



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

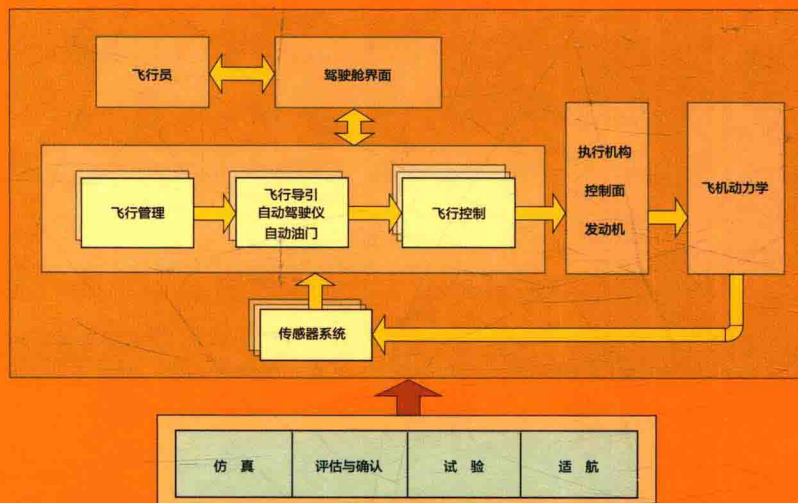
大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

民机飞行控制技术系列
主编 李明

民机飞行控制系统 设计的理论与方法

Flight Control System Design for Civil Aircraft

陈宗基 张平 等编著
李明 审校



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

民机飞行控制技术系列

主 编 李 明

民机飞行控制系统 设计的理论与方法

Flight Control System Design for Civil Aircraft

陈宗基 张 平 等编著
李 明 审校



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书根据作者多年来在电传飞行控制系统的科研成果与实践经验,结合了与现代飞行控制系统设计相关的学科知识,结合了与现代飞行控制系统设计密切相关的适航要求、验证与确认、四性要求等工程实际需求,结合了对国外波音与空客公司先进大型民机的现代飞行控制系统的研究与分析。以大型民机飞行控制系统的国际先进水平为起点,系统、深入地介绍大型民机飞行控制系统的先进设计理念、先进理论与方法、先进技术途径以及先进的试验与验证技术。

本书可供民机飞控系统的科技人员学习和参考,也可作为大学飞行控制专业教材。

图书在版编目(CIP)数据

民机飞行控制系统设计的理论与方法/陈宗基等编著. —上海:上海交通大学出版社,2015

(大飞机出版工程)

ISBN 978-7-313-14179-8

I. ①民… II. ①陈… III. ①民用飞机—飞行控制系统—控制系统设计 IV. ①V249

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 288833 号

民机飞行控制系统设计的理论与方法

编 著:陈宗基 张 平等

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:上海天地海设计印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:842千字

版 次:2015年12月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-14179-8/V

定 价:175.00元

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:42.5

印 次:2015年12月第1次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-64366274

丛书编委会

总主编

顾诵芬（中国航空工业集团公司科技委副主任、中国科学院和中国工程院院士）

副总主编

金壮龙（中国商用飞机有限责任公司董事长）

马德秀（上海交通大学原党委书记、教授）

编委（按姓氏笔画排序）

王礼恒（中国航天科技集团公司科技委主任、中国工程院院士）

王宗光（上海交通大学原党委书记、教授）

刘洪（上海交通大学航空航天学院副院长、教授）

许金泉（上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院教授）

杨育中（中国航空工业集团公司原副总经理、研究员）

吴光辉（中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、研究员）

汪海（上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员）

沈元康（中国民用航空局原副局长、研究员）

陈刚（上海交通大学原副校长、教授）

陈迎春（中国商用飞机有限责任公司常务副总设计师、研究员）

林忠钦（上海交通大学常务副校长、中国工程院院士）

金兴明（上海市政府副秘书长、研究员）

金德琨（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

崔德刚（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

敬忠良（上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授）

傅山（上海交通大学电子信息与电气工程学院研究员）

民机飞行控制技术系列

编 委 会

主 编

李 明 (中航工业沈阳飞机设计研究所科技委委员、中国工程院院士)

