



现代飞机的 空气动力设计

朱自强 陈迎春 王晓璐 吴宗成 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

现代飞机的空气动力设计

朱自强 陈迎春 王晓璐 吴宗成 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书具体分析和讨论了军用机和民用机两类飞机空气动力设计上的新概念和新特点,介绍了计算流体力学(CFD)各类方法应用于气动设计的原理和关键技术以及综合和优化设计方法的应用。本书的附录扼要地介绍了 CFD 学科的发展、CFD 的主要内容及相关文献。希望本书对进行军用机及民用机气动设计有较大帮助。

本书可供从事现代飞机设计和相关领域的高等院校的教师、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

现代飞机的空气动力设计 / 朱自强等著. —北京:
国防工业出版社, 2011. 10
ISBN 978-7-118-07151-1

I. ①现... II. ①朱... III. ①飞机—空气动力学—
设计 IV. ①V211.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 046344 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京奥鑫印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 35 3/4 字数 830 千字
2011 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474
发行业务:(010)68472764

前 言

海湾战争中,多国部队采用的“空地一体战”,即协同陆、海、空与电子战而形成的一个一体化作战体系,反映了现代战争的特点,并使多国部队取得了压倒性的胜利。“空地一体战”的核心是空中优势,因此,当前各国在大量削减常规武器的同时又继续增大对航空新技术研究的投资,以发展更先进的飞机,争取空中优势。

未来的空中作战将呈现陆、海、空、天、信、电一体,攻防一体和信息火力一体的特点,在武器装备上突出信息化、隐身化、无人化和系统化。在这种思想和走向指导下,美国已确定了新一代“高档”(F-22)和“低档”(F-35)战斗机装备部队的体系。出于信息要求和经济性的考虑,美国十分重视无人机系列的发展,已经启动供空、海军共同使用的无人战斗机 X-47B 项目,并考虑改进和提高目前世界上体积最大、航时最长的“全球鹰”无人侦察机的性能,进入未来战争的有人机和无人机配合作战的状态。

国际民航事业高速的发展、国际商业激烈竞争的形势使各国迫切要求发展各自先进的民航机。积累大量经过飞行实践考验的设计经验对民航机的发展至关重要。

上述形势使与国际水平仍有相当差距的我国军用机、民用机发展面临着极为严峻的考验。民用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民用机,才能使自己保持在世界民用机产业中的独立地位。

未来军用机和民用机的设计是高度复杂的大系统,并涉及各种学科的综合。导弹、雷达、电子仪表及自动控制系统等的迅速发展对战斗机的优异性能起着越来越大的作用;然而,毋庸置疑,高性能的动力装置和优良的空气动力特性仍然是使战斗机获得高机动性和机敏性、在作战效能上实现新高度的保证,也是使民用机获得优异的巡航性能、起飞着陆性能和经济性的保证。因此,空气动力学在航空中的地位不仅不应削弱,而且还需进一步加强。没有先进的空气动力技术及新成果,就无法实现未来军用机及民用机的高性能。我们编写此书的目的之一也是希望人们能重视并推动空气动力学这一经典力学学科的发展,以促进我国飞机设计事业的发展。

虽然军用机及民用机的设计有各自的特点,对空气动力的要求也不尽相同,但仍有很多共同的特点和要求。为叙述方便,本书仍针对军用机和民用机分别讨论其有关的气动技术问题,但这并不意味着对民用机有意义的气动新技术对军用机就不重要,反之亦然。全书共 17 章,第 1 章讨论基础性问题,第 2 章~9 章讨论军用机的气动问题,第 10 章~17 章讨论民用机的气动问题。

本书是根据第一作者的《现代飞机设计中的空气动力学》(1995 年版)、《现代飞机设

计空气动力学》(2005 年版)两书和第一作者及其合作者们长期教学和科研的积累重新编著而成的。考虑到计算流体力学(CFD)对飞机气动设计的重要性,本书补充的附录 A ~ D 分别就面元法、跨声速流计算中的全位势方法、欧拉/N-S 方程及设计计算方法和工具等四方面内容进行了讨论,扼要地介绍了 CFD 学科的发展,讨论了 CFD 包含的主要内容并介绍了相关的重要文献,希望能使读者获得对 CFD 的初步了解,对其在军用机、民用机设计中的应用有较具体的认识。

