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

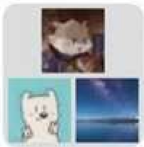
联系方式（答疑解惑welcome）：

办 公 室：将军路校区D11楼B313室

电子邮件：hongwei.yang@nuaa.edu.cn

微信：课程讨论群(发布消息通知)

课程临时微信群



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

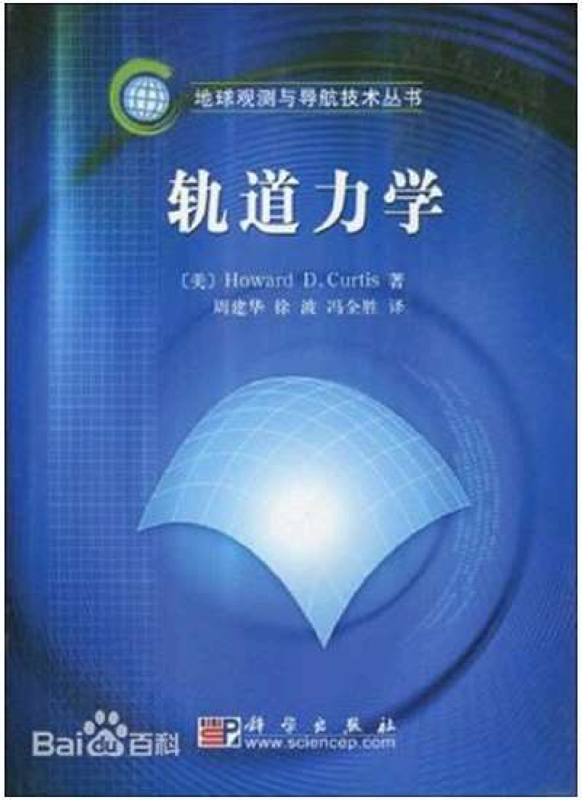
课后答疑：

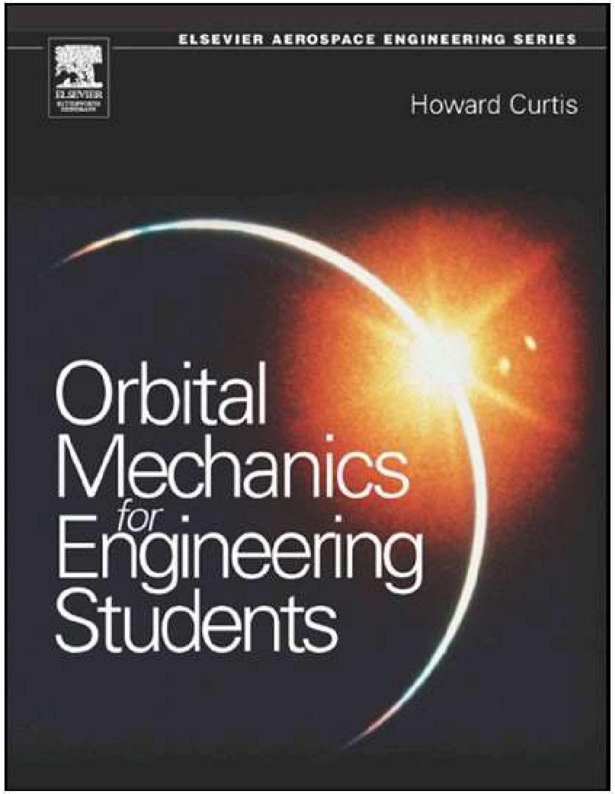
每周三19:00-20:00

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



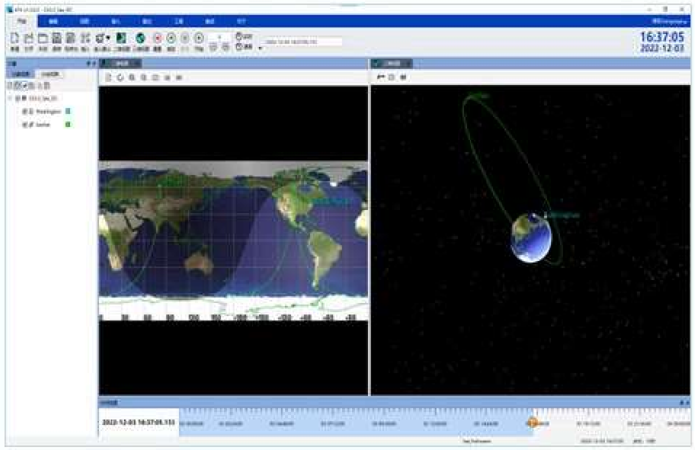


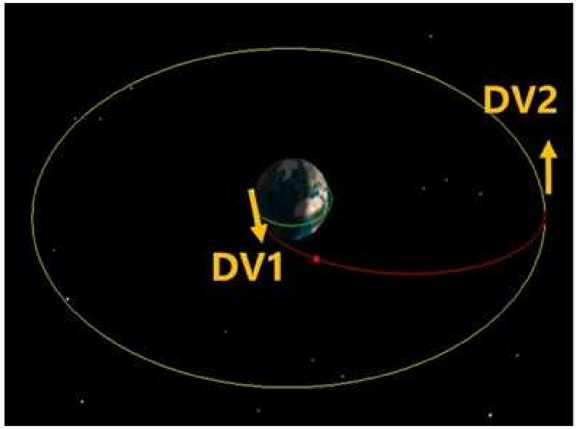
◎有关MATLAB的介绍书目；

◎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

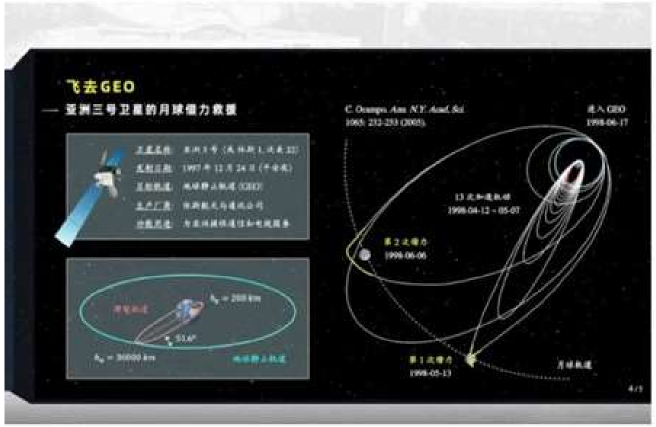
