

飞行稳定性 和自动控制

Flight Stability and Automatic Control

(美) ROBERT C. NELSON 著

顾均晓 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

飞行稳定性和自动控制

Flight Stability and Automatic Control

(美) ROBERT C. NELSON 著

顾均晓 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2007-034 号

图书在版编目(CIP)数据

飞行稳定性和自动控制/(美)尼尔森(Nelson, R. C.)
著;顾均晓译. —北京:国防工业出版社, 2008. 1
ISBN 978-7-118-05180-3

I. 飞... II. ①尼... ②顾... III. ①飞行稳定性②自动飞行控制 IV. V212. 12 V249

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 133165 号

ROBERT C. NELSON

Flight Stability and Automatic Control/Second Edition

ISBN 0-07-046273-9

Copyright ©1998 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

All Rights Reserved

在 McGraw-Hill Education (Asia) Co. 的授权下,原作品的简体中文版由国防工业出版社在中华人民共和国境内独家出版发行。版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 15 字数 388 千字

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 50.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

译 序

自动驾驶仪对有人和无人驾驶飞机的重要性是不言而喻的,近年来随着美国和以色列等国家在局部战争中大量使用无人飞机,而引发了国际和国内无人飞机研制的热潮。无人飞机飞行的基础是用自动驾驶仪实现的自动飞行控制系统,而飞行力学和自动控制技术则是理论基础,它们通常对应不同的专业,飞行动力学和飞行控制方面曾分别出版过一些专著和参考书。本书的作者尼尔森教授在本科和攻读硕士期间专业是飞行动力学,而在 Pennsylvania 大学读航天工程博士学位则是研究飞行自动控制,后来又在美国空军的飞行动力学试验室担任工程师,负责一种轰炸机机载短距离空空防卫导弹开发,因此它对于这两个学科都有很高的造诣,而在研发导弹中的一些实际工程经验也在这本书中体现出来。本书的特点就在于它把飞机的飞行力学、飞行自动控制和自动驾驶仪设计的整个过程系统综合在一起,而又相当简练,体现出了一工程实用性。

书后多种飞机的稳定性系数等数据的附录相当实用,有很好的参考价值。书中采用美国惯用的坐标系和习惯,这对使用和理解越来越多利用这一坐标习惯的计算机模拟和设计软件也会有帮助。

史新民和丁国辉对译者给与了支持和鼓励,在此表示感谢。刘剑锋博士对译文提出了很多有益的意见,为译文增色不少,在此表示衷心的感谢。

批评指正。

译者

2007 年 3 月

前 言

在飞机发展的早期阶段,懂得飞行稳定性和控制对于飞机设计最终成功起着重要的作用,后来自动控制系统的设计对于商用和军用飞机的迅速发展起到了推动作用,今天军用和民用飞机都极大地依赖于自动控制系统提供人工的稳定性和自动驾驶功能,帮助驾驶员在不利的天气条件下导航和着陆。本书的目标是对飞机稳定性的基本原理、飞行控制、自动驾驶仪的设计作一个综合的处理。

本版的更新之处:在第二版中改进了前面的6章,这些章节覆盖了静态稳定性、飞行控制、飞机动力学和飞行品质等主题,这里包括了更实用的例题和每章的习题,新增加的一些材料使这些课题的内容更翔实。本书最主要的变化是对自动控制理论部分的扩展以及自动控制理论在飞行控制系统设计中的应用。

内容:本书的目标是作为本科高年级和研究生第一年的飞机飞行动力学的教科书,本书的内容包括静态稳定性、飞机运动方程、动态稳定性、飞行或操控品质、自动控制原理及控制理论在自动飞行控制系统综合中的应用。第1章回顾了空气动力学的基本概念、大气特性、几个重要的飞行仪表和一些术语。第2章提出飞机静稳定性和控制的概念,并讨论一些要求的特性可以综合到飞机的设计中,以便提供静态的稳定和足够的控制力。第3章推导刚性飞机的运动方程,讨论对作用在飞机上的空气动力和力矩建立数学模型的方法,使用气动稳定性导数的概念为气动力和力矩建立数学模型。在这章给出估算这些导数的方法,以及一个计算STOL运输机纵向导数的详细例子。第4章和第5章给出了飞机的动力学特性以及自由和强制响

