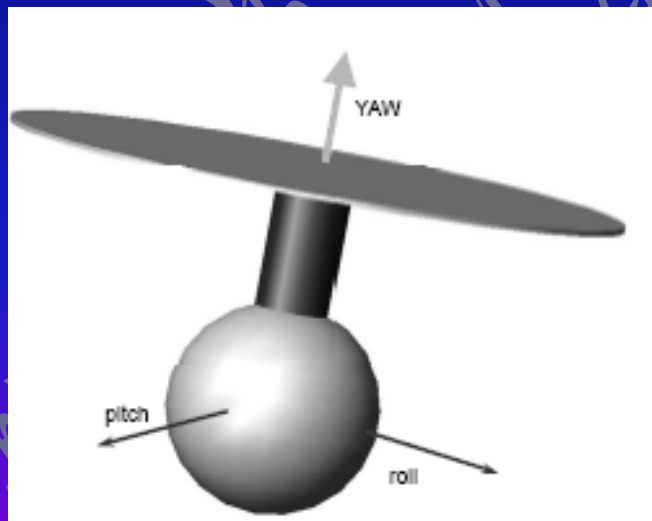
桌面型三轴气浮台

哑铃型三轴气浮台



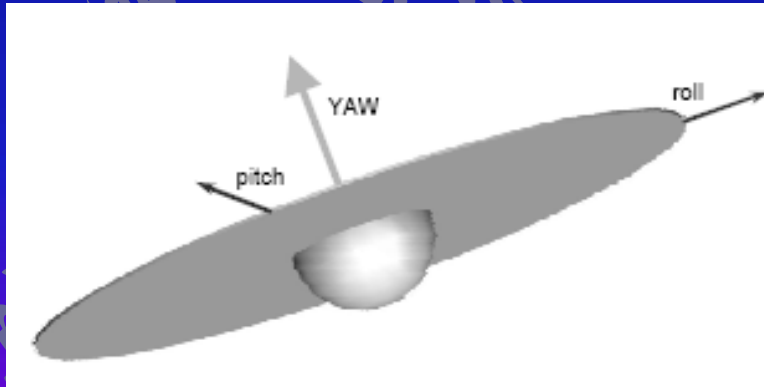
伞型三轴气浮台

伞形气浮台的平台表面通过一根伸长杆连接在整个球形空气轴承上，负载放置在台面外侧。



桌面型三轴气浮台

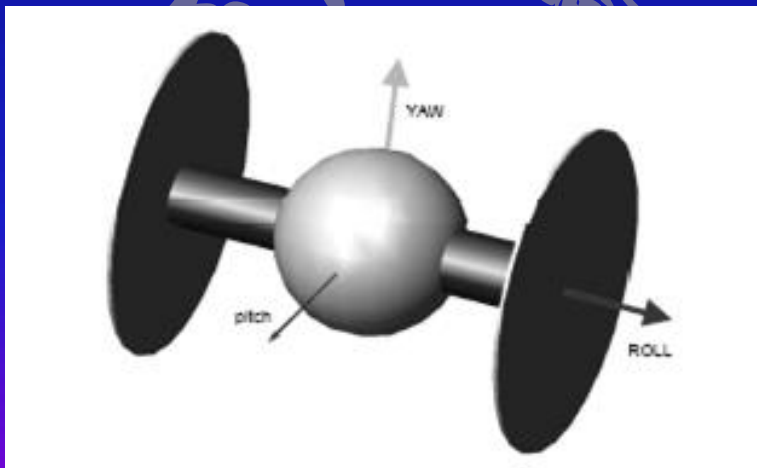
负载平台通常直接安装在半球空气轴承的平面上，各部分的组件放在这个负载平台上。



哑铃型三轴气浮台

负载平台就安装在空气轴承伸长杆的两端。

伸长杆是中空的，里面可以安装两负载平台的通信线路。



哑铃型三轴气浮台

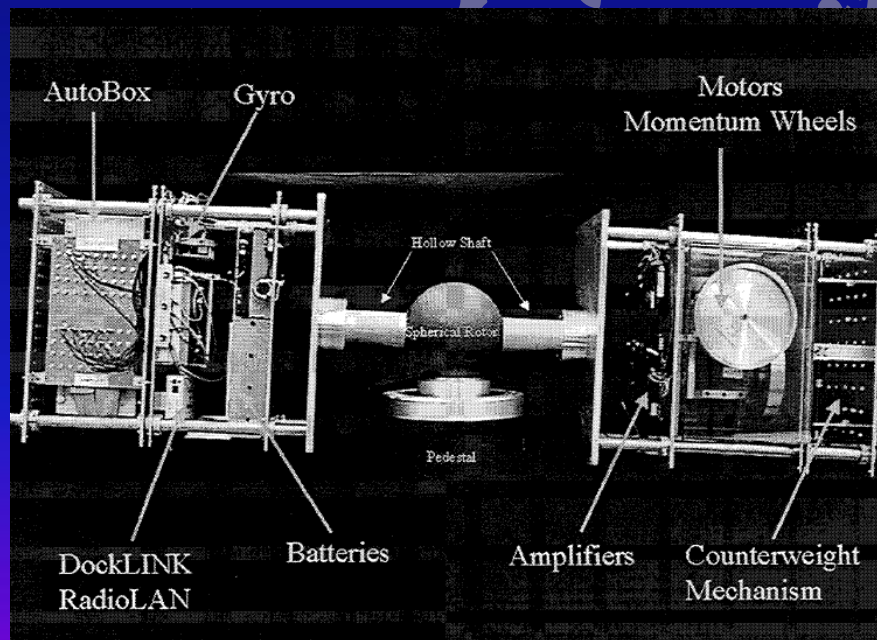
可以绕偏航轴和滚动轴360度自由旋转，这是气浮设备极具意义的创新。

下图是密歇根大学的哑铃型三轴气浮台



