

飞行控制

[德] 鲁道夫 布罗克豪斯

金长江 译

肖业伦 校

国防工业出版社

著作权合同登记 图字:军—1999—016 号

图书在版编目(CIP)数据

飞行控制/(德)布罗克豪斯著;金长江译. —北京:
国防工业出版社,1999.9
书名原文:Flugregelung
ISBN 7-118-02096-6

I. 飞… II. ①布… ②金… III. 飞行控制 IV. V 249.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 16163 号

Die Deutsche Bibliothek-CIP-Einheitsaufnahme
Brockhaus, Rudolf;
Flugregelung/Rudolf Brockhaus. Mit einem
Geleitw. von Marc Péglerin. -
Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris;
Tokyo; Hong Kong; Barcelona; Budapest:
Springer, 1994
ISBN 3-540-55416-5

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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 41¼ 940 千字

1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:79.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

Rudolf Brockhaus

Flugregelung

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo
Hong Kong Barcelona Budapest



作者简介

鲁道夫 布罗克豪斯博士、教授(1933 年—)是德国著名的飞行控制学者,现任德国航空航天研究院(DLR)飞行力学研究所科学顾问、欧洲航空研究和技术组织(GARTEUR)顾问专家,从事“鲁棒飞行控制,一个设计挑战”(Robust Flight Control, A Design Challenge)活动。曾就读于达姆施塔特工业大学和柏林工业大学,1967 年在布伦瑞克工业大学获博士学位。曾任德国航空航天研究院飞行制导研究所控制系统部主任、布伦瑞克工业大学飞行控制研究所所长。参与德国工业部门 VTOL 项目、VJ 101X1、VAK 191 和 Do 31 发展研究,承担德国研究委员会(DFG)和德国航空航天学会(DGLR)多项研究任务。发表论文近百篇、著作 3 本,指导培养 37 名博士。讲授过基本控制理论、飞行控制系统、多变量控制、离散时间控制等多门课程。长期从事飞机和发动机建模及控制工作,在多变量和自适应控制、系统建模、系统辨识、非线性控制、非线性观测器、卡尔曼滤波、故障测定、模式识别等方面卓有建树。曾在法国、英国、意大利、中国交流讲学。

译者的话

1996年初,译者收到德国布伦瑞克工业大学飞行控制研究所所长山策(Schänzer)教授赠寄由布罗克豪斯教授撰写的《飞行控制》一书,该书引用了直到1994年为止的大量文献和资料,而且征得德国航空研究和工业部门很多飞行力学与飞行控制学者的意见,是目前德国航空科技界很有影响的一部著作,德国、荷兰有关大学把它作为主要的教学参考书。该书对我国航空界也很有参考价值。由于原书用德文撰写,我国的读者面又较窄,在国防工业出版社的支持下,遂从1997年底开始了本书的翻译工作。

布罗克豪斯教授自1969年以来,一直在布伦瑞克工业大学讲授《飞行控制》这门课,他的讲课深受学生的欢迎,译者曾听过他的课。80年代中期以前,他的讲课主要以他在70年代撰写的两本《飞行控制》书为主。80年代之后,电传操纵、计算机控制技术的实用化,使飞行控制发生了革命性的变化。布罗克豪斯教授适时吸收这些最新的科技成果,在他退休之前,历时3载有余,撰写了这本内容丰富的著作。这本著作凝聚了作者对飞行控制这一专业领域的观点和看法,也从一个侧面反映了德国在这一领域的主要研究活动,例如,在推力矢量验证机X31-A方面的研究情况。

作者在书中贯彻以人为中心的飞机自动化思想,把飞行力学、飞行控制和导航以及飞行管理有机地结合起来,重在讨论飞行控制系统设计的基本原理和总体思想,这就给读者以启迪思考发展的空间。

航空科学技术的敏感性,使研究人员、特别是在校的博士研究生、硕士研究生难以找到数据完整的示例飞机,常常要花费相当多的时间和精力。为此,在允许使用的资料范围内,作者在书中给出5种飞机的示例数据,系统地编排了飞机运动的数学模型,这给教学和研究工作提供了很大方便。

