

732458

V24
08

飞机飞行操纵系统

徐鑫福 主 编

冯亚昌 副主编

HK34/12



C0222639

北京航空航天大学出版社

前 言

最近20多年来,飞机飞行操纵系统的有关理论和技术发展很快。由经典控制理论发展到控制理论;由机械操纵系统发展到高增益系统,进而应用随控布局技术和与其它系统综使飞机飞行操纵系统迅速发展。因此,需要编写一本《飞机飞行操纵系统》的教材,供高等院校有关专业学生应用,并且,广大飞机设计和操纵系统(包括控制系统)设计人员和从事航空工业的工程技术人员也迫切需要有关论述飞行操纵系统的书籍。为了满足上述求,根据飞机飞行操纵系统课程的教学大纲编写这本教材。

全书共分三篇二十一章,每章后附有思考题。

第一篇有七章,为空气动力学及飞行力学部分。第一章介绍空气动力学的基本知识。第二、三、五章介绍空气动力及力矩,特别是有关空气动力系数和导数的意义;阐述飞机静稳静操纵性的概念。第四、六章采用自动控制理论的方法,阐明飞机对操纵的反应,研本身固有的稳定性。第七章简要地介绍有关操纵品质规范的知识。

第二篇有六章,为飞机主操纵系统的机械操纵系统部分。第八、九章分别介绍简单机械系统和不可逆助力机械操纵系统的组成、构造型式、主要构件的构造和工作原理。第十章论不可逆助力机械操纵系统的动特性问题,建立线性模型、进行解偶和降阶处理,最后数估计法得杆系系统的等效线性模型。第十一章介绍非线性机构的组成原理以及如何建构输出的非线性位移曲线的表达式。第十二章介绍多种类型的机械合成装置及其传动分力分析。第十三章介绍飞机颤振和副翼反效问题,操纵系统的强度和刚度要求以及飞的承力和传力问题。

第三篇有八章,为近代飞机飞行操纵系统部分。第十四章介绍近代飞机操纵系统中的敏作。如陀螺仪、线加速度计、气压式高度表和空速表、 M 数表、迎角(或侧滑角)传感以及大气数据系统简介。第十五、十六章分别讲述增稳和控制增稳操纵系统的组成、原理、控制规律等,分析对飞机稳定性和操纵品质所起的作用。第十七章是以一个典型向电传操纵系统(模拟式)为例,说明电传操纵系统的组成、工作原理和控制规律等。过人工稳定回路,讨论放宽静稳定性要求。第十八章简要介绍随控布局技术项目,如放定性要求、机动载荷控制、直接力操纵、阵风减载、乘感控制及颤振主动抑制等。第二十章是用经典控制理论的设计方法,分别分析、设计纵向和横侧操纵系统,使等效行特性符合技术指标要求。第二十一章是用近代控制理论的设计方法,优化设计控满足技术指标的要求,并用很大篇幅讨论两种方法的联系。

本书是在北京航空学院徐鑫福、冯亚昌、党祖祺、焦国权、姚铁梅等同志于1982年编写了《飞机飞行操纵系统》讲义的基础上编写的。本书前六章的编写参考了北京航空学院509教研室于1980年和1983年编写的《空气动力学及飞行力学》一书。

本书由徐鑫福(绪论、第一章至第六章、第八章、第九章、第十三章、第十八章)、冯亚昌(第七章、第十四章至第十七章、第十九章、第二十章)、姚铁梅(第十章、第二十一章)、党祖祺(第十一章、第十二章)、书主编徐鑫福、副主编冯亚昌。书中图由孙奎兰、郝记珂两位同志描绘。本书王俊轩同志进行了审阅,在编写过程中,也得其他同志的热情帮助,在此一并对于书中的缺点和错误,敬请

,以便再版时修订。

编 者

1988年5月

符号表

(只列出主要和常用的符号)