哑铃型三轴气浮台

下图是美国空军技术研究所的
哑铃型三轴气浮台





复合气浮台

复合气浮台

复合气浮台是上述两种类型气浮台的结合。包括平面和转动运动，可以提供六个完整的自由度。

复合型气浮台主要用于航天器交汇对接和编队飞行等试验中。



复合气浮装置

NASA的喷气推进实验室（JPL）
开发的具有五自由度的气浮台
（平面两个自由度的运动，桌面
型三轴气浮台，具有三自由度的
转动运动）






气浮台

气浮台作为动力学设备，要根据特定卫星系统仿真要求来设计。

物理仿真对气浮台的要求：


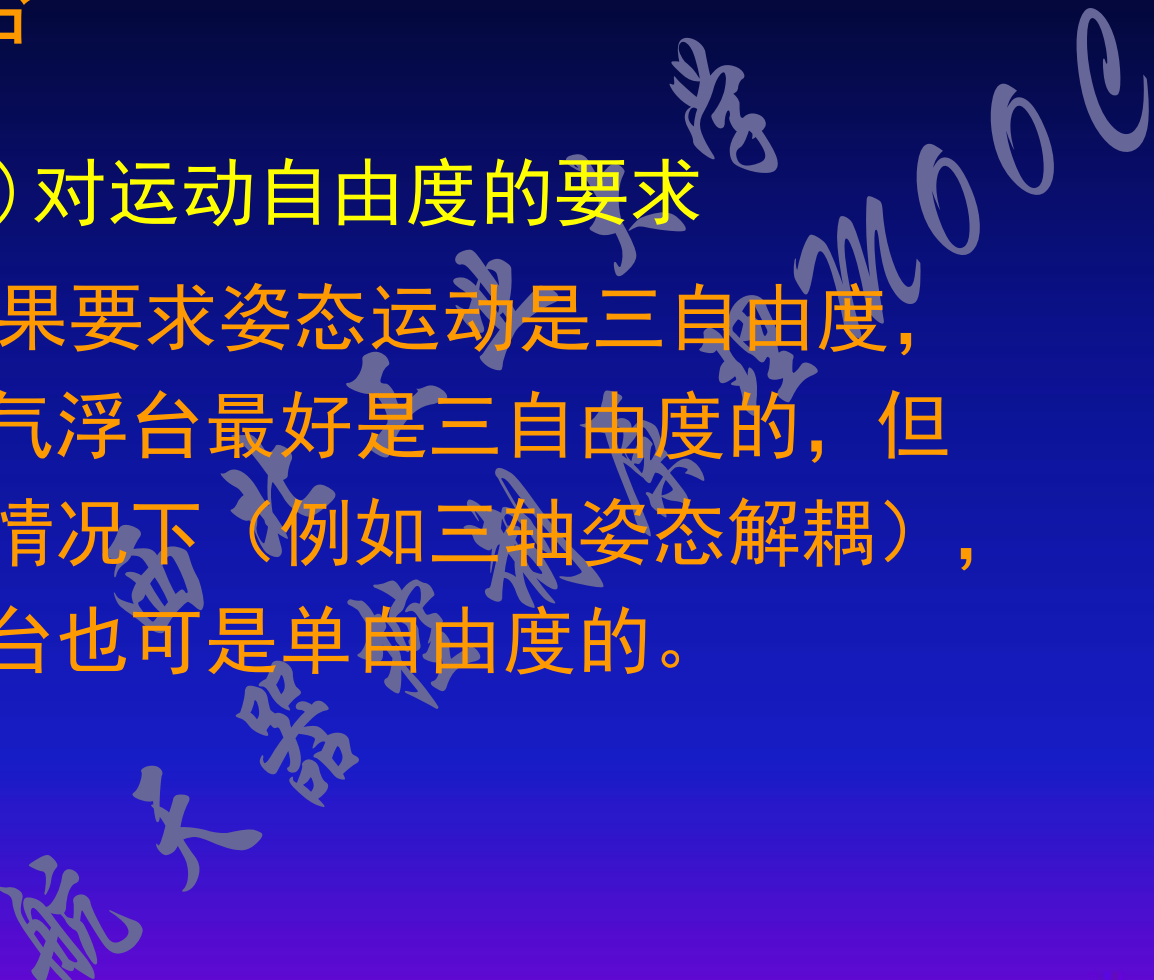
- (1) 对运动自由度的要求
 - (2) 对气浮台承载能力的要求
 - (3) 气浮台各轴转动惯量要求
 - (4) 气浮台各轴干扰力矩要求
 - (5) 气浮台连续工作时间要求
 - (6) 对气浮台角位置测量要求
- 



