

J.W. 科尼利斯 H.F.R 斯科耶尔 K.F. 韦克 著

火箭推进 与 航天动力学

杨炳尉 冯振兴 译


$$F = C_p A_p \dot{m} c$$

$$F = C_p A_p \dot{m} c$$

$$F = C_p A_p \dot{m} c$$

宇航出版社

$$A_p \dot{m} c$$

火箭推进与航天动力学

J.W. 科尼利斯 H.F.R 斯科耶尔

K.F. 韦克 著

杨炳尉 冯振兴 译

宇航出版社

内 容 简 介

本书是作者根据在荷兰德尔福特(Delft)科技大学航天工程系给研究生讲授的一系列课程的讲稿整理编写而成的教科书。作者把航天学中火箭推进、弹道分析和航天动力学这三个密切相关的基本方面有机地综合在一起,作了全面而系统的阐述。本书通篇采用国际单位(SI)制,阅读时无需进行换算。

本书可供从事火箭、导弹、卫星、空间科学研究和空间利用等方面的科学工作者、工程技术人员、军队干部、有关大专院校的教师、学生和研究生阅读。

Rocket Propulsion and Spaceflight Dynamics

J.W.Cornelisse

H.F.R.Schöyer

K.F.Wakker

Pitman

LONDON · SAN FRANCISCO · MELBOURNE

First published 1979

火箭推进与航天动力学

J.W.科尼利斯 H.F.R.斯科耶尔

K.F.韦克 著

杨炳尉 冯振兴 译

责任编辑:宋兆武

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

天津市静一胶印厂印刷

开本: 850 × 1168 1/32 印张: 20.5 字数: 477千字

1988年9月第1版 第1次印刷 印数: 1-1,500册

统一书号: 15244.0021 定价: 4.90元

译 序

国内外已出版的宇航学的专业书籍中，分别讨论火箭推进、导弹弹道和飞行动力学的书籍已有不少，但把宇航学中这些基本的方面有机地综合在一起、进行全面阐述的书却极少。而本书的特点正好是弥补这一不足。本书采用国际单位制，阅读时无需进行换算。原作者曾多年在荷兰德尔福特科技大学航天工程系给研究生讲课，在此基础上写出了本书。献身宇航领域的有志者，可以从该书详细而严格的推导中获得坚实而广阔的基础知识；在宇航学某一专业领域内有经验的研究人员和工程师们，也可利用它作为通往相关领域去的捷径。所以本书既适合于作为教材或教学参考书，也适合于作为工程手册查阅。本书原文版曾得到国内许多专家的好评和推荐，为此我们翻译了这本著作。

宇航学涉及的专业面很广，加之目前有些新科技名词尚未统一，这给译者增添了一些困难。本书所用的名词术语尽量采用我国国标中规定的名称和科学出版社出版的各科专业英汉词汇的译名，对其中没有收录的一些新词汇，尽量采用各专业习惯使用的名词术语，力求与各科专业书籍和宇航工程师们工作中所用的名词一致。对原文中个别容易混淆的或与国内通用名称不一致的名词术语，译者均已加注说明。

序言、符号表、第一、二、三、四、七、八、十三、十四、十八、十九、二十章和附表、附录由杨炳尉同志翻译；第五、六、九、十、十一、十二、十五、十六、十七章由冯振兴同志翻译。对各章分别作了互校，最后由杨炳尉同志负责全书的定稿。由于时间仓促，水平有限，译得不当或错误之处，望广大读者指正。

译者

一九八四年五月

于北京

序 言

近二十年来，宇航学已经发展得日趋成熟，并且在现实生活中变得越来越重要了。许多国家有了他们自己的空间计划，在国际开发计划中与他国协作，成了国际空间开发组织的成员国。数以万计的人们正在从事空间技术、空间研究和空间应用领域的工作。他们绝大多数人必须对同宇航学有关的物理和数学基础知识有透彻的了解。本书的目的就是在火箭推进、弹道分析以及卫星和星际飞行动力学这三个基本方面，以及与宇航学密切相关的其他方面，满足读者的需求。

