飞行器飞行与控制

曹金涛 许瑞杰 编著

国防工业出版社

飞行器飞行与控制

曹金涛　许瑞杰　编著

国防工业出版社

内容简介

本书是把控制和飞行器（控制对象）的运动作为一个整体系统进行研究。它将飞行力学和飞行控制综合在一起进行讨论。

全书共有九章。第一、二、三、四章，主要叙述飞行器在宇宙空间的运动和现代控制系统用到的一些基本理论和基本方法；第五、六章是以建立飞行器的空间非定常运动的数学模型和对控制系统的分析为主要内容；在七、八、九章中紧密联系实际把整个控制过程分为三种典型类型举例分别进行阐述。

本书适用于航空控制专业研究生的教材，也可作为航空专业本科生高年级的自学用书以及从事飞行器总体设计者的参考资料。

飞行器飞行与控制

曹金涛　许瑞杰　编著

责任编辑　王丽燕

*

国防工业出版社出版、发行

（北京市车公庄西路老虎庙七号）

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32　印张17 3/8　457千

1988年12月　第一版　1988年12月第一次印刷　印数：　001—　650册

ISBN 7-118-00405-5/V34　　定价：8.85元

前　言

本书是把控制和飞行器（控制对象）的运动作为一个整体系统进行研究。它将飞行力学和飞行控制综合在一起进行讨论。由于飞行器的飞行与控制是分不开的，过去对飞行器的设计往往先以气动布局与结构总体设计为主，然后再考虑飞行控制装置问题。随着自动控制技术的发展和广泛的应用，飞行控制系统装置现已在飞行器总体设计中占有主要的地位。为了适应宇航技术发展的需要，我们编写了本书。在飞行器总体设计过程中，对把控制系统装置和气动布局予以同时考虑的问题进行了研究和阐述。

本书五、六章是以建立飞行器的空间非定常运动的数学模型和对控制系统的分析为主要内容；在七、八、九章中，紧密联系实际把整个控制过程分为三种典型类型（即飞行器在没有外界输入控制情况下的系统性能、飞行器在开环控制情况下的反应和飞行器在闭环控制下的实际飞行性能）举例分别进行阐述；为了使读者学习方便起见，在一、二、三、四章中，对描述飞行器在宇宙空间的运动和现代控制理论用到的线性空间及其运算的知识，对为确定飞行器在空间的位置与姿态而用到的坐标系及其相互转换的知识，对现代控制系统分析用到的积分变换（傅氏变换、拉普拉斯变换、Z变换）以及为研究随机变量对整个系统性能影响而用到的随机过程分析等基本理论知识都分别扼要地作了综合叙述。

本书适用于飞行器控制专业研究生的教材，也可作为航空专业本科毕业生的自学用书以及从事飞行器总体设计者的参考资料。本书虽经作者在本学院硕士研究生的教学讲授试用中作过一些修改，但由于作者水平所限，难免存有不妥之处，恳请读者批评指正。

编　者

目　录

第一章　线性空间、线性变换及变换矩阵 …… 1
第一节　几何空间 …… 2
一、三维几何空间 …… 2
二、n维几何空间 …… 3
第二节　向量空间 …… 3
第三节　欧氏空间 …… 5
第四节　酉空间（U空间）——复内积空间 …… 9
第五节　标准正交基 …… 11
第六节　线性变换与变换矩阵 …… 18
一、基底线性变换及变换矩阵A …… 21
二、同一基底下向量坐标的变换与变换矩阵 …… 25
第七节　正交变换与正交矩阵 …… 29
第八节　酉变换(U变换) …… 39
第二章　坐标系、坐标转换与应用 …… 44
第一节　参考系 …… 44
第二节　坐标系 …… 45
一、直角坐标系 …… 45
二、平面极坐标系 …… 46
三、圆柱坐标系 …… 46
四、球面坐标系 …… 47
五、标准正交基 …… 47
六、广义坐标系 …… 48
第三节　飞行动力学中常使用的几种坐标系 …… 50
一、惯性坐标系——$F_i(o-x_iy_iz_i)$ …… 50
二、地球中心坐标系——$F_{ec}(o-x_{ec}y_{ec}z_{ec})$ …… 51
三、地理坐标系——$F_e(o-x_ey_ez_e)$ …… 52