其他课程相关资源（参考）

国产航天任务设计软件：ATK（Aerospace Tool Kit ）



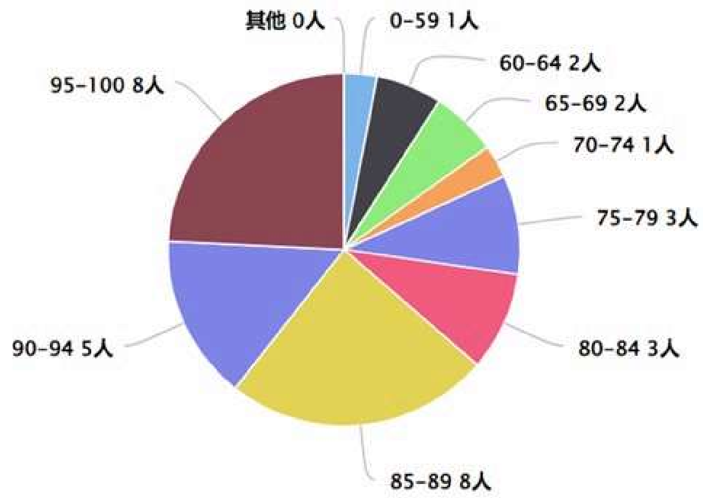


线上慕课资源（配套有习题资源）



考核方式

航天器轨道动力学 2学分（12-19周）
理论教学 32学时



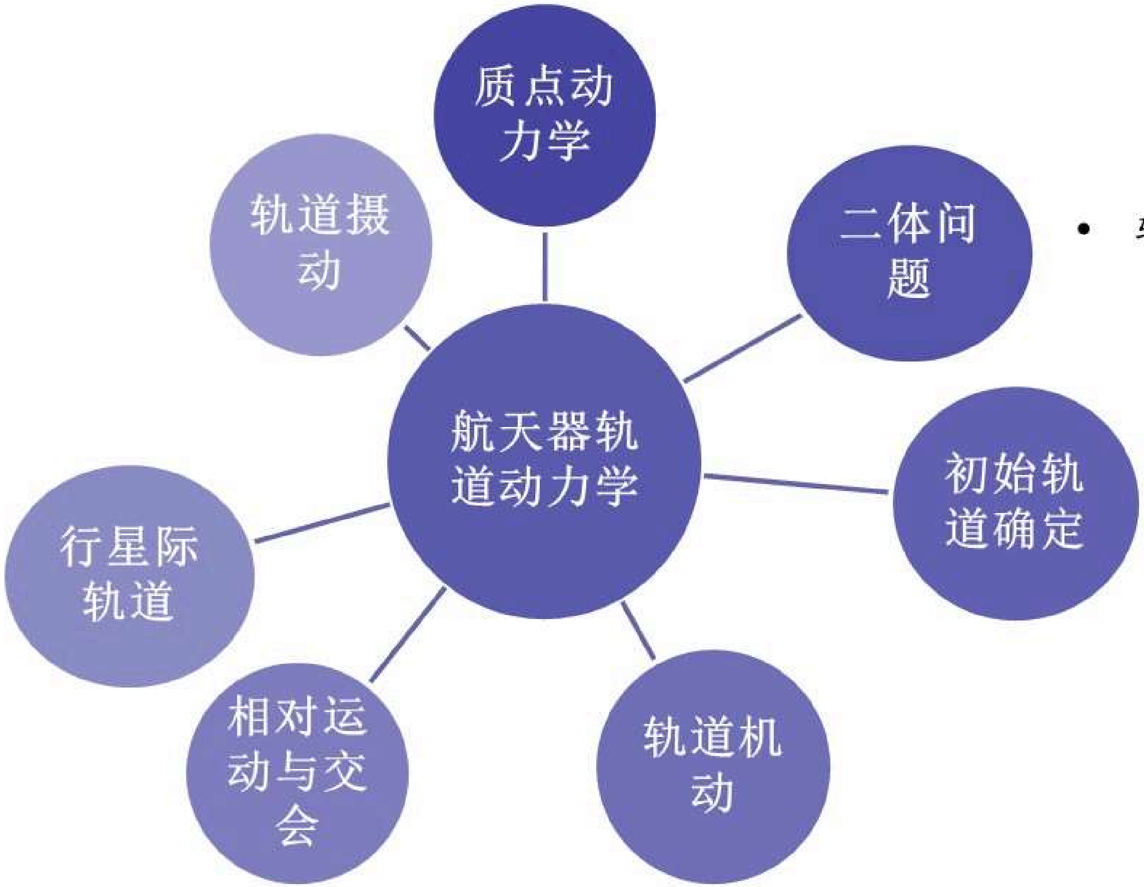
成绩比例

（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



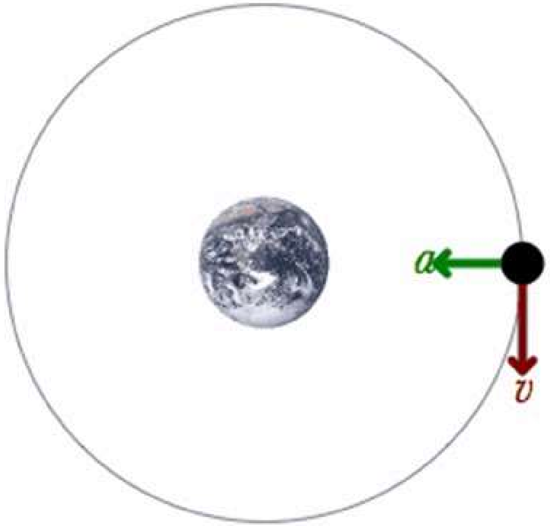
- 轨道预报

- 轨道设计（含轨道机动）

绪论

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

为何要学习轨道动力学?

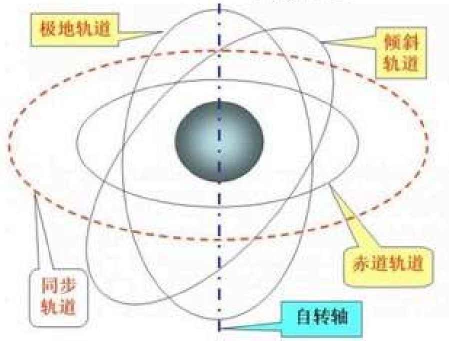
- 通过轨道动力学，可以用于确定航天器运行轨道及其规律、预报航天器的位置和速度等，是

航天器任务设计基础

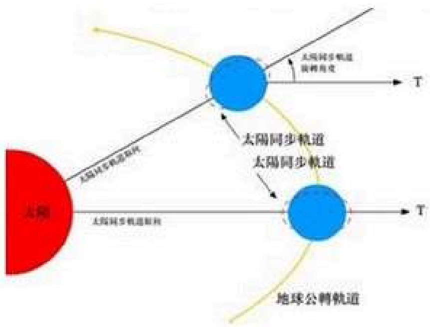
- ✓ 任务轨道（太阳同步、冻结、回归）
- ✓ 发射窗口（探月、探火）
- ✓ 载荷…

