M. H. 卡普兰 著

# 空间飞行器动力学和控制

科学出版社

# 空间飞行器动力学和控制

M. H. 卡普兰 著

凌福根 译

胡海昌 校

科 学 出 版 社

1 9 8 1

# 内 容 简 介

本书比较系统地介绍了空间飞行器动力学和控制的基本理论.

可供从事空间飞行器研究、设计的专业人员和高等院校有关师生阅读.

Marshall H. Kaplan

MODERN SPACECRAFT DYNAMICS & CONTROL

John Wiley

1976

**空间飞行器动力学和控制**

M. H. 卡普兰 著

凌福根 译

胡海昌 校

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售

*

1981年4月第一版　开本：787×1092 1/32

1981年4月第一次印刷　印张：14 5/8

印数：0001—2,200　字数：333,000

统一书号：13031·1548

本社书号：2123·13—2

定价：2.25 元

# 序　言

空间飞行成为现实几乎已有整整一代[1)]的时间了．许多人把离开地球大气层，有时甚至摆脱地球引力的自动飞行器和载人飞行器当作偶然的琐事来对待．实际上，自从第一颗小型卫星被送入轨道以后，空间飞行技术的发展是如此之快，以致在解释物理原理与空间飞行特有现象之关系的教科书和参考文献方面出现了空白．本书提供了当代空间飞行器操纵和控制技术与有关物理基础之间的联系桥梁．本书避免使用着重于数学的分析动力学方法，因为这样往往把物理现实降到了次要的地位．因此从牛顿方法来引伸概念，而所有的假设都建立在正确的逻辑基础上．全书的材料是为对空间飞行器动力学和控制方面感兴趣的学生及实际工程师安排的．本书主要是想给具有大学高年级和毕了业的工程水平的人使用．但处理当代问题也应以它为参考书．实际上，飞行任务计划人员和空间飞行器设计师可能希望用本书来扩充他们工作的知识面．本书有许多初步的轨道和姿态控制计算方面的基本公式．

作为教科书使用时，本书给出的材料可以作为两学期或三季度的教学内容．为了帮助深入理解和检查对概念的理解程度，本书收入了一些难易程度不等的习题．假定读者已经具有应用矢量代数、矩阵、拉普拉斯变换和动力学方面的基本知识．第一章到第三章介绍了基础内容，并划分了研究领域，

---

1) 西方一般把二、三十年作为一代．

这样就可以使学生进一步学习时能够掌握高深的概念．第四、五章叙述了空间飞行器姿态控制的有关技术，讨论了产生力矩的执行机构和敏感器，阐述了空间飞行器绕质心运动的操纵问题．第六章介绍了自动姿态控制系统的概念，还对线性控制理论作了基本的评述．第七、八章给出了比较成熟的处理二体轨道的方法，还介绍了位置和速度的预测以及轨道摄动．第九章说明了目前关心的三类实际问题．对于两个学期的教程来说，第一学期应安排第一章到第四章的内容．如果主要是对姿态动力学及控制感兴趣，则第二学期可以安排第五、六章以及第九章的一部分．如果着重星际航行动力学，则第二学期可以安排第七、八章以及§9.3．按三季度教程安排时，第一季度可以安排第一章到第三章，第二季度安排第四章到第六章，最后一季度安排第七章到第九章．

M. H. 卡普兰

1976 年 7 月 4 日

# 目 录

# 第一章 引 论

作为介绍空间飞行器动力学和控制这门学科的开始，复习一下所根据的物理学基本原理是合适的. 简要地叙述导致这门现代学科的历史大事也是适宜的.对这里所讨论的问题，概述了解决的一般方法，以待使用. 另外，定义和讨论了作为全书基础的坐标系及其变换方法.

## §1.1 历 史 发 展

哥白尼的日心说为更完美准确的理论打开了通道，而更完美准确的理论必须建立在精确观察天体的基础上. 丹麦天文学家第谷·布拉赫在十六世纪后期根据对火星运动的研究，提供了这方面的资料. 开普勒是第谷的一个助手，他推导出了最早的行星运动的一般性经验定律. 多年以后，出了一个牛顿，开创了理论天体力学. 在这方面工作中，他证明了开普勒定律是他的引力定律的必然推论.