四、体轴坐标系——$F_b(o-x_by_bz_b)$ ……52
五、随体坐标系——$F_v(o-x_vy_vz_v)$ ……52
六、弹道坐标系——$F(o-xyz)$ ……53
七、风轴坐标系——$F_w(o-x_wy_wz_w)$ ……54
八、固定于大气的坐标系——$F_A(o-x_Ay_Az_A)$ ……54
九、稳定性坐标系——$F_s(o-x_sy_sz_s)$ ……55
十、以目标为原点的极坐标系 ……55
十一、陀螺坐标系 ……55
第四节 欧拉角 ……59
第五节 向量分量的转换 ……61
第六节 用转动角表示的转换矩阵 A_{ba} ……63
一、欧拉角旋转 ……63
二、克雷洛夫角旋转 ……65
第七节 向量导数的转换 ……68
第八节 矩阵的转换 ……72
第九节 坐标系之间的转换关系式 ……72
一、由随体坐标系 F_v 转换到体轴坐标系 F_b 的向量转换 ……72
二、由风轴坐标系F_w转换到体轴坐标系F_b的向量转换 ……73
第十节 坐标系之间的相对运动 ……74
一、随体地理坐标系 F_{ve} 相对于重力惯性坐标系F_i的运动 ……74
二、陀螺坐标系 $o-xyz$相对于重力惯性坐标系F_i
运动的绝对角速度 ……77
三、平台坐标系 $o-x_py_pz_p$和随体坐标系 $o-x_vy_vz_v$之间的运动 ……79
第三章 积分变换 ……81
第一节 积分变换的概念 ……81
第二节 傅氏变换（Fourier变换） ……82
一、傅氏级数收敛的充要条件和复数形式表达式 ……82
二、傅氏积分表达式 ……85
三、傅氏变换表达式 ……86
第三节 拉氏变换（Laplace变换） ……88
一、函数 $f(t)$ 的拉氏变换定义 ……88
二、函数 $f(t)$ 的拉氏变换存在的充要条件 ……89

三、常用函数的拉氏变换 ……89
四、拉氏变换的基本性质 ……94
第四节 拉氏反变换 ……101
一、拉氏反变换公式及应用留数定理求拉氏反变换 ……101
二、应用部分分式展开法求拉氏反变换 ……103
第五节 用拉氏变换解微分方程 ……108
第六节 Z变换 ……111
一、Z变换的定义 ……111
二、Z变换的基本性质 ……116
第七节 Z反变换 ……122
一、直接相除法 ……123
二、部分分式展开法 ……124
三、反演积分法 ……124
第八节 用Z变换解差分方程 ……126
第四章 随机过程 ……128
第一节 随机变量 ……128
一、概率空间 ……129
二、随机变量 ……130
三、随机变量X的主要数值特征 ……131
四、两个随机变量X和Y的主要数值特征 ……133
五、契比雪夫定理(即大数定律) ……136
六、中心极限定理 ……138
七、随机向量及随机向量的主要数值特征 ……139
第二节 随机函数 ……142
一、随机函数 ……142
二、随机函数的概率分布和密度函数 ……142
三、随机函数的主要数值特征 ……145
四、随机函数的导数和微分的定义 ……146
第三节 平稳随机函数 ……148
一、平稳随机过程（函数） ……148
二、平稳随机过程的各态历经性 ……151
第四节 相关函数的性质 ……158