航天器GNC基础

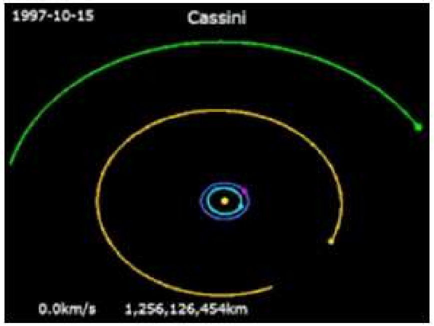
- ✓ 轨道机动控制
- ✓ 制导设计
- ✓ 滤波算法状态估计…



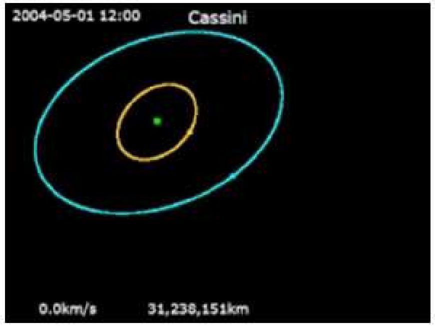
特殊轨道



太阳同步轨道



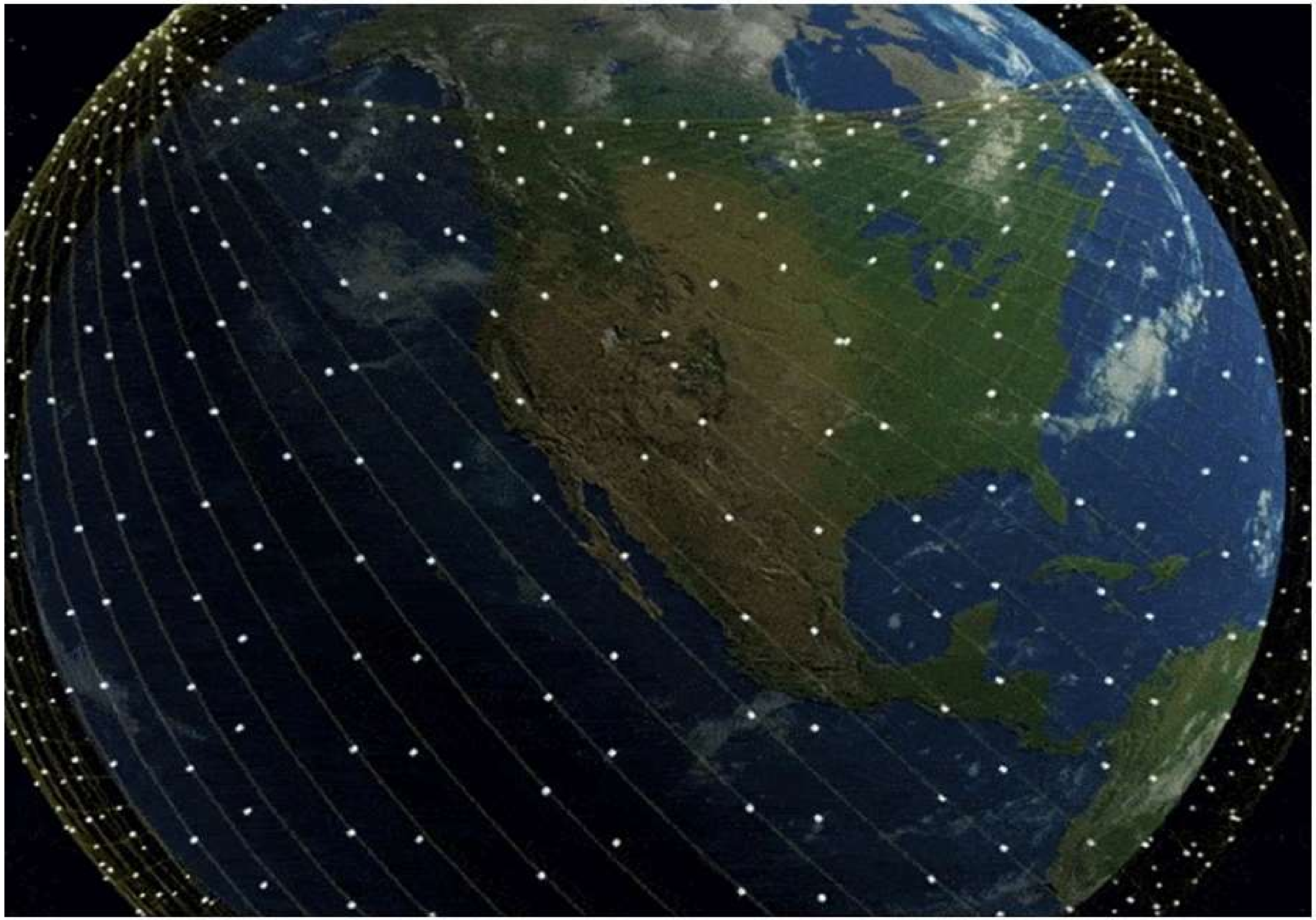
星际转移轨道



借力飞行轨道

绪论

巨型星座



绪论

CCTV 13
新闻
CCTV 央视网 com
神舟二十号
载人飞行任务
20
2025
中国空间站
CHINA SPACE STATION
东方时空
神舟二十号载人飞船返回任务将推迟进行
0:19 / 0:23
星期三
20:47
倍速
高清

