



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

航空公司运营经济性分析与飞机设计

Analysis of Airline Operational Economics and
Its Effects on Design

陈迎春 主 编
宋文滨 党铁红 副主编



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



大飞机出版工程

航空经济学系列

总主编 顾诵芬

航空公司运营经济性分析 与飞机设计

Analysis of Airline Operational Economics and
Its Effects on Design

陈迎春 主 编

宋文滨 党铁红 副主编



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

内 容 提 要

本书汇集了航空公司运营经济性分析与飞机设计的优秀学术论文,内容主要涵盖航空公司运营经济性及其对飞机设计的影响问题。经济性贯穿商用飞机全寿命周期的所有环节,是反映商用飞机竞争力的重要指标之一。航空公司运营经济性对市场分析、机队规划、飞机设计等都具有重要的影响,开展有关经济性的研究和应用工作对于发展航空经济学这一新的交叉学科具有重要的意义。本书可供从事相关工作的技术和管理人员使用,也可供决策人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空公司运营经济性分析与飞机设计 / 陈迎春主编.
—上海:上海交通大学出版社,2012
(大飞机出版工程)
ISBN 978-7-313-08777-5

I. ①航… II. ①陈… III. ①航空公司—运营管理—
经济分析—文集②飞机—设计—文集 IV. ①F560.6-53
②V22-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 160457 号

航空公司运营经济性分析与飞机设计

陈迎春 主编

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

浙江云广印业有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 9.75 字数: 137 千字

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-08777-5/V 定价: 46.00 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: 0573-86577317

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(国家民航总局原副局长、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

本书编委会

学术指导委员会

(按姓氏笔划排序)

王子方 叶叶沛 陈迎春 杨慧敏
刘 洪 姜丽萍 葛忠汉 黎先平

主 编

陈迎春

副主编

宋文滨 党铁红

编委会

(按姓氏笔划排序)

孙 宏 宋文滨 余雄庆 陈晓和
李晓勇 李栋成 俞金海 童明波

前 言

民用航空是技术密集型和资本密集型的战略性行业,面临激烈的国际竞争,也是国家创新能力的重要体现之一。2006年2月9日,国务院出台的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》文件中,将大型飞机项目定为“未来15年力争取得突破的16个重大科技专项”之一,并确立“举全国之力,聚全国之智”的研发思路。大飞机研制面临着技术和市场的双重挑战,在开展技术攻关的同时,有效地开展相关经济性专题的研究,培育出成熟的、有竞争力的商用飞机产业,也是相当紧迫的。

商用飞机发展的历史就是通过持续性的技术与设计创新,不断提高使用经济性的过程。在这一过程中,需要确保安全性达到适航标准,舒适性不断提高,对环境的影响逐渐减少。发展规律表明,每一代新机型的推出,在使用经济性上需要达到10%~15%的改善,才可能获得航空公司认可。但是,飞机制造商在新技术研发上的投入,势必会推高飞机成本,在飞机价格主要由市场决定的情况下,可能会降低其自身的盈利能力,影响其对后续机型的研发投入和持续稳健的发展。过分追求新技术甚至会导致飞机制造商在商业上面临破产的境地,这一特点是商用飞机项目必须考虑的。

对商用飞机经济性的研究涉及飞机设计、制造、运营、维护,以及处置等全寿命周期的各个环节,包含市场预测与分析、飞机定价、设计方案、供应商成本管理、航空公司竞争性分析以及新技术的经济性评估等广泛的内容,覆盖经济学、飞机设计、管理科学等多学科的综合交叉,形成航空经济学的主体。

航空经济学研究的内容应涵盖飞机设计和制造的经济性分析;民用航空经济性评估方法、标准和体系;飞机全寿命成本、直接使用成本、直接维修成本;影响飞机经济性设计的因素分析;面向价值工程的设计方法与体系;新一代布局飞

