



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

ARJ21新支线飞机技术系列
主编 郭博智 陈勇

支线飞机强度 设计与验证

Strength Design and Verification of
Regional Aircraft

朱广荣 许志香 等著



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

ARJ21新支线飞机技术系列

主编 郭博智 陈 勇

支线飞机强度 设计与验证

Strength Design and Verification of
Regional Aircraft

朱广荣 许志香 等 著



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



大飞机读者俱乐部

内容提要

本书是对 ARJ21 新支线飞机研制过程中强度设计工作的总结,它介绍了强度设计的依据文件、载荷计算、强度分析、试验验证、试飞验证等方面的工作情况,也对适航取证过程中的技术攻关、关键技术、重大试验、试飞工作进行了技术总结,同时,对技术管理工作、研制过程中取得的科技成果、技术创新等进行梳理,总结经验教训,提炼收获与体会,为后续型号研制提供参考和借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

支线飞机强度设计与验证 / 朱广荣等著. —上海:
上海交通大学出版社, 2017
大飞机出版工程
ISBN 978-7-313-18553-2

I. ①支… II. ①朱… III. ①飞机-强度-设计
IV. ①V22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 307717 号

支线飞机强度设计与验证

著 者: 朱广荣 许志香 等

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 制: 上海万卷印刷有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 324 千字

版 次: 2017 年 12 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-18553-2/V

定 价: 178.00 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: 16.5

印 次: 2017 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

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 and 不断创新,也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多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标志着我国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年造出与波音公司

B737 和空客公司 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的飞机研制工作。我本人作为航空事业发展50多年的见证人,欣然接受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的培养提供一套系统、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。

“大飞机出版工程”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》《英汉航空缩略语词典》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

民用飞机产业是大国的战略性产业。民用客机作为一款高附加值的商品,是拉动国家经济发展的重要力量,是体现大国经济和科技实力的重要名片,在产业和科技上具有强大的带动作用。

自新中国成立以来,中国民机产业先后成功地研制了 Y-7 系列涡桨支线客机和 Y-12 系列涡桨小型客机等民用飞机。在民用喷气客机领域,曾经在 20 世纪 70 年代自行研制了运-10 飞机,国际合作论证了 MPC-75、AE-100 等民用客机,合作生产了 MD-80 和 MD-90 飞机。民机制造业转包生产国外民机部件,但始终没有成功研制一款投入商业运营的民用喷气客机。

支线航空发展迫在眉睫。2002 年 2 月,国务院决定专攻支线飞机,按照市场机制发展民机,并于 11 月 17 日启动 ARJ21 新支线飞机项目,意为“面向 21 世纪的先进涡扇支线飞机(Advanced Regional Jet for the 21st Century)”。从此,中国民机产业走上了市场机制下的自主创新之路。

ARJ21 作为我国民机历史上第一款按照国际通用适航标准全新研制的民用客机,承担着中国民机产业先行者和探路人的角色。跨越十五年的研制、取证和交付运营过程,经历的每一个研制阶段,解决的每一个设计、试验和试飞技术问题,都是一次全新的探索。经过十五年的摸索实践,ARJ21 按照民用飞机的市场定位打通了全新研制、适航取证、批量生产和客户服务的全业务流程,突破并积累了喷气客机全寿命的研发技术、适航技术和客户服务技术,建立了中国民机产业技术体系和产业链,为后续大型客机的研制打下了坚实的基础。

习近平总书记考察中国商飞公司时要求改变“造不如买、买不如租”的逻辑,坚持民机制造业“不以难易论进退”,在 ARJ21 取证后要求“继续弘扬航空报国精神,总结经验、迎难而上”。马凯副总理 2014 年 12 月 30 日考察 ARJ21 飞机时,指出,“要把 ARJ21 新支线飞机项目研制和审定经验作为一笔宝贵财富认真总结推广”。工信部副部长苏波指出:“要认真总结经验教训,做好积累,形成规范和手册,指导 C919 和后续大型民用飞机的发展。”