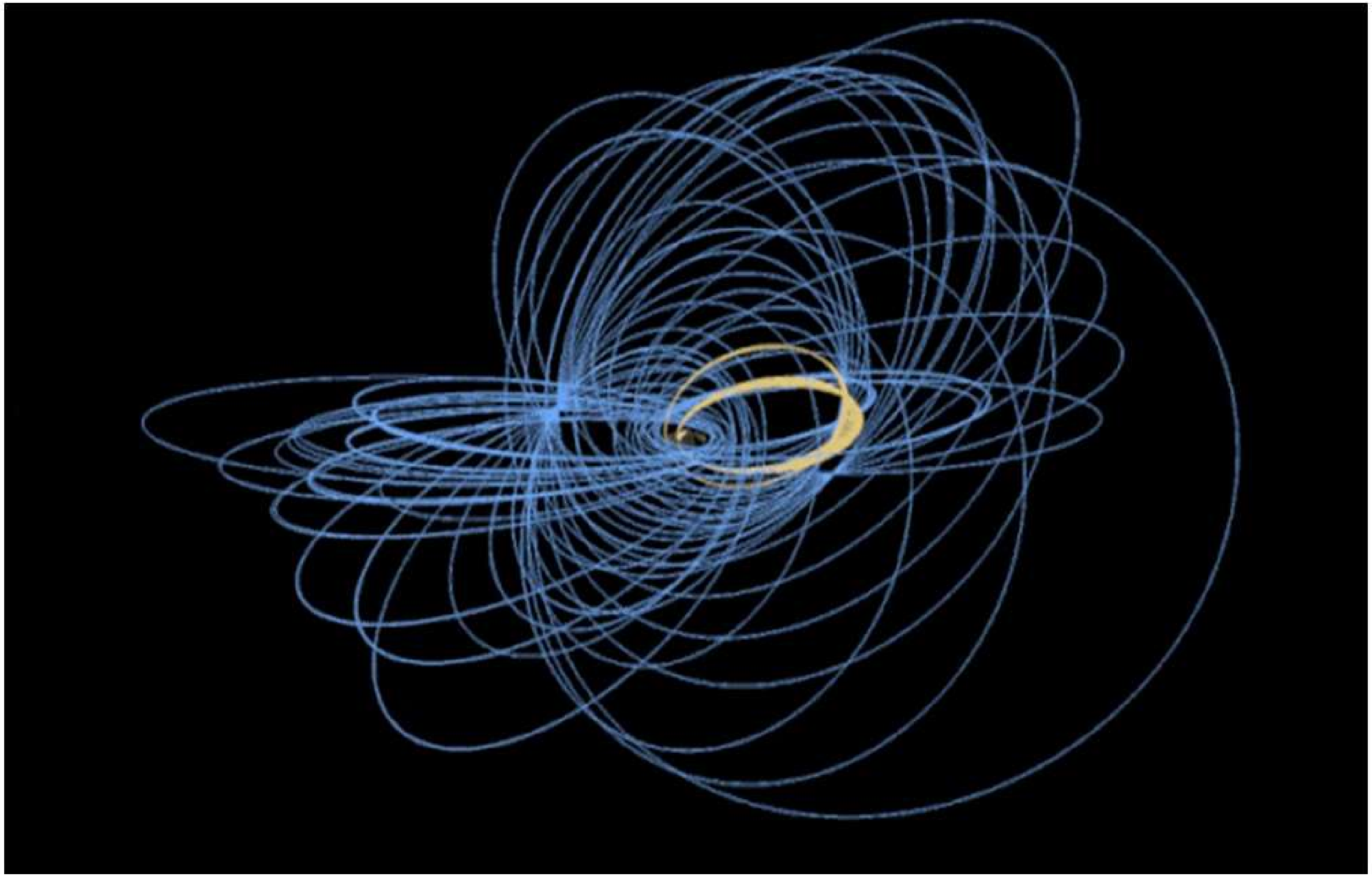
绪论

空间碎片

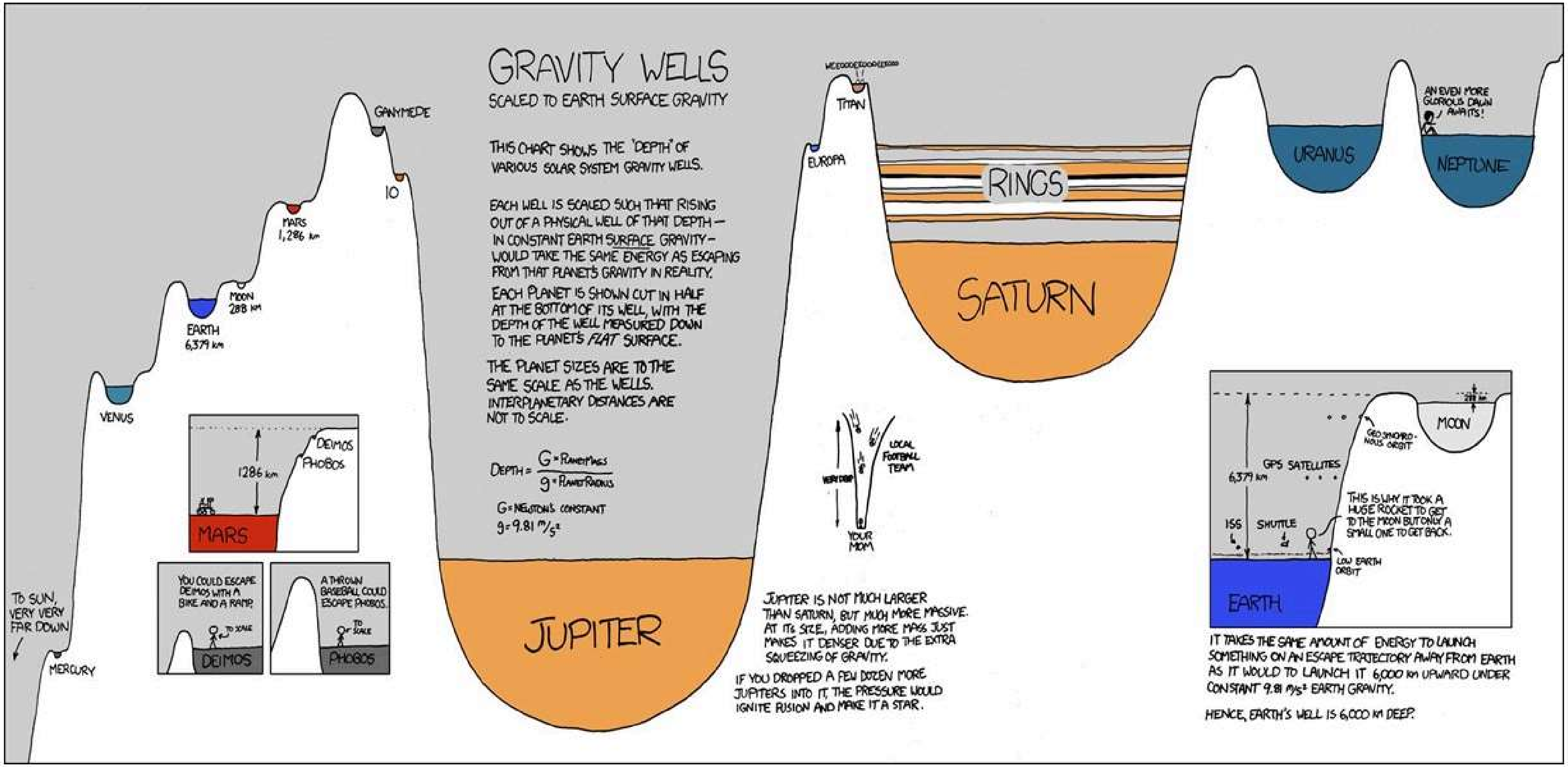
空间目标监测

绪论

卡西尼号轨道



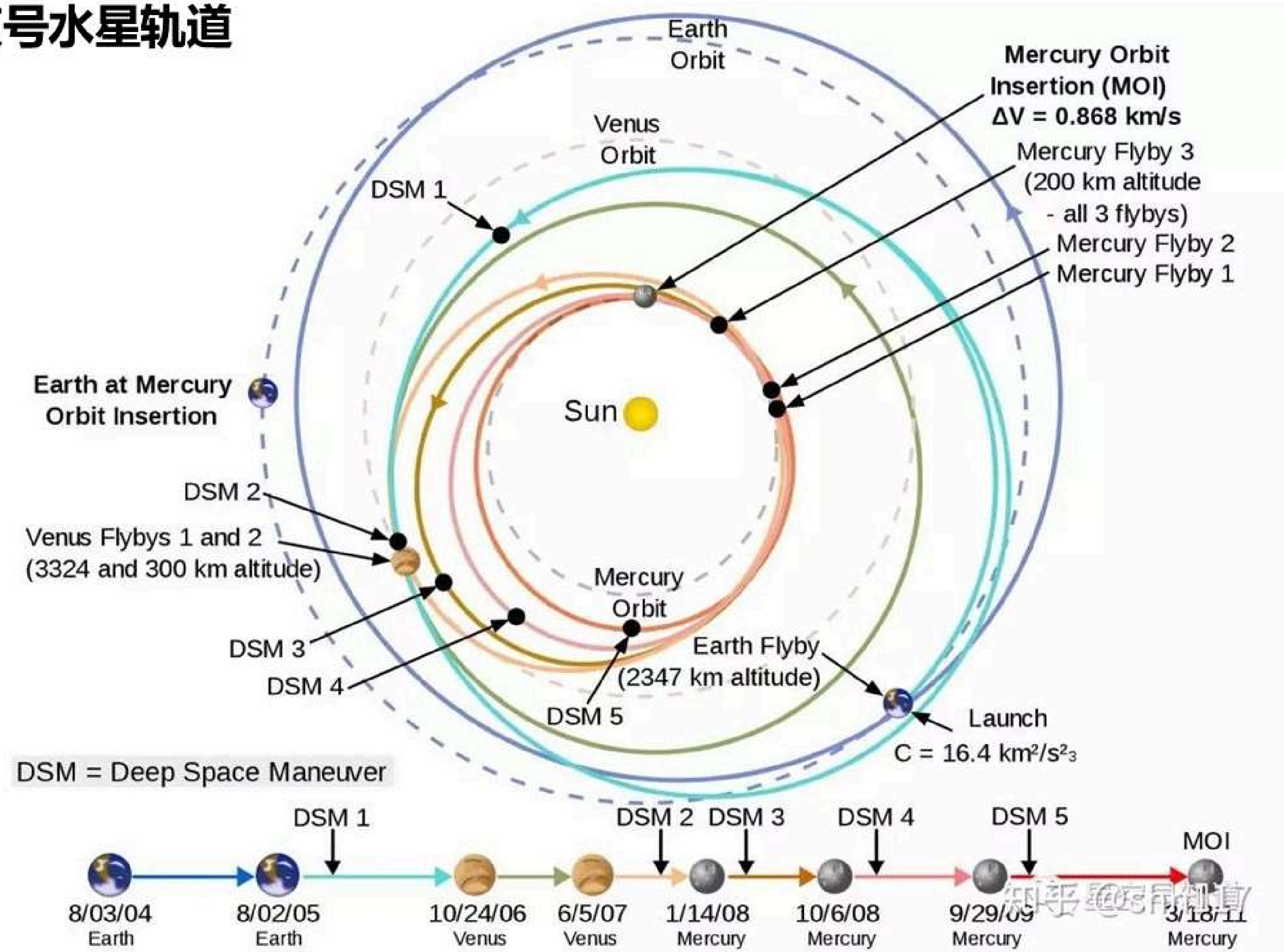
绪论



GRAVITY WELLS
SCALED TO EARTH SURFACE GRAVITY
THIS CHART SHOWS THE 'DEPTH' OF VARIOUS SOLAR SYSTEM GRAVITY WELLS.
EACH WELL IS SCALED SUCH THAT RISING OUT OF A PHYSICAL WELL OF THAT DEPTH — IN CONSTANT EARTH SURFACE GRAVITY — WOULD TAKE THE SAME ENERGY AS ESCAPING FROM THAT PLANET'S GRAVITY IN REALITY.
EACH PLANET IS SHOWN CUT IN HALF AT THE BOTTOM OF ITS WELL, WITH THE DEPTH OF THE WELL MEASURED DOWN TO THE PLANET'S FLAT SURFACE.
THE PLANET SIZES ARE TO THE SAME SCALE AS THE WELLS. INTERPLANETARY DISTANCES ARE NOT TO SCALE.
DEPTH = G × PlanetMass / g × PlanetRadius
G = NEWTON'S CONSTANT
g = 9.81 m/s²
TO SUN, VERY VERY FAR DOWN
MERCURY
VENUS
EARTH 6,379 km
MOON 288 km
MARS 1,286 km
GANYMEDE
IO
EUROPA
TITAN
RINGS
SATURN
JUPITER
URANUS
NEPTUNE
AN EVEN MORE GLORIOUS DAWN AWAITS!
1286 km
DEIMOS
PHOBOS
MARS
YOU COULD ESCAPE DEIMOS WITH A BIKE AND A RAMP.
TO SCALE
DEIMOS
A THROWN BASEBALL COULD ESCAPE PHOBOS.
TO SCALE
PHOBOS
VERY DEEP
LOCAL FOOTBALL TEAM
YOUR MOM
