



大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

“十二五”国家重点图书规划项目
国家科学技术学术著作出版基金资助
上海科技专著出版基金

民机空气动力设计 先进技术

Advanced Technology of Aerodynamic Design for
Commercial Aircraft

朱自强 吴宗成 陈迎春 王晓璐 著



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

“十二五”国家重点图书规划项目
国家科学技术学术著作出版基金资助
上海科技专著出版基金

大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

民机空气动力设计 先进技术

Advanced Technology of
Aerodynamic Design for Commercial Aircraft

朱自强 吴宗成 陈迎春 王晓璐 著



上海交通大学出版社

内容提要

本书探讨了民机未来的发展及民机空气动力设计可应用的新概念和新技术,详细介绍了几种先进气动布局的概念和 design 方法,讨论了未来可能应用的先进技术,如层流流动控制、主动流动控制、机体/发动机的有利干扰及一体化设计,多学科分析和优化设计等,以及各种抑制噪声和音爆的技术。希望本书能对民机气动设计提供有益的帮助。

本书可供从事民机设计和相关领域研究的工程师、高等学校教师、研究生和本科生使用,也可供相关研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

民机空气动力设计先进技术/朱自强等著. —上海:上海交通大学出版社,2013

(大飞机出版工程)

ISBN 978-7-313-09865-8

I. ①民… II. ①朱… III. ①民用飞机—空气动力学—设计
IV. ①V271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 121634 号

民机空气动力设计先进技术

著 者:朱自强 吴宗成 陈迎春 王晓璐

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:浙江云广印业有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:637 千字

版 次:2013 年 11 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-09865-8/V

定 价:135.00 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:32.25

印 次:2013 年 11 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:0573-86577317

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪,科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略,上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”,资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

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

前 言

随着世界人口的增加、现代经济的增长、国际交往的频繁以及旅游事业的兴旺,民用航空持续高速地发展着,国内外对民机的数量和质量要求都在不断提高。除传统的安全、经济、高性能和舒适等要求外,对未来民用飞机(民机)还提出了更高的减少排污、抑制噪声等环保性能指标要求。未来民机的设计和制造面临着高难度的挑战。

国际商业的剧烈竞争及国外大型民机制造商的垄断,迫使我国必须重视发展自己的先进民机。我国将自主研制大型民机列为“国家中长期科学和技术发展纲要(2006—2020)”确定的16个重大专项之一,这个决定极大地推动着我国民机走上自主创新的发展道路。而目前我们的设计、制造水平和已有的技术储备与国际先进水平还有相当的差距,因此,我们必须更加重视科研投入,特别是对新概念和新技术的探索,做出科学的规划,组织相应的研究队伍,严格科学管理,总结和发展具有自主知识产权的科研成果和专利;必须认真积累经过飞行实践考验过的设计经验,通过现有型号的实践,大力提高设计和制造人员的素质和工程实践能力;必须努力缩小我们与国际先进水平的差距,使我国民机事业尽快地步入健康、快速、有效发展的道路。

研究民机空气动力设计先进技术,使我们深感未来民机对此的要求是非常高的。虽然市场具有灿烂的前景,但竞争也十分激烈。因而民机制造大国纷纷加大投资,积极开展科学研究,积累技术储备,不断探索新的概念和新的技术来应对巨大的挑战和竞争。例如美国首先从国家层面制订了NextGen计划,根据空中交通运输可能的发展前景,提出近期和远期民机发展的N+1、N+2和N+3代规划。NASA据此制定了基础研究和技术开发及验证的规划,组织了相应的研究队伍,有条不紊地开展研究工作。显然他们是希望在未来民机设计和制造技术上获得领先优势,在市场上占有先机和更大的份额。

理论探讨及数值计算(CFD)、地面实验和飞行试验是研究中三个相辅相成

的主要手段。地面实验仍然是获得必需数据库的主要手段,经过验证的 CFD 方法可以大量缩减地面实验的工作,因此在研究中应继续加强 CFD 与地面实验的有机结合,以最小耗费获得最大成果。由于民机安全性的苛刻要求,飞行验证已成为能否将新概念和新技术应用于民机设计中的必要手段,尽管其代价昂贵,但仍是必须的。在探索新概念、新技术过程中应将三种研究手段有机地结合,充分发挥高等院校、科研机构 and 工业部门各自的优势,相互紧密支持和配合,尽快完成基础研究、应用研究到技术发展的全过程。

为了将多学科的新成果与新技术真正融合到未来民机的设计和制造中去,必须大力、深入地开展气动布局,特别是概念设计的研究工作。为应对空气动力设计的巨大挑战,需继续加强空气动力学的基础研究,探索各类复杂流动现象,特别是湍流流动和分离流动的机理和规律,并进一步实现对它们的控制和利用。

