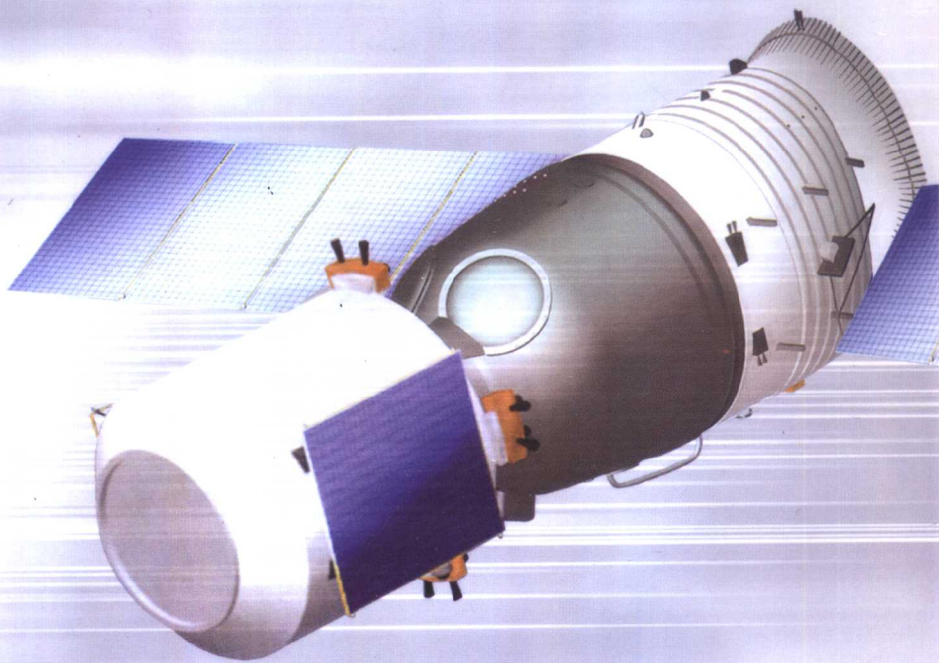


航空航天器运动的建模 ——飞行动力学的理论基础

• 肖业伦 著



北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

航空航天器运动的建模

——飞行动力学的理论基础

肖业伦 著

北京航空航天大学出版社

内容简介

本书阐述航空航天飞行器运动的数学模型的建立,这是各类具体飞行器(如飞机、卫星、运载火箭、导弹)的飞行动力学的理论基础。主要内容包括:坐标变换的一般方法,平面大地情况下飞行器的运动方程,球形或椭球形大地情况下的飞行器运动方程,航天器轨道运动和姿态运动的基本规律,飞行器运动方程的线性化,飞行器的相对运动的描述,四元数的理论和应用,飞行器运动仿真的方法。

本书是航空航天技术的基本理论的专著,可以作为大学本科和研究生的教材,也可供航空航天工程师们参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空航天器运动的建模:飞行动力学的理论基础/肖业伦著. —北京:北京航空航天大学出版社,2003.6

ISBN 7-81077-246-5

I. 航… II. 肖… III. 航空航天器—飞行力学
IV. V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 009673 号

航空航天器运动的建模 ——飞行动力学的理论基础

肖业伦 著

责任编辑 陶金福

责任校对 陈 坤

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail:bhpress@263.net

河北省涿州市新华印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:10.75 字数:241千字

2003年6月第1版 2003年6月第1次印刷 印数:1500册

ISBN 7-81077-246-5 定价:18.00元

前 言

飞行动力学是航空航天技术的基础理论学科之一。它既有严格的理论体系，又与飞行器的设计、试验和运行的实际问题有密切的关系。

本书讲述各类飞行器的飞行动力学的共同基础，即飞行器运动的数学模型的建立，也就是飞行器运动方程的建立，其中包括：飞行器质心运动的动力学方程和运动学方程，飞行器转动的动力学方程和运动学方程，许多几何关系式，各变量之间的联系。本书讲述的一般原理和方法对于学习和掌握任何类型飞行器的飞行动力学来说都是必要的。本书规定并严格应用一套合理的科学的符号规则，特别是关于矢量、分量列阵、坐标变换矩阵的符号规则。

