

带自动器飞机 飞行动力学

**Aircraft Flight Dynamics and
Automatic Flight Control**

方振平 著

国防工业出版社

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成

(以姓氏笔划为序) 刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨呈豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫悟生 崔尔杰

前 言

自重于空气的飞行器问世以来,早在本世纪初,为了减轻驾驶员负担,实现精确控制,人们就考虑采用自动控制装置来代替驾驶员的部分工作。航空事业迅速发展,要求飞机完成的飞行任务日趋复杂,为保证飞机具有良好的飞行性能和飞行品质,机上配置的飞行控制系统也愈来愈多,趋于复杂。飞机的动力学特性也相应地出现许多新的变化。从本质上来认识、理解带自动器飞机的运动特点,成为飞行力学、飞机设计和飞行控制系统设计工作者,以及新机驾驶员的迫切需要。显见,带自动器飞机的飞行动力学已发展成为飞机设计、飞行控制等多学科的综合点。

为适应航空事业发展的需要,满足航空高等院校教学和广大科技工作者学习和参考的迫切要求,作者曾在1978年编写了“飞行器(闭环)系统的动态特性”教材,供航空院校飞行力学专业的研究生、高年级本科生使用,效果较好。同时也受到航空厂、所飞行力学、飞行控制工作者的欢迎。本书系在该教材基础上,吸取教学实践经验和近年来的科研成果,并参阅有关国外文献,重新编写而成,使内容更为系统、充实、结合实际。

全书分两大部分,前四章为第一部分,着重从飞行力学角度全面系统地介绍引入各类飞行控制系统后对飞机运动特性影响及其机理分析。其中第一章为建立分析用的系统数学模型,简要介绍飞行控制系统中各个环节的传递函数,包括驾驶员环节传递函数;第二章扼要介绍系统分析、综合方法,引出有关飞机动力学特性评价指标等;第三、四章为飞行控制系统的各个基本反馈信号引入后对飞机静态、动态特性影响及其机理分析,作为实际飞行控制系统综合分析的基础。后四章为第二部分,按实际飞行控制系统功能

分类,对系统进行综合分析,提出相应的飞机设计指标等。其中第五章是有关改善飞机稳定性和操纵性的飞行控制系统;第六章为有关控制飞机在空间姿态角运动的系统;第七章是飞机的质心控制系统,介绍飞机机动轨迹控制和自动着陆控制;第八章介绍采用主动控制技术飞机的飞行特性。

高仍清、屈香菊、张曙光同志参加了本书的部分工作。

由于水平所限,书中出现的不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

作 者

目 录

绪论	(1)
第一章 飞行控制系统的主要组成	(5)
1.1 引言	(5)
1.2 敏感元件	(6)
1.2.1 三自由度陀螺	(6)
1.2.2 二自由度陀螺	(7)
1.2.3 加速度传感器	(10)
1.2.4 空速传感器	(12)
1.2.5 高度传感器	(15)
1.2.6 迎角(或侧滑角)传感器	(17)
1.2.7 大气数据计算机	(20)
1.3 系统性能调节元件	(20)
1.3.1 简单滞后网络	(21)
1.3.2 简单超前网络	(22)
1.3.3 积分器和微分器	(23)
1.3.4 放大器	(24)
1.3.5 滤波器	(25)
1.4 执行元件	(27)
1.4.1 驾驶员	(28)
1.4.2 舵机	(29)
第二章 飞行控制系统分析和综合的有关理论	(34)
2.1 引言	(34)
2.2 根轨迹法	(36)
2.2.1 根轨迹作图基本规则	(38)
2.2.2 非最小相位系统	(39)

2.2.3	具有时间延迟环节的系统	(40)
2.2.4	多回路系统	(41)
2.3	伯德图法	(42)
2.3.1	非最小相位系统	(45)
2.3.2	具有时间延迟环节的系统	(46)
2.4	系统时域响应与 S 域响应之间关系	(48)
2.4.1	二阶系统	(48)
2.4.2	高阶系统	(51)
2.5	常用的系统性能指标	(53)
2.5.1	时域响应指标	(53)
2.5.2	频域响应指标	(57)
2.6	多回路、多变量控制系统	(59)
2.6.1	飞机-自动器系统运动方程	(60)
2.6.2	飞机-自动器系统传递函数	(63)
2.7	等效系统	(69)
2.7.1	等效系统数学模型	(71)
2.7.2	等效系统拟配方法	(72)
2.8	系统灵敏度	(73)
2.8.1	灵敏度函数定义	(74)
2.8.2	特征根值灵敏度	(76)
2.8.3	Bode 灵敏度	(79)
第三章	基本的纵向反馈控制	(81)
3.1	引言	(81)
3.2	飞机的纵向传递函数	(83)
3.3	升降舵通道中的俯仰角及其角速度反馈信号	(87)
3.3.1	俯仰角反馈信号	(87)
3.3.2	俯仰角速度反馈信号	(99)
3.4	升降舵通道中的速度和加速度反馈信号	(102)
3.4.1	速度反馈信号	(103)
3.4.2	加速度反馈信号	(104)
3.5	升降舵通道中的迎角和法向加速度反馈信号	(106)
3.5.1	迎角反馈信号	(107)