到目前为止，那些携带人造地球卫星、星际飞船或其他有效载荷的大型运载火箭，还是由化学火箭发动机提供推力的。这些化学火箭发动机（其能量来自化学反应）是现今唯一研制成熟、可靠而又经过广泛飞行考验的发动机，它们能够提供巨大的推力把重型飞行器送离地球表面。因此，较深入地了解其工作原理及其限制是每个从事宇航科学的人所必不可少的。

由于运载火箭的主要目的是把有效载荷送到某一预先指定的位置上，并使它具有规定的速度，因此任务的成败在很大程度上取决于能否精确预示运载火箭的弹道。运载火箭的弹道是由火箭发动机的推力和地球的引力共同决定的，并且受到大气的影 响。运载火箭的飞行圆满结束后，主任务便开始：或是人造地球卫星进入绕地球的轨道，或是空间飞船启程奔向太阳系中的一个或某几个星球。

人造地球卫星都是根据不同的目的发射的。纯科学研究卫星帮助我们探索宇宙之谜，或是帮助我们更好地了解地球的几何、气象或电磁特性；商业通信卫星则为航海、航空和公用事业提供比较便宜而又强有力的空间通讯工具。

星际飞船大大地扩展了我们的视野。它们已经拍摄了火星上高耸的山脉和倾斜的平原，拍摄了金星的旋转着的云层；它们也为对水星、木星及更远的行星的激动人心的探索开辟了可能的途径。所有这些探索最终将使我们更深入地了解太阳系、特别是我们所居住的行星——地球，了解它们的发展过程、特性和发展趋势。很明显，对于这些任务来说，精心地选择飞行路径是至为重要的，因为小小的误差就可能使这种任务的价值大为失色。

本书向读者全面介绍上述的宇航学课题，并阐明它们之间的相互关系。本书是作者根据在德尔福特科技大学宇航工程系给研究生讲课的讲稿整理编写的。据作者所知，至今还没有出版过一本把宇航学中这些密切相关的课题综合在一起的单一教程。因此，那些只熟悉宇航学中某一部分知识的人要了解其他领域的知识，就不得不参考许多别的资料。除此之外，许多论述轨道力学的书籍好象忘记了卫星是必须用运载火箭发射的；论述火箭推进的教科书往往又把火箭推进本身当作目的，而不把它看作是发射卫星或接近别的天体去的一种工具（在1925年，霍曼(W. Hohmann)就提出过这种看法)；而运载火箭的弹道学则经常象是火箭推进或轨道力学的附属品而得不到应有的重视。因此，一个从事火箭弹道分析的学生为了掌握这方面的知识，不得不查找几个学科的文献，或是从军事外弹道学、从飞行力学手册中去找参考资料。更令人感到麻烦的是不同来源的资料中所用的术语不统一，描述同一现象的方程式又常常略有差别。这就妨碍了对它们的确切理解和正确使用。在本书内，作者尽力使所用符号和表达式前后统一。当然还会有不完美之处。例如，在力学中习惯于使用符号 \mathbf{B} 表示角动量，而在天体力学中却使用 \mathbf{H} 。为了便于同别的教科书相互参照，本书中某些部分也采用了这些传统的表示法，但是只在极个别情况下才这样做，并且在书中作了明确的说明。把数字推导连同其许多中间步骤一起给出，目的是使之更清楚和

易于学习。作者本着宁要推导和叙述透彻明白，而不愿堆砌更多材料的原则，尽力做到着重讲清楚所发生的物理现象的本质，因为表达式或公式只不过是物理现象的速写。

书中通篇采用国际单位（SI）制。这种单位制早已为科学界所接受，并且因为其一贯制和便于使用，也促使它在最近十年来很快地被技术界所采用。美国国家航空和航天局（NASA）、欧联空间局（ESA）在它们的出版物中均已采用了国际单位制。但据作者所知，本书是第一本严格地只使用国际单位制全面讲述宇航学技术的教科书，这一点也提高了它作为教科书的价

