



国防特色院士文库

“十二五”国家重点图书
出版规划项目

航空发动机多学科设计优化

HANGKONG FADONGJI DUOXUEKE SHEJI YOUHUA

尹泽勇 米 栋 等著

北京航空航天大学出版社

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



国防特色院士文库

“十二五”国家重点图书
出版规划项目

航空发动机多学科设计优化

尹泽勇 米 栋 等著

北京航空航天大学出版社

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

内容简介

本书介绍了多学科设计优化的关键技术,建立了一种基于多学科设计优化技术的航空发动机协同设计方法,结合压气机叶片、涡轮叶片、涡轮级叶片、发动机总体方案以及发动机整机等多学科设计优化工作,较详细地叙述了所建立方法的执行步骤与应用效果。

本书可供航空发动机及燃气轮机专业的工程技术人员参考,也可作为高等院校航空发动机等专业多学科设计优化课程的辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机多学科设计优化 / 尹泽勇等著. -- 北京 :
北京航空航天大学出版社, 2015. 1

ISBN 978 - 7 - 5124 - 1659 - 8

I. ①航… II. ①尹… III. ①航空发动机—最优设计
IV. ①V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 309841 号

版权所有,侵权必究。

航空发动机多学科设计优化

尹泽勇 米 栋 等著

责任编辑 张冀青

*

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

中印集团数字印务有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:14.5 字数:371 千字

2015 年 2 月第 1 版 2015 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5124 - 1659 - 8 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

航空发动机是一个十分复杂的高技术系统,其设计涉及热力、气动、燃烧、结构、强度、寿命等许多学科,且这些学科间存在着高度非线性时变耦合关系。从设计角度讲,航空发动机综合性能的提高在很大程度上来源于如下两个方面。一方面是所涉及的各学科自身理论及技术的进步。例如,发动机零部件强度寿命设计就是从原先采用材料力学理论逐步发展为线弹性理论、属于非线性范畴的弹塑性理论及损伤容限理论等,从而使得零部件质量变得更轻,可以承受的转速和工作温度变得更高。应该说,这方面的工作一直得到相关研究者及工程技术人员的高度重视,并取得了十分明显的效果。另一方面是能充分、合理地考虑各学科耦合关系的综合设计理论及技术的进步。但遗憾的是,在这方面取得的效果迄今远不如第一方面。

目前,越来越多的人认识到,提高发动机综合设计水平的最佳途径是采用多学科设计优化(Multidisciplinary Design Optimization, MDO)技术。MDO 是一种通过充分探索并利用工程系统中各学科间相互作用的协调机制来设计复杂系统和子系统的方法。它在设计过程中充分考虑各学科间的耦合作用,合理平衡各学科要求间的冲突,利用多学科设计优化策略与优化搜索算法来寻求系统最优解,从而提高产品综合性能,缩短研制周期,降低寿命期成本。

中国航空动力机械研究所是国内最早从事航空发动机 MDO 技术研究与应用的单位之一。本书作者所在团队于 20 世纪 90 年代末开始追踪 MDO 技术的发展动向,2000 年着手 MDO 关键技术的研究与工程应用工作。遵循由易到难、由简单到复杂的原则,本团队分多个阶段各有侧重地对 MDO 的一些关键技术进行研究、开发及应用工作。本书即是对十余年来这些工作的一个总结。

需要指出的是,航空发动机多学科设计优化所涉及的各个学科,包括多学科设计优化本身的基本理论及通用方法等,都是十分复杂的,本书无意也无法对它们进行全面、系统及深入的阐述,只是针对本团队所做的多学科设计优化工作涉及的范围作一基本说明,主要引用了其他人已完成的工作成果。由于难以在正文中一一注明引文,每章后统一列出了参考文献。在此为这种方式可能带来的不便致歉。