征得国防工业出版社同意,中译本尊重保持原书的格式。例如:外文一律用正体;物理矢量用字母上方加箭头表示;矩阵用字母下方划横线表示;参考文献在中译本中亦按原书方式标记;原书符号定义按德国国家标准DIN 9300,其中有些符号定义与我国现行标准不一致;原书中量和单位基本上用国际单位制,但鉴于英、美资料中仍用英制,故原书中仍有不少地方沿用英制单位,必要时在中译本中作了注解;航空科技中的一些通用术语在原书中均用英文附在括号中,为便于中国读者理解,中译本中均予以保留,并附上缩写,另外,作者又为中译本补充了一些缩写;等等。

在翻译过程中发现的一些笔误和疏漏,在征得作者确认后,在中译本中均作了更正。

对原文中一些理解疑难之处,译者得到布罗克豪斯教授的热心指教,并为中译本寄来插图的复印件。在办理中译本版权许可过程中,也得到布罗克豪斯教授的友好帮助。在此,译者谨向布罗克豪斯教授表示诚挚的谢意。

布伦瑞克工业大学是德国航空航天科学学科设置最为齐全的著名大学,是与北京航空航天大学结成科技文化交流的友好大学。我国航空院校多名教师曾先后在该大学学习工作。译者借此机会向德国朋友和同事表示感谢,并以此书作为两校航空科技交流的一页。

翻译这样一本内容广泛的著作,是一项很繁重的工作。刘玉芳副教授、彭兢、王衍洋、王志红、何晓波、李宁、郭馥立各位参加了中文译稿的校对整理及公式推导;肖业伦教授对译文稿作了仔细校对,并提出许多修改建议。对于他(她)们的帮助和合作,译者谨在此表示衷心的感谢。另外,还特别要向在此期间与我同甘苦、给我理解和支持的我的夫人表示我的谢意。

本书由中国人民解放军总装备部专项资金资助出版。在翻译工作中还得到北京航空航天大学出版社许传安社长的大力支持。译者在此一并谨致谢意。

译 者

1999 年 1 月于北航

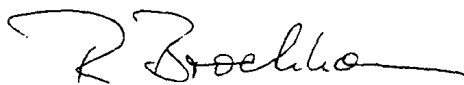
作者为中译本写的序言

我的《飞行控制》的中文译本在中国这个世界上人口最多的国家出版,这是我的一项极高的荣誉。这之所以能成为现实,我要感谢我尊敬的同事、北京航空航天大学金长江教授先生,他在一年多时间内为本书的中文翻译付出了辛勤的劳动,在此我谨向他致以美好的祝愿。我还要向他的夫人、他的助手,特别向对中文译稿进行艰苦的校译工作的北京航空航天大学肖业伦教授先生、向为仔细编辑出版中文译本的国防工业出版社表示谢意。

本书的德文版本的撰写修订工作是在1991年5月到1994年3月期间进行的,除了我的教学工作和研究工作外,它占用了我所有的时间。本书的基础是自1969年我在布伦瑞克工业大学(Technische Universität Braunschweig)任教授以来的讲课,以及我的两本有关飞行控制的教科书《飞行控制 I —— 作为控制对象的飞机(1977)》和《飞行控制 II —— 控制系统设计(1979)》。另外,1981~1987年在中国西北工业大学(西安)和布伦瑞克工业大学关于飞行控制领域的合作交流的讲学,也充实促进了这一教学领域。1984年我的《飞行控制 I —— 作为控制对象的飞机(1977)》一书的中文译本已出版。在北京航空航天大学访问期间的学术报告和讨论,以及同西安和北京来布伦瑞克工业大学留学的中国访问学者的交流,对拓宽我的教学领域也获益匪浅。

