

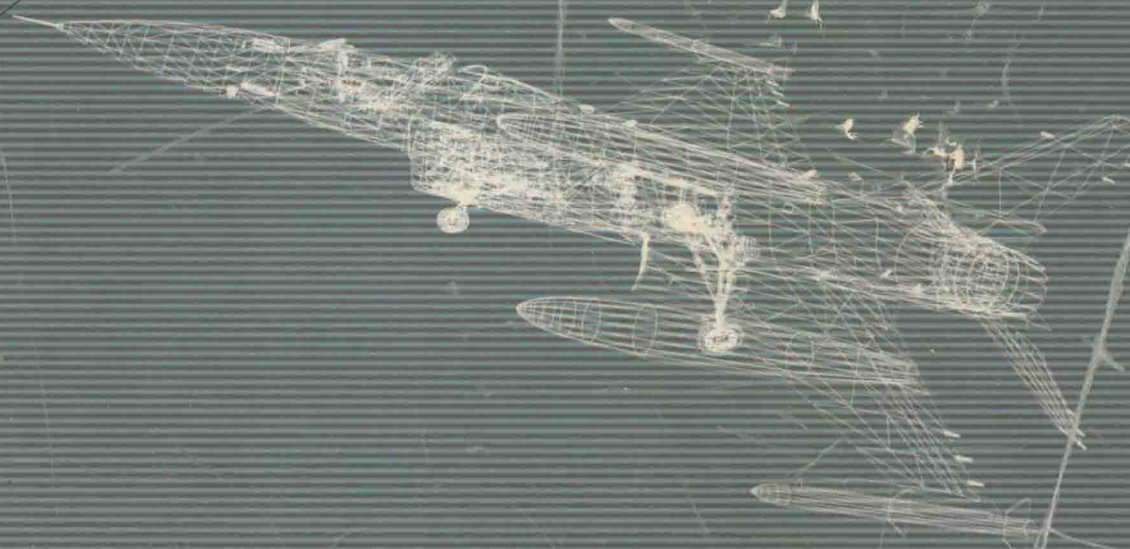
航空宇航科学与技术



国防科工委「十五」规划  
教材

# 现代飞机设计空气动力学

●朱自强 吴宗成 主编



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·航空宇航科学与技术

# 现代飞机设计空气动力学

朱自强 吴宗成 主编

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

现代飞机的高性能要求对空气动力学提出了新的挑战,要求设计空气动力学提供新的思想、新的概念,并在工程应用上实现之。空气动力外形的设计对飞机性能的好坏具有十分重要的作用。本书针对战斗机与民航机两类飞机的特点,分别概要地讨论了空气动力学研究的新成果,以及应用于气动外形设计上的新概念,例如在战斗机设计中如何应用非定常大迎角空气动力学,以及矢量推力技术等成果于布局中,在民航机设计中如何实现增升减阻,以提高飞机性能等问题。书中突出介绍了数值模拟在现代飞机设计中的作用与地位。

本书可作为教师、研究生和高年级学生的教材和教学参考书,也可供设计、研究人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代飞机设计空气动力学/朱自强等主编. —北京:  
北京航空航天大学出版社,2005.4  
ISBN 7-81077-570-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 024248 号

## 现代飞机设计空气动力学

朱自强 吴宗成 主编

责任编辑 韩文礼

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: [bhpress@263.net](mailto:bhpress@263.net)

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16

印张:16.25 字数:364千字

2005年4月第1版 2005年4月第1次印刷

印数:3000册

ISBN 7-81077-570-7 定价:23.00元

# 国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编 委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯  
乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春  
杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡  
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章  
贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山  
郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



# 总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,



积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影 响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业



走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



# 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、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，已经启动空军、海军使用的无人战斗机X-45A和X-47A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。

同时，国际民航事业高速地发展、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、民机发展面临着极为严峻的考验。

未来战斗机和民航机的设计是高度复杂的大系统，并涉及多种学科的综合。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愈来愈大的作用；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，也是使民航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、民机的高性能。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。

虽然军、民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,本书仍针对军机和民机分别讨论其有关的气动技术问题。但并不意味着对民机有意义的气动新技术对军机就不重要;反之亦然。本书共 16 章,第 1~7 章讨论军机的气动问题;第 8~16 章讨论民机的气动问题。

本书是根据《现代飞机设计中的空气动力学》(1995 年版)一书和作者教学的体会修改补充编写而成的。付鸿雁、刘周等为书稿的排版和图形扫描等付出了大量的劳动,在此向他们表示深切的谢意。

