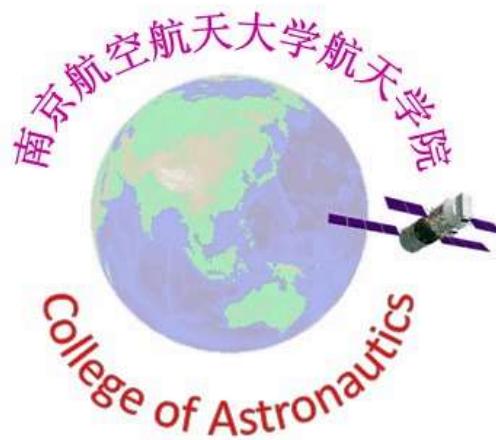




# 航天器轨道动力学



杨洪伟

航天学院

# 任课教师基本情况



任课教师：

杨洪伟 教授/博士生导师

(航天控制工程系)

个人主页

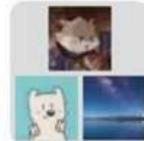


联系方式（答疑解惑welcome）：

办公 室：将军路校区D11楼B313室

电子邮件：[hongwei.yang@nuaa.edu.cn](mailto:hongwei.yang@nuaa.edu.cn)

微信：课程讨论群(发布消息通知)



群聊：25年秋季航天器轨道动力学课程



该二维码7天内(11月25日前)有效，重新进入将更新

课程助教（答疑解惑）：

梁国梁 博士生

2023年航天学院本专业毕业

航天学院B505研究室

课后答疑：

每周三19:00-20:00

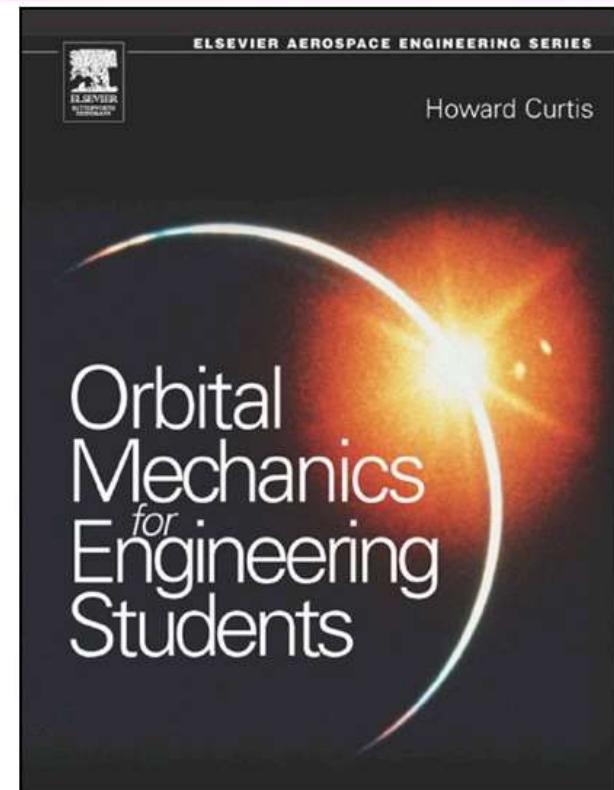
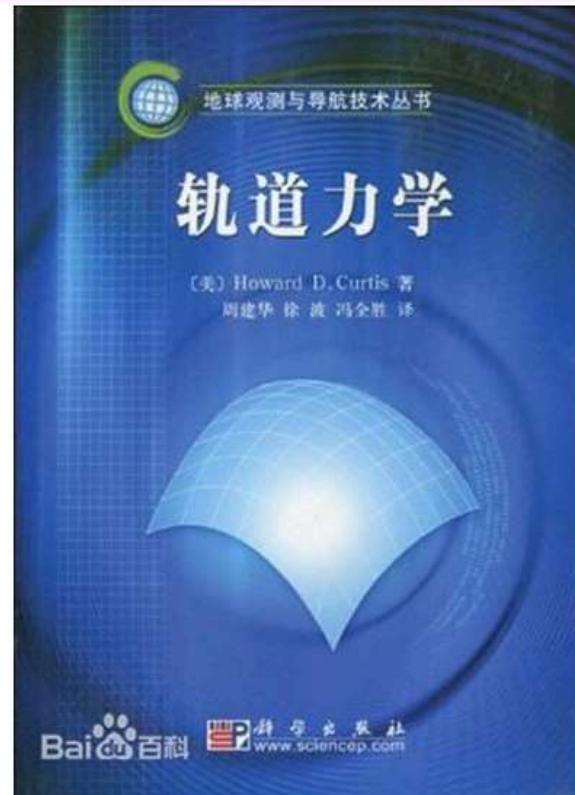
# 参考书目或网站



参考教材：

原著作者：  
Howard Curtis,  
美国安博瑞德  
航空航天大学

周建华、徐波、  
冯全胜 译

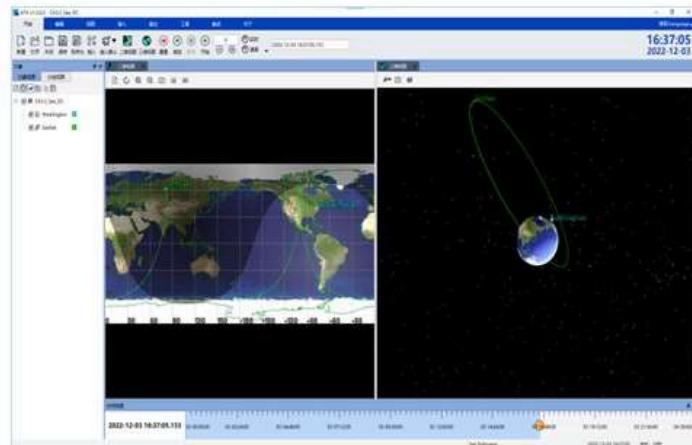


- ◎有关MATLAB的介绍书目；
- ◎有关网站或网页：登月、火星探索、神舟飞船、航天器、空间计划、天文知识等

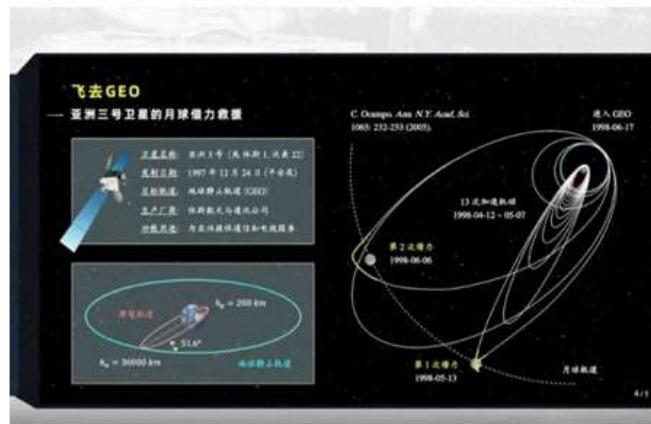


# 其他课程相关资源（参考）

国产航天任务设计软件：ATK (Aerospace Tool Kit )



