

航空航天学 通论

AN INTRODUCTION TO
AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

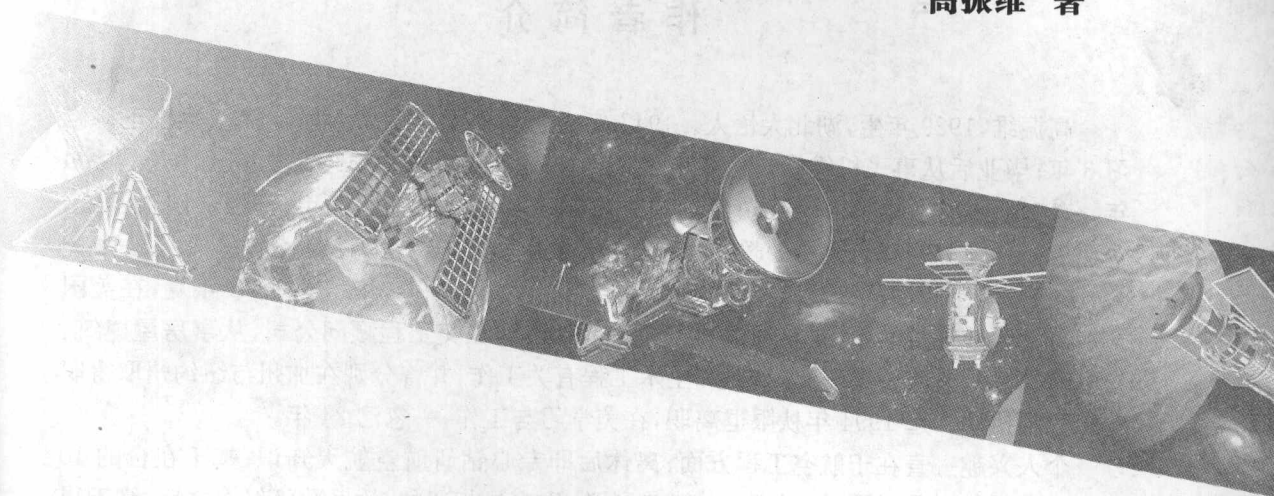
高振维 著

湖北长江出版集团
湖北科学技术出版社

航空航天学 通论

AN INTRODUCTION TO
AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

高振维 著



湖北长江出版集团
湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

航空航天学通论 / 高振维编著. —武汉: 湖北科学技术出版社, 2007.7

ISBN 978-7-5352-3848-1

I. 航... II. 高... III. ①航空学②航天学 IV. V2 V4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 100694 号

航空航天学通论

© 高振维 著

责任编辑: 高诚毅 宋志阳

封面设计: 喻 杨

出版发行: 湖北长江出版集团
湖北科学技术出版社

电话: 87679468

地 址: 武汉市雄楚大街 268 号湖北出版文化城 B 座 12-13 层

邮编: 430070

印 刷: 荆州市翔羚印刷有限公司

邮编: 434000

787 毫米 × 1092 毫米

16 开

40.75 印张

916 千字

2007 年 7 月第 1 版

2007 年 7 月第 1 次印刷

定价: 72.00 元

本书如有印装质量问题 可找承印厂更换



作者简介

高振维, 1929年生, 湖北大悟人。1947年去台湾谋生。后考入航空机械学校正科修习3年; 毕业后从事飞机维修长达7年之久。1962年复考入中原理工学院土木工程系4年, 获工学士学位; 旋考入时在苗栗的中央大学地球物理研究所2年, 获理学硕士学位。毕业后留任地球物理研究所助教, 并兼任中原理工学院讲师2年。

羁台23年后, 终于得以自费奖学金选赴美国留学。1970年秋至1972年夏, 在美国芝加哥大学地球科学系, 复获理学硕士学位。此后即在美工程顾问公司, 从事房屋建筑、核电站、厂房、公路桥梁等, 与结构和土木工程有关工作; 并曾分别在加州与纽约州取得职业工程师执照。迄1994年秋限退离职, 在美学习与工作, 一忽已24年。