3.5.2	法向加速度反馈信号	(109)
3.6	升降舵通道中的高度及高度微分反馈信号	(114)
3.6.1	速度稳定性	(115)
3.6.2	高度反馈信号	(118)
3.6.3	高度微分反馈信号	(121)
第四章	基本的横侧向反馈控制	(125)
4.1	引言	(125)
4.2	飞机横侧向传递函数	(126)
4.3	副翼通道中的倾斜角及其角速度反馈信号	(131)
4.3.1	倾斜角反馈信号	(131)
4.3.2	滚转角速度反馈信号	(139)
4.4	副翼通道中的其他反馈信号	(141)
4.4.1	侧滑角反馈信号	(141)
4.4.2	侧向加速度反馈信号	(144)
4.4.3	偏航角速度反馈信号	(145)
4.4.4	偏航角反馈信号	(146)
4.5	方向舵通道中的偏航角速度反馈信号	(148)
4.6	方向舵通道中的其他反馈信号	(150)
4.6.1	侧滑角反馈信号	(150)
4.6.2	侧向加速度反馈信号	(154)
4.6.3	偏航角反馈信号	(154)
4.7	飞机重心侧向位移及其导数反馈信号	(156)
4.7.1	在副翼通道中的反馈	(157)
4.7.2	在方向舵通道中的反馈	(160)
第五章	改善飞机稳定性和操纵性的控制	(162)
5.1	引言	(162)
5.2	纵向阻尼器系统	(162)
5.2.1	控制系统相迟后限制	(165)
5.2.2	阻尼器增益系数限制	(167)
5.2.3	阻尼器对飞机操稳特性影响	(169)
5.3	纵向增稳系统	(171)
5.4	纵向控制增稳系统	(175)

5.4.1	带有积分反馈信号的飞行控制系统	(176)
5.4.2	静不稳定飞机飞行控制系统	(178)
5.5	飞机纵向平衡特性的控制	(184)
5.6	偏航阻尼器系统	(186)
5.7	倾斜阻尼器系统	(191)
5.8	副翼方向舵交联系统	(195)
5.9	偏航增稳系统	(198)
第六章	飞机姿态角运动的控制	(201)
6.1	引言	(201)
6.2	俯仰角控制系统	(203)
6.3	倾斜角控制系统	(211)
6.4	航向控制系统	(217)
6.4.1	偏航通道内的航向控制系统	(218)
6.4.2	倾斜通道内的航向控制系统	(221)
第七章	飞机质心运动的控制	(226)
7.1	引言	(226)
7.2	飞行高度稳定系统	(227)
7.2.1	俯仰角调节方案	(228)
7.2.2	过载调节方案	(232)
7.3	飞行速度控制	(235)
7.3.1	飞行速度稳定系统	(236)
7.3.2	飞行速度控制系统	(240)
7.4	飞行航线控制	(250)
7.4.1	飞行航线稳定系统	(251)
7.4.2	飞行航线控制系统	(252)
7.5	飞行轨迹控制	(256)
7.6	飞机着陆控制	(264)
7.6.1	下滑阶段控制	(266)
7.6.2	拉平阶段控制	(273)
第八章	改善飞机飞行特性的主动控制	(277)
8.1	引言	(277)

8.2 减少飞机静稳定裕度	(278)
8.3 减少机翼上的机动载荷	(280)
8.3.1 运输机的机动载荷控制	(280)
8.3.2 战斗机的机动载荷控制	(284)
8.4 抑制风的影响	(284)
8.4.1 提高乘员舒适性	(285)
8.4.2 降低风引起的机翼载荷	(294)
8.5 气动力的直接控制	(295)
参考文献	(308)

