

国家“十一五”出版规划重点图书  
空间飞行器设计专业系列教材  
航天一线专家学术专著

# 航天器数字化设计基础

AN INTRODUCTION OF DIGITAL DESIGN FOR SPACECRAFT

陈月根 编著

 中国科学技术出版社

- 国家“十一五”出版规划重点图书
- 空间飞行器设计专业系列教材
- 航天一线专家学术专著

# 航天器数字化设计基础

## AN INTRODUCTION OF DIGITAL DESIGN FOR SPACECRAFT

陈月根 编著

中国科学技术出版社  
· 北 京 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

航天器数字化设计基础/陈月根编著. —北京:中国科学技术出版社,2010.1

(空间飞行器设计专业系列教材)

ISBN 978-7-5046-5564-6

I. ①航… II. ①陈… III. ①航天器-设计-高等学校-教材 IV. ①V423

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第241405号

本社图书封面贴有防伪标志,未贴为盗版

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街16号 邮政编码:100081

电话:010-62173865 传真:010-62179148

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京国防印刷厂印刷

\*

开本:787毫米×960毫米 1/16 印张:29 字数:530千字

2010年3月第1版 2010年3月第1次印刷

印数:1-2000册 定价:50.00元

ISBN 978-7-5046-5564-6/V·46

---

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、  
脱页者,本社发行部负责调换)

# 内 容 提 要

本书概要地阐述了航天器数字化设计中的一些最基本问题,内容包括航天器三维 CAD 设计、CAE 分析和系统集成设计有关的流程和技术问题。

全书共分 10 章。第 1 章介绍数字化设计技术的发展和现状,重点叙述了由 CALS 计划推动的并行工程实践在航空航天界的应用;第 2 章着重讨论了三维 CAD 技术在航天器构型设计中的应用及有关的零件实体、曲面、钣金造型技术和装配及质量特性计算有关的问题;第 3 章介绍三维/二维统一的工程图设计流程,并用实例说明用现有的二维工程图来进行三维建模(所谓逆向建模)的技术问题;第 4 章就模型交换问题进行了专题讨论;第 5 章讨论了有限元法的基本概念、软件及其在航天器力学分析中的应用,重点讨论了分析流程和建模原则;第 6 章主要面对设计工程师的需求,介绍了零部件的力学分析和零件优化有关的技术问题和应用,并以应用实例说明力学分析和优化的执行过程;第 7 章讨论了航天器热控制和防热的分析方法、流程和软件,介绍了蒙特-卡罗法原理及其在外热流和角系数计算中的应用,重点讨论了热网络法和有限元法的特点及它们的异同性;第 8 章简要介绍了流体力学的基本概念,讨论了航天器设计对 CFD 技术的需求、流体力学的基本知识,并用三个实例说明了 CFD 技术的应用流程和分析过程;第 9 章重点讨论了航天器电子产品的综合分析流程、软件,阐述了板级/单机热分析、力学分析和辐射剂量分析的有关问题;第 10 章着重介绍了集成设计的有关技术问题,包括流程优化、PDM 应用、集成方法,重点剖析了以 SYSTEMA 为代表几个典型的航天产品集成设计系统,最后用实例介绍了多学科优化技术在航天产品设计中的应用。

## 作者简介

**陈月根** 研究员,1958年上海动力学校毕业,先后从事过风洞实验、探空火箭载荷分析、卫星再入防热结构设计分析和结构力学分析工作。近20年来,专职从事CAD/CAE技术在航天器设计中的应用推广、软件培训和信息化工作,现任中国空间技术研究院神舟学院教授。

责任编辑 崔 玲  
封面设计 中文天地  
正文设计 孙 俐  
责任校对 林 华  
责任印制 安利平

# 总 序

我国航天技术走过了40多年的光荣历程,正面临着21世纪更加蓬勃发展的形势,需要人才,需要知识。

空间飞行器即航天器,包括卫星、飞船、空间站、深空探测器等等。空间飞行器设计专业是航天技术领域的一门主要学科,它所涵盖的知识面很宽,涉及光、机、电、热和系统工程等,是一门多学科交叉综合和工程性很强的新型学科。