编著这套书,一是经验总结,总结整理 2002 年以来 ARJ21 飞机研制历程中设计、取证和交付各阶段开创性的重要成果及宝贵经验;二是技术传承,将民机研发技术专家、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,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民机理论与实践相结合的知识体系,为飞机设计技术人员提供参考和学习的材料;三是指导保障,为大飞机研制提供有力的技术保障。

丛书主要包括了项目研制历程、研制技术体系、研制关键技术、市场研究技术、适航技术、运行支持系统、关键系统研制和取证技术、试飞取证技术等分册的内容。本丛书结合了 ARJ21 的研制和发展,探讨了支线飞机市场技术要求、政府监管和适航条例、飞机总体、结构和系统关键技术、客户服务体系、研发工具和流程等方面的内容。由于民用飞机适航和运营要求是统一的标准,在技术上具有高度的相似性和相关性,因此 ARJ21 在飞机研发技术、适航验证和运营符合性等方面取得的经验,可以直接应用于后续的民用飞机研制。

ARJ21 新支线飞机的研制过程是对中国民机产业发展道路成功的探索,不仅开发出一个型号,而且成功地锤炼了研制队伍。参与本套丛书撰写的专家均是 ARJ21 研制团队的核心人员,在 ARJ21 新支线飞机的研制过程中积累了丰富且宝贵的实践经验和科研成果。丛书的撰写是对研制成果和实践经验的一次阶段性的梳理和提炼。

ARJ21 交付运营后,在飞机的持续适航、可靠性、使用维护和经济性等方面,继续经受着市场和客户的双重考验,并且与国际主流民用飞机开始同台竞技,因此需要针对运营中间发现的问题进行持续改进,最终把 ARJ21 飞机打造成为一款航空公司愿意用、飞行员愿意飞、旅客愿意坐的精品。

ARJ21 是“中国大飞机事业万里长征的第一步”，通过 ARJ21 的探索和积累，中国的民机产业会进入一条快车道，在不远的将来，中国民机将成为彰显中国实力的新名片。ARJ21 将继续肩负着的三大历史使命前行，一是作为中国民机产业的探路者，为中国民机产业探索全寿命、全业务和全产业的经验；二是建立和完善民机适航体系，包括初始适航、批产及证后管理、持续适航和运营支持体系等，通过中美适航当局审查，建立中美在 FAR/CCAR-25 部大型客机的适航双边，最终取得 FAA 适航证；三是打造一款具有国际竞争力的喷气支线客机，填补国内空白，实现技术成功、市场成功、商业成功。

这套丛书获得 2017 年度国家出版基金的支持，表明了国家对“ARJ21 新支线飞机”的高度重视。这套书作为上海交通大学出版社“大飞机出版工程”的一部分，希望该套图书的出版能够达到预期的编著目标。在此，我代表编委会衷心感谢直接或间接参与本系列图书撰写和审校工作的专家和学者，衷心感谢为此套丛书默默耕耘三年之久的上海交通大学出版社“大飞机出版工程”项目组，希望本系列图书能为我国在研型号和后续型号的研制提供智力支持和文献参考！