同中国大学界在航空航天技术领域的深入交往,不仅使我在这个领域获得了中国科技工作者的友谊,而且这些交流活动也使我认识了解了中国人民和她的文化。我要感谢对许多中国城市和地区的访问,使我亲眼目睹了这个伟大国家的美丽和丰富多姿。因此,我特别高兴能通过本书向我的中国朋友表示我的感激之情。希望这本书能够有助于中国很多科技工作者和工程师的教学、研究发展工作,尤其能有益于年轻的大学生和研究生。但是,所有的读者应当记住,没有扎实的理论基础就没有实践的进步;反之,没有实践的检验,也就没有理论上的认识提高。

我期望本书能有助于许多读者尽量好、并尽量容易地进入这一富有魅力的专业领域。



1998年10月22日于路耳斯(法)

原书序言

“驾驶员还是自动驾驶仪”——绪论第1节的标题就可以作为鲁道夫 布罗克豪斯教授刚刚完成的这本内容丰富的著作的书名。

与其它技术部门相比,航空跟随科学技术发展的步伐更快。航空无非是指具有多种能力的大型载运工具,在分解了它的任务之后,人力图把这些任务转交给机器,以解脱疲劳或者免除重复性工作的单调乏味。人有时要把一些繁重的或者非常危险的工作交给机器去完成——幸亏在航空中不是这样。

然而,在自动化技术发展最迅速的1950~1970年期间,这种任务转交之快是始料不及的。此后,控制工程人员认识到,在“系统”中必须尽量把人像技术组成部分那样加以考虑,这是一个有待全面解决的难题。

假如大气空间只有飞机,那么全部(包括加速飞行阶段和起飞阶段)飞行都可以自动化。然而,天空并不只有飞机,在空中交通稠密区域,驾驶员必须不断修改“飞行计划”数据。另外,总会有意外情况——尽管很罕见,因为没有绝对的可靠性,意外情况总是存在的。因而,机组、地面指挥与飞机之间经常要进行通话联络。

我认为,本书的重要贡献在于,除了飞行原理和系统工程,本书还计入了人的行为,在定义设计准则时也把它视为子系统之一,并且涉及全部飞行的管理。

本书取名“驾驶员还是自动驾驶仪”不是更确切么?

Marc Pélegrin 教授
ENSAE 大学,图鲁兹
巴黎(国家)科学院通信院士

原书前言

本书原本想作为《飞行控制 I —— 作为控制对象的飞机(1977)》和《飞行控制 II —— 控制系统设计(1979)》这两本书的修订本。然而,在写作过程中,却形成了这本在目标想法和结构上全新的、而且素材大大扩展了的著作。新的版本首先是基于这样的事实:飞行控制技术近 15 年来发生了革命性的变化。1987 年,A 320 首次实现了民用运输机无机械主操纵、纯电传操纵飞行。在控制任务不断增加的情况下,计算机逐步承担监控、导航和飞行计划等项任务,使旅客机驾驶舱乘员从 4 个减少到 3 个,后来又减少到 2 个。数字技术的应用,使各种互不相关的专用控制器得以综合成一个集成总系统,能作出新的、过去只是纸面上的解答。在此期间,在军用领域,随控布局(Control Configured Vehicle,CCV)概念已成为现实;而在民用飞机方面,用控制技术改善飞行性能或者降低结构重量,已不再是空想了。

重新编写的第二个原因是:近 15 年来我本人在教学和研究工作中所经历的学习过程。在布伦瑞克工业大学(TU Braunschweig)、中国西北工业大学和印度尼西亚万隆工学院的讲课,在进修班以及在与学生和助手的交谈中,一些困难的关系用简单的模型概念常常就变得比较容易理解。在飞行控制器设计、驾驶员与控制器的协同、建模、仿真、系统辨识、非线性滤波,以及飞行试验验证等方面的研究实践,加深了我对实际问题复杂性的认识。本书得到布伦瑞克工业大学和德国航空航天研究院(DLR)布伦瑞克研究中心和同事在两个专门研究项目“SFB 58——飞机控制引导(1969~1983 年)”和“SFB 212——空中交通中的安全(1983~1994 年)”的多年紧密合作的决定性激励。最后,我从我的飞行控制研究所的朋友和同事贡特·山策(Gunther Schänzer)教授的研究工作中学到很多东西。他富于创新的思想对我的写作具有重要影响。他和他的助手在飞行控制器及其实现、风的测量和风场建模、用惯性导航和差分 GPS 实现飞行导航等方面都达到一个新的高度。