第五节　平稳随机过程（函数）的频谱分析 ……162
第五章　飞行器非定常运动的方程 ……169
第一节　空间质点P在任意运动坐标系中的速度和加速度 ……169
第二节　几种动坐标系的角速度 ……172
一、由于地球自转引起运动坐标系产生的角速度 ……172
二、由于运载体的移动所引起的随体坐标系 F_v 相对于地球的转动角速度（$\omega_v-\omega_v^E$） ……173
三、随体地理坐标系F_v相对惯性坐标系F_I的转动角速度(ω_v) ……175
四、ω_v在体轴坐标系F_b和风轴坐标系F_w中的分量 ……175
五、体轴坐标系F_b相对随体坐标系F_v的转动角速度（$\omega_b-\omega_v$)(相对角速度） ……176
六、方向余弦的变化率 ……179
七、气动角的变化率 ……181
第三节　导弹质心的位置、速度和加速度 ……183
一、导弹质心相对于地球的位置和速度 ……183
二、常用到的惯性加速度 ……186
第四节　在动坐标系中刚体质心运动的动力学方程 ……195
一、微元质量dm在惯性坐标系F_I中的动力学方程 ……195
二、质量为m的质点系在动坐标系F中的动力学方程（只适用于质心运动和绕质心的转动） ……196
三、动量矩h在体轴坐标系F_b中的分量 ……198
第五节　在风轴坐标系F_w中导弹质心运动的动力学方程 ……201
一、作用在导弹上的力 ……201
二、作用在导弹上的力矩G ……203
三、在风轴坐标系F_w中导弹质心运动的动力学方程 ……203
第六节　在体轴坐标系F_b中导弹质心运动和绕质心转动的动力学方程 ……206
第七节　对方程组的讨论 ……209
一、方程组复杂性的分析与处理 ……209
二、在使用动力学方程时，关于坐标系的选择问题 ……211

三、刚体导弹运动方程的结构(暂不考虑控制方程和变量方程) ……212
第八节　平面地球的近似 ……218
一、对风轴和体轴组合轴系的导弹运动方程组 ……218
二、对体轴系的导弹运动方程组 ……220
第九节　定常状态 ……222
第十节　小扰动理论 ……226
一、坐标系的选择及小扰动符号 ……227
二、假设条件 ……228
三、线化方程 ……230
四、线化的空气反作用力 ……232
五、两组互不耦合的方程组 ……235
第十一节　精确的线化气动力和拉普拉斯变换方程 ……240
一、指示函数表示法 ……240
二、传递函数表示法 ……241
三、拉普拉斯变换方程 ……242
附录5-1　阶跃函数的反应与迭加定理 ……246
附录5-2　速度与角速度符号的定义 ……248
第六章　系统分析基础 ……251
第一节　系统的基本概念 ……252
一、系统 ……252
二、系统的输出量和输入量 ……252
三、系统状态的坐标 ……252
四、系统的参数 ……254
五、线性系统和非线性系统 ……254
六、系统的平衡、控制和稳定性 ……255
七、控制系统的质量指标 ……256
第二节　传递函数 ……258
一、传递函数 ……258
二、系统静增益K的概念(放大倍数) ……259
三、几种基本环节的传递函数 ……261
四、串联和反馈系统的传递函数 ……264

五、有干扰作用时闭环系统的传递函数 ……265
六、误差传递函数 ……266
七、一般线性定常系统的传递函数 ……266
第三节 自治线性定常系统 ……270
一、线性齐次方程组的解法 ……271
二、耦合齐次方程组的解法 ……278
三、自治线性定常系统的特性 ……280
四、应用特征坐标系将耦合方程转换为非耦合方程 ……285
五、稳定性判据 ……289
第四节 线性定常系统的反应 ……292
一、线性定常系统的基本结构 ……293
二、脉冲反应 ……295
三、阶跃反应 ……298
四、频率反应 ……300
五、脉冲反应和频率反应之间的关系 ……311
六、迭加定理（卷积积分，杜哈麦尔(Duhamel)积分） ……312
七、包含初始条件的解 ……314
八、对一组平稳随机输入的反应 ……316
九、有关均方反应的一条有用的定理 ……317
第五节 时变和非线性系统 ……319
一、连续系统的状态空间表达式的求法 ……319
二、非线性系统的两种特殊分析方法 ……329
第六节 系统运动模型的辨识 ……336
一、解析法 ……337
二、实验测试法 ……337
附录6-1 相关函数与频谱函数 ……340
附录6-2 函数 $x(t)$ 的傅立叶变换对照表 ……345
第七章 定常飞行的稳定性 ……346
第一节 无因次形式的扰动运动方程 ……347
一、将有因次量化为无因次量的方法 ……347
二、无因次小扰动运动方程 ……350
三、无因次方程组的拉普拉斯变换式 ……362

