



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](mailto: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



# 航天器姿态控制系统的组成与分类

01

姿态敏感器

02

执行机构

03

控制器——星载控制计算机

04

姿态控制系统的任务与分类



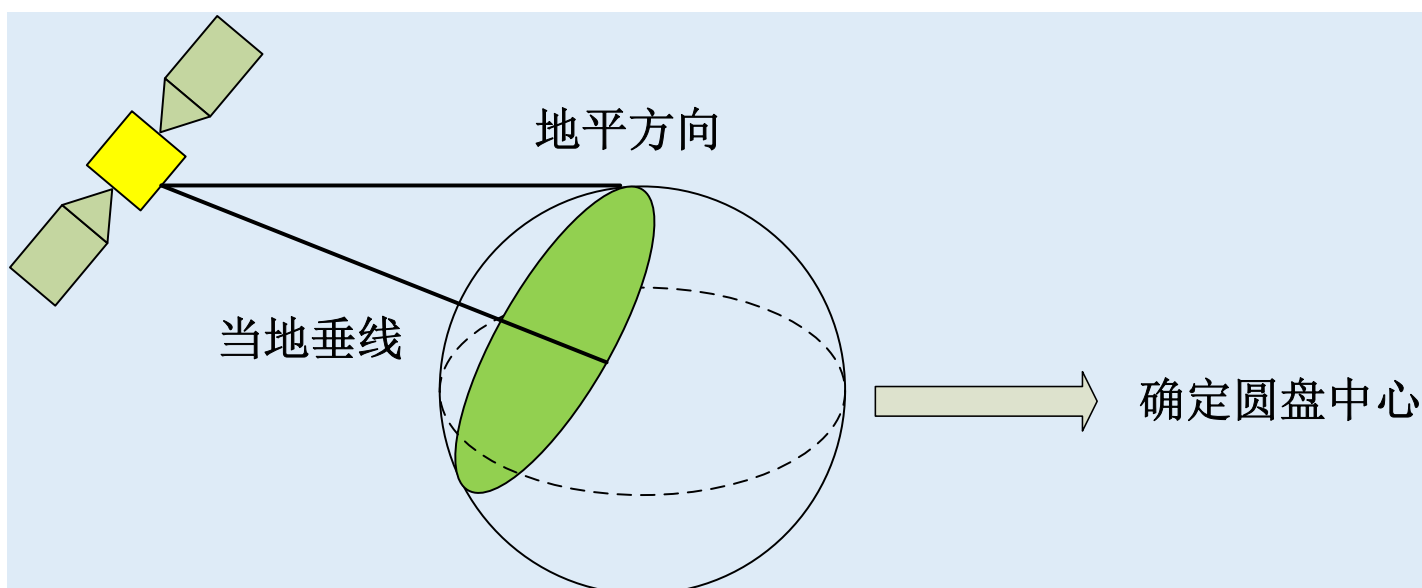
# 第一讲 · 姿态敏感器

- 01 太阳敏感器
- 02 红外地平仪
- 03 星敏感器
- 04 陀螺
- 05 加速度计
- 06 磁强计
- 07 射频敏感器
- 08 姿态敏感器小结



## 2、红外地平仪

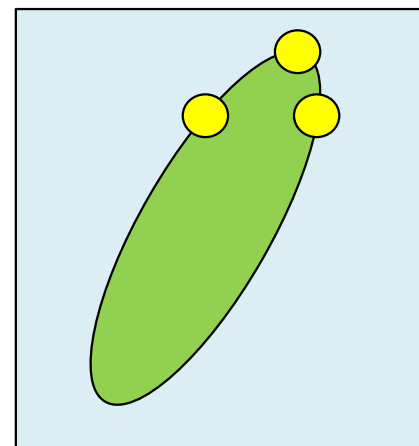
- 红外地平仪是利用地球自身的红外辐射来测量航天器相对于当地垂线或者当地地平方位的姿态敏感器，简称地平仪。





## 地球扫描 敏感方案

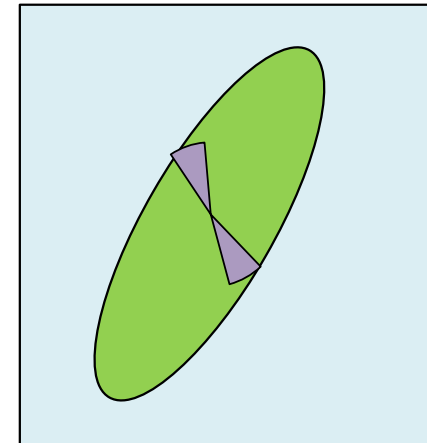
- 确定边缘上的三个点，从而确定中心
- 实质是边缘敏感
- 敏感器视场能够对地球进行扫描运动





## 地球热辐射平衡 敏感方案

- 测量覆盖地球圆盘边缘若干小区域的辐射通量
- 当两小块区域辐射通量相等时，地球圆盘中心必定位于两区域中心的垂直平分线上





- 地球辐射由对太阳辐射的反射辐射和地球及大气系统的自身辐射两部分组成。
- 反射辐射主要是在可见光谱部分，最大光谱亮度在**0.5**微米波长处；
- 自身辐射主要是在红外光谱部分，最大光谱亮度约在**10**微米波长处。





- 地球辐射红外波段的主要特征：
  - 辐亮度变化比可见光小得多；
  - 辐亮度高的红外波段其可见光辐亮度比较低；
  - 研究表明，地球大气系统在红外波段确定的地平圈是比较稳定的。
  
- 对地平辐射的波动影响最大的因素是温度的起伏变化、吸收气体混合比的变化以及云层的影响。



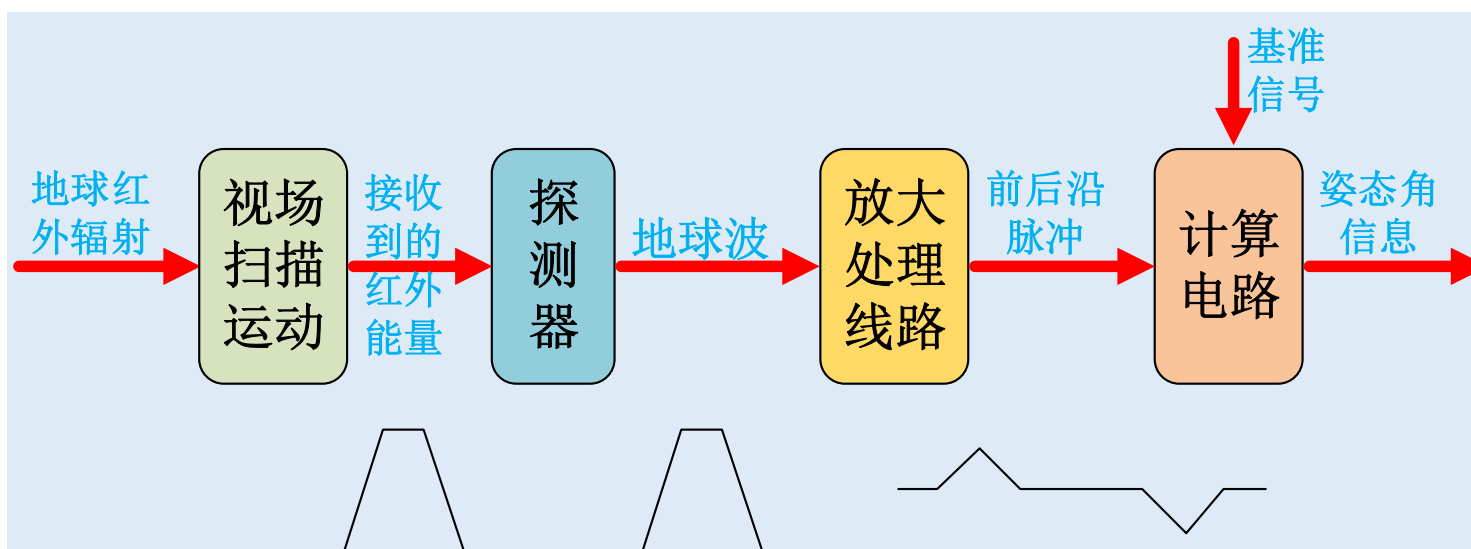
- 地球敏感器的工作波段应选择二氧化碳15微米的吸收带。主要原因：
  - 温度波动的影响较小
  - 对水蒸气和云层辐射起伏扰动有很好的屏蔽能力
  - 地平辐射分布具有较大梯度
  - 符合当前红外技术水平，可供实用。



- 主要形式：
  - 地平穿越式
  - 边界跟踪式
  - 辐射热平衡式
- 地平穿越式地平仪扫描视场大，可用于大范围的姿态测量，但精度略低。
- 其余两种地平仪的工作视场较小，只能适用于小范围的姿态测量，但精度较高。

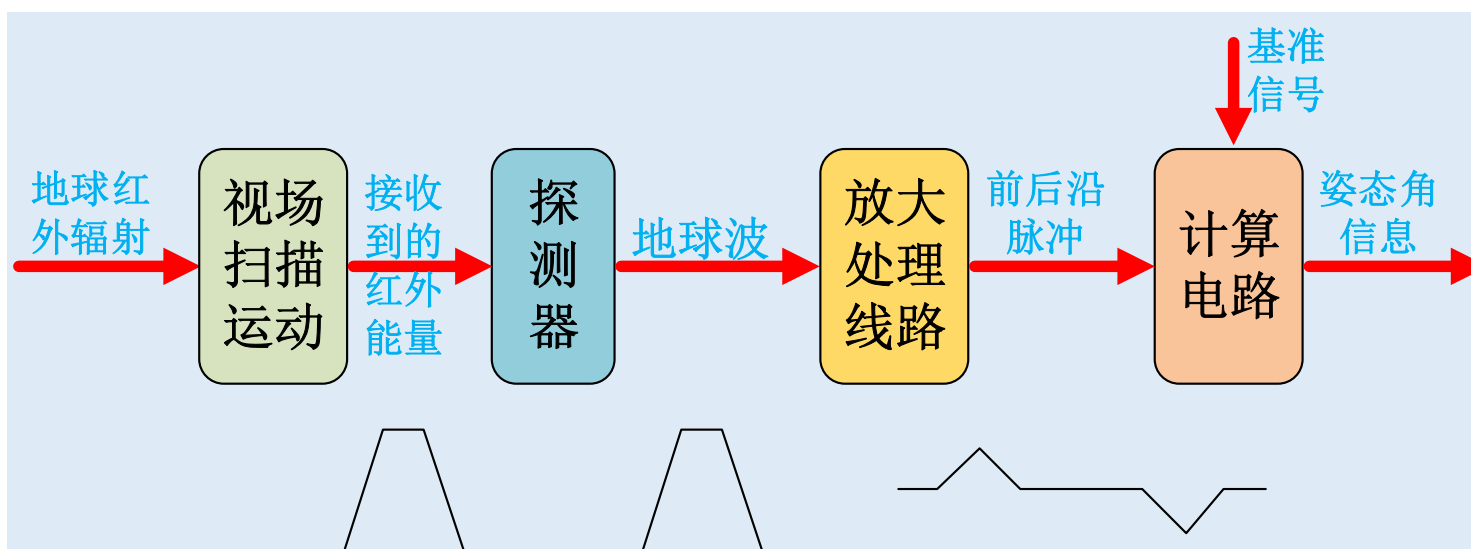


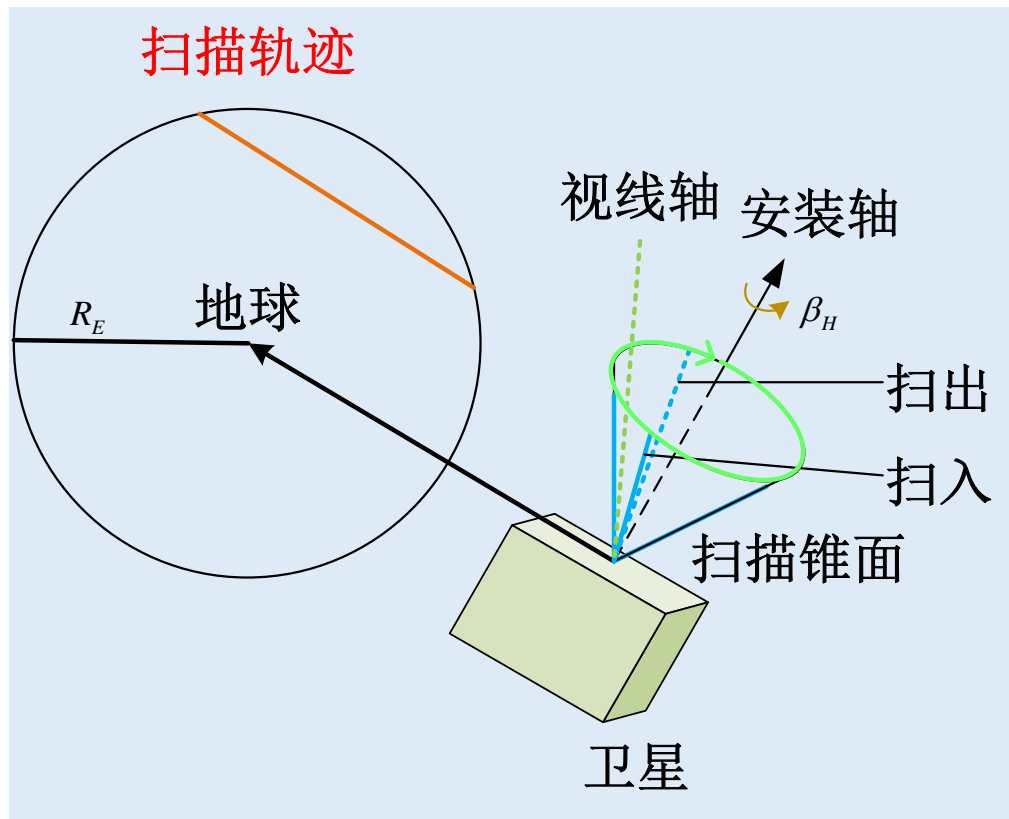
- 地平穿越式地平仪的视场相对于地球作扫描运动。当视场穿越地平线时，地平仪接收到的红外辐射能量发生跃变，经过热敏元件探测器把这种辐射能量的跃变转变成电信号，形成地球波形。然后通过放大和处理电路，转变成前后沿脉冲。最后通过计算电路与姿态基准信号进行比较，得出姿态角信息（滚动角或俯仰角）。