飞行控制旨在宽广的高度和马赫数范围内完成对 6 个自由度运动的有人驾驶并载运人的飞机的控制任务。飞机装备的控制系统与要控制的过程一样复杂和多样,两者都在持续不断地向前发展。因此,在一本控制教科书中同时阐述一些专门问题,或者一些实际的、但只在某种情况下有用的短命的特殊解是没有什么意义的。如果能尽量简单地介绍基本原理和关系,则复杂的细节就很容易理解了。所以,在本书中我试图明确介绍一般的基本原理,系统概要地编排各种特殊解。为此,不仅需要明确的定义和精确的数学方程,而且还需要简单的并能应用在其它方面的模型形式,以及有效范围明确限定的近似解。

飞行控制的任务与飞行力学和飞行引导的问题完全相同。从改善飞行品质(稳定性、操纵性和扰动特性)直到在日益稠密的空中交通中安全引导变化的飞行航迹,它们都面临同样的问题。文献中常常只涉及这两种互相关联的任务的一个方面,而我则试图尽可能在

上面所述的出发点下把两者互相结合起来。

现代飞行控制器不能再以线性传递函数作为基础(按极点和零点配置),而需要广泛的过程知识,因此,本书有近一半的内容介绍过程模型和控制系统。对仿真和飞行控制器提出的一些新的任务,要求数学模型的精度和完整性越来越高。在所有的工作场合都有迅速发展的计算机技术可使其实现数字化。因此,与我前两册书一样,本书仍然采用非线性矢量方程。这种完整的编写方式的好处是不易出现错误,可以直接转变成计算程序,在任何情况下都可根据相应的简化,导出特殊情况下的近似表达式。

本书在编写中,在飞行力学、任务类型和品质要求基础上,突出了传统的和现代的控制结构形式的发展,从而有助于理解传统的和新型的控制器,并对其结构的进一步发展有所启发。为研究发展新的解法,需要引进各种飞行力学和控制工程方法。控制器结构形式以 PID—控制器、串联控制、状态矢量反馈和非线性控制等经典的基本结构为基础,后者已扩展到多变量系统。

本书共 20 章,分成 7 篇。第 1 章是为对本领域不太熟悉的读者介绍一些**一般的概念**,可以说,这一章是按初学者水平对全书内容的缩写,以便于理解并揭示其关联性。

第一篇(2~4 章)介绍描述飞机在扰动大气中运动所需要的**物理基础知识**。首先,定义了所有的飞行力学变量和导航变量,以及它们之间的关系;其次,介绍空气动力和发动机推力的产生及作用;最后,当然要介绍大气运动的模型化及其与飞机的相互作用。

第二篇(5~8 章)用来推导过程的**数学模型及其分析**。非线性矢量微分方程被逐步加以简化,最后再进行线性化。用结构框图和信号流程图可以很容易地看出复杂的内在关系。不仅用非线性方程,而且也用线性方程分析研究飞机的固有特性和操纵特性。

第三篇(9~11 章)介绍**控制器设计的边界条件**。这三章首先介绍飞机与控制器之间的接口,即测量方法和传感器,操纵系统和执行元件,其中也包括飞行力学和飞行导航方面的边界条件。

第四篇(12~13 章)简要介绍在飞行控制中被证明是特别适用的**控制方法**,重点放在修改动态特性、主要用于修改旋转自由度动态特性的控制器结构,以及那些用于引导过程、对控制移动自由度和航迹引导特别重要的内容。但是,我放弃了对控制理论和设计方法的详细介绍,而是以已具备了这方面的基础知识为前提,因为在这方面已有很多优秀的教科书。