本书分为 10 章。第 1 章叙述 MDO 的定义、发展历史以及开展 MDO 研究的必要性。第 2 章叙述如何利用代理模型技术代替“真实”的物理分析模型以便大幅减少各学科的分析时间。第 3 章叙述如何利用多目标优化和优化算法技术解决多学科设计优化所面临的复杂、多目标优化问题。第 4 章叙述本团队基于 MDO 技术建立的航空发动机协同设计方法。第 5~10 章分别结合压气机叶片、

涡轮叶片、机匣、涡轮级叶片、发动机总体方案以及发动机整机多学科设计优化,较详细地叙述所建立方法的具体执行步骤与应用效果。其中,第5章重点叙述如何利用可变复杂度建模技术、标准MDO策略,以及变权系数加权求和法处理压气机叶片多学科设计优化问题。第6章在第5章的基础上重点叙述如何利用满意度函数法处理涡轮叶片这一类发动机热端零部件的多学科设计优化问题。第7章重点叙述如何利用响应面法这一代理模型技术处理机匣多学科设计优化问题。第8章重点叙述如何利用协作优化策略以及混合优化算法处理涡轮级叶片这一部件级的多学科设计优化问题。第9章重点叙述如何利用多目标遗传算法处理涡扇发动机总体方案设计这一多学科设计优化问题。第10章重点叙述如何利用基于支持向量机及神经网络等代理模型技术来帮助实现发动机整机多学科设计优化。需要说明的是,为便于阅读,有少量内容在相关章节中有所重复。

第1~4章由尹泽勇、米栋执笔,第5章由米栋执笔,第6章由吴立强执笔,第7章由肖根升执笔,第8章由刘飞春执笔,第9章由湖南林业大学李立君执笔,第10章由米栋、冯立勇执笔,全书由尹泽勇统稿(未注明单位者均供职于中国航空动力机械研究所)。

在编写过程中,得到了中国航空动力机械研究所同事们的大力支持,其中,邹学奇研究员与朱玲研究员在压气机气动设计,李概奇研究员、胡好生研究员及彭剑勇高工在燃烧室设计,李维研究员在涡轮气动设计方面给予了热情帮助,董纪岚、李锦红、钱正明和张立章硕士等对书稿进行过校对,在此一并表示感谢。

多学科设计优化技术是一门新兴技术,其本身还在不断发展之中,同时由于作者水平有限,本书缺点错误在所难免,恳请读者批评指正。希望本书的出版能为我国航空发动机多学科设计优化工作的发展及应用起到一定的推动作用。

作 者

2014年10月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 MDO 的定义内容及现状	1
1.1.1 MDO 的定义及研究内容	1
1.1.2 MDO 研究现状	3
1.2 先进航空发动机设计对 MDO 的需求	6
1.3 本团队在航空发动机领域内开展的 MDO 工作	10
参考文献	11
第 2 章 代理模型技术	15
2.1 概 述	15
2.2 试验设计	15
2.2.1 基本概念	15
2.2.2 正交试验的优点	17
2.2.3 试验方案安排	18
2.2.4 试验结果分析	18
2.3 近似方法	20
2.3.1 响应面法	21
2.3.2 克里金法	22
2.3.3 神经网络法	24
2.3.4 支持向量机法	26
参考文献	27
第 3 章 多目标优化及优化算法技术	29
3.1 概 述	29
3.2 基本概念	29
3.3 多目标的求解方法	31
3.3.1 主目标函数法	31
3.3.2 评价函数法	31
3.3.3 交互规划法	32
3.3.4 分层求解法	32
3.3.5 非劣解法	32
3.4 优化算法技术	33
3.5 多目标遗传算法	34
3.5.1 标准遗传算法	34