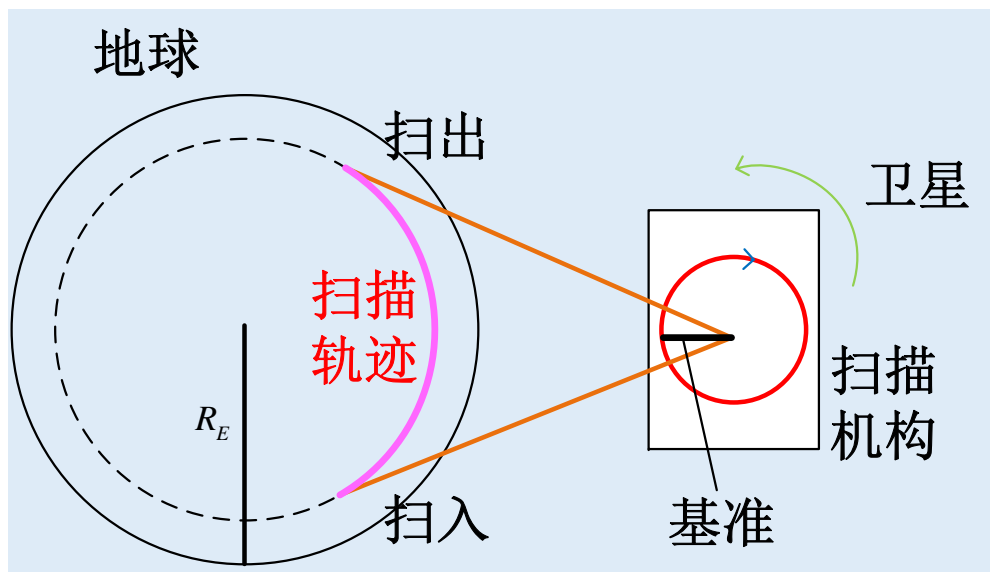


- 穿越式地平仪常见有两种形式：圆锥扫描地平仪和自旋扫描地平仪。  
前者依靠地平仪的扫描机构，后者依靠航天器旋转。

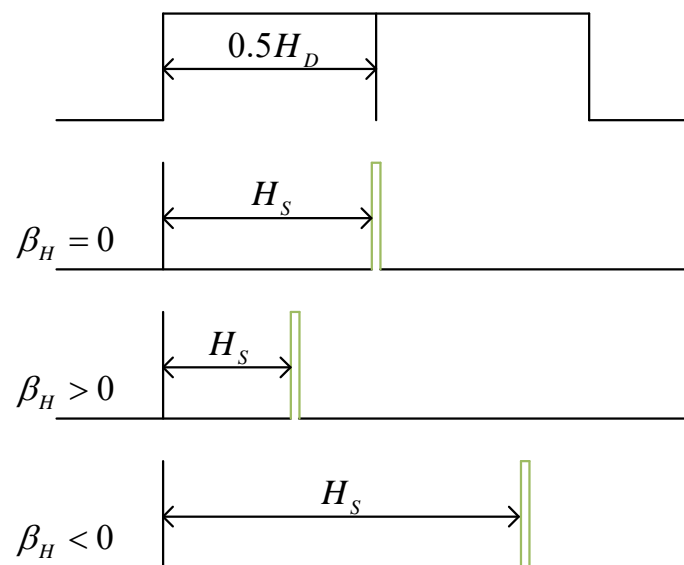


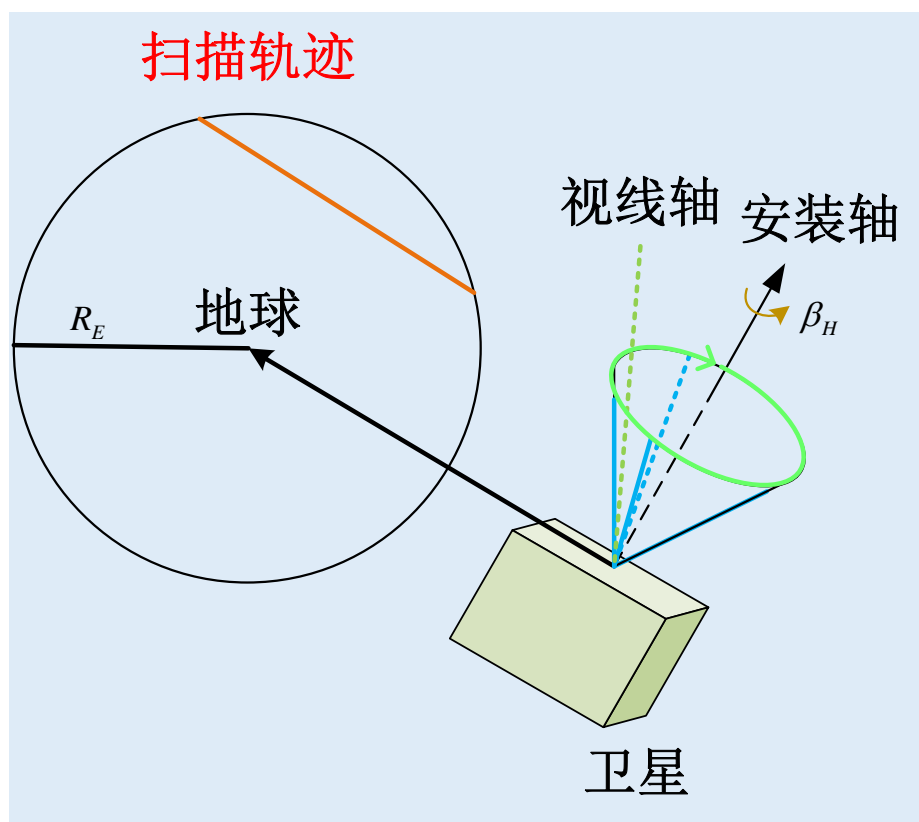


三轴稳定卫星圆锥扫描安装图



三轴稳定卫星圆锥扫描原理





$$\beta_o = \frac{t_s - t_o}{T} \times 360^\circ$$

$$H_s = \frac{t_s - t_i}{T} \times 360^\circ = \beta_i$$

$$H_D = \frac{t_o - t_i}{T} \times 360^\circ = -\beta_o + \beta_i$$

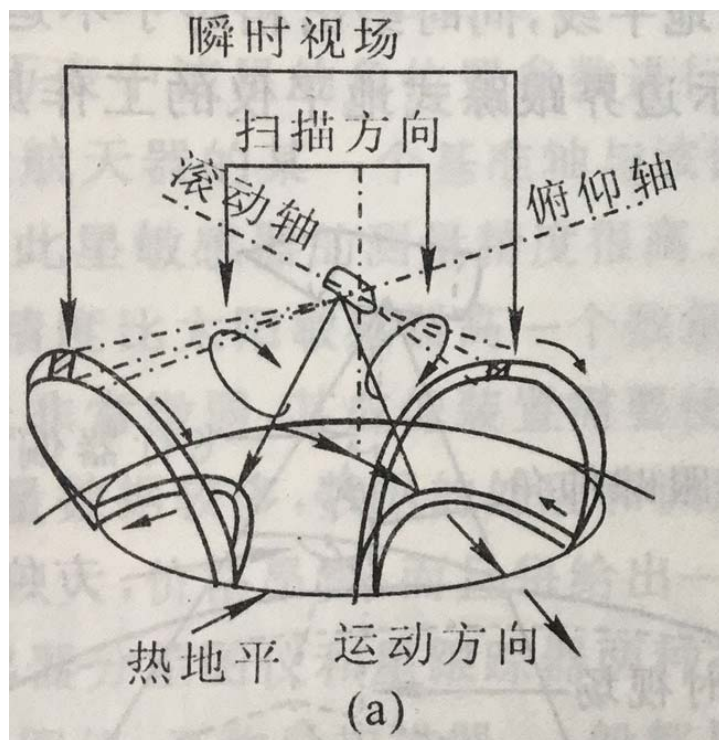
$$\beta_H = 0.5H_D - H_s = -0.5(\beta_o + \beta_i)$$