第五篇(14~17 章)介绍最主要的**飞行控制器结构**。在选择对改善稳定性有积极作用的反馈之后,介绍用于改进飞行品质的纵向运动和横向运动的基本控制器。通过对扩展飞行包线、称为“主动控制”概念的最重要措施的讨论,进一步深入这种研究。

然后,介绍典型的自动驾驶仪,包括稳定巡航飞行阶段的高度、速度和航向的各种控制器,以及自动着陆系统。最后,介绍变化飞行航迹引导的“耦合”(综合)控制器的新近进展,其中有一些已应用到商业系统,有些则刚刚在试验系统上实现。它们都以从实用中选择出的状态反馈与非线性控制相结合为主要特征,是从飞行力学过程知识中发展而来的。与此有关,还要介绍生成理想航迹的一些新的概念以及由此导出的理想状态的生成。此外,还要介绍在其它机载系统(导航、飞行管理)中包括的飞行控制系统。

驾驶员和控制系统之间的接口在单独一章(18 章)中介绍,研究基于电传操纵(Fly-by-Wire)和智能显示系统(“Flight Director”)、并使飞行控制引导具有高度灵活性的驾驶

员和自动驾驶仪的合作的结构形式。

最后,在第六篇(19~20章)列举总系统的一些实际例子,分别介绍几种军用和民用领域的示例,使前面各章介绍的系统形式具体化和实际化。

附录中重新编排整理了运动方程和参数,使其在形式上更适合进行数值仿真用。为便于量级对比和示例计算,附加了多种示例飞机的飞行力学数据、阶跃响应特性和伯德图,其相应的图表是用 MATLAB[®]制作的。这些数据与 MATLAB 工具箱一起附在一张磁盘上,供飞行仿真和控制器设计使用。附录中还附上常用的量和常数及标准大气表。

本书是面向航空工程和控制工程的大学生^①的,可以作为在本领域拓宽授课和进修课程的基础。本书同样也适于研究机构、航空公司和机构中的工程师,不仅适合飞行控制方面的专业人员,也可供系统工程师使用。为使本书不仅能作为教科书,而且也能作为参考书,故素材按系统学观点分类,而未完全按教学观点分类,而且书中还常常加入互相参照的内容。

为便于分类素材,按章列出参考文献,参考文献列在第一次被引用的那一章中。详细的辞条目录有助于读者确定概念和寻找出处^②。书中黑体字行标明提法的定义。飞行控制中许多通用的英文术语同样也作了说明,尽量用德文术语来替换它们,并在文中用斜体^③说明。常用的缩写也列在附录^④中。

我尽量采用现行标准规定的定义、术语和公式符号。那些现行标准不够用的地方,我按同样的原则定义了一些新的量和符号。飞行技术和控制技术变量彼此同时编排在附录的符号说明中。物理矢量用字母上方加箭头来标记,一般的矢量,例如状态矢量和矩阵则与此不同,是用字母下方划横线来标记,这与控制工程文献中通用的标记方法是一样的。每个方程都标记有下文中要采用的公式编号,以便能查找它们的推导过程。

本书是我向我的老师和所引用的参考文献的学习心得,我把它重新加以组织整理,希望这能有助于对这个有意义的领域的理解。许多心得是我从我的科研助手和博士研究生以及大学界和航空工业部门的同行那里学来的。在此,我怀着感激的心情把他们那些好的想法转达给读者。他们的鼓励、提示和批评对完善本书的编写极有裨益。我想代表读者对我以前的老师温弗里德·奥拜尔特(E. H. Winfriedt Oppelt)工学博士、教授,向我的博士导师多伊奇(Karl Heinrich Doetsch)工学博士、教授,向我过去的助手阿勒斯(Wolfgang Alles)工学博士(现在 DASA-Dornier 公司)表示谢意。阿勒斯博士从本书写作计划直到完成,一直陪伴这本书稿,在多次讨论中给了我许多有价值的启发。

在书稿修改整理过程中,很多同事提出了修改建议,给我以支持帮助。我特别要感谢胡梅尔(D. Hummel)工学博士、教授(布伦瑞克工业大学);西默(A. Siemer)硕士(汉诺威大学);德国航空航天研究院飞行力学研究所所长哈默尔(P. Hamel)工学博士、教授和他的助手布赫霍尔兹(J. J. Buchholz)工学博士、哈恩(K. U. Hahn)工学博士、罗塞诺(G. Rosenau)工学硕士;和威廉(K. Wilhelm)工学博士、教授(现在柏林工业大学);Airbus 公司德国分部的希赛纳(St. Hiesener)工学博士、赛德尔(H. Seidel)工学博士和卢可纳(R.