3.5.2 遗传算法的特点及应用	38
3.5.3 多目标遗传算法	38
参考文献	44
第4章 基于MDO的航空发动机协同设计方法	46
4.1 概述	46
4.2 系统分解	46
4.3 系统建模	48
4.3.1 MDO物理建模	48
4.3.2 MDO数学建模	50
4.4 系统求解	55
参考文献	56
第5章 压气机叶片MDO	57
5.1 概述	57
5.2 系统分解	58
5.3 系统建模	59
5.3.1 各学科物理模型	59
5.3.2 优化数学模型	71
5.4 系统求解	77
5.4.1 主目标函数法	78
5.4.2 固定权系数加权求和法	79
5.4.3 变权系数加权求和法	79
5.5 多学科设计优化结果	80
5.5.1 算例1	80
5.5.2 算例2	88
5.5.3 算例3	90
5.5.4 算例4	91
参考文献	92
第6章 涡轮叶片MDO	93
6.1 概述	93
6.2 系统分解	94
6.3 系统建模	96
6.3.1 各学科物理模型	96
6.3.2 优化数学模型	101
6.4 系统求解	105
6.5 多学科设计优化结果	109
6.5.1 分析软件的校验	109

6.5.2 计算实例	110
参考文献	118
第 7 章 机匣 MDO	119
7.1 概 述	119
7.2 系统分解	119
7.3 系统建模	120
7.3.1 各学科物理模型	120
7.3.2 基于正交试验设计及响应面的强度代理模型	127
7.3.3 优化数学模型	132
7.4 系统求解	134
7.5 多学科设计优化结果	134
7.5.1 优化算例 1	134
7.5.2 优化算例 2	137
7.5.3 优化算例 3	139
参考文献	140
第 8 章 涡轮级叶片 MDO	141
8.1 概 述	141
8.2 系统分解	142
8.3 系统建模	143
8.3.1 各学科物理模型	143
8.3.2 优化数学模型	149
8.4 系统求解	158
8.4.1 优化算法的选用	158
8.4.2 多目标优化	159
8.5 多学科设计优化结果	159
8.5.1 算例 1——气动效率最优	159
8.5.2 算例 2——叶片质量最轻	166
8.5.3 算例 3——气动效率及叶片质量加权最优	167
参考文献	170
第 9 章 发动机总体 MDO	171
9.1 概 述	171
9.2 系统分解	171
9.3 系统建模	172
9.3.1 各学科物理模型	172
9.3.2 优化数学模型	183
9.4 系统求解	189

9.5 多学科设计优化结果	189
参考文献.....	200
第 10 章 发动机整机 MDO	201
10.1 概 述.....	201
10.2 系统分解.....	201
10.3 系统建模.....	204
10.3.1 各学科物理模型.....	204
10.3.2 代理模型的建立.....	208
10.3.3 优化数学模型.....	217
10.4 系统求解.....	218
10.5 多学科设计优化结果.....	219
参考文献.....	222

第 1 章 绪 论

1.1 MDO 的定义内容及现状

1.1.1 MDO 的定义及研究内容

多学科设计优化 (Multidisciplinary Design Optimization, MDO) 是一种通过充分探索并利用工程系统中各学科间相互作用的协调机制来设计复杂系统和子系统的方法。它在设计过程中“同步”考虑各学科间的耦合作用,“实时”平衡各学科间的冲突,利用先进 MDO 策略及适于 MDO 的先进优化算法来寻求系统最优解,从而提高产品综合性能水平,缩短研制周期并降低成本。

MDO 是一项新兴的前沿技术,最早产生于美国航空航天领域,是追求高综合性能、低成本飞行器的必然产物。MDO 有其巨大的优越性,同时也面临着分析、计算及数据交换高度复杂等困难。众所周知,航空发动机每一学科本身的设计计算复杂性往往就已很高,若考虑多学科综合以及各学科间的耦合性,并在此基础上进行优化设计,其设计分析工作量就不是简单的线性叠加,而是成指数关系增长。若不采取相关的先进方法及技术手段,MDO 就无法成为实用的技术。

为克服这些困难,人们逐步开展了一系列的研究工作,突破了很多 MDO 关键技术。这些工作主要涉及几个大的领域,即 MDO 系统分解技术、MDO 系统物理建模技术、MDO 策略技术、MDO 优化算法技术和 MDO 计算框架技术等。