第二节　纵向模态（纵向系统状态变量的轨迹）……366
一、纵向运动方程……366
二、数例……369
第三节　纵向模态的近似方程……375
一、关于沉浮模态的近似解法……376
二、关于短周期模态的近似解法……378
第四节　纵向静稳定性的一般理论……381
第五节　飞行状态对纵向模态的影响……385
一、速度的影响……385
二、高度的影响……388
三、飞行轨迹角的影响……390
四、垂直密度梯度的影响……392
五、静裕度（$K_n=h_n-h$）的影响……394
六、速度导数C_{mv}的影响……398
第六节　一架亚音速喷气式飞机的横侧特性……399
一、横侧模态特性的分析（即横侧运动轨迹的分析）……399
二、速度对横侧模态特性的影响……404
三、高度对横侧模态特性的影响……406
四、飞行轨迹角对横侧模态特性的影响……408
第七节　横侧模态的近似方程……408
一、螺旋模态……408
二、滚转模态……410
三、荷兰滚模态……412
第八节　风的垂直梯度的影响……413
一、所产生的z导数……416
二、基本导数的变化……417
第九节　高超音速飞行时稳定性特征……420
一、运动方程……420
二、导数M_θ(俯仰力矩随θ变化的导数)……424
三、数例……428
附录7-1　气动力传递函数……435
附录7-2　由一体轴系到另一体轴系的气动导数的变换……437

第八章　对操纵动作的反应（开环控制）……145
第一节　操纵控制的概念……145
第二节　对升降舵输入的反应……447
一、无因次纵向方程组的拉普拉斯变换式的简化……447
二、短周期近似传递函数……450
三、沉浮近似传递函数……451
四、频率反应的数例……454
五、阶跃反应的数例……459
第三节　对油门的反应……464
一、计算公式……464
二、近似传递函数……464
三、阶跃反应的数例……466
第四节　横侧定常状态……468
一、定常侧滑飞行（飞行轨迹为直线）……468
二、定常盘旋（角速度向量在铅垂方向）……470
三、数例……473
第五节　横侧频率反应（副翼与方向舵）……475
一、横侧频率反应的计算……475
二、数例……476
三、近似横侧传递函数……481
第六节　对副翼和方向舵的瞬态反应……485
第七节　急剧机动时的惯性交感……489
第九章　闭环控制……498
第一节　闭环控制……498
一、飞行器闭环控制的概念与作用……498
二、闭环控制对气动导数的影响……499
三、感受器……500
第二节　沉浮抑制举例……501
第三节　操纵系统运动方程……507
一、动能T的计算……509
二、广义力$\mathcal{F}$的计算……509
三、运动方程……511

四、对惯性交感的控制 ……512
五、随动系统方程 ……512
第四节 飞行器增稳系统举例 ……515
一、螺旋模态不稳的纠正 ……515
二、定态方向舵偏角的消除 ……518
第五节 高度和下滑轨迹控制举例 ……522
一、精确的等高度飞行——速度稳定性 ……522
二、下滑轨迹的自动控制 ……525
第六节 闭环系统的稳定性 ……530
一、特征方程 ……531
二、增益的影响 ……532
三、相角滞后的影响 ……532
四、正弦输入——尼奎斯特判据 ……532
第七节 驾驶员的数学模型 ……534
一、补偿显示时驾驶员的数学模型 ……534
二、几点说明 ……539
三、追踪显示时驾驶员的数学模型 ……540
参考文献 ……544