副主编

陈宗基 (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授)

张汝麟 (中航工业西安飞行自动控制研究所原副总工程师、研究员)

张文军 (上海交通大学原副校长、教授)

编 委 (按姓氏笔画排序)

王少萍 (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院副院长、教授)

车 军 (中航工业西安飞行自动控制研究所研究员)

朱 江 (中航工业第一飞机设计研究院研究员)

朱建设 (中国航空工业集团公司研究员)

江 驹 (南京航空航天大学研究生院常务副院长、教授)

杨 晖 (中航工业航空动力控制系统研究所所长、研究员)

杨朝旭 (中航工业成都飞机设计研究所副总工程师、研究员)

张 平 (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授)

张翔伦 (中航工业西安飞行自动控制研究所研究员)

宋科璞 (中航工业西安飞行自动控制研究所所长、研究员)

范彦铭 (中航工业沈阳飞机设计研究所副总设计师、研究员)

周元钧 (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授)

赵京洲 (中国商飞上海飞机设计研究院副总设计师、研究员)

胡士强 (上海交通大学航空航天学院副院长、教授)

高亚奎 (中航工业第一飞机设计研究院副总设计师、研究员)

章卫国 (西北工业大学自动化学院党委书记、教授)

敬忠良 (上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授)

程 农 (清华大学自动化系导航与控制研究中心主任、教授)

戴树岭 (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授)

总 序

国务院在 2007 年 2 月底批准了大型飞机研制重大科技专项正式立项,得到全国上下各方面的关注。“大型飞机”工程项目作为创新型国家的标志工程重新燃起我们国家和人民共同承载着“航空报国梦”的巨大热情。对于所有从事航空事业的工作者,这是历史赋予的使命和挑战。

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、比重大于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。飞机作为 20 世纪最重大的科技成果之一,是人类科技创新能力与工业化生产形式相结合的产物,也是现代科学技术的集大成者。军事和民生对飞机的需求促进了飞机迅速而不间断的发展和运用,体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索和不断创新,为诸多学科的发展和相关技术的突破提供了强劲动力。航空工业已经成为知识密集、技术密集、高附加值、低消耗的产业。

从大型飞机工程项目开始论证到确定为《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的十六个重大专项之一,直至立项通过,不仅使全国上下重视起我国自主航空事业,而且使我们的人民、政府理解了我国航空事业半个世纪发展的艰辛和成绩。大型飞机重大专项正式立项和启动使我们的民用航空进入新纪元。经过 50 多年的风雨历程,当今中国的航空工业已经步入了科学、理性的发展轨道。大型客机项目其产业链长、辐射面宽、对国家综合实力带动性强,在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用,我国的航空工业迎来了新的发展机遇。

大型飞机的研制承载着中国几代航空人的梦想,在 2016 年造出与波音 B737 和

空客 A320 改进型一样先进的“国产大飞机”已经成为每个航空人心中奋斗的目标。然而,大型飞机覆盖了机械、电子、材料、冶金、仪器仪表、化工等几乎所有工业门类,集成了数学、空气动力学、材料学、人机工程学、自动控制学等多种学科,是一个复杂的科技创新系统。为了迎接新形势下理论、技术和工程等方面的严峻挑战,迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料,总结、巩固我们的经验和成果,编著一套以“大飞机”为主题的丛书,借以推动服务“大型飞机”作为推动服务整个航空科学的切入点,同时对于促进我国航空事业的发展和加快航空紧缺人才的培养,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

