

飞行动力学

——飞机的稳定性和操纵性——

胡兆丰 何植岱 高 浩 编

国防工业出版社

154706

内 容 简 介

本书主要介绍飞机的稳定性和操纵性原理。首先建立飞机的运动方程，然后依次讨论飞机的平衡、静稳定性和静操纵特性、动稳定性和操纵运动。

本书可作为航空院校大学本科生的教材，对于飞机设计和使用部门的工程技术人员也有参考价值。

飞 行 动 力 学

——飞机的稳定性和操纵性——

胡兆丰 何植岱 高 浩 编

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张 14 359千字

1985年12月第一版 1985年12月第一次印刷 印数：0,001—1,400册

统一书号：15034·3003 定价：2.85元

前 言

本书是根据几所航空院校空气动力学专业和飞行力学专业的教学计划和“飞行力学”课程的教学大纲作为大学本科生的教材而编写的。

“飞行力学”课程的教材内容包括两部分：飞机飞行性能计算及飞机的稳定性和操纵性。前一部分已由金长江、范立钦、周士林等同志编就，并于1983年出版。本书为后一部分，即飞机的稳定性和操纵性。为了保持本书的完整起见，书中个别章节内容与“飞机飞行性能计算”有所重复。讲授则应按教学大纲进行。

全书共分六章，每章后附有思考题。

第一章通过推导和讨论飞机的运动方程和操纵系统运动方程，建立飞机运动的普遍数学模型并包括这些模型的若干实用的变型。这部分内容是研究本书其它章节的基础。第二章和第三章探讨作用在飞机上的空气动力和力矩以及飞机的平衡问题。同时还研究了静稳定性和静操纵问题。这些问题不仅对飞机设计来说是十分重要的而且还为讨论飞机动稳定性和操纵运动提供了必需的预备知识。在简略地介绍了运动稳定性的基本原理之后，第四章详细讨论了飞机小扰动运动的一般属性，阐述近年来飞机发展中提出的诸如纵横惯性耦合、大迎角飞行和结构弹性变形的影响等问题。第五章和第六章讨论飞机的操纵运动。从飞行品质的角度考察了飞机在典型操纵输入下运动的特点。其中飞机的闭环操纵运动一章着重从原理上阐明了在采用自动器后，分析飞机操纵运动的基本方法和运动的特点。

本书由张桂联教授组织和指导进行编写。他多次审阅初稿，在本书的体系、内容、文字表达等方面都提出了大量的十分重要的意见。具体章节中，绪论、第二、三章和附录Ⅰ由胡兆丰副教

授执笔，第一、四章和附录 I、II 由何植岱副教授执笔，第五、六章由高浩副教授执笔。

书稿承北京航空学院赵震炎教授全面审阅，提出了许多宝贵意见和建议。航空工业部航空教材编审室副主任周士林同志校审了书稿，北京航空学院朱仁标讲师也校审了部分书稿，他们的宝贵意见对提高本书的出版质量是十分重要的。毕建忠同志参与了第四章部分算例的计算。编者仅在此向他们表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正，以使本书逐步完善。

目 录

符号表	1
绪论	7
第一章 飞机的一般运动方程	9
§ 1-1 坐标轴系和飞机的运动参数	9
一、常用坐标轴系	9
二、飞机运动参数的定义	12
三、各坐标轴系之间的关系和转换	14
§ 1-2 飞机的动力学方程	21
一、主要简化假定	21
二、对动坐标轴系写出的刚体动力学方程	22
§ 1-3 飞机的运动学方程	26
§ 1-4 方程组的讨论	28
一、方程的封闭情况	28
二、飞行力学的几类主要问题及方程的应用	29
§ 1-5 运动方程的线化和简化——小扰动方程	31
一、小扰动法和方程的线化	31
二、小扰动方程分离为纵向和横侧两组的条件	33
三、线化的飞机小扰动运动方程组	34
§ 1-6 小扰动方程的无因次形式	44
一、无因次表	44
二、纵向小扰动方程的无因次形式	46
三、横侧小扰动方程的无因次形式	49
§ 1-7 小扰动方程的矩阵形式	49
一、纵向小扰动方程的矩阵形式	50
二、横侧小扰动方程的矩阵形式	51
§ 1-8 操纵系统的运动方程	52
一、方程的基本形式	53
二、方程的线化形式	58
第二章 纵向气动特性及对称飞行的平衡、	