- A ——截面面积
- a ——音速、加速度
- b ——弦长
- b_A ——平均空气动力弦
- C_x, C_{xi} ——阻力系数, 诱导阻力系数
- $C_y, C_{y\varphi=0}$ ——升力系数, 由迎角 α 产生的飞机升力系数
- C_z ——侧力系数
- C_G ——重力系数
- C_P ——推力系数
- $c, \bar{c}$ ——翼型最大厚度, 翼型相对厚度 $\bar{c} = c/b$
- 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
- $C_z^{\delta x}, C_y^\eta$ ——升降舵效率, 全动平尾效率
- $C_z^{\delta y}$ ——方向舵效率
- F ——力、焦点
- F_x, F_y, F_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
- F_s ——载荷感觉器弹簧组拉伸 (或压缩) 力
- $F_x^{ax}, F_y^y, F_z^{zy}$ ——横向静操纵性指标, 侧向静操纵性指标, 纵向静操纵性指标
- $F_s^{w_s}$ ——载荷感觉器弹簧组刚度 (J)
- f ——振动频率
- G ——飞行重量、重量
- $G(S)$ ——传递函数
- g ——重力加速度
- H ——飞行高度
- I_x, I_y, I_z ——飞机绕 Ox_i, Oy_i, Oz_i 轴的转动惯量 (惯性矩)
- J ——弹簧组刚度, $J = F_s^{w_s}$
- K ——传递函数的放大系数、传动比、刚度

K_x, K_y, K_z ——侧向静操纵性系数, 纵向静操纵性系数, 纵向静操纵性系数

L_{pw} ——平尾焦点到飞机质心的距离

L_{cw} ——垂尾焦点到飞机质心的距离

M ——马赫数 (M 数)

M_P ——最大超调量

M_{nz} ——扭转力矩 (扭矩)

M_{wan} ——弯曲力矩 (弯矩)

M_i ——舵面铰链力矩

M_x, M_y, M_z ——滚转力矩, 偏航力矩, 俯仰力矩

M_{zP} ——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_{z0} ——零升力矩系数

m_z^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^a ——纵向静稳定性 (俯仰刚度)

$m_x^{\delta x}, m_y^{\delta y}, m_z^{\delta z} (m_z^{\delta \eta})$ ——副翼操纵效能, 方向舵操纵效能, 升降舵 (全动平尾) 操纵效能

$\dot{m}_z^a$ ——洗流时差导数

$m_x^{\bar{\omega} x}, m_y^{\bar{\omega} y}, m_z^{\bar{\omega} z}$ ——滚转阻尼导数, 偏航阻尼导数, 纵向阻尼导数

$m_y^{\bar{\omega} x}$ ——滚转的偏航力矩导数 (交叉导数或交联导数)

$m_x^{\bar{\omega} y}$ ——偏航的滚转力矩导数 (交叉导数或交联导数)

$N_{1/2}, N_2$ ——半衰期或倍增时内振动次数

$N(S)$ ——传递函数分子行列式

n ——荷兰滚模态阻尼系数 (特征根实部)、载荷因数、操纵系统的传动

n_1 ——短周期模态阻尼系数

n_2 ——长周期模态阻尼系数

n_F ——摇臂的力传动比

n_x ——摇臂的位移传动比、切向载荷因数

n_y ——法向载荷因数 (过载)

n_i ——助力器的操纵传动比

n_{oc} ——助力器的反馈传动比

P ——发动机推力、助力器输出力

p_s ——大气压力, 静压

p_t ——全压 (等于静压与动压之和)

p_∞ ——远前方自由流的压力

p_{iy} ——助力器来油压力

Q ——阻力

Q_i ——诱导阻力

q ——动压

S ——机翼面积、助力器行程、微分算子 ($S = \frac{d}{dt}$)

T ——周期、时间常数、绝对温度 (K)