Contents

Introduction	(1)
Chapter 1 Basic Components of Flight Control System	(5)
1.1 Introduction	(5)
1.2 Sensors	(6)
1.2.1 Displacement Gyroscope	(6)
1.2.2 Rate Gyroscope	(7)
1.2.3 Accelerometers	(10)
1.2.4 Airspeed Sensors	(12)
1.2.5 Altitude Sensors	(15)
1.2.6 Flow Incidence Angle Sensors	(17)
1.2.7 Air Data Computers	(20)
1.3 System Controllers	(20)
1.3.1 Simple Lag Network	(21)
1.3.2 Simple Lead Network	(22)
1.3.3 Integrators and Differentiators	(23)
1.3.4 Amplifiers	(24)
1.3.5 Filters	(25)
1.4 Actuators	(27)
1.4.1 Pilot	(28)
1.4.2 Servo Actuator	(29)
Chapter 2 Fundamentals of Flight Control System Analysis and Synthesis	(34)
2.1 Introduction	(34)
2.2 The Root Locus Method	(36)
2.2.1 Fundamental Rule of Drawing Root Locus	(38)

2.2.2	Nonminimum Phase System	(39)
2.2.3	System with Time-Delay Component	(40)
2.2.4	Multiloop System	(41)
2.3	The Bode Method	(42)
2.3.1	Nonminimum Phase System	(45)
2.3.2	System With Time-Delay Component	(46)
2.4	Relationship Between the S-Domain and Time-Domain	(48)
2.4.1	Second Order System	(48)
2.4.2	High Order System	(51)
2.5	Performance Specifications	(53)
2.5.1	Time Domain Specifications	(53)
2.5.2	Frequency Domain Specifications	(57)
2.6	Multiple Loop, Multiple Variable Control System	(59)
2.6.1	Equations of Motion of Aircraft-Automaton System	(60)
2.6.2	Transfer Function of Aircraft-Automaton System	(63)
2.7	Equivalent System	(69)
2.7.1	Mathematical Models of Equivalent System	(71)
2.7.2	Matching Method of Equivalent System	(72)
2.8	System Sensitivity	(73)
2.8.1	Definition of Sensitivities Function	(74)
2.8.2	Eigenvalue Sensitivities	(76)
2.8.3	Bode Sensitivities	(79)
Chapter 3	Elementary Longitudinal Feedback Control	(81)
3.1	Introduction	(81)
3.2	Longitudinal Transfer Function	(83)
3.3	Feedback Signal of Pitch Angle and Pitch Rate to the Elevator	(87)
3.3.1	Feedback Signal of Pitch Angle	(87)
3.3.2	Feedback Signal of Pitch Rate	(99)
3.4	Feedback Signal of Speed Error and Acceleration Error to the Elevator	(102)

3.4.1	Feedback Signal of Speed Error	(103)
3.4.2	Feedback Signal of Acceleration Error	(104)
3.5	Feedback Signal of Angle of Attack and Normal Acceleration to the Elevator	(106)
3.5.1	Feedback Signal of Angle of Attack	(107)
3.5.2	Feedback Signal of Normal Acceleration	(109)
3.6	Feedback Signal of Altitude and Normal Velocity to the Elevator	(114)
3.6.1	Speed Stability	(115)
3.6.2	Feedback Signal of Altitude	(118)
3.6.3	Feedback Signal of Normal Velocity	(121)
Chapter 4	Elementary Lateral Feedback Control	(125)
4.1	Introduction	(125)
4.2	Lateral Transfer Function	(126)
4.3	Feedback Signal of Bank Angle and Rolling Velocity to the Ailerons	(131)
4.3.1	Feedback Signal of Bank Angle	(131)
4.3.2	Feedback Signal of Rolling Velocity	(139)
4.4	Feedback Signal of Other Quantities to the Ailerons	(141)
4.4.1	Feedback Signal of Sideslip Angle	(141)
4.4.2	Feedback Signal of Lateral Acceleration	(144)
4.4.3	Feedback Signal of Yawing Velocity	(145)
4.4.4	Feedback Signal of Yaw Angle	(146)
4.5	Feedback Signal of Yaw Rate to the Rudder	(148)
4.6	Feedback Signal of Other Quantities to the Rudder	(150)
4.6.1	Feedback Signal of Sideslip Angle	(150)
4.6.2	Feedback Signal of Lateral Acceleration	(154)
4.6.3	Feedback Signal of Yaw Angle	(154)
4.7	Feedback Control of Lateral Displacement of Mass	