静稳定性和静操纵	61
§ 2-1 引言	61
§ 2-2 对称定直飞行时飞机的纵向力和力矩特性	63
一、机翼的纵向气动力及力矩特性	64
二、机翼机身组合体的纵向气动力及力矩特性	67
三、组合情况下平尾的纵向气动力及力矩特性	70
四、动力系统产生的纵向力及力矩特性	72
五、全机的纵向力及力矩特性	76
§ 2-3 对称定直飞行的平衡	77
一、平衡所需的操纵面偏角及驾驶杆位移	77
二、平衡所需的纵向操纵力	84
§ 2-4 纵向气动导数	90
一、对 V 的导数	90
二、对 α 的导数	92
三、对 ω_z 的导数	96
四、对 $\dot{\alpha}$ 的导数	99
五、对 δ_z (或 Ψ_{pm}) 的导数	101
六、对 δ_p 的导数	103
七、对 H 的导数	105
§ 2-5 飞机的纵向静操纵和静稳定性	107
一、定直飞行的舵偏角 (或杆拉移) 静操纵特性、握杆中性点	107
二、定直飞行时的杆力静操纵特性、松杆中性点	113
三、定常拉升时的舵偏角 (或杆位移) 静操纵特性、握杆机动点	122
四、定常拉升时的杆力静操纵特性、松杆机动点	126
五、助力操纵系统简介	129
六、弹簧、配重对杆力静操纵特性的影响	131
§ 2-6 构形变化及气动参数对飞机平衡、静稳定及静操纵 特性的影响	133
一、飞机构形变化的影响	133
二、 Ma 数变化的影响	138
三、大迎角飞行和地面效应的影响	143
§ 2-7 飞机的质心变动范围	144
第三章 横侧气动特性及非对称飞行的平衡、静稳定 性和静操纵	148
§ 3-1 引言	148
§ 3-2 横侧气动导数	149
一、对 β 的导数	149

二、横侧静稳定性——上反效应和风标静稳定性	162
三、对 ω_x 的导数	164
四、对 ω_y 的导数	170
五、对 δ_x 及 δ_y 的导数	175
六、影响横侧气动力和力矩特性的各种因素	178
§ 3-3 定直侧滑运动, 正常盘旋及稳定滚转的平衡和静操纵	185
一、定常直线侧滑飞行的横侧平衡和静操纵	185
二、正常盘旋及稳定滚转的平衡和静操纵	193
§ 3-4 横侧静操纵力和位移	197
一、副翼和方向舵静操纵力及操纵机构位移的一般表达式	198
二、副翼及方向舵的铰链力矩及铰链力矩导数	199
三、定直侧滑飞行的横侧操纵力	202
四、正常盘旋及稳定滚转时的附加操纵力	205
五、操纵面松浮时的气动导数	209
六、横侧操纵力与横侧松浮气动导数的关系及静操纵力指标	212
第四章 定常飞行的稳定性	215
§ 4-1 运动稳定性	215
一、动稳定性的概念	215
二、扰动运动的模态	218
§ 4-2 稳定性判据	220
一、罗斯判据	221
二、霍尔维茨判据	225
§ 4-3 纵向小扰动方程的拉氏变换形式和方程的一般求解过程	226
一、纵向小扰动方程的拉氏变换形式	227
二、纵向小扰动方程的一般求解过程	229
§ 4-4 纵向小扰动运动的两种典型模态及其物理成因	235
一、典型示例	235
二、两种典型运动模态及其物理成因	240
§ 4-5 纵向扰动运动的简化求解方法	243
一、特征根的近似估算	243
二、短周期模态的简化分析方法	245
三、长周期模态的简化分析方法	249
§ 4-6 飞行条件和气动参数对纵向动稳定性的影响	253
一、飞行速度的影响	253
二、飞行高度的影响	255
三、飞行航迹角的影响	256
四、静裕度的影响	257