个人兴趣一直在于航空工程方面; 离休后即专心钻研航空航天知识; 基于在台的10年航空学习与工作经历, 加以理工的基础科学, 许多是相通的; 故经数年努力之后, 终于得以完成《航空航天学通论》一书, 以供有志青年学习之参考。

序 言

此书的主要目的是对广大航空航天爱好者,在重于大气飞行器的科学与工程方面,提供清晰而初步的了解。深信此书将会给予读者较深入地理解有关流体力学的基础。诸如航空术所需的升力和阻力的产生,黏度和压缩性的重要与影响,以及估计性能、稳定要素和飞机设计特性对其性能与稳定所具冲击的方法。升力与阻力亦有赖于升力本身和其他现象,如下降气流(downwash)、地面效应和流痕漩涡扰动,这可由适当地研究环流原理才能有所了解。所以,此书的6章,对升力的环流理论和绕翼剖面环流与升力关系有相当地讨论。开头的一些航空术历史的发展,则强调应用空气动力学;8章的将空气动力学扩充到旋翼机上、9章的重入地球大气层,都考虑到逃离速度进入大气的减速、控热与进入途径的方向等问题,对太空飞行器的安全着陆是有助的。这些,都是此书的一些特色。

在航空动力方面,将往复式活塞引擎和涡轮喷射各式引擎,归类为大气呼吸引擎;即只能在富氧大气层中供航空之用。将航天引擎如多级火箭发射器、火箭、高级电、热动力推力器等,分章讨论以供太空轨道操纵和转换之用。有了发射与航天动力,进而分章讨论太空任务建构设施、太空船与发射系统、太空弹道与轨道实际问题,才不致成为空中楼阁之讨论。最后二章,分别才就飞行器结构与材料、高超音速飞行器的发展,有关缩短环绕地球飞航时间的可行性稍作探讨,作本书的结束。

此书在航空航天两方面采用混合讨论方式。如9章和17章的返回地球,12章和18章的轨道转换。骤看起来,这些章节,似有相似或雷同之处;其实各有侧重,细看起来将不觉有何重复。例如18章讲的星际椭圆轨道转换,系以补锥线近似方法,以太阳为中心的黄道面椭圆转换,可将地球停留轨道中运行之太空船,由太阳中心之椭圆轨道转换,以与另一太阳系行星(目标)会合,而进入目标行星之停留轨道,或最后登陆此目标行星。后者是一个富有兴趣的星际轨道转换与会合的实际问题,与12.11节讲的学理式轨道转换是有所区别的。

最后,总合谈一下有关第V部的航天学浅说。本部的撰稿作者均系美空军学院航天系之专家学者,书的内容深入浅出,资料尤其丰富;颇似一科普性巨著,文中尽量避免使用严密的数学方程(必要的置于附录),以引起读者兴趣而不致躲开(shy away from)太空旅行与探测这一兴奋题材,因一般人看来数理方程是复杂的。航天和太空任务研究,有时可能是不相同,但《航空航天学通论》一书的目的,是解开所谓太空飞行的奥秘(to bring space down to Earth)。如果成功的话,在研读此书之后,除了航空学外,您应会了解太空船、太空飞行器、发射系统和太空运作的概念与原理。而数学层级,亦不过是向量、微积分和微分方程而已;深信有志于航空航天事业的大学生和资深高中同学都能理解此书,并会由衷地感兴趣。