值。本书是为那些从各个不同角度对宇航学及其相关领域有浓厚兴趣的工程师和科学家们写的，也是为即将从事宇航科学的学生们写的。在宇航学某一领域内工作素有经验的工作人员将能由此找到一条通往相关领域去的捷径；对初学者来说，则是按照合乎逻辑的严格方式把他们引向一系列有关的课题。我们希望本书对弹道学家、火箭和导弹的使用者，如军人、利用探空火箭进行实验的人员和利用卫星进行科学研究的人员，也会具有较高的价值。这些人经常需要了解由火箭本身，以及由其弹道或卫星轨道所确定的一些使用限度，而本书就阐述了这些限制。

本书分成四个主要部分，由二十章组成。前三章向读者简要介绍了为学习以后各章所需的宇航学、天文学、地球物理学、力学和物理学方面的各种基本概念。已经熟悉这些内容的读者可以越过这三章直接学习后面的部分。因此，头三章仅作为参考性内容。

第四章对运载火箭运动方程作了严格的推导。

第五章至第十章讨论火箭推进技术，给出了理想（化学）火箭发动机的基本理论，并联系实际的火箭发动机进行讨论。火箭发动机内的燃烧过程是在化学（平衡）反应的基础上进行讨论

的。火箭发动机的某些部件通常总要出现极高的温度，所以也讲述了与之有关的传热问题。最后，对固体火箭发动机和液体火箭发动机进行了全面的讨论。

第十一章至第十四章讨论了运载火箭的弹道和性能。这些章节的内容，包括火箭在真空中的运动、多级火箭理论、洲际弹道导弹的弹道、以及大气对运载火箭弹道的影响等。

在最后六章讲述了卫星轨道和行星际飞行问题。这些章节首先从古典天体力学的几个课题开始，接着讲述了开普勒轨道理论；然后借助于一次性使用的运载火箭和多次使用的航天飞机的性能图表，讨论和解释了卫星的发射和入轨问题；还详细介绍了受扰动卫星轨道的计算方法，讨论了行星际飞行轨道的解析方法；最后一章以电火箭发动机或太阳帆为动力的星际飞船为例，讲述了小推力飞行轨道。

书末的附表给出了物理学和天文学方面的一些常数以及有关太阳系的一些数据。作者努力使这些数据一致和配套。书末的附录给出了一些常用的基本概念，如高斯定理、雷诺迁移定理以及热力学第一定律，以便读者查阅。

虽然作者已作了最大的努力，但错误在所难免，恳请读者指正。

作者感谢为本书作过各种贡献的人士。他们给了我们许多有益的建议，提供了必要的数据和资料。

J.W. 科尼利斯

H.F.R. 斯科耶尔

K.F. 韦克

1978年8月

于荷兰德尔福特

符 号 表

符号表按字母次序排列，英文符号在前，希腊文符号在后。希腊字母之后是花体字母和天文符号。符号表的最后部分是最常用的下角码和上角码。对于符号表内没有列出的那些带有下角码或上角码的符号，可以在本符号表的相应部分分别查出符号、下角码或上角码的意义，从而得出其总的意义。

A	转动矩阵	C_D	质量流量系数
A	表面；面积	C_D, C_L 等	气动力系数
A_0	喷管出口面（喷管出口轮廓线围定的面）	C_{d0}	横向流动阻力系数
A_p	反应产物；固体推进剂药柱的流道面积	C_F	推力系数
A_r	反应物	C_F^0	特征推力系数
a	加速度	$C_{F\alpha}, C_{m\alpha}$ 等	稳定性导数
a	声速	C_l, C_n 等	气动力矩系数
a	活度	C_p	定压热容
a	半长轴	C_v	定容热容
a_{cm}	相对于火箭结构的质心加速度	c	真空光速
B	角动量	c	比热
B	碰撞参数	c	有效排气速度
b	叶轮宽度	c	弦长
b	翼展	c_d	流量系数
b	半短轴	c_p	定压比热
C	结构因子	c_s	比耗量
C	周向扰动加速度	c_v	定容比热容
C	雅可比常数	cm	质心（质量中心）
		cP	压心（压力中心）
		c^*	特征排气速度
		D	阻力