JUPITER IS NOT MUCH LARGER THAN SATURN, BUT MUCH MORE MASSIVE. AT ITS SIZE, ADDING MORE MASS JUST MAKES IT DENSER DUE TO THE EXTRA SQUEEZING OF GRAVITY.
IF YOU DROPPED A FEW DOZEN MORE JUPITERS INTO IT, THE PRESSURE WOULD IGNITE FUSION AND MAKE IT A STAR.
MOON
GEOSYNCHRONOUS ORBIT
GPS SATELLITES
6,379 km
ISS
SHUTTLE
THIS IS WHY IT TOOK A HUGE ROCKET TO GET TO THE MOON BUT ONLY A SMALL ONE TO GET BACK.
LOW EARTH ORBIT
EARTH
IT TAKES THE SAME AMOUNT OF ENERGY TO LAUNCH SOMETHING ON AN ESCAPE TRAJECTORY AWAY FROM EARTH AS IT WOULD TO LAUNCH IT 6,000 km UPWARD UNDER CONSTANT 9.81 m/s² EARTH GRAVITY.
HENCE, EARTH'S WELL IS 6,000 km DEEP.

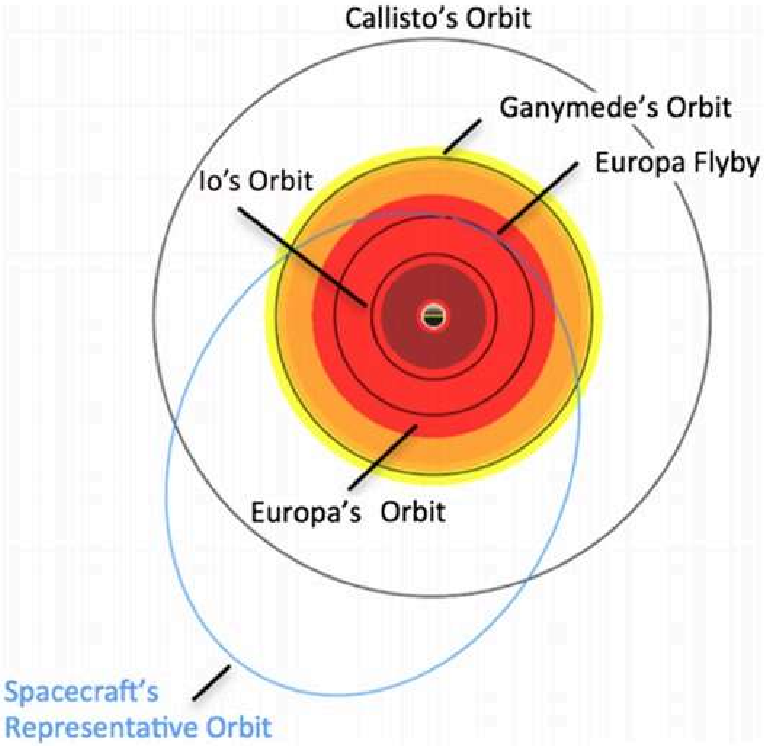
绪论

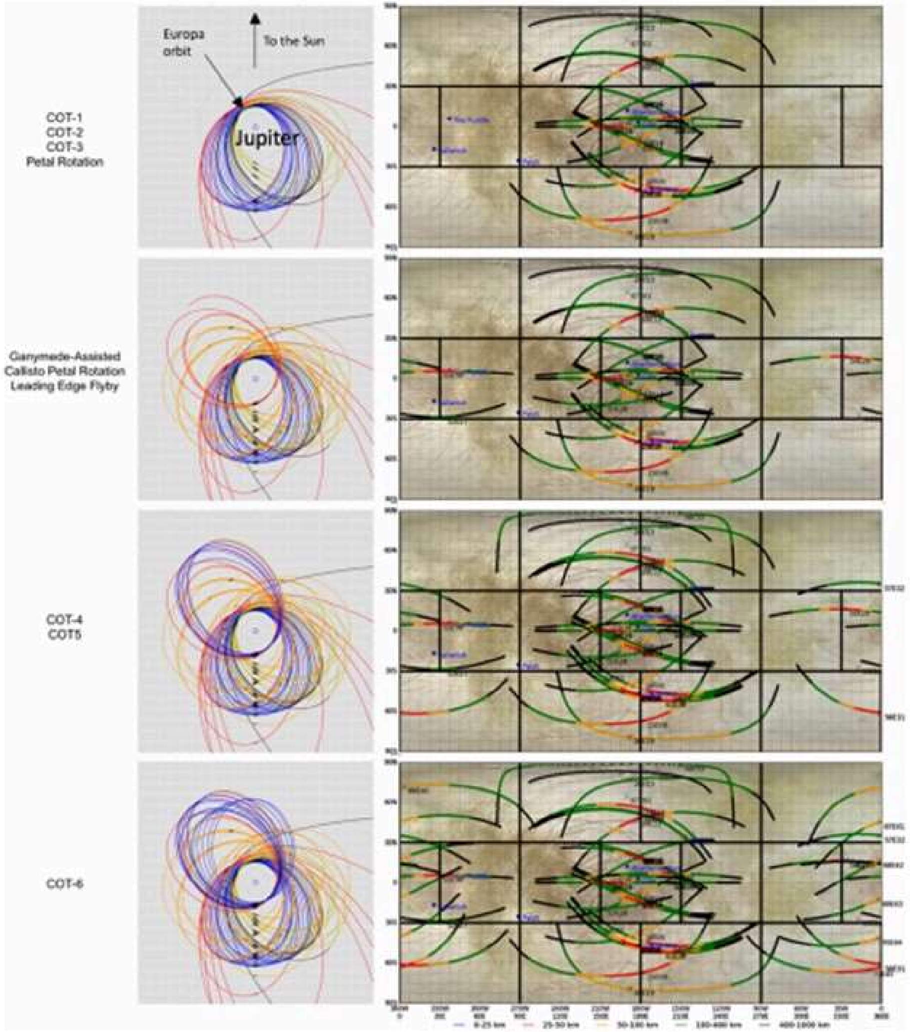
信使号水星轨道



Earth Orbit
Mercury Orbit Insertion (MOI)
ΔV = 0.868 km/s
Venus Orbit
Mercury Flyby 3 (200 km altitude - all 3 flybys)
Mercury Flyby 2
Mercury Flyby 1
DSM 1
Earth at Mercury Orbit Insertion
Sun
DSM 2
Venus Flybys 1 and 2 (3324 and 300 km altitude)
Mercury Orbit
DSM 3
DSM 4
Earth Flyby (2347 km altitude)
DSM 5
Launch
C = 16.4 km²/s²₃
DSM = Deep Space Maneuver
DSM 1
DSM 2
DSM 3
DSM 4
DSM 5
MOI
8/03/04 Earth
8/02/05 Earth
10/24/06 Venus
6/5/07 Venus
1/14/08 Mercury
10/6/08 Mercury
9/29/09 Mercury
3/18/11 Mercury