我国决定自主研制大型民机是对我国所有航空人的巨大鼓舞。在激烈竞争的世界民机市场中我们虽有巨大市场的优势,但目前我们的设计、制造水平和已有的技术储备与国际先进水平仍有相当的差距,急需我们加强规划,科学管理,埋头苦干,团结协作。市场经济规律和我国民机研制的经验与教训告诉我们,必须发展具有自主知识产权的高水平、高质量民机,才能使自己在世界民机市场中首先是有一席之地,再不断努力而处于不败的地位。

在民机研制中,空气动力设计始终起着先行的关键作用,空气动力设计的新概念和新方法将决定着未来民机可能实现的先进性能。为此,我们参考国外的经验,加上自己的思考,提出对空气动力设计先进技术的看法和意见。希望能抛砖引玉,推动中国民机设计的现代化。

本书第 1 章简要地概述了民机近期的发展和可能的未来。考虑到现代飞机新型的综合设计模式要求提高早期的设计知识和设计自由度,减少后期的改变,概念设计在未来民机产品的设计过程中将具有更为重要的地位,故本书以未来可能实现的新布局形式,如翼身融合体民机、高经济性静音中航程民机、支撑机翼跨声速民机等为例,分别在第 2, 3, 4 章介绍了它们的概念设计。增升减阻是民机设计中的重要原则之一,传统的民机都按完全湍流流动来设计,而层流化可以大大减小飞机的阻力,因此层流化设计也是飞机设计师追求的目标之一。第 5 章讨论了层流流动控制技术及应用。高升力系统的几何外形、绕流和支撑系统等都很复杂,其生产价格可能占到一架典型民机生产价格的 6%~11%,因此现代民机设计中高升力系统应在满足起降性能要求下尽可能简单。实现短距起降是未来民机的又一重要指标,现有的高升力系统能否实现? 如何改进? 第 6 章讨论了高升力系统外形空气动力及流动分离的控制技术。随着跨洲越洋交往

的增加,超声速民机早已成为民机设计者追求的目标之一,而迟迟未能实现的障碍之一是音爆的影响。低噪声是未来民机重要指标之一。第7章讨论了超声速民机和噪声的控制。最后一章为多学科综合和优化设计。

感谢顾诵芬院士、陈懋章院士和唐长红院士对本书的鼎力支持和提出的宝贵意见。

感谢国家科学技术学术著作出版基金委员会、上海科技专著出版基金管理委员会和上海交通大学出版社对本书的出版给予的大力支持。

感谢北京航空航天大学航空科学和工程学院的鼓励和支持。

由于时间仓促,加之我们自身水平有限,本书中存在的错误及不妥之处恳请读者批评指正。

作 者

2013年3月

符 号 表

符号	量的名称	符号	量的名称
α	迎角	η_{p_1}, η_{p_2}	由 Stino 方程关连 η_p 与比燃油消耗率之间关系
α_i	流向(空间)增长率	θ	Kriging 模型计算中的一个参数
α_r	流向波速	$\theta(x)$	边界层动量厚度的变化函数
β	多孔性参数	$\theta(\infty)$	动量厚度
β_0	壁面流线和无黏流线之间的夹角	λ	波长
β_i	展向(空间)增长率	Λ	后掠角
β_r	展向波数	$\Lambda_{1/4}$	1/4 弦线处的后掠角
γ	间歇因子	Λ_{LE}	前缘后掠角
γ_{min}	最小强度因子	μ	有效黏性系数
$\gamma(S_q)$	转捩区流动长度	ρ	密度
Γ	间隙函数 $\begin{cases} \Gamma=0 & \text{层流;} \\ \Gamma=1 & \text{湍流} \end{cases}$	ρ'	脉动密度
δ	边界层厚度	ρ_e	边界层外缘密度
$\delta(x)$	位移厚度积分参数	σ	空间的增长率
δ_f	襟翼偏转角	σ_i	第 i 单元应力
δ_{flap}	襟翼偏度	σ_{min}^{upw}	数值格式中的加权因子
δ_{hood}	喷口安装的帽沿偏转角度	$\sigma_{剪切}$	剪切应力
δ_{LE}	前缘偏度	$\sigma_{拉力}$	拉伸应力
δ_{to}	原分离流再附的角度	$\sigma_{压缩}$	压缩应力
δ_s	缝翼偏转角	τ_{ij}	应力张量
δ_{so}	无激振时出现分离的角度	φ	与飞行方向的夹角
δ_Z	横向流位移厚度	χ	尖削比
η	功率效率	ω	频率
η_p	Froude 推进效率	ω_i	时间增长率