D	直径；外径
D	距离
D.A.	直接上升型轨道
D _s	弹道的线射程
d	火箭底部直径
E	单位矢量矩阵
E	内能
ΔE	内能变化（定容热量变化）
E	偏近点角
e	单位矢量
e	比内能
e	（数值）偏心率
F	力；推力
F	吉布斯自由能
F	增强函数
F	焦点
F	双曲近点角
F _s	作用在系统S上的总外力
F _v	火箭发动机真空推力
f	逸度
G	万有引力常数
g	单位质量所受的力；引力场强度
g ₀	海平面标准重力加速度
g _r	参考重力加速度
H	点质量系统的角动量
H	单位质量的角动量
H	焓

ΔH	焓变化（定压热量变化）；反应热
H	时角
H.T.A	霍曼转移轨道型
H _p	泵压头
ΔH _{f⁰}	标准生成热
H _{g⁰}	世界时零点时刻格林威治时角
h	比焓
h	普朗克常数
h	海拔高度
h _c	对流放热系数
I	惯性张量
I	总冲量
I _{s,p}	比冲量
I _δ	体积比冲量
I	极惯性矩
I _{xx} , I _{yy} , I _{zz}	惯性矩
I _{xy} , I _{yz} , 等	惯性积
i	轨道倾角
J	线动量
J	喉部面积与流道面积的比值
J	带调和函数、田形调和函数和扇形调和函数的系数
K	燃烧表面积与喉部面积的比值
K	阻力参数
K _a	平衡常数（按摩尔数

	计算)
K_p	平衡常数 (按分压计算)
$K_{z,}$	生成平衡常数
k	玻耳兹曼常数
k	导热率
κ_1	入轨速度参数; 弹道段起始点速度参数
κ_2	气体的光谱吸收系数
L	升力
L	长度
L	气层厚度
L	平黄经
L	拉格朗日秤动点
L_{00}	射线当量长度
L^*	火箭发动机特征长度
L', M', N'	气动力矩
l_0	固体推进剂药柱通道横截面的周长
M	力矩
M	(质点) 系统的总质量; 物体的质量; 人造地球卫星或飞船的质量
M	平均近点角
M_0	马赫数
M_0	结构质量
M_0	空火箭质量 (火箭最终质量)
M_r	由于推力 (矢量偏差) 造成的力矩

M_0	(有效) 推进剂质量
M_0	有效载荷质量
M'	俯仰力矩
m	质点质量或点质量
m	质量流量; 物质通量
N	法向力
N	泵的每秒钟转数; 转速
N	与速度矢量垂直的摆动加速度
N	飞行圈数
$NPSE$	净正抽吸能
N_0	努塞尔数
N_A	阿伏伽德罗常数
N_0	泵的比转速
N_{00}	抽吸比转速
N'	偏航力矩
n	单位法线矢量
n	浓度或摩尔数
n	无量纲加速度
n	(平均) 角运动
n	行星轨道的无量纲半径
nP	中性点
O	参考系原点
P	功率
P_0	普朗特数
P_0	输给泵的功率
P_i	组份 i 的分压与参考压力的比
P_0	有用功率

P	压力
P	半正焦距
P, q, r	角速度分量
P_0	(未扰动的)大气压
P_i	组份 <i>i</i> 的分压
P_0	前端滞止压(驻点压力)
Q	热量
Q	体积流率
q	能流密度; 热流密度●
q	无量纲半正焦距
\hat{q}	动压
R	位置矢量; 矢径
R	地球半径; 行星半径; 标准椭球的当地半径
R	气体常数
R	摄动势或扰动势
R_0	雷诺数
\tilde{R}	摄动函数
R_0	弹道横偏影响系数
ΔR_0	弹道横偏误差
$R_{0,1}$	俘获半径