线上慕课资源（配套有习题资源）





## 航天器轨道动力学 2学分（12-19周） 理论教学32学时

### 成绩比例

#### (1) 平时成绩 (20%)

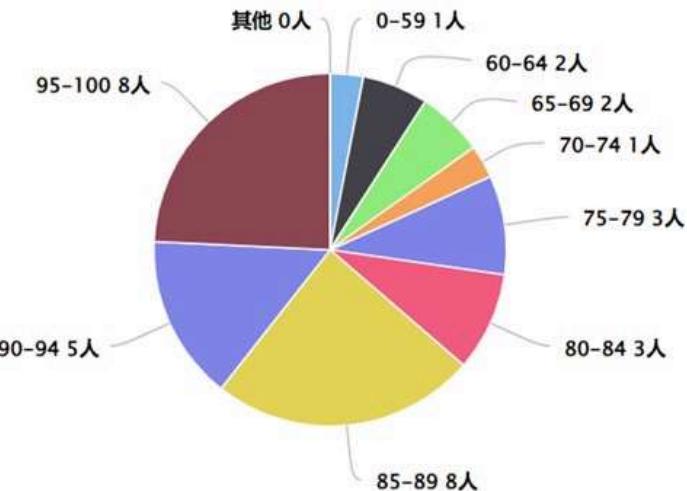
- 考勤+课后小作业+课堂表现

#### (2) 阶段成绩 (20%)

- 计划大作业2次，需编程仿真实验，需提交报告

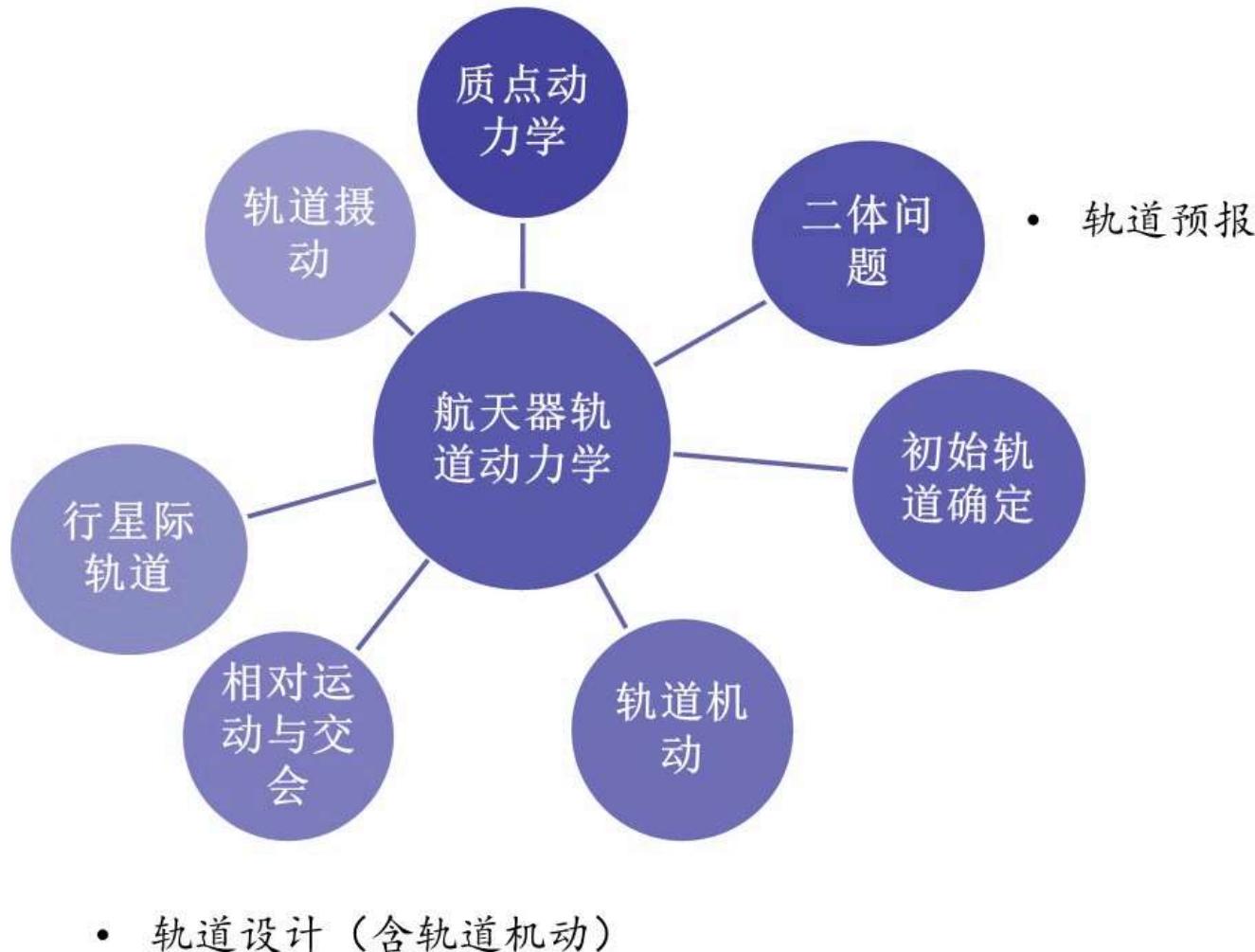
#### (3) 期末考试 (60%)

- 闭卷，包括判断或选择、简答、计算推导等





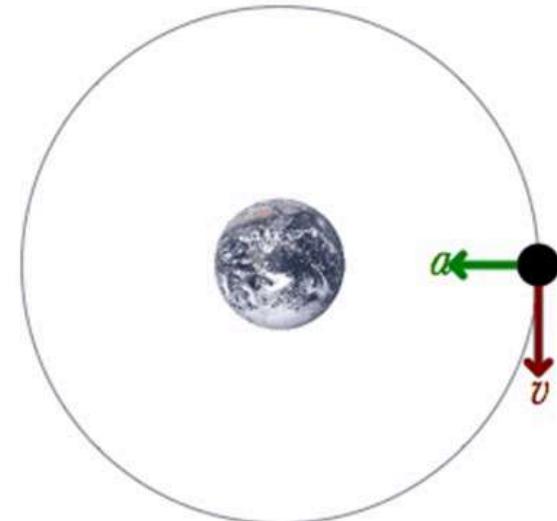
# 课程内容





## 何为航天器轨道？

- **轨道**——航天器质心的运动轨迹，包括发射轨道、运行轨道、返回轨道等



## 何为轨道动力学？

- **轨道动力学**——从天文学发展而来，以牛顿定理及万有引力定律为基础。研究轨道的特点、轨道转移及控制。实际上**是研究航天器质心的运动。**  
**(与姿态动力学的区别？)**



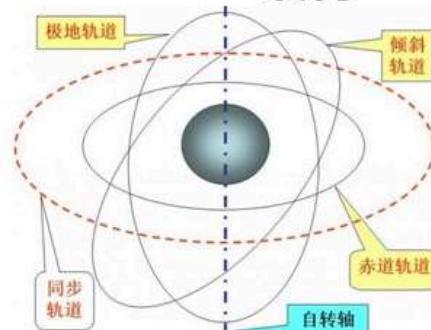
# 航天器轨道动力学作用

## 为什么要学习轨道动力学？

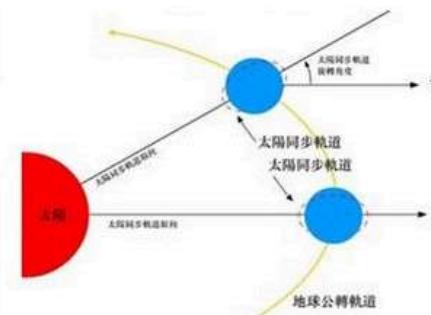
- 通过轨道动力学，可以用于确定航天器运行轨道及其规律、预报航天器的位置和速度等，是

### 航天器任务设计基础

- ✓ 任务轨道（太阳同步、冻结、回归）
- ✓ 发射窗口（探月、探火）
- ✓ 载荷...



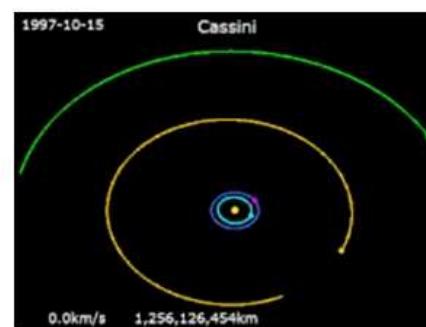
特殊轨道



太阳同步轨道

### 航天器GNC基础

- ✓ 轨道机动控制
- ✓ 制导设计
- ✓ 滤波算法状态估计...