气浮台

(1) 对运动自由度的要求

如果要求姿态运动是三自由度，
一般气浮台最好是三自由度的，但
有些情况下（例如三轴姿态解耦），
气浮台也可是单自由度的。


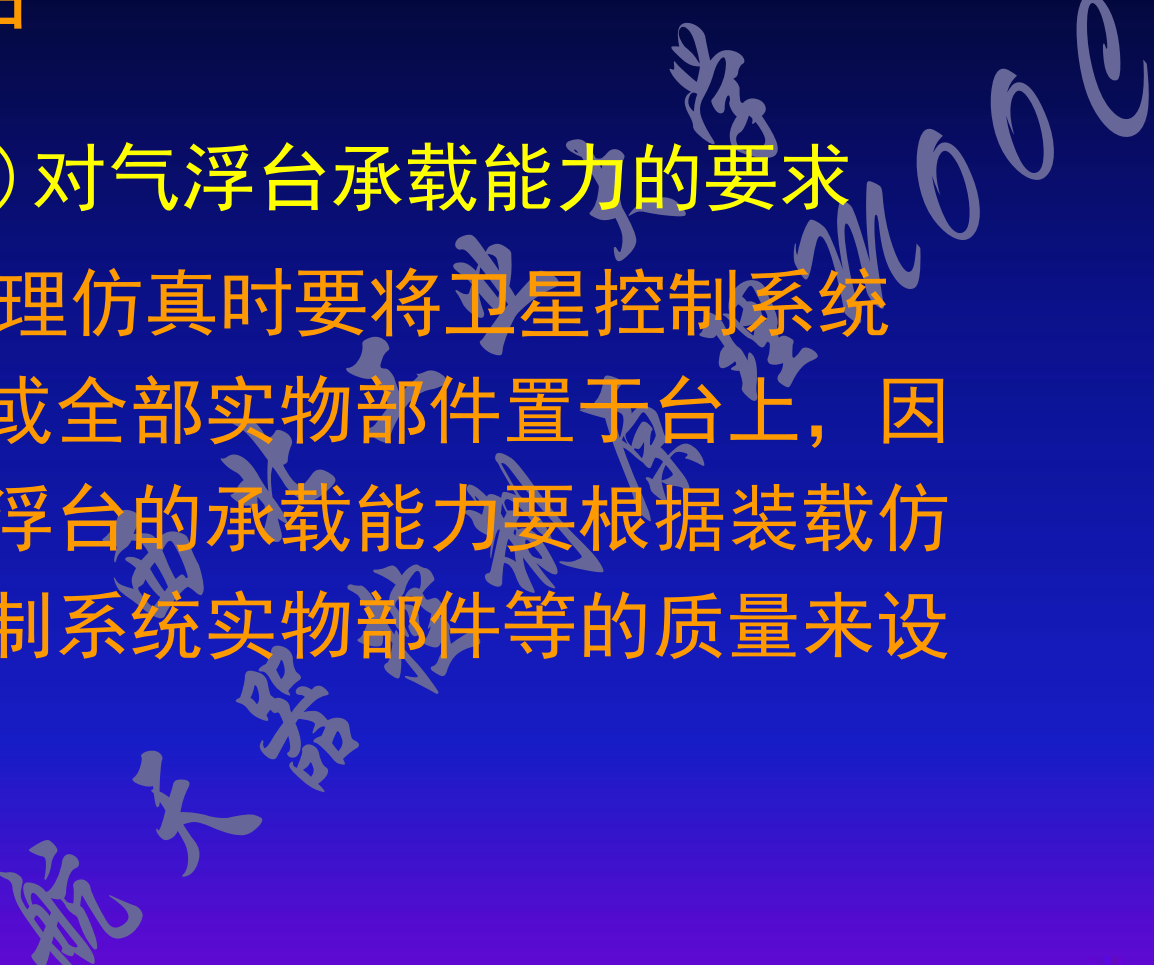




气浮台

(2) 对气浮台承载能力的要求

物理仿真时要将卫星控制系统部分或全部实物部件置于台上，因此气浮台的承载能力要根据装载仿真控制系统实物部件等的质量来设计。