R_D	弹道纵偏影响系数
ΔR_D	弹道纵偏误差; 弹道纵偏修正量
R_0	地球平均赤道半径
R_p	地球极半径
$R_{0,1}$	影响范围或作用范围半径
R_0	普适气体常数
R_0	地球平均半径
r	矢径; 位置矢量(相对于火箭质心)
r	恢复因子
r	固体推进剂燃烧表面的移动速度; 燃烧速率
r_0	质流心(质量流量中心)的位置矢量
r_0	侵蚀燃烧速率
\hat{r}	无量纲距离
S	质系
S	惯性参考系
S	瓣
S	(闭合的)面
S	参考面积; 火箭底部横截面积
S	径向摄动加速度
S_1	斯坦顿数
S_{nr}	火箭的外壁面
S_r	参考面积
S_w	翼的投影面积

● 此译名按《计量单位名称与符号方案(试行)》,也与工程技术人员习惯上使用的名称一致。《英汉物理学名词》上译作能通量和热通量。但按《方案》,通量的量纲是功率的量纲,与热流密度的量纲有差别。——译者

s	结构比		
	距离	V	心速度
Δs	火箭飞越的距离	ΔV	速度矢量
T	扭矩	V_0	火箭的速度增量
T	切向力	$V_{0,h}$	当地环绕速度
T	切向扰动加速度	$V_{0,h}$	运载火箭特征速度
T	温度	$\Delta V_{0,h}$	飞行任务特征速度
T	飞行时间	$\Delta V_{0,h}$	由发射场和发射方位
T	轨道周期		角引起的速度修正值
T_b	整体温度(按体积计算的平均温度)	V_0	排气速度
T_f	流体的膜温(定性温度)	\bar{V}_0	平均排气速度
T_f	火焰温度	V_{00}	当地逃逸速度
T_r	恢复温度	V_1	推进剂注入速度
T_{syn}	会合周期	V_{1d}	N级火箭的理想速度
T_∞	大气外逸层温度	ΔV_{1d}	理想速度增量
T'	自燃温度	V_L	V_0 的极限值
t	时间	V_1	容积装填系数
t_b	燃烧时间	V_∞	双曲超速
t_0	惯性滑行时间	W	引力
t_f	飞行时间	W	功
t	无量纲时间	W	法向扰动加速度
U	单位矩阵	w	固体推进剂药柱的药厚
U	势函数; 势; 单位质量的势能	w_f	固体推进剂药柱的药厚系数
u	理想速度比	X_a, Y_a, Z_a	气动力
u	升交角距	x, y, z	参考系坐标轴
u, v, w	线速度分量	α	吸收比
u_{cm}	相对于火箭结构的质	α	攻角; 入射角
		α	喷管的扩张角

α	涡轮喷嘴角	η	效率
α	赤经	θ	角坐标
α	通用轨道要素	θ	角位移
α	渐近线偏转角	θ	俯仰角
α	修正因子	θ	真近点角
$\frac{1}{\alpha_\lambda}$	气层的单色吸收率	$\Delta\theta$	日心转移角
β	比推力	κ	热扩散率 (导温系数)
β	叶片角	Λ	质量比
β	侧滑角	Λ	地理经度
Γ	范登柯克霍夫 (Van denkerckhove) 函数	λ	有效载荷比
Γ	速度因子	λ	波长
Γ	时间因子	λ	喷管折算因子
γ	比热比	λ	黄经
γ	航迹角	μ	引力参数
γ	无量纲距离	μ	动粘度
δ	赤纬	μ	无量纲质量
δ	厚度	μ	质量流量参数
δ	推力 (矢量偏差) 角	ν	位置矢量 (相对于质心)
δ_0	突偏角	ν	化学计量系数
ϵ	结构效率	ν	拉格朗日乘子
ϵ	(半球) 发射率	ξ	反应程度
ϵ	黄赤交角	ξ	品质因子
ϵ	地球的扁率	ξ, η, ζ	坐标轴
ϵ	下洗角	π	推进剂燃烧灵敏度系数
ϵ_{tot}	总结构效率	ρ	位置矢量 (相对于质心)
ϵ_λ	气层的单色发射率	ρ	(未受扰动的) 参考轨道的位置矢量
η	气体相对于质流心的速度		