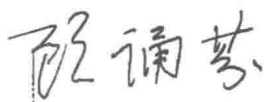
2008年5月,中国商用飞机有限公司成立之初,上海交通大学出版社就开始酝酿“大飞机出版工程”,这是一项非常适合“大飞机”研制工作时宜的事业。新中国第一位飞机设计宗师——徐舜寿同志在领导我们研制中国第一架喷气式歼击教练机——歼教1时,亲自撰写了《飞机性能及算法》,及时编译了第一部《英汉航空工程名词字典》,翻译出版了《飞机构造学》《飞机强度学》,从理论上保证了我们飞机研制工作。我本人作为航空事业发展50年的见证人,欣然接受了上海交通大学出版社的邀请担任该丛书的主编,希望为我国的“大型飞机”研制发展出一份力。出版社同时也邀请了王礼恒院士、金德琨研究员、吴光辉总设计师、陈迎春副总设计师等航空领域专家撰写专著、精选书目,承担翻译、审校等工作,以确保这套“大飞机”丛书具有高品质和重大的社会价值,为我国的大飞机研制以及学科发展提供参考和智力支持。

编著这套丛书,一是总结整理50多年来航空科学技术的重要成果及宝贵经验;二是优化航空专业技术教材体系,为飞机设计技术人员培养提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的迫切需求;三是为大飞机研制提供有力的技术保障;四是将许多专家、教授、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,旨在从系统性、完整性和实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的“大飞机”理论与实践相结合的知识体系。

“大飞机”丛书主要涵盖了总体气动、航空发动机、结构强度、航电、制造等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机的关键技术。图书类别分为译著、专著、教材、工具书等几个模块;其内容既包括领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也

包括来自飞机设计第一线的理论和实践成果。如:2009年出版的荷兰原福克飞机公司总师撰写的 *Aerodynamic Design of Transport Aircraft* (《运输类飞机的空气动力设计》),由美国堪萨斯大学2008年出版的 *Aircraft Propulsion* (《飞机推进》)等国外最新科技的结晶;国内《民用飞机总体设计》等总体阐述之作和《涡量动力学》《民用飞机气动设计》等专业细分的著作;也有《民机设计1000问》《英汉航空双向词典》等工具类图书。

该套图书得到国家出版基金资助,体现了国家对“大型飞机项目”以及“大飞机出版工程”这套丛书的高度重视。这套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,凝结了国内外航空领域专业人士的智慧和成果,具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性,既可作为实际工作指导用书,亦可作为相关专业人员的学习参考用书。期望这套丛书能够有益于航空领域里人才的培养,有益于航空工业的发展,有益于大飞机的成功研制。同时,希望能为大飞机工程吸引更多的读者来关心航空、支持航空和热爱航空,并投身于中国航空事业做出一点贡献。



2009年12月15日

序

大飞机工程是我国推进创新型国家建设的重要标志性工程。为了配合大飞机的研制,在国家出版基金的资助下,上海交通大学出版社成功策划出版了“大飞机出版工程”,旨在为大飞机研制提供智力支持。“民机飞行控制技术系列”是“大飞机出版工程”系列图书之一。

现代飞行控制技术是现代军机、民机的主要关键技术之一。以电传操纵技术为核心的现代飞行控制系统是现代飞机的飞行安全关键系统,是现代飞机上体现信息化与机械化深度融合的典型标志。飞行控制技术也是大型民机确保安全性、突出经济性、提高可靠性、改善舒适性和强调环保性的重要技术。

1903年,莱特兄弟在前人研究的基础上,重点解决了飞机三轴可控问题,实现了动力飞机的首次飞行。此后的60年,驾驶员利用机械操纵系统来控制稳定飞机飞行,形成了经典的飞行控制系统。飞机机械操纵系统在自动控制技术的辅助下,解决了对飞机性能和任务能力需求不断增长所遇到的一些重大问题——稳定性,稳定性与操纵性的矛盾,精确、安全的航迹控制,以及驾驶员工作负荷等问题。20世纪60年代至70年代初发展起来的主动控制技术和电传飞行控制系统对飞机发展具有划时代的意义,改变了传统的飞机设计理念和方法论,使飞机的性能和执行任务的能力上了一个新台阶。这两项技术已成为第三代军机和先进民机的典型标志,同时也为第四代军机控制功能综合以及控制与管理综合建立了支撑平台。在人们对飞机飞行性能的不断追求和实现的过程中,飞行控制系统发挥着越来越重要的作用,飞行控制系统的创新研究、优化设计和有效工程实现对现代飞机的功能和性能的提高起着至关重要的作用。

