



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

民用飞机适航出版工程
主编 赵越让

民用飞机系统安全性设计与评估技术概论

System Safety Design & Assessment in Civil Aircraft

修忠信等 编著
成 伟等 主审



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

014031242

V328

31



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

民用飞机系统安全性设计与评估技术概论

System Safety Design & Assessment
in Civil Aircraft

修忠信等 编著

成伟等 主审



V328

31



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



北航

C1719158

内 容 提 要

本书是民机系统安全性设计与评估技术方面的著作。全书共分为13章:第1章为绪论;第2章为规章、咨询通告与工业标准;第3章为飞机系统安全性设计与评估体系;第4章为功能危险性评估;第5章为初步系统安全性评估;第6章为系统安全性评估;第7章为安全性概率计算分析工具;第8章为故障模式及影响分析;第9章为特定风险分析;第10章为区域安全性分析;第11章为共模分析;第12章为与民机系统安全性设计与评估技术相关的其他内容;第13章为安全性工作管理与规划。本书汇集了近年来国际国内在民机系统安全性等方面的最新技术和方法,内容新颖,图表清晰,实用性强。

本书可供从事民机系统安全性、可靠性工作的科研人员、工程技术人员和管理人员使用,也可供系统安全性、可靠性相关专业的本科生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

民用飞机系统安全性设计与评估技术概论/修忠信等编
著. —上海:上海交通大学出版社,2013
(大飞机出版工程)
ISBN 978-7-313-09596-1

I. ①民… II. ①修… III. ①民用飞机—飞行安全—安全设计②民用飞机—飞行安全—技术评估 IV. ①V328

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 074936 号

民用飞机系统安全性设计与评估技术概论

修忠信等 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

上海万卷印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 21 字数: 409 千字

2013 年 9 月第 1 版 2013 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-09596-1/V 定价: 88.00 元

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:021-56928211

大飞机出版工程

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、两院院士)

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、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教授)

许金泉(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院工程力学系主任、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(上海交通大学航空航天学院副院长、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、院士)

金兴明(上海市经济与信息化委副主任、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(上海交通大学航空航天学院研究员)

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、重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,应用和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《飞机性能捷算法》,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。

顾诵芬

2009年12月15日

序 一

发展国产大型客机是党中央、国务院在 21 世纪作出的具有重要战略意义的决策。“民机发展，适航先行”，是民用航空事业的基本理念。适航是国产大型客机获得商业成功、走向国际市场的法定前提和重要保证。

众所周知，第二次世界大战结束后，世界航空工业的两个超级大国——美国和苏联，分别成功制造了大型飞机波音 707 飞机和图-154 飞机，并投入民用航空运输领域。经过数十年的市场选择，最后的结果值得我们深思。目前，世界大型民机市场几乎完全由美国波音和欧洲空客两大航空巨头垄断，而辉煌一时的苏联民用运输机在市场上所占的份额不足 0.5%。造成这种结果的最重要因素，就是它的飞机安全性没有完全保证；同时，其保障安全性的适航体系也没有完全建立和全面实施。

美国高度重视适航体系的建立和发展。早在 1926 年商务部就成立了航空司，并颁发第 7 号航空通报，对飞行员、航图、导航和适航标准进行管理。1934 年，航空司更名为航空局。从 1934 年到 1958 年相继制定并颁发了民用航空规章(CAR)如 CAR04(飞机适航要求)、CAM04(要求和解释材料)、CAR03(小飞机)、CAR06(旋翼机)、CAR04a-1(TSO)、CAR7(运输类旋翼飞机)等。

1958 年，航空局更名为联邦航空局(FAA)，被赋予制定和监督实施美国航空规章(FAR)的职责。FAA 归属交通运输部，但局长由总统直接任命。

波音 707 飞机于 1958 年获得 FAA 型号合格证，获得了适航批准。在美国严格的审定标准和审定程序下，该飞机具有良好的安全性和市场表现，先后共交付 1 010 架，被誉为商用民航客机的典范。美国的适航体系和概念也得到了世界上绝大多数国家的认可。