ρ	反射比
ρ	质量密度; 空气密度
ρ_1	弹道段起始点半径与再入半径的比值
ρ_p	推进剂平均密度
Σ	无量纲燃烧面积
Σ	弹道角射程
σ	斯蒂芬-玻耳兹曼常数
τ	透射比
τ	托马 (Thoma) 参数 (前次) 经过近心点的时刻
τ^*	滞留时间
Φ	地心纬度
Φ'	测地纬度或地理纬度
φ	推进剂比
φ	滚转角
φ	角坐标
φ	黄纬
φ_{tot}	总推进剂比
ψ	角坐标
ψ	航迹方位角; 弹道下降段航向角
ψ	偏航角
ψ	压强参数
ψ_0	推力/重量比
Ω	角速度或转速
Ω	升交点赤经

Ω'	升交点黄经
ω	角速度
ω	近心点角距
ω_0	地球自转角速度
$\underline{\omega}$	近心点黄经
ϵ	(单位质量的) 总能量
e_k	动能
e_p	势能
M	(平均) 分子量
V	(物质) 体积
V_p	可用于存贮推进剂的容积
φ	春分点
$\underline{\Omega}$	秋分点; 天秤 (星) 座
下角码	
a	气动力的
a	远心点
ab	火箭的后体
abs	绝对的
as	离去渐近线
B	(火箭) 弹体
b	发动机熄火 (关机)
c	(火箭发动机的) 燃烧室
c	凝聚相
c	科氏 (科里奥利)
c	圆形 (轨道)
c	临界

c	极点 (最大高度点)	i	弹着点
c	飞船	in	惯性的
cm	质心 (质量中心)	l	发射 (场)
cp	压心 (压力中心)	max	最大的
cr	临界的	n	火箭的前体
cyl	火箭的圆柱段	nP	中性点
D	阻力	o	力的作用点
d	定向的	opt	最优的
d	摄动物体	P	压力
dr	牵连的	P	反应产物
e	喷管出口	P	推进剂
e	反应后的状态	P	固体药柱流道面积
e	再入 (大气层)	P	近心点
e	地球	P	行星
esc	逃逸	Par	驻留轨道
exp	实验的	r	反应物
f	流体的膜温 (定性温 度) 的	r	辐射的
f	摩擦力的	r	火箭参考系
f	火焰	rel	相对的
f	弹着点	s	等熵的
G	格林威治	s	滞止的
g	转动的地心参考系	s	太阳
g	气体	s	卫星
g	推进剂药柱端面	t	喉部; 声速点
H	霍曼 (Hohmann)	t	目标行星
i	干扰	th	理论的
i	物体i	tot	总的
i	子火箭	v	火箭质心水平参考系
ii	弹道段起始点; 入轨 点	W	尾翼
		w	壁面
		x, y, z	x, y, z 方向的分量

·0	初始的		标行星时刻
0	参考温度	3	在绕目标行星的双曲
0	反应前的		轨道的近心点处
0	固体药柱前端	4	离开借力行星的影响
0	在绕地球的驻留轨道		范围时的
	上	λ	该波长的
1	在行星际飞行轨道的	上角码	
	日心圆锥曲线段的起	,	摄动量
	点时刻	。	标准参考状态
2	行星际飞行轨道的日	-	平均值; 平均
	心圆锥曲线段到达目		