ARJ21 总设计师

2017 年 9 月

前 言

2017年4月22日是我们ARJ21-700型飞机研制人员值得庆祝的纪念日,ARJ21-700飞机自2016年6月28日交付成都航空公司商业营运至2017年4月22日,安全运送旅客累计已达10000人次。ARJ21-700飞机安全、舒适的乘坐体验得到了国人的充分肯定,一时在航线上造成了一票难求的局面,不少人就是冲着ARJ21-700飞机去购票体验我国第一架喷气客机去的,当然也有不少外国人士前往体验和探究具有中国自主知识产权的支线客机的营运和乘坐情况,总的来说,对ARJ21-700飞机的评价较高,尽管还有许多需要不断改进和完善的地方。此时此刻,作为ARJ21-700研制人员无比欣慰和自豪,因为是我们为祖国实现了在蓝天中我国自己研制的具有自主知识产权的营运喷气客机“零的突破”!从研发到取得适航证,为此我们奋斗了12年。忆往事,岁月峥嵘,这12年研制历程是我们践行“长期吃苦、长期奉献、长期攻关、长期奋斗”的难忘岁月。本书是对ARJ21-700飞机研制过程强度设计工作的总结,介绍了强度设计的依据文件、载荷计算、强度分析、试验验证、试飞验证等方面的工作情况,也对适航取证过程中的技术攻关、关键技术、重大试验、试飞工作进行了技术总结,同时,对技术管理工作、研制过程中取得的科技成果、技术创新等进行梳理,总结经验教训,提炼收获与体会,为后续型号研制提供参考和借鉴。

ARJ21-700飞机项目开始是由中航工业负责立项研制的,在2008年5月国家成立了中国商飞,并由中国商飞全面接手负责ARJ21-700飞机的研制工作。因此,中航工业一飞院强度所的部分设计人员当时也参加了ARJ21-700的强度研制工作,主要负责机翼外翼、中后机身等结构的强度分析计算和试验验证工作,除此之外,还参加了部分颤振和疲劳方面的技术工作,直到2010年10月全部工作移交给中国商飞。其他主要结构,如机头、前机身、中机身、后机身、中央翼、平尾、垂尾等结构的强度分析和试验、试飞验证(包括静强度、动强度、疲劳和损伤容限、颤振等专业)都是由我们负责完成的。我们当年的研发团队人数最少仅有50人左右,其中,仅少数人员有型号研制经验,大多数是2003

年刚毕业的 80 后大学生。为了技术把关和培养年轻人,我们返聘了 16 位曾参加过运 10 研制的退休老同志作为技术专家加入研制团队。人员少、无经验、无积累、任务重、进度紧、难度大、责任大,面对如此艰难局面,就是这样的一支团队,我们用百折不挠的精神和钢铁般的意志,不畏艰难迎接挑战,加班加点,克服了常人难以想象的困难,攻坚克难,解决了一个又一个的技术难关,最终我们完成了 ARJ21-700 飞机所有的强度计算分析、适航验证试验和试飞工作,并得到了审查方的批准,关闭了所有的适航条款,为 ARJ21-700 飞机取得适航证作出了巨大贡献,也为我国民机事业培养了一支年轻的有民机研制经验的技术队伍。

ARJ21-700 飞机的整个研制过程就是一部记载我国民机事业发展的史诗。我们研制 ARJ21-700 飞机的技术要求起点高,中国适航规章条款要求和美国适航规章条款要求几乎是一样的,代表世界先进水平,而我们民机研制和适航验证经验缺乏、无技术积累,底子薄,因此 ARJ21-700 飞机的研制道路就不会是一帆风顺的,它注定是一条充满艰辛和坎坷的富有挑战的曲折道路。在这条崎岖的道路上,我们尝遍了“酸甜苦辣”,有很多刻骨铭心的事件值得回味和总结。“ARJ21-700 飞机全机稳定俯仰(2.5g)极限载荷全机静力试验中止事件”是我们强度专业终生难忘的事件。一件看似不应该发生的低级错误事件,又似乎是必然会发生的事件,将整个研制进度推迟了 7 个月,同时对 ARJ21-700 飞机研制当时的舆论产生了很多的负面影响,我们遭遇了前所未有的巨大压力和打击。但我们并没有被压垮、击溃,而是潜下心来,开展技术攻关,查找原因。在试验现场攻关长达 7 个月,查找故障原因,并用故障再现的方式确认了原因,针对原因制定了结构更改方案,又用试验验证了更改方案和修理方案的合理性,从而确保试验一次成功。同时,又通过试验数据向局方表明了修理后的试验机构型符合性,最终我们重新恢复试验,在中国局方审查代表和美国局方影子审查代表的目击下顺利完成了惊心动魄的“ARJ21-700 飞机全机稳定俯仰(2.5g)极限载荷全机静力试验”。我们做到了“从哪里跌倒就从哪里爬起来”,并用事实来证明了我们是有能力处理这样的故障的,同样也是有能力研制民机的。这样一个“坏事”通过我们的努力变成了一个“好事”。通过这个事件的处理,我们处理问题时严谨的态度、周密的流程、用试验数据说话的处理方法和处理问题的技术水平赢得了局方代表的高度认可和信任,由此,在“影子”审查中,我们结构强度专业是美国局方代表唯一自始至终打出认可和信任的绿灯标志的专业,为我们以后的审查工作奠定了基础。事实证明,通过该事件处理的实践和锻炼,提高了年轻技术人员处理重大技术问题的能力,他们在解决后续发生的各种技术问题时发挥了重要作用。后来我们将该事件的处理过程浓缩提炼成了“2.5g 精神”,它是我们创造的精神财富,在 ARJ21-700