$T_{1/2}, T_z$ ——半衰期, 倍增时

t ——时间、摄氏温度 (°C)

u ——机翼弯曲振动的垂直运动速度、垂直阵风速度

V ——飞机飞行速度

V_s ——助力器活塞运动速度

V_∞ ——远前方自由流流速

W ——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

W_s ——载荷感觉器弹簧组位移

$W_x^{ox}, W_y^y, W_z^{zy}$ ——横向静操纵性位移指标, 侧向静操纵性位移指标, 纵向静操纵性位移指标

x_a ——加速度计到质心的距离

x_F ——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_{ad} ——平均气动弦前缘到握杆机动点的距离

Y ——升力

$Y_{\alpha=0}$ ——由迎角 α 产生的飞机升力

Z ——侧力

α ——迎角

β ——侧滑角

γ ——滚转角、倾斜角、重量密度

δ ——偏角

$\delta_x, \delta_y, \delta_z$ ——副翼偏角, 方向舵偏角, 升降舵偏角

$\delta_l, \delta_{ql}, \delta_{ya}$ ——襟翼偏角, 前缘襟翼偏角, 鸭翼偏角

δ_P ——油门杆位置

ϵ ——下洗角

θ ——俯仰角

θ ——航迹偏角、扭转角

χ ——后掠角

λ ——展弦比、特征根值

μ_1, μ_2 ——纵 相对密度, 横侧相对密度

ξ ——传递函数 且尼比, 荷兰滚模态阻尼比

ξ_1, ξ_2 ——短周期模态阻尼比, 长周期模态阻尼比

ρ ——大气密度

σ ——最大超调量 对值

σ_p ——材料的比例 限应力

σ_{ij} ——压杆的临界应力

τ ——洗流时差、动态系统延迟时间、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、全动平尾偏角

ψ ——机翼上反角、偏航角

ω ——特征根虚部(振荡角频率)、荷兰滚模态振荡(角)频率

ω_1, ω_2 ——短周期模态振荡(角)频率, 长周期模态振荡(角)频率

ω_{n1}, ω_{n2} ——短周期模态固有频率, 长周期模态固有频率

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

下 标

“b”——对半机体坐标系的

“b·ch”——补偿

“bs”——表速

“cw”——垂尾

“da”——大

“d”——对地面坐标系的

“h”——对航迹坐标系的

“hou”——后

“hx”——后项

“j”——襟翼、铰链

“ja”——压

“jd”——机动、接地

“lj”——临界

“ly”——来油

“nz”——扭

“p”——配重

“pf”——平飞

“ph”——平衡

“pj”——平均

“pw”——平尾

“q”——对气流坐标系的

“qian”——前

“qj”——前缘襟翼

“qx”——前项

“s”——传动活塞

“sh” —— 机身、升致 (波阻)
 “sy” —— 剩余
 “t” —— 对机体轴的
 “w” —— 对稳定性坐标系的
 “wan” —— 弯
 “x” —— 沿 Ox 轴方向的、副翼
 “xi” —— 小
 “y” —— 沿 Oy 轴方向的、方向舵
 “ya” —— 鸭翼
 “yi” —— 机翼
 “yi-sh” —— 机翼机身组合体
 “you” —— 右
 “z” —— 沿 Oz 轴方向的、升降舵或全动平尾
 “zl” —— 着陆
 “zs” —— 真速
 “zuo” —— 左
 “ ψ ” —— 上反作用
 “ χ ” —— 后掠作用
 “0” —— 基准飞行状态
 符号的上置符 “—” —— 无因次量
 符号的前置符 “ Δ ” —— 小扰动量、增量

目 录

符号表

绪 论

§0—1	飞机飞行操纵系统的分类	(1)
§0—2	飞机飞行主操纵系统的发展和展望	(1)
§0—3	飞机飞行辅助操纵系统	(5)