三轴稳定卫星圆锥扫描求解

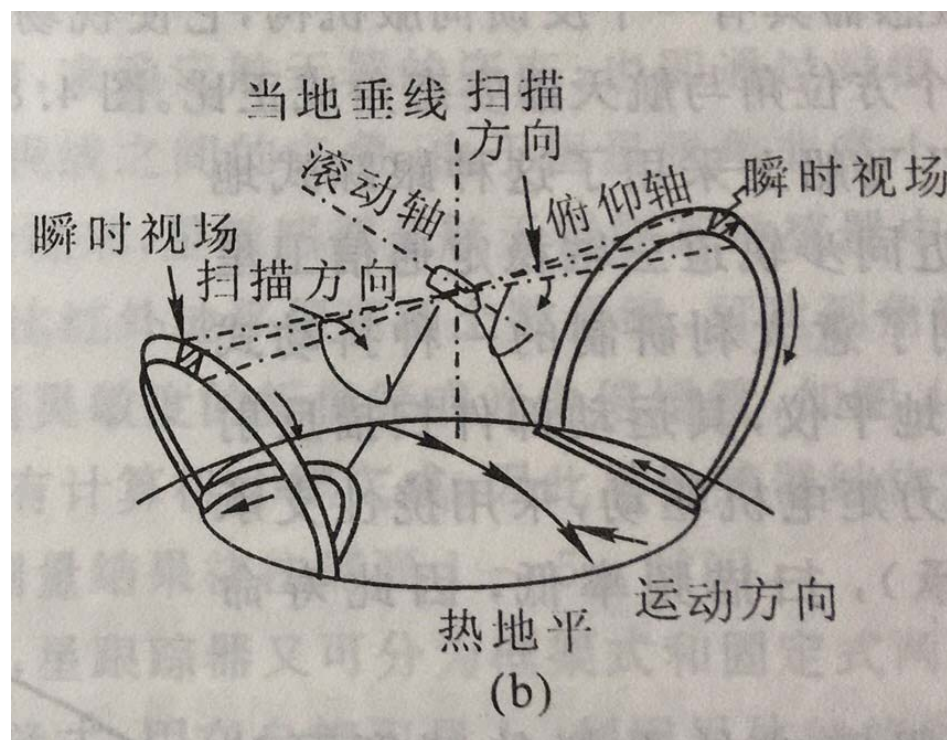




- 一个圆锥扫描地平仪只能确定一个姿态角，因此要确定航天器相对于当地垂线或地平的两个姿态角就需要两个地平仪。



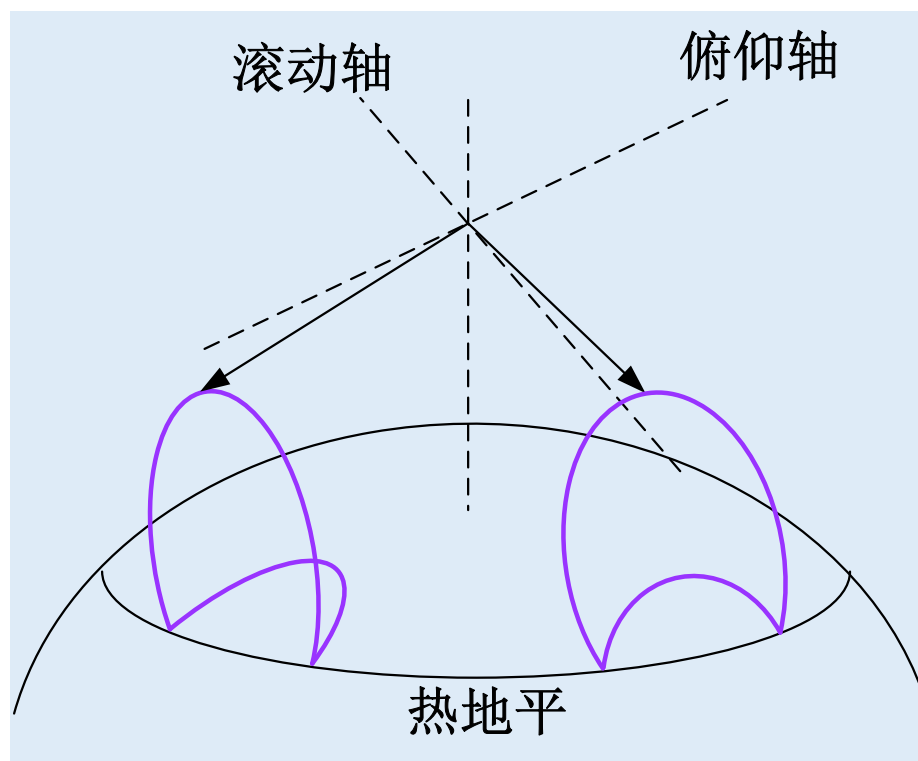
垂直安装



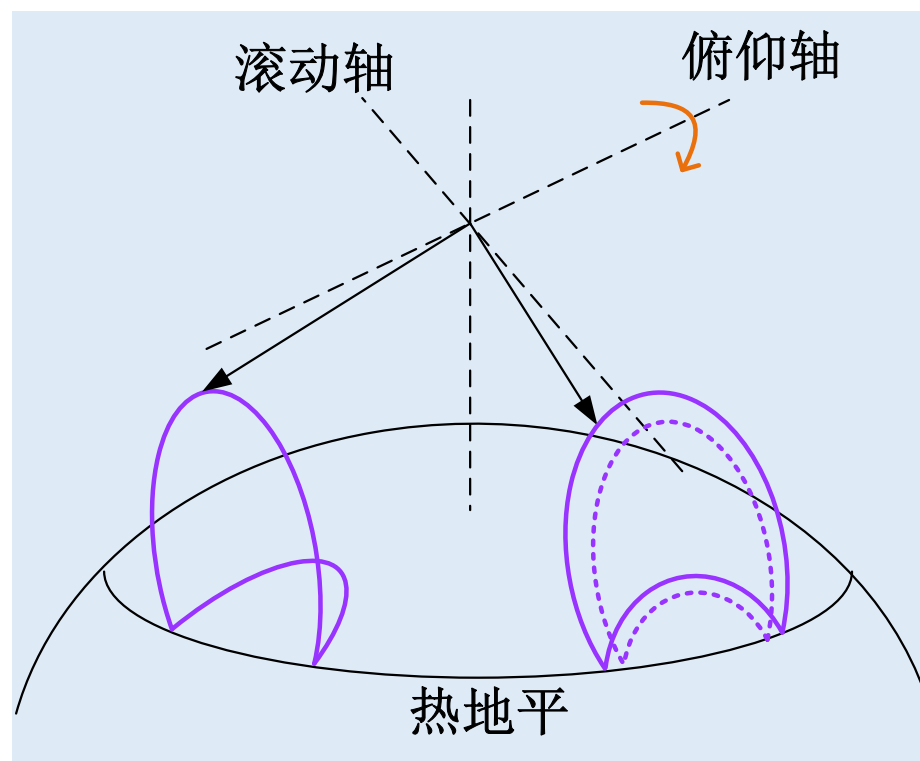
共面安装



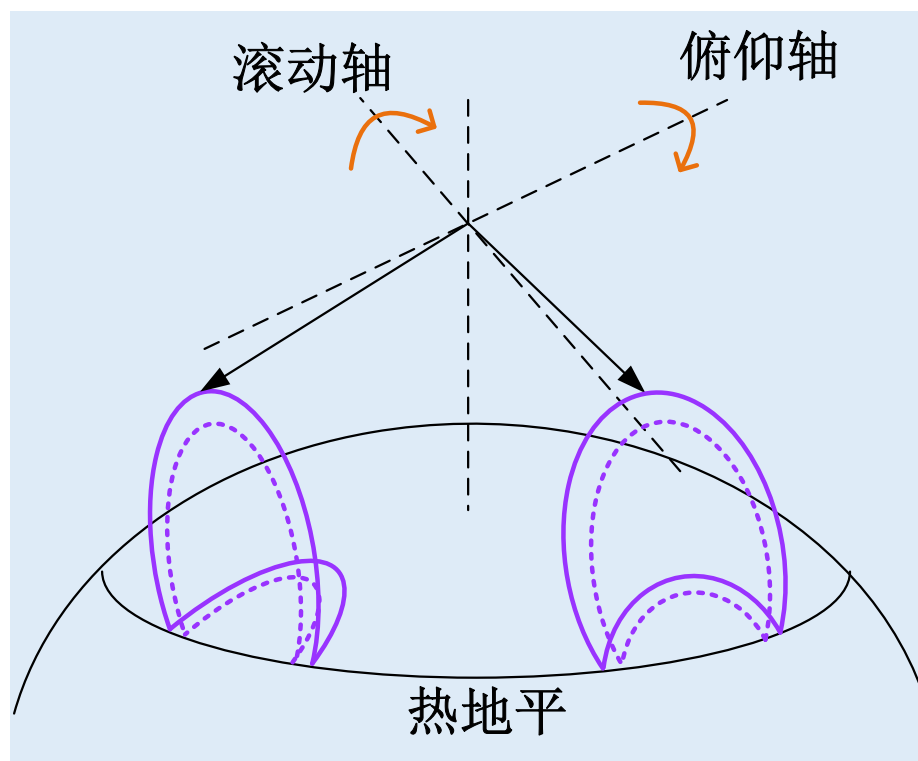
- 垂直安装是指在航天器的滚动轴和俯仰轴方向设两个相同的圆锥扫描地平仪，扫描轴相隔90度。



垂直安装，可以直接获取姿态角



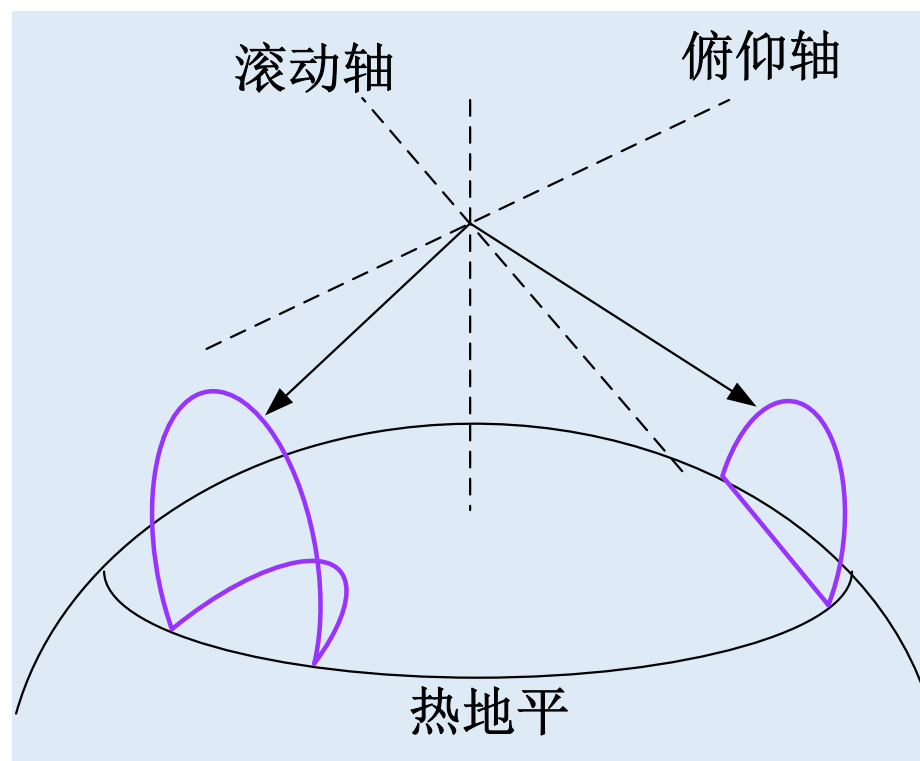
垂直安装，可以直接获取姿态角



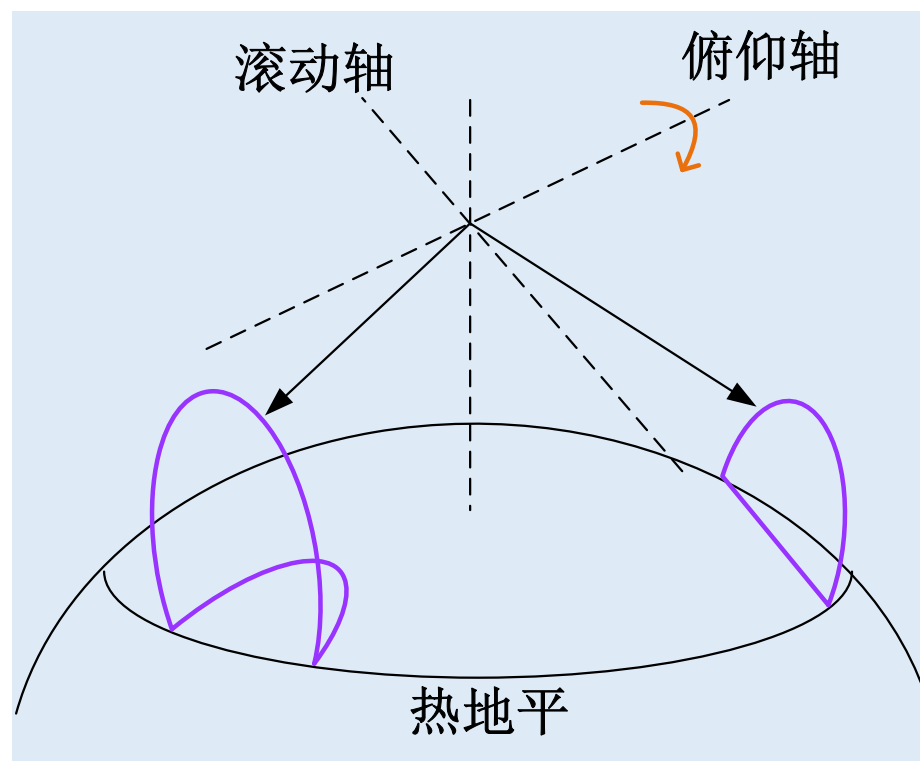
垂直安装，可以直接获取姿态角



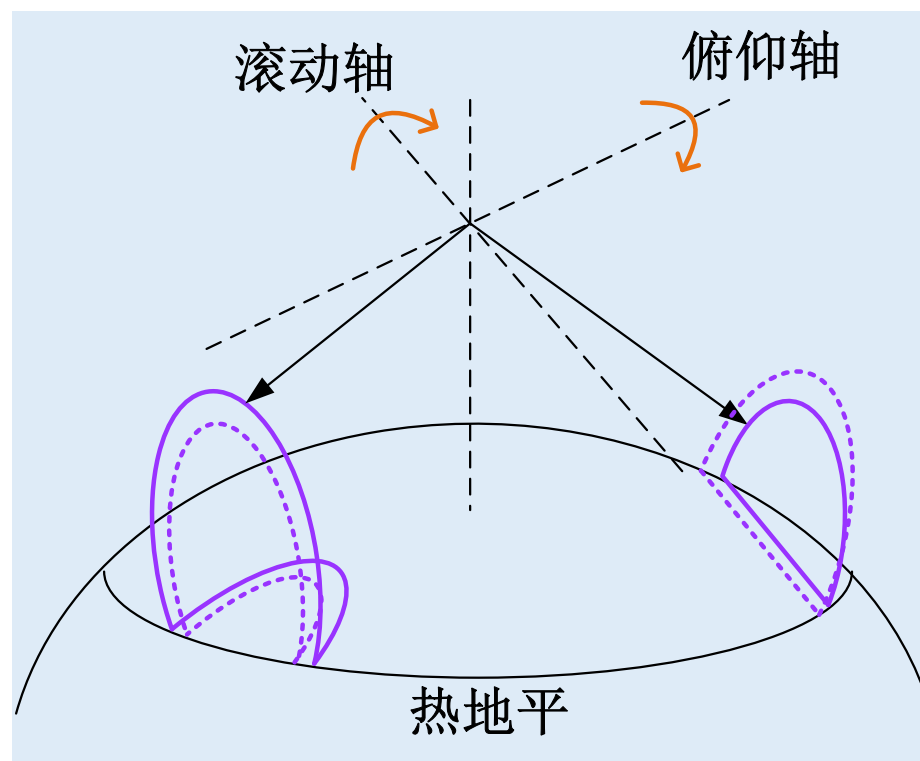
- 共面安装是指两个扫描轴安装的与当地垂线在同一平面上。



共面安装，可以直接获取俯仰姿态，而滚动姿态需要比较两个扫描弦宽得到



共面安装，可以直接获取俯仰姿态，而滚动姿态需要比较两个扫描弦宽得到



共面安装，可以直接获取俯仰姿态，而滚动姿态需要比较两个扫描弦宽得到

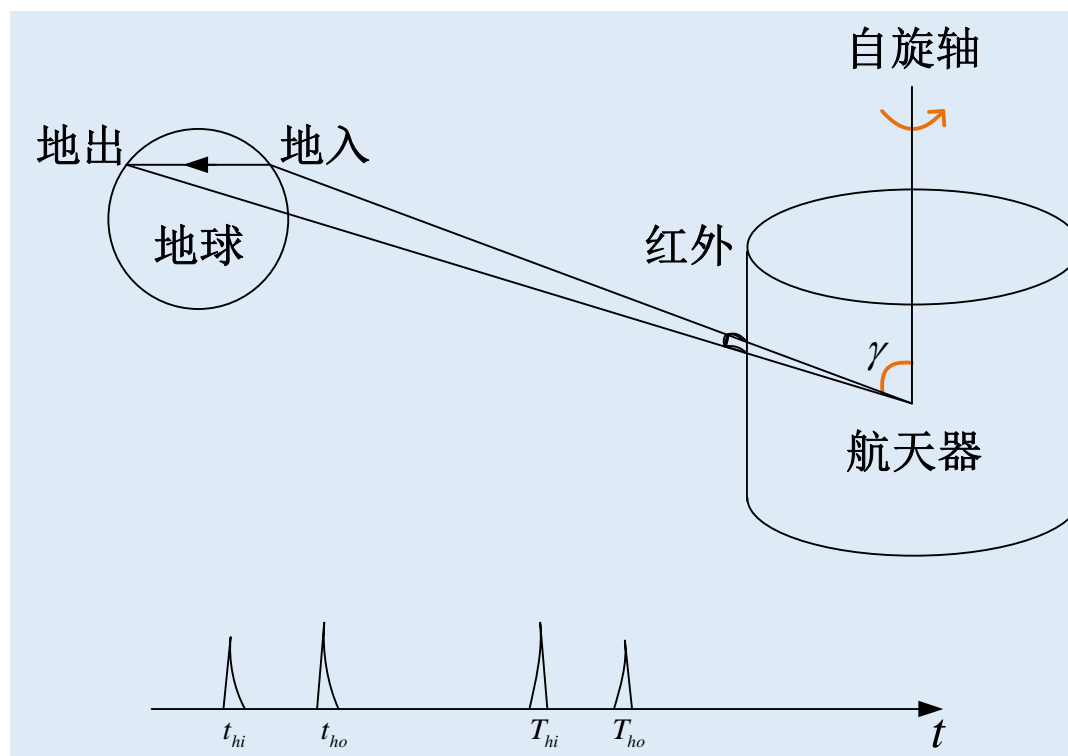


- 无论哪一种安装方式，红外地平仪均只能测量出航天器的俯仰和滚动两个姿态角。
- 优点是扫描视场大，响应时间快，对飞行任务适应性较强，特别是对大范围姿态测量和姿态机动捕获更为合适。
- 但是由于存在运动扫描机构，因此寿命受到限制。