我国的军机飞行控制系统经过五十多年的研究、设计、试验、试飞、生产和使用的实践,已积累了丰富的经验,并取得了大量的成果,在各型军机上得到了广泛的应用,但民机飞行控制系统的研发经验仍相对薄弱。总结现代军机飞行控制系统研发经验,分析和借鉴世界先进民机飞行控制系统新技术,对助力我国大型民机的自主研发是十分必要且意义重大的。

本系列丛书编著目标是:总结我国军/民领域的飞行控制技术的理论研究成果和工程经验,介绍国外最先进的民机飞行控制技术的理念、理论和方法,助力我国科研人员以国际先进水平为起点,开展我国民机飞行控制技术的自主研究、开发和原始创新。本系列丛书编著的指导思想和原则是:内容应覆盖民机飞行控制技术的各重要专业;要介绍当今重要的、成功的型号项目,如波音系列和空客系列的飞行控制技术,也要重视方向性的探索和研究;要简明介绍技术与方法的理论依据,以便读者知其然,也知其所以然;要概述民机飞行控制技术的各主要专业领域的基本情况,使读者有全面的、清晰的了解;要重视编著的准确性以及全系列丛书的一致性。

本系列丛书包括《飞行控制系统设计和实现中的问题》《民机液压系统》《民机飞行控制系统设计的理论与方法》《民机传感器系统》等专著。其中王少萍教授的专著《民机液压系统》(英文版),已经输出版权至爱思唯尔(Elsevier)出版集团,增强了我国民机飞控技术的国际影响力。

在我国飞行控制领域的资深专家李明院士、陈宗基教授和张汝麟研究员的主持下,这套丛书的编委会由北京航空航天大学、清华大学、西北工业大学、南京航空航天大学、中航工业西安飞行自动控制研究所、中航工业沈阳飞机设计研究所、中航工业成都飞机设计研究所、中航第一飞机设计研究院、中航工业航空动力控制系统研究所、中国航空工业集团公司、中国商用飞机有限责任公司等航空院所和公司的飞控专家、学者组建而成。他们在飞行控制领域有着突出的贡献、渊博的学识和丰富的实践经验,他们对于本系列图书内容的确定和把关、大纲的审定和完善都发挥了不可替代的重要作用。

上海交通大学出版社“大飞机出版工程”项目组以他们成熟的管理制度和保障体系,组织和调动了丛书编委会和丛书作者的积极性和创作热情。在大家的不懈努

力下,这套图书终于完整地呈现在读者的面前。

本系列图书得到国家出版基金的资助,充分体现了国家对“大飞机工程”的高度重视,希望该套图书的出版能够达到本系列丛书预期的编著目标。我们衷心感谢参与本系列图书编撰工作的所有编著者,以及所有直接或间接参与本系列图书审校工作的专家、学者的辛勤工作,希望本系列图书能为民机飞行控制技术现代化和国产化发展做出应有的贡献!

民机飞行控制技术系列编委会

2015年3月

作者简介

陈宗基,1983年英国曼彻斯特大学控制系统中心博士,曾任北京航空航天大学研究生院副院长、院长;“飞行器控制一体化技术”国防科技重点实验室主任;北航校学术委员会常务副主任、校学位委员会副主任,中国系统仿真学会常务副理事长。现任“飞行器控制一体化技术”国防科技重点实验室名誉主任。

在飞行控制系统设计、适应性控制系统、自主控制系统、容错控制系统、混合控制系统、先进仿真技术等方面有较显著研究成果。曾获国家教育成果一等奖一项、二等奖一项,北京市教育成果一等奖一项,部级科技进步一等奖一项,二等奖四项,三等奖四项。1997年由国家人事部授予中青年有突出贡献专家,2010年全国优秀科技工作者。在国内外期刊发表论文180多篇,学术会议论文120多篇,其中SCI、EI收录68篇,出版专著两本。