第一篇 空气动力学及飞行力学

第一章 空气动力学基础

§1—1	引言	(8)
§1—2	空气的基本性质	(8)
一、	空气的状态参数与状态方程	(8)
二、	国际标准大气 (ISA)	(9)
§1—3	低速空气动力学的基本方程	(10)
一、	流线和流管	(10)
二、	连续方程 (质量守恒方程)	(10)
三、	伯努利方程	(11)
§1—4	高速空气动力学的基本概念	(13)
一、	音速和马赫数	(13)
二、	弱扰动的传播区	(14)
三、	可压缩流流速与流管截面积的关系	(15)
四、	激波	(16)
五、	膨胀波	(18)
六、	临界马赫数	(19)
§1—5	飞机在空间运动的坐标系、运动参数和操纵机构的参数	(20)
一、	常用坐标轴系	(20)
二、	飞机的运动参数	(21)
三、	飞机操纵机构的参数	(21)
§1—6	空气动力和空气动力系数	(22)
§1—7	飞机的升力, Y	(23)
一、	机翼的几何形状和几何参数	(23)
二、	机翼的升力	(25)

三、平尾的升力	(27)
四、机身的升力	(28)
§ 1—8 飞机的阻力, Q	(28)
一、附面层、摩擦阻力、压差阻力	(28)
二、底部阻力	(29)
三、零升波阻	(30)
四、升致阻力	(30)
五、整个飞机的阻力及极曲线	(32)

第二章 飞机作对称定直平飞时作用在飞机上的力和力矩

§ 2—1 引言	(35)
§ 2—2 由飞机迎角 α 和平尾偏转角 φ 产生的气动力	(36)
一、由 α 产生的升力 $Y_{\varphi=0}$, 升力系数 $C_{y\varphi=0}$ 和导数 $C_{y\varphi=0}^{\alpha}$	(36)
二、由 φ 产生的附加升力 ΔY_{φ} , 升力系数 $\Delta C_{y\varphi}$ 和导数 $C_{y\varphi}^{\varphi}$	(37)
三、全机的升力 Y 、升力系数 C_y 和导数 C_y^{α}	(38)
§ 2—3 飞机的空气动力焦点	(38)
§ 2—4 纵向稳定力矩 $M_z^{\alpha}\alpha$	(39)
一、纵向静稳定性 m_z^{α}	(39)
二、纵向静稳定裕度 $m_z^{C_{y\varphi=0}}$	(40)
§ 2—5 纵向配平力矩 $M_z^{\varphi}\varphi$ 与平尾操纵效能 m_z^{φ}	(41)
§ 2—6 零升力矩 M_{z_0} 与零升力矩系数 m_{z_0}	(41)
§ 2—7 飞机俯仰力矩 ($m_z^{\alpha}\alpha$ 、 $m_z^{\varphi}\varphi$ 、 m_{z_0})	(42)
一、飞机总升力线斜率 C_y^{α} 的计算公式	(42)
二、飞机定直平飞时, 所需平尾偏转角 φ 的计算公式	(42)
三、纵向静稳定性应具备的条件	(43)
§ 2—8 平尾偏度 φ 的平衡曲线	(44)
一、速度影响	(45)
二、高度影响	(46)
§ 2—9 飞机的速度静稳定性	(47)

第三章 飞机作纵向非定常曲线飞行时作用在飞机上的力和力矩

§ 3—1 引言	(51)
§ 3—2 曲线飞行时的法向过载 n_y 和俯仰角速度 ω_z	(51)
§ 3—3 曲线飞行时作用在飞机上附加的气动力和力矩	(53)
§ 3—4 由于 ω_z 引起的纵向阻尼力矩 $M_z^{\omega_z} \cdot \omega_z$	(54)
§ 3—5 由于迎角 α 随时间的变化率 $\dot{\alpha}$ 引起的纵向阻尼力矩 $M_z^{\dot{\alpha}} \cdot \dot{\alpha}$	(56)
§ 3—6 单位(剩余)过载的平尾偏度 φ^{ny}	(57)