本丛书是根据空间飞行器设计专业培养研究生的课程教学需求,同时考虑到空间技术领域的在职中、高级技术人员研究生水平进修的需要而编写的。因此,本丛书全面讲授空间飞行器设计专业领域的基础理论和系统的专门知识,在内容上具有足够的纵深度和宽广度、前沿性和前瞻性。本丛书的作者都是从事了几十年航天工程的高级设计师和研究员,他们把自己丰富的知识和经验很好地融入到这套丛书中,理论与实践密切结合,使本丛书具有很高的学术水平和工程实用价值。

本丛书将陆续出版。它的出版是非常值得祝贺的,相信它不仅是一套不错的研究生教材,能够为培养高级航天技术人才服务;同时又是一套优秀的学术专著,将对我国航天科学与技术的发展做出贡献。

阎桂荣

2001年9月

# 前 言

与本系列丛书的其他分册不同,本书重点不是介绍航天器设计本身的专业知识,而主要阐述利用计算机技术进行航天器设计、分析中的一些方法和技巧问题。利用数字化的手段来进行航天器设计是近十几年来发生的事情,现在还找不到一本参考书系统地讨论此问题。目前的现实是许多专业从事航天器数字化工作的年轻工程师缺乏航天器设计的必要知识,而从事航天器设计的设计师又缺少时间去了解数字化技术的最新发展,两张皮的问题非常突出。编写本书的初衷是想在这两方面起一个桥梁的作用,以促进数字化技术与航天器设计业务的融合。

航天器是一个建立在多学科技术成果基础上的产品,航天器的数字化设计的题目涉及范围非常广:从学科组成的层面看,除了原子物理学外,普通物理中讲授的光、机、电、热等学科都涉及;从专业上说,覆盖系统总体、光学有效载荷、通信有效载荷、结构、热、控制、数据管理、测控和系统管理等许多专业;从知识面上看,世界上大概还没有一个人能把涉及这么多学科和专业的数字化设计问题讲清楚。由于篇幅的限制,也不可能用一本书来说清楚航天器设计中所有数字化问题。本书只讨论了航天器设计中的与三维几何建模、力学分析、热分析、流体力学分析、辐射剂量分析和综合分析、集成设计中的流程、方法、模型交换、工具软件等问题,并自行设计或选取了部分实例进行了应用示范。与航天器数字化设计有关的问题的更全面阐述只能留待新一代航天人去讨论了。

本人从1999年开始给中国空间技术研究院的研究生讲授航天器数字化设计基础的课程,每年对讲稿都进行一些修改,在讲稿整理和补充的基础上完成了本书的编写。本书可作为从事航天器设计、分析和信息化工作的工程师的参考书。由于缺少权威参考书的佐证,本书中不少观点只是作者一家之言,供读者参考。

作者

2009年12月



# 目 录

<b>第 1 章 概 论</b> .....	1
1.1 航天产品设计的信息特点 .....	2
1.2 产品设计组织和手段的变革 .....	5
1.3 CALS 计划和并行工程 .....	11
1.4 数字化和并行工程实践 .....	15
<b>第 2 章 航天器的数字化构型和三维 CAD 技术</b> .....	29
2.1 概述 .....	29
2.2 数字化构型对软件功能的需求 .....	30
2.3 数字化构型设计环境 .....	33
2.4 数字化构型的准备和流程 .....	39
2.5 零件造型 .....	41
2.6 航天器的数字化装配设计 .....	61
2.7 航天器质量特性的集成分析 .....	67
<b>第 3 章 三维/二维统一的工程图设计和逆向建模</b> .....	77
3.1 概述 .....	77
3.2 二维工程图的设计流程 .....	79
3.3 二维工程图设计的准备 .....	80
3.4 工程投影视图 .....	82
3.5 细节标注 .....	86
3.6 工程图的保存 .....	95
3.7 关于二维工程图的再利用 .....	96
<b>第 4 章 模型交换技术</b> .....	105
4.1 概述 .....	105
4.2 几何模型交换的三种基本方法 .....	106
4.3 几个典型的中性文件和中间文件 .....	112
4.4 模型交换问题的讨论 .....	142