1. MDO 系统分解技术

系统分解的主导思想是通过改变多学科设计优化问题的结构,在保证合理性的前提下降低问题的复杂性,以此来减少总的设计计算分析时间。

系统分解的主要研究内容为:如何采用简便的方法表述设计信息流以清楚地反映系统分析过程中的信息传递;如何对系统分析过程本身进行优化以提高系统分析的效率;如何选择合适的分解方法以有效地进行复杂系统的分解等。

通过系统分解,一个复杂系统就可被重新组织成由一系列较小的简单子系统组成的形式。这些子系统问题的设计计算工作量之和应当远小于分解前整个系统的设计计算工作量。同时,各子系统之间保持必要的联系与协调,不会失去原系统的主要耦合与协同关系。

系统分解是进行多学科设计优化的基础,具有很重要的意义。其实质是利用多学科设计优化技术中关于组织安排复杂性问题的手段来解决计算分析复杂性问题,从而提高计算分析效率,降低计算分析成本。

2. MDO 系统物理建模技术

在系统分解的基础上,MDO 系统建模技术研究如何建立适当的系统物理模型。总体来说,MDO 系统物理建模的原则有两个:

① 考虑尽可能多的学科,以达到降低产品全寿命周期费用的目的。

有资料显示,在设计阶段主动增加的必要投入,在随后的阶段中会顺次产生 10 倍的收益。在目前对产品全寿命周期费用越来越重视的情况下,更应重视设计阶段的质量,在设计初期应尽可能多地考虑到各个因素及学科的重要影响。

② 合理进行计算保真度和成本之间的权衡。

计算保真度和成本是一对矛盾,如何合理权衡两者的关系具有重要意义。根据保真度和成本权衡方式的不同,目前主要有两大类 MDO 建模技术。一是可变复杂度建模(Variable-Complexity Modeling,VCM)技术,研究在优化设计过程中,如何根据不同保真度需求,采用不同复杂度及不同成本的模型。例如,可对各学科分析采用高复杂度模型,对学科间的信息交换采用低复杂度模型;对物理分析模型采用高复杂度模型,对优化数学模型采用低复杂度模型。二是代理模型技术,即以降低一定精度为代价。例如,利用一个拟合的多项式函数来描述多学科分析中原本复杂的输入、输出响应关系,以减少计算成本。这种输入、输出既可以指各学科物理分析模型的输入、输出,也可以指优化数学模型中的优化设计变量、目标函数或约束条件。目前应用比较多的代理模型有响应面模型(Response Surface Model,RSM)、克里金模型(Kriging Model,KM)、神经网络模型(Artificial Neural Network Model,ANNM)及支持向量机模型(Support Vector Machine Model,SVMM)等。

3. MDO 策略技术

多学科设计优化技术实施所面临的最主要困难就是计算复杂性与组织复杂性问题。计算复杂性主要体现在多学科设计优化问题中设计变量的数目极大,问题的维数极高,子系统或学科分析软件对计算机性能的要求极其严格。组织复杂性主要体现在来源于不同开发单位的多类软件的集成工作极其困难,工程设计的实际组织形式与多学科设计优化的组织形式不匹配等。作为 MDO 系统数学建模中重要工作内容的 MDO 策略,从包含多级、多个子系统的一个大型复杂系统设计问题优化的角度,表述系统寻优的总体结构,如各学科间的耦合关系及其处理方式、信息组织形式、优化器布局等。多学科设计优化技术发展至今,已产生了一系列多学科设计优化策略,诸如标准优化策略、协作优化策略(Collaborative Optimization,CO)、并行子空间优化策略(Concurrent SubSpace Optimization,CSSO)以及二级集成系统综合优化策略(Bi-Level Integrated System Synthesis,BLISS)。这些优化策略将在随后的章节中说明。

4. MDO 优化算法技术

在 MDO 技术中,相同或不同的优化算法由不同层级优化器使用。当求解多学科设计优化问题时,优化算法被集成到各级优化器中,与各级分析模块一起构成相应的系统级与子系统级(有时也称为学科级,为表述方便,本书不刻意区分两者的区别)优化问题求解器。与一般优化算法研究不同的是,MDO 环境下的优化算法的研究及应用更侧重于在某系统、子系统或学科中采用怎样的优化算法更适宜,对某种优化模型采用怎样的优化算法更适宜。也就是说,我

