



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

民机传感器系统

Civil Aircraft Transducer System

朱建设 等编著



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



民机飞行控制技术系列

主 编 李 明

民机传感器系统

Civil Aircraft Transducer System

朱建设 等编著



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

内容提要

本书根据作者三十多年从事传感器技术研究和管理的实践经验和体会,力求从系统工程师的视角介绍系统构成、测量方法、应用范例和相关规范等,并且从原理、发展简史、现行普遍采用技术等方面详细介绍了空气动力学测量、惯性力学测量、卫星导航系统、无线电定位设备、仪表着陆系统、微波着陆系统、飞行环境监视系统等主要飞行控制用传感器。

本书是面向民用大飞机设计、制造、服务工程技术人员飞行控制传感器系统参考书,也可供相关传感器专业人员和院校学生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

民机传感器系统/朱建设等编著. —上海:上海交通大学出版社,2015

(大飞机出版工程)

ISBN 978-7-313-14181-1

I. ①民… II. ①朱… III. ①民用飞机—传感器

IV. ①V241.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 288825 号

民机传感器系统

编 著:朱建设 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:上海万卷印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:472千字

版 次:2015年12月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-14181-1/V

定 价:99.00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:24

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:021-56928277

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）

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应用,体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索 and 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、金德珉研究员、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。

顾诵芬

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

作者介绍

朱建设,研究员,1982年1月毕业于哈尔滨工业大学无线电技术专业。同年于中航工业西安自动控制研究所(618所)参加工作,1984年8月调中航工业成都凯天电子股份公司(161厂),2009年1月调中国航空工业集团公司工作。历任技术员、主任工程师、设计所所长、总工程师、总经理、董事长、高级专务、派出专职董事、监事等职。参与的科研项目有5个项目分别获得“国防科技进步奖”和“部级科技进步奖”,曾获航空工业“有突出贡献专家”和“优秀企业领导干部”称号,享受国务院政府特殊津贴,2011年中航工业集团公司授予新中国航空工业创建60周年“航空报国突出贡献奖”。

前 言

编写航空用传感器一书,供业内工程技术人员参考选型,提高飞行器设计水平一直是我多年未了的心愿。2013年初接受本书的编写任务,使几近熄灭的心愿之火再次点燃。很多年前,还在基层从事技术和技术管理工作时经常遇到与整机、系统设计人员耗费大量精力协商传感器的选型问题,而问题往往集中在对国内传感器专业发展现状不了解。同时,传感器专业新进入人员也亟待有一个了解本专业发展的途径。这也是一直想编写与传感器相关书籍的初衷。

现代飞机使用的各类传感器越来越多,由于丛书编写目的的限制,本书收录了与飞行控制系统相关的主要传感器分系统,仍然无法囊括所有类型传感器,使我感到一丝遗憾。经过两年的编写工作发现,传感器涉及太多的专业领域和庞杂的使用要求,以至于任何全面囊括所有类型传感器企图都只能成为“奢想”。为弥补这点缺憾,本书增加了第5章航空通用传感器。

本书定位为民用飞机设计、制造、使用、服务工程技术人员的参考书,也为现有飞机传感器系统更新发展提供借鉴。在传感器开发设计领域本书为相关技术人员提供了解系统全貌、主机设计需求及适航要求的途径。

本书首先简单介绍了传感器使用的相关理论和相关标准,并从原理、发展简史、现行普遍采用技术等方面详细介绍了空气动力学测量、惯性力学测量、卫星导航系统、无线电定位设备、仪表着陆系统、微波着陆系统、飞行环境监视系统等主要飞行控制用传感器系统,内容涵盖了与飞行控制系统相关的传感器分系统的大部分关键内容,并尽可能结合工程使用的实际,从系统架构、测试原理、误差分析、关注问题等方面提供工程技术帮助。飞行控制系统的发展与具体的传感器技术的发展、进步密不可分,本书也努力就系统及传感器的未来发展等方面收录当前的研究成果,为系统的更新发展提供借鉴。

本书编写过程中不同章节都邀请了国内相关专业素养一流的专家参与,他们在所在专业均有深厚的理论功底和丰富的工程经验。第1章介绍传感器测量技术的基础理论与相关管理法规,是重要的通用预备知识,由朱建设和梁志国撰写;第2章空气动力测量由任红军、朱建设、宣晓刚撰写,介绍了大气数据系统的测量理论、系统构型和技术发展现状,同时也介绍了目前几个典型机型的系统设计概况;第3章和第6章重点介绍了惯性测量(惯性导航系统在本丛书中有专著叙述,本书仅作简单介绍)、飞机环境监视系统,在第5章就飞行控制相关的航空通用传感器做了原理、结构的阐述以便读者参阅,此三章由李孔贤、宋耀、范竹荣、刘增明、刘玉霞、刘成林、周清撰写;第4章无线电测量部分由顾世敏、李文辉撰写。各章节编者在撰写过程中得到了所供职单位或机构的大力支持并获取了大量的技术资料和相关数据,在此对汪晓明、曹英杰、王金岩、龙平、钟希田、米尔为等领导同志表示衷心的感谢。