Center and Lateral Velocity	(156)
4.7.1 Feedback of Lateral Displacement and Lateral Velocity to the Aileron	(157)
4.7.2 Feedback of Lateral Displacement and Lateral Velocity to the Rudder	(160)
Chapter 5 Improvement on Dynamic Stability and Control	(162)
5.1 Introduction	(162)
5.2 Pitch Damper	(162)
5.2.1 Damper Phase Lag Limitation	(165)
5.2.2 Damper Gain Coefficient Limitation	(167)
5.2.3 Influence of Damper on Stability and Control	(169)
5.3 Longitudinal Stability Augmentation System	(171)
5.4 Longitudinal Control Augmentation System	(175)
5.4.1 Effect of Integral Feedback Signal	(176)
5.4.2 Static Instability Aircraft	(178)
5.5 Pitch Equilibrium Control System	(184)
5.6 Yaw Damper	(186)
5.7 Roll Damper	(191)
5.8 Aileron-Rudder Interconnect System	(195)
5.9 Directional Stability Augmentation System	(198)
Chapter 6 Aircraft Attitude Control System	(201)
6.1 Introduction	(201)
6.2 Pitch Angle Control System	(203)
6.3 Bank Angle Control System	(211)
6.4 Heading Hold Control System	(217)
6.4.1 In Yaw Control Loop	(218)
6.4.2 In Bank Control Loop	(221)
Chapter 7 Aircraft Center of Mass Control System	(226)
7.1 Introduction	(226)
7.2 Altitude Hold Control System	(227)

7.2.1	Regulative Programme of PitchAngle	(228)
7.2.2	Regulative Programme of Normal Load	(232)
7.3	Speed Hold Control System	(235)
7.3.1	Speed Stability	(236)
7.3.2	Speed Control	(240)
7.4	Flight Line Control System	(250)
7.4.1	Flight Line Stability	(251)
7.4.2	Flight Line Control	(252)
7.5	Flight Path Control System	(256)
7.6	Automatic Landing Control System	(264)
7.6.1	Control of Glide Path	(266)
7.6.2	Control of Landing Flare Path	(273)
Chapter 8	Active Control Technology	(277)
8.1	Introduction	(277)
8.2	Reduced Static Stability System	(278)
8.3	Maneuvering Load Control System	(280)
8.3.1	Maneuvering Load Control for Transport Aircraft	(280)
8.3.2	Maneuvering Load Control for Fighter Aircraft	(284)
8.4	Gust Load Alleviation System	(284)
8.4.1	Improving Passenger Comfort Ability	(285)
8.4.2	Decreasing Wing Load by Gust	(294)
8.5	Direct Force Control System	(295)
	References	(308)

绪 论

飞行动力学是研究飞行器在空间运动规律的学科。飞行器的运动是可以按照人们的意愿,通过一定操纵方式来实现的。对于有人驾驶的飞行器来说,驾驶员要保持或实现某个飞行状态时,通常是根据当时实际飞行状态与所期望飞行状态之间的差别,作出判断,然后进行操纵,视其结果是否达到预定要求,如仍未达到或操纵过头,就要继续进行操纵,直到实际的与期望的飞行状态一致为止,驾驶员不再进行操纵。其操纵过程可用图 0-1 示意。

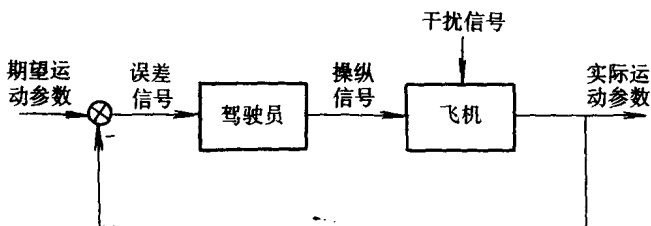


图 0-1 驾驶员操纵飞机过程示意图

显而易见,驾驶员的操纵信号由实际和期望飞行状态运动参数的误差信号确定,并在整个操纵过程中要不断地进行修正,但还与飞机运动参数密切相关。此时,在同样干扰或操纵信号作用下,所得飞机的动态响应特性与飞机固有的动态特性相比,会有所不同。因为飞机实际运动特性是属于闭环系统的特性。

早在本世纪初,为了减轻驾驶员负担,实现精确控制,就考虑采用自动控制装置来替代驾驶员的部分工作,由此各类型的自动驾驶仪相继出现。随着飞机性能的不不断提高,飞行任务的不断复杂,特别是大高度、远航程的运输机和大速度、高机动的战斗机出