§ 4-7 松杆纵向动稳定性简介	261
§ 4-8 横侧小扰动方程的拉氏变换形式和方程的求解过程	264
一、横侧小扰动方程的拉氏变换形式	265
二、横侧小扰动方程的一般求解过程	265
§ 4-9 横侧扰动运动的典型模态及其物理成因	273
一、典型示例	273
二、三种典型运动模态及其物理成因	275
§ 4-10 横侧扰动运动的简化求解方法	280
一、滚转收敛模态的简化分析	280
二、螺旋模态的简化分析	282
三、荷兰滚模态的简化分析	282
§ 4-11 飞行条件和气动参数对横侧动稳定性的影响	284
一、飞行速度的影响	284
二、飞行高度的影响	288
三、航迹角的影响	290
四、气动参数的影响和稳定边界的简略分析	293
§ 4-12 纵横向交感运动简介	295
一、急滚惯性交感运动及其数值解	295
二、急滚交感运动的线化求解方法——定常解	302
三、尾旋运动简介	307
§ 4-13 飞机结构弹性变形对稳定性和操纵性的影响简介	311
§ 4-14 有关动稳定性的品质要求	314
一、飞行品质要求简介	314
二、纵向稳定性品质指标	315
三、横侧稳定性品质指标	317
第五章 飞机的操纵运动（开环）	320
§ 5-1 引言	320
§ 5-2 飞机的纵向操纵运动	324
一、飞机纵向运动的传递函数	324
二、升降舵阶跃型输入时飞机的反应	330
三、升降舵谐波型输入时飞机的反应——频率特性	336
四、飞行条件和气动参数对纵向操纵特性的影响	339
§ 5-3 飞机的横侧操纵运动	345
一、飞机横侧运动的传递函数	345
二、副翼阶跃型输入时飞机的反应	349
三、副翼谐波型输入时飞机的反应——横侧频率特性	355
四、飞行条件对副翼操纵反应特性的影响	356

五、滚转机动飞行中方向舵的协调操纵	359
§ 5-4 飞机动态操纵品质指标简介	362
一、纵向动态操纵品质指标	363
二、横侧动态操纵品质指标	365
第六章 飞机的操纵运动 (闭环)	368
§ 6-1 引言	368
§ 6-2 闭环操纵运动的一般原理	371
一、单通道、单回路闭环操纵运动分析	372
二、单通道、多回路系统的变换	378
三、双通道、多回路系统的闭环传递函数	380
§ 6-3 纵向闭环操纵运动分析	384
一、沉浮运动的控制	384
二、短周期模态特性和操纵性的改善	390
三、高度和下滑航迹控制	394
四、通过减小纵向静裕度来改善飞机的性能	398
五、关于操纵 (控制) 系统动力学特性的影响	403
§ 6-4 横侧闭环操纵运动分析	405
一、飞机倾斜姿态的控制	405
二、改善高空飞行时飞机的横向操纵特性	408
三、通过方向舵通道的闭环操纵来改善飞机的横侧模态特性	410
附录 I 在动坐标系中质点的速度和加速度	416
附录 II 不同体轴系间的气动导数及惯矩的换算	422
附录 III 拉普拉斯变换	427
§ III-1 定义	427
§ III-2 基本性质	431
一、线性	431
二、平移定理	431
三、微分法则	432
四、积分法则	432
五、极值定理	433
§ III-3 拉氏变换在解微分方程中的应用	434
§ III-4 反变换法	438

符 号 表

(只列出主要和常用的符号)