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

2004 年 8 月

# 目 录

## 上篇 军机篇

### 第 1 章 未来战斗机发展的趋势及其对空气动力学提出的挑战

1.1 第 3 代战斗机的特点 .....	3
1.2 第 4 代战斗机的特点 .....	7
1.3 2020 年空战中战斗机配备设想 .....	10
1.3.1 重、轻型飞机的搭配 .....	10
1.3.2 有人机和无人机的搭配 .....	13
1.4 无人飞行器的研制 .....	13
1.4.1 无人机在局部战争中的地位与作用 .....	13
1.4.2 无人机的种类和发展方向 .....	15
1.4.3 长航时高空无人侦察机 .....	15
1.4.4 无人战斗机 .....	17
1.4.5 微型飞行器 .....	22

### 第 2 章 现代战斗机气动布局示例

2.1 非定常大迎角空气动力学 .....	24
2.1.1 大迎角空气动力的特性 .....	24
2.1.2 绕细长物体的大迎角非定常空气动力特性 .....	30
2.1.3 细长前机身非对称涡流动的控制 .....	32
2.1.4 大迎角和非定常空气动力的计算 .....	38
2.2 边条翼升力面布局 .....	44
2.2.1 引 言 .....	44
2.2.2 边条翼流动的特性 .....	46
2.2.3 边条翼的气动布局 .....	52
2.2.4 偏转襟翼以改善中小迎角时的气动特性 .....	58
2.2.5 大迎角时的静稳定性 .....	59
2.2.6 超声速飞机边条翼布局气动力小结 .....	63
2.3 鸭式布局 .....	63
2.3.1 引 言 .....	63
2.3.2 近距离耦合的鸭式布局 .....	64



2.3.3	远距耦合的鸭式布局 .....	70
2.4	前掠翼的三翼面布局 .....	71
2.4.1	引言 .....	71
2.4.2	前掠翼气动特性的优点 .....	72
2.4.3	前掠翼的不足处 .....	75
<b>第3章</b>	<b>隐形飞行要求和空气动力的综合设计</b>	
3.1	减缩雷达散射截面积的空气动力外形设计措施 .....	78
3.2	飞机隐形特性要求与飞行性能要求的综合和折中 .....	82
3.3	气动、隐形一体化设计的数值计算简介 .....	83
<b>第4章</b>	<b>进排气系统及其与飞机的一体化设计</b>	
4.1	一体化的含义 .....	88
4.2	超声速战斗机中一体化设计的重要性 .....	88
4.2.1	民用机和军用机发动机布局上的差异 .....	88
4.2.2	推进系统推力贡献的变化 .....	88
4.2.3	推力矢量化与超动机性相结合的要求 .....	89
4.3	进气道系统与前机身的一体化设计 .....	90
4.3.1	进气道的形式和位置 .....	90
4.3.2	前机身流场的设计 .....	92
4.3.3	F-15的进气道设计 .....	93
4.3.4	F-16的进气道设计 .....	94
4.3.5	未来飞机进气系统设计中应考虑的新因素 .....	97
4.3.6	“无隔道式超声速进气道”概念及其应用 .....	98
4.4	后机身、尾翼和喷管系统的一体化设计 .....	100
4.4.1	减小尾部阻力 .....	100
4.4.2	后体的综合设计 .....	101
4.5	内流以及内外流一体化分析与设计的数值模拟 .....	104
4.5.1	飞机-进气道的计算 .....	104
4.5.2	三维扩压管道——S形管道的数值计算 .....	108
4.5.3	喷流与后体相互作用的计算 .....	111
<b>第5章</b>	<b>推力矢量化、机敏性和超机敏性</b>	
5.1	飞机的机敏性 .....	113
5.2	推力矢量化 .....	115
5.2.1	推力矢量化的优点 .....	115
5.2.2	过失速技术 .....	116
5.2.3	完全矢量化飞机 .....	116
5.2.4	部分矢量化飞机 .....	118
5.2.5	PST机动动作的设计及空战作战方案的研究 .....	119



5.2.6	实现矢量化飞机的困难 .....	121
<b>第 6 章</b>	<b>大迎角非定常空气动力的数学模型</b>	
6.1	问题的提出 .....	122
6.2	空气动力的暂态函数模型 .....	122
6.3	状态—空间变量模型 .....	123
6.3.1	非定常带有后缘分离的翼型绕流 .....	124
6.3.2	具有涡破裂的三角翼的非定常流动 .....	126
6.3.3	全机的非定常运动 .....	128
<b>第 7 章</b>	<b>数值模拟方法是未来飞机设计的重要工具</b>	
7.1	数值模拟在未来飞机设计与研制中的地位和作用 .....	130
7.2	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 .....	133
7.3	计算流体力学的发展和展望 .....	134
7.3.1	三维非定常黏流的模拟 .....	135
7.3.2	多学科耦合及优化设计是 CFD 的未来方向之一 .....	135
7.3.3	发展大规模并行机的有效计算方法 .....	135