ω_r	波频率	C_m	俯仰力矩系数
A	面积; e^n 计算中的放大扰动振幅	$C_{M\delta}$	舵面效率
A_0	层流面积; e^n 计算中的初始扰动振幅	C_n	偏航力矩系数
AOA	迎角	C_p	压强系数
AR	展弦比	C_q	层流控制的吹气系数
b/z	半翼展	C_T	推力系数
BF	轮档油量	C_V	变化系数
BPF	叶片通道频率	C_{V, C_D}	阻力的变化系数
BPR	涵道比	C_{V, C_L}	升力的变化系数
c	弦长	C_{V, C_m}	俯仰力矩的变化系数
c_0	声速	C_μ	动量系数
c_∞	来流声速	$\langle C_\mu \rangle$	振荡动量系数
c_p	剖面压强系数	d	网格直径
C_d	剖面阻力系数	D	喷口直径
C_{dp}	压力阻力系数	D	阻力
C_D	阻力系数	D_{ewn}	故障发动机的阻力
C_{Dp6}	6°迎角时的型阻系数	DC_{60}	控制流场畸变的参数
$C_{D波}$	波阻系数	DOC	直接运行成本
$C_{D废}$	废阻系数	e^N	N 因子法
$C_{D摩}$	摩擦阻力系数	E	典型的运行重量
$C_{D压}$	压差阻力	EPNL	有效感觉噪声水平
$C_{D总}$	总阻力系数	f	频率
C_E	输入功率系数	f_e	激振频率
C_f	摩阻系数	F^+	激振减缩频率
$C_{f层}$	层流的摩阻系数	$F_{F_1}^+$	多点激振中激振器 F_1 的激振减缩频率
$C_{f湍}$	湍流的摩阻系数	$F_{F_2}^+$	多点激振中激振器 F_2 的激振减缩频率
C_F	总摩擦阻力系数	F_M^+	有效无因次频率
CI	成本指标	F_i	第 i 单元允许应力
C_l	翼剖面升力系数	F_{xyz}	网格
C_L	升力系数	FM	功率效率和动力效率之比
$(C_L/C_D)_{巡航}$	巡航飞行的气动效率	FOM	(燃油效率)指标值
C_{L6}	6°迎角时的升力系数	g	非定常激振的台阶高度
C_{Lmax}	最大升力系数	g	重力加速度
C_{La}	升力线斜率	h	非定常激振的缝隙宽度

h/c	缝隙高度与弦长之比	$N _{X^T}^{\text{TS}}$	由 TS 波产生转捩点的 N 因子值
h/r	缝道高度与曲率半径之比		
h_{ccw}	ccw 吹气缝隙高度	OASPL	总体声压水平
h_i	狭窄缝口	OEW	运行空重
H	飞行高度	p_{back}	进气道的反压
$H(=\delta^*/\theta)$	形状因子	p_i	喷口压强
H_i	不可压缩的边界层形状因子	p_o	总压
I	单位矢量	P	设计商载重量
$K(=\frac{L}{D})$	空气动力效率	PFEI	商载燃油能量强度
K_{max}	最大空气动力效率	PNLT	单音修正感觉噪声水平
K_a	翼型技术因子	PSD	压强谱密度
l_e	发动机间的侧向距离	$q(y)$	复振幅函数
l_{ref}	平均气动弦长	q'	脉动量
L	分离区在垂直来流方向的长度尺度	$r(x)$	多维的相关矢量
L	升力	r_o	喷流出口半径
L/D	升阻比	R	航程
L_t	襟翼长度	$R(x^{(i)}, x^{(j)})$	任意两点 $x^{(i)}, x^{(j)}$ 之间的相关函数
$\dot{m}_t$	发动机燃油消耗速率	Re	雷诺数
Ma	马赫数	Re_c	基本弦长雷诺数
Ma_{∞}	自由来流马赫数	Re_d	稳定性计算中给定的雷诺数
Ma_{crit}	临界马赫数	Re_T	转捩雷诺数
Ma_{del}	阻力发散马赫数	Re_{∞}	自由来流雷诺数
$M_{xy}F_z$	网格	Re_{δ}	黏性边界层厚度雷诺数
M_{xyz}	网格	Re_{θ}	以边界层动量厚度 θ 为单位的雷诺数
MAC	平均气动弦长	S	网格宽度
MFR	质量流量比	S_q	转捩区域长度
MTOW	最大起飞重量	S_{req}	参考面积
N	模拟波的周期数	Sr	斯特劳哈尔数 (Strouhal number)
N	网格点数		
N_{CF}	横向流的 N 因子	S_{strip}	机翼上所取局部狭条面积
N_{clm}	转捩点数	$S_{\text{浸润}}$	浸润面积
$NPR_{\text{次}}$	次喷流压强比	S/R	相对弧长
$NPR_{\text{主}}$	主喷流压强比	SFC	比燃油消耗率
$N _{X^T}^{\text{CF}}$	由横向波产生转捩点的 N 因子值	SPL	声压水平