应,第4章讨论纵向动力学,而第5章给出横向动力学。在这两章中解释了刚体运动和驾驶员对飞机操纵难易观点之间的关系。操控或飞行品质是一些控制和动力学特性,它们能够制约驾驶员能否很好地完成特定飞行任务。第6章讨论在任意操纵输入和大气扰动下的运动方程的解。本书的第7章至第10章包含了第2版的主要修改,第7章提供了古典控制理论的回顾,讨论了控制系统的综合和设计。根轨迹方法用于设计控制系统,以便满足给定的时间和频率域性能要求。在第8章中应用古典控制理论设计各种飞行自动控制系统,这些自动控制系统可以用于保持飞机的倾斜角、俯仰角、高度和速度。此外还定性分析了全自动着陆系统。第9章是对现代控制理论概念和设计方法的概述。通过状态反馈的设计,设计者可以定位闭环系统的根,从而得到任何希望的性能;讨论了任意根放置的实际约束以及实现状态反馈控制的必要要求。最后,第10章介绍现代控制的设计方法在飞机自动飞行控制系统设计中的应用。

学习工具:为了有助于理解书中的概念,书中给出了一些实用的例题,并在每章的末尾附有习题。一些例题和习题需要使用计算机,计算机辅助设计软件用于一些例题和指定的习题,需要使用计算机的习题已明显地标出。本书的一个重要特点是用简单练习的方式引入一些材料。例如,首先用限于单自由度运动的方式引入动态稳定性的概念,这样就可以让读者在进行复杂的多自由度运动分析之前获得数学表达和物理意义方面的经验。类似的方法也用于导出控制系统的设计。例如,在建模维持机翼水平姿态的滚动自动驾驶仪的时候,使用了最简单的数学公式表示飞机和控制系统的要素。按照这样的方法读者不必经历过分的数学复杂性就引导到设计过程中来。书末的附录提供了一些飞机的空气动力、质量、几何特性方面的数据,另外附录中还提供了书中所用到的一些数学和分析技术的复习资料。

关于作者:Robert C. Nelson 在 Notre Dame 大学获得航天工程学士和硕士学位,在 Pennsylvania 大学获得航天工程博士学位。Nelson

博士先在 Pennsylvania 州大学担任讲师,后在 Fairborn Ohio 的 Wright-Patterson 空军基地的空军飞行动力学试验室担任工程师,后加入 Notre Dame 大学。在 AFFDL(空军飞行动力学试验室)期间参加一个高级研发项目,为一种空空短距离轰炸机防卫导弹开发新技术。为此获得空军系统司令部的技术成果奖。

1975 年 Nelson 博士作为教师加入 Notre Dame 大学,并参与飞机和导弹的空气动力学和飞行动力学的研究。他目前的研究方向包括细长机身在大迎角时的空气动力学、流体可视化技术、三角机翼空气动力学和飞机稳定性及控制。他撰写过 100 多篇有关研究项目的文章和论文。Nelson 博士是 Notre Dame 大学的航天和机械工程系主任教授,还是政府和工业组织的高级顾问;他是注册职业工程师,美国航空和航天学会(AIAA)成员。他担任了 1982 年 AIAA 大气飞行器会议的首席主席,1983 年—1985 年 AIAA 大气飞行器技术委员会主席。Nelson 博士从 1986 年—1989 年担任 AIAA 应用空气动力学技术委员会成员。其它职业活动包括担任 AIAA 支持的四个短期学习和国内研究课程的讲师和协调员(1982 年,1984 年,1989 年,1995 年)。他也是 AGARD 讲师(1991 年,1993 年,1995 年,1997 年)。1991 年 Nelson 博士被 AIAA 和 ASEE 授予 John Leland Atwood 奖,这个奖项每年授予对航天工程教育做出贡献的人员。

目 录

第1章 引言	1
1.1 大气中的飞行力学	1
1.2 基本定义	3
1.2.1 流体	3
1.2.2 压强	3
1.2.3 温度	4
1.2.4 密度	4
1.2.5 黏度	4
1.2.6 马赫(Mach)数和声速	6
1.3 空气静力学	7
1.3.1 静止流体中压强的变化	7
1.4 伯努利方程的推导	9
1.4.1 不可压缩流体的伯努利方程	10
1.4.2 可压缩流体的伯努利方程	11
1.5 大气	12
1.6 空气动力学的一些术语	19
1.7 飞机仪表	22
1.7.1 气压数据系统	23
1.7.2 空速表	23
1.7.3 高度表	26
1.7.4 爬升速率表	27
1.7.5 马赫表	29
1.7.6 迎角(攻角)指示器	30