§ 3—7 机动点	(60)
§ 3—8 操纵面的铰链力矩	(62)

第四章 飞机纵向动稳定性与操纵性

§ 4—1 引言	(68)
§ 4—2 飞机纵向运动方程的建立和条件假设	(70)
§ 4—3 小扰动原理	(71)
§ 4—4 纵向小扰动运动方程的建立	(72)
一、纵向扰动运动方程及其线性化处理	(72)
二、纵向小扰动运动方程的矩阵形式	(75)
三、纵向小扰动运动方程简化及拉氏变换	(77)
§ 4—5 纵向操纵运动的传递函数与频率特性	(79)
一、纵向操纵全量运动传递函数	(79)
二、典型示例——纵向传递函数与频率特性	(82)
三、纵向传递函数和频率特性分析	(84)
§ 4—6 两种运动模态的物理成因	(86)
一、短周期运动模态的物理成因	(86)
二、长周期运动模态的物理成因	(86)
§ 4—7 短周期运动的近似传递函数	(87)
一、近似传递函数的建立和典型示例	(87)
二、近似传递函数的进一步简化和过载系数的响应曲线	(90)
§ 4—8 短周期运动的近似传递函数的无因次形式和过载系数的稳态值	(92)
§ 4—9 飞行条件和气动参数对短周期模态特性的影响, 举例	(94)
§ 4—10 长周期运动的近似传递函数	(97)
一、近似传递函数的建立与典型示例	(97)
二、长周期运动的稳定性	(99)
三、长周期运动的固有频率 ω_{n2} 和阻尼比 ξ_2 的近似表示式	(100)

第五章 飞机侧力及压力中心, 横侧气动力矩和横向、航向的静稳定性

§ 5—1 横侧力矩及其导数	(102)
§ 5—2 飞机的侧力及压力中心	(104)
§ 5—3 横向和航向静稳定性	(104)
一、横向静稳定性	(104)
二、航向静稳定性	(105)
§ 5—4 由于 ω_x 和 ω_y 引起的横侧力矩及导数	(106)
一、由于 ω_x 引起的横侧力矩及其导数	(106)
二、由于 ω_y 引起的横侧力矩及其导数	(107)
§ 5—5 副翼和方向舵偏转所引起的力矩	(108)
一、副翼偏转所引起的力矩	(108)

二、方向舵偏转所引起的力矩	(108)
§ 5—6 横侧气动导数随 M 数的变化曲线	(110)
§ 5—7 横向静操纵性指标 F_{η}^{0*} 的分析	(110)
§ 5—8 侧向静操纵性指标 F_{η}^y 的分析	(115)

第六章 飞机横侧动稳定性与操纵性

§ 6—1 横侧运动方程的建立	(121)
§ 6—2 横侧小扰动运动方程的建立	(121)
一、横侧扰动运动方程及其线化处理	(121)
二、横侧小扰动运动方程的矩阵形式	(124)
三、横侧小扰动运动方程简化及拉氏变换	(125)
§ 6—3 横侧操纵运动的传递函数及频率特性	(126)
一、横侧操纵全量运动传递函数	(126)
二、典型示例——横侧传递函数与频率特性	(129)
§ 6—4 横侧传递函数与频率特性分析	(133)
一、三种运动模态的特性与特征参数	(133)
二、三种运动模态的特征根	(134)
三、横侧频率特性分析	(136)
四、脉冲响应曲线分析	(136)
§ 6—5 横侧操纵运动的近似传递函数	(137)
一、二自由度荷兰滚运动的近似传递函数	(137)
二、三自由度全量运动的近似传递函数	(138)
三、一自由度滚转运动的近似传递函数	(139)
§ 6—6 横侧小扰动运动三种运动模态的物理成因	(140)
一、滚转模态的物理成因	(140)
二、螺旋模态的物理成因	(140)
三、荷兰滚模态的物理成因	(142)
§ 6—7 飞机急滚惯性交感运动	(146)
一、引言	(146)
二、惯性交感力矩	(146)
三、偏航与俯仰临界滚转角速度	(147)
四、急滚惯性交感运动发散现象	(147)
五、影响临界滚转角速度大小的因素	(148)

