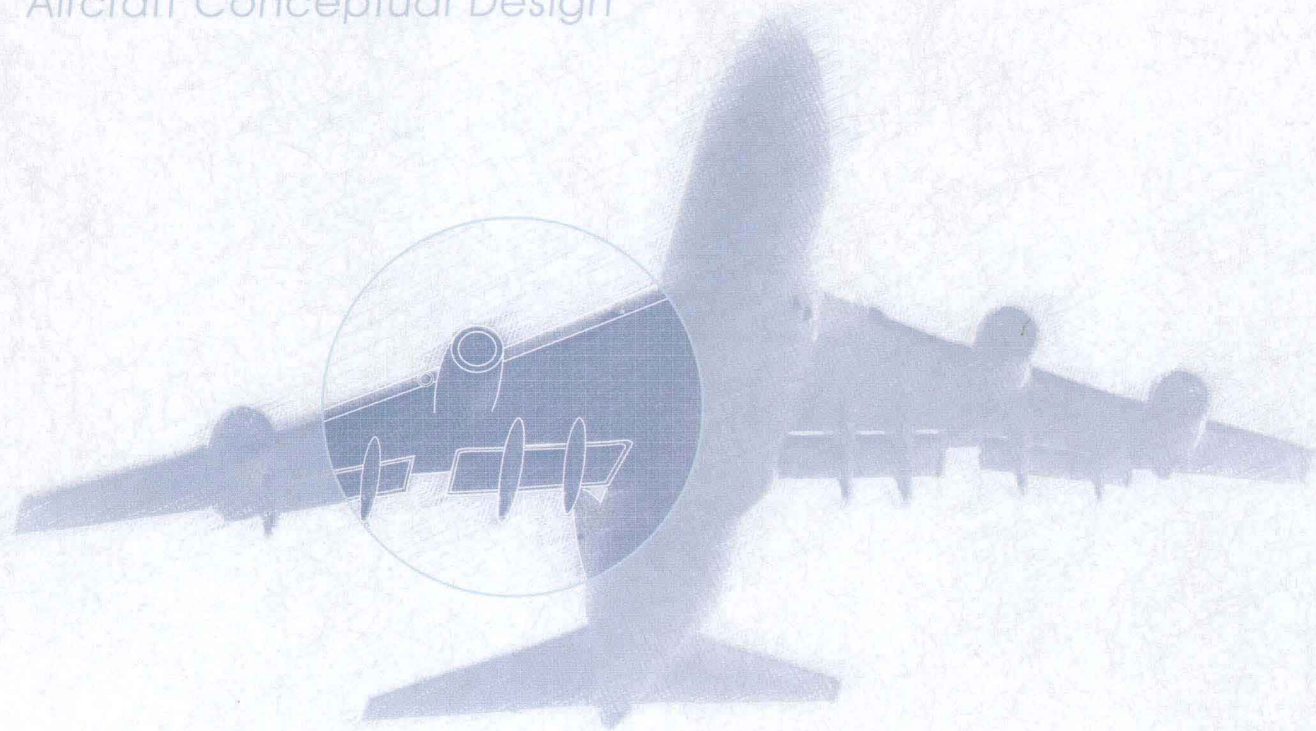


Exploration and Practice of
Supporting Technology for
Aircraft Conceptual Design



飞机总体设计支持技术 —— 探索与实践 ——

刘虎 罗明强 田永亮 武哲 著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

飞机总体设计支持技术 探索与实践

刘虎 罗明强 田永亮 武哲 著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书围绕飞机总体设计支持技术的应用与发展,论述了从相对独立的飞机概念方案设计软件,到具有一定开放能力的集成化飞机总体设计系统,再到更具全面性的飞机总体数字化设计平台的研究历程,最后对智能设计及“面向运行的设计”这两个支持技术的新方向进行了探讨。本书涉及飞机总体设计的设计要求分析、总体布局、外形设计、总体布置、性能分析、多学科设计优化等方面的知识,并且详细介绍了它们在软件系统中的实现与应用。

本书适合于从事飞机总体设计及相关信息化工作的研究人员阅读,可以作为飞行器设计专业研究生和高年级本科生的参考书,对航天、船舶等行业的总体设计研究人员也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