本书的主要内容是：关于飞行动力学的介绍，坐标变换的一般方法，平面、球形或椭球形大地情况下飞行器的运动方程，航天器轨道运动和姿态运动的基本规律，飞行器运动方程的线性化，飞行器相对运动的描述，四元数的理论和应用，飞行器运动的仿真方法。

作者在撰写本书时，除参考国内外大量的航空航天科技文献外，还反映了本人多年来在教学和科研中的成果。

本书共十章。

第1章：绪论。

第2章：讲述在建立飞行器运动数学模型时需要的一些数学工具和力学原理，特别是坐标变换的一般方法。

第3章：在平坦大地的假设下建立飞行器运动方程。这样的方程适用于大多数飞机和战术导弹。

第4章：把大地看作理想的圆球体并考虑它的旋转，建立飞行器的运动方程。

第5章：进一步考虑地球的椭球形，建立飞行器的运动方程，更接近实际情况。这里还讲述了惯性导航的动力学原理。

第6章：讲述航天器飞行动力学的原理，包括轨道动力学和姿态动力学的基

本概念。

第7章:讲述飞行器运动方程的线性化。这样的线性化对于研究飞行器的模态特性和建立传递函数是必要的。

第8章:建立飞行器的相对轨迹运动和相对姿态运动的方程。

第9章:四元数的理论。虽然在第3、第4、第5章已经提到或利用了四元数,但只在第9章才完整地讲述四元数的理论。学习时要注意交错。

第10章:飞行器运动的数值仿真方法介绍,其中有,微分方程组的数值求解,飞行过程数值仿真的方法,可视化仿真所需要的物体投影原理。

撰写这样一本以飞行器运动的数学建模为主旨的书,还是初次尝试,作者希望在今后的教学实践中进一步充实、补充、完善。

肖业伦

北京,2002年12月

主要符号表

a	加速度
a	气流坐标系的标记
A	空气动力
	大地方位角
b	机翼展长
	本体坐标系的标记
c	平均气动弦长
C	气动侧力
C_D	气动阻力系数
C_C	气动侧力系数
C_L	气动升力系数
C_l	滚转力矩系数
C_m	俯仰力矩系数
C_n	偏航力矩系数
D	气动阻力
e	轨道偏心率
E	能量常数
	偏近点角
f	矢阵
	比力
	摄动加速度
f_r	径向摄动加速度
f_u	横向摄动加速度
f_h	副法向摄动加速度
F	气动力和推力的矢量和
g	地球引力加速度

h	高度
h_p	地球位势高度
H	轨道动量矩常数
\mathbf{H}	飞行器动量矩矢量
i	轨道倾角
\mathbf{i}	x 轴的单位矢量
\mathbf{I}	惯性张量
I_x, I_y, I_z	惯性矩
I_{xy}, I_{yz}, I_{zx}	惯性积
\mathbf{j}	y 轴的单位矢量
\mathbf{k}	z 轴的单位矢量
l	参考长度
L	气动升力
L_{roll}	滚转力矩(= M_x)
\mathbf{L}	坐标变换矩阵 例如 \mathbf{L}_{b_0} 是从 S_0 到 S_b 的坐标变换矩阵
m	质量
\mathbf{M}	力矩
M	俯仰力矩(= M_y)
\mathbf{M}_{gr}	引力梯度力矩
M_x	滚转力矩
M_y	俯仰力矩
M_z	偏航力矩
n	轨道平均角速度
N	偏航力矩(= M_z)
O	坐标原点
p	大气压力 轨道半通径 滚转角速度
\mathbf{P}	发动机推力 轨道周期
q	俯仰角速度
q_0, q_1, q_2, q_3	四元数的元素
Q	四元数

r	地心距离矢量
r	偏航角速度
R	地球(平均)半径
R_E	地球赤道半径
S	参考面积
S	坐标系
S_a	气流坐标系
S_b	本体坐标系
S_e	地球固连坐标系
S_g	地面坐标系
S_i	惯性坐标系
S_j	发射惯性坐标系
S_k	航迹坐标系
S_u	当地拟铅垂坐标系
S_v	当地铅垂坐标系
t	时间
T	张量
u	纬度幅角
U	地球引力势
V	速度
V_a	对空速度
V_k	对地速度
V_w	风速度
W	角度变化率
x	x 轴
y	y 轴
z	z 轴
α	迎角 赤经
α_G	Greenwich 赤经
β	侧滑角
γ	航迹倾斜角
δ	赤纬