第七章 有人驾驶飞机飞行操纵系统和操纵品质规范简介

§ 7—1 飞行操纵系统和操纵品质规范概述	(150)
§ 7—2 操纵品质规范的基本体制	(152)
一、飞机分类	(152)

二、飞行任务阶段的种类	(152)
三、操纵品质的等级	(153)
四、规范的基本体制	(155)
§ 7—3 飞行操纵系统类型及其工作状态分类	(155)
§ 7—4 飞机纵向操纵品质	(156)
一、按速度的纵向稳定性 (又称速度稳定性)	(156)
二、纵向机动特性	(158)
§ 7—5 飞机横侧向操纵品质	(164)
一、横侧向模态特性	(164)
二、横侧运动的动态反应	(166)
三、滚转操纵效能	(169)
§ 7—6 等效系统	(169)
一、等效系统的提出	(169)
二、等效系统的概念	(171)
三、纵向频域等效系统	(171)
四、横侧向频域等效系统	(174)
§ 7—7 C^* 准则	(175)
§ 7—8 驾驶员-飞机闭合回路的操纵品质准则	(177)

第二篇 飞机飞行机械操纵系统

第八章 简单机械操纵系统

§ 8—1 引言	(183)
§ 8—2 对飞机主操纵系统的要求	(183)
§ 8—3 飞机主操纵系统的组成和工作原理	(185)
一、中央操纵机构的构造和工作原理	(185)
1. 手操纵机构	(185)
2. 脚操纵机构	(187)
二、传动机构的构造和工作原理	(189)
1. 传动机构的构造型式	(189)
2. 硬式传动机构的主要构件	(189)
3. 软式传动机构的主要构件	(194)
§ 8—4 主操纵系统的传动系数和传动比	(197)
一、主操纵系统的传动系数	(197)
二、主操纵系统的传动比	(198)
§ 8—5 操纵系统运动模线的计算	(199)
一、编制典型机构的计算子程序	(201)
1. 单摇臂机构	(201)

2. 平面四杆机构	(202)
3. 导向杆系	(204)
二、编制计算主程序	(207)

第九章 不可逆助力机械操纵系统

§9—1 引言	(210)
§9—2 可逆助力机械操纵系统	(210)
§9—3 不可逆助力机械操纵系统	(212)
§9—4 液压助力器	(213)
一、液压助力器的构造及其工作原理	(213)
二、液压助力器的静态特性	(215)
三、助力器的选择	(216)
1. 助力器轴线与平尾转轴垂直的布置情况	(216)
2. 助力器轴线与平尾转轴不垂直的布置情况	(219)
3. 选择助力器时需要考虑的其它一些问题	(221)
§9—5 后掠式全动平尾的顺气流偏度计算公式	(221)
§9—6 载荷感觉器	(222)
§9—7 调整片效应机构	(224)
§9—8 力臂自动调节器	(225)
一、力臂自动调节器的功用	(225)
二、力臂自动调节器的工作原理	(226)
三、力臂自动调节装置的组成	(228)
四、力臂自动调节器的调节规律	(231)
五、变臂偏度(引动量)	(232)
§9—9 杆力与杆位移曲线	(235)
一、零杆力位置	(235)
二、杆力梯度和最大杆力	(237)
§9—10 主操纵系统传动线路的布置	(239)
§9—11 主操纵系统传动比分配和确定	(240)

第十章 飞机机械操纵系统动态模型

§10—1 机械操纵系统的线性模型	(244)
§10—2 助力器-舵面系统的降阶处理	(247)
§10—3 机械杆系(前段)的线性分析	(250)
§10—4 机械操纵系统的非线性模型	(253)
§10—5 机械操纵系统的等效线性模型	(256)
§10—6 算例	(263)
§10—7 结论	(265)