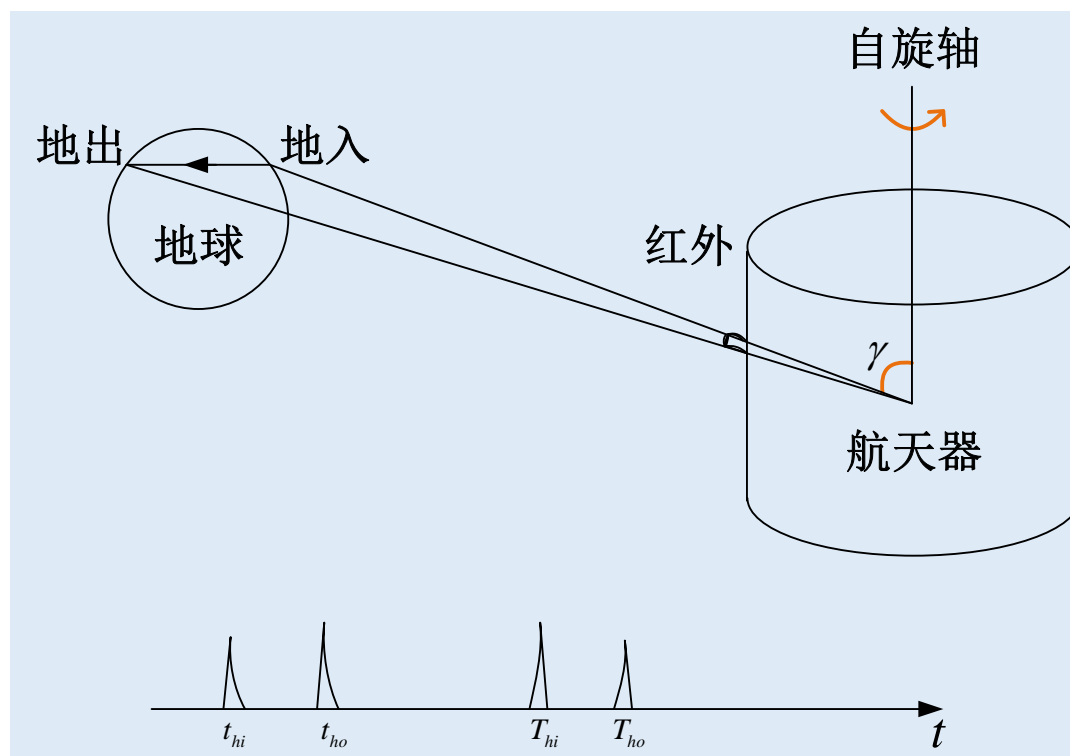
- 自旋扫描地平仪主要用于自旋卫星，扫描机构就是自旋卫星。



自旋扫描红外地平仪原理图



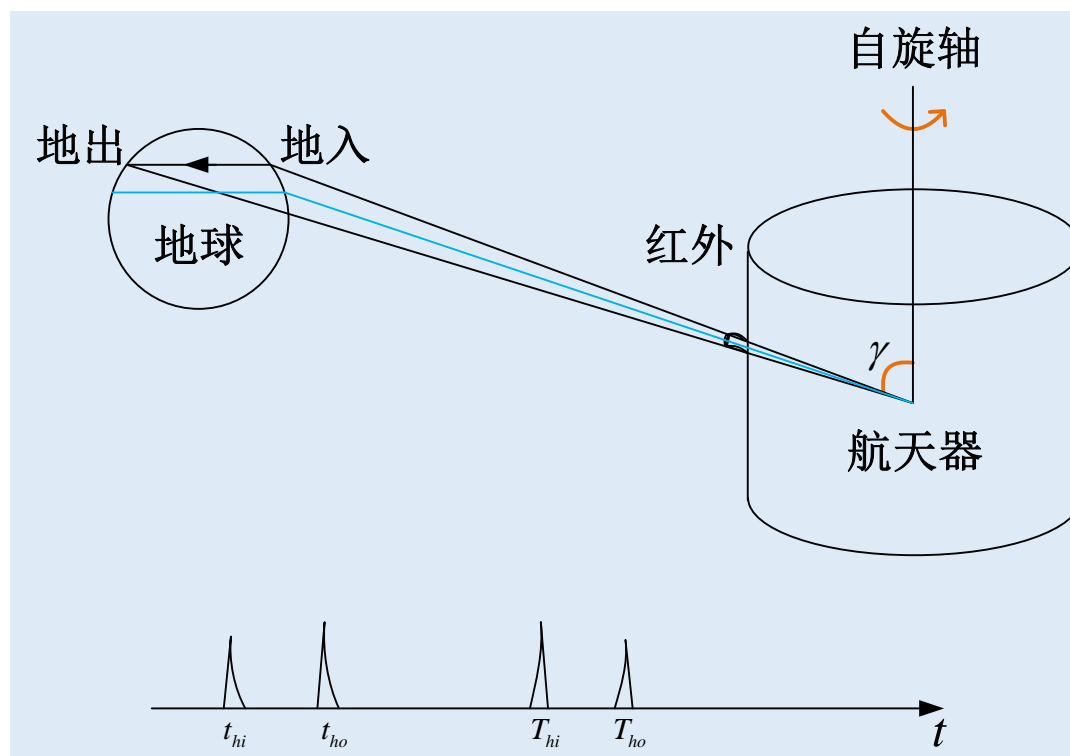
- $t_{hi}$  和  $t_{ho}$  表示地球弦宽长短，含有姿态信息。结合卫星轨道高度就可以计算出自旋轴与当地垂线/地平方向的夹角，即姿态角。



自旋扫描红外地平仪原理图



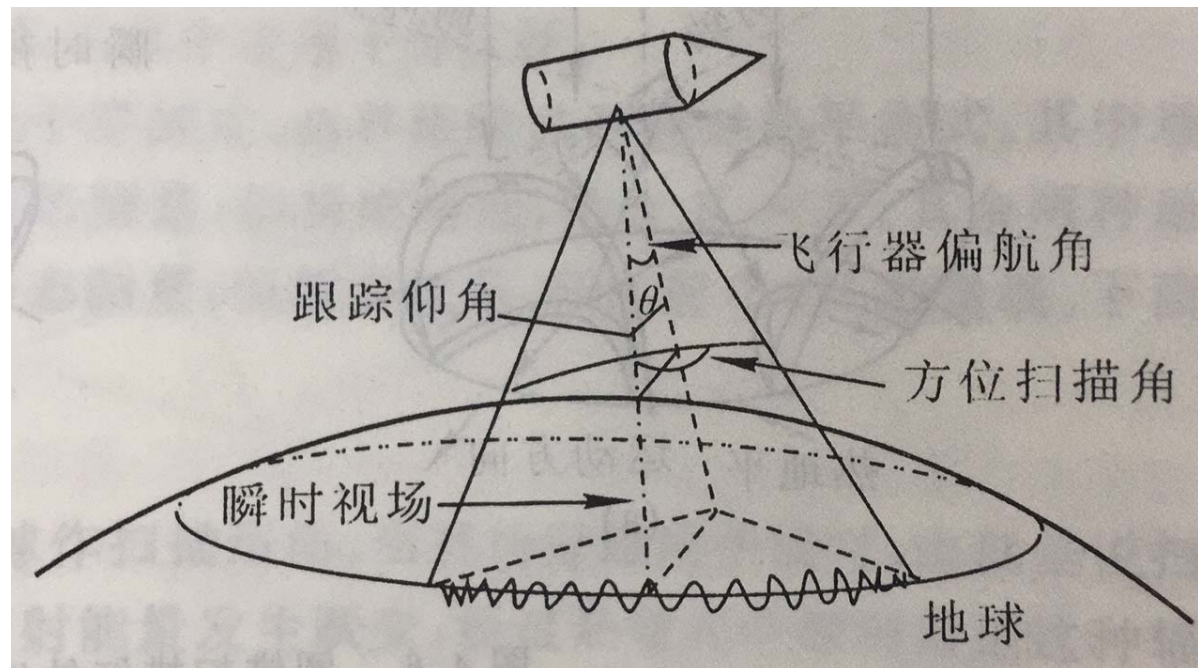
- 安装两个地平仪，就可以得到两条弦宽。然后进行比较，则不需要卫星轨道高度参数，同样也可以得出姿态角。



自旋扫描红外地平仪原理图

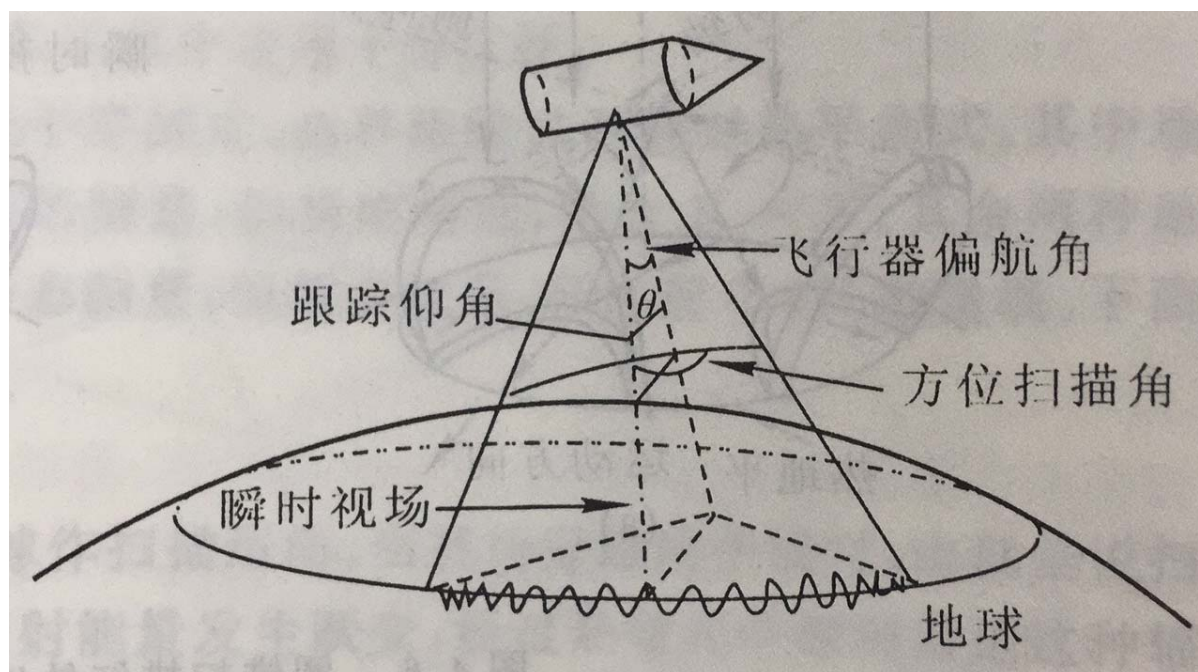


- 具有一个反馈伺服机构，它使视场跟踪地平线，同时给出相对于不运动部分的方位角，这个方位角与航天器姿态角成正比。





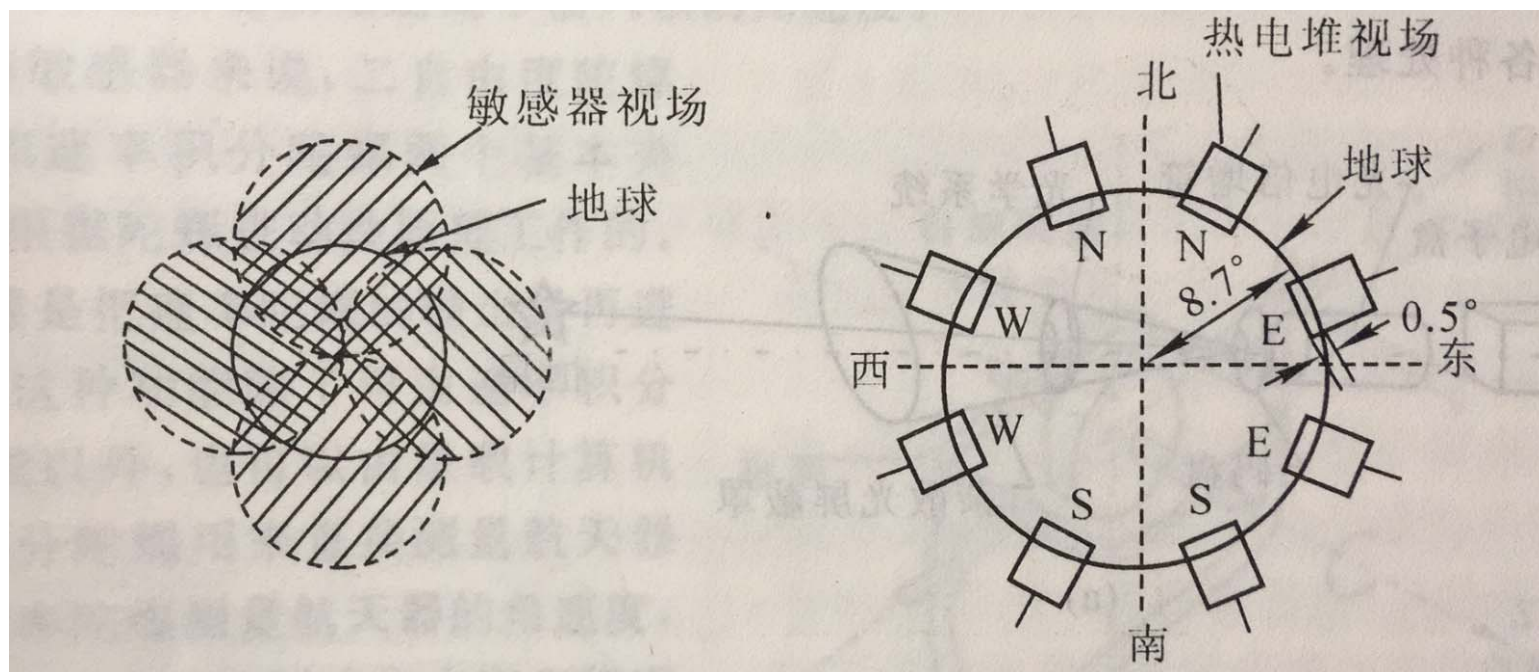
- 边界跟踪式地平仪只能工作在较窄的姿态范围内。
- 受到大气成分、温度的不规则变化、日出日落的光照条件变化的影响。





