



航天器控制原理

第13讲 姿态敏感器(1)

主讲：黄河

西北工业大学 精确制导与控制研究所



第13讲 姿态敏感器 (1)

- 1、姿态控制系统组成
- 2、敏感器作用及分类
- 3、太阳敏感器
- 4、红外地平仪

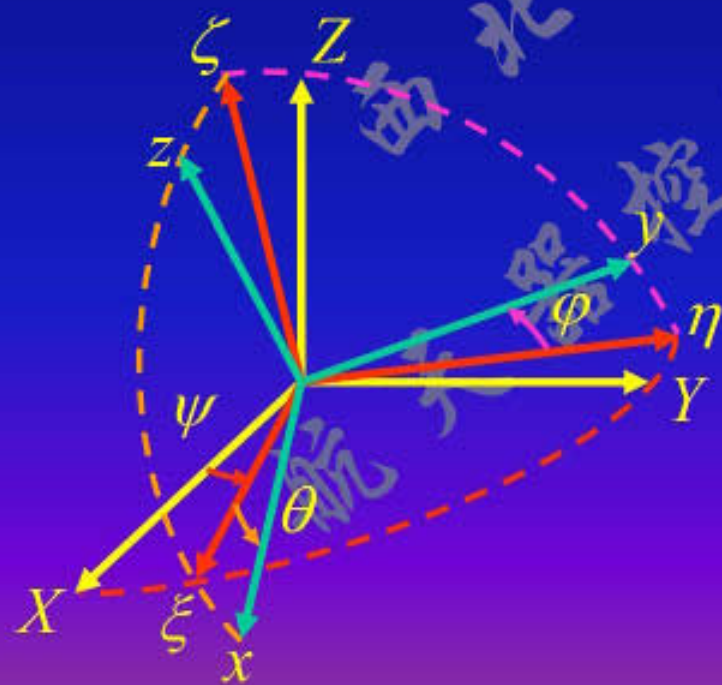


1、航天器姿态控制系统组成



2、姿态敏感器

姿态敏感器测量航天器本体坐标系相对于某个基准坐标系的相对角位置和角速度，以确定航天器的姿态。



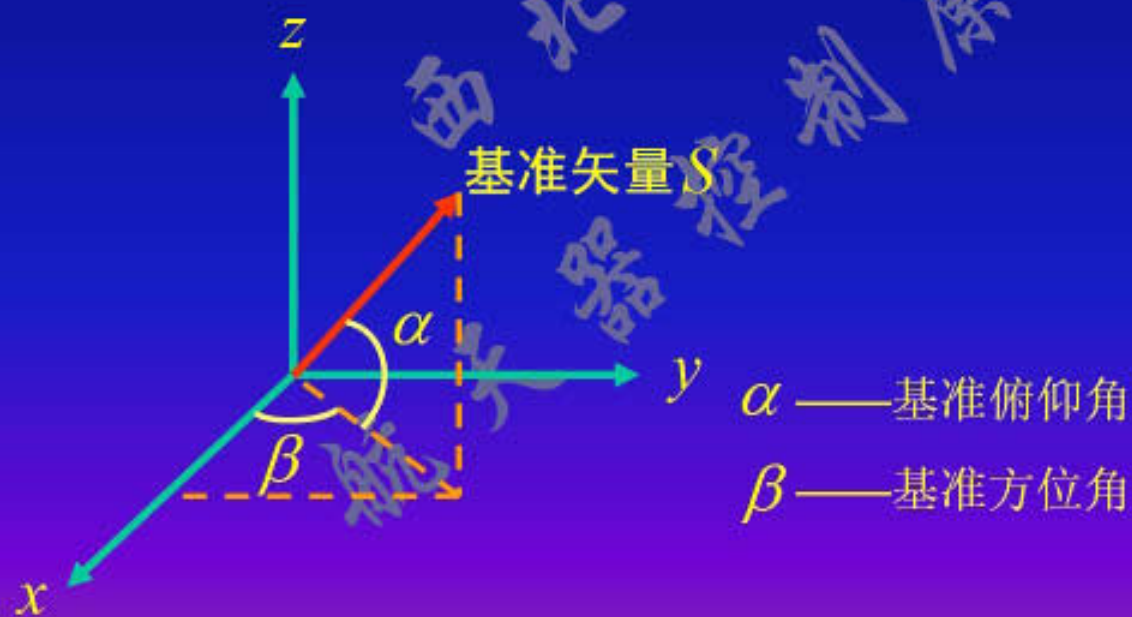
θ —— 俯仰角

ψ —— 偏航角

φ —— 滚动角

2、姿态敏感器


姿态敏感器测量航天器本体坐标系相对于某个基准坐标系的相对角位置和角速度，以确定航天器的姿态。





2、姿态敏感器

按不同的基准方位，可分为下列5类：

- (1) 以地球为基准方位：红外地平仪，地球反照敏感器；
 - (2) 以天体为基准方位：太阳敏感器，星敏感器；
 - (3) 以惯性空间为基准方位：陀螺，加速度计；
 - (4) 以地面站为基准方位：射频敏感器；
 - (5) 其他：例如磁强计(以地磁场为基准方位)，陆标敏感器(以地貌为基准方位)。
- 



2、姿态敏感器

按不同方式的测量变换器可分为下列4种：

- (1) 光学敏感器：太阳敏感器，红外地平仪，星敏感器，地球反照敏感器等；
- (2) 惯性敏感器：陀螺、加速度计；
- (3) 无线电敏感器：射频敏感器；
- (4) 其他：磁强计。