苏联图-154 飞机却命运多舛。该飞机于 1966 年开始设计，苏联当时没有

构成体系的民用飞机适航标准和主要参考强度规范等。虽然苏联民用飞机和直升机适航标准联合委员会于1967年制订了《苏联民用飞机适航标准》，该标准涵盖了运输类飞机、直升机、发动机和螺旋桨等各种航空产品，但适航要求不够详细和完善。1972年，图-154获得苏联民用航空部运送乘客许可并投入运行。该飞机虽然生产了900余架，但却发生了56次重大事故，最终没能在国际主流民机市场获得认可。

欧洲空中客车公司在国际民机市场的崛起，从另一个侧面说明了强有力的适航管理能力是大型客机成功的关键因素之一。欧洲为了在国际民机市场上和美国分庭抗礼，于1990年成立联合航空局(JAA)，大力加强适航审定体系和适航管理能力建设，为空中客车公司后来居上进而国际大型民机市场与波音公司平分秋色，起到了支撑和保障作用。

纵观欧美和苏联的运输类飞机发展历程可以发现，民机型号的发展不仅需要先进的航空工业基础，更重要的是要有国际认可的安全性——适航性。

当前，在国家政策指引下，中国航空业呈现跨越式发展。ARJ21-700新支线飞机、215直升机、MA600螺旋桨飞机、Y12F轻型多用途飞机、N5B农用飞机、H300水陆两栖飞机、L7初级教练机、28F直升机、Y8F-600飞机等型号陆续开展研制工作。2009年12月16日，大型客机C919基本总体技术方案经过评审并获得通过，转入初步设计阶段；2010年向中国民航局提交大型客机取证申请，预计大型客机争取在2014年首飞，2016年交付客户使用。

面对正在开展的支线飞机和大型客机适航审定工作，我国的适航管理面临着新的严峻的挑战，突出表现为两个主要矛盾：一是国际审定技术快速发展与我国适航审定能力相对滞后的矛盾，尽管我们采用“影子审查”的中美两国政府合作方式来弥补；二是国内民用航空工业的快速发展与有限的适航符合性基础能力的矛盾。

现实迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料，同时总结、巩固我国30年的实践经验和科研成果，编著一套以“民用飞机适航”为主题的丛书，这对于促进我国适航管理技术的发展和加快适航紧缺人才的培养，具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

与适航事业结缘近30年，并见证了我国适航发展变迁，我怀着继续为中国适航管理竭尽绵薄之力的愿望，欣然接受了上海交通大学出版社的邀请，担任“民用飞机适航”丛书的名誉主编。出版社同时邀请了我国民用航空局张红鹰总工程师、中商飞吴光辉总设计师和原民航局适航司副司长赵越让等适航专家撰写专著、精选书目，承担翻译、审校等工作，以确保这套丛书具有高品质和重大的

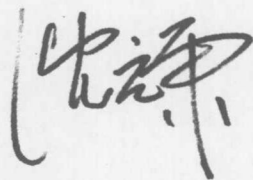
社会价值,为我国的大飞机研制以及适航技术的发展提供参考和智力支持。

这套丛书主要涵盖了适航理念与原则、机载软件适航、试飞、安全可靠、金属材料与非金属材料等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机适航的关键技术,内容既包括适航领域专家们最先进的理论方法和技术成果,也包括来自工艺部门进行适航符合性验证的理论和实践成果。

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“民用飞机适航出版工程”的高度重视。这套丛书承担着记录与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,凝结了国内外民机适航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,也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民用航空领域里适航人才的培养,有益于国内适航法规的完善、有益于国内适航技术的发展,有益于大飞机的成功研制。同时吸引更多的读者重视适航、关心适航、支持适航,为国产大型客机的商业成功做出贡献。

最后,我们衷心感谢中商飞、上海交通大学出版社和参与编写、编译、审校的专家们以及热心于适航教育的有识之士做出的各种努力。

由于国内外专家们的背景、经历和实践等差异,有些观点和认识不尽相同,但本着“仁者见仁,智者见智”,“百花齐放,百家争鸣”的精神,给读者以研究、思考的广阔空间,也诸多裨益。当然,不同认识必将在未来的实践检验中得到统一和认可。这也是我们出版界伟大的社会责任。我们期望的事业也就蓬勃发展了。大家努力吧!