欧罗巴快船木卫二探测

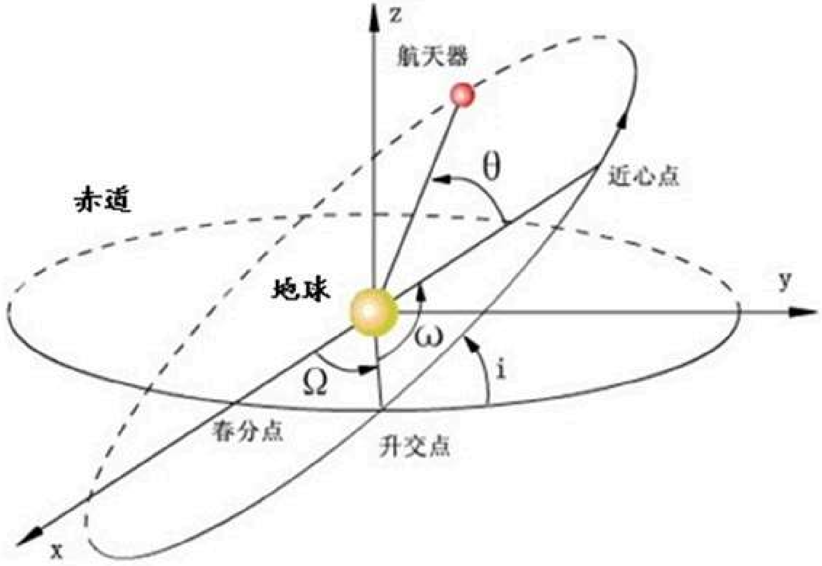

Callisto's Orbit
Ganymede's Orbit
Europa Flyby
Io's Orbit
Europa's Orbit
Spacecraft's
Representative Orbit


Europa
orbit
To the Sun
Jupiter
COT-1
COT-2
COT-3
Petal Rotation
Ganymede-Assisted
Callisto Petal Rotation
Leading Edge Flyby
COT-4
COT5
COT-6

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（Ω）
- 近地点辐角（ω）
- 在指定历元的平近点角（M）

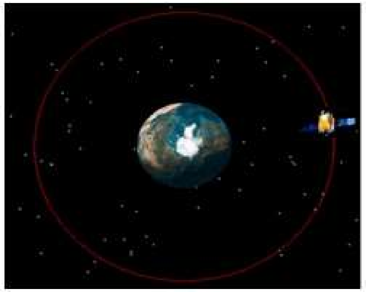


轨道分类

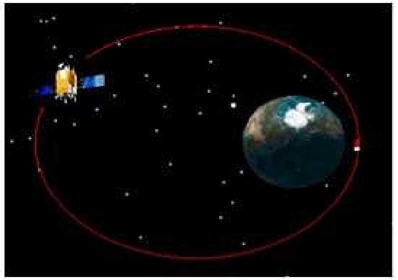
二体轨道

按偏心率e分

- 圆轨道 $e=0$
- 椭圆轨道 $0<e<1$
- 抛物线轨道 $e=1$
- 双曲线轨道 $e>1$

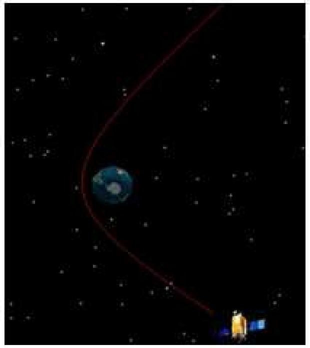


圆轨道



椭圆轨道

抛物线轨道



双曲线轨道

单选题 1分

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

单选题 1分

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

按轨道高度分类

低地球轨道

几百公里高度的卫星轨道

中地球轨道

几千公里高度的卫星轨道

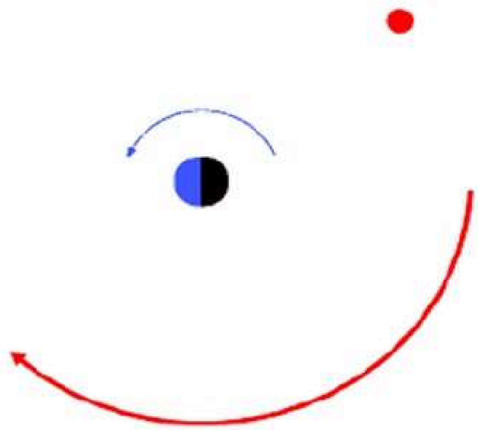
高地球轨道

几万公里高度的卫星轨道

轨道分类

按轨道倾角分

- 顺行轨道
- 逆行轨道



轨道分类

特殊轨道：

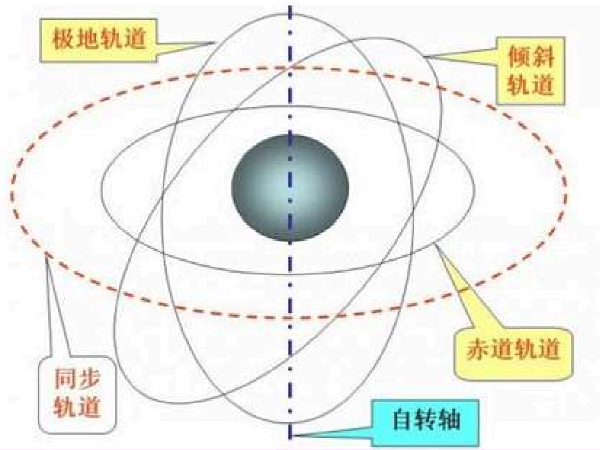
地球同步轨道： 卫星的轨道周期等于地球在惯性空间中的自转周期（23小时56分4秒），且方向亦与之一致，卫星在每天同一时间的星下点轨迹相同，当轨道与赤道平面重合时称地球静止轨道。

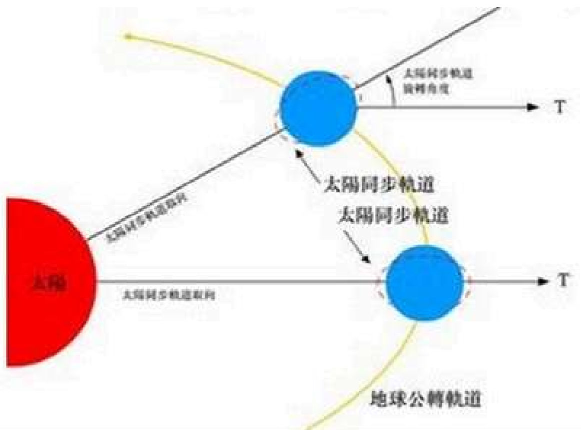
太阳同步轨道： 是指卫星的轨道平面和太阳始终保持相对固定的取向，轨道倾角（轨道平面与赤道平面的夹角）接近90°卫星要在两极附近通过，因此又称之为近极地太阳同步卫星轨道。

极　轨　道： 倾角为90°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°，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）。