飞机整个研制过程中，“2.5g 精神”一直在激励和鼓舞着我们每一位强度专业技术人员。

虽然 ARJ21-700 型飞机已经投入航线营运,并且已开始进行批量生产,但要想取得商业上的成功,还需很长一段优化设计和持续适航的路要走。我们已经取得适航证,从安全性上来说毫无问题,但毕竟我们是第一次研制喷气客机,在经济上、舒适性、顺畅运营方面还存在不尽人意的问題,这些问題将不断从航空公司营运中反馈过来,因此需要我們不断地去优化、更改设计。相信通过我们的努力,一定会使我们 ARJ21-700 飞机成为飞行员愿飞、乘客愿坐、航空公司愿买的一款商业成功的喷气支线客机。

ARJ21-700 飞机承载着几代国人的民机梦,它是我国大飞机的先驱者和探索者,它必将载入我国民机研制历史的史册。

本书是集体智慧的结晶,第 1 章绪论,由许志香、郭伟毅、许海生、宋春艳、刘景光、梁技、金秀芬和李卫平共同执笔;第 2 章专业架构及职责,由许志香执笔;第 3 章专业研制文件依据,由许志香执笔;第 4 章飞机研制过程强度技术工作,载荷计算研制历程由刘景光、金秀芬执笔;机体强度设计历程由许志香、郭伟毅、许海生、宋春艳、刘景光、邬旭辉、闫照明、陆慧莲、邹新煌、李卫平、李娜执笔;起落架强度验证工作由金秀芬执笔;颤振专业研制历程由梁技执笔;制造、试验、试飞中的故障部分由刘景光、许海生执笔;第 5 章重要技术问题攻关,由金秀芬、梁技、郭伟毅、许海生、宋春艳执笔。全书由朱广荣统稿、修改、补充并审定。

由于作者水平有限,书中的瑕疵恳请读者批评与指正。

朱广荣

2018 年 4 月

目 录

- 1 绪论 1
 - 1.1 支线飞机强度设计与验证的国内外现状 1
 - 1.2 支线飞机强度设计与验证工作解决的关键技术 2
 - 1.3 本书各章节的重点及主要成果 3

- 2 专业构架及职责 4
 - 2.1 强度专业的专业构成及人员比例 4
 - 2.2 强度专业的职责 4

- 3 专业研制文件依据 5
 - 3.1 依据文件 5
 - 3.2 适航审定基础和符合性方法 6
 - 3.2.1 审定基础 6
 - 3.2.2 符合性方法 7