飞机总体设计支持技术探索与实践 / 刘虎等著. --
北京:北京航空航天大学出版社,2013.6

ISBN 978-7-5124-1096-1

I. ①飞… II. ①刘… III. ①飞机—设计—研究
IV. ①V22

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第062279号

版权所有,侵权必究。

飞机总体设计支持技术探索与实践

刘虎 罗明强 田永亮 武哲 著

责任编辑 刘晓明

*

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(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:21.25 字数:544千字

2013年6月第1版 2013年6月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 978-7-5124-1096-1 定价:79.00元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

自1903年12月17日美国的Wright兄弟实现人类首次带动力且可操纵的飞行以来,航空产业在国家安全和国民经济中已经发挥出了举足轻重的作用,其兴盛可谓是各国科技进步和工业发达的重要标志。在我国的《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》中,更是明确提出了将现代航空装备作为我国的战略性新兴产业之一。为了实现“十二五”规划中的宏伟目标,建立起强大的空中力量和适应竞争日益激烈的民航市场,研制新型的高性能飞机无疑至关重要,而保证设计质量则是研制成功的关键。

与一般的工业产品设计不同的是,飞机设计具有高度的综合性,而这在前期的总体设计阶段体现得尤为突出——它不仅需要充分且合理地利用到空气动力学、结构力学、材料学、自动控制、动力技术、隐身技术等多个学科的进展,更需要进行大量的权衡和折衷,寻求在可用的资源下能满足设计要求且综合性能得以优化的方案。尽管总体设计在整个飞机研制周期中所占的时间相对较短,却对一个型号的成败起到了举足轻重的作用,而高度综合性的要求无疑为这一设计阶段带来了更大的挑战。

正所谓“工欲善其事,必先利其器”。保证飞机总体设计的质量和效率不仅需要优秀的设计师,还需要先进的设计工具和手段。作者所在的科研团队自20世纪90年代中后期以来,一直在从事计算机辅助飞机总体设计的理论方法研究及软件系统的开发,也切身体会了近十余年间我国航空学术界与工业界对飞机总体设计的各类软件支持系统从初步接触到大力投入的发展历程;同时,无论是科研院所还是高等院校,从事飞机总体设计支持技术与系统开发的人员也在逐步增多。在这样的形势下,作者通过此书对团队在该领域的探索与实践中所取得的成果、经验、体会与思考进行总结与分享,尤其希望通过对不同的研究阶段开发的飞机总体设计支持软件的介绍与分析,能对相关的研究人员、教师和学生提供有益的借鉴和参考。

撰写本书的另一原因在于,飞机总体设计由于具有非常强的工程性,造成在新的设计思想、理论方法上的研究相对于力学、材料学等基础学科而言显得不甚活跃,这对一个学科和领域的发展而言显然是不利的。为此,在本书中将介绍作者的研究团队提出的一些设计支持理论方法,希望起到抛砖引玉的作用;此外,还将结合自身的思考和国际上的相关研究进展,提出飞机总体设计支持技术研究的新方向,为进一步开拓和活跃这一领域的研究提供新的思路。

本书围绕飞机总体设计支持技术的应用与发展,详细论述了从相对独立的飞机概念方案设计软件,到具有一定开放能力的集成化飞机总体设计系统,再到更

具全面开放性的飞机数字化设计平台的研究历程,最后对于飞机总体设计支持新技术与方向进行了探讨,体现了研究思路的逐步演化及软件开发的不断更新实践。

具体而言,本书的序篇即为第1章,主要阐述了飞机总体设计的重要性和特点,以及总体设计支持技术的发展与平台化的趋势;第2章到第7章归为第一篇,阐述了综合型飞机概念方案设计软件SEACD的研发背景与系统框架、设计要求的组织与分析、基于草图的概念机建模、基于面元的几何特性估算、重量及其他特性评估的实现以及集成化多学科设计优化初步应用;第二篇是集成化飞机总体设计系统,包括第8章到第11章,从系统设计的指导原则、基于ACIS图形核心的通用类部件建模、民用飞机参数化构型设计与布置、层次化集成特性分析与优化等方面介绍了集成化系统OpenCADs;第三篇是飞机总体数字化设计平台,包括第12章和第13章,从数字化设计平台的定位与实施思路、平台中的过程数据管理和工程信息资源管理等方面进行了论述;第四篇是飞机总体设计支持技术新方向,包括第14章与第15章,前者论述了智能设计支持技术的方法与实例,后者则提出了“面向运行的设计”的框架与相应的虚拟仿真验证技术。