3、太阳敏感器

通过对太阳辐射的敏感来测量太阳视线与航天器某一体轴之间夹角的敏感器。

广泛的通用性：

1. 太阳近似看作是点光源；
2. 太阳光源很强，敏感器结构简单，其功率要求也很小；
3. 太阳敏感器的视场很大。

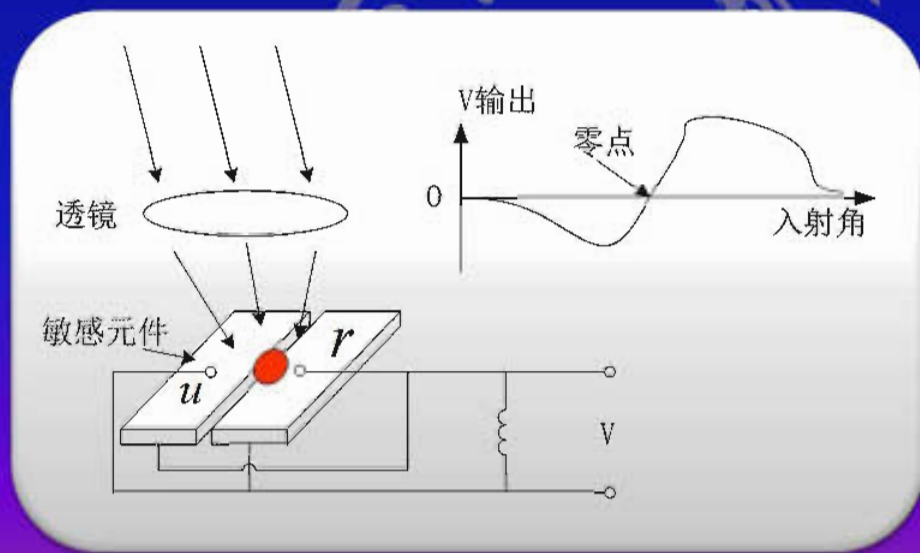
太阳敏感器具有3种基本类型：

模拟式、数字式和太阳指示器。



3.1 模拟式太阳敏感器

模拟式太阳敏感器的输出信号大小和符号是太阳光入射角的连续函数。通常又叫做余弦检测器，这是因为硅太阳电池输出电流与太阳光入射角成正弦规律变化。



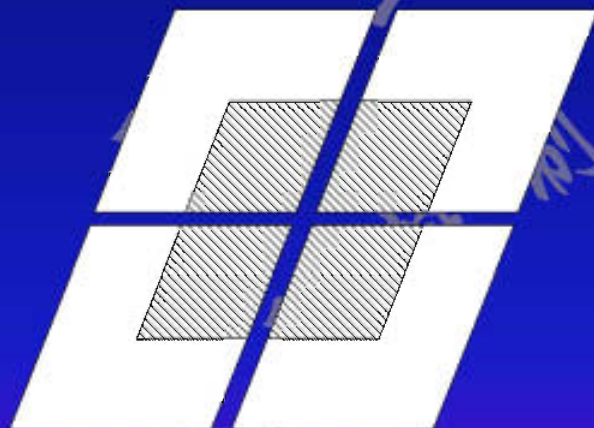
模拟式太阳敏感器工作原理

单轴模拟式太阳敏感器：

敏感相对于太阳方向的一个姿态角

双轴模拟式太阳敏感器：

同时获得相对于太阳方向的两个姿态角

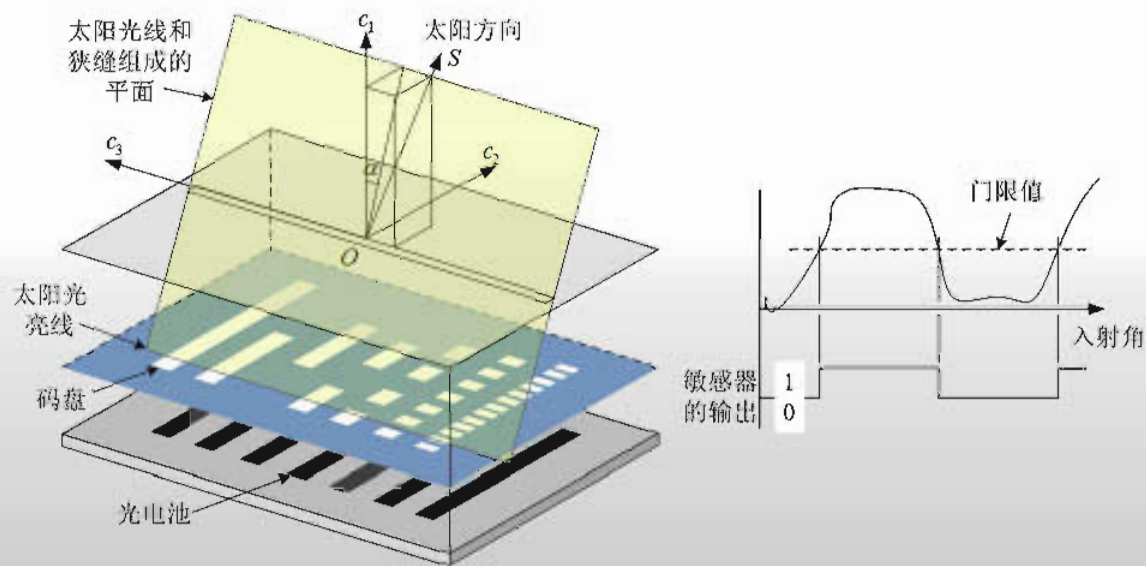


两轴模拟式太阳敏感器

视场在几十度时，精度可达到 0.5° ；

视场很小时（ $1^\circ \sim 2^\circ$ ），精度可达到 0.05° 。

3.2 数字式太阳敏感器



分辨率

视场 / 2^n

数字式太阳敏感器工作原理




3.3 其他太阳敏感器

太阳指示器也称为太阳出现探测器。

当太阳出现在敏感器视场内，并且信号超过门限值时，表示见到了太阳，输出为1；

当信号低于门限值时，输出为0，表示没见到太阳。

这种敏感器一般用来作保护器，例如保护红外地平仪免受太阳光的影响。






3.4 目前的技术状态

(1) 小型化、高精度全功能

双轴太阳敏感器

- 面阵CCD作探测器
 - 110度视场内精度达到30''
 - CCD不需要制冷，结构简单
 - 不需要复杂的运算软件
 - 处理电路简单，信噪比高
- 

3.4 目前的技术状态

(2) 集成于单片的太阳敏感器

- 采用CMOS工艺，功耗低
- 探测器用开关型光敏二极管，不用CCS，统一了工艺
- 图像中心单元采用专用集成电路，提高了适应性

性能方面：

体积缩小了4/5~19/20

质量减小了1/2~14/15



3.5 太阳敏感器特点

太阳敏感器优点：

- 信号源强
- 功耗低，质量轻
- 精度较高，约1'

使用限制：

- 有阴影区



3.6 太阳敏感器国内外现状

俄罗斯地球物理协会

CCD太阳敏感器

视场: $92^{\circ} \times 92^{\circ}$

精度: 0.003°

功耗: $0.6W$



3.6 太阳敏感器国内外现状

日本Astro公司

视场： $\pm 64^\circ \times \pm 60^\circ$

精度： $(0 \sim \pm 32^\circ) 0.05^\circ$
 $(\pm 32 \sim \pm 64^\circ) 0.1^\circ$

功耗：0.5W

寿命：15年



3.6 太阳敏感器国内外现状

美国GoodRich公司(13-517)

狭缝式模拟太阳敏感器

视场： $128^{\circ} \times 168^{\circ}$

精度：优于 0.3°

功耗：0.3W

寿命：15年





3.6 太阳敏感器国内外现状

中国（以东3和东4平台为例）

数字式太阳敏感器

精度(fov内): $\leq 0.05^\circ(3\sigma)(-32^\circ \leq \alpha \leq +32^\circ)$
 $\leq 0.1^\circ(3\sigma)$ (其他)