A ——静面矩、诱导因子。

a ——音速、加速度。

B 或 T_0 ——拉力系数, $B = 8T_0/\pi$ 。

b ——弦线。

b_i ——平均(空)气动(力)弦。

C ——松舵因子。

$C_x, C_y, C_z, C_G, C_P, C_{N_p}$ ——阻力系数, 升力系数, 侧力系数, 重力系数, 推力系数, 法向力系数。

$C.Q.C$ ——操纵期望参数。

C_y^α ——升力系数对迎角的导数(升力线斜率)。

C_z^β ——侧力系数对侧滑角的导数。

D ——螺旋桨直径。

$D(S)$ ——传递函数分母多项式、特征方程式。

F ——力、桨盘面积、焦点。

G ——飞行重量、重量。

$G(S)$ ——闭环传递函数。

G_* ——指令矩阵。

H ——飞行高度。

h_{aw} ——方向舵平均剖面焦点到 Ox 轴的距离。

h_p ——推力线到质心距离。

h_{pw} ——垂直于机身纵轴方向量得的平尾焦点到飞机质心的距离。

I ——单位矩阵。

Im ——虚部。

I_x, I_y, I_z ——飞机绕 Ox, Oy, Oz 轴的转动惯量(惯性矩)。

I_{xy}, I_{yz}, I_{zx} ——飞机对相应轴的惯性积。

K ——传动比、反馈系数、静增益、弹性弯曲刚度。

$K(S)$ ——反馈矩阵。

K_x, K_y, K_z ——副翼传动比，方向舵传动比，纵向操纵面（升降舵或全动尾面）传动比。

K_n ——握杆静裕度。

K_{j_d} ——握杆机动裕量。

k ——三维修正系数。

k_d ——速度阻滞系数。

L ——拉普拉斯变换、坐标变换矩阵。

L_{pw} ——沿机身纵轴量得的平尾焦点到飞机质心的距离。

L_{cw} ——方向舵平均剖面焦点到飞机质心的距离。

l ——机翼翼展。

M ——力矩。

Ma ——马赫数。

M_p ——最大超调量。

M_x, M_y, M_z ——滚转力矩，偏航力矩，俯仰力矩。

$M_{j_x}, M_{j_y}, M_{j_z}$ ——副翼铰链力矩，方向舵铰链力矩，纵向操纵面（升降舵或全动平尾）铰链力矩。

M_{z_p} ——发动机推力产生的俯仰力矩。

m_x, m_y, m_z ——滚转力矩系数，偏航力矩系数，俯仰力矩系数。

$m_{j_x}, m_{j_y}, m_{j_z}$ ——副翼铰链力矩系数，方向舵铰链力矩系数，纵向操纵面（升降舵或全动平尾）铰链力矩系数。

m_{z_0} ——零升力矩系数。

m_x^{β} ——横向静稳定性（上反效应）。

m_y^{β} ——侧向静稳定性（风标静稳定性）。

m_z^{α} ——纵向静稳定性（俯仰刚度）。

$m_x^{\delta_x}, m_y^{\delta_y}, m_z^{\delta_z}$ ——副翼操纵效能，方向舵操纵效能，升降舵操纵效能。

\bar{m}_z^{α} ——洗流时差导数。

$\bar{m}_x^{\omega_x}, \bar{m}_y^{\omega_y}, \bar{m}_z^{\omega_z}$ ——滚转阻尼导数，偏航阻尼导数，纵向阻尼

导数。

$n_{y\dot{x}}$ ——滚转的偏航力矩导数（交叉导数）。

$m_{x\dot{y}}$ ——偏航的滚转力矩导数（交叉导数）。

N ——单位时间振动次数（振数频率）、发动机功率。

N_p ——法向力。

$N_{1/2}, N_2$ ——半衰时或倍增时内振动次数。

$N(S)$ ——传递函数分子多项式。

n ——载荷因数、特征根实部（阻尼）。

n_x, n_y ——切向载荷因数、法向载荷因数。

P ——发动机推力。

P_x, P_y, P_z ——副翼操纵力，方向舵操纵力，纵向（升降舵或全动平尾）操纵力。

Q ——阻力。

q ——动压。

R ——罗斯判别式。

Re ——雷诺数、实部。

S ——机翼面积、面积。

S_{z_1} ——副翼单个翼片铰链轴后面积。

S_y ——方向舵铰链轴后面积。

S_z ——升降舵铰链轴后面积。

S_f ——襟翼部分机翼面积、进气口面积。

S_p ——滑流流过的机翼面积。

S_c ——机身侧投影面积。

T ——周期、时间常数。

$T_{1/2}, T_2$ ——半衰时，倍增时。

V ——飞行速度。

W ——侧风速度、操纵位移量。

W_x, W_y, W_z ——副翼操纵位移，方向舵操纵位移，驾驶杆纵向位移。

x_c ——平均气动弦前缘到焦点的距离。

x_G ——平均气动弦前缘到质心的距离。

x_{jd} ——平均气动弦前缘到握杆机动点的距离。

Y ——升力。

y_G ——质心到平均气动弦的距离。

Z ——侧力。

α ——迎角。

β ——侧滑角。

γ ——滚转角。

γ_r ——绕飞行速度矢量的滚转角。

δ ——偏角、微分量。

$\delta_x, \delta_y, \delta_z, \delta_j, \delta_P$ ——副翼偏角, 方向舵偏角, 升降舵偏角, 襟翼偏角, 油门杆位置。