本书序篇由刘虎、田永亮撰写,第一篇由刘虎撰写,第二篇和第三篇由罗明强撰写,第四篇由刘虎、田永亮撰写。全书由武哲、刘虎统稿和审校。陈稗、张超颖、银娇、魏城龙为书稿的整理提供了很多的帮助。

本书的研究工作得到了工业和信息化部、解放军总装备部相关预研项目的资助。作者取得的研究成果离不开十多年来团队中各位同事和同学的大力支持与帮助,包括王学仁、黄俊、黄沛霖、王钢林、白振东、卢新来、谢文娇、王新林、安纪冲、黄敏杰、鲍君波、白金鹏、冯昊成、武旭东、孙瑜、梁爽、张晨虢、王宜新、马楠、臧精、佟明、吴博、武名虎、谢福朋、吴睿、马明等。作者也衷心地感谢顾诵芬院士、李天院士、朱自强教授、孙聪总设计师、吴光辉总设计师、D. P. Raymer博士、John Sullivan教授等国内外专家的关心和指导。北京安世亚太科技有限公司的张国明、梅林涛、林子健等,北京高科系统技术有限公司的李义章、王江等,对研究成果的产业化应用提供了很多的帮助,在此一并表示感谢。

飞机总体设计支持技术是一个多学科交叉的研究领域,并且是在新型飞机的研制需求和信息化技术的发展等方面的推动下不断变化和扩展的。本书仅仅反映了作者探索与实践的部分心得和成果,而作者的研究和应用水平也都有局限性,因此本书难免还存在疏漏和不足之处,恳请读者不吝赐教。

刘虎 罗明强 田永亮 武哲

2013年2月

目 录

序 篇

第 1 章 绪 论	3
1.1 飞机设计面临的挑战与总体设计的重要性	3
1.2 飞机总体设计的特点	5
1.3 飞机总体设计支持技术的发展	8
1.4 从“孤岛”到平台的演化	12
参考文献	14

第一篇 综合型飞机概念设计软件

第 2 章 SEACD 的研发背景与系统框架	21
2.1 SEACD 的研发背景	21
2.2 对应于方案演化的系统组成	23
2.3 面向对象的系统框架	24
第 3 章 设计要求的组织与分析	27
3.1 性能要求分类	27
3.2 任务剖面的描述与构造	28
3.3 有效载荷选取方式	30
3.4 参数选择所需数据的层次性	31
3.5 约束分析与设计点的选取	31
3.6 任务分析方法的改进	33
第 4 章 基于草图的概念机建模	36
4.1 基于草图的方法	36
4.1.1 方法的提出及其含义	36
4.1.2 基本的实现措施	39
4.2 成品部件的定义与管理	41
4.2.1 发动机数据库的建立	41
4.2.2 装载数据库的建立	43