第一章　线性空间、线性变换及变换矩阵

时间、空间、物质及其运动是密不可分的，物质的运动与时间、空间紧密联系着，因此在研究飞行器的运动时先回顾一下时空观的概念是很有必要的。

人们对时间与空间的认识是随着科学的发展而逐步深入的，例如在牛顿力学基础上提出了经典力学的时空观，称为绝对时空观。绝对时空观认为时间和空间与观测者的相对运动无关，时间与空间是彼此独立而互不相关的，并不受物质或运动的影响。所以，时间、长度、质量等都与参考系的相对运动无关。牛顿说："绝对的真实的数学时间，就其本质而言，是永远均匀地流逝着，与任何外界事物无关"，"绝对空间，就其本质而言，是与任何外界事物无关的，它从不运动，并且永不变"，这就是经典力学的时空观。用形象的比拟来说，就是把时间比作独立的不断流逝着的流水，把空间比作盛有宇宙万物的一个无形的永不运动的框架。

随着科学的发展，在爱因斯坦相对论的基础上提出了现代力学的时空观，认为时间、空间、质量并不是绝对不变的，它们随着物质的匀速运动而变化。时间、空间、质量失去绝对性，成为相对的；同时，时间与空间也不再是独立的，它们是可以相互转化的，空间的变短变成了时间的变长（现已广泛用于原子能高能加速器和基本粒子物理研究领域）。在广义相对论的基础上又进一步揭示了时间与空间是随着物质分布和运动速度的变化而变化的，这就是现代力学的时空观。

本章主要内容是对一般常用的线性空间、标准正交基及空间中的线性变换与变换矩阵作一概要的叙述。

第一节　几何空间

一、三维几何空间

几何空间是建立在数轴基础上的。在几何空间中，为了确定空间一点的位置，17 世纪法国数学家笛卡儿引进了空间直角坐标系，从空间某一点引出三条相互垂直的直线 ox、oy、oz 叫做坐标轴，三条直线的交点 o 叫做坐标原点，这样可以用三个有序的数（x，y，z）即点的坐标来表示空间任意点的位置。因此，三维几何空间可视为由三个有序的数（x，y，z）所组成的空间。

两点间的距离：

$P_1(x_1, y_1, z_1)$、$P_2(x_2, y_2, z_2)$ 两点之间的距离可表示为：

$$P_1P_2=\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}$$

直线 P_1P_2 的方向余弦：

定义　P_1 与 P_2 两点的坐标差与该两点之间的长度之比为直线的方向余弦。

直线 P_1P_2 对 ox、oy、oz 坐标轴的方向余弦可分别用公式表示为：

$$\cos\alpha=\frac{x_2-x_1}{\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}}$$

$$\cos\beta=\frac{y_2-y_1}{\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}}$$

$$\cos\gamma=\frac{z_2-z_1}{\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}}$$

其中 α、β、γ 分别为直线 P_1P_2 与 ox、oy、oz 坐标轴的夹角。

空间两条相交直线的夹角 θ 的余弦可用公式表示为：

$$\cos\theta=\cos\alpha_1\cos\alpha_2+\cos\beta_1\cos\beta_2+\cos\gamma_1\cos\gamma_2$$

其中下标 1、2 分别表示直线 1 与直线 2 的方向余弦。

二、n维几何空间

由 n 个有序数 $(x_1, x_2, \cdots\cdots, x_n)$ 的全体所组成的空间称为 n 维几何空间。

点 $(x_1, x_2, \cdots\cdots, x_n)$ 与点 $(y_1, y_2, \cdots\cdots, y_n)$ 之间的距离可用公式表示为：