空间飞行器运动的研究已经分成了几个不同的领域. 在人造空间飞行器出现以前，科学家们研究过天体的自然运动，这门学科称为天体力学. 这一学科的基础就是牛顿运动定律和他的万有引力定律. 但是天体力学的数学性很强，其部分原因就是因为天体力学的大量工作是在高速电子数字计算机出现之前进行的. 应用这些计算机才使空间飞行成为可实践的事情. 另外还有一些重大的发展，例如高推力-重量比推进装置、空间能源和通信系统、导航技术等. 关于空间飞行器运

动方面的现代研究可以分为两大领域. 一个是考虑重力场内质点运动的星际航行动力学. 另一个是考虑飞行器绕其质心运动的姿态控制学. 还可以分出许多小的研究领域. 例如，最近关心的最佳轨道操纵和结构上柔性的空间飞行器部件的模型化等.

## §1.2 物理原理

研究空间飞行器运动所根据的几个物理原理，从它们的基本形式来看是十分初等的. 适当应用这些概念，就可以发展有用的重要学科. 所以，在这里应该清晰地阐述这些原理.

### §1.2.1 牛顿定律和开普勒定律

可以认为，牛顿是提出能够完全确定空间飞行器运动的物理定律的人. 他建立了三个力学定律和一个引力定律. 这里只考虑其中的三个.

(a) 物体线动量的变化率恰好等于作用力

$$\mathbf{F}=\frac{d}{dt}(m\mathbf{V})$$

其中$m$是质量，$\mathbf{V}$是速度矢量. 如果质量是常数，则上式就是熟知的

$$\mathbf{F}=m\mathbf{a} \tag{1.1}$$

其中 $\mathbf{a}=d\mathbf{V}/dt$.

(b) 加速度只能成对出现. 因此，一个物体在宇宙中被加速，必然要涉及一个反方向的加速度. 换句话说，如果质点2对质点1作用了某个力 $\mathbf{F}_{12}$，则质点1必然对质点2作用另一个力 $\mathbf{F}_{21}$，它与 $\mathbf{F}_{12}$ 大小相等、方向相反. 如果把两个质

点的系统看作一个完整的系统，而且没有外力作用，则质心(或称引力中心)应保持不变. 或者，如果质心已经移动，则它应以常速度继续运动.

(c) 任何两个质点都互相吸引，吸引力的大小为

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \tag{1.2}$$

其中 $m_1$ 和 $m_2$ 是质点的质量，$r$ 是这两个质点之间的距离，$G$ 是万有引力常数，等于 $6.6695 \times 10^{-11}$ 米$^3$/公斤 · 秒$^2$.

开普勒根据第谷的观察，提出了描述行星运动的一组经验定律:

(a) 每个行星的轨道都是一个椭圆，太阳是它的一个焦点(1609).

(b) 联接太阳和行星的矢径，在相等的时间内所扫过的面积相等(1609).

(c) 行星的周期正比于(行星到太阳的平均距离)$^{3/2}$ (1619).

### § 1.2.2 功和能

功和能的概念对于正确发展我们这个学科也是很重要的. 功是一个标量，定义为沿着点 $\mathbf{r}_1$ 和 $\mathbf{r}_2$ 之间某路径(见图1.1)的线积分

$$W_{12} = \int_{\mathbf{r}_1}^{\mathbf{r}_2} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} \tag{1.3}$$

注意，$\mathbf{F}$ 是作用在质点 $m$ 上的力. 使用牛顿定律(1.1)，并注意到

$$d\mathbf{r} = \mathbf{V}\,dt$$

得

$$W_{12} = \int_{t_1}^{t_2} m\frac{d\mathbf{V}}{dt} \cdot \mathbf{V}\,dt = \frac{1}{2}\int_{t_1}^{t_2} m\frac{d}{dt}(\mathbf{V} \cdot \mathbf{V})\,dt$$

$$=\frac{1}{2}\int_{t_1}^{t_2} m\frac{d}{dt}v^2dt=\frac{1}{2}mv^2\Big|_{v_1}^{v_2}$$