<b>第 5 章</b>	<b>航天器力学分析和有限元法</b>	150
5.1	概述	150
5.2	力学分析的基本理论知识	152
5.3	有限元法力学分析的一般方程和讨论	165
5.4	航天器有限元力学分析技术	176
<b>第 6 章</b>	<b>航天器零部件的力学分析和优化</b>	195
6.1	概述	195
6.2	零部件的力学分析	196
6.3	航天器零部件力学分析的实例	206
6.4	结构零件的优化设计	217
6.5	结构优化应用实例	227
<b>第 7 章</b>	<b>航天器的集成热分析</b>	235
7.1	概述	235
7.2	空间热环境和航天器的热平衡	237
7.3	角系数及其计算	241
7.4	航天器的外热流计算	247
7.5	热传导问题的表达式	252
7.6	热传导问题的数值解法	256
7.7	航天器热分析的软件体系	263
7.8	热分析集成建模技术讨论	276
7.9	航天器的热防护分析	283
<b>第 8 章</b>	<b>计算流体力学在航天器设计中的应用</b>	300
8.1	概述	300
8.2	流体力学问题的基本方程	302
8.3	流体力学问题的 CFD 软件	308
8.4	流体力学问题的分析流程	311
8.5	CFD 分析其他应用实例	318
<b>第 9 章</b>	<b>航天电子设备数字化综合分析</b>	323
9.1	概述	323

9.2	综合分析流程和信息流 .....	327
9.3	航天电子设备数字化综合分析的软件系统 .....	339
9.4	EDA-MCAD 协同设计问题 .....	344
9.5	PCB 板级热分析 .....	347
9.6	单机热分析 .....	362
9.7	单机的力学分析 .....	363
9.8	单机的辐射剂量分析 .....	372
<b>第 10 章</b>	<b>航天器的集成设计和多学科优化 .....</b>	<b>378</b>
10.1	概述 .....	378
10.2	设计结构矩阵和流程优化 .....	379
10.3	产品数据管理系统 .....	386
10.4	航天器的集成设计 .....	392
10.5	航天器多学科优化 .....	426
10.6	展望 .....	437
<b>附录一</b>	<b>NASTRAN 中叠层材料和蜂窝夹层结构的模型理想 化处理 .....</b>	<b>439</b>
<b>附录二</b>	<b>热传导问题的泛函表达式推导 .....</b>	<b>445</b>
	<b>参考文献 .....</b>	<b>447</b>

# 第 1 章 概 论

数字化设计制造技术是当前世界上发展最快的一门技术,它是随着计算机的出现和发展(图 1-1)而同步发展起来的一种新技术。1939 年前后,一位名叫阿塔那索夫(John V. Atanasoff)的美国物理学教授带着他的学生贝利(Clifford Berry),制造出了世界上第一台电子计算机 ABC。70 多年来,计算机的硬件和软件技术都经历了巨大的进展,人们普遍感到计算机的硬件刚到货就淘汰,计算机软件刚安装就升级,计算机的书籍刚出版就过时,计算机的文章刚发表其观念就已陈旧。计算机的应用远远超出了原来“计算”的范畴,渗透到人们生活的各个方面,改变着人们的生活,也改变了传统的工作方式。可以说,一个航天器设计师,如果不会用计算机这个先进的工具,就无法完成现代航天器的设计。

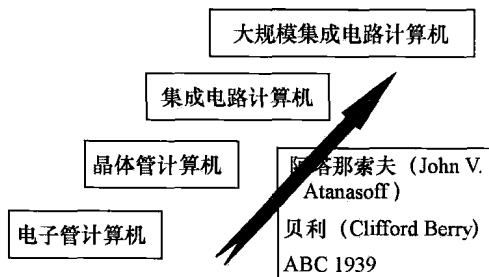


图 1-1 电子计算机发明以来的巨大进展

航天器数字化研制的内涵很广,从纵向时间轴来看,它涵盖产品的全生命周期,包括产品的数字化定义,产品功能、性能的数字化分析仿真,产品的数字化制造,产品的数字化测试,产品的运行维护和在轨管理。从横向的学科面而言,包括计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程(CAE)、计算机辅助工艺过程规划(CAPP)、计算机辅助制造(CAM)、计算机辅助测试(CAT)和技术产品数据管理(PDM)等内容。虚拟样机技术(VP)和虚拟现实技术(VR)的出现,又大大扩展了计算机的应用范围。

由于书稿篇幅的限制和作者知识的局限,要想通过一本书把航天器的数字化设计问题讨论清楚是不可能的,本书着重介绍数字化设计有关的基本知识,重点讨论航天器设计有关的 CAD、CAE 软件体系及它们集成应用中的一些问题,而不强调某个特定软件的具体操作。