星际转移轨道

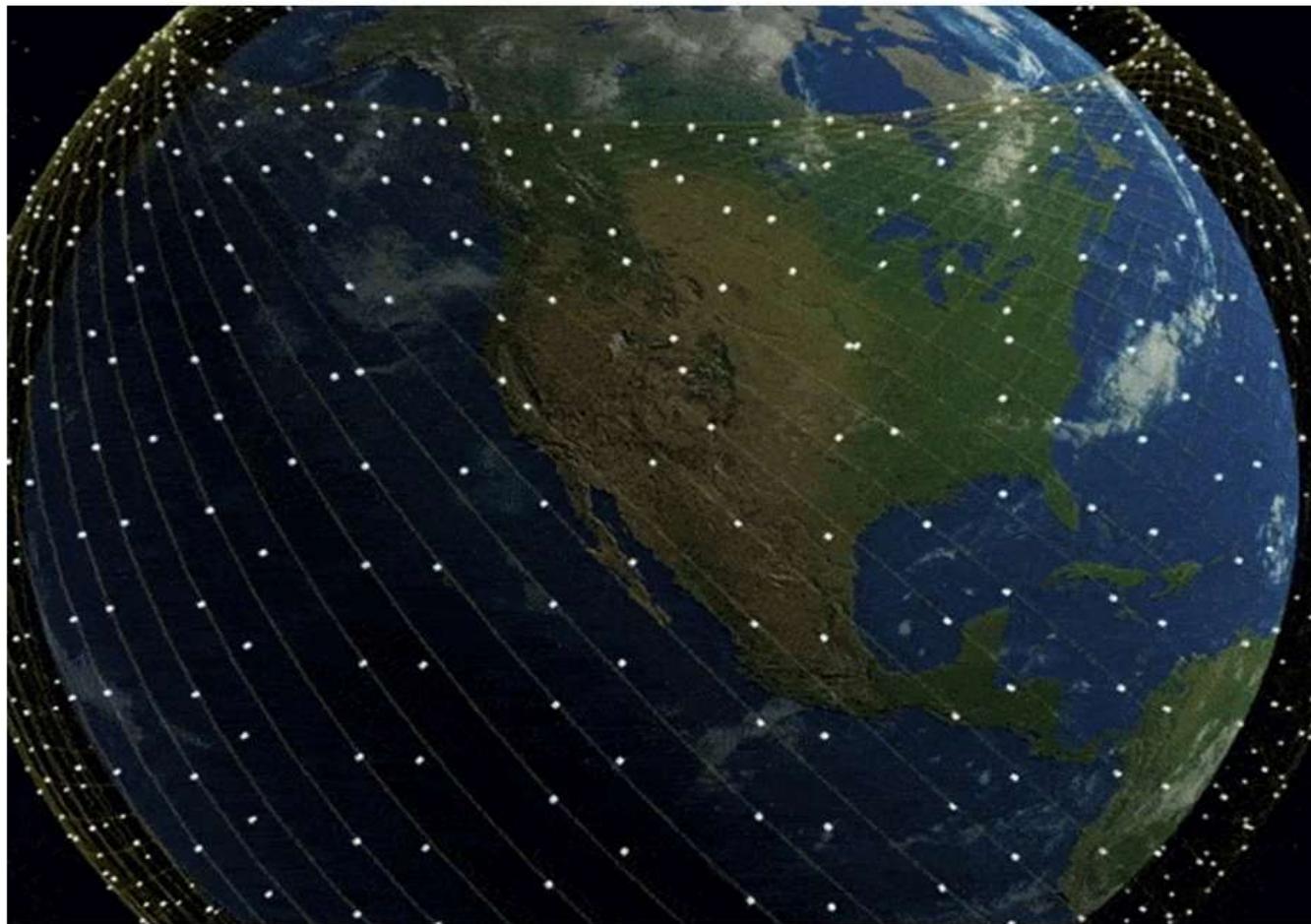


借力飞行轨道

# 绪论



## 巨型星座



2025年11月19日星期三

Page 10



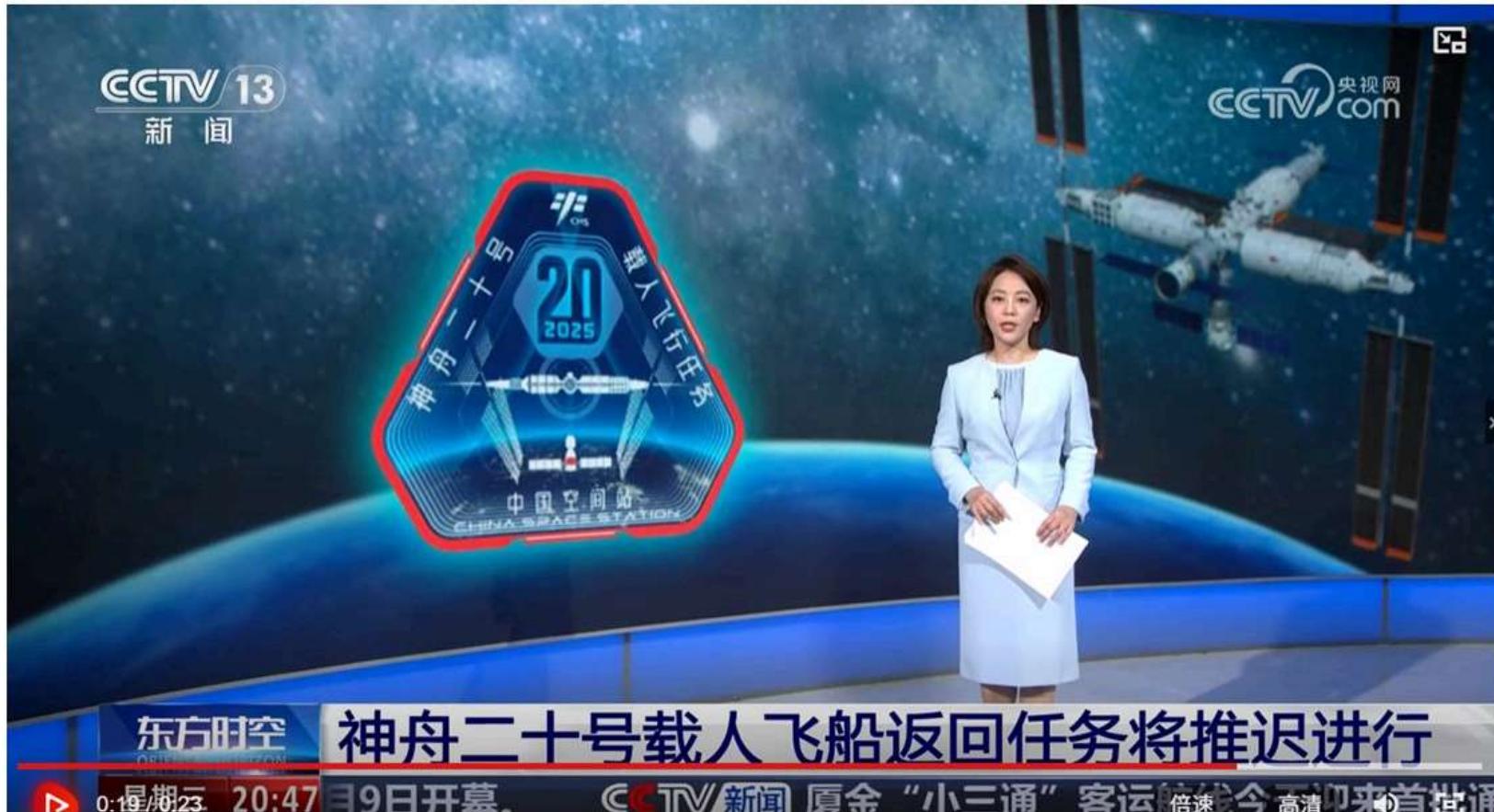
## 空间目标监测



2025年11月19日星期三

Page 11

# 绪论



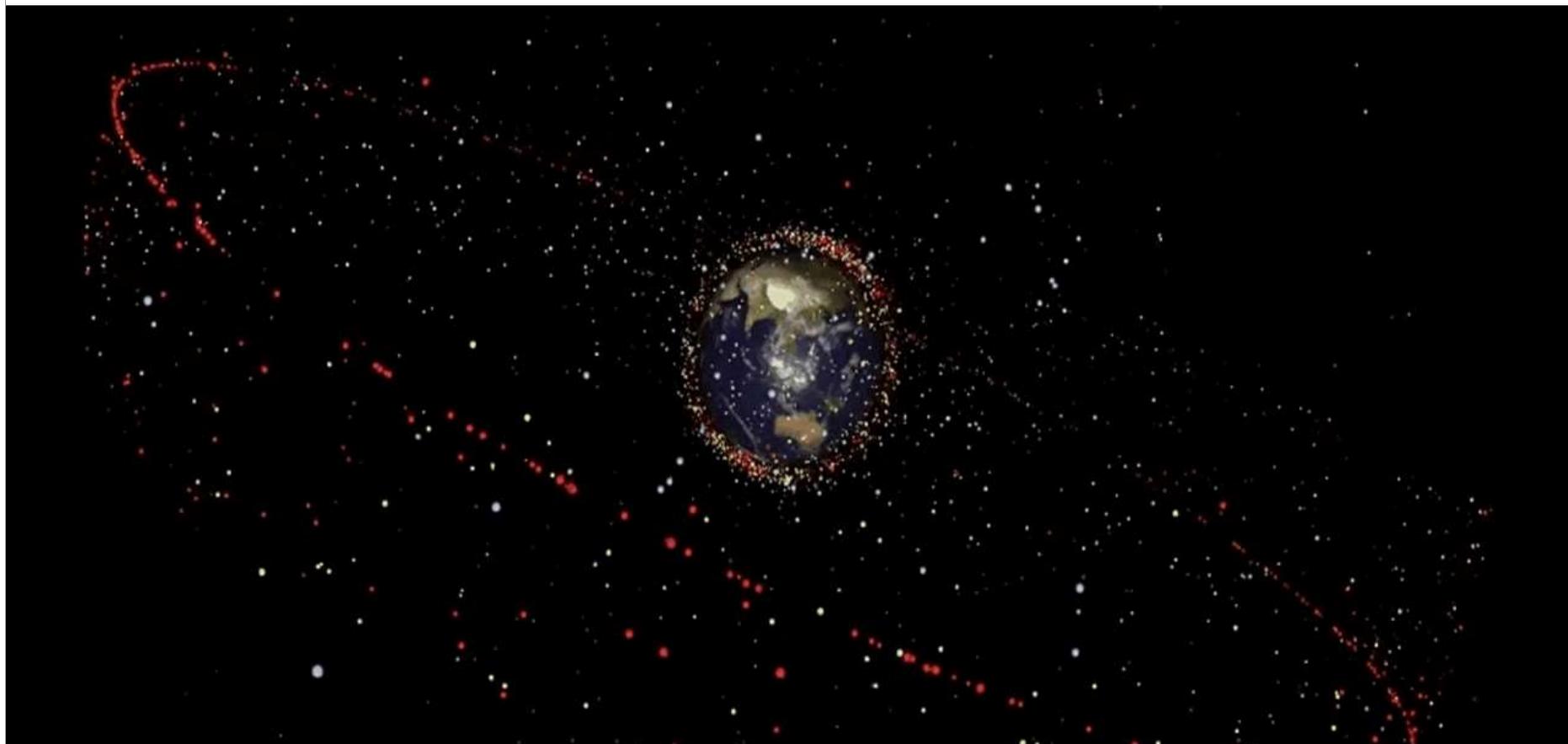
2025年11月19日星期三