2013年4月20日

序 二

2012年7月8日,国务院出台了《国务院关于促进民航业发展的若干意见》。其中明确提出“积极支持国产民机制造”,包括加强适航的审定和航空器的适航评审能力建设,健全适航审定组织体系,积极为大飞机战略服务,积极拓展中美、中欧等双边适航范围,提高适航审定国际合作水平。2013年1月14日,国务院办公厅以国办函[2013]4号文件下发了《促进民航业发展重点工作分工方案的通知》,要求有关部门认真贯彻落实《国务院关于促进民航业发展的若干意见》精神,将涉及本部门的工作进行分解和细化,并抓紧制订出具体落实措施。由此可见,适航和适航审定能力建设已上升为国家民航强国战略、国产大飞机战略的有效组成部分。

适航是民用飞机进入市场的门槛,代表了公众对民用飞机安全的认可,也是民用飞机设计的固有属性。尽管相比国外,我国的适航管理起步较晚,1987年国务院才颁布《中华人民共和国民用航空器的适航管理条例》,但是我们一开始在适航标准的选用上就坚持了高标准并确定了与欧美国家接轨的道路,几十年国际民用飞机的发展和经验已充分证明我国适航管理道路的正确性和必要性,对于国家的大飞机战略,我们仍将坚持和选择这样的道路,只有这样,才能确保我国从民航大国走向民航强国,形成有国际竞争力的民用飞机产业。

飞机已经诞生110年了,国外先进的民机发展历史也有七八十年,我国民机发展历史较短,目前还无真正意义上按25部适航标准要求取得型号合格证的产品出现,但可喜的是从中央到企业,从民航到工业界,业界领导和专家将适航及适航能力的突破作为国产民用飞机产业发展的基础和前提,达成了共识。专家、学者、工程师和适航工作者全面探索和开辟了符合中国国情的适航成功道路的

研究及实践,并直接应用到 C919 等型号研制中。我很高兴地看到上海交通大学出版社面向大飞机项目的适航技术提高和专业适航人才的培养,适时推出“民用飞机适航出版工程”系列丛书,引入、借鉴国外的优秀出版物,总结并探索我国民机发展适航技术的实践经验及工程实践道路,直接呼应了国家重大任务,应对了民机产业发展,这无疑具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

张红鹰

2013年7月20日

民用飞机系统安全性设计与评估技术概论

主 编 修忠信

副主编 王 鹏 郭 强 肖女娥

主 审 成 伟 徐金萍

编著者 (按姓氏笔画排序)

马 赞 王 伟 包敦永 冯 臻

吕 军 刘 艳 池巧君 杨建忠

杨 林 阮宏泽 吴丽娜 张国防

郑友石 高 磊 袁天伦 阎 芳

郭 伟

作者介绍

修忠信,男,1962年11月出生,黑龙江人,北京航空航天大学航空工程专业工程硕士。从事飞机研制和试飞工作近30年,先后参与或主持了H410、H425、直9武改、直9武侦、运-12和ARJ21-700等多个型号的研制和试飞工作。主持了EWIS安全性评估体系和可靠性数据获取、民用飞机试飞规划与管理等多项民用飞机试飞技术研究。参与编写了CCAR36部、CCAR27部及一些军机标准。曾获中国人民解放军科学技术进步二等奖、获中航二集团科技进步二等奖、国防科工委科技进步一等奖、获国家科学技术进步二等奖、获省部级个人三等功、省部级个人一等功。于2006年获国务院颁发的特殊津贴证书,被评为“2011年上海领军人才”。在我国飞机研制和试飞业内享有较高声誉。历任哈尔滨飞机制造公司副总设计师、副总工程师,现就职于中国商用飞机有限公司,担任ARJ21-700飞机副总设计师和ARJ21-700飞机外场试验队副队长职务。