## 下篇 民机篇

<b>第 8 章</b>	<b>未来民机发展的趋势</b>	
8.1	亚声速民机的发展 .....	139
8.1.1	新世纪对民机的需求和剧烈的市场竞争 .....	139
8.1.2	发展亚声速民机的主要方向 .....	145
8.2	超声速民机的需求和发展 .....	153
<b>第 9 章</b>	<b>先进翼型的不断发展</b>	
9.1	超临界翼型 .....	156
9.2	扩张后缘翼型 .....	164
<b>第 10 章</b>	<b>亚声速干线飞机三维机翼的设计</b>	
10.1	提高 $Ma \cdot K_{\max}$ 值 .....	170
10.2	减小阻力 .....	173
10.3	三维机翼气动布局的基本要求 .....	174
10.4	几点讨论 .....	174
10.4.1	翼型的影响 .....	174
10.4.2	最大厚度沿展向分布的(非线性)影响 .....	177
10.4.3	几何扭转角 $\varphi$ 沿展向分布的影响 .....	179
<b>第 11 章</b>	<b>机翼翼梢减阻装置的应用</b>	



<b>第 12 章 减少部件间的干扰阻力</b>	
12.1 引言 .....	188
12.2 发动机短舱的翼吊方式 .....	189
12.3 发动机短舱的尾吊方式 .....	192
12.4 数值计算方法简介 .....	193
<b>第 13 章 减少摩擦阻力</b>	
13.1 层流化技术 .....	198
13.2 湍流减阻——小肋减阻 .....	204
<b>第 14 章 增升装置外形的空气动力</b>	
14.1 引言 .....	207
14.2 机翼的前缘增升装置 .....	207
14.3 机翼的后缘增升装置 .....	210
14.4 雷诺数对最大升力系数的影响 .....	211
14.5 增升装置气动特性的数值模拟 .....	215
<b>第 15 章 民机气动力的数值计算</b>	
<b>第 16 章 高速民航机</b>	
<b>结 束 语</b>	
<b>参 考 文 献</b>	

# 上篇

## 军机篇

现代战斗机的设计是高度复杂的大系统,是多种学科的综合。例如,现代战斗机不仅要有高的气动性能,同时还要求具有良好的隐形性能。隐形技术涉及电磁学、声学、光学、材料学、电子学和信息科学等多种学科。目前,最重要的隐形技术是减小飞机的雷达散射面积(RCS)。设计者在外形设计时必须兼顾高气动性能和小 RCS 的要求,然而这两者对外形的要求却往往是互相矛盾的,设计中必须妥善处理。

高性能的动力装置和优良的空气动力特性仍然是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。

现代战斗机为提高机动性和机敏性,提高对目标的击毁率,必须扩大使用迎角。如第 3 代战斗机 F-16 的使用迎角只能达到  $25^{\circ}$ ,而第 4 代战斗机 F-22 的使用迎角则已扩大至  $60^{\circ}$ ,试验机 X-31 的使用迎角甚至可达  $70^{\circ}$ 。可用迎角的大幅度提高要求设计者从传统设计方法所依赖的线性空气动力学范畴进入到非线性空气动力学的范畴。大迎角飞行还常伴随着分离、非定常等现象,要求我们不仅要从理论上、物理上研究它们,更重要的是在工程上有控制地应用它们,以实现所要求的大迎角飞行。随着使用迎角的增大,大迎角非定常空气动力学的数学建模已成为有效地进行设计而迫切需要解决的问题。

矢量推力技术也已成为现代战斗机设计中一种必要的技术,如 F-22, X-31, Su-35, Su-37 等都不同程度地采用了此技术。矢量推力技术不仅可以扩大使用迎角范围,而且可使推力直接参与对飞机运动的控制而大大提高飞机的过失速机敏性及隐形能力。

本篇将对上述各项分别进行讨论。



# 第 1 章 未来战斗机发展的趋势 及其对空气动力学提出的挑战

现代高科技在战争中的作用在近年来的局部战争中得到了充分的体现,战争的实效推动着航空装备及其基础技术的发展。海湾战争中多国部队“空一地一体战”的作战体系在随后的波黑、科索沃、阿富汗以及伊拉克战争中取得了一系列胜利,“空一地一体战”的核心是空中优势,这表明发展飞机技术对未来战争具有战略意义。