Page 12

# 绪论



## 空间碎片

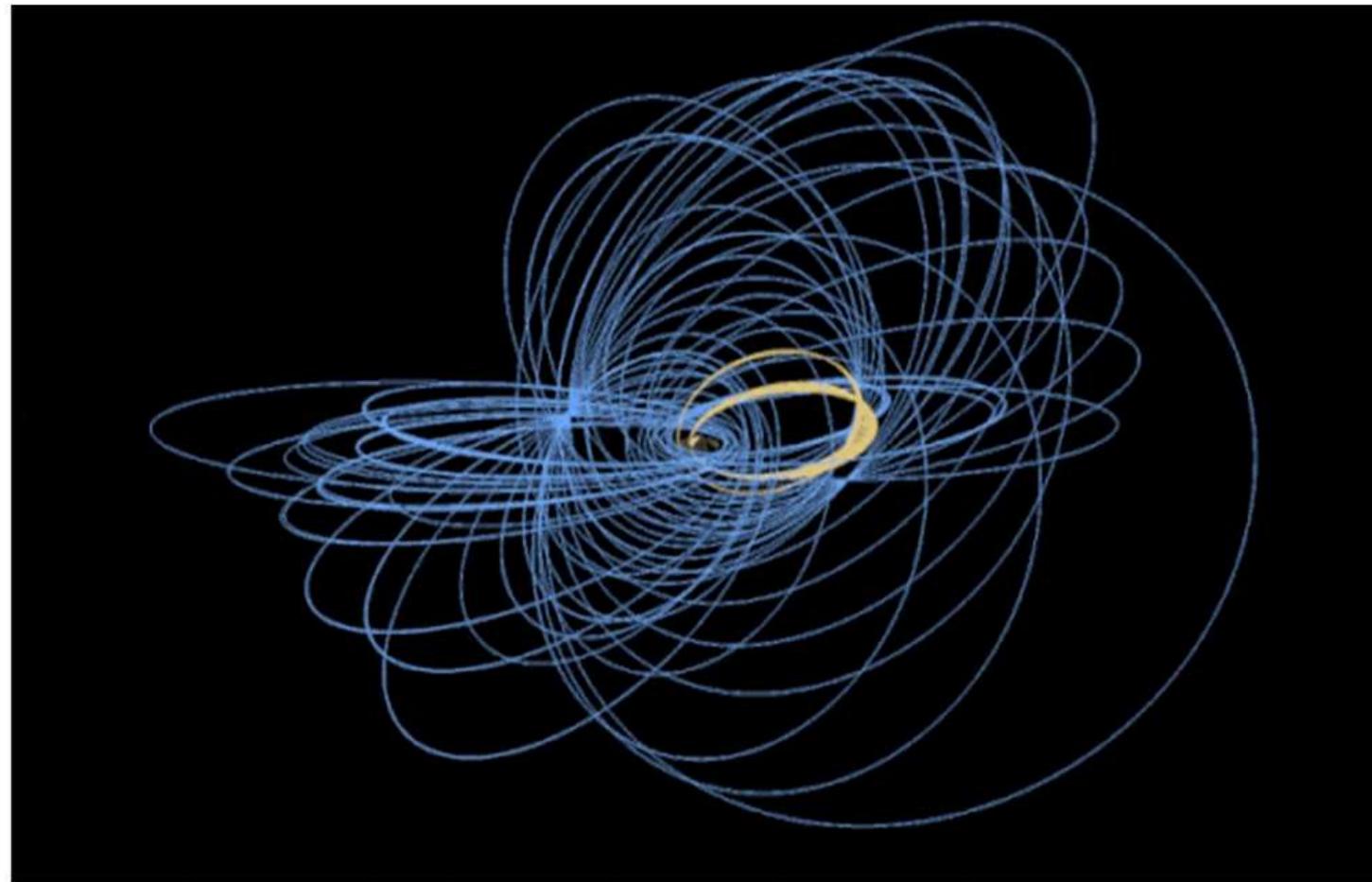


2025年11月19日星期三

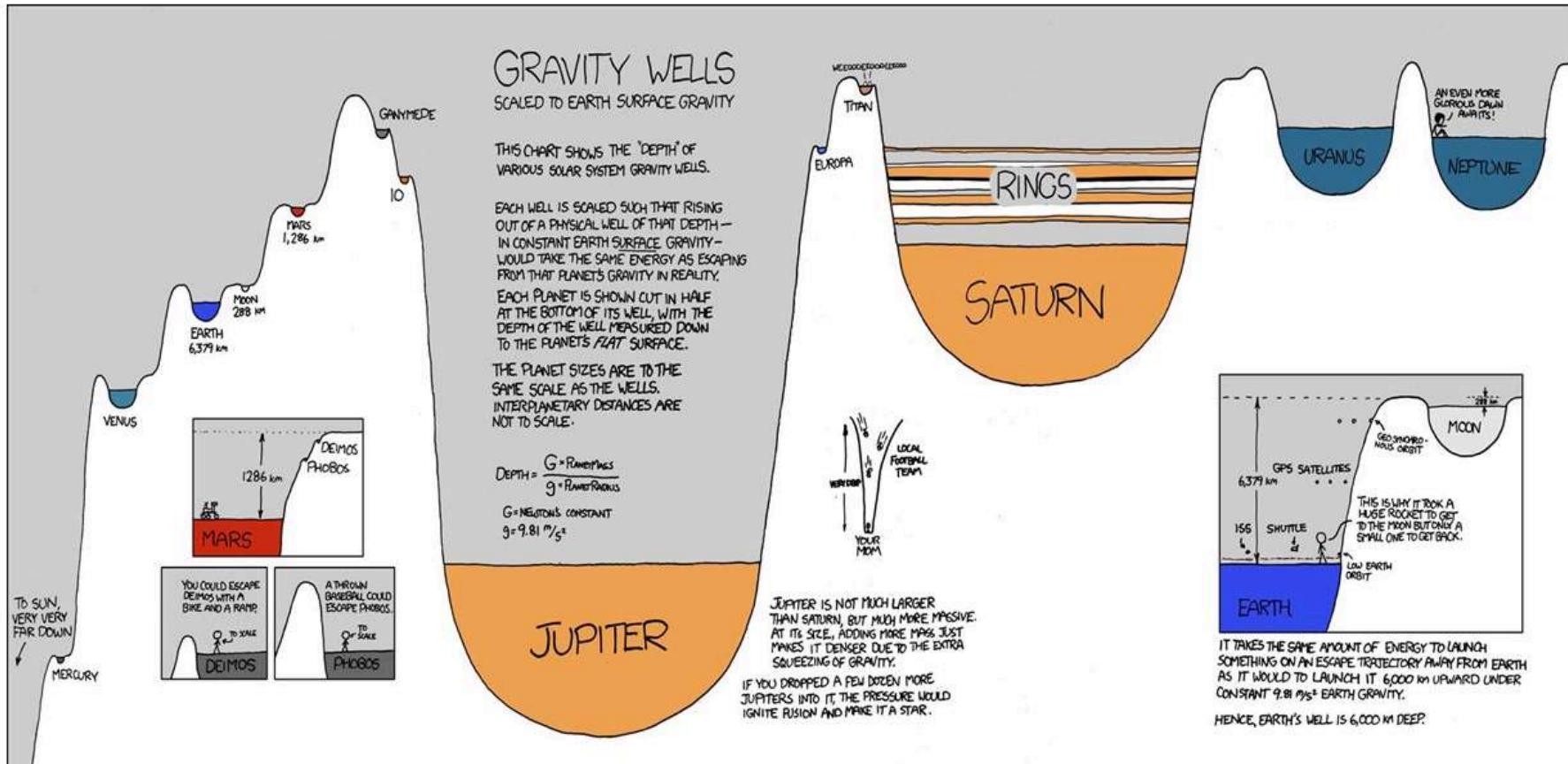
Page 13



## 卡西尼号轨道

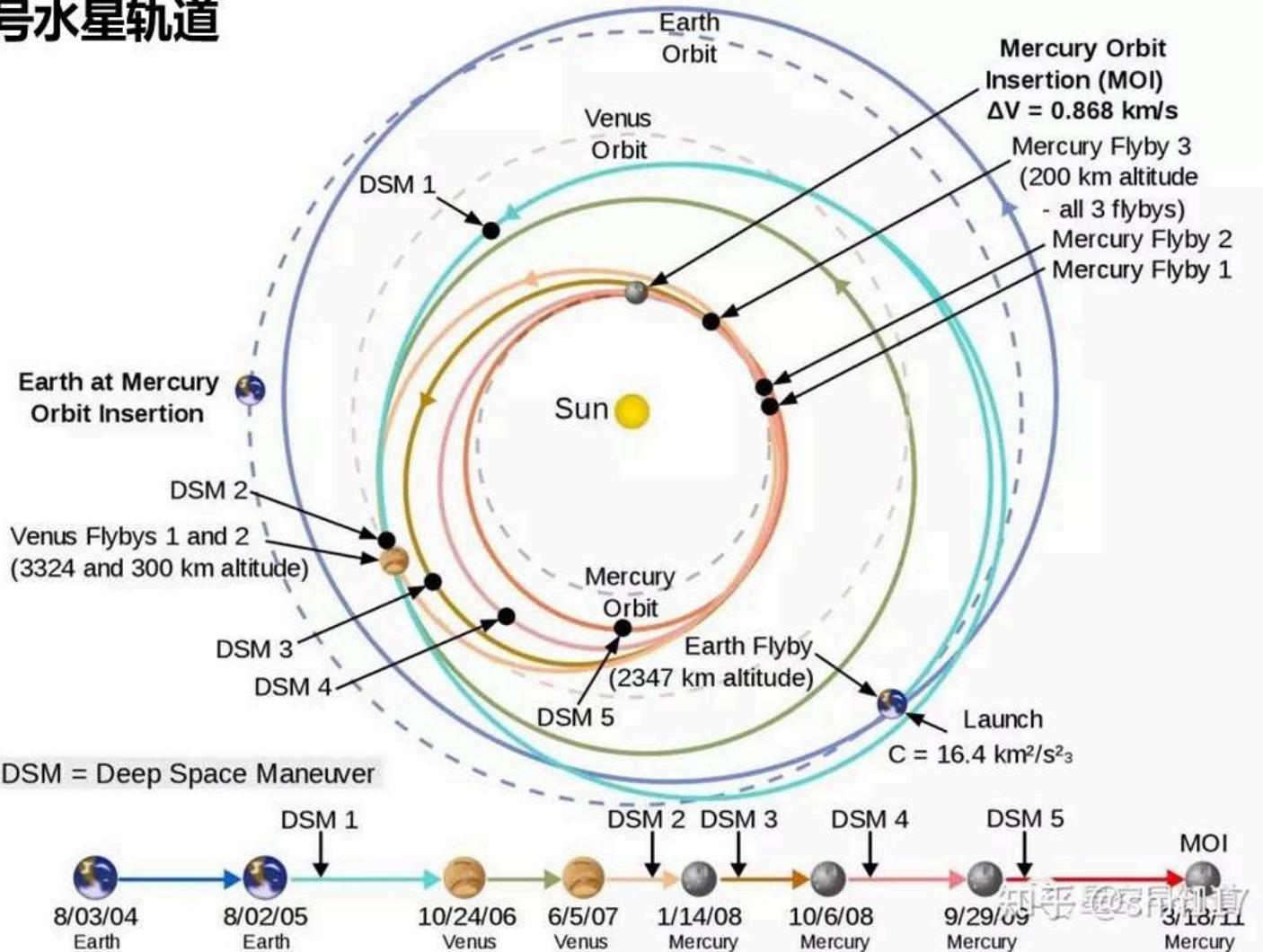


# 绪论





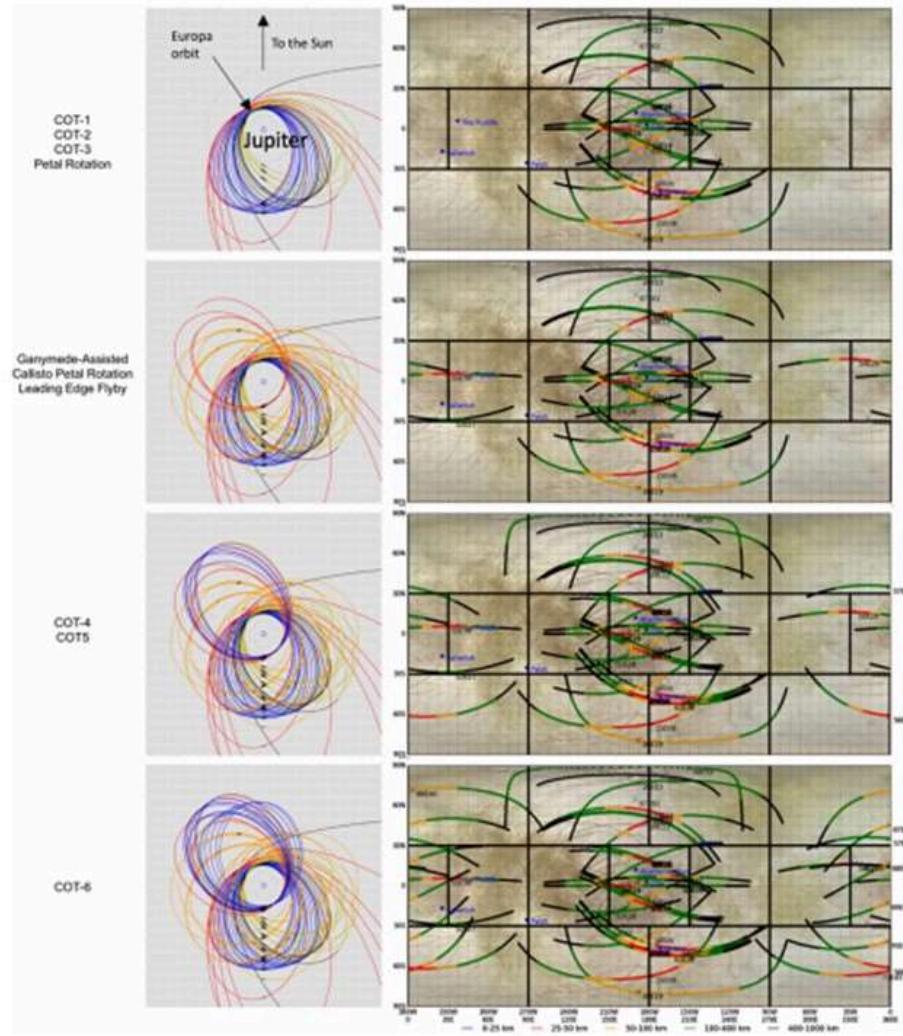