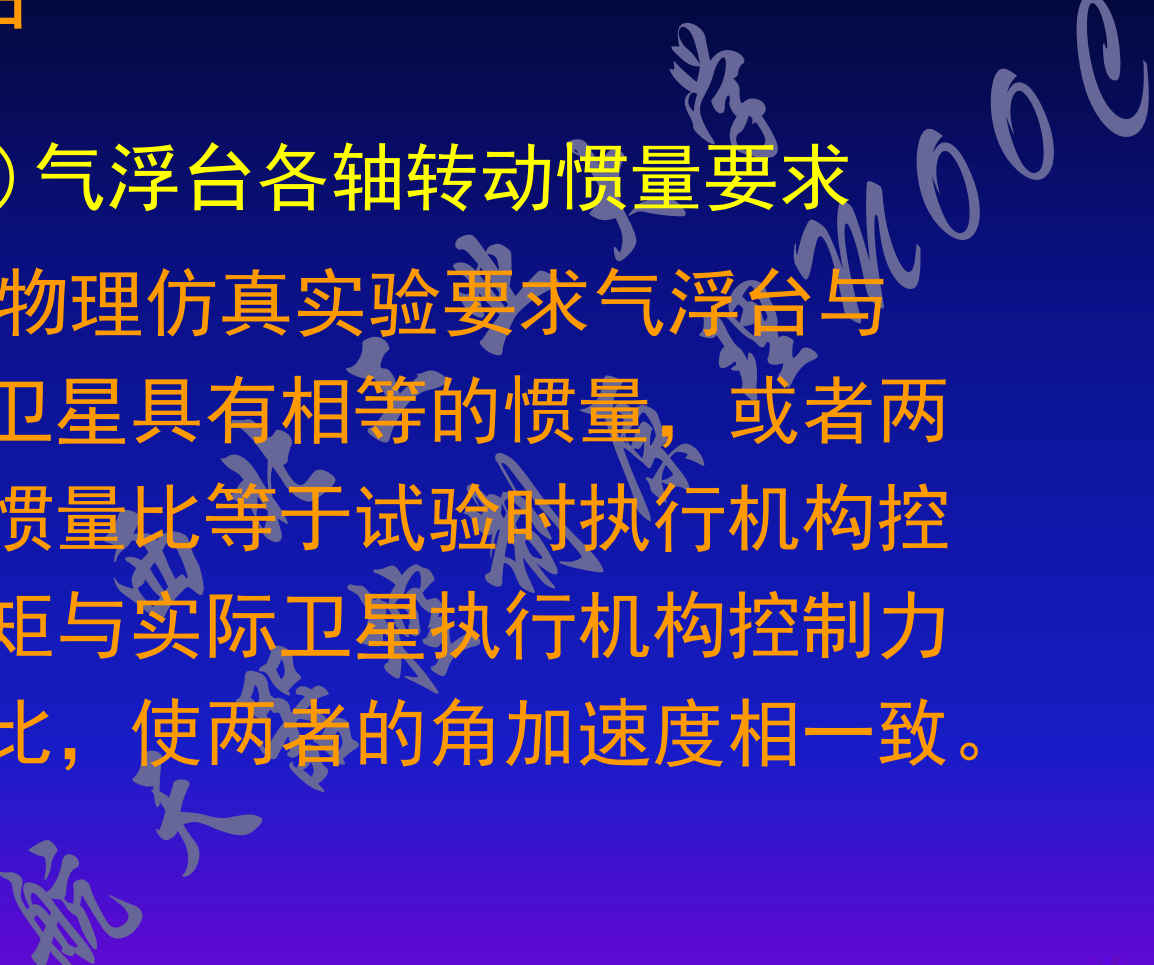




气浮台

(3) 气浮台各轴转动惯量要求

全物理仿真实验要求气浮台与实际卫星具有相等的惯量，或者两者的惯量比等于试验时执行机构控制力矩与实际卫星执行机构控制力矩之比，使两者的角加速度相一致。






气浮台

(4) 气浮台各轴干扰力矩