在这一系列战争中也进一步丰富和发展了这一作战体系,使人们认识到信息攻击的重要性,明确了武装冲突和火力摧毁应采用信息攻击和火力摧毁有机结合的模式。精锐的知识型部队和常规步兵结合,舰队和战斗机联队统一,空中力量在信息化时代和战争中仍将保持首选地位,从争夺制空权进一步到争夺“制天权”,形成空天一体、使未来的空中作战呈现陆海空天电一体、攻防一体和信息火力一体的特点。

在武器装备上则突出信息化、隐身化、无人化和系统化等发展方向。在这种思想和走向指导下,美国已确立了新一代“高档”和“低档”战斗机研制和生产的型号:F-22 已完成试飞阶段,进入了生产发展阶段,于 2004 年装备部队;F-35 被正式命名为 JSF(联合攻击战斗机)。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、海军使用的无人战斗机 X-45A 和 X-47A 项目,并考虑改进和提高目前在世界上体积最大和航时最长的“全球鹰”无人侦察机的性能;针对体系对抗观念和武器装备系统性的重要性,相应发展如预警指挥机、电子战飞机和空中加油机等。从海湾战争到阿富汗战争,轰炸机发挥了重要的作用,如阿富汗战争中轰炸机出动架次只占总量的 10%,投弹量却占总量的 70%,而且达到了较好的攻击效果。考虑到高技术条件下的未来局部战争,美国正在启动可能要在 30 年后使用的新一代轰炸机的研制,包括空天轰炸机和超声速轰炸机。受经济发展困扰的俄罗斯在第 4 代战斗机上也有 MF1 和 C-47,拥有目前世界上最大的运输机安-225,“暴风雪”航天飞机也已经复出。欧洲三代半战斗机的研制成功,A400M 大型运输机和多种外形、类型的无人机项目正在启动。这些都充分表明了现代先进的飞机装备发展的趋势。

## 1.1 第 3 代战斗机的特点

以著名的美国 F-15,F-16 和俄罗斯苏-27,米格-29 等为代表的第 3 代战斗机充分运用当时已取得的空气动力学研究成果,如非线性升力技术、边条翼布局、弯扭的机翼中弧面、翼身





融合技术以及飞机推进系统的一体化设计概念等,并在气动布局上作了精细的设计计算和实验分析;结合使用静不稳定的概念,在电传操纵中加入控制增稳系统,从而取得了高升力特性及良好的操纵性和稳定性;同时采用了高性能的发动机和优异的电子设备系统,充分保证了飞机的优异性能。表 1-1 给出了第 3 代战斗机的研制日期表。图 1-1 和图 1-2 分别给出了 F-15C 和苏-27 外形的三面图。

表 1-1 第 3 代飞机研制日期表

日期	飞机					
	俄罗斯		美国			
	米格-29	苏-27*	F-14(海)	F-18A(海)	F-15(空)	F-16A(空)
启动	1969	1969	1965	1975	1965	1972
首飞	1977.10	1981.4	1970	1978	1972	1974
批生产	1978	1982	1972	1982	1974	1978

\* 俄罗斯在推倒第 1 次苏-27 方案后而改为目前外型,第 2 次启动日期为 1978 年。

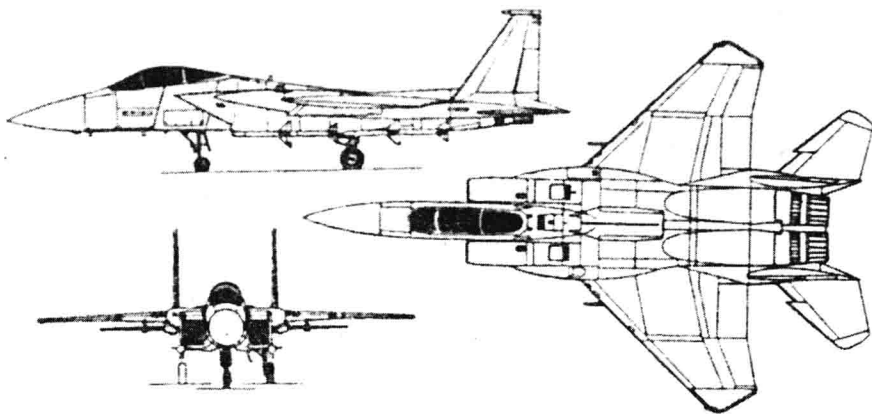


图 1-1 F-15C 三面图

分析这些第 3 代战斗机,可知其具有如下特点:

#### 1. 宽阔的高度-速度范围

实用升限为 18~19 km,低空最大速度 1 350~1 450 km/h,高空最大速度 2 300~2 500 km/h,活动高度为 30 m~18 km。

#### 2. 高的机动性(过载大、爬升率高、增速快)

转弯半径小和转弯时间短,减速范围宽,保证有效地进行近距空战以及截击高空高速目标时能进入有利攻击位置。