## 1.1 航天产品设计的信思特点

从1957年10月4日前苏联发射了人类的第一颗人造地球卫星至今,航天器设计技术经历了50年多的发展,然而每年发生的大量航天器故障和灾难性失败的事例告诉人们,航天器研制技术还远没有到达完全成熟的阶段。大量的统计资料表明,在航天器的质量事故中,大约1/3是由于设计错差而引起的,究其原因80%~90%来自信息交流的失误。从信息交流的观点来看,航天器的设计存在以下三个特点,这里借用NASA马歇尔中心J. C. Blair等人的图示(图1-2)予以说明。

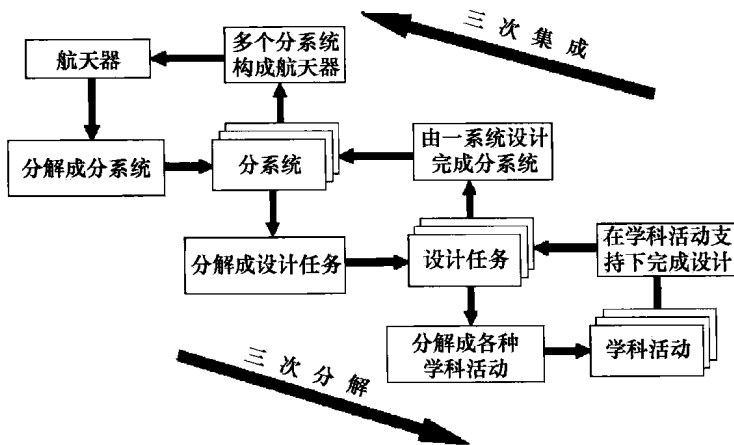


图1-2 航天器研制中的工作分解和集成

### 1.1.1 错综复杂的横向信息关系

航天器的研制是一个庞大的系统工程,一个航天器由多个分系统组成,总体与分系统间、分系统与分系统之间存在大量的信息交换。一颗卫星至少应包括有效载荷、结构、热控、能源、测控、姿态和轨道控制、推进和星上数据管理等分系统,一艘载人飞船或一个空间站,包含的分系统就更多。总体设计的任务之一是按功能要求,把航天器分解成若干个分系统。每个分系统进一步把工作分解成具体的硬件和软件设计任务。每一个软件、硬件设计涉及多个学科的分析 and 验证,因此又得进一步把工作分解为不同专业和学科的设计、分析任务。整个分解工作遵循自上而下(TOP-DOWN)的工作方式,分解是否正确,就要看

最后能否用自下而上(BOTTOM-UP)的方式集成为一个完整的航天器。在三次分解和三次集成的过程中,任何一个环节出现错差,就无法实现原定的设计任务。图1-2形象地说明了航天器研制中实际存在的三次分解和三次集成过程。J. C. Blair 等人认为航天器研制过程中错综复杂的信息交换关系可以用图1-3所示的书架模型来表示,书架的顶板表示总体设计,顶板下面的各层搁板代表各分系统,整个架子通过4根方立柱和1根圆立柱支撑在一起。这个模型隐含着三个层次的信息交流。第一个层次是总体一分系统间的正规信息交流,标有向下箭头的3根方柱表示总体设计与各分系统间的信息交换如设计任务书等,标有向上箭头的主方柱表示各分系统反馈给系统总体的信息渠道。第二个层次的信息交流是各分系统间的非正规信息交流,图中标有上、下箭头的圆柱表示各分系统间的信息交流。第三个层次是各分系统内部的信息交流,也就是发生在每层搁板平面内的信息交流。