视场(fov): $120^\circ \times 120^\circ$

寿命: 15年





3.6 太阳敏感器国内外现状

中国（以东3和东4平台为例）

模拟式太阳敏感器

精度(fov内): $\leq \pm 1^\circ (|\alpha| \leq 4^\circ)$

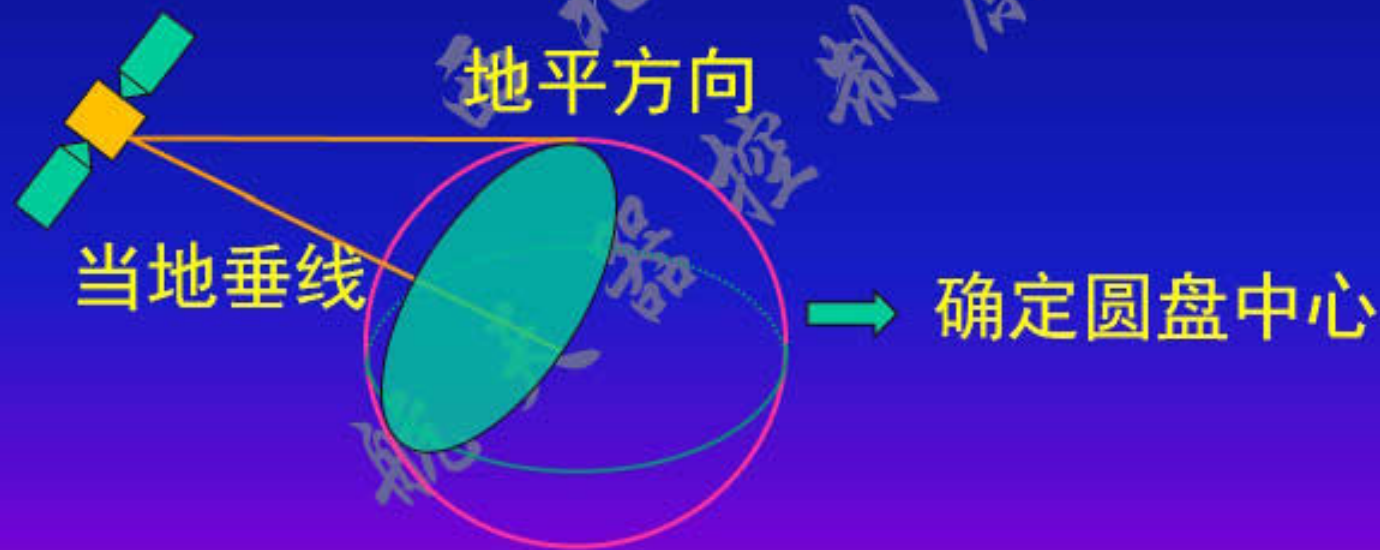
$\leq \pm 2^\circ (4^\circ \leq |\alpha| \leq 20^\circ)$

视场(fov): $90^\circ \times 90^\circ$

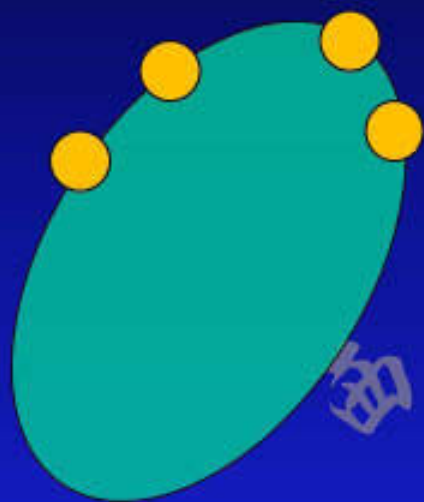
设计寿命: 10年

4 红外地平仪

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。



4.1 确定圆盘中心的方案(1)



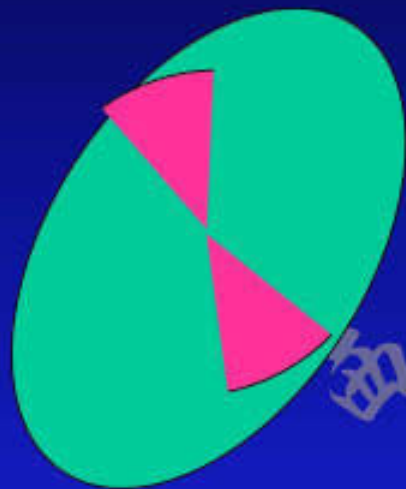
实质是边缘敏感

敏感器视场对地球
扫描运动

确定边缘上的三个点，从而确定中心

✓ 地球扫描敏感方案

4.1 确定圆盘中心的方案(2)



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。

测量覆盖地球圆盘边缘若干小区域的辐射通量。

✓ 地球热辐射平衡敏感方案



4.2 地球红外辐射特性

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。



4.2 地球红外辐射特性

地球辐射红外波段的主要特征：

- 1) 辐亮度变化比可见光小得多；
- 2) 辐亮度高的红外波段其可见光辐亮度低。

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。



红外地平仪波段选择

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：

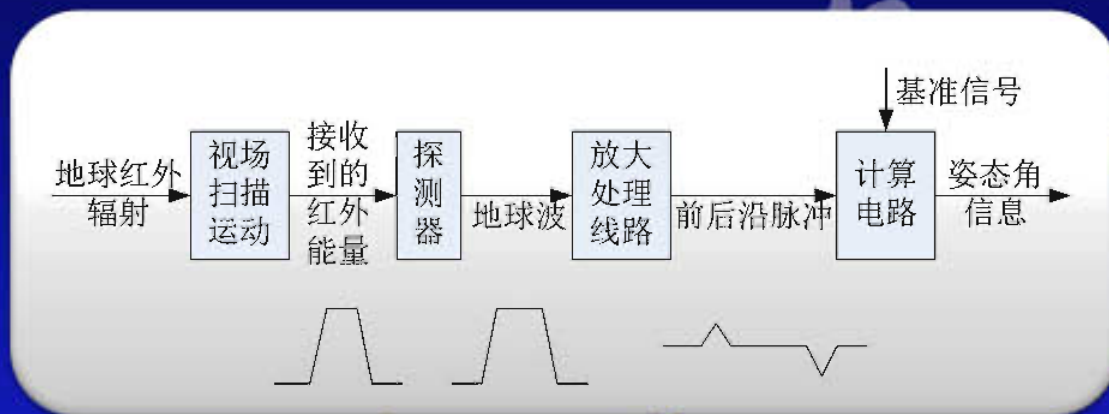
- 1、温度波动的影响较小；
- 2、对水蒸气和云层辐射起伏扰动有很好屏蔽能力；
- 3、地平辐射分布具有较大梯度；
- 4、符合目前红外技术水平，可供实用。