物理仿真中作用在气浮台各轴的干扰力矩值应尽可能小。


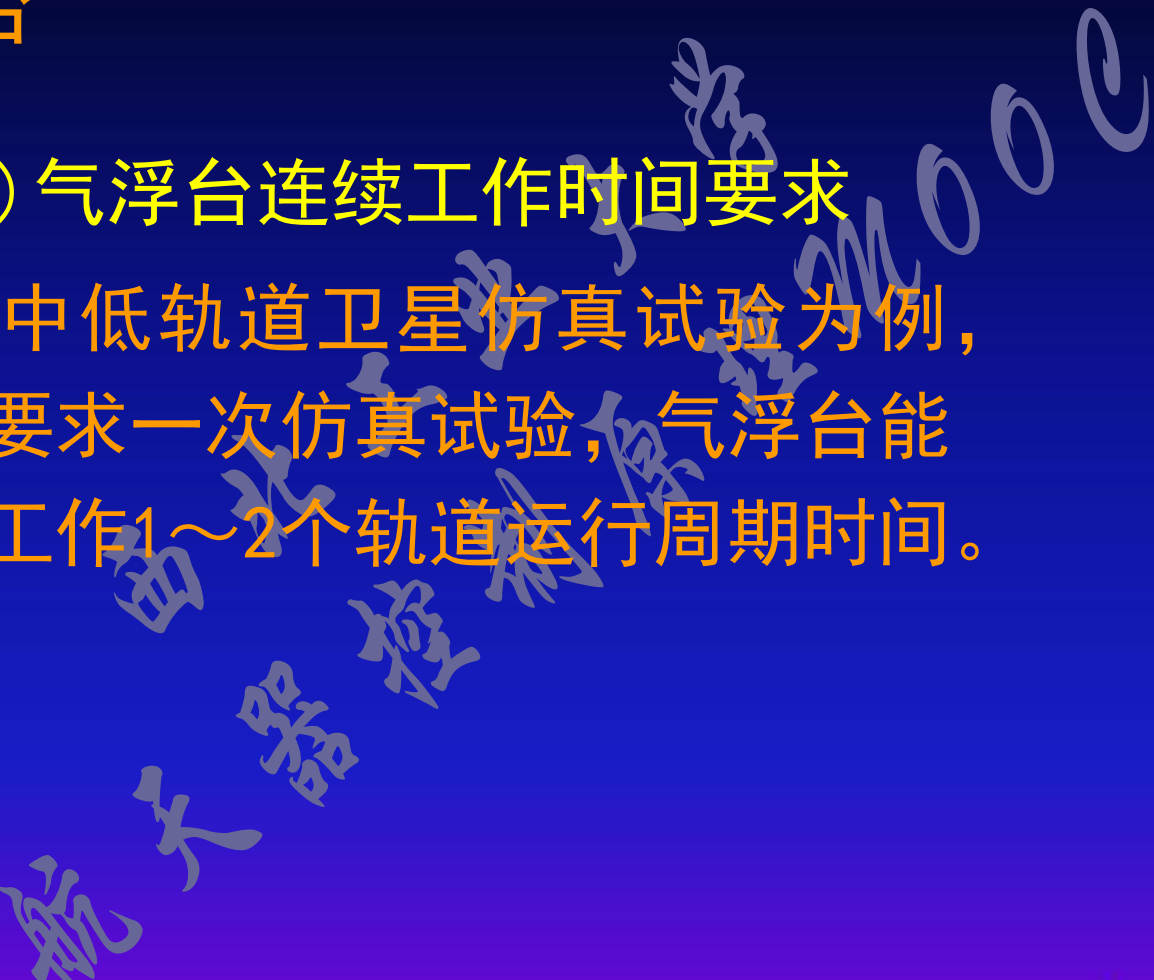
- ✓ 一般模拟中、高轨道卫星时，各轴干扰力矩在数量级 $10^{-4}\text{N}\cdot\text{m}$ ；
 - ✓ 模拟低轨道卫星时，各轴干扰力矩可在 $10^{-3} \sim 10^{-2}\text{N}\cdot\text{m}$ 之间。
- 