① 德国大学毕业相当于我国的硕士研究生毕业。——译者

② 在中译本中已删去。——译者

③ 在中译本中用黑体字。——译者

④ 中译本中又补充了一些缩写术语。——译者

Luckner)工学博士;莱韦达克(S. Levedag)工学博士(DASA, Ottobrunn);以及我的助手东克尔(W. Dunkel)工学硕士、格林厄(H. Göllinger)工学硕士和耶里希(F. Jelich)工学硕士。我还要感谢施普林格出版社(Springer Verlag)对重新撰写本书的促进和对我的信任。

本书第一个提纲是在没有研究工作的学期完成的。除了我的教学和研究工作外,为撰写书稿则全力投入两年多时间。在这段时间里,我的家庭与我同甘苦,特别我亲爱的夫人寂莫地渡过许多夜晚和周末,对于在此期间她所忍受的、缺少我的关心表示深深的歉意,她以她的理解给予我完成这部著作的力量和勇气。

鲁道夫 布罗克豪斯

(Rudolf Brockhaus)

1993 年 11 月于布伦瑞克

内 容 简 介

本书介绍了现代飞行控制系统初步设计需要的基础知识,推导了在扰动大气中飞机运动的数学模型,讨论了飞机的稳定性、操纵性和观测性,研究了飞行控制器设计需要的测量系统、操纵系统及其模型化,从飞行物理角度研究了满足飞行力学和飞行控制引导任务要求的控制器结构设计方法。

本书按系统学方法介绍了飞机特性及控制系统的作用。为了理解系统结构,采用信号流图作为状态方程和传递函数之间的连接纽带。引导读者从了解简单的阻尼器、自动增稳和姿态控制器,到了解复杂的全系统(自动飞行控制系统)。实际飞机的示例数据和校验算例充实了素材结构,并列出大量丰富的参考文献。附带的仿真程序(MATLAB 4.0)及算例飞机数据,便于读者在计算机上理解各种解决方法。

本书是面向航空工程的飞行力学和飞行控制专业的研究生的,可以作为在本领域拓宽授课和进修课程的基础,也可以作为航空工程大学生的参考书。它同样也适用于航空工程研究部门和航空公司的技术人员。

本书附带磁盘软件说明

它涉及 1 张 1.44MB 的 3.5" 磁盘, 在 PC 机 MS-DOS 6.2 环境下格式化。磁盘内包括在目录 FC 中的 ASC II 数据文件和另外 4 个子目录, 它们按 MATLAB 4.0 语言运行。用户可在文件 readme.m 中得到提示。

菜单引导的程序含本书附录所列数据的 15 种飞行状态和 1 个控制器接口, 使用者在阅读本书的同时, 用这些数据可以设计自己的控制器, 并可以由相应的结果曲线直接而迅速地看出控制器的作用效果。

本软件同样安装在美国 Mathworks 公司的 Internet-File-Server 中, 有兴趣的用户可通过 Internet 获得最新资料。

目 录

1 绪论	1
1.1 驾驶员还是自动驾驶仪?	1
1.1.1 作为“飞行学员”的自动驾驶仪	2
1.1.2 作为飞行管理者的驾驶员	3
1.2 物理基础	5
1.2.1 描述方法	6
1.2.2 升力和阻力	6
1.2.3 力矩平衡	8
1.2.4 飞机的操纵	9
1.2.5 动力装置	10
1.2.6 风和大气紊流	12
1.3 过程数学模型	15
1.3.1 对称运动的方程	15
1.3.2 近似方程	16
1.3.3 方程分析	18
1.3.4 飞行航迹方程	19
1.4 飞行控制器设计的边界条件	20
1.4.1 控制对象的特点	20
1.4.2 控制的任务	22
1.4.3 设计规范	23
1.5 飞行控制系统的构成	24
1.5.1 阻尼器(增稳系统)	24
1.5.2 姿态控制器	26
1.5.3 高度控制器	27
1.5.4 弯曲航迹的自动控制引导	28
1.5.5 输入控制(电传操纵)	29
1.5.6 总的控制系统	29