	舵面偏转角
θ	俯仰角
	真近点角
λ	经度
Δ	经度
μ	地球引力常数
ρ	大气密度
σ	弹道系数
	发动机安装角
τ	时间差
ϕ	滚转角
	地心纬度
ϕ_c	地心纬度
ϕ_v	绕速度的滚转角
Φ	大地纬度
χ	航迹方位角
ψ	偏航角
ω	飞行器角速度
	近地点幅角
ω_E	地球旋转角速度
Ω	升交点赤经

特别符号

矢量 \mathbf{u} 在坐标系 S_a 中的分量列阵为

$$(\mathbf{u})_a = (u_{xa} \quad u_{ya} \quad u_{za})^T$$

矢量 \mathbf{u} 在坐标系 S_a 中的叉乘矩阵为

$$(\mathbf{u})_a^\times = \begin{pmatrix} 0 & -u_{za} & u_{ya} \\ u_{za} & 0 & -u_{xa} \\ -u_{ya} & u_{xa} & 0 \end{pmatrix}$$

目 录

第 1 章 飞行动力学引论

1.1 飞行动力学是航空航天技术的基础理论学科之一	1
1.2 飞行动力学的几个特点	1
1.3 面向对象的飞行动力学	2
1.3.1 飞机飞行动力学的主要内容 ^[1~7]	2
1.3.2 机动导弹飞行动力学的主要内容	3
1.3.3 轨道动力学的主要内容	3
1.3.4 航天器姿态动力学的主要内容	3
1.4 飞行动力学的方法	4

第 2 章 坐标变换的原理和方法

2.1 矢量运算与矩阵运算的关系	6
2.1.1 矢量与分量列阵	6
2.1.2 矢量运算的矩阵表示法	7
2.2 坐标变换	8
2.2.1 坐标变换矩阵	8
2.2.2 基元旋转矩阵	9
2.2.3 坐标变换的一般情况	10
2.2.4 坐标变换矩阵的传递性质	11
2.2.5 由两矢量的分量列阵求坐标变换矩阵	12
2.3 张量矩阵的坐标变换	13
2.3.1 张量及张量分量矩阵	13
2.3.2 张量分量矩阵的坐标变换	13
2.3.3 矢量的叉乘矩阵的变换	14
2.4 坐标系旋转的效应	15
2.4.1 在旋转坐标系中矢量的导数	15
2.4.2 变换矩阵的变化率	16

第3章 平面大地情况下飞行器的运动方程

3.1 预备知识	18
3.1.1 基本假设	18
3.1.2 速度三角形	18
3.2 坐标系和运动变量的定义	19
3.2.1 关于坐标系的一般说明	19
3.2.2 地面坐标系	19
3.2.3 本体坐标系	19
3.2.4 气流坐标系	20
3.2.5 航迹坐标系	21
3.2.6 坐标系的综合关系及补充说明	22
3.3 飞行器的质心运动方程	23
3.3.1 飞行器质心运动方程的一般形式	23
3.3.2 在地面坐标系中的运动方程	25
3.3.3 在本体坐标系中的运动方程	25
3.3.4 在航迹坐标系中的运动方程	26
3.4 飞行器的旋转运动方程	27
3.4.1 飞行器旋转运动的动力学方程	27
3.4.2 飞行器旋转运动的运动学方程	28
3.4.3 姿态表示和运动学方程的多种方式的讨论	29
3.5 其他补充方程	30
3.5.1 质量和惯量特性	30
3.5.2 发动机推力特性	31
3.5.3 空气动力特性	31
3.6 大气的模型	33
3.6.1 USSA76 模型	33
3.6.2 CIRA 模型	37