高振维 2007年2月

写于美国旧金山

主要符号意义说明表

英文符号	用 途
a	加速度; 音速, $a = \sqrt{\gamma RT}$, $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1.4$, T 乃温度, 和 R 为特定气体常数比例于高度之大气温度递减率, $a = \frac{dT}{dh}$; 机翼升力曲线斜率, $a = \frac{dC_L}{d\alpha}$; 椭圆轨道之半主轴
a_0	无限翼升力曲线斜率, $a_0 = \frac{dC_L}{d(\alpha - \alpha_i)} = \frac{dC_L}{d\alpha_{eff}}$
ac	机翼之空气动力中心, 如空气动力对 ac 之力矩 M_{ac} = 常数, 而与冲角无关
A	直升机旋翼所成致动圆盘面积; 螺旋桨叶旋转面积; 平台面积或截面积
AR	机翼展弦比, $AR = \frac{b^2}{S}$
atm	大气压, 海平面一标准大气压为 $1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
b	翼展; 椭圆轨道之半副轴
bhp	往复式引擎刹车马力
$BSFC$	刹车比燃油消耗
c	翼弦长度; 比燃油消耗; 比热, $c = \frac{dq}{dT}$
c_d	翼剖面阻力系数
C_D	基于飞机参考面积上的阻力系数, $C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 S}$
$C_{D,i}$	诱导阻力系数, $C_{D,i} = \frac{C_L^2}{\pi e AR}$
$C_{D,0}$	0 升力阻力系数
$C_{D,p}$	外形阻力系数
cg	重力中心
c_l	翼剖面升力系数
C_L	飞机升力系数
C_M	飞机力矩系数
$c_{m,1/4}$	翼剖面 1/4 弦力矩系数
$c_{m,ac}$	翼剖面空气动力中心力矩系数
c_p	定压比热
C_p	压缩流压力系数, $C_p = \frac{C_{p,0}}{\sqrt{1-M_\infty^2}}$
$C_{p,0}$	非压缩流压力系数

$C_{p,cr}$	临界压力系数, $C_{p,cr} = \frac{2}{\gamma M_\infty^2} \left\{ \left[\frac{2 + (\gamma - 1) M_\infty^2}{1 + \frac{1}{2} (\gamma - 1) M^2} \right]^{\gamma/(\gamma - 1)} - 1 \right\}$
c_v	定容比热
d	直径
D	阻力; 扩散系数
D_f	总表皮摩擦
D_i	诱导阻力
D_p	外形阻力
D_w	近音速领域扩散马赫数以后波阻力
e	内能; 诱导阻力校正因数; 椭圆等锥线之偏心
E	飞机之总能量; 飞机之续航力, $E = \frac{\eta}{c} \frac{C_L^{3/2}}{C_D} (2\rho_\infty S)^{1/2} (W_1^{-1/2} - W_0^{-1/2})$, (螺旋桨飞机) 和 $E = \frac{1}{c_t} \frac{C_L}{C_D} \ln \frac{W_0}{W_1}$ (喷射飞机), 在此 ρ_∞ 为大气密度, W_0 为满油箱燃油机重, W_1 为无燃油机重, S 为机翼面积, 和 c_t 为推力比燃油消耗
$EIRP$	有效等方向的辐射功率
F	力; 喷射引擎推力; 功率通量密度
g	重力加速度
G	通用引力常数, $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg})(\text{s})^2$; 发射(G_t)和接收(G_r)天线收益
g_0	海平面重力加速度
h	高度; 地势高度, $h = \left(\frac{r}{r + h_G} \right) h_G$; 火箭熄火高度; 比角动量向量; 热焐, $h = e + pv$
H	角动量向量
h_a	由地心起算的绝对高度
h_G	由海平面起算的几何高度
H_e	比能量高度, $H_e = h + \frac{V^2}{2}$
h_n	中立点, $h_n = h_{acwb} + V_H \frac{a_t}{a} \left(1 - \frac{\partial \epsilon}{\partial \alpha} \right)$
I	质量之转动惯量
I_{sp}	比冲量
I_t	总冲量
J	螺旋桨之前进比, $J = \frac{V_\infty}{nD}$, n 乃螺旋桨每秒旋转数
K	热传导系数; 绝对温度之单位
l	长度
L'	飞机滚转力矩
lbf	英制力单位磅