物理基础篇

2 运动变量的定义	33
2.1 符号	33

2.2	飞行力学变量	35
2.2.1	飞机相对地面的姿态的确定	35
2.2.2	航迹速度矢量的确定	36
2.2.3	空气动力学变量的确定	38
2.2.4	描述风影响的角度	40
2.2.5	运动学关系的简化描述	41
2.2.6	速度方程	41
2.2.7	转动角速度方程	42
2.2.8	操纵偏角	43
2.3	矢量微分法	45
2.3.1	矢量对时间的微分法	45
2.3.2	在一个场中的空间微分法	46
2.3.3	穿场运动时的时间导数	47
2.3.4	欧拉角和转动角速度之间的关系	47
2.4	确定飞机位置的变量	48
2.4.1	相对地面固定点的位置	48
2.4.2	相对于规定航迹的位置	50
2.5	飞机几何关系	53
2.6	传感器位置的影响	55
2.6.1	传感器偏差	55
2.6.2	飞机转动的影响	56
2.6.3	飞机上任意点的加速度矢量	57
2.7	正负号定义	58
3	外力和力矩	60
3.1	空气动力的产生	60
3.1.1	升力的产生	62
3.1.2	空气动力阻力	65
3.2	定常飞行的条件	67
3.2.1	纵向运动的弹簧常数(“静稳定性”)	67
3.2.2	尾翼的升力和力矩	69
3.2.3	全机的升力和力矩	71
3.2.4	侧向运动的弹簧常数(“静稳定性”)	73
3.2.5	飞机的操纵	74
3.3	对称飞行时空气动力的作用	76
3.3.1	俯仰角速度的影响	78
3.3.2	迎角变化的影响	79
3.3.3	空速变化的影响	80
3.3.4	升降舵偏转的影响	80
3.4	非对称飞行时空气动力的作用	81

3.4.1	侧滑角的影响	81
3.4.2	侧滑角变化的影响	84
3.4.3	滚转角速度的影响	84
3.4.4	偏航角速度的影响	85
3.4.5	副翼偏转的影响	86
3.4.6	方向舵偏转的影响	87
3.5	空气动力模型的补充和总结	87
3.5.1	纵向运动和侧向运动的空气动力耦合	87
3.5.2	地面效应	87
3.5.3	弹性变形的影响	88
3.5.4	发动机的影响	90
3.5.5	系数和导数的分类	90
3.6	航空喷气发动机	92
3.6.1	推力的产生	92
3.6.2	发动机模型	96
3.6.3	发动机控制	97
3.6.4	作为飞机运动控制装置的发动机	98
4	风和紊流	99
4.1	风模型	100
4.1.1	风的形成	100
4.1.2	风的模型化	103
4.1.3	紊流的形成	105
4.1.4	紊流模型	106
4.2	风的运动和飞机运动的耦合	107
4.2.1	风场对作为质点飞机的作用	108
4.2.2	风梯度对有限大小飞机的作用	112
4.2.3	作用在飞机上的紊流与空间和时间的关系	115
4.2.4	德莱顿频谱	117
4.2.5	紊流的仿真	118
4.2.6	紊流的非定常作用	120

过程数学模型篇

5	非线性运动方程	122
5.1	力和力矩方程的综合	123
5.1.1	坐标系的选择	123
5.1.2	列写方程	123
5.2	飞机运动的状态方程	125
5.2.1	移动速度的微分方程	125
5.2.2	加速度和载荷系数	126