4.2.3	成品部件的布置	45
4.3	从二维到三维的机身类部件建模	46
4.3.1	子部件的分类与相关的定义	46
4.3.2	建模过程及支持措施	48
4.3.3	轮廓线在模型调整中的作用	54
4.3.4	机身类部件建模示例	55
4.4	翼面类部件的参数化定义	58
4.4.1	翼段的描述方式	58
4.4.2	参考机翼的定义	60
4.4.3	翼面类部件的二维和三维表示	62
4.5	油箱的分类建模	63
4.6	起落架的描述与简化	65
4.7	概念机初始方案示例	66
第 5 章	基于面元的几何特性估算	69
5.1	部件曲面的含义与相交部件的分类	69
5.2	浸润面积估算	70
5.2.1	基本思路与估算过程	70
5.2.2	特征点准则	71
5.3	横截面积估算	72
5.4	估算方法的实现	73
5.5	算例与讨论	74
5.5.1	战斗机模型的几何特性估算	74
5.5.2	超声速运输机模型的几何特性估算	77
5.5.3	面元数目的影响	78
第 6 章	重量及其他特性评估的实现	79
6.1	重量估算与重心定位的实现	79
6.1.1	基本原则与实现措施	79
6.1.2	重量分类与方法选用	81
6.1.3	所需参数的分类与确定方式	83
6.1.4	重量特性估算示例	85
6.2	RCS 估算功能的融合	86
6.3	方案的 CFD 气动分析	89
第 7 章	集成化多学科设计优化初步应用	92
7.1	典型的优化方法简介	92
7.2	采用集成化 MDO 的必要性	94
7.3	集成中各种软件工具的选取	95

7.4 实现集成的基本措施·····	96
7.5 优化策略上的考虑·····	98
参考文献 ·····	100

第二篇 集成化飞机总体设计系统

第 8 章 OpenCADs 的研发背景与系统框架 ·····	107
8.1 典型的飞机总体设计集成系统·····	107
8.2 集成化飞机总体设计系统指导原则·····	109
8.3 集成化飞机总体设计系统的框架设计·····	114
8.3.1 系统定位与技术要求·····	114
8.3.2 “开放式系统”定义·····	117
8.3.3 系统架构设计·····	117
8.3.4 开放式系统集成·····	120
8.3.5 基于多方案的系统数据组织逻辑·····	123
8.3.6 可扩展的研发层次结构·····	126
8.3.7 远程设计的初步研究·····	127
第 9 章 基于 ACIS 的通用类部件建模 ·····	129
9.1 ACIS 造型平台与基于部件特征的模型构建方法·····	129
9.1.1 ACIS 造型平台·····	129
9.1.2 基于部件特征的模型构建方法·····	129
9.2 翼面类部件参数化建模·····	132
9.2.1 翼面类部件描述方法·····	132
9.2.2 翼型数据库的建立·····	135
9.2.3 翼面类部件建模过程及支持措施·····	136
9.3 机翼结构及整体油箱参数化快速设计·····	140
9.3.1 机翼结构参数化描述方式·····	140
9.3.2 机翼结构及油箱设计过程与支持措施·····	143
9.3.3 机翼结构及油箱的自动化调整·····	145
9.3.4 机翼结构及油箱设计与自动化调整示例·····	146
9.4 其他部件设计·····	148
9.4.1 成品部件布置·····	148
9.4.2 起落架描述与简化·····	149
第 10 章 民用飞机参数化构型设计与布置 ·····	151
10.1 机身剖面构型设计·····	151

10.1.1	基础项目定义及数据管理	151
10.1.2	机身剖面构型设计支持措施	153
10.2	机身类部件建模	156
10.2.1	机身类子部件数据定义	156
10.2.2	模型构建及支持措施	159
10.2.3	机身类部件设计中的自动化调整	162
10.3	客舱快速布置	164
10.3.1	参数化客舱描述	164
10.3.2	客舱建模过程及支持措施	167
10.3.3	客舱布置中的自动化调整	171
10.3.4	客舱布置示例	172
10.4	其他部件设计	173
10.4.1	货舱快速布置	173
10.4.2	风挡快速设计	174
10.5	设计方案示例	176
第 11 章	层次化集成特性分析与优化	180
11.1	集成层次与实现措施	180
11.2	工程化快速特性分析	182
11.2.1	分析方法选取及实现措施	182
11.2.2	工程重量估算	184
11.2.3	工程费用估算	188
11.3	结构有限元的初步研究及应用	190
11.3.1	机翼结构有限元模型的自动构建	190
11.3.2	基于结构有限元的应用	194
11.4	基于高阶面元法的气动力快速分析	197
11.4.1	PANAIR 软件概述	197
11.4.2	基于 PANAIR 的计算方法与实现	197
11.4.3	结果验证及分析算例	199
11.5	基于 Workbench 的集成分析	202
11.6	集成化多学科设计优化研究	205
11.6.1	集成中相关软件工具的选取	205
11.6.2	集成优化的实现措施	205
11.6.3	算例与讨论	208
参考文献		214