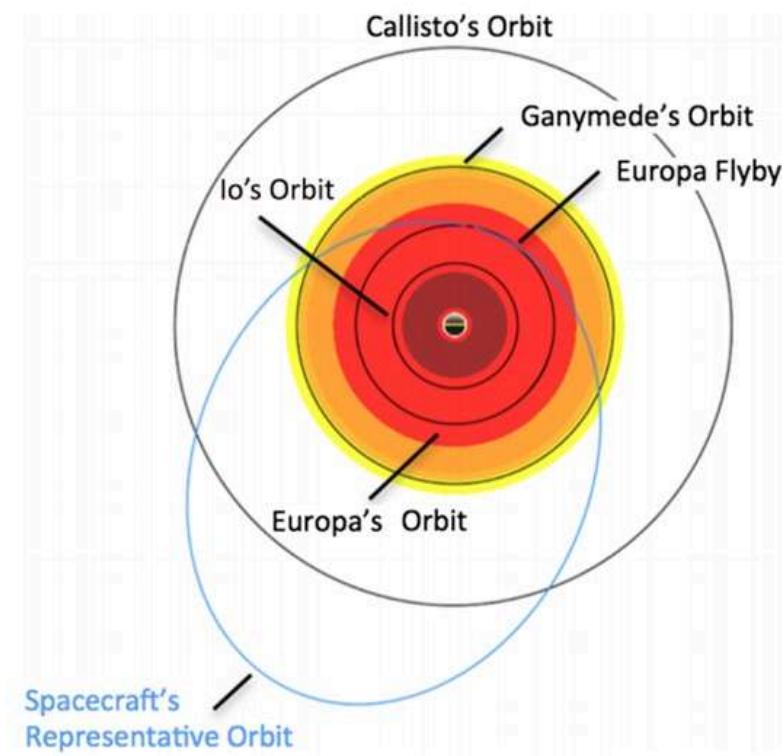
## 信使号水星轨道



# 绪论



## 欧罗巴快船木卫二探测

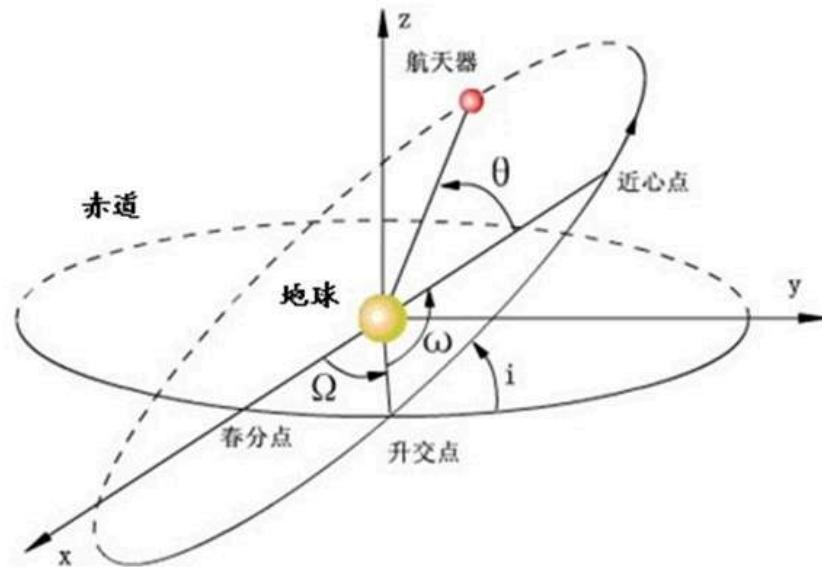




# 轨道描述

## 轨道的描述——轨道根数

- 半长轴 ( $a$ )
- 偏心率 ( $e$ )
- 轨道倾角 ( $i$ )
- 升交点赤经 ( $\Omega$ )
- 近地点辐角 ( $\omega$ )
- 在指定历元的平近点角 ( $M$ )