气浮台

(5) 气浮台连续工作时间要求


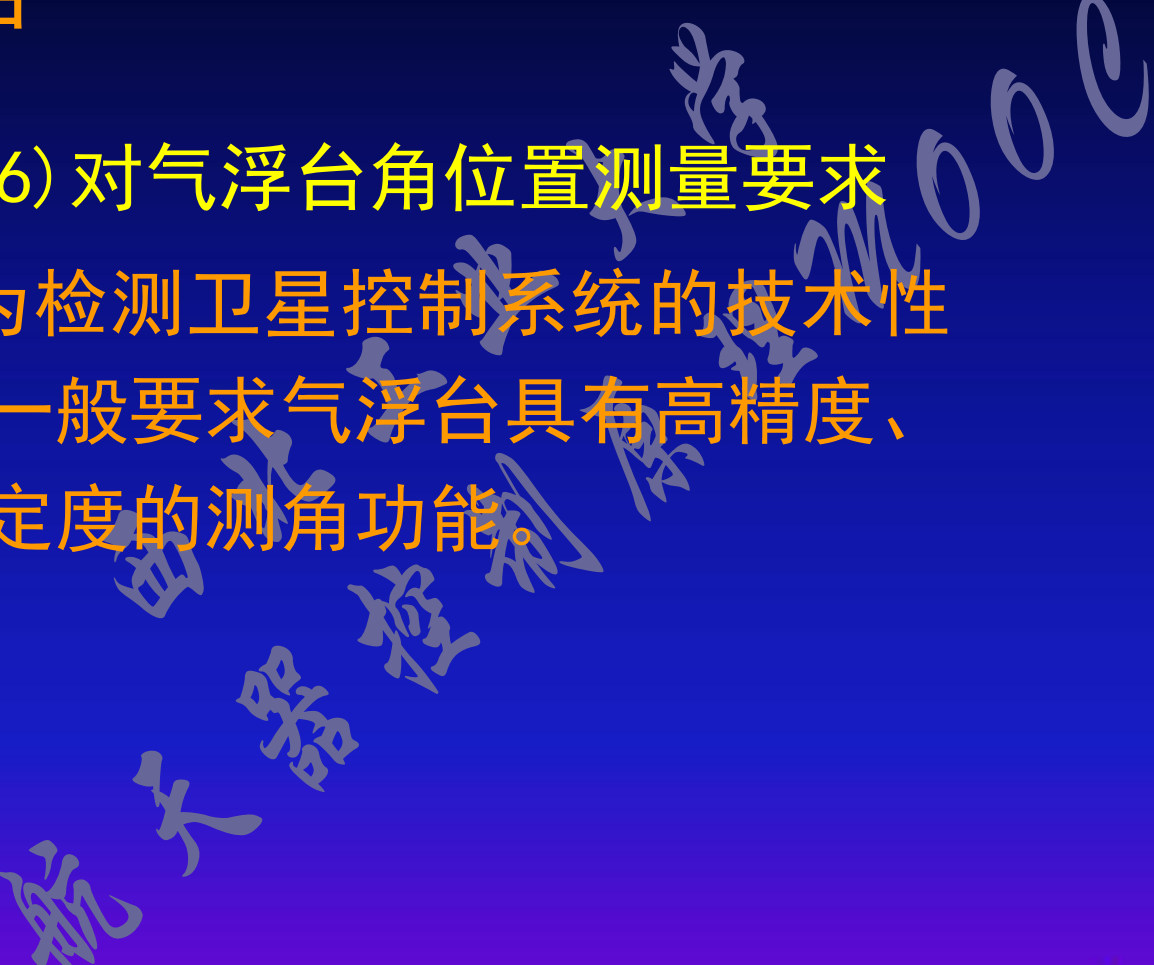
以中低轨道卫星仿真试验为例，一般要求一次仿真试验，气浮台能连续工作1~2个轨道运行周期时间。