传感器是控制系统的基础,而传感器本身也是一个技术更新很快的专业。本书力求从系统工程师的视角介绍系统构成、测量方法、应用范例、相关规范等,同时也兼顾到相关人士和在校大专院校学生的学习参考要求,使本书既能成为工程技术人员的设计依据,又能成为优秀传感器系统设计人员成长的阶梯。本书除第1章为基础知识外,其余各章均独立介绍一个专题,提高了本书的学术性和可读性。

全书最后的集成和统稿工作由朱建设负责完成,在此过程中崔文博同志协助做了大量文字处理工作,程农同志负责全书校对,上海交通大学出版社给予大力协助,在此一并表示诚挚的谢意。

编著者

2015年10月30日于北京

目 录

- 1 概述 1
 - 1.1 量与量值 2
 - 1.2 法定计量单位 3
 - 1.2.1 法定计量单位的构成 3
 - 1.2.2 国际单位制 4
 - 1.2.3 我国法定计量单位的使用规则 6
 - 1.3 测量、测试、计量、校准、检定及相互关系 7
 - 1.3.1 测量 7
 - 1.3.2 测试 9
 - 1.3.3 计量 9
 - 1.3.4 校准 11
 - 1.3.5 检定 11
 - 1.3.6 校准和检定的主要区别 11
 - 1.3.7 比对 12
 - 1.4 传感器、敏感器、检测器 12
 - 1.4.1 传感器 12
 - 1.4.2 敏感器 13
 - 1.4.3 检测器 13
 - 1.4.4 传感器、敏感器、检测器的区别 13
 - 1.4.5 传感器特性 14
 - 1.5 传感器分类 18
 - 1.5.1 按工作原理分类 19
 - 1.5.2 按用途分类 20
 - 1.5.3 按输出信号分类 20
 - 1.5.4 按材料分类 20
 - 1.5.5 按制造工艺分类 21

- 1.6 测量数据的估值滤波 22
 - 1.6.1 数据处理过程中对误差的估计 22
 - 1.6.2 估计值 25
 - 1.6.3 滤波 26
 - 1.6.4 滤波问题分类 27
- 1.7 测量的可靠性 29
 - 1.7.1 测量结果的不确定度评定与表述 29
 - 1.7.2 测量不确定度与误差两者之间概念上的差异 30

2 空气动力学测量 33

- 2.1 空气动力学测量原理 33
 - 2.1.1 空气动力的基本原理 33
 - 2.1.2 空气动力学测量原理 34
- 2.2 大气数据传感器 36
 - 2.2.1 大气压力传感器 36
 - 2.2.2 大气温度传感器 40
 - 2.2.3 角度传感器 41
- 2.3 大气数据测量 43
 - 2.3.1 自由气体的静压 44
 - 2.3.2 大气总压 44
 - 2.3.3 大气总温 44
 - 2.3.4 指示迎角 45
 - 2.3.5 指示侧滑角 46
- 2.4 大气数据解算 46
 - 2.4.1 标准大气参数常数及主要参数符号 46
 - 2.4.2 气压高度 48
 - 2.4.3 空速 51
 - 2.4.4 马赫数 53
 - 2.4.5 垂直速度(升降速度) 54
 - 2.4.6 迎角和侧滑角 55
- 2.5 大气数据系统 57
 - 2.5.1 概述 57
 - 2.5.2 基本工作原理 57
 - 2.5.3 大气数据计算机 59
 - 2.5.4 发展简史 83
 - 2.5.5 系统构型与现状 86

2.5.6 代表机型的构型分析 87

3 惯性量测量 94

3.1 惯性测量原理 94

3.2 惯性测量传感器 94

3.2.1 加速度计 94

3.2.2 陀螺仪表(陀螺的工作原理与发展) 98

3.2.3 速率陀螺(角速度陀螺) 117

3.2.4 垂直陀螺(陀螺地平仪) 123

3.2.5 航向陀螺 131

3.2.6 全姿态组合陀螺 136

3.2.7 磁罗盘 138

3.3 惯性器件的计量和校准 142

3.3.1 加速度计的计量与校准 142

3.3.2 陀螺的计量与校准 145

3.4 惯性测量系统 154

3.4.1 常用坐标系 154

3.4.2 陀螺磁罗盘(综合罗盘) 155

3.4.3 航向姿态系统 164

3.4.4 捷联航向姿态系统 167

3.4.5 惯性导航 169

3.4.6 陀螺罗经 186

4 无线电测量 191

4.1 无线电测量原理 191

4.1.1 无线电波传播的基本概念 191

4.1.2 空间坐标系 194

4.1.3 参数测量原理 198

4.1.4 无线电导航定位原理 203

4.1.5 无线电导航工作区 206

4.2 无线电测量传感器 211

4.2.1 甚高频全向信标 211

4.2.2 测距机 223

4.2.3 无线电罗盘 229

4.2.4 仪表着陆系统 236

4.2.5 微波着陆系统 241