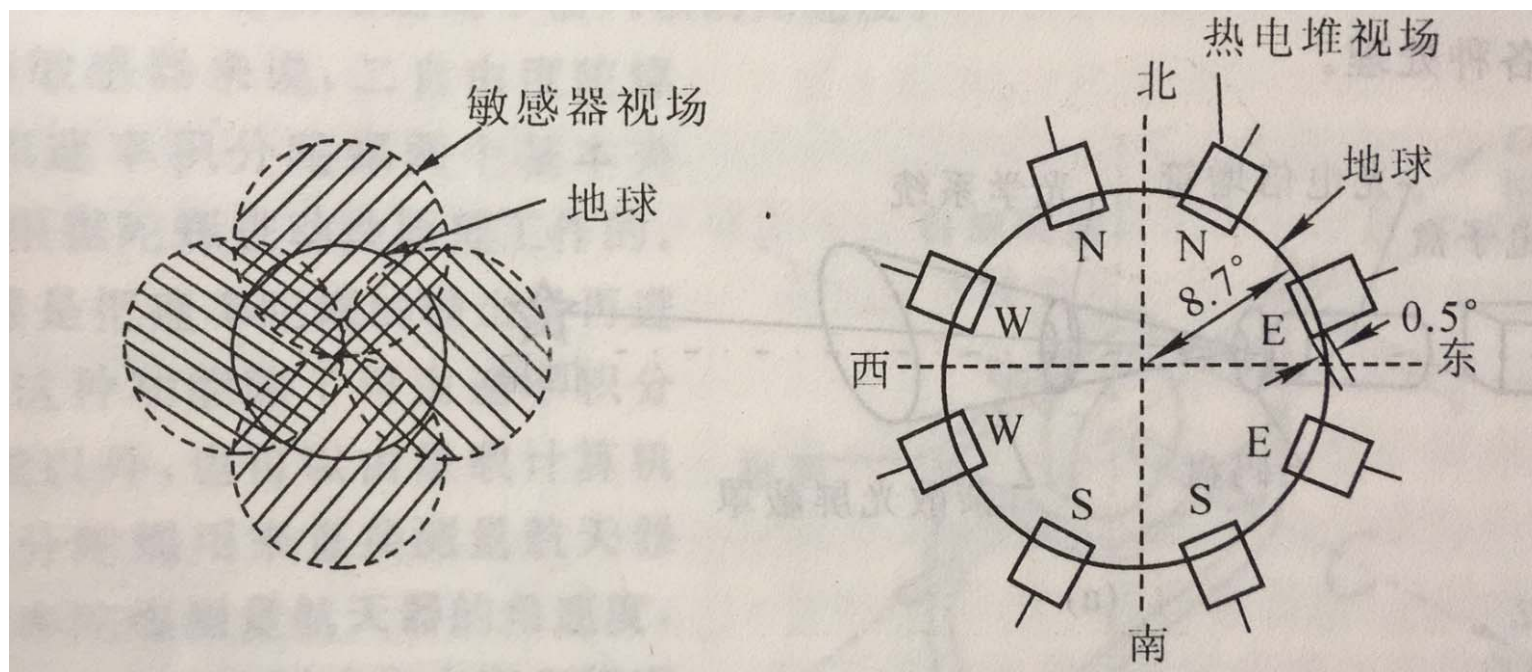


- 辐射热平衡式地平仪具有多个视场，每个视场分别接收来自地球不同部分的红外辐射，通过对每个视场接收到的不同红外辐射能量进行分析而得出航天器姿态。





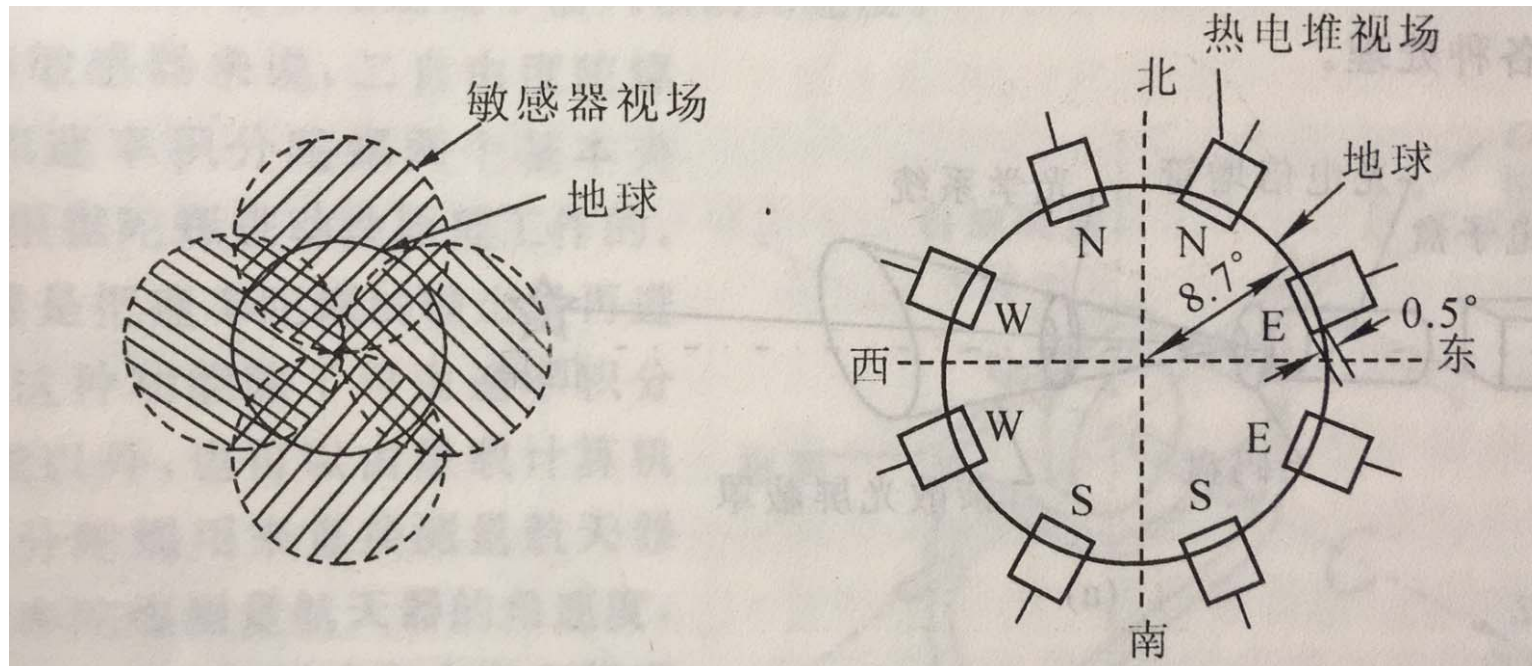
- 这种地平仪不需要扫描机构，所以又称为静态红外地平仪；
- 没有运动部件，体积和质量较小，功耗低，适合长寿命飞行任务；





## ➤ 技术难点:

- 仪器各部分之间温度梯度产生热交换
- 季节变化所产生的地球红外辐射的不均匀性和不稳定性都会对测量精度产生较大影响。







➤ 红外地平仪优点:

- 信号源强
- 轮廓清楚
- 分析方便

➤ 使用限制:

- 一般需要扫描机构
- 需要防止太阳干扰
- 精度约0.1度
- 受轨道影响大



国家	美国	日本
型号	GoodRich 13-410	AstroResearch CES3
类别	多任务、静态	圆锥扫描
适用范围	低中高轨道	中低轨道
精度	$\pm 0.05$ - $\pm 0.08$ 度(MEO)	随机误差 $<0.07$ 度 常规误差 $<0.05$ 度
视场	$16 \times 10$ 度	$1.5 \times 1.5$ 度
备注	倾斜角 $\pm 0.013$ 度，滚动角 $\pm 0.03$ 度(GEO)	半圆锥角55度 扫描速度60r/min



法国Sodern公司STD15(NEO), STD16(LEO), 动态双圆锥扫描。

参数名称	STD15	STD16
应用高度	15000-14000	300-6000
准确度	偏差0.035 典型噪声0.015	偏差0.06 典型噪声0.042
数据传输率	1.25HZ	1HZ
质量	3.4	3.5
功耗	7.5	7.5
设计寿命	15	5



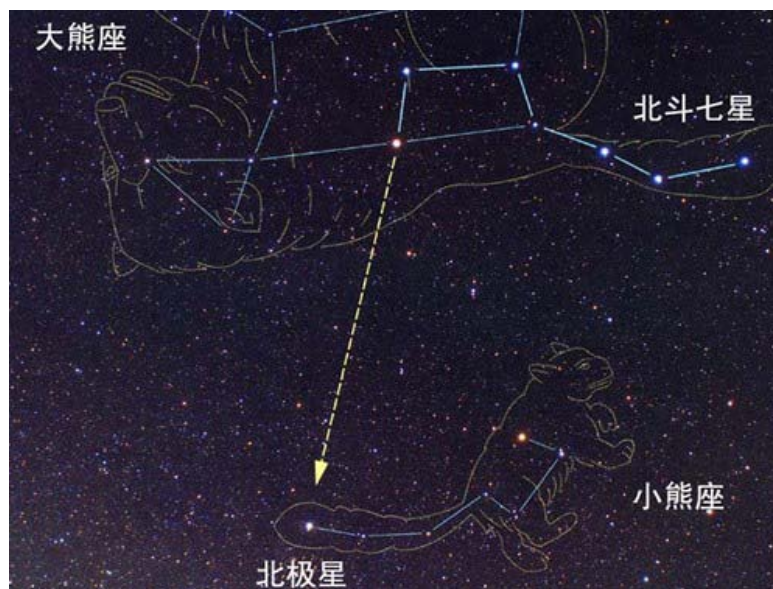
## 我国的三种动态红外地平仪

红外地平仪类型	摇摆扫描	笔-光束	圆锥扫描
轨道高度 km	25000-40000	36000	200-3000
质量 kg	$\leq 3.2$	$\leq 2.7$	$\leq 2.8$
随机误差	$\leq 0.03$ 度	$\leq 0.1$ 度	$\leq 0.1$ 度
系统误差	$\leq 0.05$ 度	$\leq 0.1$ 度	$\leq 0.05$ 度
设计寿命	>8年	>4.5年	>5年
其他	扫描频率: 5HZ 扫描幅度: 窄扫描 $\pm 6$ 度 宽扫描 $\pm 11$ 度	地球弦宽度: 8-20度 自选速度: 15-120r/min	扫描频率: 1HZ 扫描锥半角: 55度 分辨率: 2'



## 3、星敏感器

- 星敏感器是以某一颗亮度高于+2可见星等的恒星为基准，测量其相对于航天器的角位置，并同星历表中该星的角位置参数进行比较，来确定航天器的姿态。即通过对恒星星光的敏感来测量航天器的某一个基准轴与该恒星视线之间的夹角。





- 精度高
  - 中等精度 $10''$ ，高精度 $1''$
- 信号弱
  - 零等星照度 $2.1 \times 10^{-6}lx$
  - 克服杂散光干扰很重要
- 需要恒星识别
- 能够提供三轴姿态信号



## □ 恒星的光谱

- 恒星探测器有一定的光谱特性
- 对不同光谱，探测器灵敏度不同
- 按最大辐射波长的递升顺序分为七个型：

**O B A F G K M**



## □ 恒星的星等

- 星等是星体亮度的表征
- 星等亮度是用大气层外接收到的恒星辐射照度来衡量的

$$m = -2.51 \log_{E_0} E$$

- $E$ 是辐射照度； $E_0$ 是零等星辐射照度； $m$ 是星等。

➤ 辐射照度越大，星等越负。





## □ 恒星的分布

- 按各光谱段分布

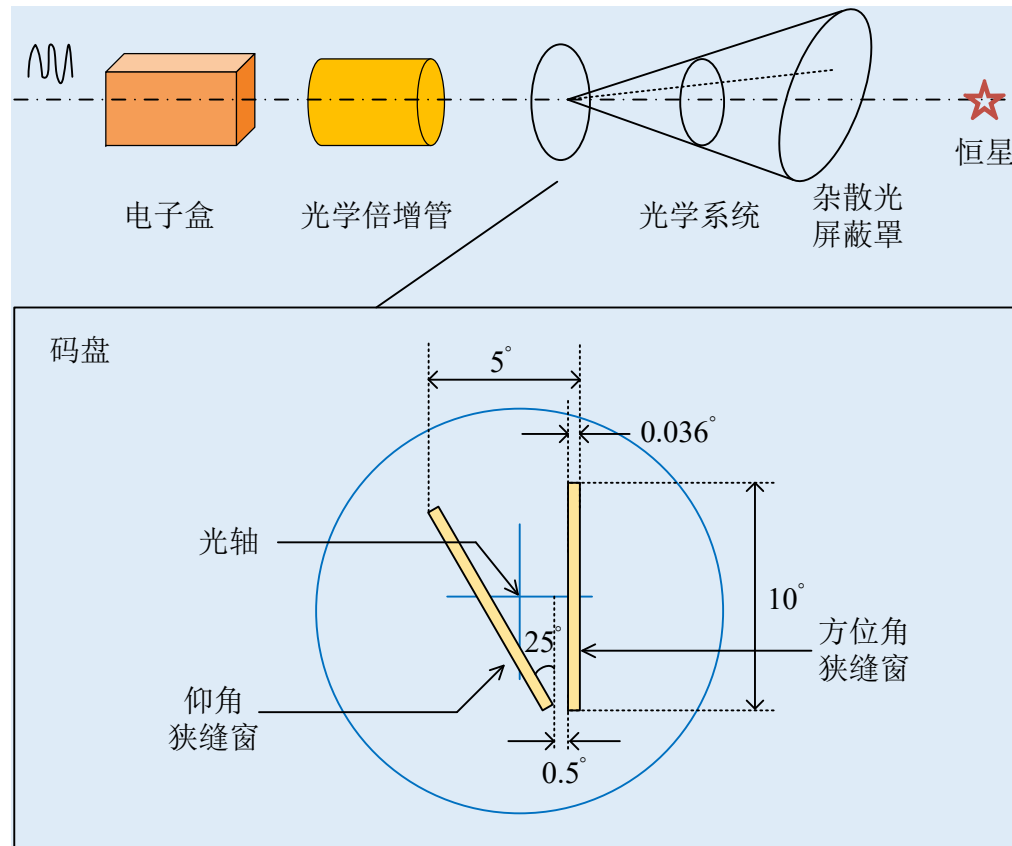
光谱段	O	B	A	F	G	K	M
数目 (%)	1	10	22	19	14	31	3