感谢顾诵芬院士、陈懋章院士、崔尔杰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对本书的出版给予的大力支持。

由于时间仓促,加之我们自身水平有限,本书错误及不妥之处恳请读者批评指正。

作 者

2010 年 10 月于北京

目 录

上篇 基础篇

第 1 章 现代飞机设计模式的发展和特点	2
1.1 飞机设计的高技术性和高复杂性	2
1.2 航空产品(飞机)模式的发展和变化	4
1.3 飞机设计模式的变化	6
1.4 数字化设计	7
1.4.1 方案决策支持系统	7
1.4.2 综合设计与工程发展系统	8
1.4.3 集群化性能分析与仿真系统	8
1.4.4 虚拟现实运营与制造仿真系统	8
1.4.5 试验信息综合管理系统	9
1.4.6 知识管理与适航取证支持系统	10
1.4.7 国外典型大型飞机数字化设计实例	11
1.5 计算流体力学在飞机设计中的作用	11
1.6 CFD 及其在现代飞机设计中应用的发展	19
1.6.1 线性位势方法	20
1.6.2 全速势耦合边界层方法	21
1.6.3 欧拉方程方法及其与边界层方法的耦合	23
1.6.4 N-S 方程方法	24
1.6.5 基于 CFD 方法的设计方法和工具	32
1.7 多学科优化设计	36
1.7.1 MDO 方法	36
1.7.2 支撑机翼跨声速民用机的多学科优化设计	39
1.7.3 波音公司的 MDOPT 软件	49
1.7.4 大飞机和战斗机的双学科优化举例	52
1.7.5 MDO 应用的现状和未来	53
参考文献	55

中篇 军用机篇

第 2 章 未来战斗机发展的趋势及其对空气动力学提出的挑战	61
2.1 第三代战斗机的特点	61

2.2	第四代战斗机的特点	64
2.3	2020 年空战中战斗机配备的设想	67
2.3.1	重、轻型机的搭配	67
2.3.2	有人机和无人机的搭配	69
2.4	无人飞行器的研制	70
2.4.1	无人机在局部战争中的地位与作用	70
2.4.2	无人机的种类和发展的方向	71
2.4.3	长航时高空无人侦察机	72
2.4.4	无人战斗机	74
2.4.5	小型/微型无人机(SUAV/MAV)	79
2.5	结束语	86
第3章	现代战斗机气动布局示例	87
3.1	非定常大迎角空气动力学	87
3.1.1	大迎角空气动力的特性	87
3.1.2	绕细长物体的大迎角非定常空气动力特性	91
3.1.3	细长前机身非对称涡流动的控制	94
3.1.4	大迎角和非定常空气动力的计算	98
3.2	边条翼升力面布局	103
3.2.1	引言	103
3.2.2	边条翼流动的特性	104
3.2.3	边条翼的气动布局	108
3.2.4	自适应机翼	113
3.2.5	大迎角时的静稳定性	115
3.2.6	超声速飞机边条翼布局气动力小结	117
3.3	鸭式布局	118
3.3.1	引言	118
3.3.2	近距耦合的鸭式布局	119
3.3.3	远距耦合的鸭式布局	124
3.4	前掠翼的三翼面布局	126
3.4.1	引言	126
3.4.2	前掠翼气动特性的优点	126
3.4.3	前掠翼的不足	128
第4章	隐身飞行要求和空气动力的综合设计	130
4.1	减缩雷达散射截面积(RCS)的空气动力外形设计措施	131
4.2	飞机隐身特性要求与飞行性能要求的综合和折中	134
4.3	气动/隐身一体化设计的数值计算简介	136
第5章	进排气系统及其与飞机的一体化设计	141
5.1	一体化的含义	141
5.2	超声速战斗机中一体化设计的重要性	141
5.2.1	民用机和军用机发动机布局上的差异	141