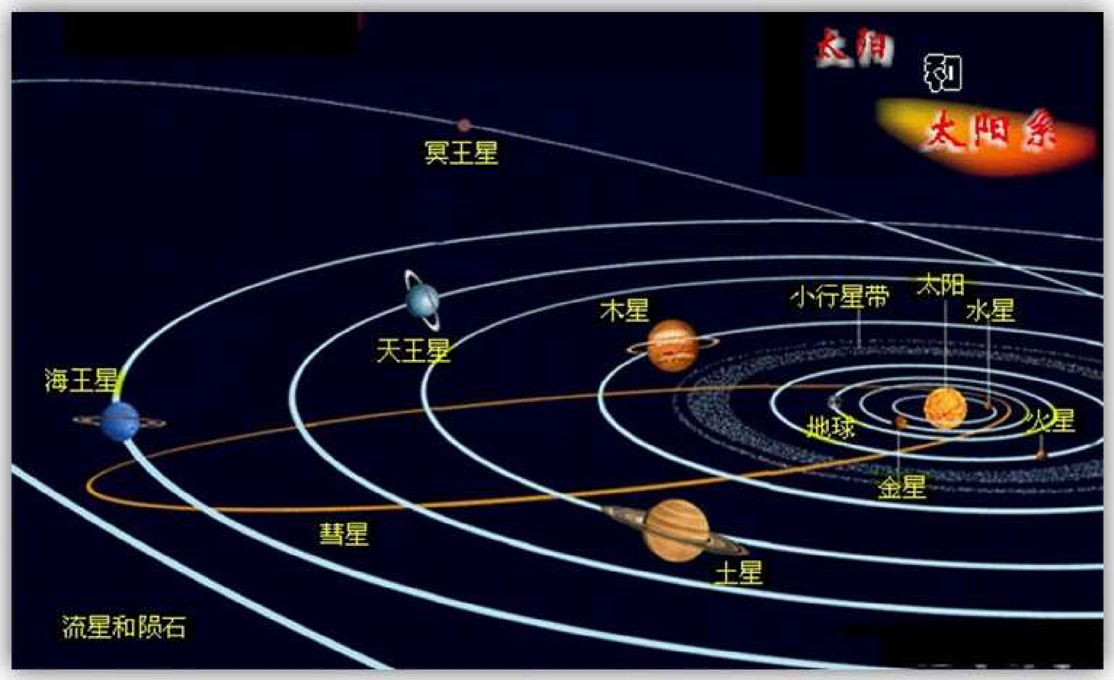




行星际轨道

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。



课程思政案例

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 …”