张平,北京航空航天大学博士,北京航空航天大学自动化学院教授,博士生导师。研究方向为飞行控制与仿真,容错控制,故障检测与诊断,机器视觉与导引,虚拟样机等。曾在联邦德国斯图加特大学、联邦军队大学进修,曾任日本东京大学生产技术研究所外国人协力研究员。中国航空学会GNC飞行控制专业委员会委员,航空学会高级会员,系统仿真学报编委。获国防科技二等奖一项,三等奖一项,出版专著两本,发表飞控领域论文100余篇。

前 言

本书为“大飞机出版工程·民机飞行控制技术系列”丛书之一。

现代飞行控制技术是现代军机、民机的主要关键技术之一,以电传操纵技术为核心的现代飞行控制系统是现代飞机上体现信息化与机械化深度融合的典型标志,是现代飞机的飞行安全关键系统,是大型民机确保安全性、突出经济性、提高可靠性、改善舒适性、强调环保性的重要技术保障。当前,在我国大型民用飞机的研制正获得飞速发展之际,本书是着力于为我国大型民机飞行控制系统的研发和人才培养提供技术支撑而编写的一本专著。

本书着重介绍大型民机飞行控制系统设计的先进理念、理论和方法,阐述相关的核心关键技术,介绍并分析当今重要的大型民机飞行控制系统的成功设计案例和经验。本书的特点是总结了国内多年来在电传飞行控制系统的科研与教学成果;结合了与现代飞行控制系统设计相关的学科知识(如空气动力学、飞行力学、现代控制理论、可靠性理论等);结合了与现代飞行控制系统设计密切相关的适航要求、验证与确认、四性要求等工程实际需求;结合了对国外波音与空客公司先进大型民机的现代飞行控制系统的研究与分析。

本书主要内容有大型民机的建模与特性;民机的传感器系统及执行机构系统;民机飞行性能与飞行品质;民机电传操纵与主飞控系统控制律设计;民机自动飞行控制系统;飞行控制系统设计的现代控制理论与方法;民机飞行控制系统的可靠性与安全性设计;结构弹性模态与飞控系统的耦合;民机的飞行管理系统;民机飞控系统的评估与确认;最后给出了民机飞控系统的新技术发展及挑战的展望。

本书由北京航空航天大学的陈宗基、张平、杨超、周锐、夏洁、吴志刚、魏晨、杨凌宇、李卫琪、张晶、宋晨,清华大学的李清,以及南京航空航天大学的江驹,第

一飞机设计研究院的高亚奎联合编著。他们都是从事所编著内容多年科研和教学的资深学者。第1章由张平编写,第2、3章由夏洁编写,第4章由张平、李卫琪编写,其中高升力系统(4.6—4.8节)由高亚奎编写,第5章由江驹编写,第6章由周锐、陈宗基编写,第7章由李卫琪、陈宗基和李清编写,第8章由李清编写,第9章由杨超、宋晨和吴志刚编写,第10章由魏晨编写,第11章由陈宗基、李卫琪、张晶和杨凌宇编写。全书由陈宗基和张平统一规划和最终定稿,由夏洁进行排版和集成,最后由李明院士完成了全书的审校。

本书在编著过程中得到了李明院士、张汝麟研究员、高金源教授和高亚奎研究员的许多宝贵意见和建议,对于他们为确保本书的编写质量所作的贡献,在此表示由衷的感谢!

本书内容丰富、特色鲜明,既有较高的学术研究价值,又可供民机飞控系统专业领域的科技人员学习和参考,还可以作为大学本科与研究生的飞行控制学科教材。



2015年10月

飞机方程主要符号表(英美制)