5.2.2	推进系统推力贡献的变化	141
5.2.3	推力矢量化与超机动性相结合的要求	142
5.3	进气道系统与前机身的一体化设计	142
5.3.1	进气道的形式和位置	142
5.3.2	前机身流场的设计	143
5.3.3	F-15 的进气道设计	145
5.3.4	F-16 的进气道设计	146
5.3.5	未来飞机进气道系统设计中应考虑的新因素	149
5.3.6	“无隔道式超声速进气道”概念及其应用	149
5.4	后机身、尾翼和喷管系统的一体化设计	151
5.4.1	减小尾部阻力	151
5.4.2	后体的综合设计	152
5.5	内流以及内外流一体化分析与设计的数值模拟	153
5.5.1	飞机/进气道的计算	153
5.5.2	三维扩压管道——S 形管道的数值计算	156
5.5.3	喷流与后体相互作用的计算	159
第 6 章	推力矢量化、机敏性和超机敏性	160
6.1	飞机的机敏性	160
6.2	推力矢量化	162
6.2.1	推力矢量化的优点	162
6.2.2	过失速技术	162
6.2.3	完全矢量化飞机	162
6.2.4	部分矢量化飞机	164
6.2.5	PST 机动动作的设计及空战作战方案的研究	164
6.2.6	实现推力矢量化飞机的困难	166
第 7 章	大迎角非定常空气动力的数学模型	168
7.1	问题的提出	168
7.2	空气动力的暂态函数模型	169
7.3	状态-空间变量模型	169
7.3.1	非定常带有后缘分离的翼型绕流	169
7.3.2	具有涡破裂的三角翼的非定常流动	171
7.3.3	全机的非定常运动	172
第 8 章	数值模拟方法是未来飞机设计的重要工具	173
8.1	数值模拟在未来飞机设计与研制中的地位和作用	173
8.2	程序验证与确认是使数值模拟方法成为有效计算工具 的必要条件	175
8.3	计算流体力学的发展和展望	176
8.3.1	三维非定常黏流的模拟	177
8.3.2	多学科耦合及优化设计是 CFD 的未来发展方向之一	177
8.3.3	发展大规模并行机的有效计算方法	177

第9章 无人机的空气动力设计	179
9.1 高空长航时 UAV	179
9.1.1 翼型的研制	179
9.1.2 三维机翼的设计	185
9.2 UCAV 的空气动力及布局研究	190
9.3 SUAV/MAV	192
9.3.1 低雷诺数流动特点	192
9.3.2 低雷诺数时固定翼的定常空气动力	193
9.3.3 拍动翼推进的非定常空气动力	195
9.3.4 气动设计的讨论	197
参考文献	200

下篇 民用机篇

第10章 未来民用机发展的趋势	205
10.1 亚声速民用机的发展	205
10.1.1 新世纪对民用机的需求和剧烈的市场竞争	205
10.1.2 发展亚声速民用机的主要方向	212
10.1.3 民用机的一种新型布局形式——翼身融合体(BWB)飞机	214
10.1.4 高经济性静音中航程民用机设计方法讨论	226
10.1.5 其他可能的布局形式	236
10.2 超声速民用机的需求和发展	237
10.3 应对未来空中运输持续增长的挑战,注重基础研究,发展新概念和新技术	238
第11章 先进翼型的不断发展	241
11.1 超临界翼型	241
11.2 扩张后缘翼型	245
第12章 亚声速干线飞机三维机翼的设计	249
12.1 提高 $Ma \cdot K_{\max}$ 值	249
12.2 减小阻力	250
12.3 三维机翼气动布局的基本要求	251
12.4 几点讨论	252
12.4.1 翼型的影响	252
12.4.2 最大厚度沿展向分布的(非线性)影响	253
12.4.3 几何扭转角(φ)沿展向分布的影响	255
12.5 三维机翼的一种气动设计方法	257
12.5.1 对原 B-737 机翼的改进设计	258
12.5.2 A-7 机翼的改型设计	264
12.5.3 几点补充意见	269
12.5.4 机翼的多点优化设计	270