第十一章 非线性传动机构

§ 11—1 引言	(267)
§ 11—2 四杆非线性机构	(267)
§ 11—3 六杆非线性机构	(269)
§ 11—4 连杆齿轮式非线性机构	(272)
一、连杆齿轮式非线性机构的组成和传动分析	(272)
二、连杆齿轮式非线性机构的设计	(275)

第十二章 机械合成装置

§ 12—1 引言	(276)
§ 12—2 复合摇臂式合成装置	(276)
一、复合摇臂式合成装置的组成	(276)
二、复合摇臂式合成装置的传动分析	(277)
三、复合摇臂式合成装置的受力分析	(280)
1. 复合摇臂式合成装置的受力分析	(280)
2. 力反传与功率反传	(281)
§ 12—3 平行四边形式合成装置	(282)
一、平行四边形式合成装置的组成与类型	(282)
二、平行四边形式合成装置的传动分析	(283)
三、平行四边形式合成装置的受力分析	(284)
§ 12—4 机械转换合成装置	(286)
一、机械转换合成装置的组成原理	(286)
二、机械转换合成装置的传动分析	(288)
三、液压转换机构转换过程分析	(291)
§ 12—5 齿轮式合成装置	(292)

第十三章 飞机颤振与副翼反效, 结构承力与传力, 操纵系统的强度与刚度

§ 13—1 引言	(295)
§ 13—2 传动杆的振动和翼面颤振	(295)
一、振动的主要特性参数	(295)
二、传动杆的振动	(297)
三、机翼与尾翼颤振的现象	(297)
四、机翼弯扭颤振	(298)
五、机翼弯曲-副翼偏转颤振	(300)
六、尾翼颤振	(302)
§ 13—3 副翼反效	(303)
§ 13—4 作用在飞机结构上的集中力——承力和传力问题	(305)
一、简单平面梁的组成、元件的功用和传力	(305)

二、机身和机翼结构的承力和传力问题	(306)
三、示例	(307)
§13—5 飞机主操纵系统的强度和刚度	(310)

第三篇 近代飞机飞行操纵系统

第十四章 近代飞机操纵系统中的敏感元件

§14—1 陀螺仪	(313)
一、陀螺仪的用途和种类	(313)
二、双自由度陀螺及其基本特性	(314)
三、单自由度陀螺	(319)
四、典型陀螺仪举例	(322)
§14—2 线加速度计	(330)
一、线加速度计的功用	(330)
二、简单式线加速度计	(330)
三、浮子摆式加速度计	(333)
四、用加速度计近似测量飞机的迎角或侧滑角	(336)
§14—3 高度和速度的测量	(337)
一、高度的测量及其传感器	(337)
二、速度的测量及其传感器	(340)
§14—4 迎角和侧滑角的测量	(344)
一、概述	(344)
二、测量迎角（或侧滑角）的几种方案及其传感器	(344)
§14—5 大气数据系统简介	(349)
一、问题提出	(349)
二、大气数据系统的组成	(350)
三、大气数据系统的计算公式	(351)
四、大气数据系统的工作原理	(351)

第十五章 增稳操纵系统

§15—1 概述	(353)
§15—2 具有纵向阻尼器的操纵系统	(356)
一、组成方块图	(356)
二、工作原理	(360)
三、控制规律	(362)
四、对飞机稳定性和操纵品质的作用	(363)
§15—3 具有法向过载（或迎角）稳定器的操纵系统	(371)
一、组成方块图	(371)