lbm	英制质量单位磅
LE	翼前缘
L/D	升力阻力比
l_t	机尾中心至飞机中心之距离
m	质量;公尺
M	质量;力矩;飞机俯仰力矩;马赫数
$\bar{M}$	气体分子量
M_{cr}	临界马赫数
$M_{d,d}$	阻力扩大马赫数
M_0	飞行器总质量
M_f	飞行器无推进剂质量
$\frac{m}{C_D S}$	重入飞行器的弹道参数
$\frac{m}{C_L S}$	控制飞行器滑翔弹道重入的升力参数
n	力的因数, $n = \frac{L}{W}$
N	飞机偏航力矩;引擎轴每分钟旋转数, rpm;力的单位牛顿
P	压力;功率;飞机滚转角速度
P_A	可用功率
P_0	流线停滞点总压
P_R	所需功率
P_∞	自由流大气压力
q	动压, $q = \frac{1}{2} \rho V^2$; 热量
Q	热量;飞机俯仰角速度
r	半径;地球半径
r_a	椭圆轨道远地点半径
R	气体常数, $R = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$; 飞机偏航角速度;航程;曲率半径
$\bar{R}$	通用气体常数
R/C	爬升率
RN	雷诺数
r_p	椭圆轨道近地点半径
s	时间秒; ρ_s 、 p_s 和 T_s 分别为海平面的大气密度、压力、与温度
S	面积;表面积;机翼平台面积
SFC	比燃油消耗
S_{LO}	起飞时飞机离开跑道升空距离
SSL	标准海平面

S_{π}	物体前头面积	面积单位: 平方米
St	热传导有关的 Stanton 数, $St = \frac{Q}{\rho V (H_s - H_w) A}$	无量纲
t	时间; 厚度	时间单位: 秒
t_b	火箭发射升空进入轨道前熄火时间	时间单位: 秒
T	推力; 温度; 周期, 亦常用 τ	力单位: 牛顿; 温度单位: 开尔文; 时间单位: 秒
$TSFC$	推力比燃油消耗	质量流量单位: 千克/秒
U	速度分量	速度单位: 米/秒
V	飞机速度; 轨道速度; 速度分量; 体积或容积	速度单位: 米/秒; 体积单位: 立方米
V_a	椭圆轨道远地点速度	速度单位: 米/秒
V_b	火箭入轨道熄火速度	速度单位: 米/秒
V_1	飞机真速	速度单位: 米/秒
V_{CAL}	飞机校正空速	速度单位: 米/秒
V_e	火箭排气速度	速度单位: 米/秒
V_E	飞机相当空速; 飞行器重入大气层的最初速度	速度单位: 米/秒
V_{IND}	飞机指示空速	速度单位: 米/秒
V_H	飞机尾翼体积比, $V_H = \frac{l_t S_t}{c S}$	无量纲
V_{LO}	飞机离地起飞时速度	速度单位: 米/秒
V_p	椭圆轨道近地点速度	速度单位: 米/秒
V_S	卫星或轨道速度	速度单位: 米/秒
V_{stall}	飞机失速速度	速度单位: 米/秒
w	机翼下降流	速度单位: 米/秒
W	重量; 功; 速度分量	力单位: 牛顿; 功单位: 焦耳; 速度单位: 米/秒
希腊符号		用途
α	翼弦相对于自由流风向的冲角; 为指数大气之一常数, $\alpha = g_0 / (RT)$	
α_a	绝对冲角, 即翼剖面 0 升力线与相对风间夹角, $\alpha_a = \alpha - \alpha_{L=0}$ (最后一项为 0 升力线冲角)	
α_e	调衡冲角	
α_{eff}	有效冲角, $\alpha_{eff} = \alpha - \alpha_i$, α_i 为诱导冲角	
δ	界面层厚度	
τ	剪应力; 轨道周期	
μ	流体黏滞系数; 马赫角, $\mu = \arcsin(1/M)$	
Γ	漩涡流或环流强度	
λ	波长	