12.5.5	民用机机翼设计举例	270
12.5.6	基于高可信度分析的多学科优化设计(MDO)方法的探讨	274
第 13 章	机翼翼梢减阻装置的应用	282
13.1	翼梢小翼	283
13.2	翼梢帆片	286
13.3	剪切翼梢	287
13.4	不同形式翼梢装置的比较	287
13.5	翼梢小翼的设计	288
第 14 章	减小发动机短舱/机体间的干扰阻力	297
14.1	引言	297
14.2	发动机短舱的翼吊方式	298
14.3	发动机短舱的尾吊方式	300
14.4	数值计算方法简介	301
14.4.1	PANAIR 的应用	302
14.4.2	全位势方法的应用	304
14.4.3	TRANAIR 的优化设计	307
14.4.4	欧拉/N-S 方程方法和应用	308
14.5	机体/发动机综合设计方法	311
14.5.1	引言	311
14.5.2	综合设计中需要考虑的问题	312
14.5.3	综合设计方法	313
第 15 章	减小摩擦阻力	320
15.1	层流化技术	320
15.2	湍流减阻——小肋减阻	323
第 16 章	增升装置外形的空气动力	326
16.1	引言	326
16.2	机翼的前缘增升装置	327
16.3	机翼的后缘增升装置	329
16.4	增升装置外形流动的物理特征	329
16.5	分析增升装置外形气动特性的数值(RANS 方程)方法	333
16.5.1	二维计算	336
16.5.2	三维计算	338
16.5.3	EUROLIFT I 和 EUROLIFT II	340
16.6	增升装置的设计	348
16.6.1	多段翼型的设计	349
16.6.2	发动机短舱/挂架与增升装置缝、襟翼间的气动干扰	352
16.6.3	产生高升力与满足失速特性(固有的低头和适度的滚转倾向)之间的折中	352
16.6.4	工程设计方法的研究	352
第 17 章	高速民航机	359
	参考文献	368

附录

附录 A 面元法及其在飞机设计中的应用	376
A.1 引言	376
A.2 经典面元法	376
A.3 第二代面元法	379
A.4 涡格法 (Vortex lattice method, VLM)	381
A.5 面元法的应用	381
A.6 结束语	387
参考文献	387
附录 B 跨声速流计算中的全位势方法	391
B.1 引言	391
B.2 流场分析计算的全位势方法	391
B.2.1 跨声速流动的特点和全位势方法的等熵与无旋假设	391
B.2.2 全位势方程	392
B.2.3 边界条件和环量	394
B.2.4 守恒方程和非守恒方程	394
B.2.5 跨声速小扰动 (TSD) 方程	395
B.2.6 全位势方程的数值方法	396
B.2.7 近似因子分解迭代格式	403
B.2.8 SLOR、ADI 和 AF2 的收敛特性	406
B.2.9 多重网格方法	408
B.2.10 曲线坐标和复杂外形的全位势方法应用	409
B.2.11 TRANAIR	412
B.2.12 BLWF	415
B.2.13 黏流/无黏流相互作用技术	419
参考文献	422
附录 C 现代计算流体力学方法——欧拉/N-S 方程解方法	428
C.1 引言	428
C.2 欧拉/N-S 方程的数值计算方法	429
C.2.1 中心型差分格式	430
C.2.2 迎风型通量分裂方法	432
C.2.3 中心差分型格式和通量差分裂格式的数值算例比较	437
C.2.4 TVD 格式	439
C.2.5 基本无振荡——ENO 格式	447
C.2.6 AUSM+ 的迎风型格式	447
C.2.7 求解非定常流的多重网格双时间步长方法	450
C.2.8 航空工业界目前使用的 CFD 软件	453