4.3 红外地平仪的分类

主要有3种形式：地平穿越式、边界跟踪式和辐射热平衡式。

其中地平穿越式地平仪扫描视场较大，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。

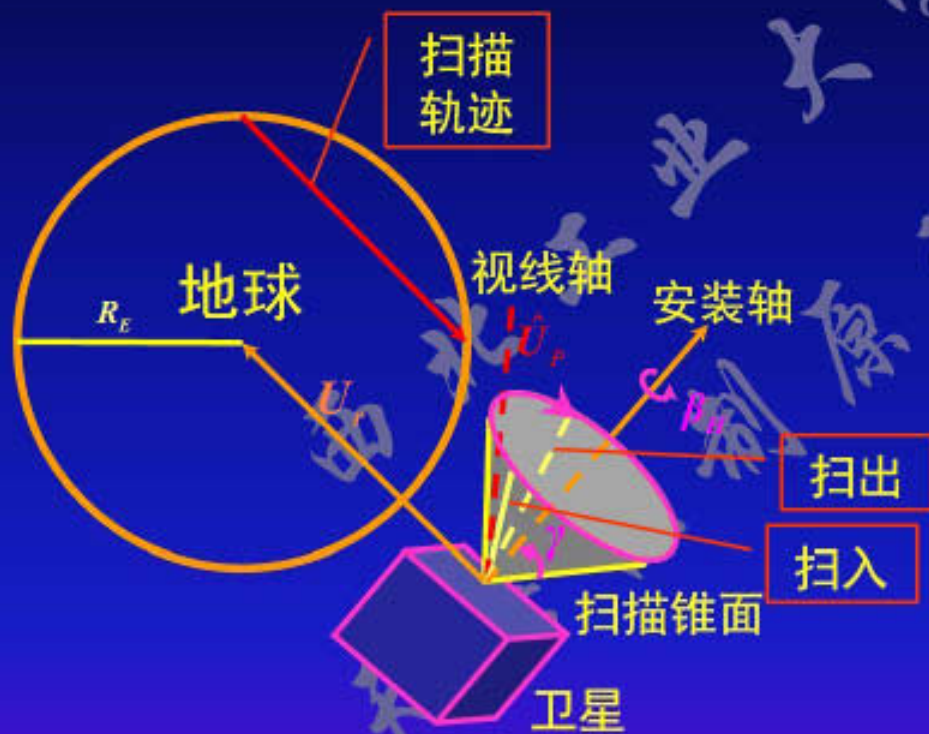
(1) 地平穿越式地平仪



地平穿越式地球敏感器原理图

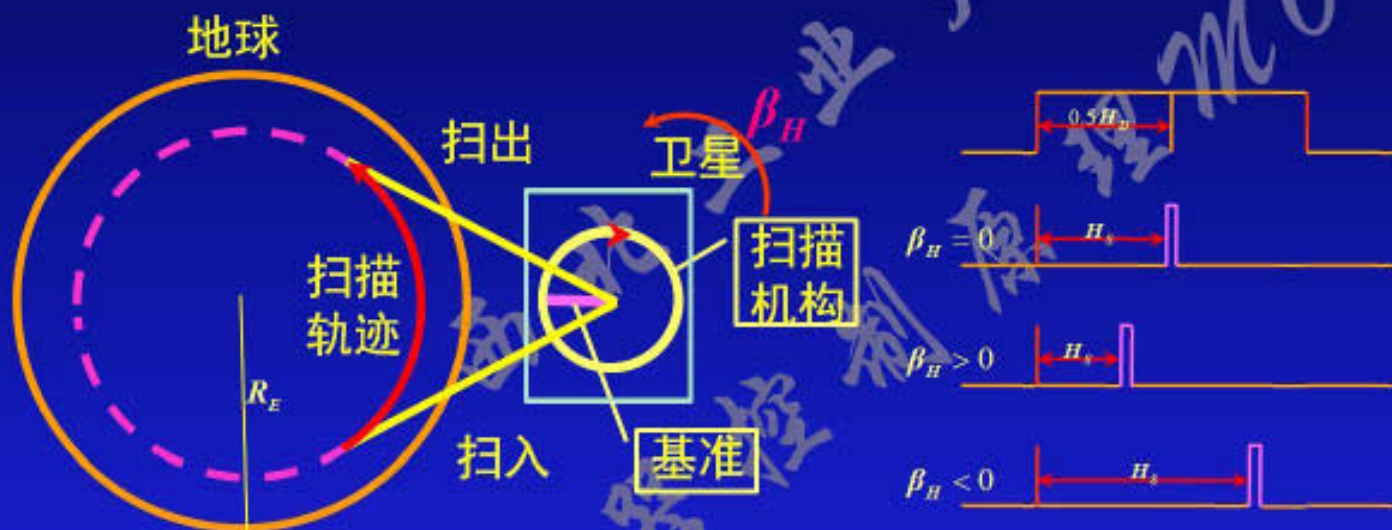
穿越式地平仪常见有两种形式：圆锥扫描地平仪和自旋扫描地平仪。前者依靠地平仪的扫描机构，后者依靠航天器旋转（例如自旋卫星）。