目 录

序言	1
I 航空学简介	
1 绪论-航空发展简史	3
1.1 航空术简介	3
1.1-1 莱特首飞至二次世界大战末期的飞机发展	4
1.1-2 二次世界大战以后飞机的发展	5
1.2 飞行情况与推力	10
1.3 20 世纪前期欧美航空研究	11
2 飞行器的解剖	13
2.1 飞机的解剖	13
2.2 太空船和相关飞行器概要	17
II 地球标准大气和空气动力学	
3 标准大气	27
3.1 理想气体、状态方程、高度定义与流体静力方程	27
3.2 标准大气性质对高度的变化	30
3.3 压力高度、温度高度与密度高度的例示	33
4 流体力学原理与实验	35
4.1 影响空气动力的参数-因次分析	38
4.2 风洞的原理与实验	42
5 基本空气动力学	47
5.1 连续方程	47
5.2 非压缩与压缩流	48
5.3 动量方程	49
5.4 基础热力学	53
5.5 等熵气流	56
5.6 能量方程	58
5.7 基本空气动力应用问题	61
5.7-1 音速	61
5.7-2 低速亚音速风洞的实际问题	64
5.7-3 飞机航速的量度	66

5.7-4 超音速风洞与火箭引擎	75
6 黏滞流与环流	82
6.1 黏滞流介绍	82
6.2 层流界面层与表皮摩擦阻力	87
6.3 乱流界面层与表皮摩擦阻力	90
6.4 压缩性对表皮摩擦的影响	92
6.5 界面层的转变	93
6.6 气流分离	95
6.7 黏滞流阻力效应的结论	98
6.8 势流简介	98
6.9 升力理论:环流	101
7 翼剖面 and 机翼的升力与阻力	107
7.1 翼剖面名称	107
7.2 升力、阻力和弯矩系数	109
7.3 翼剖面资料	111
7.4 无限对有限机翼	115
7.5 压力系数	116
7.6 由 C_p 求升力系数	118
7.7 升力系数的压缩性校正	121
7.8 临界马赫数和临界压力系数	122
7.9 阻力扩大马赫数	128
7.10 在超音速下的波阻力	130
7.11 翼剖面阻力的总结	134
7.12 有限机翼	135
7.13 诱导阻力的计算	138
7.14 升力曲线斜度的改变	141
7.15 后掠机翼	144
7.16 高升力机件-襟翼	147
7.17 圆柱和球体的空气动力学	149
7.18 升力如何发生的替代解释	151
8 基本直升机空气动力学	157
8.1 转子垂直飞行的动量原理分析	157
8.1-1 盘旋	157
8.1-2 垂直爬升	160
8.1-3 垂直降落	161
8.1-4 完整的诱导速度曲线	162
8.1-5 回转翼自动转动	163
8.1-6 地面效应	164
8.1-7 动量原理的总评	164

8.2 转子垂直飞行叶片元件原理	165
8.2-1 基本方法	165
8.2-2 推力近似法	167
8.2-3 非均一进入流	168
8.2-4 理想扭转	170
8.2-5 叶片平均升力系数	171
8.2-6 功率的近似	171
8.3 前进飞行的转子机件	172
8.4 转子的控制	174
8.5 前进飞行的转子空气动力学	175
8.5-1 动量原理	176
8.5-2 叶片元件原理	177
9 重返地球空气动力学	185
9.1 热障和抗热系统	186
9.2 大气传输性质	192
9.3 大气进入的一般运动方程	197
9.4 弹道进入的应用	199
9.5 升力重入连同太空梭的应用	204
III 飞行力学	
10 飞机性能	209
10.1 阻力极概念	209
10.2 运动方程	211
10.3 不加速平飞所需推力	213
10.4 可用推力和最大速度	219
10.5 不加速平飞所需功率	220
10.6 可用功率和最大速度	223
10.6-1 往复式引擎与螺旋桨之联合	224
10.6-2 喷射引擎	225
10.7 高度对所需功率和可用功率的影响	226
10.8 爬升率	229
10.9 滑翔飞行	234
10.10 绝对和运用高限	235
10.11 爬升时间	238
10.12 航程和续航力 - 螺旋桨飞机	239
10.12-1 物理上的考虑	239
10.12-2 量度公式	239
10.12-3 螺旋桨机的 Breguet 公式	241
10.13 航程和续航力 - 喷射飞机	244
10.13-1 物理上的考虑	244