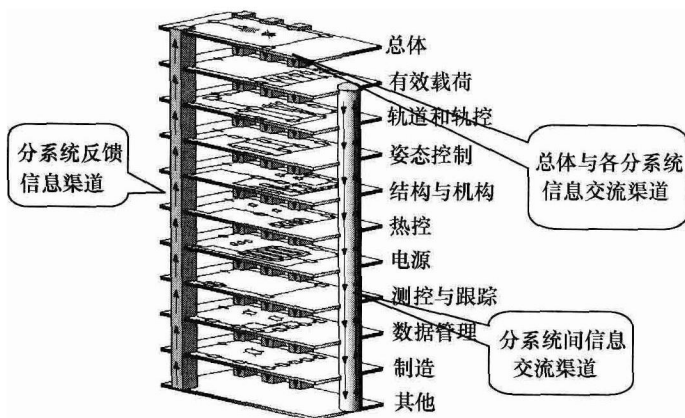


图1-3 航天器研制中信息交换的模型

### 1.1.2 前后交叉的纵向信息传递

航天器研制过程中复杂的信息关系不仅反映在航天器内部横向信息交流,更反映在时序上不同研制阶段间的信息关联。在正常情况下,一个航天器的研制,要经过方案设计、初步设计、详细设计、制造、系统集成、发射和在轨运行等7个阶段,经历了一个螺旋式发展过程。在具体的阶段划分和标志上,中国与欧美国家略有差别,但实际工作内容是一致的。后一个阶段的信息来源于前一个阶段,但又不同于前一个阶段,信息源的唯一性和技术状态的控制成为航天产品质量控制的重要内容。更为复杂的是由于发展的不平衡,各个分系统间还存

在着研制阶段的交叉。即使在同一个研制阶段,由于用户需求的改变、外部协作条件的变化、分系统间的折中和平衡等因素考虑,也存在多次反复迭代的可能。图 1-4 给出了航天器研制过程中纵向(时间轴)、横向(学科间)信息关系图示。在方案设计、初步设计和详细设计的各个阶段中,都存在总体、分系统、设备、学科间的信息交换。

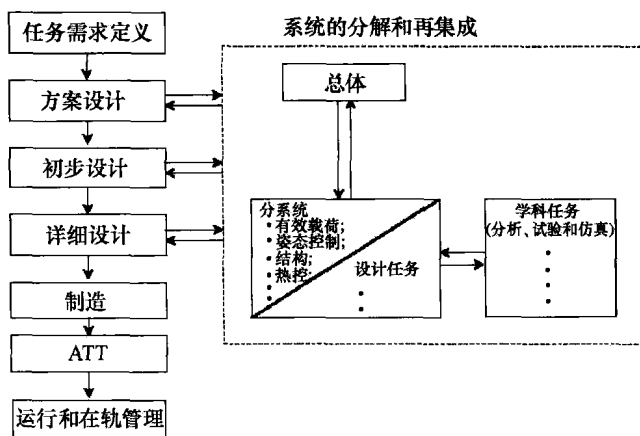


图 1-4 航天器研制中纵横信息关系

### 1.1.3 似曾相识的不同学科模型

航天器设计涉及的学科面非常广,无法用一个数学模型来完整地描绘航天器的功能和特性,因此航天器的数字样机必定是一个模型族。由于这些不同学科模型间反映的是同一个航天器,所以它们间存在着必然的联系,它们有共同的几何形状、相同的材料、运行在同一个轨道上,遇到同样的环境,它们之间还存在着某种程度的耦合,甚至是强耦合,彼此很难分离,所以看起来总是似曾相识。但由于不同学科对研究对象的数学描述、分析方法、习惯和语义上存在巨大的差别,有的用有限元模型,有的用差分模型;有的需要体模型,有的只需要面模型。图 1-5 所示的是两个看似相识但又截然不同的模型,图(a)是卫星的总体布局模型,它关心的几何形状和尺寸,用的是实体模型;图(b)是该卫星用来进行仪器设备间热辐射角系数分析,它用的是细节简化后的表面模型。

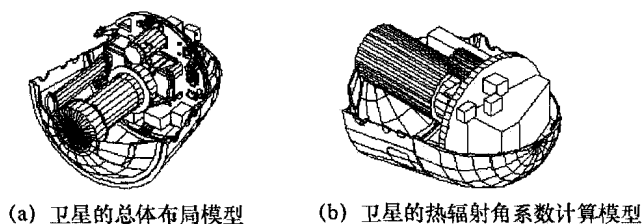


图 1-5 两个似曾相识的不同学科模型示例

## 1.2 产品设计组织和手段的变革

### 1.2.1 设计组织的变化

设计组织是生产关系范畴内的内容,它必须随着生产力的发展而变化。100 多年来,随着科学技术的发展和计算机技术的进步,人类的设计方式经历了不同的发展阶段。按照美国航空航天协会(AIAA)1991年发表的多学科优化(MDO)白皮书的总结,参考近20年来的发展,人类进行航空航天产品的设计模式大致经历了四个发展阶段,它们个人全能式、总设计师主导式、科学家主导式和项目经理下的计算机并行工程和协同设计模式,见图1-6。