(1) 地平穿越式地平仪



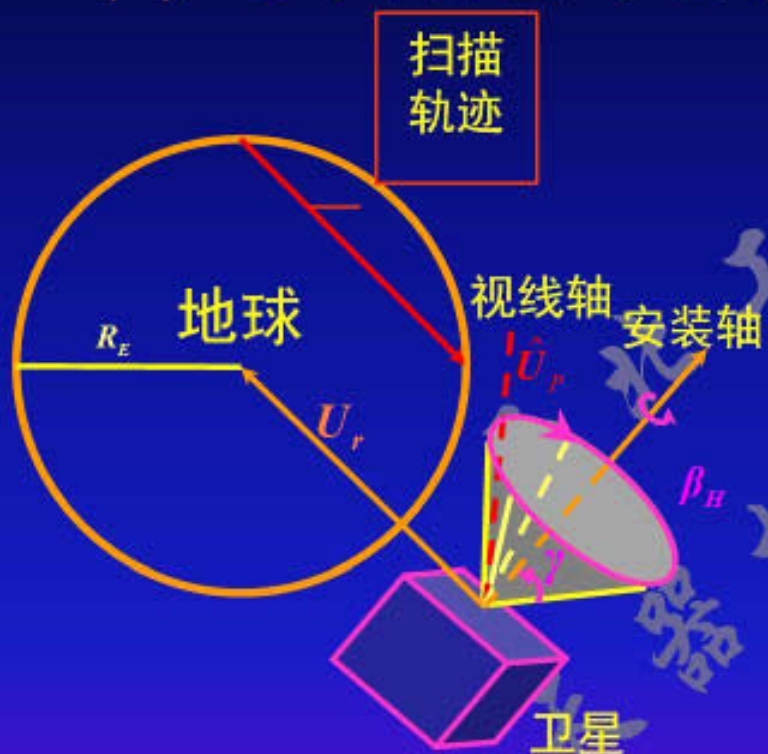
三轴稳定卫星圆锥扫描安装图

(1) 地平穿越式地平仪



三轴稳定卫星圆锥扫描原理

(1) 地平穿越式地平仪



$$\beta_0 = \frac{t_s - t_0}{T} \times 360^\circ$$

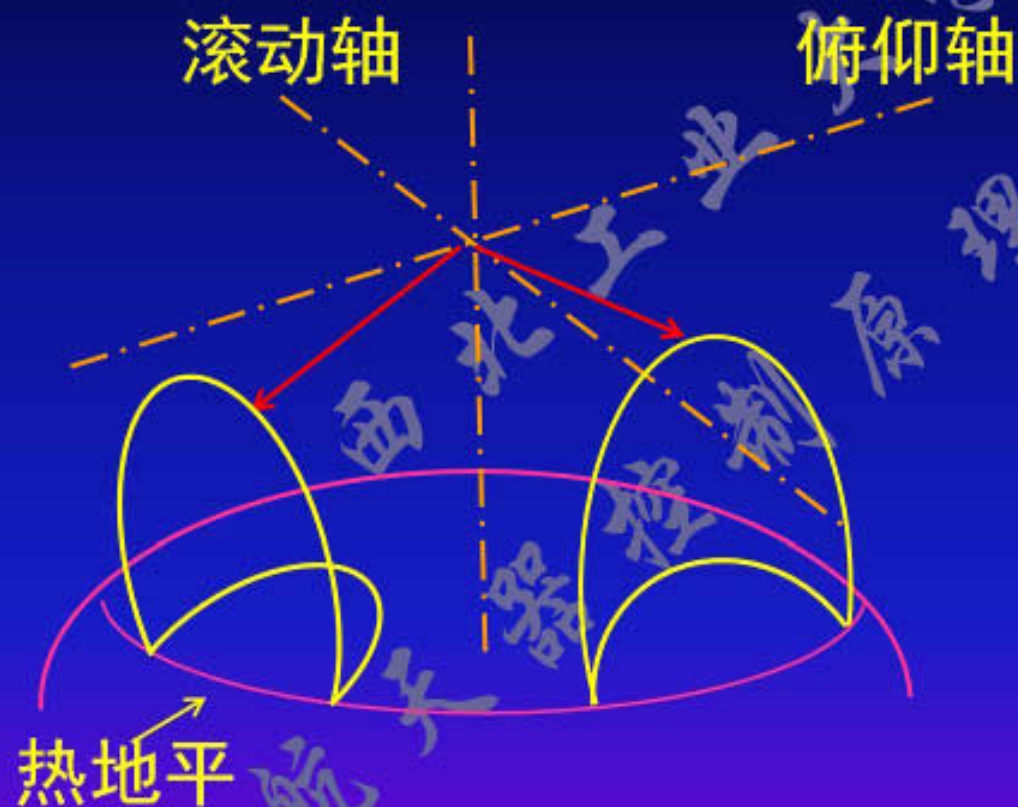
$$H_s = \frac{t_s - t_i}{T} \times 360^\circ = \beta_i$$

$$H_D = \frac{t_0 - t_i}{T} \times 360^\circ = -\beta_0 + \beta_i$$

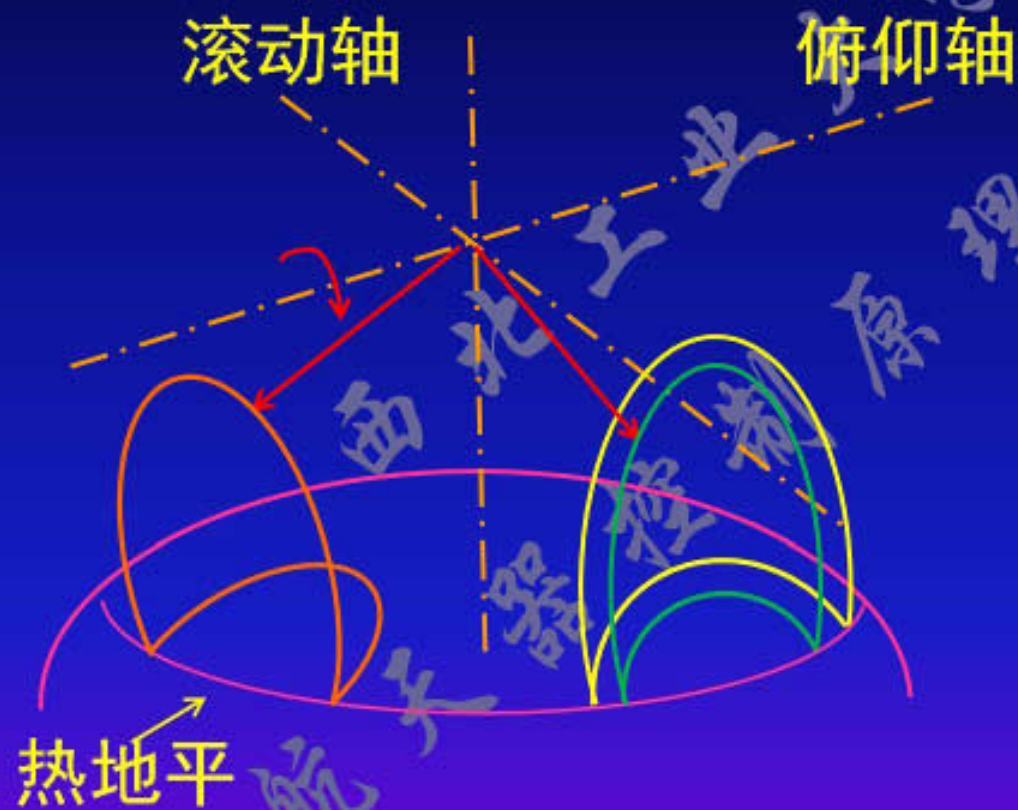
$$\begin{aligned} \beta_H &= 0.5 H_D - H_s \\ &= -0.5 (\beta_0 + \beta_i) \end{aligned}$$