# 轨道分类

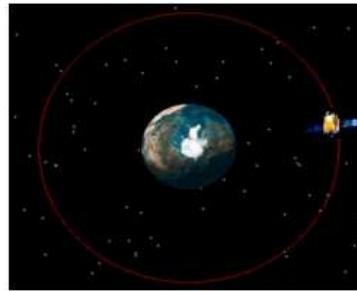


二体轨道

按偏心率e分

圆轨道

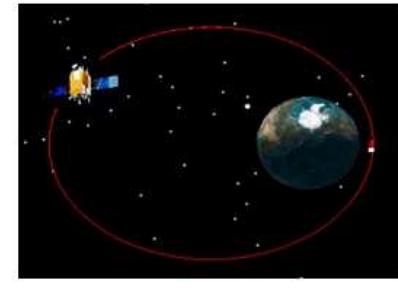
$$e=0$$



圆轨道

椭圆轨道

$$0 < e < 1$$



椭圆轨道

抛物线轨道

$$e=1$$



抛物线轨道

双曲线轨道

$$e>1$$



双曲线轨道



第一宇宙速度相关的什么轨道？

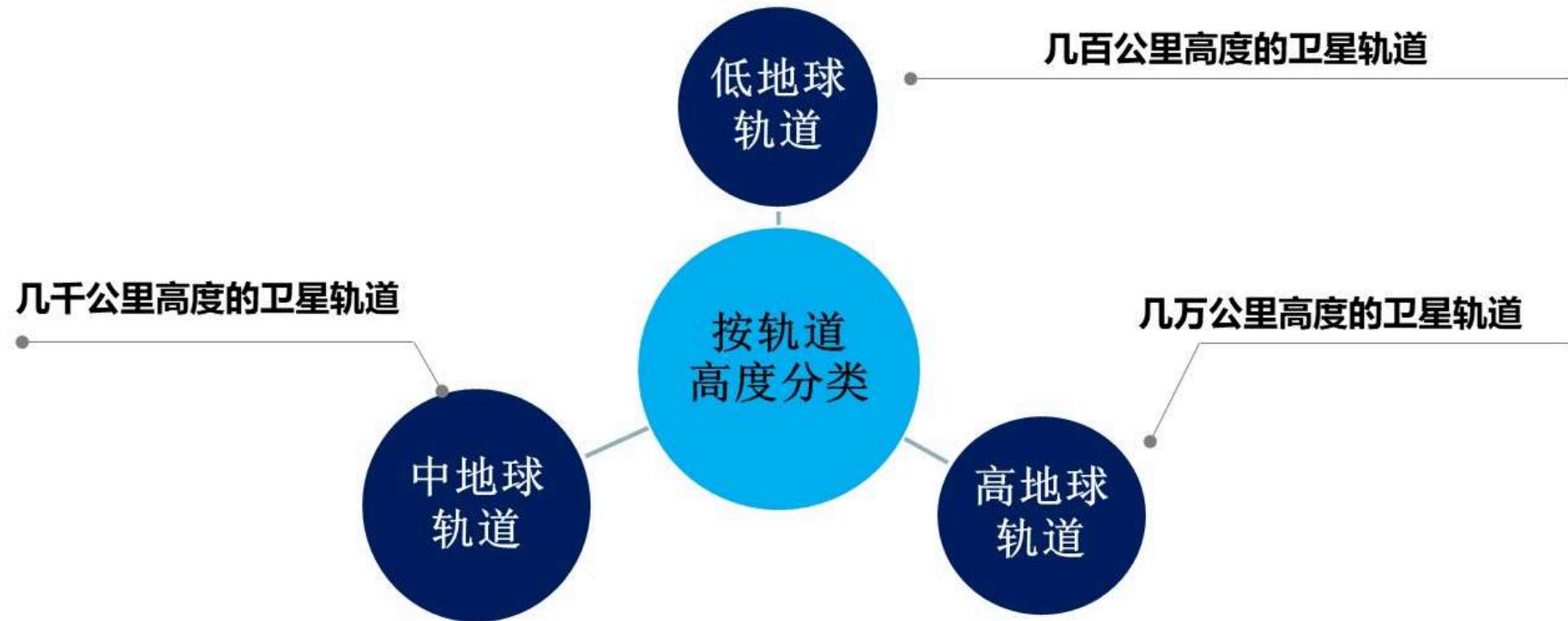
- A 圆轨道
- B 椭圆轨道
- C 抛物线轨道
- D 双曲线轨道



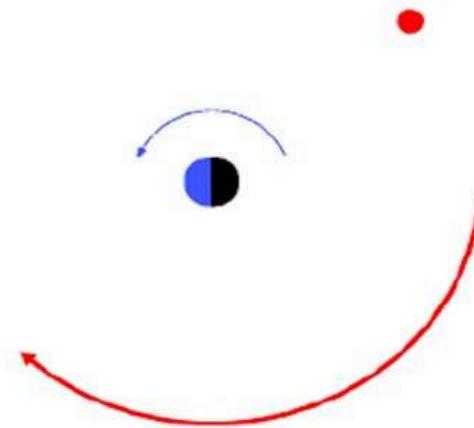
第二宇宙速度相关的什么轨道？

- A 圆轨道
- B 椭圆轨道
- C 抛物线轨道
- D 双曲线轨道

# 轨道分类



# 轨道分类





# 轨道分类

## 特殊轨道：

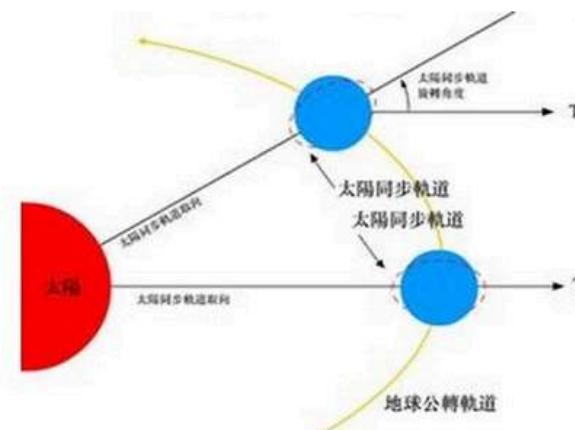
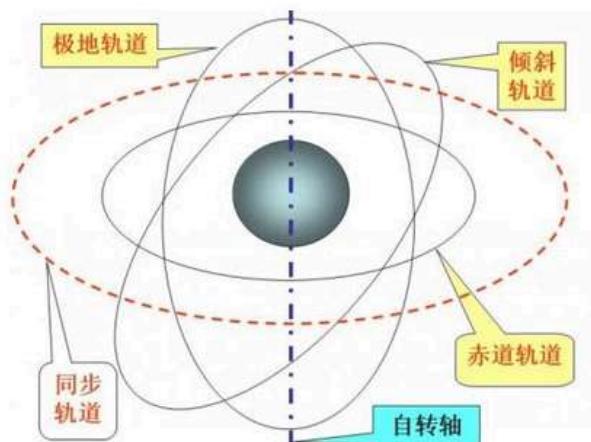
**地球同步轨道：**卫星的轨道周期等于地球在惯性空间中的自转周期（23小时56分4秒），且方向亦与之一致，卫星在每天同一时间的星下点轨迹相同，当轨道与赤道平面重合时称地球静止轨道。

**太阳同步轨道：**是指卫星的轨道平面和太阳始终保持相对固定的取向，轨道倾角（轨道平面与赤道平面的夹角）接近 $90^\circ$ 。卫星要在两极附近通过，因此又称之为近极地太阳同步卫星轨道。

**极 轨 道：**倾角为 $90^\circ$ 的人造地球卫星轨道又称极地轨道。在极轨道上运行的卫星，每一圈内都可以经过任何纬度和南北两极的上空。

**临界/冻结轨道：**当倾角为 $63.43$ 或 $116.57^\circ$ ，轨道拱线不转动，临界轨道，例如闪电轨道（Molniya）；近地遥感卫星，临界倾角不符合应用要求，冻结近地点幅角。

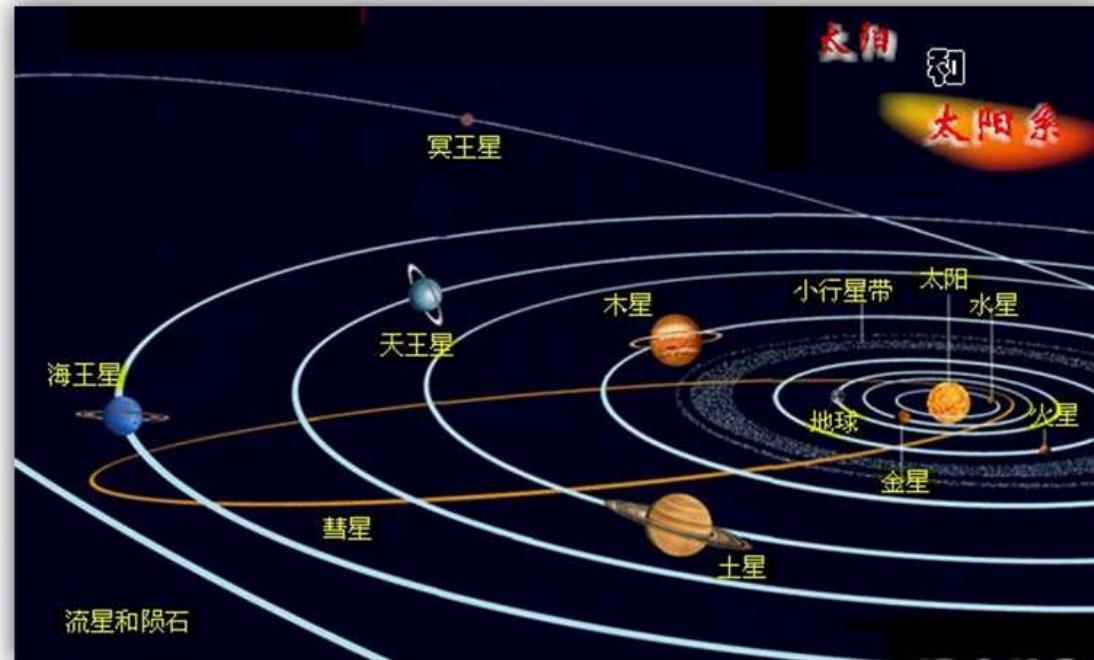
**回 归 轨 道：**星下点轨迹（地理坐标）周期性重复，也称重访轨道、循环轨道（近地轨道）。





**行星际空间：**太阳系中行星之间的空间区域。

**行星际轨道：**行星际空间航天器的运行轨道。





## 嫦娥六号：人类首次月背采样返回



中国人的智慧

MIT 轨道动力学教科书

8.8 Spacecraft Motion Under Continuous Thrust

“The **key results** of this section are from two papers by **Hsue-shen Tsien** and ...”