二、工作原理及控制规律	(372)
三、对飞机稳定性和操纵品质的作用	(373)
§ 15—4 纵向增稳操纵系统	(377)
一、组成方块图	(377)
二、工作原理及控制律	(377)
§ 15—5 增稳-驾驶仪操纵系统	(381)
一、问题提出	(381)
二、自动驾驶仪的组成、功用、工作原理及其控制律	(382)
三、增稳-驾驶仪操纵系统	(387)
§ 15—6 横侧增稳操纵系统	(390)
一、具有航向阻尼器和横滚阻尼器的操纵系统	(390)
二、航向增稳操纵系统	(395)
三、横侧增稳操纵系统	(396)

第十六章 控制增稳操纵系统

§ 16—1 控制增稳操纵系统的组成、工作原理及其控制律	(404)
一、增稳操纵系统的缺点	(404)
二、控制增稳操纵系统的组成、工作原理及其控制律	(405)
三、控制增稳操纵系统能兼顾飞机稳定性和操纵性	(407)
§ 16—2 控制增稳操纵系统对飞机稳定性和操纵品质的作用	(409)
一、增加杆力灵敏度 M_{Fz} 值	(409)
二、改善操纵系统的杆力特性	(413)
三、增加静操纵性系数	(416)
四、为提高飞机机动性，放宽静稳定度要求提供了可能性	(416)
§ 16—3 控制增稳操纵系统的类型	(420)
一、类型	(420)
二、中性速度稳定性控制律的物理含义	(422)
三、实现中性速度稳定性控制律的一种可能方案	(424)
§ 16—4 控制增稳操纵系统的优缺点	(425)

第十七章 电传操纵系统

§ 17—1 电传操纵系统的提出	(427)
§ 17—2 电传操纵系统中可靠性与余度技术	(428)
§ 17—3 电传操纵系统的组成、工作原理和控制律	(430)
一、单通道电传操纵系统	(431)
二、四余度电传操纵系统	(438)
§ 17—4 电传操纵系统对飞机稳定性和操纵品质的作用	(439)
一、提高飞机性能和机动性	(440)
二、提供大迎角和大过载时较好的操纵稳定性	(442)

三、提供满意的杆力特性	(442)
§ 17—5 电传操纵系统的优点及存在的问题	(449)
一、电传操纵系统的优点	(449)
二、电传操纵系统存在的问题	(450)
§ 17—6 电传操纵系统是设计随控布局飞机的基础	(450)

第十八章 随控布局飞机操纵系统简介

§ 18—1 引言	(452)
§ 18—2 放宽静稳定性要求及飞行边界控制	(452)
§ 18—3 机动载荷控制	(453)
一、大型飞机的机动载荷控制	(453)
二、歼击机的机动载荷控制	(454)
✓ § 18—4 直接力操纵	(456)
一、直接升力操纵	(456)
1. 间接升力操纵	(456)
2. 直接升力操纵系统的组成	(457)
二、直接侧力操纵	(462)
1. 间接侧力操纵	(462)
2. 直接侧力操纵系统的组成	(463)
§ 18—5 阵风减载与乘感控制	(467)
一、阵风与过载	(467)
1. 垂直阵风引起的法向过载	(468)
2. 交变阵风的频率	(469)
二、阵风减载	(469)
三、乘感控制	(471)
§ 18—6 机动增强	(473)
§ 18—7 颤振主动抑制	(474)

第十九章 近代飞机纵向操纵系统的分析设计

§ 19—1 纵向运动控制中基本反馈信号的分析	(477)
一、以俯仰角 θ 作为反馈信号时的分析	(477)
二、以俯仰角及其积分信号作为反馈时的分析	(480)
三、以俯仰角速率作为反馈信号时的分析	(484)
四、以俯仰角及其速率信号作为反馈时的分析	(487)
五、对纵向静不稳定飞机的分析	(487)
六、俯仰姿态控制的一般形式和增益的调整	(489)
七、以迎角和迎角速度作为反馈时的分析	(493)
八、以法向加速度作为反馈时的分析	(495)
§ 19—2 俯仰姿态角稳定和控制系统的分析设计实例	(502)