三轴稳定卫星圆锥扫描求解

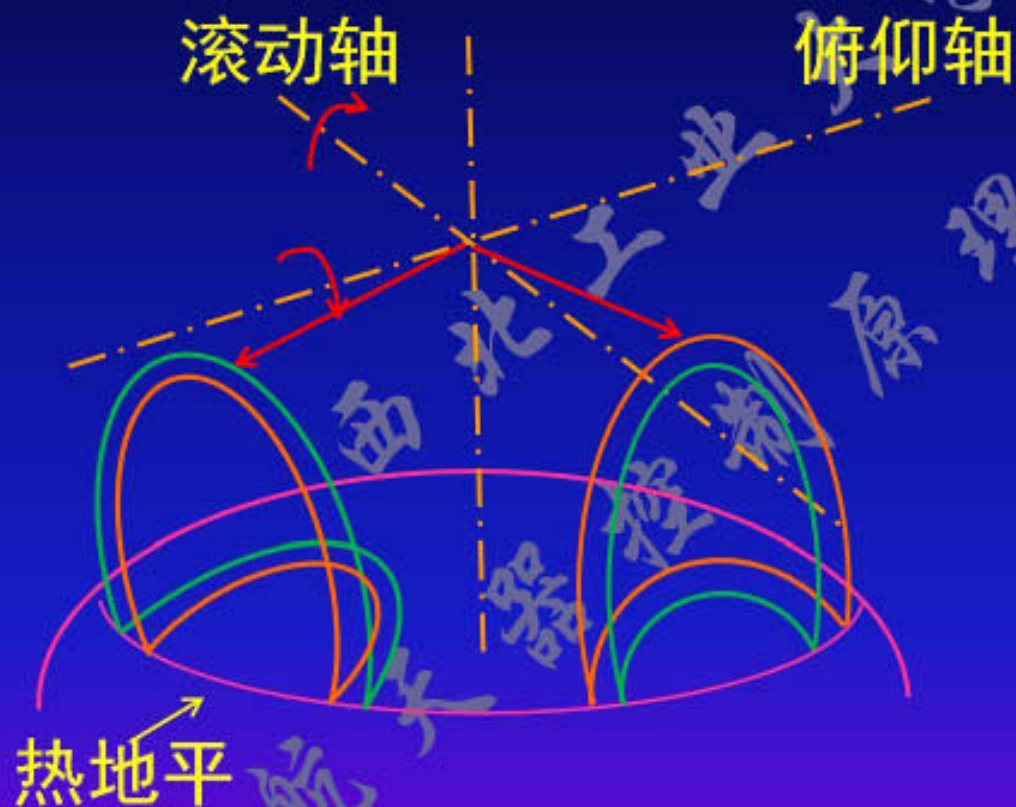
(2) 圆锥扫描地平仪



(2) 圆锥扫描地平仪

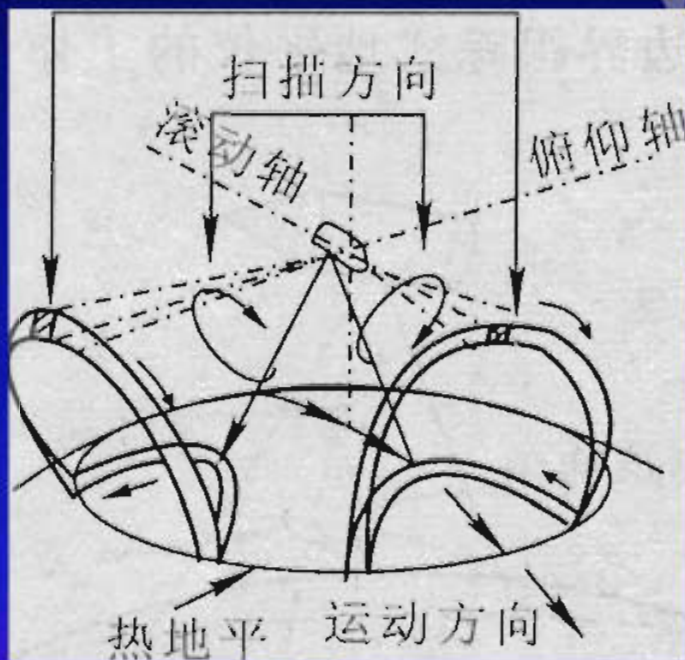


(2) 圆锥扫描地平仪



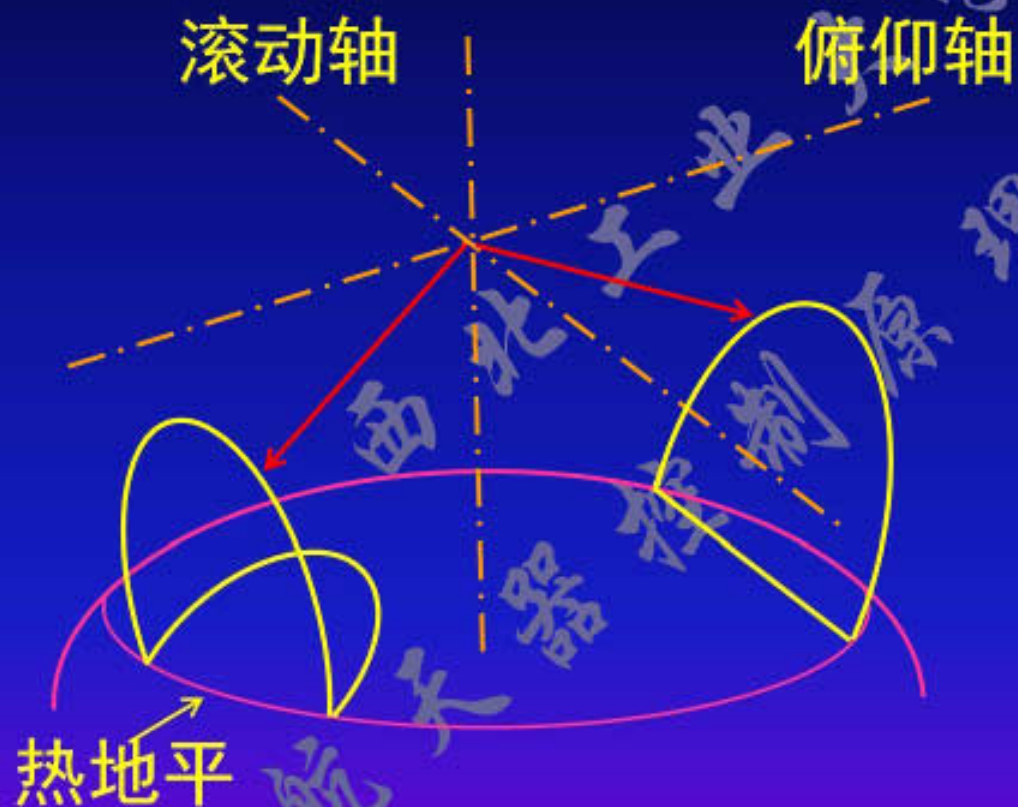
垂直安装方式，可以直接获取姿态角。

(2) 圆锥扫描地平仪

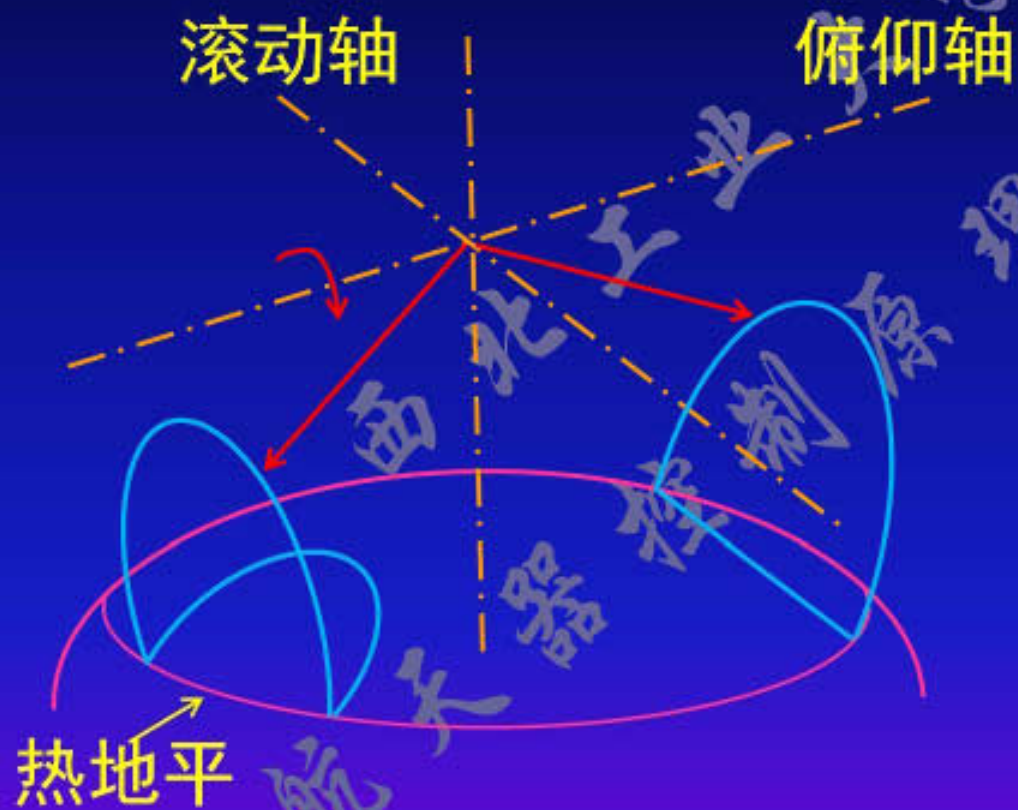


两个扫描轴安装成为 90°

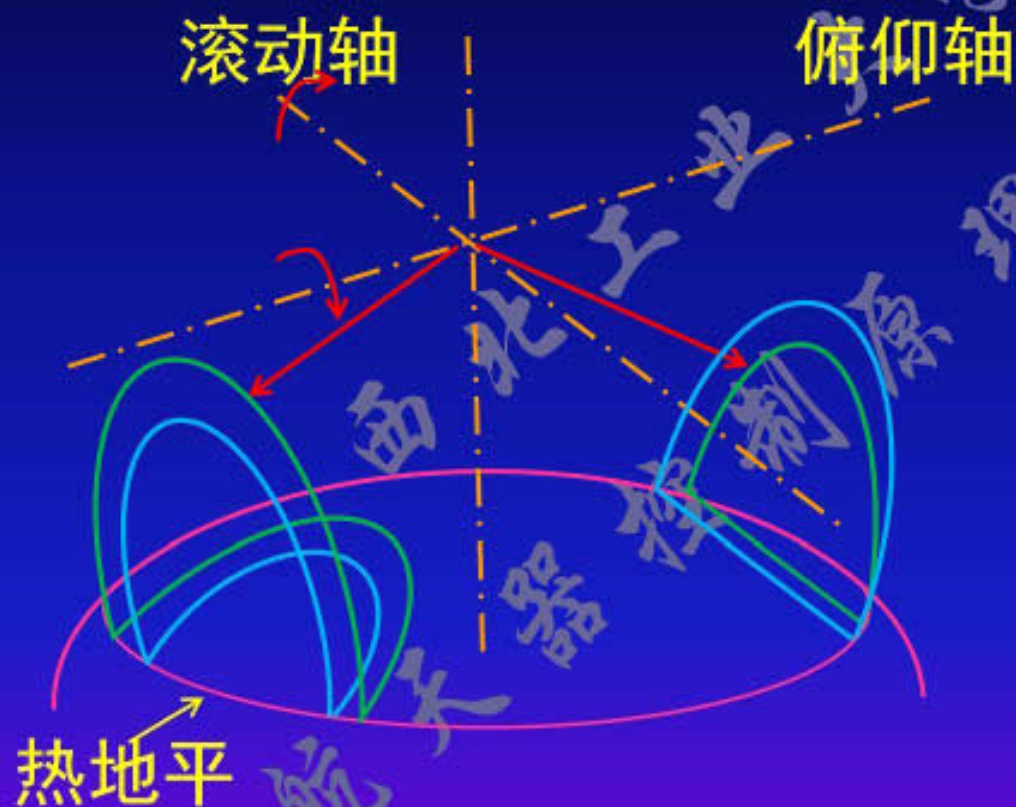
(2) 圆锥扫描地平仪



(2) 圆锥扫描地平仪

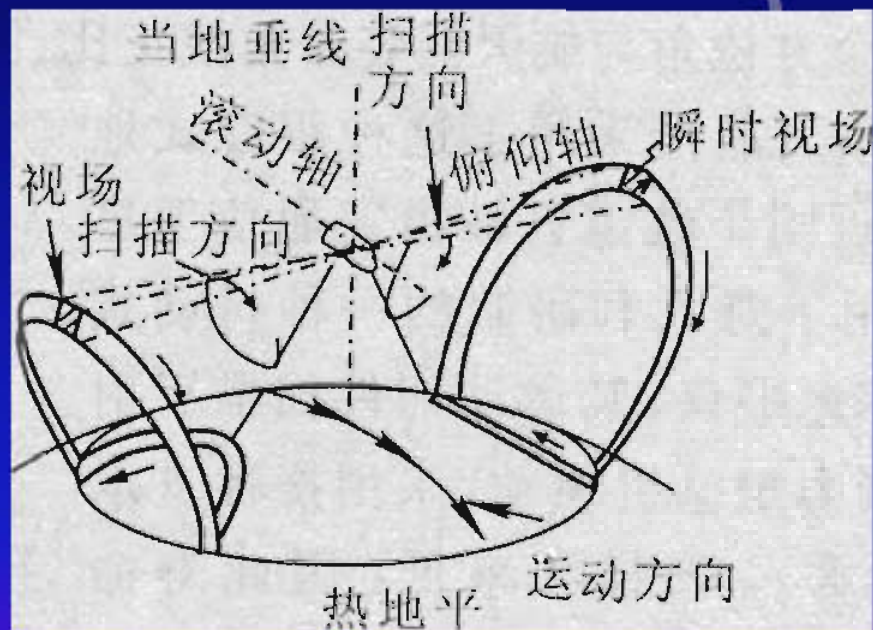


(2) 圆锥扫描地平仪



共面安装方式，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来得到。

(2) 圆锥扫描地平仪



两个扫描轴与当地垂线共面安装

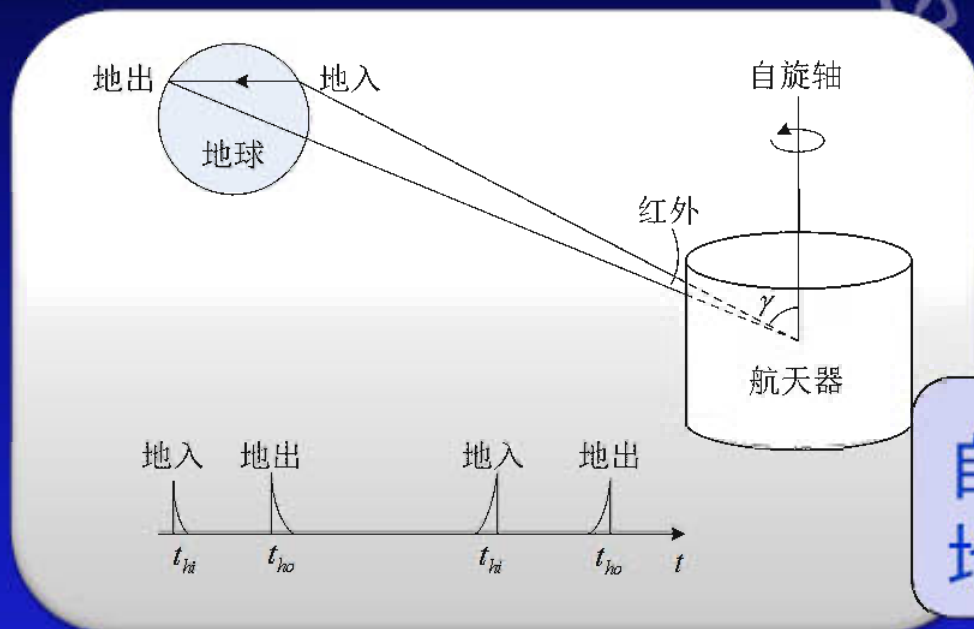


无论哪一种安装方式，红外地平仪均只能测量出航天器的俯仰和滚动两个姿态角。

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。这种地平仪精度可达到 0.1° 。

(3) 自旋扫描地平仪



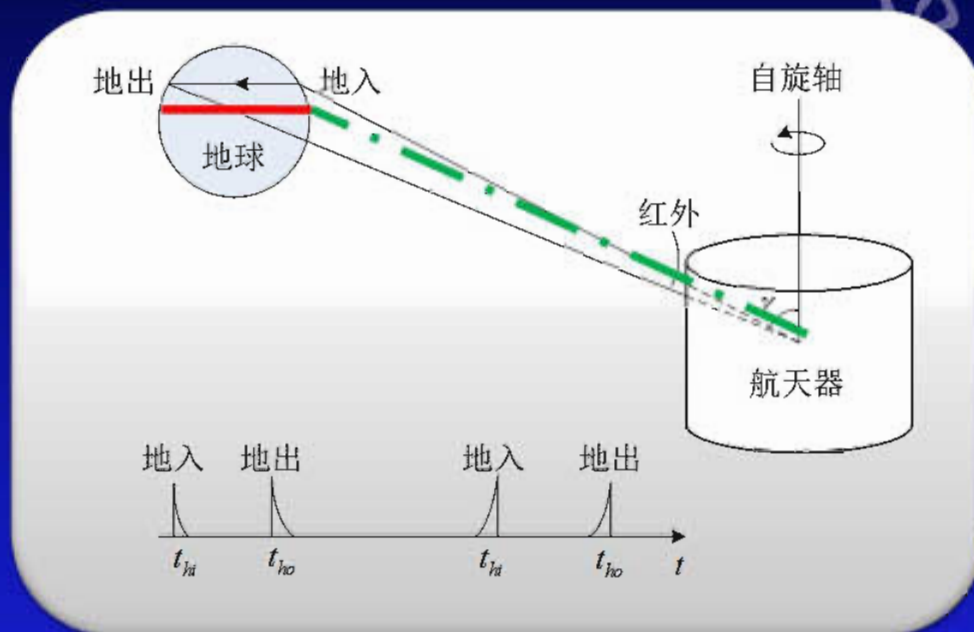