嫦娥六号：人类首次月背采样返回

从探月工程到行星探测工程

中国行星探测
PEC

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

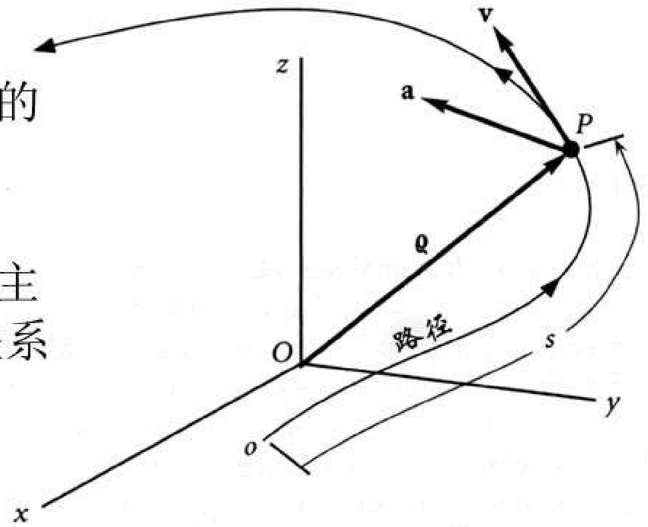


图. 位置、速度和加速度矢量

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

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

$$F_g = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$ 万有引力

$$W = mg$$ 重力

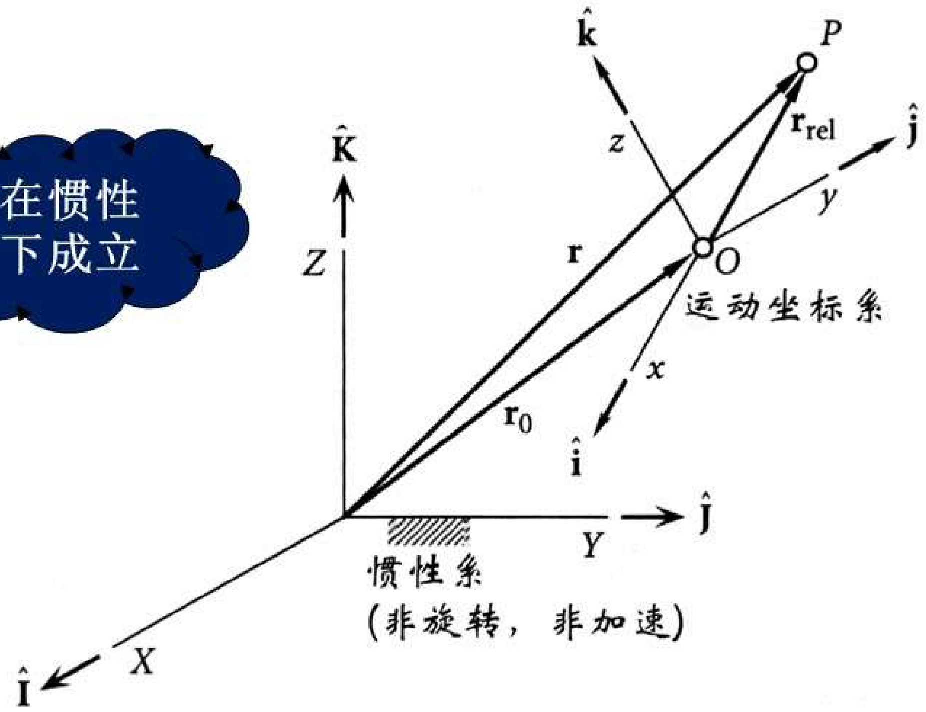
$$g = \frac{GM}{r^2}$$ 引力加速度

三. 牛顿第二定律

$$F_{合} = ma$$

只在惯性系下成立

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = a = \frac{F_{合}}{m}$$



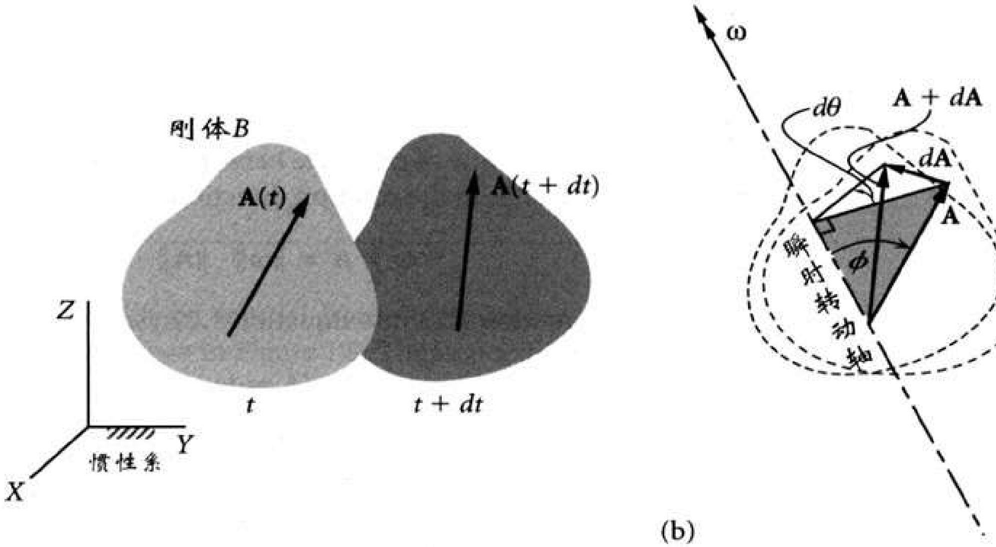
通过牛顿第二定律，力便与基本物理量质量、长度和时间相联系起来。

四. 运动矢量的时间导数

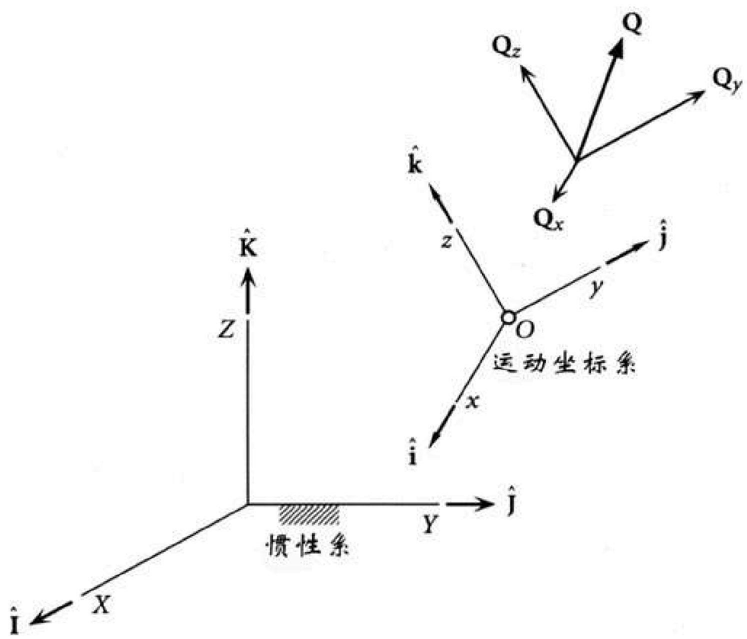
$$d\mathbf{A}=\left[\left(\|\mathbf{A}\|\sin\phi\right)d\theta\right]\hat{\boldsymbol{n}}$$

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

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$\boldsymbol{Q}$，在惯性坐标系中分解

$$\boldsymbol{Q} = Q_X\hat{\boldsymbol{I}} + Q_Y\hat{\boldsymbol{J}} + Q_Z\hat{\boldsymbol{K}}$$

$\boldsymbol{Q}$ 的时间导数

$$\frac{d\boldsymbol{Q}}{dt} = \frac{dQ_X}{dt}\hat{\boldsymbol{I}} + \frac{dQ_Y}{dt}\hat{\boldsymbol{J}} + \frac{dQ_Z}{dt}\hat{\boldsymbol{K}}$$

将$\boldsymbol{Q}$在运动坐标系中分解

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

$\boldsymbol{Q}$ 的时间导数

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

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

$$\left.\frac{d\mathbf{Q}}{dt}\right)_{\text{相对}}=\frac{dQ_x}{dt}\hat{\mathbf{i}}+\frac{dQ_y}{dt}\hat{\mathbf{j}}+\frac{dQ_z}{dt}\hat{\mathbf{k}}$$

$$\frac{d\hat{\mathbf{i}}}{dt}=\mathbf{\Omega}\times\hat{\mathbf{i}},\quad \frac{d\hat{\mathbf{j}}}{dt}=\mathbf{\Omega}\times\hat{\mathbf{j}},\quad \frac{d\hat{\mathbf{k}}}{dt}=\mathbf{\Omega}\times\hat{\mathbf{k}}$$

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

如何通过相对时间导数来求绝对时间导数

练习，推导 $\dfrac{d^2\mathbf{Q}}{dt^2}$的表达式

$$\frac{d^2\mathbf{Q}}{dt^2}=\frac{d}{dt}\frac{d\mathbf{Q}}{dt}\bigg)_{相对}+\frac{d\mathbf{\Omega}}{dt}\times\mathbf{Q}+\mathbf{\Omega}\times\frac{d\mathbf{Q}}{dt}$$

$$\Rightarrow\frac{d}{dt}\frac{d\mathbf{Q}}{dt}\bigg)_{相对}+\frac{d\mathbf{\Omega}}{dt}\times\mathbf{Q}+\mathbf{\Omega}\times\left(\frac{d\mathbf{Q}}{dt}\bigg)_{相对}+\mathbf{\Omega}\times\mathbf{Q}\right)$$

$$\Rightarrow\frac{d^2\mathbf{Q}}{dt^2}\bigg)_{相对}+\mathbf{\Omega}\times\frac{d\mathbf{Q}}{dt}\bigg)_{相对}+\frac{d\mathbf{\Omega}}{dt}\times\mathbf{Q}+\mathbf{\Omega}\times\frac{d\mathbf{Q}}{dt}\bigg)_{相对}+\mathbf{\Omega}\times(\mathbf{\Omega}\times\mathbf{Q})$$

$$\Rightarrow\frac{d^2\mathbf{Q}}{dt^2}\bigg)_{相对}+\frac{d\mathbf{\Omega}}{dt}\times\mathbf{Q}+\mathbf{\Omega}\times(\mathbf{\Omega}\times\mathbf{Q})+2\mathbf{\Omega}\times\frac{d\mathbf{Q}}{dt}\bigg)_{相对}$$

五. 相对运动

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

在运动坐标系中可表示为

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

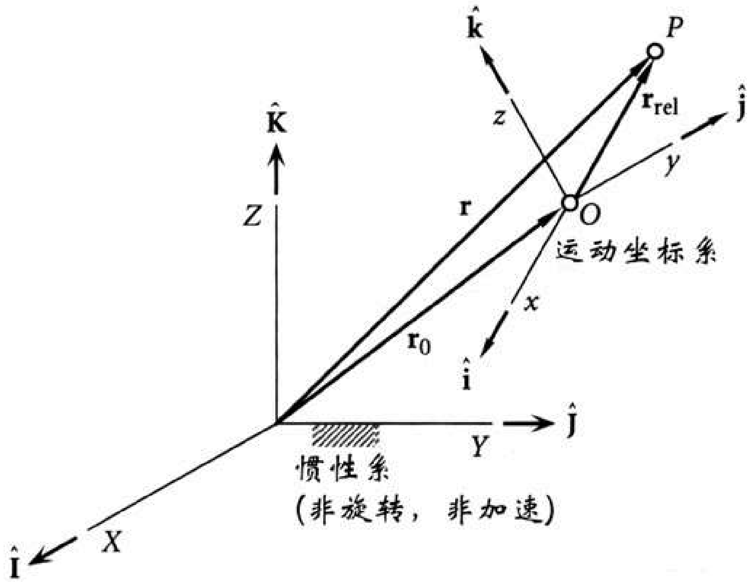


图. 绝对和相对位置矢量

第一章：质点动力学

$$\frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt^2}=\frac{\boldsymbol{F}_{合}}{m}$$

$$\frac{d\boldsymbol{r}}{dt}=\frac{d\boldsymbol{r}_O}{dt}+\frac{d\boldsymbol{r}_{相对}}{dt}$$

在运动坐标系中$\boldsymbol{r}_{相对}$可表示为

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

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_O+\frac{d\boldsymbol{r}_{相对}}{dt}$$

$$\frac{d\boldsymbol{r}_{相对}}{dt}=\frac{dx}{dt}\hat{\mathbf{i}}+\frac{dy}{dt}\hat{\mathbf{j}}+\frac{dz}{dt}\hat{\mathbf{k}}+x\frac{d\hat{\mathbf{i}}}{dt}+y\frac{d\hat{\mathbf{j}}}{dt}+z\frac{d\hat{\mathbf{k}}}{dt}$$

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

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

质点绝对速度

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) $$\boldsymbol{a}=\boldsymbol{a}_o+\frac{d^2\boldsymbol{r}_{相对}}{dt^2}$$

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

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

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

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

$$\ddot{z}=-\frac{GM}{r_{相对}{}^3}z$$

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：

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

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