10.13-2	量度公式	245
10.14	$C_{D,0}$ 和 $C_{D,i}$ 间关系	247
10.15	起飞性能	249
10.16	降落性能	253
10.17	转弯飞行和 $V-n$ 图	255
10.18	加速爬升	259
10.19	超音速飞机的一些特别考虑	263
11	飞机稳定与控制原理	267
11.1	飞机各轴向的平移和旋转运动	267
11.2	稳定与控制定义	268
11.2-1	静力稳定	268
11.2-2	动力稳定	269
11.2-3	控制	270
11.2-4	偏微分	271
11.3	飞机上的力矩	271
11.4	绝对冲角	272
11.5	纵向静力稳定标准	273
11.6	量度的讨论:机翼对 M_{cg} 的贡献	277
11.7	尾部对 M_{cg} 的贡献	280
11.8	关于重力中心总的俯仰力矩	282
11.9	纵向静力稳定方程	283
11.10	中立点	284
11.11	静力余额	286
11.12	静力纵向控制概念	286
11.13	计算升降舵调衡角	290
11.14	驾驶杆固定对其自由的静力稳定	291
11.15	升降舵铰链力矩	292
11.16	驾驶杆自由的纵向静力稳定	293
11.17	方向性的静力稳定	296
11.18	侧向静力稳定	297
11.19	短评	298
12	火箭弹道和轨道力学	299
12.1	火箭弹道	299
12.2	多级火箭	304
12.3	逃离速度	305
12.4	圆轨道和卫星速度	306
12.5	椭圆轨道	306
12.6	微分方程	308
12.7	Lagrange 方程	309

12.8	轨道方程	311
12.8-1	力和能量	311
12.8-2	运动方程	312
12.9	太空船弹道的某些基本方面	314
12.10	Kepler 定律	319
12.11	轨道转换	322
12.12	太空飞行的扰动	328
12.13	深空和飞月弹道	330
IV 航空航天推力		
13	大气呼吸引擎	337
13.1	简介	337
13.2	螺旋桨	337
13.3	往复式引擎	342
13.4	喷射推进的推力方程	349
13.5	涡轮喷射引擎	351
13.6	扇涡轮引擎	355
13.7	涡轮螺旋桨引擎	356
13.8	冲压喷射引擎	358
14	火箭引擎与发射系统	362
14.1	火箭引擎的发展和特性	362
14.2	火箭推力和热力关系	363
14.3	火箭推进剂 - 某些考虑之处	367
14.3-1	液体推进剂	367
14.3-2	固体推进剂	369
14.3-3	混合推进剂	372
14.4	火箭方程	373
14.5	火箭的分级	374
14.6	发射器系统	378
14.6-1	发射器推进次要系统	379
14.6-2	发射器其他次要系统	380
15	高级太空推进装置	384
15.1	小推力高 I_{sp} 火箭	384
15.2	热动力火箭	385
15.2-1	冷气体火箭	385
15.2-2	太阳-热火箭	385
15.2-3	热电火箭	386
15.2-4	核子-热力火箭	388
15.3	电动力火箭	389
15.3-1	电子-离子推力器	389