ε ——下洗角、误差。

ε_P ——滑流引起的下洗角。

ζ ——相对阻尼比。

η ——机翼根梢比、螺旋桨效率。

η_x, η_y, η_z ——副翼效率系数, 方向舵效率系数, 升降舵效率系数。

η_q ——静弹性变形系数的影响因子。

θ ——俯仰角。

θ ——航迹倾斜角。

λ ——展弦比、特征根值。

μ_1, μ_2 ——纵向相对密度, 横侧相对密度。

ρ ——大气密度。

σ ——侧洗角、最大超调量的相对值。

τ ——洗流时差。

τ_x, τ_z ——副翼调整片偏角, 纵向操纵面调整片偏角。

τ_1, τ_2 ——纵向时间尺度, 横侧时间尺度。

φ ——初相角, 进气道流量系数。

φ_p ——发动机安装角。

φ_{pw} ——全动平尾偏角。

φ_{yi} ——机翼安装角。

χ ——机翼后掠角。

ψ ——机翼上反角、偏航角。

ψ_r ——航迹偏转角。

ω ——特征根虚部（角频率）。

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ——滚转角速度，偏航角速度，俯仰角速度。

下 标

“a”——飞机本身。

“b”——闭环、对半机体坐标系的。

“b.ch”——补偿。

“cw”——垂尾。

“d”——对地面坐标系的、对地的、计及动力系统作用的。

“g”——干扰。

“h”——对航迹坐标系的。

“j”——襟翼。

“jd”——机动、接地。

“ld”——离地。

“P”——剖面值、计及动力系统影响的。

“p”——配重。

“pf”——平飞。

“pw”——平尾。

“q”——对气流坐标系的。

“rx”——容许。

“s”——松杆。

“sh”——机身。

“T”——转置矩阵。

“t”——对机体坐标系的、弹性、弹簧。

- “ w ”——对稳定性坐标系的。
- “ x ”——沿 Ox 轴方向的、副翼。
- “ y ”——沿 Oy 轴方向的、方向舵。
- “ yi ”——机翼。
- “ $yi-sh$ ”——机翼机身组合体。
- “ you ”——右半翼。
- “ z ”——沿 Oz 轴方向的、升降舵。
- “ zuo ”——左半翼。
- “ ψ ”——上反作用。
- “ χ ”——后掠作用。
- “ 0 ”——基准飞行状态。
- “ $*$ ”——给定值。

上置符号“ $-$ ”——无因次量、拉普拉斯变换。

前置符号“ Δ ”——小扰动量。

绪 论

飞行动力学是应用力学的一个分支。它是按力学基本原理结合具体对象——飞行器来分析、研究在有控制或无控制情况下的运动特性的一门学科。

从力学观点来看，飞行器飞行动力学与经典力学中的质点系动力学问题并无本质的区别，只是在运动所受的约束及外力性质方面存在某些特点。例如：飞行器一般在三维空间内运动；在大气层内飞行时，飞行器所受的部分外力（主要指气动力，某些类型发动机的推力）还与运动状态，飞行器构形及变形等因素有关；此外，根据需要，人们可以通过控制改变飞行器的受力情况，从而改变它们的运动规律。这样，飞行动力学的发展，很自然地与相应学科发生了联系。这些学科包括：空气动力学、结构动力学、发动机原理、现代控制工程以及经典力学和应用数学等等。电子（数字、模拟或数模混合）计算机的出现，又为飞行动力学研究提供了有效、快速的计算手段，和飞行模拟（飞行仿真）技术，大大丰富了飞行器飞行动力学的研究内容。

随着飞行实践的进展，飞行器的种类越来越多。其活动范围由大气层而进入宇宙空间，飞行速度也提高到第三宇宙速度（ 16.7km/s ）。由于各种飞行器所要研究的飞行动力学问题性质不完全相同，因而，又出现了飞机飞行动力学、直升机飞行动力学、导弹飞行动力学等分工更细的研究学科。

本教材限于重点介绍属于飞机飞行动力学范围内的某些问题。

飞机飞行动力学着重研究飞机在大气层内的运动特性。通常包括三方面的内容：飞机飞行性能、飞机的稳定性和操纵性、结构柔性引起的气动弹性问题。其中，因气动弹性现象引起飞机结