第4章 圆球形大地情况下飞行器的运动方程

4.1 坐标系和运动变量的定义	38
4.1.1 地心赤道惯性坐标系	38
4.1.2 地心赤道旋转坐标系	39
4.1.3 当地铅垂坐标系	40

4.1.4	本体坐标系	40
4.1.5	气流坐标系	41
4.1.6	航迹坐标系	41
4.1.7	各坐标系的综合关系	42
4.2	飞行器质心运动方程	42
4.2.1	质心运动的动力学方程的矢量形式	42
4.2.2	在当地铅垂坐标系中的质心运动方程	44
4.2.3	在航迹坐标系中的质心运动方程	46
4.2.4	几个特殊情况	48
4.3	飞行器的旋转运动方程	50
4.3.1	运动学方法	50
4.3.2	几何学方法	50

第5章 椭球形地球情况下的飞行器运动方程

5.1	地球的参考椭球模型	52
5.1.1	参考椭球的几何性质	52
5.1.2	椭球形地球的引力	53
5.1.3	补充坐标系	55
5.1.4	关于参考坐标系的选择与讨论	55
5.2	以地面坐标系为参考基准的飞行器质心运动方程	56
5.2.1	地面坐标系	56
5.2.2	质心运动的动力学方程	57
5.2.3	质心运动学方程及其他关系	58
5.3	飞行器的转动方程	59
5.3.1	以 Euler 角表示姿态时的转动方程	59
5.3.2	四元数的应用	61
5.4	运载火箭的运动方程的特殊点	63
5.4.1	坐标系定义的两个特点	63
5.4.2	火箭的质心运动方程	64
5.4.3	火箭的转动运动方程	66
5.5	惯性导航方程	69
5.5.1	一般原理	69
5.5.2	捷联惯导系统的原理	70
5.5.3	平台惯导系统	71

第 6 章 空间飞行器的运动特性

6.1 在轨道平面内考察 Kepler 轨道	75
6.1.1 Kepler 运动的微分方程	75
6.1.2 Kepler 轨道的三个常数	75
6.1.3 轨道方程	77
6.1.4 速度及其分量	79
6.1.5 沿 Kepler 轨道运动的时间历程	80
6.1.6 轨道周期	81
6.2 在惯性空间观察的 Kepler 轨道	82
6.2.1 轨道要素	82
6.2.2 轨道运动状态量的变换	83
6.3 轨道摄动的概念和方程	86
6.3.1 轨道摄动的概念	86
6.3.2 轨道摄动方程	87
6.4 轨道摄动的主要效果	91
6.4.1 地球扁率的摄动效果	91
6.4.2 地球大气的摄动效果	94
6.4.3 一般情况下的轨道计算	97
6.5 航天器的姿态运动方程	98
6.5.1 航天器姿态的定义	98
6.5.2 引力梯度力矩	99
6.5.3 航天器姿态运动的方程	101

第 7 章 飞行器运动方程的线性化

7.1 飞行器运动方程线性化的一般介绍	103
7.2 线性化的纵向运动方程	105
7.3 线性化的横侧向运动方程	108
7.4 线性化的运动方程的应用	110