第三篇 飞机总体数字化设计平台

第 12 章 飞机总体数字化设计平台的定位与实施思路	225
12.1 飞机总体数字化设计平台的定位	225
12.2 基于研发活动的平台构建总体思路	226
12.2.1 研发活动及其数字化设计支持	226
12.2.2 目标客户群体需求现状分析	231
12.2.3 飞机总体数字化设计平台组成要素及体系框架	233
12.3 飞机总体数字化设计平台的实施方法论	237
12.3.1 飞机总体数字化设计流程梳理	237
12.3.2 飞机总体设计知识体系梳理规范	237
12.3.3 典型实例	238
第 13 章 飞机总体数字化设计平台中的数据管理	254
13.1 飞机总体设计中的数据	254
13.2 设计平台中的过程数据管理	256
13.2.1 数据管理系统的发展及现状	256
13.2.2 基于演变与衍生的过程数据管理	258
13.2.3 过程数据管理系统的主要技术指标	260
13.3 设计平台中的工程信息管理	261
13.3.1 飞机总体设计中的工程信息资源	261
13.3.2 工程信息资源管理系统设计	262
参考文献	266

第四篇 飞机总体设计支持技术新方向

第 14 章 智能设计支持方法与实例	273
14.1 基于实例推理的主要设计参数选择	273
14.1.1 引 言	273
14.1.2 改进后的 CBR 应用流程	274
14.1.3 表示实例的层级模型	275
14.1.4 实例检索方法的改进	277
14.1.5 CBR 应用实例	280
14.2 自动化方案调整的概念与方法	283
14.2.1 引 言	283

14.2.2	部件间联系网的构造	284
14.2.3	对等联接中部件的自动调整	290
14.2.4	基准/依附联系中部件的自动调整	294
14.2.5	自动化方案调整示例	297
14.3	优化中隐身设计准则的自动实现	300
14.3.1	引言	300
14.3.2	主要边缘的标识	300
14.3.3	边缘间的关联及参数关系	302
14.3.4	对应于一个设计点的调整	304
14.3.5	优化示例与讨论	305
第 15 章	面向运行的设计与仿真验证	307
15.1	“面向运行的设计”的统一化公式描述	307
15.2	面向运行的设计的层次化评价模型	308
15.2.1	三层级任务分类模型	308
15.2.2	评价准则总体架构	309
15.3	基于虚拟仿真的层次化任务评估架构	312
15.4	层次化任务仿真应用实例	314
15.5	从设计仿真到训练仿真	320
	参考文献	322



序 篇

第1章 绪论

1.1 飞机设计面临的挑战与总体设计的重要性

当今世界,航空工业在国民安全和国民经济中都发挥了举足轻重的作用,成为各国科技进步、工业发达的重要标志^[1]。以军用飞机为主体的空中力量经过两次世界大战和海湾战争等多次现代局部战争的磨炼,已经逐渐成为影响战争进程和胜负的核心因素^[2,3]。民用方面,航空客运年周转量已从20世纪50年代的约1 800万人次增加到近年的超过10亿人次^[4]。为此,2010—2020年间全世界航空公司大型喷气飞机总需求量将超过1.8万架,总价值将超过1.4万亿美元。在我国,据预测到2050年需要新增2 000多架大型客机,总值约2 000亿美元^[5];再加上支线客机和通用航空领域的巨大市场,蓬勃发展的民用航空业必然有助于推动国民经济的持续增长。2012年7月国务院印发《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》,将现代航空装备产业明确列为大力发展的重要方向,并且制定了宏伟的发展目标:到2015年,大型客机实现首飞;ARJ21支线飞机批量生产和交付;新型通用飞机、民用直升机发展和应用实现全面突破;初步形成具有国际水平的航空研发和生产体系,形成国产飞机整机集成和关键部件研制生产能力,航空产业融入世界航空产业链。到2020年,大型客机研制成功并批量进入市场;新型支线飞机完成研制,支线飞机实现系列化发展,通用航空实现产业化发展;完成大型商用航空发动机研制;航空产品、航空服务形成竞争优势,航空产业国际化发展水平显著提高。