机经济性分析;环保与经济性的关系;市场销售策略;经济环境和运营环境的影响;国家宏观政策和发展战略以及国际环境的影响等。

在2010年10月于上海成功举办“大型客机设计、制造与使用经济性研究学术会议”以及论文结集出版的基础上,2011年11月中国商飞上海飞机设计研究院市场研究中心再次联合上海交通大学在浙江宁波召开“航空公司运营经济性及其对设计的影响研究学术会议”,会议代表来自中国商飞,南京航空航天大学,上海大学,英国 Stirling Dynamics 公司,以及上海交通大学。本书即为该次会议的优秀论文集。与会代表都表达了共同发展航空经济学的强烈愿望,希望此书出版能够为此发挥一定的作用。

本书可供从事相关工作的技术和管理人员使用,也可供决策人员参考。

目 录

基于经济性的公务机升降特性优化展望

邓 建 朱阿元 颜永富 1

民用飞机移动通信对航空公司经济性影响的分析

陆 曦 曹全新 8

浅析影响民用飞机经济性的几点设计因素

彭 雄 18

航空公司运营经济性对飞机动力装置设计的影响

郎 振 唐洪刚 王 鹏 郑 晨 23

浅析民用航空发动机健康管理系统的应用和发展

李 婧 29

浅谈信息系统对航空公司运营经济性的影响

孙志强 曹全新 35

基于 DEA 的支线飞机选型经济性评价研究

杨文东 尹国栋 40

客舱布局对民机经济性影响的分析方法

陈小荣 张 帅 余雄庆 50

航线更换滑油类型对发动机运营经济性影响分析

颜 颜 唐宏刚 戚学锋 王 鹏 58

欧盟 ETS 对中国民航市场影响分析及应对策略研究

李嘉毅 张 康 64

民用飞机经济性研究的数据体系和数据库

赵 楠 宋文滨 74

民用飞机使用经济性计算方法对比研究

张 华 莫庆华 宋文滨 82

民用飞机经济性设计

叶叶沛 李晓勇 91

基于性能的导航(PBN)与中国航空市场

孟锐征 贾 佳 109

所有权成本对航空公司飞机引进决策的影响

许 敏 118

民用飞机燃油系统设计方案的经济性分析和权衡研究

赵亚正 刘英军 125

结合多层次制造成本模型的气动结构优化机翼设计

赵 曼 宋文滨 134

基于经济性的公务机升阻 特性优化展望

邓 建¹ 朱阿元¹ 颜永富¹

(1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司技术中心, 成都 610092)

摘要: 在可预见的未来,高性能、高效能的公务机将在世界公务机市场中日益重要。基于提高公务机空气动力效率的目的,本文讨论了未来可能应用于工程实际应用的升阻优化技术的优缺点,并展望了其应用前景。

关键词: 公务机; 升阻比; 优化

The Prospect of L/D Ratio Optimizing Design Based on Business Jet Economy

Deng Jian¹ Zhu Ayuan¹ Yan Yongfu¹

(1. Research and Development Center, Chengdu Aircraft & Industrial
Group Ltd. Corp., Chengdu 610092)

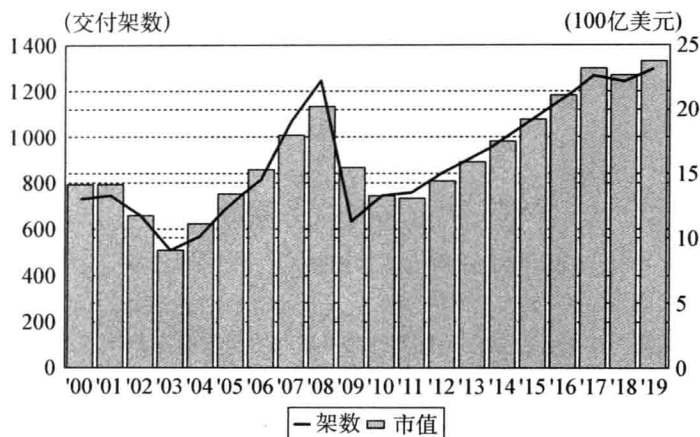
Abstract: In the near future, high performance and high efficiency business jets will be more and more important. Based on the purpose of promoting business jets aerodynamics efficiency, this paper discusses both the advantages and the disadvantages of L/D ratio optimizing technologies which are possibly applied in real engineering in the future and the prospect of application is reviewed.