C. 2. 9	高阶格式	455
C. 3	网格生成技术	468
C. 3. 1	复杂外形的结构网格生成	469
C. 3. 2	非结构网格——三角化方法	471
C. 3. 3	非结构六面体网格	473
C. 3. 4	自适应笛卡儿网格	474
C. 3. 5	黏性层网格	474
C. 3. 6	网格生成方法小结	475
C. 3. 7	计算网格应用举例	477
C. 4	湍流流动的模拟	484
C. 4. 1	湍流流动的各种模拟方法	484
C. 4. 2	湍流模型的讨论	491
C. 5	提高 RANS 软件计算效率及扩充其使用功能的方法	502
C. 5. 1	多重网格方法	502
C. 5. 2	预处理方法	506
C. 6	CFD 面临的两个挑战性的计算	512
C. 6. 1	巡航构形阻力的计算	512
C. 6. 2	三维高升力外形的最大升力计算	522
C. 7	结束语	524
	参考文献	525
附录 D	设计计算方法和工具	539
D. 1	间接方法	539
D. 2	反设计方法	540
D. 3	数值优化方法	544
D. 3. 1	梯度法	544
D. 3. 2	伴随方程方法	549
D. 3. 3	遗传算法	552
	参考文献	557
结束语		560

上篇

基础篇

自 20 世纪 90 年代以来人们对飞机的要求从追求飞得更高、更快和更远逐渐转变为要求综合性能好、生产周期短和价格更低廉。飞机成为技术驱动转变为市场驱动的产品。飞机设计方式也由传统设计模式逐渐转变为综合性的现代化模式,即尽早考虑设计、工艺、支持等方面的要求和约束,较早完成成本/性能的折中,将复杂系统作为一个整体来设计。其关键技术是数字化、各学科高性能的数值模拟和多学科的优化。本篇为基础篇,将综述 CFD 和多学科优化在飞机设计中的应用。

第1章 现代飞机设计模式的发展和特点

1.1 飞机设计的高技术性和高复杂性

飞机最突出的特点是在空中飞行,因此,应具有高的运输效率和良好的飞行性能。飞机对外形有严格的要求,以满足空气动力学的要求,由此可见,空气动力设计在飞机设计中的重要地位和作用。为了能在空中飞行并有一定的运输效率,必须严格控制飞机的空载重量,这就要求气动设计与结构/重量设计必须密切合作,使得设计出来的飞机既符合空气动力要求,具有先进的气动和飞行性能,又具有尽可能轻的重量^[1]。此外,要使飞机能在空中安全飞行,飞机还必须依靠各种专业技术和系统。飞机总体设计的任务是要把这些不同的专业技术和系统创造性地综合在一起,使飞机整体性能优化,达到规定的战术技术要求(军用机)和性能任务的要求(民用机)。如果各技术专业都仅从本专业的角度出发来设计飞机,则飞机将不可能成为一架可用的飞机。在综合设计中空气动力设计始终起主导作用。对于飞机设计部门来说,推进系统、机载设备和机械的一些分系统都由其他相关部门协调设计、加工并集成至飞机(机体)中来,飞机设计实际上主要完成图1-1所示的设计工作内容^[2],而图中前两方面的设计(总体和空气动力)核心是气动设计(包含气动布局设计、各种气动参数的选择和确定,以及一些与气动特性有关的综合设计),而后三方面的设计(结构、机械系统和机载设备)也离不开与气动的综合设计。

飞机设计不仅具有高度的复杂性,而且还要满足不断发展的先进性能(民用机)和战术技术(军用机)要求,不仅要在各专业上有所创新,而且在综合成新飞机的设计技术上也要有创造性的思维,敢于创新,善于创新。从1903年莱特兄弟发明第一架飞机至今,发展了无数新型飞机。战斗机经历了从第一代军用机到第四代军用机的历程,气动设计千姿百态,性能有飞跃的发展;民用机方面也从螺旋桨、涡轮喷气发展到涡轮风扇发动机的民用机,从小型的通用民航机到大型的巨无霸A380飞机。它们的发展象征着航空技术以及空气动力设计技术的飞跃,例如凭借不断引入新技术和新理念,空中客车公司近年来研制型号的主要指标得到不断提高(图1-2)^[3]。如图1-2所示,空气动力效率(巡航因子)提高40%,巡航时的燃油消耗降低15%,每座每英里^①燃油消耗降低37%,每座每英里直接运营成本降低15%。这些因素使空中客车从开始的市场占有率不到3%,发展到2003年在新机交付量、储备订货和新订单3项指标上全面超过原来独霸大型飞机市场的美国波音公司,可见先进技术在当今和未来竞争激烈的民用机市场和民用机设计中的重要性和作用。