由于用户需求的不断提高、市场竞争的日益激烈、技术复杂性的不断增加等多种因素的共同影响,现代飞机,尤其是先进军用飞机和大型民用飞机的研制周期越来越长,耗资也越来越巨大。以美国的第五代战斗机研制为例,从1983年“先进战术战斗机(Advanced Tactical Fighter, ATF)”计划启动,到20世纪90年代初,YF—22在与YF—23的竞争中胜出,直至2005年第一支F—22中队正式服役,总共用了超过20年时间;尽管F—22具有非常优异的性能,但由于价格过于高昂,以致其采购数量从最初估计的750架一直降到187架并在2011年停产,成为了美国历史上生产周期最短的战斗机^[6]。更新型的F—35战斗机虽然将成本的可承受性列为了首要研制目标,而且由美国、英国、加拿大、澳大利亚等9个国家合作研制以分摊成本,但其单机费用也已经从最初估计的2 800万~3 800万美元上涨到了超过1亿美元^[7]。在大型民用飞机的研制中,Airbus公司的A380、Boeing公司的B787都出现了不同程度的延期,导致了客户流失和巨额经济赔偿^[8,9]。由此可见,在航空工业迎来巨大发展机遇的同时,无疑也面临着巨大的挑战,而飞机设计部门正处于迎接这一挑战的最前沿。

尽管很多文献对飞机研制中各阶段应完成的任务和具体工作内容都进行了介绍^[10-22],而且这些介绍并没有原则性的差异,但完全明确的各阶段划分界限和统一的表述形式是不存在的^[23]。按照原国防科工委于1995年制定的《常规武器装备研制程序》的规定,在研制新飞机所需的漫长周期中,需要经过以下5个阶段^[24]:

(1) 论证阶段

论证阶段主要是根据使用部门提出的飞机使用要求或技术特性,结合现有技术条件,提出能满足使用要求的可能的技术方案,并预测研制经费和研制周期。为了验证技术方案的可行性,还应该对关键的新技术进行实验验证,以使方案的可行性有坚实的技术基础。

(2) 方案阶段

方案阶段主要是根据经过论证的可行方案提出总体技术方案,从而确定飞机总体设计参数、布局形式等,并提出各分系统技术方案和要求,进行主要设备的协调布置和使用维护性检查。经过各部门审查通过后,可以冻结总体技术方案。此阶段必须做方案验证的系统原理实验,使所有验证计算都建立在可靠的技术基础上。

(3) 工程研制阶段

工程研制阶段是根据方案阶段确定的飞机总体设计技术方案,完成系统的详细设计。各系统的配套设备要提交设计部门进行分系统的验证,对重要分系统要做全系统的地面模拟试验。在这个阶段,还会对系统技术方案做一些细节上的修改和调整。试飞前还要做各系统的地面综合试验,并进行充分的地面滑行,为试飞做好充分的准备。

(4) 设计定型阶段

飞机首飞成功后,就要进行定型试飞。在定型试飞前,应该进行新飞机的调整试飞,排除一些初始性的重大故障,必要时应该对系统设计做局部修改。大致飞到原设计飞行包线的80%左右,再开始正式的国家鉴定试飞,以检查飞机是否达到设计要求。在定型试飞中如还有故障,就应该进一步排除故障并改进设计。

(5) 生产定型阶段

经过设计定型以后,新飞机可能还会有一定的更改,改进后的飞机可以小批量生产。首批生产的飞机也应该鉴定试飞,通过后可以成批生产。批量生产的飞机,在大量使用中还会出现新的问题,积累到一定程度,可以再做一次改进。在飞机整个寿命期内,系统的配套设备更换是必然的,这被称为寿命中期改进。