Key words: Business Jet; L/D ratio; Optimization

0 引言

公务机是企事业单位、政府部门或个人为办理公私业务而用于出差旅行的飞机,是一种节约时间、方便灵活、安全、可靠、舒适、高效的交通工具。

图 1 和图 2 分别为中国公务机交付数量预测和世界航空市场预测。可以看出,随着近年世界经济的发展和全球一体化的发展趋势,在未来的 10~20 年时间,将会是公务机发展的黄金时期。特别是远程公务机的需求日益兴旺,加之高速发展的航空科技的推动,世界航空市场将出现高速增长的态势。在技术上,现有机型日臻完善,公务机发展的重要主题,将仍然会是更舒适、更安全、更高效。



除喷气客机，支线客机和涡桨客机

图1 中国公务机交付数量预测

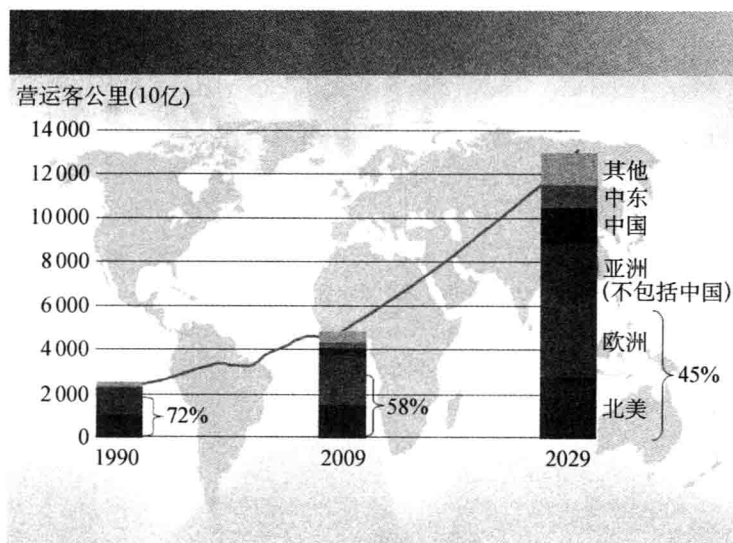


图2 世界航空市场预测

1 问题的提出

与军用飞机不同，民用飞机强调经济性、安全性和舒适性。民用飞机要在市场竞争中占有一席之地，必须具备经济竞争力。对于占据民机中高端市场的公务机来说，在市场竞争中具备较高的性能竞争力（如航程等）显得尤为重要。

我们知道，民机的直接使用成本（DOC）是体现民机经济性的重要参数，它取决于诸多因素，例如研制费用、使用年限等，在其他变量大致相同的情况下，民机的巡

航因子 $Ma \cdot K$ (Ma 为巡航马赫数, K 为巡航升阻比) 成为衡量飞机运营经济性的一个重要变量。它代表了民机的空气动力效率, 因此, 不断提高民机在巡航马赫数下的升阻比水平, 采用各种手段来降低激波阻力、摩擦阻力、诱导阻力和干扰阻力, 一直是飞机设计中重要的目标。

近几十年以来, 随着飞机设计理念的进步和计算流体力学 (CFD) 的进步与发展, 气动减阻技术得到了长足的进步和发展, 出现了翼梢小翼、超临界机翼、紧凑式发动机短舱布局等成功的气动减阻先例。在可预见的未来一段时间内, 公务机将会有什么新的减阻方式出现, 将是本文讨论的问题。

2 新型减阻方式

2.1 新型气动布局

当代喷气公务机的布局多为中等展弦比、下单翼、尾吊常规布局, 相对来说, 此种布局最为成熟也最为多见, 它可使机翼保持干净的流场, 升阻特性良好。近年来, 新型的公务机布局概念相继出现, 主要有融合体 (BWB) 布局 (图 3, 图 4)、升力体布局和飞翼布局。飞翼或者 IWB 布局有以下优点: ①优良的气动载荷分布; ②消除了传统布局中的翼身干扰阻力; ③升阻特性良好, 据估计, 飞翼或者 IWB 布局公务机升阻比可达 25~30。这大大优于当今常规布局公务机, 这将会很大地提升公务机的航程和运载能力。