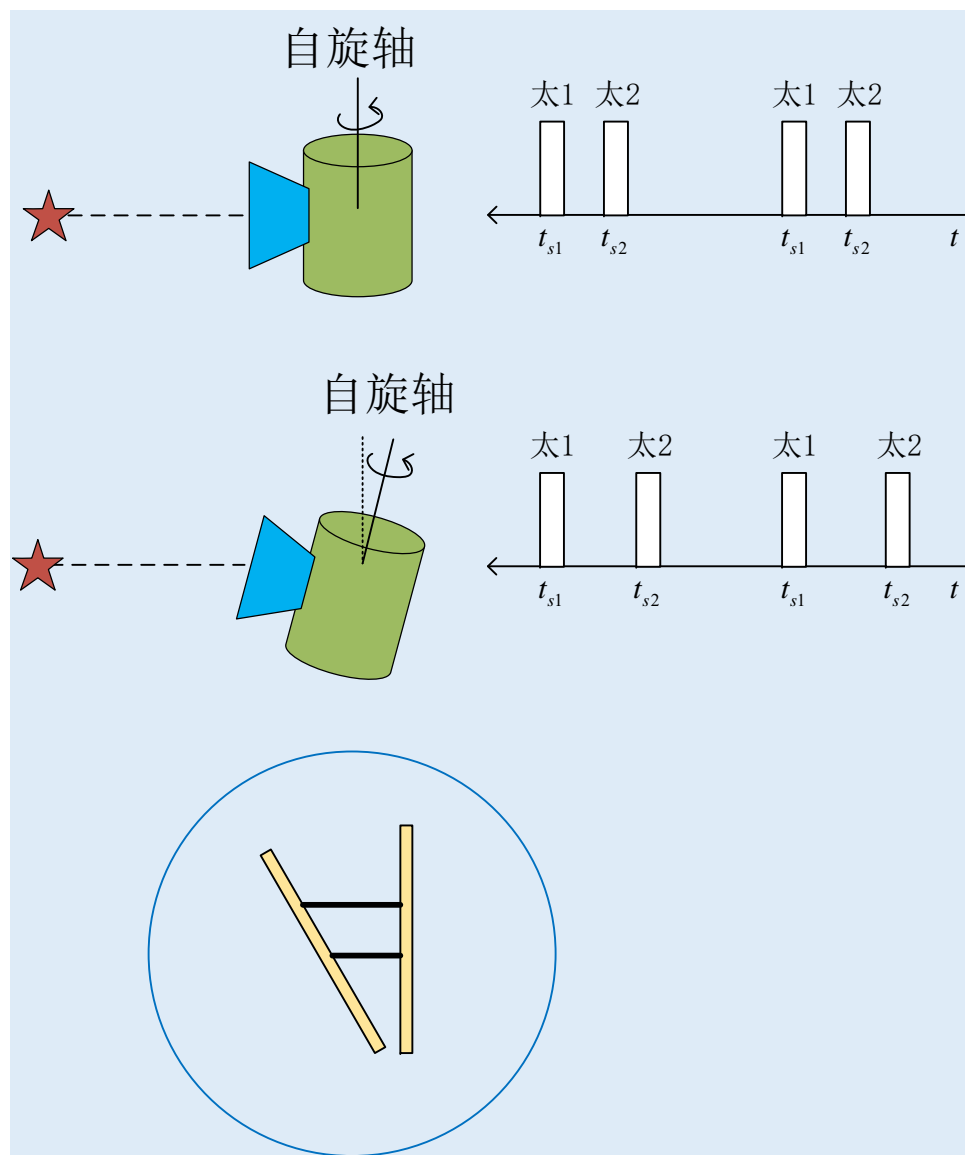
- 按恒星星等分布

视星等	+3.0	+4.0	+5.0	+6.0	+7.0	+8.0
数目 (颗)	187	556	1660	5146	15095	44700



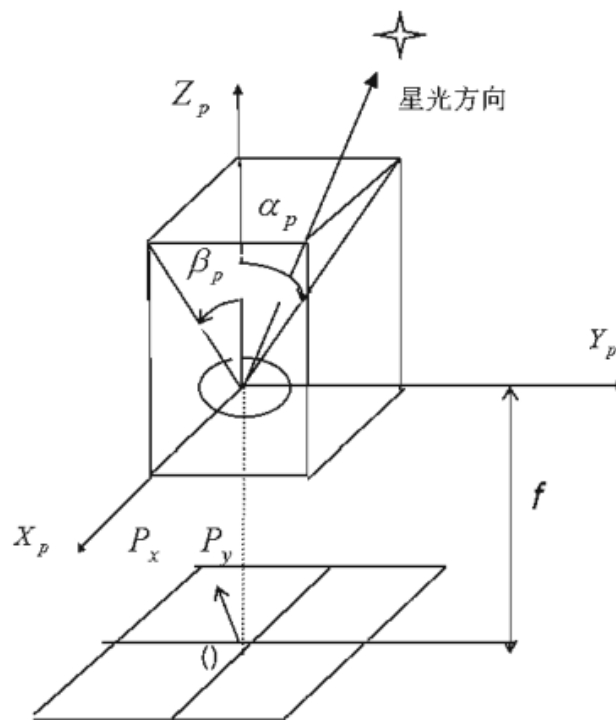
- 星敏感器分星图仪和星跟踪器两种类型，星跟踪器又可分为框架式和固定式两种形式。
- ① 星图仪：又称星扫描器。一般都是狭缝式，用在自旋卫星上，利用星体的旋转来搜索和捕获目标恒星；
- ② 框架式星跟踪器：把敏感头装在可转动的框架上，通过旋转框架来搜索和捕获目标；
- ③ 固定式星跟踪器：敏感头相对航天器固定，在一定的视场内具有搜索和跟踪能力。







- **CCD星敏感器**采用电荷耦合器件图像列阵作为检测器，电荷耦合器具有垂直和水平像素。
- 优点：能够同时跟踪多颗星，对磁场不敏感，精度得到改善。





## ➤ 视场与灵敏度

- 视场：探测器能探测到的范围
- 灵敏度：能敏感到的最暗星等

## ➤ 精度

- 定位精度：一般附带动态条件
- 星等精度：目前约为 $\pm 0.2$ 个星等

## ➤ 数据更新率

- 主要与CCD光积分时间有关，目前高于10HZ

## ➤ 工作模式

- 捕获模式：计算星像中心，识别
- 跟踪模式



- 环境、寿命、体积、质量、功耗
- ✓ 环境因素包括：
  - 温度：与安装位置是否有关，是否温控？
  - 震动和冲击：火箭发射过程
  - 抗辐照能力
  - 卫星轨道高低，工作时间长短





## ➤ 星敏感器优点

- 精度高，可达到角秒量级
- 不受轨道影响

## ➤ 星敏感器缺点

- 信号弱
- 结构复杂，成本高
- 要防止太阳干扰
- 星识别复杂
- 确定初始姿态，需要第二个姿态确定系统



➤ 国外星敏感器的发展经历了4代。

✓ 以法国Sodern公司为例：

## □ 1970s，光电析像管IDT

- 主要代表：SED03/04
- 特点：非自主，视场很小  
15kg，40W
- 应用：EXOSAT卫星





## □ 1985，非自主CCD

- 主要代表：SED12/12D
- 特点：中等视场  
8kg, 20W
- 应用：对地观测卫星Helios系列等





## □ 1990s末，全自主CCD

- 主要代表：SED16/26/36
- ✓ SED16
- 特点：全自主，大视场  
3kg, 10W, 适于各种轨道
- 应用：SPOT5, 直到现在





## ✓ SED26

### • 特点:

#### ① 精度高

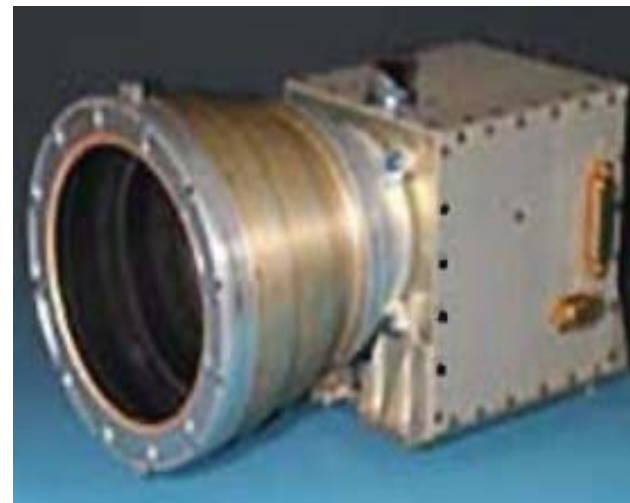
光轴方向**0.004度**, **LFE0.007度**

垂直光轴**0.0008度**, **LFE0.001度**

#### ② 同时观测**10颗星**, **3s**内可以获得卫星姿态

#### ③ 数据更新率: **10HZ**

- 应用: **2005年**第一次发射使用, 高轨道情况下设计寿命**18年**





## ✓ SED36

### • 特点:

#### ① 精度进一步提高

光轴方向**0.0017度**, **LFE0.0047度**

垂直光轴**0.00028度**, **LFE0.00072度**

#### ② 同时观测**14颗星**

#### ③ 数据更新率: **8HZ**

#### ④ 光学部件与电子器件分开, 以减小热偶和影响





## □ APS, HYDRA系列动态像元敏感器

### • 特点:

#### ① 精度进一步提高

$LFE < 0.00017^\circ$        $NEA < 0.0003^\circ$

#### ② 一个电子单元上最多可以安装4个光学单元，每个光学单元同时跟踪15颗星

#### ③ 嵌入了卡尔曼滤波，数据融合等算法，可确定角速度最大值为10度/s。

### • 应用：2010年已完成地面测试







## ➤ 我国的星敏传感器

- 主要飞行经历: **cbers-1 03/04**及嫦娥1
- 特点:
  - ① 精度:  $0.0033^{\circ}$  (俯仰, 滚动)  
 $0.028^{\circ}$  (偏航)
  - ② 视场:  $8.5^{\circ}$
  - ③ 数据更新率: **1HZ** (标准)
  - ④ 功耗: **8.1W** (标准)



## ➤ 姿态敏感器的两大类别：

- 依靠外部基准

### 光学敏感器

- ① 无漂移状态
- ② 精度较高，视场较小
- ③ 通频带窄，更新率低
- ④ 阴影区工作受限

- 自主惯性敏感器

### 陀螺和加速度计

- ① 有固有漂移
- ② 短时间内精度高
- ③ 通频带高，更新率高
- ④ 抗干扰性能强

优势互补，组合定姿



- 陀螺：敏感航天器相对惯性空间的转动运动。  
测量角度或角速度
- 加速度计：敏感航天器相对惯性空间的平动运动



## ➤ 陀螺在航天器中的应用

- 速度阻尼，相对惯性空间稳定；
- 提供短时间姿态基准；
- 组成光学-惯性测量单元（卡尔曼滤波器）；



## ➤ 加速度计在航天器中的应用

- 载人航天惯导平台，进行初始对准，载体高度和距离测量；
- 变轨控制和推力测量；
- 主动章动测量；
- 外层空间微重力环境测量



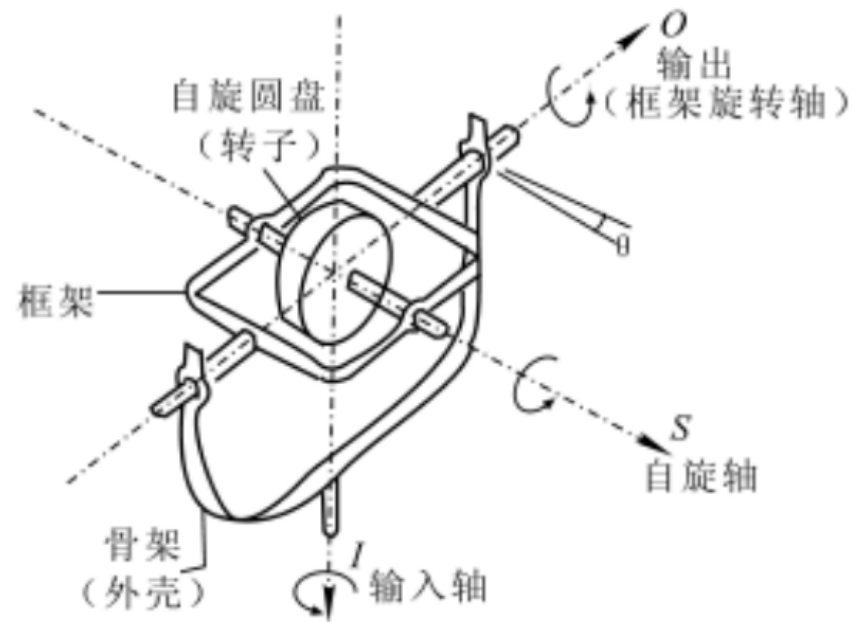


## 4、陀螺

- 陀螺是利用一个高速旋转的质量来敏感其自旋轴在惯性空间定向的变化。
- 定轴性是当陀螺不受外力矩作用时，陀螺旋转轴相对于惯性空间保持方向不变；
- 进动性就是当陀螺受到外力矩作用时，陀螺旋转轴将沿最短的途径趋向于外力矩矢量，进动角速度正比于外力矩的大小。



- 目前利用陀螺的进动性和定轴性设计的敏感器主要有二自由度陀螺和三自由度陀螺两种。



二自由度陀螺





- 20世纪初：滚珠轴承支撑陀螺，框架陀螺
- 1940s~1950s：液浮陀螺，气浮陀螺
- 1960s以后：挠性支撑转子陀螺
- 现今：静电陀螺，光学陀螺，振动陀螺



- 陀螺漂移：陀螺自旋轴在惯性空间的方向不是绝对不变的，在干扰力矩作用下会产生变化，这种现象称为漂移。
  - 以单位小时产生的漂移度数来表示。
  
- 航天器应用的陀螺具有如下特点：
  - 长寿命
  - 低功耗
  - 高可靠性
  - 低漂移



## 5、加速度计

- 加速度计是用于测量航天器上加速度计安装点的绝对加速度沿加速度计输入轴分量的惯性敏感器。
- 不同加速度计的基本工作原理是相同的，即测量一个约束质量受到加速度作用时的运动。



➤ 优点:

- 自主性强
- 不受轨道影响
- 有限时间内精度高
- 星体上容易实现

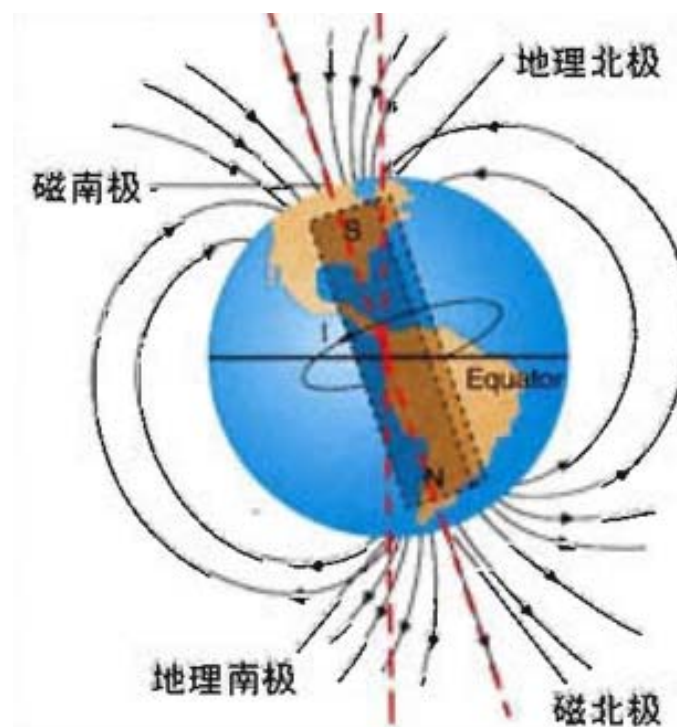
➤ 缺点:

- 易漂移
- 有高速转动部件，易磨损
- 功率大，质量大



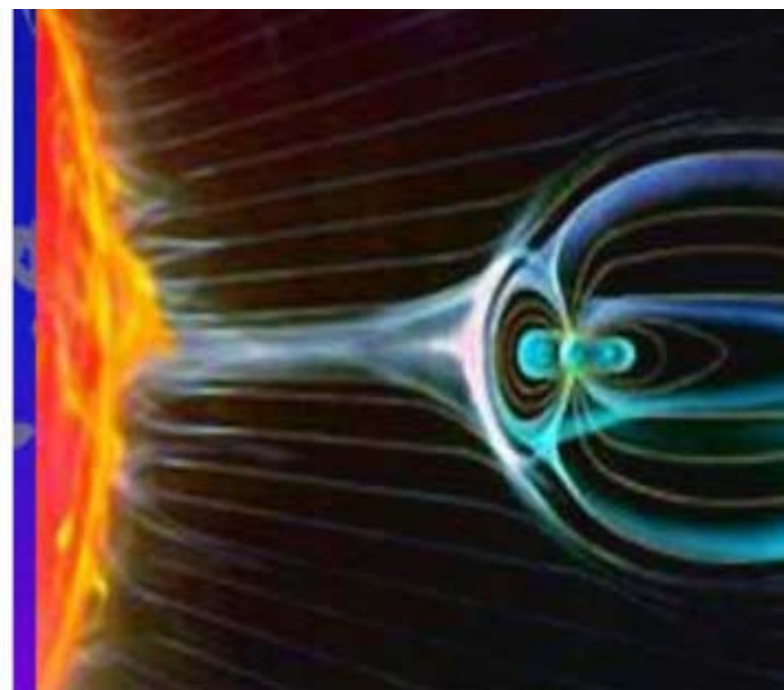
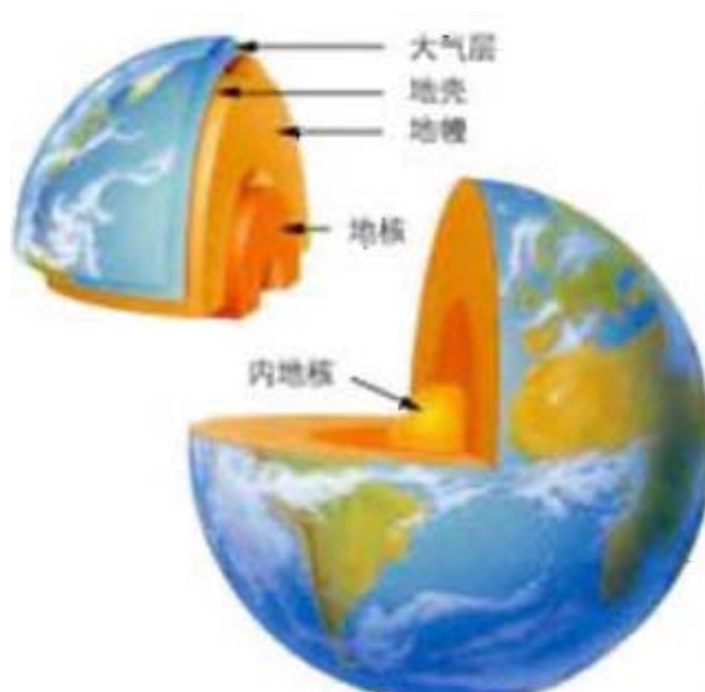
## 6、磁强计

- 地磁场包括基本磁场和变化磁场两部分。基本磁场起源于地球内部，比较稳定。偶极子磁场是地磁场的基本成分，强度约占地磁场总强度的90%。





- 包在内核外层的外核是由液态铁质混合液态镍和其他轻元素组成的。  
外核中的对流加上地球的自转是产生地磁场的原因。





- 磁强计是以地球磁场为基准，测量航天器姿态的敏感器。磁强计本身是用来测量空间环境中磁场强度的。由于地球周围每一点的磁场强度都可以由地球磁场模型事先确定，因此利用航天器上的磁强计测得的信息与之对比便可以确定出航天器相对于地球磁场的姿态。





- 磁强计由磁敏感器和电子部件组成。磁敏感器测量磁场信号，包括磁场大小和方向；电子部件是将磁敏感器的测量信号变换成为需要的电信号。

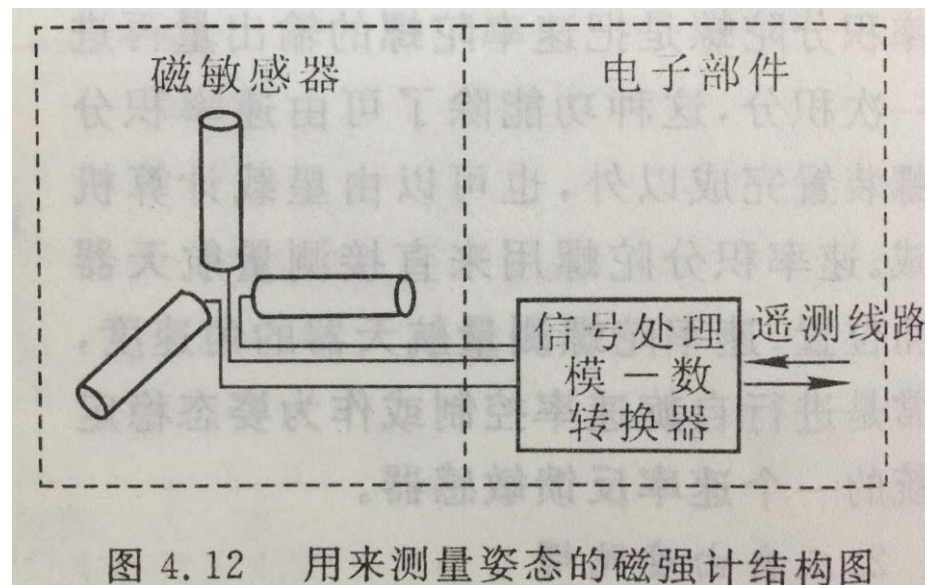


图 4.12 用来测量姿态的磁强计结构图



- 磁敏传感器根据工作原理不同分为感应式磁强计和量子磁强计两种。
- 感应式磁强计建立在法拉第磁感应定律的基础上。

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

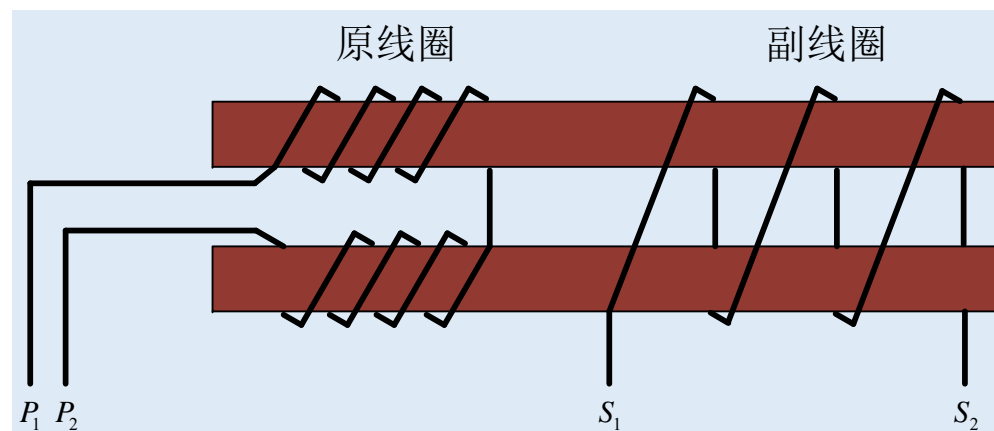
- $\Phi$ 为线圈中的磁通量,  $N$ 为线圈的匝数,  $V$ 为线圈的感应电势。



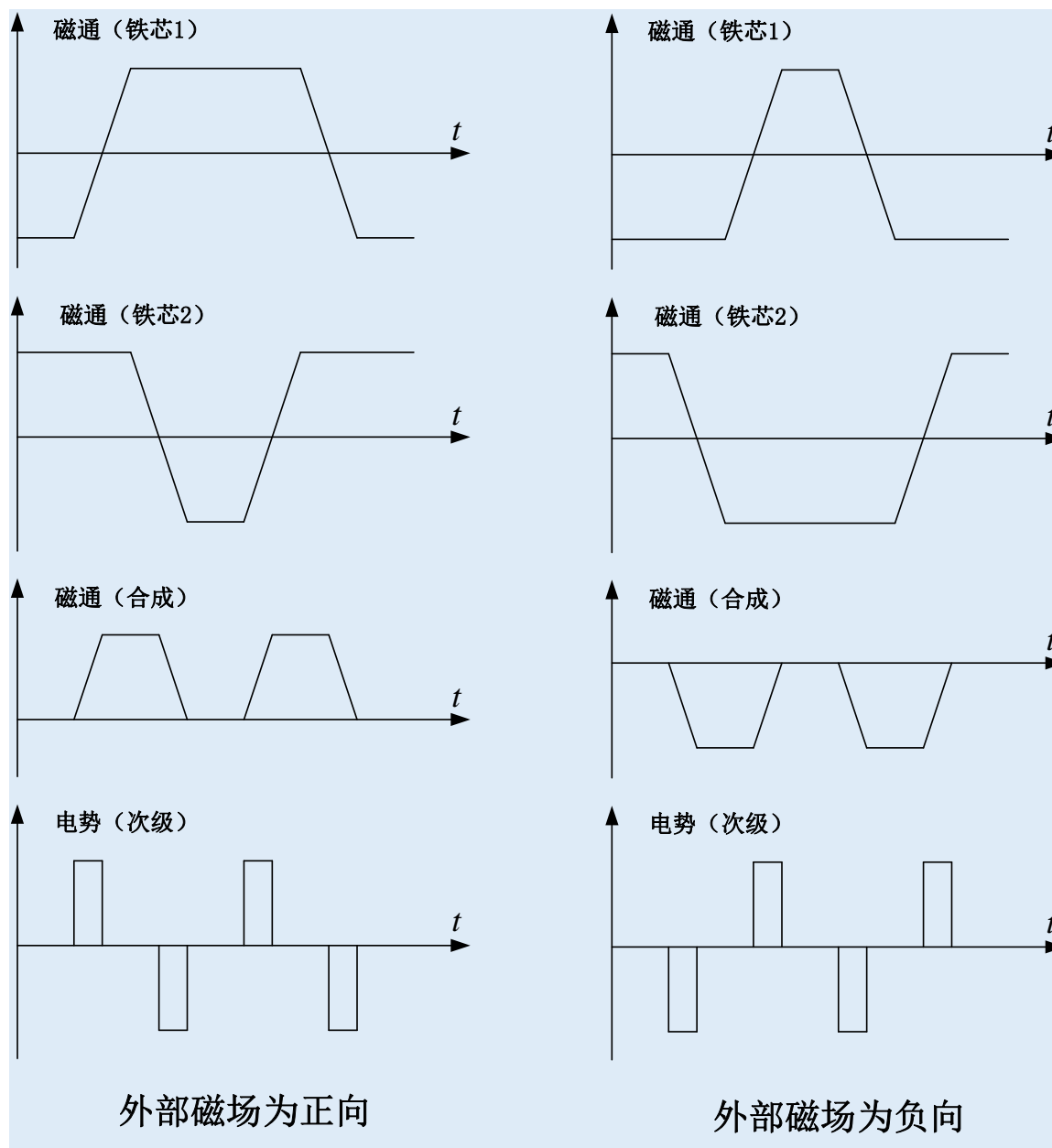
- 感应式磁强计分为搜索线圈式磁强计和磁通门磁强计两种类型。
- 搜索线圈式磁强计用于自旋卫星上，依靠卫星的自旋使通过搜索线圈的地磁场磁通量作周期性的变化，并感应出一个周期性的交流电压，在此交流电压的相位中包含了姿态的信息。
- 搜索线圈式磁强计可用在自旋卫星上提供精密的相位信息。



- 磁通门磁强计是测定沿铁心方向的磁通变化。

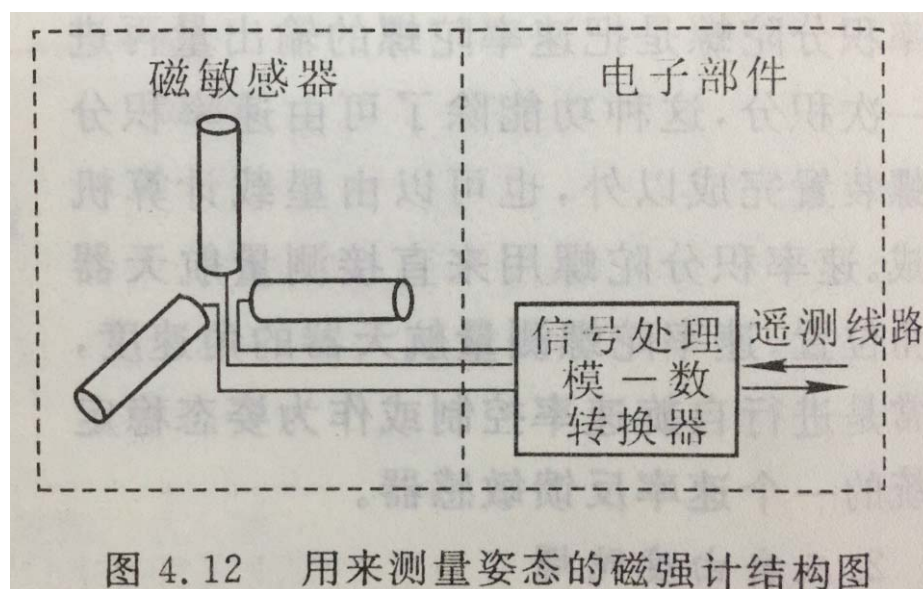


双铁心磁通门磁强计结构图





- 由于磁通门磁强计是测定沿铁心方向的磁通变化，故对测定磁场有方向性。
- 把三个磁通门磁强计互相垂直安装，可以测量三轴当地磁场强度。利用它与已知环境磁场模型相比较，可以估算出航天器三轴姿态。





- 磁强计质量小，性能可靠，消耗功率低，工作温度范围宽，没有活动部件。
- 地球磁场模型仅是对地球磁场的近似描述，以此模型作为磁强计测量星体姿态的基准必然会带来较大的误差，所以磁强计姿态测量精度不高。
- 某点地球磁场强度与该点距地心的距离的三次方成反比，这使得中高轨道(轨道高度大于1000km)上地球磁场强度很弱，以致航天器内部的剩余磁矩会超过地球磁场的影响，这时地球磁场便不能作为测量基准，使磁强计的应用受轨道高度限制。