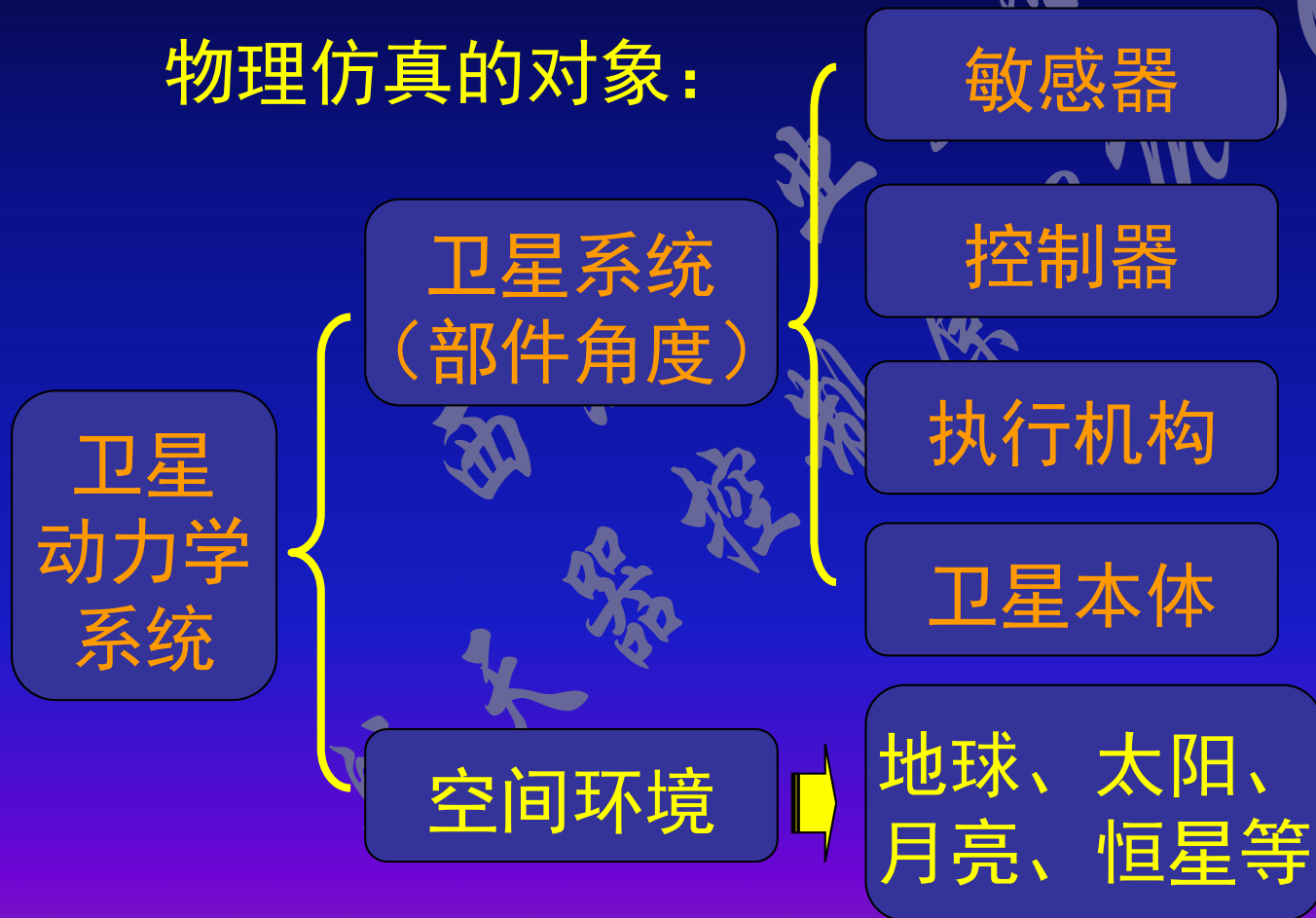
气浮台

(6) 对气浮台角位置测量要求
为检测卫星控制系统的技术性能，一般要求气浮台具有高精度、高稳定度的测角功能。



3、航天器物理仿真技术

物理仿真的对象：






微重力环境

(1) 航天器处于失重的环境，
如何模拟失重：

气浮台支撑力=重力；
重力不做功。

(2) 干扰力矩

大气扰动力矩，电源线，重力
干扰等(卫星干扰力矩量级 10^{-5} ，
实验室里的量级大于这个值)。





空间环境

敏感器需要敏感相应的目标才能正常工作，因此，实验室条件下，需要建立各种模拟器来模拟敏感器所敏感的对象

例如：太阳模拟器、地球模拟器、星模拟器。



空间环境

举例1：太阳模拟器

模拟太阳光辐射的一种设备


理想的太阳模拟器在辐射度、光谱分布、光稳定性、均匀性等方面应与真实太阳相同。





空间环境

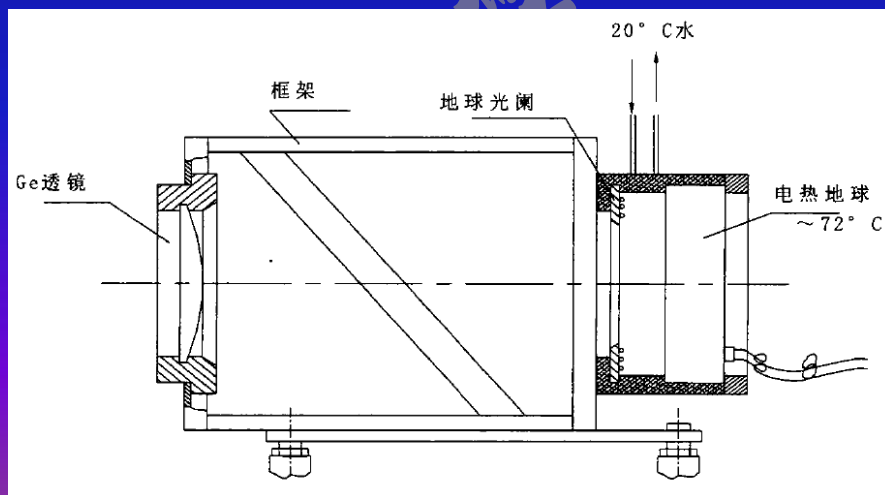
物理仿真中，需保证：

- ✓ 准直角(太阳发光面对地球上任意点的张角) $32' \pm 0.5'$ ；
 - ✓ 辐照强度0.1-0.2太阳常数
(日地平均距离处地球大气层外的太阳光谱总辐射量) ；
 - ✓ 均匀性优于5%；
 - ✓ 稳定性优于 $\pm 2\%$ 。
- 