但是, 新型气动布局公务机也同时面临以下不足: ①飞翼或者 BWB 布局公务机由于没有常规布局中的平尾和垂尾, 舵面势必布置于翼面后缘, 可能存在尾力臂不足而造成的舵面效率不足的问题, 这对于民用飞机的操纵效率和平衡场长 (BFL) 标准可能存在适航取证难题; ②为了不产生较大的零升低头力矩以造成配平困难, 飞翼或者 BWB 布局公务机可能不能采用当今主流高升阻比翼型, 这势必会影响飞翼布局飞机的升阻比; ③相对于技术及经验成熟的常规布局飞机, 飞翼或者 BWB 布局公务机的安定性问题、安全问题, 技术成熟度等尚待验证; ④可能存在研制难度和成本过高的问题。



图3 新型 BWB 布局公务机示意图

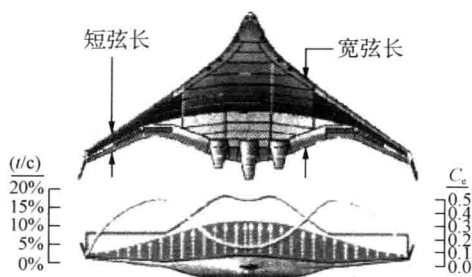


图4 展向升力系数和相对厚度图

2.2 层流减阻

人工层流及自然层流是一种减小亚声速飞机摩擦阻力的很有前途的手段,由于湍流的摩阻大于层流的摩阻,因此减少摩阻的基本措施大致可设想为:

- (1) 尽可能延迟转换的发生,扩大物面上层流流动的区域;
- (2) 减少湍流流动的阻力。

为实现大面积的层流流动,可通过适当的外形设计调整绕流的压强分布以保持大面积的层流绕流(自然层流流动 NLF)或利用吹吸气进行层流流动控制(LFC)。

在现有技术条件下,如果表面加工质量足够高的话,小后掠角机翼的层流边界层效应能有效实现,但是现代高端公务机巡航速度的发展有越来越快的趋势,例如湾流 G650 的巡航速度达到了 $Ma=0.92$,在高的巡航速度下,机翼的后掠角不可避免地加大,后掠效应与实现层流流动是相矛盾的,因为后掠限制了实现广泛自然层流流动的弦长 Re 数,且后掠诱导横向流动的扰动和前缘的湍流污染等。因此,即使不考虑噪声与粗糙度等因素,三维层流机翼的设计也还必须考虑对横向扰动、流向扰动(如经典的二维 T-S 波结构)和接触线湍流污染的控制。

理论上人工层流可以适用任何后掠角的机翼,但要求一定的能量消耗和增加结构重量,工艺、结构仍有尚未突破的技术难题,而且对所用层流技术检查及维护的可能性是实际应用层流技术时必须考虑和解决的重要问题,因为层流机翼一旦进入湍流边界层状态,其飞行性能会严重恶化。但是随着技术的进步,上述问题将会逐一解决。

2.3 主动气动弹性机翼技术

主动气动弹性机翼(AAW)技术中的机翼带有多个前缘和后缘控制面,在主动控制系统的操纵下,多个控制面可协调偏转,主动使机翼发生希望的弹性变形,由变形的机翼产生控制力,满足飞行特性改变的需求(图 5)。