因此，对质点$m$所作的功恰好等于它的动能的变化，即

$$W_{12}=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2 \tag{1.4}$$

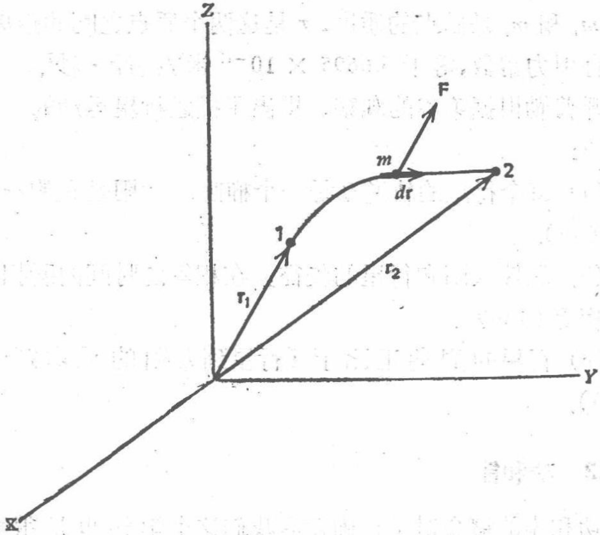


图1.1　力的线积分

如果在任何封闭路径上，$\mathbf{F}\cdot d\mathbf{r}$ 的积分均为零，则称 $\mathbf{F}$ 是守恒力．对于这样的力，任何含有点 1 和 2 的封闭路径(见图 1.2)都有

$$\oint \mathbf{F}\cdot d\mathbf{r}=0$$

上式可以写成

$$\underset{\text{路径}a}{\int_{\mathbf{r}_1}^{\mathbf{r}_2}}\mathbf{F}\cdot d\mathbf{r}+\underset{\text{路径}b}{\int_{\mathbf{r}_2}^{\mathbf{r}_1}}\mathbf{F}\cdot d\mathbf{r}=0$$

由于路径 $a$ 和 $b$ 是任意的，因此从 1 到 2 的积分（或能量变化）与积分路径无关，而只是端点的函数。因此，对守恒力来说，从一点运动到另一点所作的功与所走的路径无关。

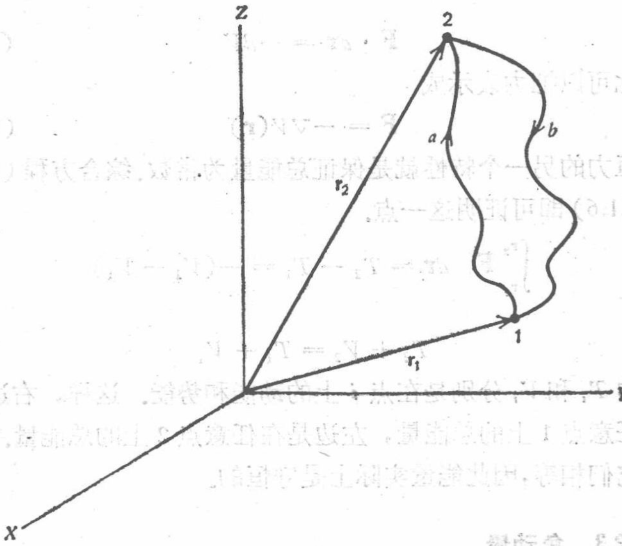


图 1.2　两点之间的势

现在引进势能的概念。一个守恒力使点 $\mathbf{r}_1$ 移动到某个基准点 $\mathbf{r}_0$ 所作的功定义为势能 $V(\mathbf{r}_1)$：

$$V(\mathbf{r}_1) = \int_{\mathbf{r}_1}^{\mathbf{r}_0} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} + V(\mathbf{r}_0) \tag{1.5}$$

由于基准点是任意的，我们选 $V(\mathbf{r}_0) = 0$. 如果作用力是守恒力，则标量势能可以与空间中的每一个点联系起来。这样，从点 $\mathbf{r}_1$ 到 $\mathbf{r}_2$ 所作的功就可以用势能来表示：

$$W_{12} = \int_{\mathbf{r}_1}^{\mathbf{r}_2} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_{\mathbf{r}_1}^{\mathbf{r}_0} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} + \int_{\mathbf{r}_0}^{\mathbf{r}_2} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$$

这就是

$$W_{12} = V(\mathbf{r}_1) - V(\mathbf{r}_2) \tag{1.6}$$

这意味着

$$\int_{\mathbf{r}_1}^{\mathbf{r}_2} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = -\int_{\mathbf{r}_0}^{\mathbf{r}_2} dV$$