t	翼弦厚度	v	扰动的法向速度分量
t/c	翼型相对厚度	v_F	临界颤振速度
T	最大推力	v_T	风洞气流速度
T/W	推重比	v_{TE}	后缘缝道喷流速度
T_μ	来流的湍流度	V_c	进场速度
T_{inf}	无穷远处温度	V_∞	来流速度
T_j	喷口温度	w	平均流分量
$TOGW$	起飞总重	W	实际重量
u	扰动的平均流分量	W_i	输入功率
u'	动脉速度	W_∞	展向速度
u_j	射流的峰值	$W_{机身}$	机身重量
U^4	近地噪声速度率	$W_{机翼}$	机翼重量
$U^{5.5}$	高升力翼面组合噪声的速度率	$W_{零燃油, 计算}$	零燃油时计算的重量
U^5	远场噪声速度率	$W_{最大机身重量}$	最大机身重量
U^6	起落架和缝翼噪声的速度率	x/c	缝道位置
U^8	襟翼噪声的速度率	x_B	气泡长度
U_∞	自由来流速度	x_j^T	转捩点的 x 值
U_{CF}	飞行(外流)速度	x_m	无黏流线拐点的位置
U_e	边界层外缘速度	x_i/c	转捩点位置
U_j	射流速度	x_{TE}	喷口主翼型后缘的距离
$\bar{U}_j$	平均射流速度	Z/D	喷口离机翼表面的距离

目 录

第1章 灿烂的前景、白热化的竞争、高难度的挑战 1

- 1.1 对未来民机需求的不同预测 1
- 1.2 A380 和 B787 之争 4
- 1.3 单通道(窄体)客机的群雄竞争 9
- 1.4 对未来民机的要求 13
 - 1.4.1 N+1 常规布局飞机 13
 - 1.4.2 两种布局并举的 N+2 代飞机 16
 - 1.4.3 N+3 代先进民用飞机 28
 - 1.4.4 超声速民机 49
 - 1.4.5 欧盟的 2050 年航空发展展望 54
 - 1.4.6 REVCON 项目 57
- 1.5 结束语 58
- 参考文献 59

第2章 翼身融合体(BWB)民机 62

- 2.1 BWB 概念的出发点 63
- 2.2 BWB 的研究和发展 64
- 2.3 欧盟航空界的 BWB 气动设计研究 71
- 2.4 BWB 外形的多学科优化设计 73
 - 2.4.1 WingMOD 多学科优化设计软件 73
 - 2.4.2 发动机和机体一体化设计 77
- 2.5 俄罗斯的研究 79
- 2.6 分布式发动机 BWB 飞机的多学科优化设计 81
 - 2.6.1 分布式发动机概念 81
 - 2.6.2 喷气机翼和喷气襟翼(Jet flap)概念 82
 - 2.6.3 分布式发动机模型 82

- 2.6.4 多学科优化设计结果 84
- 2.7 X-48B 和 X-48C 87
- 2.8 BWB 空气动力外形工程设计的一种数值优化方法 89
 - 2.8.1 设计方法概述 89
 - 2.8.2 优化设计结果的讨论 90
- 2.9 结束语 93
- 参考文献 93

第3章 高经济性静音中航程民机 96

- 3.1 SAX-40 中航程概念飞机简介 96
- 3.2 实现设计目标可能性的分析和设计思想的形成 97
- 3.3 三轮 SAX 的发展 98
- 3.4 关键技术的讨论 99
 - 3.4.1 准三维机体外形的的设计方法(Q-3D) 99
 - 3.4.2 Q-3D 设计方法的验证 100
 - 3.4.3 前缘前弯的中央体气动外形设计 102
 - 3.4.4 可平滑下弯的外翼前缘及升降副翼的后缘刷 103
 - 3.4.5 吸入边界层的多风扇埋入式发动机组和喷口截面可变推力矢量喷管组合的先进推进系统 103
- 3.5 SAX-40 优异性能概括 107
 - 3.5.1 SAX-40 的低噪声 107
 - 3.5.2 SAX-40 的油耗高经济性 109
 - 3.5.3 SAX 的低排污性 109
- 3.6 结束语 110
- 参考文献 110

第4章 支撑机翼跨声速民机 112

- 4.1 优化问题的提法 115
- 4.2 各学科计算方法 116
 - 4.2.1 空气动力学 116
 - 4.2.2 结构和重量 118
 - 4.2.3 稳定和操纵 119
 - 4.2.4 推力 121
 - 4.2.5 其他 121
- 4.3 计算结果和 SBW 提高飞机性能的潜能讨论 121
 - 4.3.1 SBW 优于常规飞机 121