- 4 飞机研制过程强度技术工作 11
 - 4.1 载荷计算研制历程 11
 - 4.1.1 地面载荷计算工作 11
 - 4.1.2 动载荷计算工作 14
 - 4.1.3 水上迫降载荷 24
 - 4.1.4 载荷试飞工作 32
 - 4.2 机体强度设计历程 34
 - 4.2.1 有限元分析 34
 - 4.2.2 机体结构静强度验证工作 41
 - 4.2.3 疲劳损伤容限验证工作 62

- 4.2.4 动强度验证工作 119
- 4.3 起落架强度验证工作 143
 - 4.3.1 起落架相关分析工作 143
 - 4.3.2 起落架相关试验试飞工作 146
 - 4.3.3 前起落架应急放更改 147
 - 4.3.4 起落架摆振试飞 148
- 4.4 颤振专业研制历程 149
 - 4.4.1 气动弹性理论分析 151
 - 4.4.2 颤振设计过程中的试验 157
 - 4.4.3 飞行试验(MOC6) 167
- 4.5 制造、试验、试飞中的故障 174
 - 4.5.1 全机疲劳试验中的问题 174
 - 4.5.2 试飞中的问题 174
- 4.6 供应商工作 176
 - 4.6.1 系统安装强度工作 176
 - 4.6.2 供应商监控强度工作 184
- 5 重要技术问题攻关 194**
 - 5.1 主起落架摆振分析部分情况稳定性裕度不足攻关 194
 - 5.2 主起落架过载系数不满足设计要求攻关 195
 - 5.3 方向舵防颤振设计 196
 - 5.4 颤振试飞技术攻关 198
 - 5.5 IRS 构型符合性验证技术问题攻关 199
 - 5.6 风车载荷情况下结构强度评估技术攻关 200
 - 5.7 全机稳定俯仰(2.5g)情况极限载荷试验 204
 - 5.7.1 试验成功的意义 204
 - 5.7.2 试验取得的成绩 205
 - 5.7.3 试验总结 212
 - 5.8 鸟撞试验攻关 212
 - 5.8.1 概述 212
 - 5.8.2 主要技术难点 213
 - 5.8.3 技术创新点 214
 - 5.8.4 总结 218
 - 5.9 全机疲劳试验攻关 219
 - 5.9.1 攻关背景及攻关目标 219

- 5.9.2 故障树及原因分析 219
- 5.9.3 技术途径及解决方案 221
- 5.9.4 技术创新 226
- 5.9.5 收获与启示 230

参考文献 233

缩略语表 234

索引 236

1 绪 论

1.1 支线飞机强度设计与验证的国内外现状

民用航空工业及其研制水平代表着一个国家综合科技能力和综合实力的高低,而适航取证是商用飞机成功的一个先决条件。民用飞机的整体设计研制过程要求严格按照中国民用航空规章第 25 部(CCAR-25 部)进行,能否顺利通过适航验证是其是否研制成功的标志,也是飞机投入市场运营的通行证。而飞机结构强度的设计与验证是整个飞机适航取证过程中非常关键的验证工作之一,对飞机的安全尤为重要。

ARJ21 飞机是我国第一架严格按照中国民用航空规章第 25 部(CCAR-25 部)进行设计和验证的飞机。飞机结构强度设计与验证工作包括载荷计算、静强度分析与验证、疲劳与损伤容限分析与验证、动强度分析与验证、气动弹性分析与验证、有限元分析等。强度设计和验证要严格按照 CCAR-25 部进行,国内没有经验可以借鉴,这对强度专业所有的设计人员都是巨大的挑战。

在疲劳损伤容限分析中,飞机结构损伤容限评定体系的建立是一个庞大而复杂的工程,它建立在无数次的试验、机队经验和复杂的理论研究基础之上,是要经过数十年才能完善的工作,在世界航空技术领域属于关键和核心的核心技术。损伤容限设计和评定,对 ARJ21 飞机的强度工程设计人员来讲是全新的课题。在这样的情况下,如何保证飞机结构损伤容限设计更为合理,参考哪些手册,为什么要做损伤容限评定,评定的基础是什么,怎样评定,评定的要求,评定的内容、方法和步骤是什么等都无经验可借鉴,如何进行满足适航符合性要求的损伤容限评定成为一个难题。