在美国、英国等国家,习惯于将飞机设计过程划分为概念设计(conceptual design)、初步设计(preliminary design)和详细设计(detail design)三个阶段。通过概念设计确定优选的概念方案,并在初步设计阶段“冻结”布局后,在详细设计阶段要详细确定部件的几何特性、规划生产工艺,要最终敲定所有重要的技术决定和将飞机托付生产;在制造阶段开始后,首先制造一些零件进行试验,而第一架完整的飞机则用于首飞试验;在所有的试验完成以后,对民用飞机将由主管的航空当局给飞机型号以适航认证,然后将飞机投入航线使用;对军用飞机往往还需要与其他制造商的设计进行竞争,其中的获胜者将交付军方开始服役。

无论是依据哪一种划分方式,飞机总体设计都是整个飞机研发过程中的一个非常关键的阶段。在工业部门和学术研究中,通常认为飞机总体设计阶段包括概念设计和初步设计^[19];而对应于原国防科工委划分的5个阶段来说则主要涉及到论证阶段和方案阶段。飞机总体设计阶段涉及到诸多学科专业,对于飞机最终性能和经济性有着很大的影响。与其他专门的气动、结构或者控制专业不同,飞机总体设计需要全面考虑各个专业的需求,需要综合考虑各系统之间相互联系、相互依存、相互制约的关系,并通过不断的折衷和综合,进行大量的方案对比,不断地进行改进迭代,最终确定综合性能或总体性能最佳的飞机设计方案。

在整个飞机研发过程中,总体设计阶段所花费的时间至多占总工作时间的20%~25%,

所花费资金占总资金的5%~10%，而对整个项目成本的影响却占了75%~80%（见图1.1）^[24]，因此一个飞机研制项目的命运在很大程度上依赖于总体设计决策的正确性。总体设计阶段所犯的错误，不仅将导致后续设计花费过多的资金和时间，而且还可能影响到方案实现的可能性，可以说总体设计是整个飞机研发过程中责任最重大的阶段。随着现代飞机的机体系统和机载系统越来越复杂，系统之间相互影响与制约的关系也越来越复杂，作为综合这些分系统的飞机总体设计阶段的作用也越来越重要。

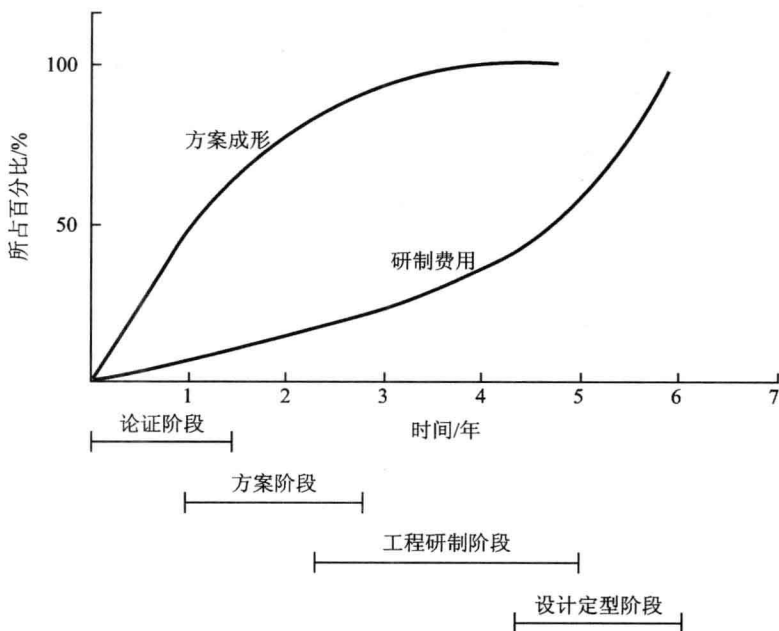
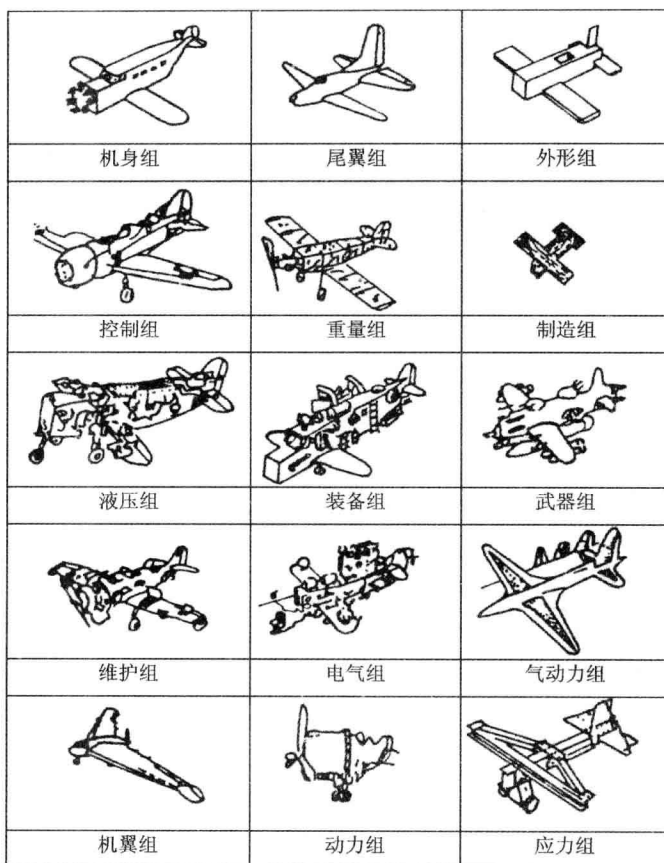