成伟,男,多年从事航空器机载系统设计工作,在国产Y12飞机设计和适航验证过程中做出过富有成效的工作。自中国适航机构成立初期调入航空器合格审定部门至今,已有二十余年航空器合格审定经验,在机载系统安全性设计与评估(SSA)方面积累有丰富经验,曾参加并通过了FAA聘请美国麦道公司专家专为CAAC举办的SSA培训。

本书序

人类飞行的历史已走过一百多年，一百年斗转星移，一百年沧桑巨变，如今的飞机跟早期的飞机相比已不可同日而语。早期的飞机，结构简单，外形粗糙，功能单一，甚至以木头作为主要结构材料，设计时也乏于提及安全性概念。现代民用飞机(民机)是一个高度综合和极其复杂的庞大系统，包括动力装置、空气管理、航电、飞控、液压、电源和起落架等十几个系统，尤其是现代电子信息技术的大量使用，使得现在的飞机复杂程度大大提高，这也增加了飞机设计的难度。在民机“安全性、可靠性、经济性、舒适性”等几大特点中，安全性始终是首位的。可以说在很大程度上，民机产业的发展取决于民机系统安全性设计技术的发展。

如何设计出安全可靠的飞机，是所有设计师首先要考虑的问题，也是飞机能否通过适航审查，能否进入市场并具有竞争力的关键所在。近年来，ARJ21和C919两大民用飞机型号的研制取得了重大进展，在民用飞机的安全性学科领域和工程技术等方面积累了一定的经验。本书以民用飞机系统安全性为核心，结合国内外民用飞机安全性设计的工程经验，由长期从事民机安全性研究、教学、设计、试验、试飞和审查的工程技术人员和审查人员协作编写而成。

本书作为国内民机安全性领域的技术经验总结和理论结晶，系统地总结并提出了民机系统安全性设计与评估的流程和方法，对民机设计、试验、试飞实践具有现实的指导意义。同时，在当今国内民机的大发展背景下，该书的出版对我国民机产业的发展具有重要的参考价值，不仅有利于进一步推进国内民机系统

安全性可靠性学科的发展,更将为早日让我国的民机产业走向成功打下坚实的基础。

航空工业出版社

袁庆成 让

2013年5月

上海

前 言

对民机而言,安全性是其首要考虑的问题,贯穿于飞机从研制、生产、运营到退役的整个生命周期。同时安全性也是民机能否通过适航审查及进入市场并获得公众信任的前提条件。民用飞机机载系统属于高度综合的复杂系统,在设计过程中运用机载系统安全性设计与评估技术是减少其事故发生概率的有效手段。

随着国内民机事业的发展,民机系统的安全性越来越受到重视,同时也面临日益增多的技术难题,可谓是机遇与挑战并行。由于国内在这方面起步较晚,工程经验的积累有限,在民机安全性设计和评估方面一直没有形成一套成熟且完备的可供参考的技术性指导材料。为解决这一问题以支持国内民机发展,编写一本系统化的指导性著作显得极为迫切。

本书的编写有以下几个特点:①强调系统化。由于飞机研制本身是一个系统化工程,因此,对其进行安全性设计和评估也是一个系统化的工程;②注重指导性。本书内容基本是概述性的,主要介绍了安全性设计和评估的相关流程和方法,以期对民机设计提供技术性的指导。③突出实用性。本书旨在为从事相关专业的工程技术人员提供一个快速有效的指导,使本书成为一本实用性较强的工具用书。

本书的作者大多是从从事民机研制的工程技术人员及专家,本书是在作者大量的工程实践中不断探索、总结以及参考国内外相关资料的情况下编写出来的,有较强的针对性。本书在编写时参考了大量的国外资料,但由于国内在民机安全性技术领域跟欧美发达国家相比还有较大差距,很难保证对引用资料理解的准确性;同时,由于能力所限,本书在内容编排和整体构架上也难免出现不合理之处;此外,由于本书的编写人员较多,且大多是忙于科研一线和不同单位的工作人员,尽管在编写过程中克服了很多协调上的困难,但由于时间紧迫,在编写中难免会出现一些差错,恳请读者提出宝贵建议。