15.3-2	磁原形质动力(MPD)推力器	390
15.3-3	原形质推力器	390
15.4	火箭推进器在太空船上的应用	392
V 航天学浅说		
16	太空任务要素和运作系统设施	397
16.1	简介	397
16.2	太空任务建构	397
16.3	任务运作系统设施	401
16.3-1	太空船制造系统	402
16.3-2	发射系统	403
16.3-3	通信系统-运作	404
16.4	通信原理	406
16.5	任务管理和运作	411
16.5-1	任务组	412
16.5-2	任务管理	417
16.5-3	太空船自主	419
17	太空船系统工程设计和其发射与返回	421
17.1	太空船的一般系统	421
17.2	系统工程程序与太空船设计	421
17.2-1	定义任务需求和限制	423
17.2-2	导出系统需求和限制	425
17.2-3	设计载荷和次要系统	426
17.2-4	设计程序	429
17.3	远程感应载荷	431
17.3-1	电磁谱	432
17.3-2	看透大气层	433
17.3-3	载荷感应器	435
17.3-4	载荷设计	439
17.4	太空船控制系统	440
17.4-1	控制系统概要	440
17.4-2	姿态控制	441
17.4-3	姿态动力学	443
17.4-4	太空船姿态感应器	447
17.4-5	太空船姿态致动器	449
17.4-6	控制器	453
17.5	轨道控制	454
17.6	太空船通信与资料处理和电力次要系统	457
17.6-1	通信和资料处理次要系统(CDHS)	458
17.6-2	CDHS的太空系统工程设计程系	461

17.6-3	电力次要系统(EPS)	462
17.6-4	EPS 的太空系统工程设计程序	470
17.7	环境控制和生命维持次要系统	471
17.7-1	热力控制系统总览	471
17.7-2	热力控制的基本原理	471
17.7-3	生命维持的基本原理	476
17.7-4	ECLSS 设计系统工程	478
17.8	结构和机件	479
17.8-1	系统总览	479
17.8-2	基本原理	480
17.8-3	系统工程	483
17.9	太空船的发射和返回地面	485
17.9-1	发射窗、发射时间和发射速度	486
17.9-2	太空船返回	490
18	太空任务中的弹道与轨道	496
18.1	轨道概念和运动分析程序	496
18.2	限制的两点问题	497
18.2-1	坐标系统	497
18.2-2	运动方程	498
18.2-3	简化的假定	498
18.2-4	轨道几何	499
18.2-5	轨道运动的常数	502
18.3	轨道要素和太空船地面痕迹	506
18.3-1	定义和计算古典轨道要素	506
18.3-2	太空船地面痕迹	511
18.4	操纵在太空	513
18.4-1	Hohmann 转换	514
18.4-2	轨道平面改变	517
18.4-3	轨道会合	520
18.5	星际旅行	525
18.5-1	星际旅行计划	525
18.5-2	补锥线近似	527
18.5-3	引力协助的弹道	541
18.6	预测轨道	542
18.6-1	Kepler 问题-预测轨道	542
18.6-2	轨道扰动	547
18.6-3	太阳同步轨道和 Molniya 轨道	549
18.6-4	现实世界内预测轨道	550
18.7	Gemini 太空船会合对接任务侧写	553

18.8	国际航天事业发展与展望	554
VI 其他		
19	飞行器结构和材料	561
19.1	简介	561
19.2	固体材料的一些物理学	561
19.2-1	应力	561
19.2-2	应变	562
19.2-3	其他情形	563
19.2-4	应力 - 应变图	564
19.3	飞机结构的一些要素	566
19.4	航空材料	568
19.5	金属材料疲劳	570
19.6	一些评论	571
20	高超音速飞行器	572
20.1	高超音速流的一些突出问题	572
20.2	高超音速流的物理方面	572
20.2-1	薄震波层	572
20.2-2	熵层	573
20.2-3	黏滞性交互作用	573
20.2-4	高温效应	575
20.2-5	低密度流	577
20.2-6	重述本节要点	578
20.3	高超音速流的牛顿定律	578
20.4	对高超音速飞行器的一些评论	582
20.5	本世纪的高超音速巡航机	587
21	后记	591
参考书目		592
附录 A: 标准大气 (公制)		594
附录 B: 翼剖面资料		607
附录 C: 单位转换因数表		635