自旋轴与当地垂线或
地平的夹角

自旋扫描红外地平仪原理图

t_{hi}, t_{h0} 表示地球弦宽长短，含有姿态信息

+ 轨道信息 → 姿态角

(3) 自旋扫描地平仪

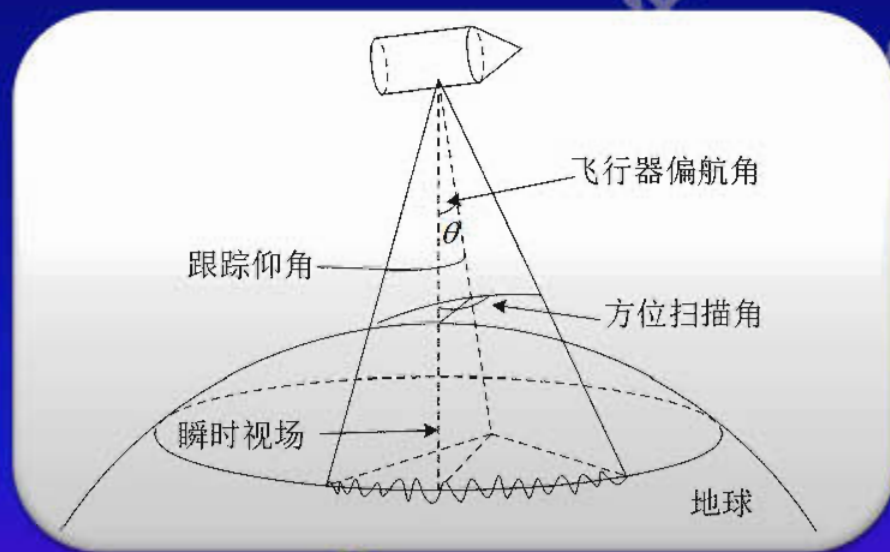


自旋扫描红外地平仪原理图

安装两个地平仪，得到两条弦宽
两条弦宽进行比较 → 姿态角

(4) 边界跟踪式地平仪

具有一个反馈伺服机构，它使视场跟踪地平线，同时给出相对于星体的方位角。

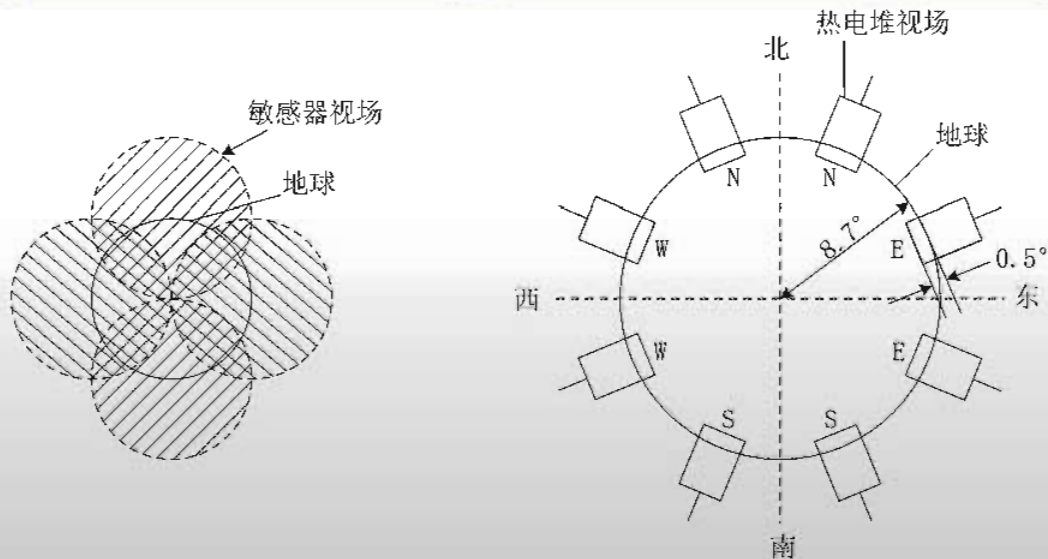


边界跟踪式地平仪

影响因素：大气成分、温度的不规则变化以及日出日落的光照条件变化。

(5) 辐射热平衡式地平仪

具有多个视场，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。



辐射热平衡红外地平仪




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，所以适合长寿命飞行任务。

两个技术难点：

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。





4.4 红外地平仪特点

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°
- 受轨道影响大

3.6 红外地平仪国内外现状

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

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

参数名称	STD15	STD16
应用高度(km)	15,000~140,000	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
数据输出率 (Hz)	1.25	1
质量(kg)	3.4	3.5
功耗(W)	7.5	7.5
设计寿命	15	5

目前，这两个型号
已成功应用于
SPOT1~5, ETS VII,
TELECOM I, II等卫
星。



STD16



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)	≤ 3.2	≤ 2.7	≤ 2.8
随机误差	$\leq 0.03^\circ (3\sigma)$	$\leq 0.1^\circ (3\sigma)$	$\leq 0.1^\circ (3\sigma)$
系统误差	$\leq 0.05^\circ$	$\leq 0.1^\circ$	$\leq 0.05^\circ$
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: $\pm 6^\circ$, 宽 扫描: $\pm 11^\circ$	地球弦 宽度: $8^\circ \sim 20^\circ$ 自旋速度: 15~120r/min	扫描频率: 1hz 扫描锥半角: 55° 分辨率: $2'$ ifov: $1.5^\circ \times 1.5^\circ$