$$\left[\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2\right]^{1/2}$$

数 n 称为空间的维数。

n 维空间的概念

在数学形式上与描述三维空间类似，随着科学技术的发展引出了 n 维空间。例如，17世纪拉格朗日（Lagrange）将四维空间的概念引进力学中，把前三个坐标作为质点的位置，时间作为第四个坐标，这样四维空间中的点，不只是标志了一个运动点的位置，同时还标志了该点占据该位置的时刻，于是四维空间作为数学工具在物理学中得到了应用。又如，描述导弹在空中飞行的状态，需要导弹的质量M，导弹在空中的位置 x、y、z 及它的三个速度分量v_x、v_y、v_z等七个量，我们可以将它理解为七维空间的一个点或向量 $(M, x, y, z, v_x, v_y, v_z)$。此外，为了考察一个力学系统，譬如 n 个质点的系统或者刚体等，我们需要用多个变量来描述它的状态，因此就要建立 n 维空间乃至无穷空间，描述不同的自然现象需用不同的空间概念。总之，n 维空间这个概念是描述某种自然现象的一种数学工具，反映了现实世界中某种量的关系，是有实际意义的，但形式是抽象的。

第二节　向量空间

向量“加法”和向量“与数相乘”运算性质的集合[1]叫做向

[1] 集合：数学上常把研究的对象，例如数、变量等称为“元素”（简称“元”），由“元”汇集的全体称为“集合”，通常用A、B、C、……等表示，集合的“元”常用a、b、c、……表示。

如果元素a是集合A的元素，即a属于A，我们常用符号$a\in A$表示（符号$\in$表示“属于”的意思）。

量空间（或线性空间）。

在解析几何中，我们已经建立了几何空间的概念，并且知道几何空间中的向量经过“加法”运算和“与数相乘”的运算后，所得的向量仍然属于此几何空间；在数学分析中，我们又知道，定义在某一区间上的函数，经过“加法”运算和“与数相乘”运算后，所得的函数仍然是定义在此区间上的函数；在代数中，我们还知道，同阶矩阵经“加法”运算和“与数相乘”运算后，所得的矩阵仍然是同阶矩阵……。如此，具有所谓“加法”和“与数相乘”运算性质的集合是很多的，它们可能具有不同的含义，但就其运算性质而言却都是共同的，如果我们抽去具体对象所可能具有的实际内容，把具有“加法”和“与数相乘”运算性质的集合（即总和）称为“向量空间”，仅从量的方面加以研究是完全可能的，而且是非常必要的。为了几何直观，我们借用几何术语来研究向量空间，把向量空间中的元素称作向量。显然，解析几何中所谈到的三维空间是向量空间中最简单的，向量空间当然也可以看作是上述几何空间概念的推广和发展。

向量空间与几何空间相似，由坐标原点出发的向量可以用二维向量或三维向量来表示，假定$\boldsymbol{R}^{(2)}$是平面上所有由原点出发的二维向量的集合，$\boldsymbol{R}^{(3)}$是空间中所有由原点出发的三维向量的集合，那么在$\boldsymbol{R}^{(2)}$或$\boldsymbol{R}^{(3)}$中任意两个向量的和仍然是一个由原点出发的向量，任意实数与向量的乘仍然是由原点出发的向量。

向量空间（即线性空间）用$\boldsymbol{V}$表示，它是由一组有序的向量$(\boldsymbol{R}_1, \boldsymbol{R}_2, \cdots\cdots, \boldsymbol{R}_n)$（元素）组成的集合，其中任意元素都满足加法的交换律及结合律，与数相乘的分配律及结合律，用公式表示为：

$$\boldsymbol{R}_1+\boldsymbol{R}_2=\boldsymbol{R}_2+\boldsymbol{R}_1$$

$$(\boldsymbol{R}_1+\boldsymbol{R}_2)+\boldsymbol{R}_3=\boldsymbol{R}_1+(\boldsymbol{R}_2+\boldsymbol{R}_3)$$

$$k(\boldsymbol{R}_1+\boldsymbol{R}_2)=k\boldsymbol{R}_1+k\boldsymbol{R}_2$$

$$(k+l)\boldsymbol{R}_1=k\boldsymbol{R}_1+l\boldsymbol{R}_1$$

$$k(l\boldsymbol{R}_1)=kl\boldsymbol{R}_1$$