从探月工程到行星探测工程





# 第一章：质点动力学

## 复习与温习

### 一.运动学

**运动学：**描述和研究物体位置随时间的变化规律的力学分支

**动力学：**动力学是理论力学的一个分支学科，它主要研究作用于物体的力与物体运动的关系

**注意**  $v \neq \dot{r}$  即  $r$  导数的模不等于  
 $r$  模的导数。

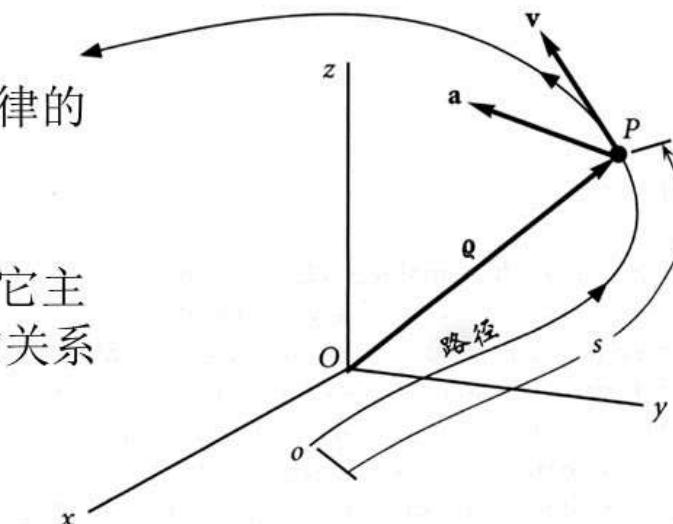


图. 位置、速度和加速度矢量



# 第一章：质点动力学

## 二.质量、力和牛顿万有引力定律

**惯性坐标系，绝对速度，绝对加速度**

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad \text{万有引力}$$

$$W = mg \quad \text{重力}$$

$$g = \frac{GM}{r^2} \quad \text{引力加速度}$$

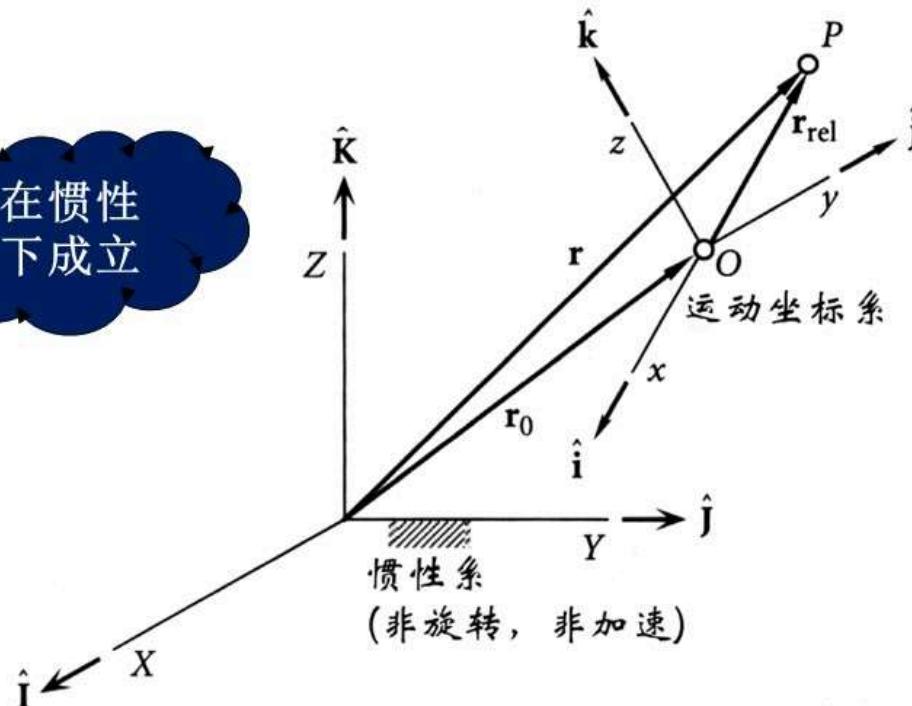


## 三. 牛顿第二定律

$$F_{合} = m\vec{a}$$

只在惯性系下成立

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \equiv \frac{\mathbf{F}_{合}}{m}$$



通过牛顿第二定律，力便与基本物理量质量、长度和时间相联系起来。



# 第一章：质点动力学

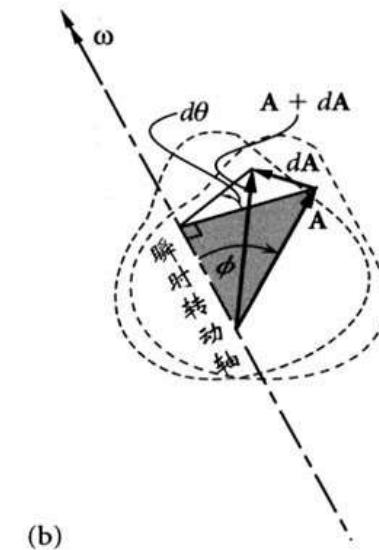
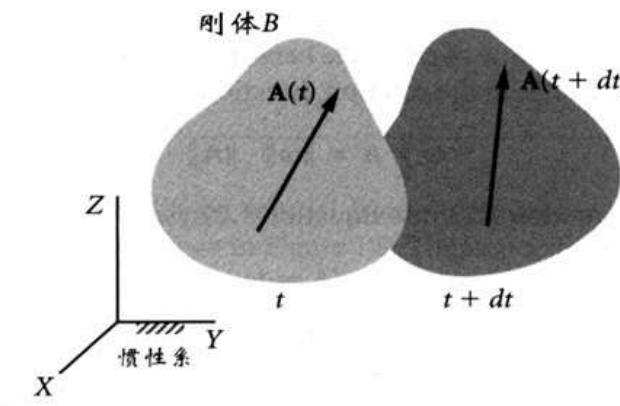
## 四. 运动矢量的时间导数

$$d\mathbf{A} = [(\|\mathbf{A}\| \sin \phi) d\theta] \hat{\mathbf{n}}$$

$$\frac{d\mathbf{A}}{dt} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{A}$$

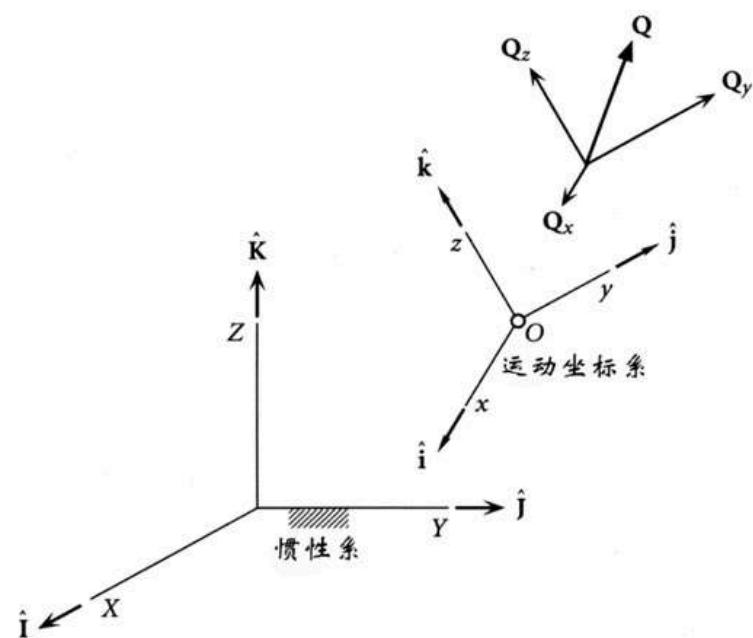
(a)

模为常量的矢量  
的时间导数





# 第一章：质点动力学



将任意矢量  $\mathbf{Q}$ , 在惯性坐标系中分解

$$\mathbf{Q} = Q_x \hat{\mathbf{i}} + Q_y \hat{\mathbf{j}} + Q_z \hat{\mathbf{k}}$$

$\mathbf{Q}$  的时间导数

$$\frac{d\mathbf{Q}}{dt} = \frac{dQ_x}{dt} \hat{\mathbf{i}} + \frac{dQ_y}{dt} \hat{\mathbf{j}} + \frac{dQ_z}{dt} \hat{\mathbf{k}}$$