第 8 章 飞行器的相对运动

8.1 一般原理	113
8.1.1 飞行器的相对轨迹问题	113
8.1.2 飞行器的相对姿态运动	114

8.2 航天器的近距离相对运动	118
8.2.1 相对运动的矢量方程	118
8.2.2 在轨道坐标系中的相对运动方程	119
8.2.3 相对运动方程的解	120
8.2.4 航天器伴随运动性质	121
8.2.5 推 广	123
8.3 相对运动高等理论	124
8.3.1 矢量的一阶相对导数	124
8.3.2 矢阵的导数	125
8.3.3 矢量的二阶相对导数	126
第 9 章 四元数的理论及应用	
9.1 四元数的定义和性质	128
9.2 用四元数表示坐标系的旋转	130
9.3 以四元数表示刚体的有限转动	131
9.4 由四元数构成坐标变换矩阵	131
9.5 三个或更多坐标系的关系	134
9.6 四元数与 Euler 角的关系	135
9.7 以四元数表示的运动学方程	136
第 10 章 飞行器运动的数值仿真	
10.1 微分方程组的数值解法	139
10.2 飞行器运动仿真的程序实例	141
10.3 飞行仿真中的可视化问题	150
10.3.1 飞行仿真的可视化	150
10.3.2 一般方程	151
10.3.3 对象点在大地坐标系中的位置的表达方式	153
10.3.4 观察坐标系的位置和姿态的表达方式	154
10.3.5 情况的组合	155
10.3.6 平行投影	155
10.3.7 航天器运动仿真的可视化的特殊问题	156
参考文献	

第 1 章 飞行动力学引论

1.1 飞行动力学是航空航天技术的基础理论学科之一

航空航天科学和技术是建立在许多基本理论学科基础之上的,除了普遍的学科,如数学、物理学、化学以外,还依赖于许多技术学科,如机械学、电工学、电子学、材料学、工艺学等。此外,航空航天科学技术还包含若干重要的基础学科,如空气动力学、飞行器结构力学、推进技术、制导导航与控制、飞行动力学等。

飞行动力学是研究飞行器运动规律的科学。

虽然为了研究和发展,划分了以上学科,但它们并不是孤立存在的,各学科之间存在密切的联系。特别是,飞行动力学与其他学科有密切的关系。

空气动力是决定飞行器(特别是航空飞行器)运动的最重要的力,因此飞行器的运动规律离不开空气动力学的规律,即作用在飞行器上的空气动力与飞行速度、大气状况、飞行器本体对气流的姿态及其变化等的规律。这就决定了飞行动力学与空气动力学的紧密联系。

航空航天飞行器依靠各种发动机(推进装置)的原动力,因此推进装置的性能,即发动机推进力与飞行条件的关系必然影响飞行器的运动规律。

对于大型飞行器来说,结构的变形是不可忽视的因素。结构的变形或振动、空气动力、飞行器运动三者的互相耦合的现象使得飞行器运动规律变得更为复杂。

现代飞行器大多具有自动控制系统,因此飞行器的运动规律决定于由飞行器本体和控制系统组成的闭环回路的动态特性。许多情况下,在飞行器飞行动力学的研究中就必须包含控制系统(更一般来说,制导—导航—控制系统)。

1.2 飞行动力学的几个特点

飞行动力学有几个显著的特点。

第一,飞行动力学是一门有严格理论体系的学科。如前所述,飞行动力学的任务是研究飞行器运动的规律,而飞行器的运动受到许多因素的制约,其规律是很复杂的。在动态情况下,飞行器的运动是以线性或非线性的常微分方程式来描述的;而静态情况下,飞行器的平衡状态

则以线性或非线性的代数方程来描述。有些情况下,它们可以得到解析解,而许多情况下只能得到数值解。

第二,飞行动力学是一门很实用的学科。在各类飞行器的设计、试验和运行中有许多飞行动力学的问题需要解决。

第三,飞行动力学的规律是由特殊的飞行环境决定的。对于航空飞行器来说,最重要的环境就是大气。飞行器在大气中运动时它相对于大气的速度引起的空气动力是决定飞行器运动规律的最重要因素。至于地球引力场则很简单,可以看成平行力场,有时甚至可以看成是大小不变的。对于航天器来说,地球引力场则是起决定作用的。在初步研究中是把地球引力场当做由圆球形地球产生的中心引力场,这样航天器的运动轨迹就是 Kepler 轨道;而实际的地球引力场是非中心的,这就造成运动轨迹偏离 Kepler 轨道,即产生轨道摄动。此外,大气阻力、日月引力、太阳光压等微弱作用也引起轨道的摄动。