1.8 总结	33
习题	33
参考文献	35
第2章 静态稳定性和控制	36
2.1 历史回顾	36
2.2 引言	41
2.2.1 静态稳定性	42
2.2.2 动态稳定性	42
2.3 静态稳定性和控制	44
2.3.1 纵向静态稳定性的定义	44
2.3.2 飞机各部分的贡献	45
2.3.3 机翼的贡献	46
2.3.4 尾翼的贡献——后尾翼	48
2.3.5 鸭翼——前置尾翼表面	54
2.3.6 机身的贡献	54
2.3.7 动力影响	57
2.3.8 定杆中性点	58
2.4 纵向控制	63
2.4.1 升降舵效率	64
2.4.2 配平时升降舵角度	66
2.4.3 X_{NP} 的飞行测量	69
2.4.4 升降舵铰链力矩	70
2.5 操纵杆力	73
2.5.1 配平调整片	74
2.5.2 操纵杆力梯度	74
2.6 方向稳定性定义	76
2.6.1 飞机各部分的贡献	77
2.7 方向控制	80
2.8 滚动稳定性	82
2.9 滚动控制	84

2.10 总结	87
习题	88
参考文献	99
第3章 飞机的运动方程	100
3.1 概述	100
3.2 刚体运动方程的推导	101
3.3 飞机的朝向和位置	105
3.4 重力和推力	108
3.5 小扰动原理	110
3.6 空气动力的力和力矩的表达	113
3.6.1 对前向速度的导数	115
3.6.2 对俯仰速度 q 的导数	117
3.6.3 对迎角的时间变化率的导数	118
3.6.4 对滚动速率 p 的导数	120
3.6.5 对偏航速率 r 的导数	123
3.7 总结	132
习题	132
参考文献	134
第4章 纵向运动(定杆)	135
4.1 历史回顾	135
4.2 二阶微分方程	137
4.3 纯俯仰运动	142
4.4 定杆纵向运动	151
4.4.1 运动方程的状态变量表示	152
4.5 纵向近似	157
4.5.1 短周期近似	158
4.6 稳定性导数对纵向运动模式的影响	166
4.7 飞行品质	168
4.7.1 驾驶员的看法	170
4.8 飞行模拟器	174

4.9 总结	176
习题	179
参考文献	184
第5章 横向运动(定杆)	186
5.1 引言	186
5.2 纯滚动运动	187
5.2.1 机翼摇摆	190
5.2.2 滚动控制逆转	192
5.3 纯偏航运动	194
5.4 横向运动方程	199
5.4.1 螺旋近似	203
5.4.2 滚动近似	204
5.4.3 荷兰滚动近似	205
5.5 横向飞行品质	209
5.6 惯性的耦合	212
5.7 总结	213
习题	213
参考文献	218
第6章 对控制或空气输入的响应	219
6.1 引言	219
6.2 非一致大气中的运动方程	222
6.3 纯垂直运动或颠簸运动	226
6.4 大气湍流	234
6.5 谐波分析	235
6.5.1 湍流模型	237
6.6 风切变	238
6.7 总结	241
习题	242
参考文献	243

第7章 自动控制原理——古典方法	244
7.1 概述	244
7.2 劳斯判据	247
7.3 根轨迹法	252
7.3.1 增加极点和零点	257
7.4 频率域技术	260
7.5 时间域和频率域规格	261
7.5.1 从根轨迹得到增益和相位裕度	264
7.5.2 高阶系统	267
7.6 稳态误差	269
7.7 控制系统设计	273
7.7.1 补偿	275
7.7.2 前向通路补偿	277
7.7.3 反馈路径补偿	279
7.8 PID 控制器	282
7.9 总结	286
习题	287
参考文献	291
第8章 古典控制理论在飞机自动驾驶仪设计中的应用	293
8.1 概述	293
8.2 飞机的传递函数	294
8.2.1 短周期运动	295
8.2.2 长周期运动	297
8.2.3 滚动运动	299
8.2.4 荷兰滚动近似	299
8.3 控制舵面的执行机构	304
8.4 位移量自动驾驶仪	306
8.4.1 俯仰位移量自动驾驶仪	307
8.4.2 滚动姿态自动驾驶仪	312
8.4.3 高度保持控制系统	316