将  $\mathbf{Q}$  在运动坐标系中分解

$$\mathbf{Q} = Q_x \hat{\mathbf{i}} + Q_y \hat{\mathbf{j}} + Q_z \hat{\mathbf{k}}$$

$\mathbf{Q}$  的时间导数

$$\frac{d\mathbf{Q}}{dt} = \frac{dQ_x}{dt} \hat{\mathbf{i}} + \frac{dQ_y}{dt} \hat{\mathbf{j}} + \frac{dQ_z}{dt} \hat{\mathbf{k}} + Q_x \frac{d\hat{\mathbf{i}}}{dt} + Q_y \frac{d\hat{\mathbf{j}}}{dt} + Q_z \frac{d\hat{\mathbf{k}}}{dt}$$



# 第一章：质点动力学

$$\frac{d\mathbf{Q}}{dt} = \left[ \frac{dQ_x}{dt} \hat{\mathbf{i}} + \frac{dQ_y}{dt} \hat{\mathbf{j}} + \frac{dQ_z}{dt} \hat{\mathbf{k}} \right] + \left[ Q_x \frac{d\hat{\mathbf{i}}}{dt} + Q_y \frac{d\hat{\mathbf{j}}}{dt} + Q_z \frac{d\hat{\mathbf{k}}}{dt} \right]$$
$$\left. \frac{d\mathbf{Q}}{dt} \right)_{\text{相对}} = \frac{dQ_x}{dt} \hat{\mathbf{i}} + \frac{dQ_y}{dt} \hat{\mathbf{j}} + \frac{dQ_z}{dt} \hat{\mathbf{k}}$$
$$\frac{d\hat{\mathbf{i}}}{dt} = \boldsymbol{\Omega} \times \hat{\mathbf{i}}, \quad \frac{d\hat{\mathbf{j}}}{dt} = \boldsymbol{\Omega} \times \hat{\mathbf{j}}, \quad \frac{d\hat{\mathbf{k}}}{dt} = \boldsymbol{\Omega} \times \hat{\mathbf{k}}$$



$$\frac{d\mathbf{Q}}{dt} = \left. \frac{d\mathbf{Q}}{dt} \right)_{\text{相对}} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{Q}$$



如何通过相对时间导数来求绝对时间导数



# 第一章：质点动力学

练习，推导

$$\frac{d^2\mathbf{Q}}{dt^2} \text{ 的表达式}$$

$$\begin{aligned}\frac{d^2\mathbf{Q}}{dt^2} &= \frac{d}{dt} \left( \frac{d\mathbf{Q}}{dt} \right)_{\text{相对}} + \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} \times \mathbf{Q} + \boldsymbol{\Omega} \times \frac{d\mathbf{Q}}{dt} \\ &\Rightarrow \frac{d}{dt} \left( \frac{d\mathbf{Q}}{dt} \right)_{\text{相对}} + \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} \times \mathbf{Q} + \boldsymbol{\Omega} \times \left( \frac{d\mathbf{Q}}{dt} \right)_{\text{相对}} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{Q} \\ &\Rightarrow \frac{d^2\mathbf{Q}}{dt^2} \left)_{\text{相对}} + \boldsymbol{\Omega} \times \frac{d\mathbf{Q}}{dt} \right)_{\text{相对}} + \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} \times \mathbf{Q} + \boldsymbol{\Omega} \times \frac{d\mathbf{Q}}{dt} \left)_{\text{相对}} + \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{Q}) \right. \\ &\Rightarrow \frac{d^2\mathbf{Q}}{dt^2} \left)_{\text{相对}} + \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} \times \mathbf{Q} + \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{Q}) + 2\boldsymbol{\Omega} \times \frac{d\mathbf{Q}}{dt} \right)_{\text{相对}}\end{aligned}$$



## 五. 相对运动

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_O + \mathbf{r}_{\text{相对}}$$

在运动坐标系中可表示为

$$\mathbf{r}_{\text{相对}} = x\hat{\mathbf{i}} + y\hat{\mathbf{j}} + z\hat{\mathbf{k}}$$

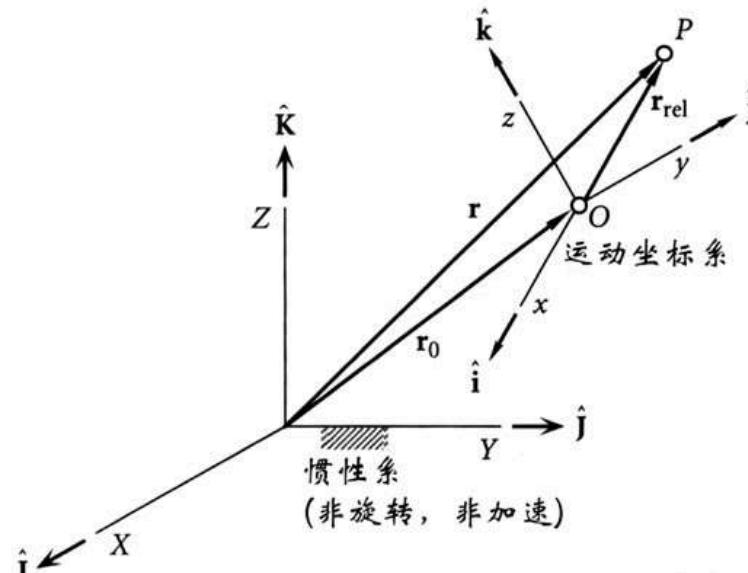


图. 绝对和相对位置矢量



# 第一章：质点动力学

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \frac{\mathbf{F}_{\text{合}}}{m} \quad \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{d\mathbf{r}_O}{dt} + \frac{d\mathbf{r}_{\text{相对}}}{dt}$$

在运动坐标系中  $\mathbf{r}_{\text{相对}}$  可表示为  
 $\mathbf{r}_{\text{相对}} = x\hat{\mathbf{i}} + y\hat{\mathbf{j}} + z\hat{\mathbf{k}}$

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_{\text{相对}}}{dt^2} = \mathbf{a}_{\text{相对}} + \dot{\boldsymbol{\Omega}} \times \mathbf{v}_{\text{相对}} = \mathbf{v}_{Odt} \frac{d\mathbf{r}_{\text{相对}}}{dt} = \frac{dx}{dt}\hat{\mathbf{i}} + \frac{dy}{dt}\hat{\mathbf{j}} + \frac{dz}{dt}\hat{\mathbf{k}} + x \frac{d\hat{\mathbf{i}}}{dt} + y \frac{d\hat{\mathbf{j}}}{dt} + z \frac{d\hat{\mathbf{k}}}{dt}$$

$$+ \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_{\text{相对}})$$

$$+ 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}_{\text{相对}}$$

质点绝对速度

$$\frac{d\mathbf{r}_{\text{相对}}}{dt} = \mathbf{v}_{\text{相对}} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_{\text{相对}}$$

动坐标系原点的绝对速度



# 应用：

设一与地球固连的坐标系o-xyz, 坐标原点在地球质心, x轴沿格林尼治子午线与赤道的交线指向外, z轴与地球自转角动量方向一致, y轴与x、z轴构成右手定则。设地球的自转角速度的大小为 $w_e$ , 推导出航天器在o-xyz坐标系中的动力学方程。

要求给出形式为:

$$\ddot{x} = f_1(x, y, z, F_x)$$

$$\ddot{y} = f_2(x, y, z, F_y)$$

$$\ddot{z} = f_3(x, y, z, F_z)$$



$$(1.39) \quad \mathbf{a} = \mathbf{a}_o + \frac{d^2 \mathbf{r}_{\text{相对}}}{dt^2}$$

$$-\frac{GM}{r_{\text{相对}}^3} \mathbf{r}_{\text{相对}} = \frac{d^2 \mathbf{r}_{\text{相对}}}{dt^2} = \mathbf{a}_{\text{相对}} + \dot{\boldsymbol{\Omega}} \times \mathbf{r}_{\text{相对}} + \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_{\text{相对}}) + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}_{\text{相对}}$$

$$-\frac{GM}{r_{\text{相对}}^3} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_e \end{bmatrix} \times \left( \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_e \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \right) + 2 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_e \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}$$

$$\ddot{x} = 2w_e \dot{y} + w_e^2 x - \frac{GM}{r_{\text{相对}}^3} x$$

$$\ddot{y} = -2w_e \dot{x} + w_e^2 y - \frac{GM}{r_{\text{相对}}^3} y$$

$$\ddot{z} = -\frac{GM}{r_{\text{相对}}^3} z$$



# 知识要点：

1. 牛顿第二定律中的加速度是运动物体相对于惯性系的加速度。
2. 模值不变的矢量A的时间导数为

$$\frac{d\mathbf{A}}{dt} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{A}$$

3. 运动物体相对于动坐标系的相对位置矢量的一阶、二阶导数分别为：

$$\frac{d\mathbf{r}_{\text{相对}}}{dt} = \mathbf{v}_{\text{相对}} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_{\text{相对}}$$

$$\frac{d^2\mathbf{r}_{\text{相对}}}{dt^2} = \mathbf{a}_{\text{相对}} + \dot{\boldsymbol{\Omega}} \times \mathbf{r}_{\text{相对}} + \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_{\text{相对}}) + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}_{\text{相对}}$$