空间环境

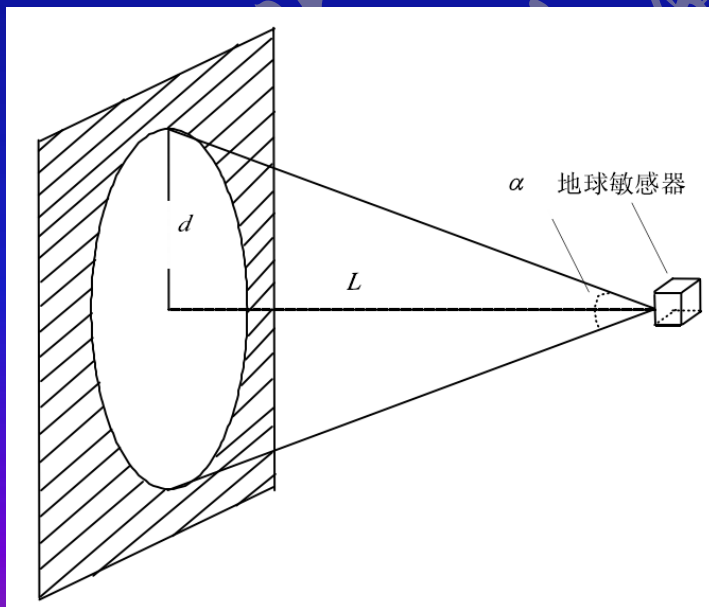
举例2：地球模拟器

用与地球红外光谱辐射特性相同的黑体光源来模拟真实地球所形成的空间辐射环境，并能实现地球弦宽(张角)的变化。



空间环境

用于摆动扫描式或静态地球敏感器的地球模拟器大都做成圆盘形，圆盘直径与卫星轨道高度成反比。






空间环境

用于圆锥扫描地球敏感器的地球模拟器做成平板形，用一个扇形加热区模拟地球辐射，扇形的张角要与卫星在轨道上的位置至地球外圆切线形成的张角一致；

地球模拟器通过热壁与冷壁（背景）的温差来实现地球辐射仿真。






空间环境

举例3：星模拟器

早期的星模拟器大多做成平行
光管形式，只能产生单颗或数颗恒
星光源；

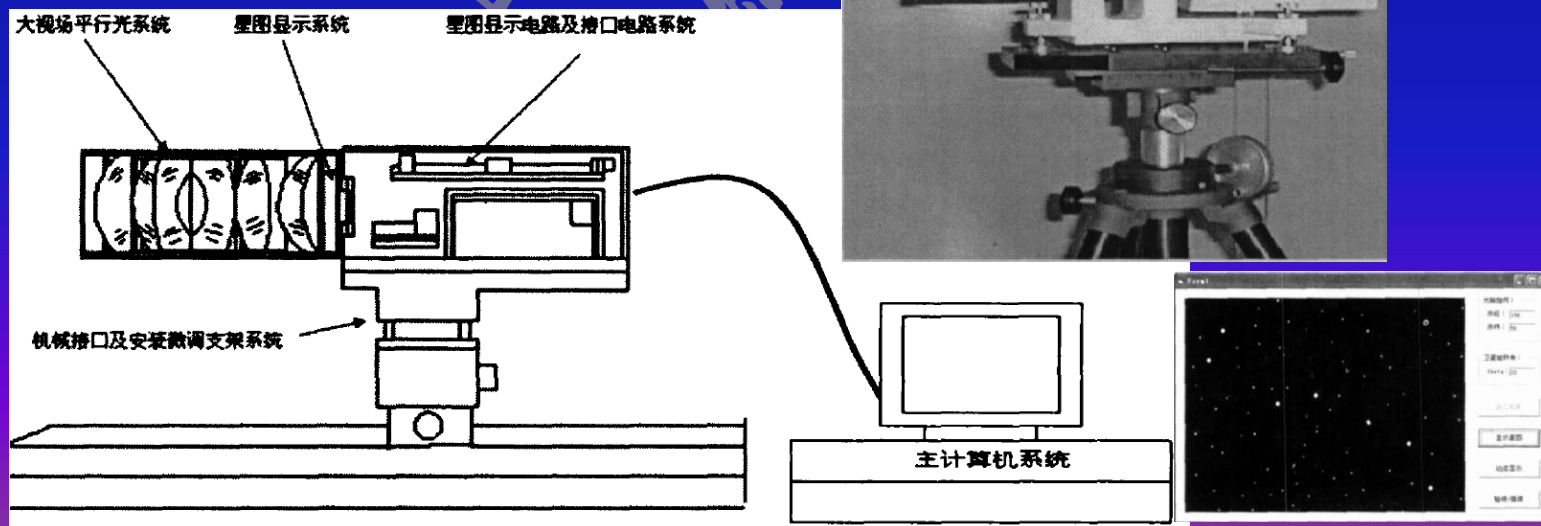


航天器控制原理

空间环境

近年采用液晶屏幕或液晶光阀来实现星图仿真，通过计算机软件编程得到整个天球的星图。

小型动态星模拟器





空间环境

太阳模拟器、地球模拟器、星模拟器等的运动均需要仿真计算机来控制。





3、航天器物理仿真技术

对仿真计算机的要求

由于要求硬件接入回路，物理仿真计算机需要具备两个特点：

(1) 实时性

即，计算机的库程序、I/O服务、操作系统等都应为实时的；





3、航天器物理仿真技术

对仿真计算机的要求

(2) 足够的I/O能力

即，具有高速数据接口，并行
A/D、D/A转换，以支持试验过程中
大量的信息交换。