符号定义	名称	单位
H	高度	m
M	马赫数	
V	速度	m/s
Q	飞行速压	kg/m ²
c_A	平均空气动力弦	m
b	翼展	m
S	机翼面积	m ²
m	质量	kg · s ² /m
g	重力加速度	m/s ²
I_x	绕 x 轴惯性矩	kg · m/s ²
I_y	绕 y 轴惯性矩	kg · m/s ²
I_z	绕 z 轴惯性矩	kg · m/s ²
I_{xz}	绕 xz 平面惯性矩	kg · m/s ²
α	迎角	rad, (°)
β	侧滑角	rad, (°)
θ	俯仰角	rad, (°)
ϕ	滚转角	rad, (°)
ψ	偏航角	rad, (°)
p	滚转角速度	rad/s
r	偏航角速度	rad/s
q	俯仰角速度	rad/s
n_z	法向过载	g
n_y	侧向过载	g
T	推力	kg
D	阻力	kg

L	升力	kg
Y	侧力	kg
G	重力	kg
L	滚转力矩	rad/s ²
N	偏航力矩	rad/s ²
M	俯仰力矩	rad/s ²
δ_e	升降舵偏转角	(°)
δ_a	副翼偏转角	(°)
δ_r	方向舵偏转角	(°)
δ_T	发动机推力偏转角	(°)
C_{L_α}	升力对攻角的导数	
C_{D_α}	阻力对攻角的导数	
C_{Y_β}	侧力对侧滑角的导数	
C_{m_α}	俯仰力矩对攻角的导数	
$C_{m_\alpha \dot{\alpha}}$	俯仰力矩对攻角变化率的导数	
C_{m_q}	俯仰力矩对俯仰角速度的导数	
$C_{m_{\delta_e}}$	俯仰力矩对升降舵的导数	
C_{l_β}	滚转力矩对侧滑角的导数	
C_{l_p}	滚转力矩对滚转角速度的导数	
C_{l_r}	滚转力矩对偏航角速度的导数	
$C_{l_{\delta_a}}$	滚转力矩对副翼偏转角的导数	
$C_{l_{\delta_r}}$	滚转力矩对方向舵偏转角的导数	
C_{n_β}	偏航力矩对侧滑角的导数	
C_{n_p}	偏航力矩对滚转角速度的导数	
C_{n_r}	偏航力矩对偏航角速度的导数	
$C_{n_{\delta_a}}$	偏航力矩对副翼偏转角的导数	
$C_{n_{\delta_r}}$	偏航力矩对方向舵偏转角的导数	

注:迎角、侧滑角、俯仰角、滚转角和偏航角在飞机方程中会用到 rad 单位,但在所有的仿真响应图中,单位都转换为(°),后面的仿真图如果没标出单位,其单位即为(°)。

目 录

- 1 大型民机的建模与特性 1
 - 1.1 飞行力学基本概念 1
 - 1.1.1 空气动力学基本知识 1
 - 1.1.2 飞机的空间运动与操纵机构 6
 - 1.1.3 纵向气动力与气动力矩 14
 - 1.1.4 横航向气动力与气动力矩 28
 - 1.1.5 操纵面的铰链力矩 34
 - 1.2 刚体飞机方程 35
 - 1.2.1 飞机动力学方程 35
 - 1.2.2 飞机运动学方程 44
 - 1.3 飞行的平衡状态与飞机非线性模型的线性化 45
 - 1.3.1 小扰动原理与线性化方法 45
 - 1.3.2 飞行中平衡状态的定义与平衡飞行条件 46
 - 1.3.3 基于小扰动原理的线性方程导出 48
 - 1.3.4 飞机线性方程的纵向与横航向分类 51
 - 1.3.5 飞机六自由度线性方程 51
 - 1.3.6 飞机的平衡状态及线性化的数值求解方法 53
 - 1.4 飞机纵向运动特征分析 56
 - 1.4.1 飞机纵向方程的解与模态特征 56
 - 1.4.2 飞机纵向运动的模态描述 57
 - 1.4.3 短周期模态的传递函数与特性分析 58
 - 1.4.4 长周期模态的传递函数与特性描述 64
 - 1.4.5 定速静稳定性与定载静稳定性 66
 - 1.4.6 空速与高度变化对纵向模态特征参数的影响 68
 - 1.4.7 油门杆偏转的动力学响应 70
 - 1.5 飞机横航向特征分析 73