图 1.1 总体设计阶段花费^[24]

1.2 飞机总体设计的特点

飞机的总体设计是需要综合应用空气动力学、结构力学、材料学、自动控制、动力技术、隐身技术等多个专业学科的系统工程，总体设计的过程也是各专业不断综合与权衡的过程。虽然各个专业学科都会力图实现自身的最优方案（见图1.2）^[24]，但对于飞机这样充满关联的复杂设计对象而言，不同的专业侧重点之间往往会产生矛盾，使得一个对某一专业“最佳”的方案往往难以满足其他方面的设计要求，只有通过不断的权衡、折衷和协调才能有效地平衡这些矛盾。

在总体阶段进行高效的系统综合对于后期的设计和研制也有重要的意义。从飞机设计过程看，详细设计阶段是工作量最大的阶段，并行工程在这一阶段也最有意义，而能否在详细设计阶段实现并行工程，关键在于总体设计阶段是否充分考虑了各专业学科之间的综合与权衡关系。在总体设计阶段越多地解决了系统内的冲突和矛盾，也就越多地减少了详细设计阶段的交叉工作，从而也就越有利于详细设计阶段的并行。

图 1.2 从各专业角度出发设计成的飞机^[24]

多专业的综合性意味着飞机总体设计中有大量的设计变量,而这些设计变量取值的组合是无穷无尽的,再加上设计者自身的创造性思维,从而造就了飞机总体设计的创造性这一突出特点,也就是所谓的设计没有“标准答案”。依据同一套设计要求,不同的团队可以设计出大相径庭的方案,如美国 ATF 竞争中的 YF-22 与 YF-23、“联合攻击战斗机(Joint Strike Fighter, JSF)”竞争中的 X-32 与 X-35 都是具有鲜明特色的优秀方案。即便在同一个设计团队的设计过程中,也需要充分发挥创造性,从一开始提出的多个备选的概念方案中通过不断地循环迭代与综合对比,最终确定能够用于下一阶段的优化设计方案,这就使总体设计阶段表现出了多方案逐步演化的特征(见图 1.3)。

图 1.3 所示的多方案演化是按照时间历程进行展开的表达方式,如果从单个设计方案的角度来看,在设计过程中,会不断地经历依据要求提出方案、分析评估方案、进行参数选择与权衡研究、改进方案、必要的修正设计要求、进一步改进、分析评估直至优化的“设计轮盘(Design Wheel)”^[16],这就是总体设计的循环迭代特点。对于复杂的现代飞机设计而言,几乎不可能有哪位设计者能保证最初的概念草图和最终的数字样机所体现的方案完全一致,而这种变化就是在不断地循环与迭代中逐步演化产生的。

为了在有限的设计周期内充分地实现多专业综合、充分发挥不同特点人员的创造性以及完成多方案的循环迭代,飞机总体设计必须依赖于一个团队的密切协作和共同努力来完成。