在动强度的分析验证中,鸟撞问题是一个十分复杂的动力学问题。由于鸟撞事故对航空安全会造成极大的危害,对经济造成极大损失,因此鸟撞问题已经成为民用飞机设计中必须考虑的重要内容之一。鸟撞问题的实质可归结为瞬态动力学响应问题。鸟撞问题具有如下特点:动量和能量的传递是在极短的时间(毫秒量级)内进行的,因此会产生巨大的撞击力;结构会发生很大的变形,载荷与变形是相互影响且连续变化的,其力学特性表现为几何非线性、材料非线性和接触非线性;鸟体的形状及物理参数发生大的变化,与结构的接触区域发生大的变形;鸟体与结

构之间存在耦合作用;撞击角度、撞击速度、紧固件的模拟及失效模式等对鸟撞有很大影响。根据 CCAR-25 部内容,有三个条款(分别为 25.571、25.631、25.775)对鸟撞提出了要求。因此,飞机在研制过程中必须开展相应工作以表明其鸟撞适航符合性。但是,由于国内在该技术领域的基础相对比较薄弱,抗鸟撞设计分析与适航验证技术已成为 ARJ21-700 飞机研制过程中为数不多的几大技术难题之一。

国外飞机制造公司都建立了自己的抗鸟撞适航技术体系,该体系是在型号研制过程中,通过系统的元件级试验、细节件试验、部件级试验等积累出来的经验,这些经验是在一个到多个型号中积累的,这些经验对外是绝对保密的,尤其是涉及一些材料性能更是无法获取,我们只能看到一些概念性的比较基础的成果;国内在结构抗鸟撞方面也进行过一些基础研究,但多数局限于简单平板及透明件的研究,在型号设计中的应用有限。有关单位在军机方面也做过不少卓有成效的研究工作,但主要局限于一些风挡的鸟撞研究,且只是满足军机规范对于 1.8kg 级鸟撞的要求,与满足中国民航 CCAR-25 部对尾翼结构必须进行 3.6kg 级鸟撞的要求存在差距。

颤振是飞机在气动力、惯性力和弹性力共同作用下的自激振动,是飞行器飞行中极易造成灾难性后果的一种气动弹性现象,不能人为控制,只能通过合理的结构设计来避免。一旦出现颤振问题,对于型号研制来说将是颠覆性的。所以,无论是军机和民机,在研制的早期阶段就要开始进行防颤振研究,这种研究贯穿于新机研制的全过程。工作内容包括颤振分析、气动伺服弹性(ASE)分析、颤振风洞试验、全机地面共振试验和全机结构模态耦合试验、颤振飞行试验、气动伺服弹性飞行试验等。

气动弹性设计是关系到型号设计成败的关键内容,是飞机设计中公认的高风险项目。国外民机公司有关民机气动弹性设计是通过型号的系列化发展,建立了具有各自特点的、完整的气动弹性设计分析技术和适航取证体系,这个体系是其在型号研制过程中逐步积累和完善起来的,过程艰难曲折,其经验不可能供我们借鉴,我们更无法得到其核心内容。

面对国内的技术薄弱和国外的技术壁垒的问题,强度设计人员唯有不断探索,自主研发。

1.2 支线飞机强度设计与验证工作解决的关键技术

在 ARJ21 飞机强度设计与验证过程中,解决了多项关键技术。主要有:① 强度专业关键适航条款验证技术;② 全机静力试验中的斜加载技术;③ 全机疲劳试验载荷谱的编制技术;④ 飞机结构损伤容限设计和评定;⑤ 鸟撞设计与验证技术;⑥ 气动弹性设计与验证技术。