8.4.4	速度保持控制系统	322
8.5	稳定性增强	326
8.6	仪表着陆	328
8.7	总结	332
	习题	333
	参考文献	336
第9章	现代控制理论	337
9.1	概述	337
9.2	状态空间模型	337
9.2.1	状态转移矩阵	343
9.2.2	状态方程的数值解	348
9.3	规范型变换	352
9.3.1	不相同实数特征值	353
9.3.2	重复特征值	356
9.3.3	复数特征值	359
9.4	可控性和可观性	363
9.5	状态反馈设计	367
9.5.1	确定反馈增益的数值方法	370
9.5.2	多输入—输出系统	374
9.5.3	特征值的位置	375
9.6	状态变量重构:状态观测器	376
9.7	最优状态空间控制系统的设计	380
9.8	总结	384
	习题	384
	参考文献	389
第10章	现代控制理论在飞机自动驾驶仪设计中的应用	391
10.1	引言	391
10.2	稳定性增强	391
10.2.1	纵向稳定性增强	391
10.2.2	横向稳定性增强	400

10.3	自动驾驶仪设计	405
10.4	状态观测器	411
10.5	最优控制	414
10.6	总结	420
	习题	420
	参考文献	424
附录 A	大气数据表(ICAO 标准大气)	426
附录 B	几种飞机的几何、质量和空气动力特性	432
	参考文献	447
附录 C	拉普拉斯变换和矩阵代数	448
附录 D	控制系统分析方法	458

第1章 引言

1.1 大气中的飞行力学

大气中的飞行力学是一个很广泛的题目,它包含了三个主要的内容:飞机性能、飞行动力学、气动弹性力学。过去这三者之间是相互独立的,但是由于现代飞机结构上的弹性特点使得他们之间的相互作用不能再被忽略。例如,飞行载荷能够引起飞机显著的结构变形,可以预料,这可以引起飞机空气动力和稳定性的变化,从而影响飞机的性能和空气动力的表现。

飞机性能研究的问题是要确定飞机的性能特征,如最大航程、续航时间、爬升率、起飞和着陆距离及飞行路径的优化。为了计算这些性能特征,人们通常把飞机看成受到重力、升力、阻力、推力作用的质点。性能计算的精确性依赖于升力、阻力、推力求取的精确性。

飞行动力学所关心的是受到内部和外部产生的扰动时飞机的运动,我们特别关心的是飞行器的稳定性和控制能力。为了足够精确描述飞机的刚体运动,需要考虑完整的六自由度运动方程,这同样要精确计算作用在飞机上的空气动力和力矩。

大气中的飞行力学这个题目下的最后一项内容是气动弹性力学,气动弹性力学研究静态和动态空气弹性现象。本质上,气动弹性力学研究惯性、弹性、空气动力之间相互作用的现象。与挠性飞机相联系的问题包括控制逆转、机翼发散、操纵面的颤振等很多问题。

本书可分为三个部分:第一部分讨论大气的性质、静稳定性和控制的概念,推导飞机的运动学和动力学模型;第二部分讨论控制

输入和空气扰动引起的飞机运动;第三部分讨论飞机的自动驾仪。尽管没有专门的章节讨论飞机的气动弹性力学性能,本书还是尽量使读者至少以定性的方式了解飞机的性能要求和气动弹性现象如何影响飞机的稳定性和控制特性。

图 1.1 的高性能飞机可以用来说明构成大气飞行力学的这三个学科之间的相互作用,X-29A 飞机应用了控制、结构、空气动力学方面最先进的技术,这些技术使它的性能优于通常的战斗机。这样一种设计如果不注意到飞机性能、气动弹性力学、稳定性和控制之间的相互作用是不可能实现的。实际上,这种革新的设计要逐渐平衡各学科之间的要求,达到希望的性能改进。



图 1.1 组合了多种先进技术的 X-29A 飞机

作用在飞机上的力和力矩依赖于飞机在飞行过程中穿过的大气性质,在后面的小节中将回顾流体力学的一些基本概念,这有助于我们理解大气的性质,这是理解飞机飞行力学的基础。此外,还将讨论一些重要的飞机仪表,这些仪表给飞行员提供必要的飞行信息。