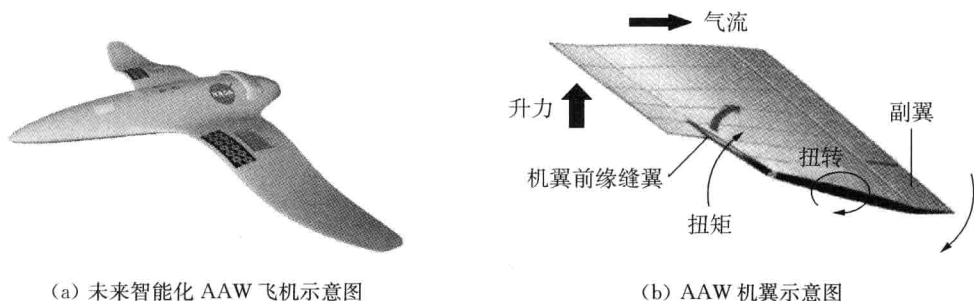


图 5 主动气动弹性机翼(AAW)技术

公务机气动布局的设计均针对特定的飞行条件,我们称之为设计点。在特定的设计点(升力系数、马赫数、雷诺数、飞行高度等)公务机具备优良的巡航性能,如果其飞行条件偏离设计点,升阻特性将不再是最优的,而公务机的飞行剖面中,有很大

一部分不在最优设计点,因此,采用 AAW 技术可能会取得很高的空气动力收益。目前,这项技术美国走在前列,2002 年,美国对装备了 AAW 的 F/A-18A 试验机在加利福尼亚州爱德华空军基地完成了首次飞行。与此同时,美国国防预先研究计划局(DARPA)、NASA、美国空军等机构联合开展“智能翼(smart wing)”研究计划,展示了形状记忆合金等智能材料的应用潜力。

但是采用 AAW 后,结构设计上的困难;气动弹性的不稳定性;外形变化激发器能量的缺乏;能够承受外形变化的蒙皮材料等都是当今亟待解决的难题。随着科学技术的不断发展,高端公务机采用 AAW 的设想是能够实现的,通过合理的规划是可以有效减低和规避风险的。

2.4 细肋减阻技术

由于特定的飞行条件和当今加工工艺水平,多数公务机表面的绝大部分都是湍流附面层,湍流减阻显得尤为重要。细肋减阻的主要机制是展向黏性力的变化导致细肋凹谷区摩阻的减少,用近壁区涡运动的观点来解释,细肋对近壁涡运动的横向分量形成阻力,从而改变了展向的速度梯度。已有的细肋试验数据表明,细肋可减小湍流摩阻为 6%~10%。

目前已有不少湍流减阻的概念、方法和技术,如离子风、再层流化、大涡破裂以及细肋等。其中细肋减阻技术则比较成熟并已准备用于型号研制中,这是目前湍流减阻各种方法中一种比较有前途,可供工程应用的方法。如图 6 所示。

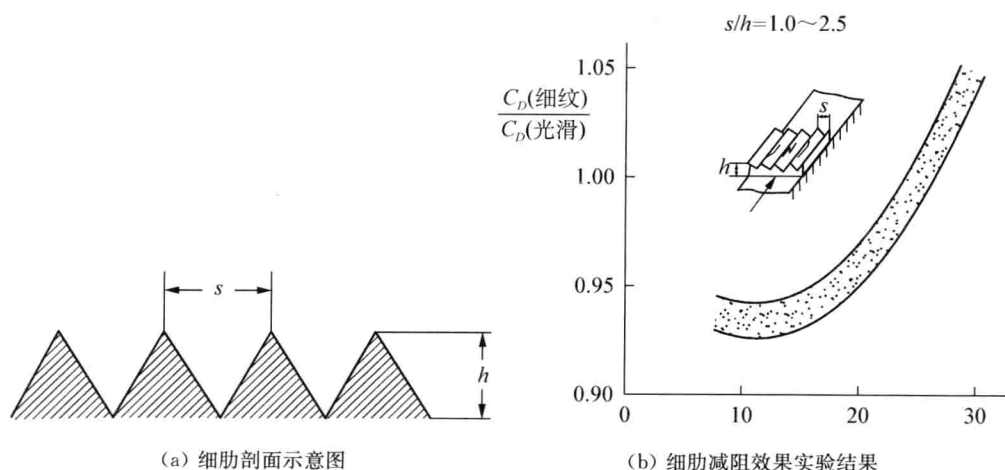


图 6 细肋减阻技术

关于细肋减阻的后续发展,还涉及维护经验、薄膜的快速覆盖与揭除,薄膜的生产、检验及维护等尚待解决的问题。

2.5 编队飞行减阻技术

诱导阻力是公务机阻力的重要组成因素。虽然随着速度的增加,诱导阻力在总