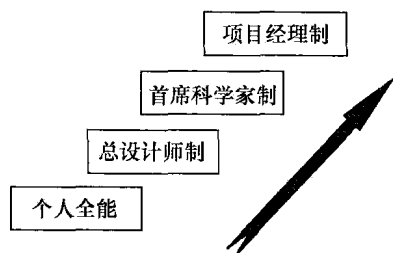


图 1-6 百年来产品设计组织的变化

第一阶段可以称为个人全能阶段(Jack-of-all-trades)。20世纪初,学科的分工还不精细,一批航空技术的开拓者,如飞机的发明者莱特兄弟(The Wright Brothers)、直升机的发明者西科尔斯基(Sikorsky)、中国的飞机制造第一人冯如等,他们在进行飞机样机设计和制造中,都不得不自己设计,自己制造,甚至自己当试飞员,有的还为试飞自己设计的飞机而献出了生命,冯如就是在1912年在广州进行飞机试飞中牺牲的一个。这些早期的航空工业开拓者,一个人既要考虑空气动力学的问题,又要顾及飞机结构、材料、推进和制造工艺,所有的问题都是一个人,加上1~2个助手就全部解决。他们不屈不挠的创新精神和自我牺牲精神为后人所敬仰。但随着飞机性能的提高和科学技术的发展和学科分工的精细化,这种个人全能的设计方法就不适应了。20世纪30年代初,风洞实验技术和空气动力学的发展,薄壁结构力学在航空航天结构分析中的应用,



燃烧化学动力学对推进系统设计的巨大影响,生产制造中工艺过程和成型方法的更新,学科分类呈精细化,一个人全面了解并掌握它们的发展已不可能,因此产品设计的组织方式随之发生了变化。

第二阶段的设计模式称为总设计师制阶段,这一阶段的设计特点是出现了产品设计的分工,产品被分解为不同的分系统,由不同的专业人员来完成不同分系统的设计。这种设计方式的最大困难是如何进行工作分解?由谁负责协调和决策不同分系统间的矛盾?这就需要有一位具有深厚工程背景和丰富设计经验的工程师为产品的总设计师,运用他的智慧和综合决策能力,来平衡和协调不同设计人员间的关系,从而把基本理论转变为航空航天的产品。在第二次世界大战的飞机的快速研制和大规模制造生产过程中,美国的麦克唐纳、道格拉斯,前苏联的米高扬、安东诺夫等都是当时的著名的飞机总设计师。美国的哥达德,前苏联的柯罗廖夫,德国的冯·布劳恩等则是当时火箭和导弹的总设计师。以总设计师为主的设计方式,大致延续了20年,到20世纪50年代随着远程导弹、火箭、卫星这类新型飞行器的出现,以总设计师为主导的设计方式逐渐感到力不从心。第二次世界大战后,人类进入了东西方冷战时期,核武器的出现,加速了远程打击武器的发展,运载火箭和导弹技术受到各国极大的关注。相对于飞机而言,火箭和导弹的最大特点是一次使用,产品自身的起飞重量对产品的性能影响极大。为了获得最高的战略、战术性能,结构轻量化成为最大限度地发挥潜力的关键。因此,理论分析和计算在产品设计中,尤其在前期方案论证中的作用显得极为重要,以设计师为主的设计模式已很难适应航天产品的设计,科学家的作用日益突出。

第三阶段的设计模式是科学家为主导的设计模式,这种设计模式的特点是产品进入工程设计阶段前,先有一个以科学家为主导的团队开展预先研究,进行产品的概念设计和可行性研究。在此基础上,设计师把科学家的意图在工程上予以实现。在中国,科学家与设计师的界限往往不很清晰,通常是同一批人,在前期作预研,立项后又从事产品的设计,但重大型号立项前的预先研究实际上是早就存在的。这种设计模式,从20世纪50年代起,大约持续了20年。到20世纪70年代后期,有两个因素极大地影响了设计组织模式的改变:一是计算机辅助设计技术的出现,设计人员开始从烦琐的事务工作中脱身出来,有更多的时间进行原理创新和理论建模的考虑;二是需求策略的变化,航空航天产品走向民用市场,因此提高产品质量、降低生产成本成为企业生存和发展的关键。用户除了关心产品的性能,更注意产品研发的时间、成本、可靠性、可维护性、安全性。时间进度、成本问题的引入,给科学家和设计师带来了难题,产品的研发不再