## ➤ 优点

- 成本低、功耗低
- 低轨道卫星灵敏度高

## ➤ 缺点

- 分辨率大于**0.5度**
- 受轨道影响大
- 星体内要进行磁清洁





## 7、射频敏感器

➤ 射频敏感器确定航天器姿态的原理是基于对航天器天线轴与无线电波瞄准线之间夹角的测量。

➤ 测量量

- 天线视轴与信号源之间的角误差

卫星有效      地面站天线

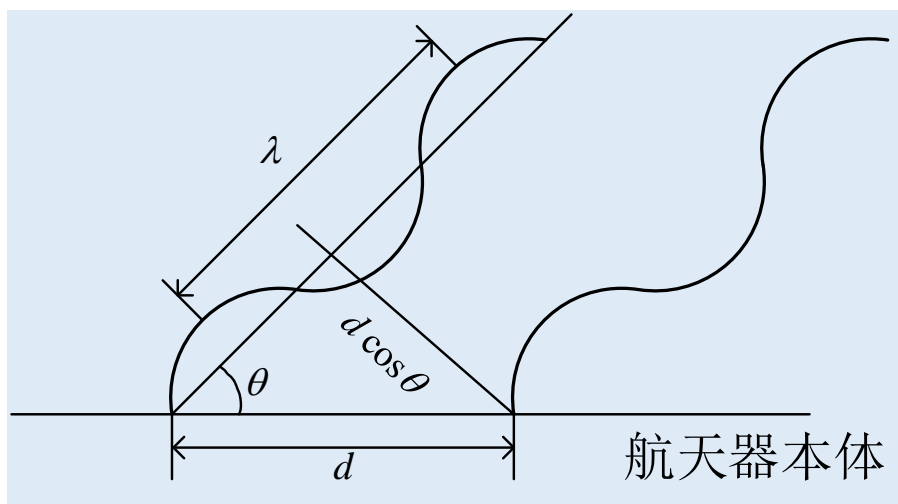
载荷          用户星可控天线

➤ 应用方向

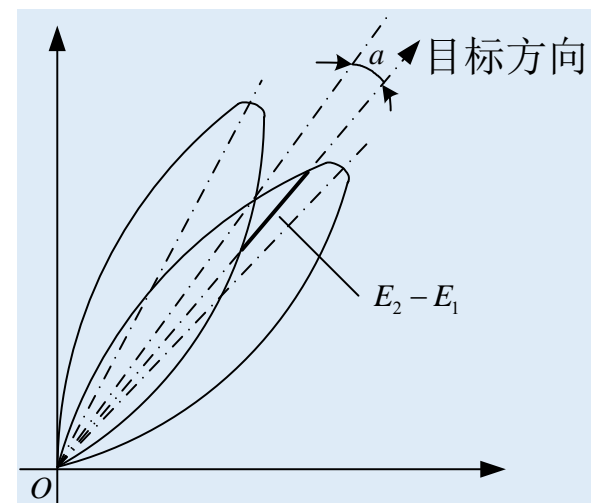
- 卫星有效载荷的高精度复合控制，如地球静止轨道通信卫星天线



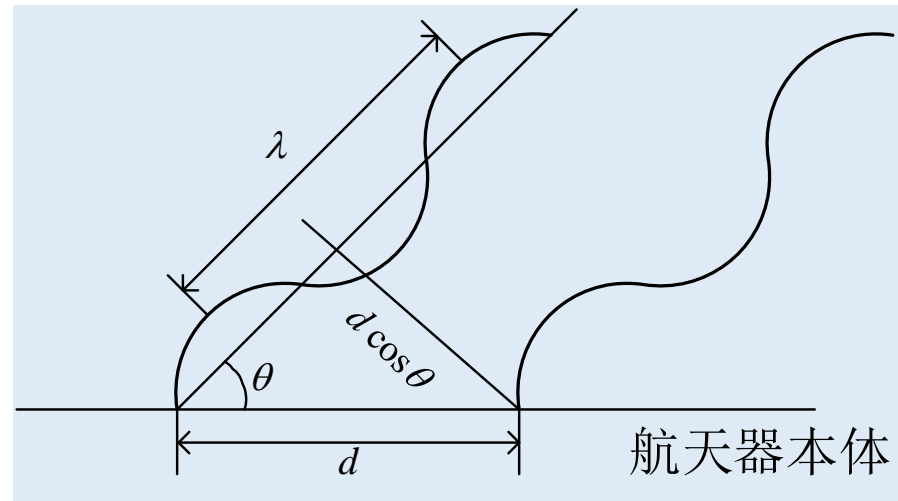
- 常用的射频敏感器：
- 单脉冲比相式（干涉仪式）
  - 单脉冲比幅式



单脉冲比相测量原理



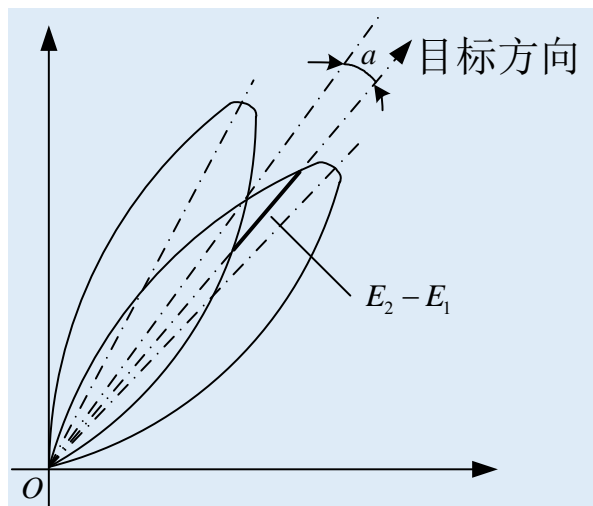
单脉冲比幅测量原理



$$\cos \theta = \frac{\lambda}{2\pi d} \varphi$$

预先确定

- $\varphi$  为两个天线接收电波的相位差。



- 单脉冲比幅方法需要形成两个互相叠交的天线方向图。
- 两个信号的振幅差表示目标与天线轴之间夹角，振幅差的符号表示偏离的方向。



➤ 优点:

- 精度约**0.03度**
- 结构易实现

➤ 缺点:

- 无自主性
- 受地面站分布限制



- 在实际的航天器姿态控制系统中，一般需要多种多个姿态敏感器组合使用，形成一个姿态测量系统。原因：
  - 由于相对于同一基准最多只能获得两个姿态角，单独使用不能获得完整的姿态信息；
  - 由于各种敏感器均存在条件限制；
  - 由于航天器的长寿命工作特点要求敏感器可靠地长时间提供高精度姿态信息；

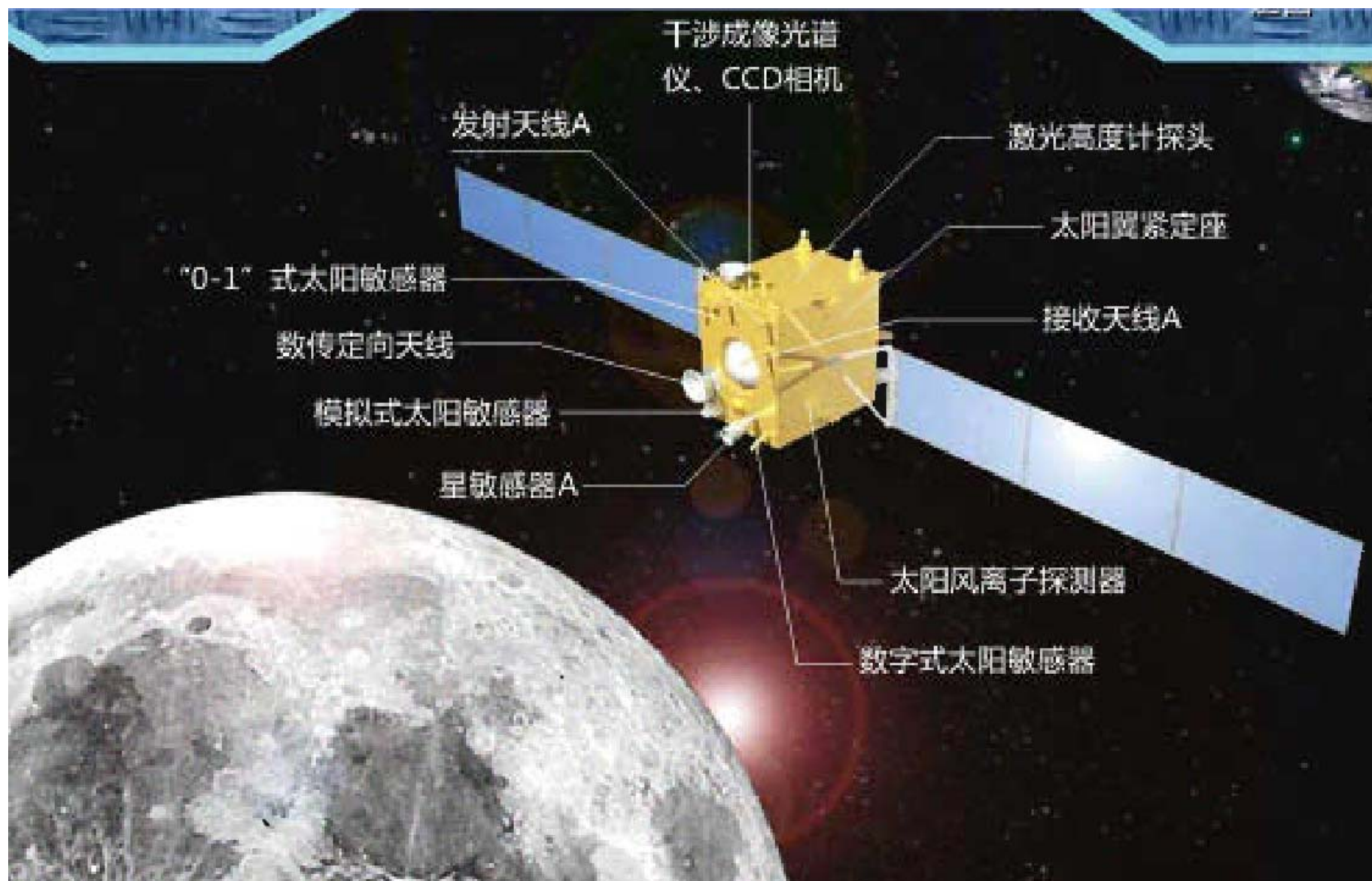


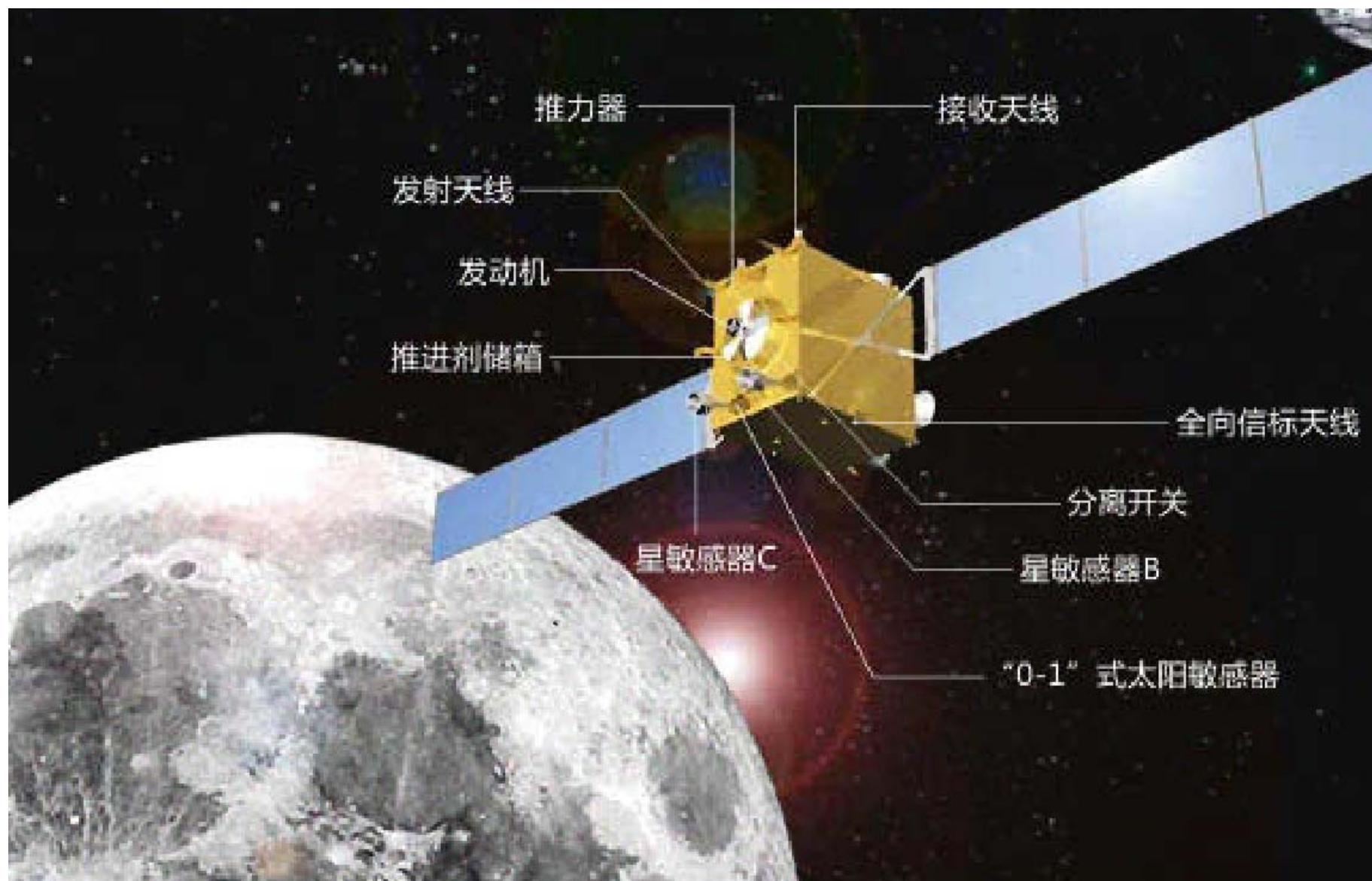
敏感器类型	优    点	缺    点
地球敏感器 (地平仪)	(1) 适用于近地轨道卫星 (2) 信号强 (3) 轮廓清楚 (4) 分析方便	(1) 一般需要扫描机构 (2) 需要防止太阳干扰 (3) 精度约 $0.1^\circ$ (4) 受轨道影响大
太阳敏感器	(1) 信号源强 (2) 轮廓清楚 (3) 功耗低,质量轻	(1) 有阴影区 (2) 精度约 $1'$
星敏感器	(1) 精度约 $0.003^\circ$ (2) 视场不受限制 (3) 不受轨道影响	(1) 信号弱 (2) 结构复杂,成本高 (3) 要防止太阳干扰 (4) 星识别复杂 (5) 确定初始姿态,需要第二个姿态确定系统



敏感器类型	优    点	缺    点
磁强计	(1) 成本低, 功耗低 (2) 对低轨道卫星灵敏度高	(1) 分辨率大于 $0.5^{\circ}$ (2) 受轨道影响大 (3) 在星体内要进行磁清洁
惯性敏感器	(1) 自主性强 (2) 不受轨道影响 (3) 有限时间内精度高 (4) 在星体上容易实现	(1) 易于漂移 (2) 有高速旋转部件, 易磨损 (3) 功率大、质量大
射频敏感器	(1) 精度约 $0.03^{\circ}$ (2) 不受航天器形变弯曲影响 (3) 结构易实现	(1) 无自主性 (2) 受地面站分布限制









西安电子科技大学  
XIDIAN UNIVERSITY



# THANKS



13389281325



dzhfeng@xidian.edu.cn