或

$$\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = -dV \tag{1.7}$$

由此可以把力表示成

$$\mathbf{F} = -\nabla V(\mathbf{r}) \tag{1.8}$$

守恒力的另一个特性就是保证总能量为常数.综合方程(1.4)和(1.6)即可证明这一点.

$$\int_{\mathbf{r}_1}^{\mathbf{r}_2} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = T_2 - T_1 = -(V_2 - V_1)$$

或

$$T_2 + V_2 = T_1 + V_1$$

其中 $T_i$ 和 $V_i$ 分别是在点 $i$ 上的动能和势能. 这样，右边是在任意点 1 上的总能量，左边是在任意点 2 上的总能量. 由于它们相等,因此能量实际上是守恒的.

### § 1.2.3 角动量

在研究质点动力学和刚体动力学时，动量矩(或角动量)是又一个重要的概念. 考虑一个质量为 $m$ 的质点，它具有线动量 $\mathbf{P}$:

$$\mathbf{P} = m\dot{\mathbf{R}}$$

参照图 1.3，这个动量关于任意点 $O$ 的矩定义为

$$\mathbf{h}_0 = \mathbf{r} \times m\dot{\mathbf{R}} \tag{1.9}$$

由于 $\dot{\mathbf{R}} = \dot{\mathbf{R}}_0 + \dot{\mathbf{r}}$，上式就变为

$$\mathbf{h}_0 = \mathbf{r} \times m\dot{\mathbf{r}} + \mathbf{r} \times m\dot{\mathbf{R}}_0 \tag{1.10}$$

右边的第一项是 $x,y,z$ 动坐标系中的视角动量,另一项是因 $O$ 点运动而带来的修正项.

在研究姿态运动方程时，$\mathbf{h}_0$ 的变化率特别重要. 它取如

下的形式：

$$\dot{\mathbf{h}}_0 = \frac{d}{dt}(\mathbf{r} \times m\dot{\mathbf{r}}) - \ddot{\mathbf{R}}_0 \times m\mathbf{r} - \dot{\mathbf{R}}_0 \times m\dot{\mathbf{r}} \quad (1.11)$$

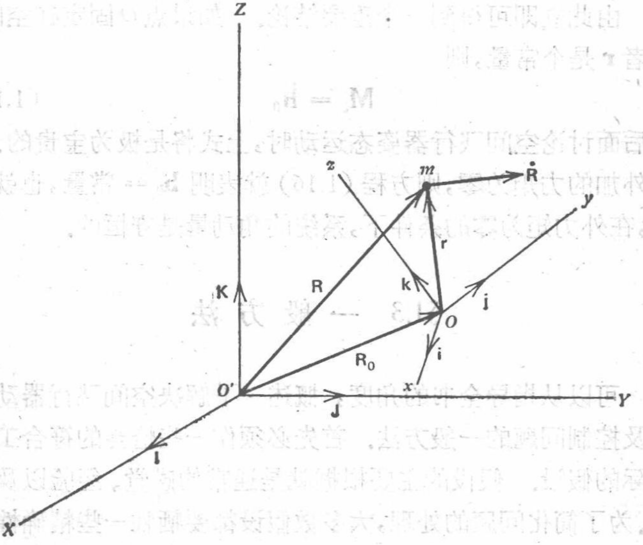


图 1.3　质点$m$关于$O$点的角动量

右边的每一项都有一定的物理意义. 第一项是 $x, y, z$ 坐标系中视角动量的变化率. 第二项表示了点$O$的加速度的影响. 最后一项表示了因点$O$的速度而带来的修正量. 这个动量变化率可以与关于$O$点的外加力矩 $\mathbf{M}_0$ 联系起来. 作用在$m$上的力关于$O$点的力矩定义为

$$\mathbf{M}_0 = \mathbf{r} \times \mathbf{F} \quad (1.12)$$

在这种情况下，$\mathbf{F} = m\ddot{\mathbf{R}}$. 因此，$\mathbf{M}_0$变为

$$\mathbf{M}_0 = \mathbf{r} \times m\ddot{\mathbf{R}} = \mathbf{r} \times m(\ddot{\mathbf{R}}_0 + \ddot{\mathbf{r}}) \quad (1.13)$$

由于 $\dot{\mathbf{r}} \times \dot{\mathbf{r}} \equiv 0$，因此式 (1.13) 变为