第四,飞行动力学与其他几门学科,即空气动力学、结构力学、推进技术、制导导航与控制有密切的联系。

第五,研究方法的多样性(将在 1.4 节详细介绍)。

1.3 面向对象的飞行动力学

作为可控制的六自由度刚体,飞行器的运动有它的共同性质,这就是飞行动力学的普遍原理。但不同类型的飞行器,又有各自不同的性质。所以为了解决具体飞行器设计和使用中的问题,还必须掌握针对具体(面向)对象的飞行动力学。下面简要介绍面向对象的飞行动力学。

1.3.1 飞机飞行动力学的主要内容^[1~7]

(1) 飞行性能。这里把飞机作为质点,研究飞机的空气动力特性(主要是升力—阻力特性)、发动机性能和飞机质量如何影响飞行性能。飞机的飞行性能包括平飞最大速度、平飞最小速度、最大爬升率、升限(最大飞行高度)、航时(续航时间)、航程、最小转弯半径、机动能力、起飞—着陆距离等。

(2) 飞机的静态稳定性和静态操纵性。这里主要研究飞机飞行的平衡状态和平衡条件,而不考虑由一个状态到另一个状态的动态过渡过程。研究升降舵偏转角、驾驶杆位移和驾驶杆力随速度和过载的变化,变化的梯度就是稳定性标志,并由此导出飞机的若干特征点和稳定裕度:固舵(升降舵固定)中性点和固舵稳定裕度,握杆(升降舵驾驶杆固定)中性点和握杆稳定裕度,松杆(升降舵驾驶杆松浮)中性点和松杆稳定裕度,固舵机动点和固舵机动裕度,握杆机动点和握杆机动裕度,松杆机动点和松杆机动裕度。所谓“静态稳定性”的说法是不严格的,事实上只有唯一的稳定性。

(3) 动态稳定性和动态操纵性。动态稳定性的内容包括动态过程品质和模态特性。通常

情况下,飞机的纵向运动有长周期模态和短周期模态,横侧向运动有滚转模态、螺旋模态和荷兰滚模态。动态操纵性的内容主要是飞机对舵面偏转的响应特性;或者更一般地,是飞机运动变量对操纵输入的传递函数。

(4) 飞机的飞行品质。这是由飞机的飞行性能、稳定性和操纵性综合决定的品质,反映驾驶员操纵飞机的难易程度。

(5) 飞机加自动驾驶仪的闭环系统的动态特性分析、自动驾驶仪的结构回路的选择及参数的确定。

(6) 飞机对大气扰动的响应特性。通常考虑三类大气扰动,即离散突风、风切变、大气紊流。

直升机的飞行动力学在许多方面与飞机类似,但更加复杂,因为直升机有更多的自由度。

1.3.2 机动导弹飞行动力学的主要内容

(1) 在制导率作用下导弹的弹道(称为运动学弹道)。它与制导率的形式和参数有关,也与目标的运动有关。在实际弹道的计算中得到各个运动变量的变化过程,其中重要的是沿该弹道运动的需用过载和可用过载。

(2) 导弹作为刚体的动态特性分析。这包括运动模态特性、弹体对舵面偏转的响应特性和传递函数。

(3) 以导弹弹体作为对象的控制回路的动态特性分析。

(4) 攻击区、脱靶量、命中概率以及全系统的效能分析等实用问题。

航天器飞行动力学由轨道动力学和姿态动力学^[8~12]组成。

1.3.3 轨道动力学的主要内容

(1) 在地球中心引力场中航天器沿 Kepler 轨道运动的基本规律和轨道要素的定义。

(2) 轨道摄动的理论和一般方程,具体因素(如地球非中心引力场、地球大气)引起的轨道摄动的规律。

(3) 轨道机动,即由一条轨道向另一条轨道的转移过程及所需要的速度增量,轨道要素的微小变化与速度微小增量的分量的关系。

(4) 航天器与地球和太阳的关系,具体问题是航天器的星下点和星下点轨迹(地面轨迹),航天器的太阳照射条件等。

(5) 新近的课题有卫星星座的轨道保持和控制、编队飞行卫星群的相对轨道动力学特性等。

1.3.4 航天器姿态动力学的主要内容

(1) 航天器姿态运动的动力学特性,包括姿态动力学方程和运动学方程。

(2) 航天器姿态稳定化和控制。