我国在“国家中长期科学和技术发展纲要(2006年—2020年)”中确定的16个重大专项之一是自行研制大型民用机。这将大幅度提升我国航空工业的实力,增强其参与国际竞争的能力,使其成为国民经济的支柱产业,促进高新技术的进步,并带动一大批产业的发展。

^① 1英里 $\approx$ 1.6千米(km)。

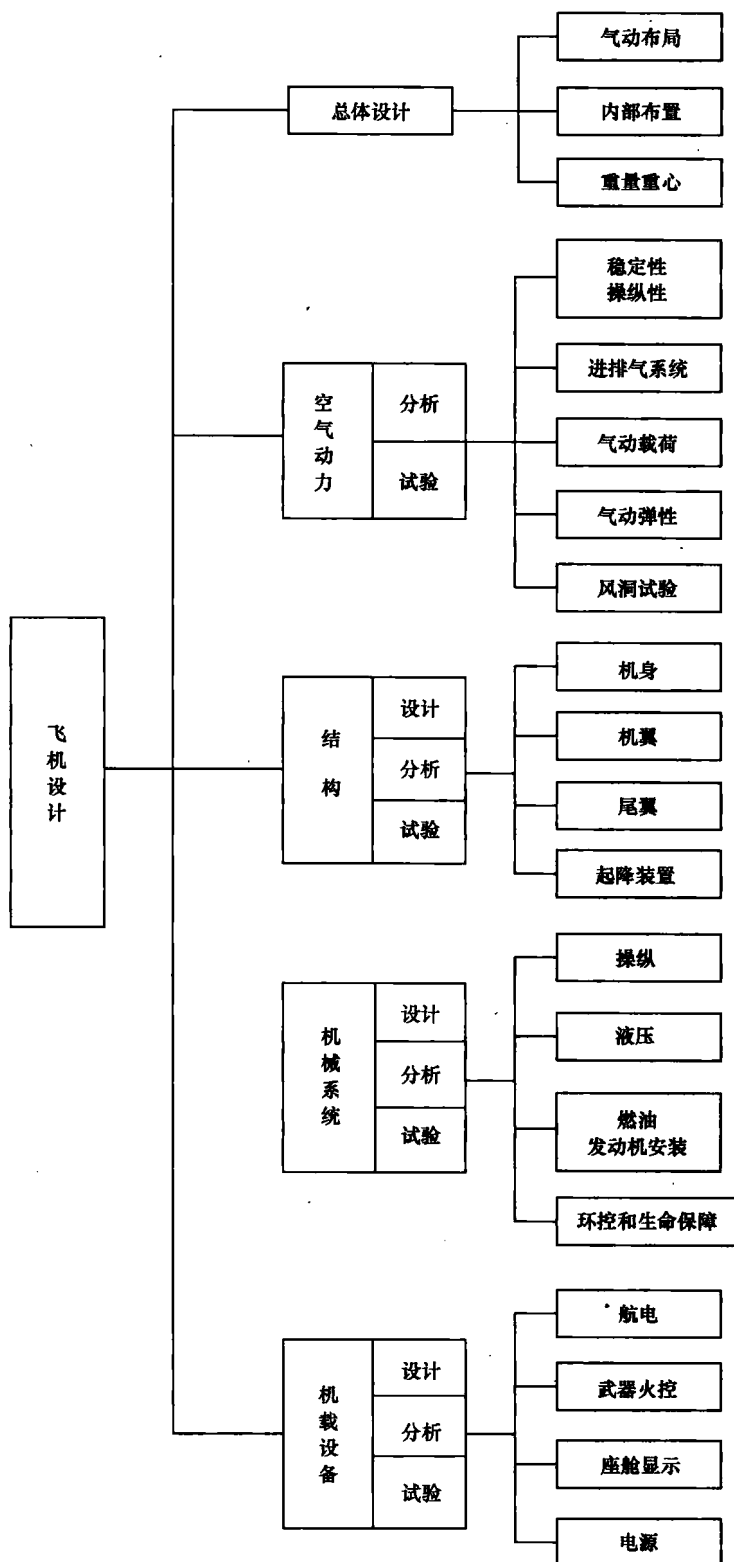


图 1-1 飞机设计的主要工作内容

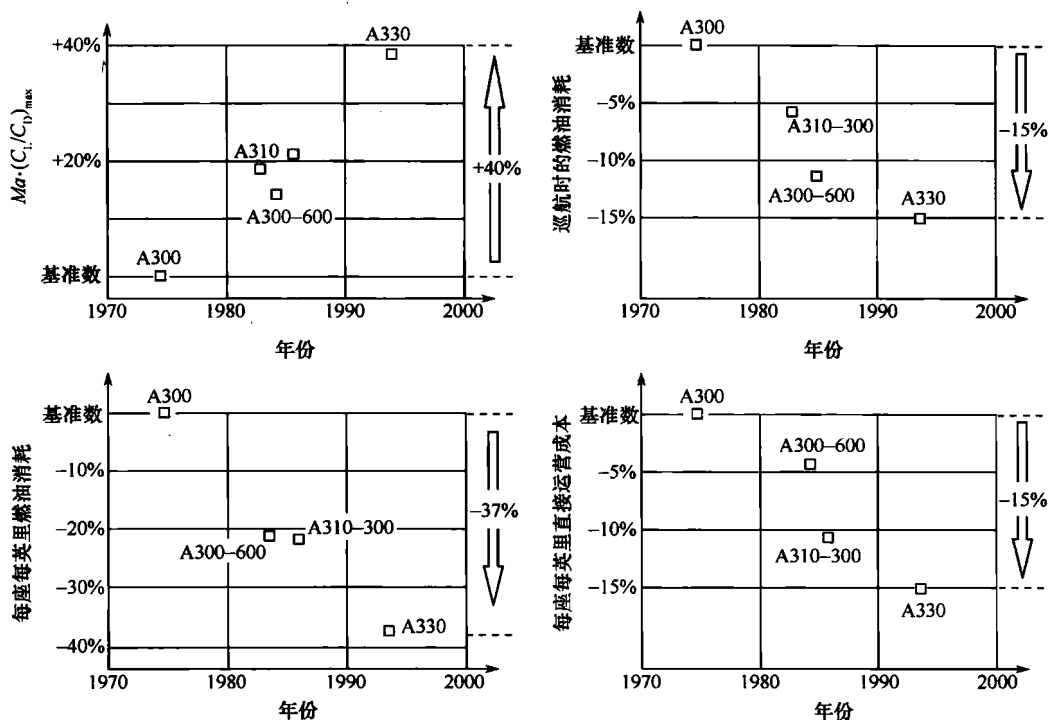


图 1-2 空中客车公司近年来研制型号主要指标的不断提高

1.2 航空产品(飞机)模式的发展和变化

从飞机发明到 20 世纪 90 年代,形成了技术驱动型的产品和设计。伴随着飞行性能的不不断提高,产品也更复杂而且价格更高,图 1-3 表征了军用机价格提高的速度,由图可见,每 10 年价格增加 4 倍。第三代战斗机 F-15 的单机价格约为 4500 万美元,而战斗性能有显著提高的第四代新战机 F-22 的单机价格则高达近 2 亿美元。用户(军方)强烈要求能以较低价格获得较高性能的产品,因此在确定研制第四代轻型战机 F-35 时第一要求是“买得起”。

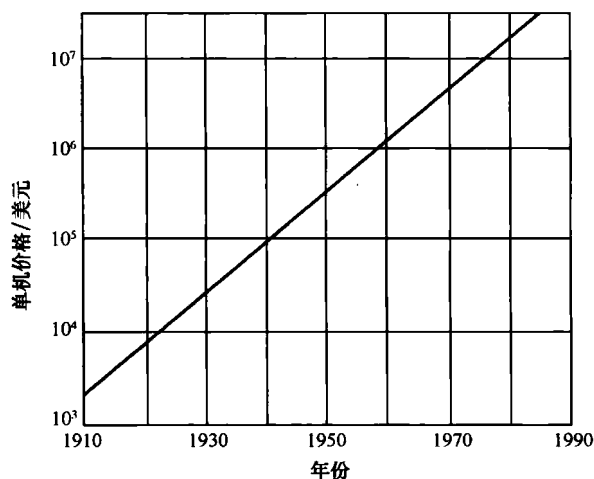


图 1-3 军用飞机价格随年份的变化

在民用机方面,巨大的市场驱动力使航空公司成为民用机设计方向的重要影响者。它们要求的产品特征可归结为:①任务(Mission)要求高,性能好;②购机价格、维护成本和运行费用低,易于维护;③操纵性更好;④环保性能好:低噪声、低排污;⑤客舱服务系统更友好,更便利。图1-4所示为从100多个航空公司调研中得出的购机“关键因子”图,可见,直接运行成本、飞机价格、维护性和环保性将是未来11个购机因子中最重要的因子,它们将直接指导着未来民用机产品的设计和制造过程。特别应注意,环保项目在今后的设计要求中越来越重要,因此需要发展与其相关的技术。图1-5给出了未来20年降低燃油经济性的多种可能的途径,可见空气动力技术能大大地发挥其对环保技术及提高整个飞机产品性能的作用。各种技术的进步有望节省燃油50%左右^[3]。

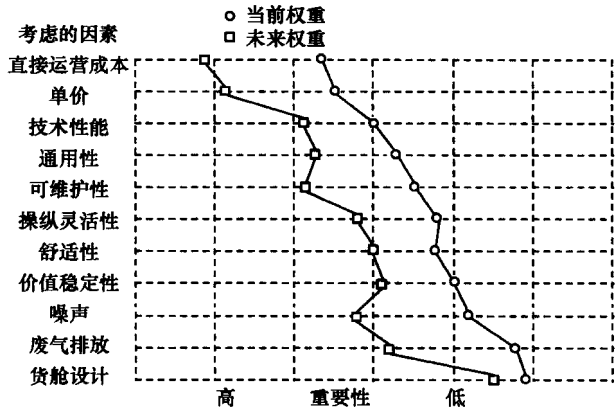


图 1-4 航空公司购买新机时主要考虑的因素

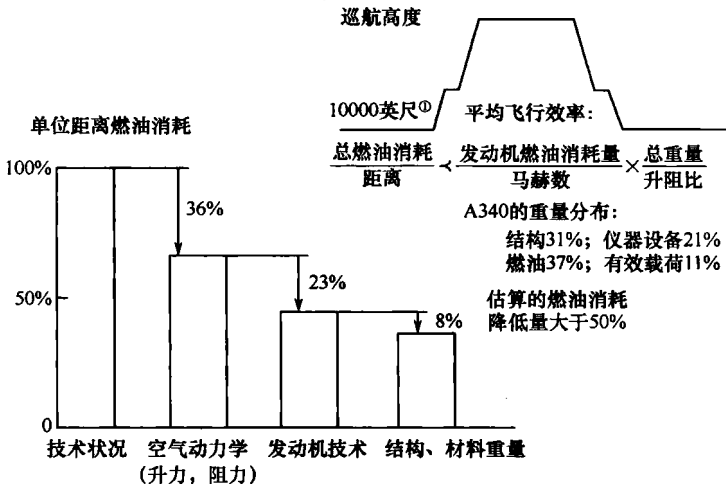


图 1-5 未来 20 年降低燃油经济性的多种可能的途径

因此,从20世纪90年代开始,军用和民用飞机已从原来的技术驱动型设计的产品过渡为要求性能好、生产周期短和更廉价的市场驱动型(风险、成本和周期都是最小)设计的产品。

① 1英尺≈0.3米(m)。