们需要研究多学科设计优化中各级优化的特征,从而在各种各样的优化算法中选择最合适的优化算法去求解对应优化问题。

5. MDO 计算框架技术

众所周知,数值计算与理论和实验并列,已成为当今世界科学活动的第三种手段。强大的分析与仿真程序以及 CAD 工作站等都有助于开展更好的设计,但这些发展也带来了新的困难,即在一个个设计环境中所采用的计算机程序大多是彼此独立的,程序间的组织集成和数据传递将耗费大量的时间。信息系统支持下的 MDO 计算框架技术能很好地解决这一难题。

MDO 计算框架是指能实现 MDO 策略、包含硬件和软件体系的计算环境。在这个计算环境中,能够集成和运行各学科的计算分析,实现各学科之间的高效通信。其主要研究内容包括:如何进行流程管理,如何进行数据管理和提取,如何集成各学科专用程序和可采用的商用软件,如何进行分布式并行计算,如何支持代理模型的生成,如何实现设计过程可视化和监控技术,等等。

1.1.2 MDO 研究现状

1. MDO 发展简史

MDO 发展图如图 1-1 所示。

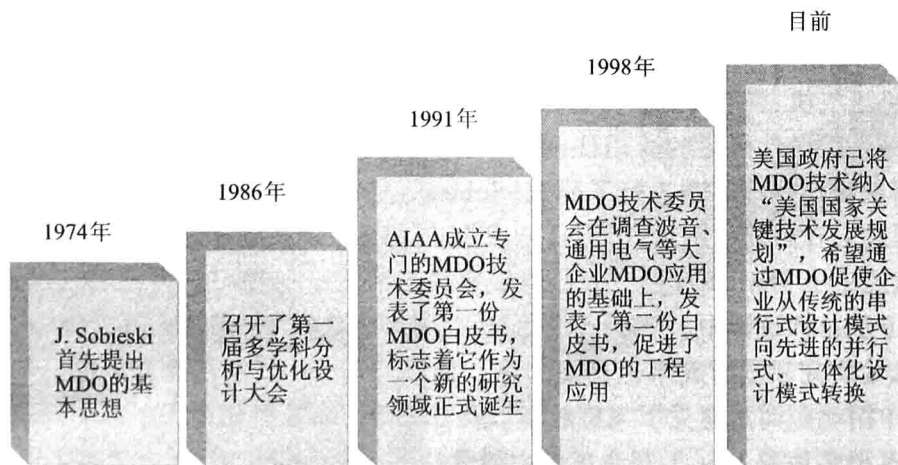


图 1-1 MDO 发展图

MDO 的发展史可简述如下:

- ① 1974 年,美国国家航空航天局(NASA)高级研究员 Sobieski 首先提出了 MDO 思想。
- ② 1986 年,在美国航空航天学会(AIAA)、NASA 和美国空军(USAF)等机构的倡导下,在 NASA 兰利研究中心举行了第一届多学科分析与优化设计会议。之后,每两年举行一次 MDO 学术大会,发表论文与参会人数逐届增加,现已演变成国际性学术会议。
- ③ 1991 年,AIAA 成立了专门的 MDO 技术委员会,发表了第一份 MDO 白皮书。该书以航空工业发展为背景,描述了飞行器设计方法的变迁,指出 MDO 技术是追求飞行器高综合

性能指标的必然产物,同时列举了 MDO 的研究内容与核心技术。这标志着 MDO 作为一个新的研究领域正式诞生。

④ 1998 年,MDO 技术委员会在调查美国波音、通用电气等大企业 MDO 应用状况的基础上,发表了第二份白皮书。该书描述了 MDO 的工程应用情况,总结了利用 MDO 技术的方法及经验,提出了需要解决的困难问题,推进了 MDO 技术的工程应用。

⑤ 目前,美国政府已将 MDO 技术纳入“美国国家关键技术发展规划”,希望通过对 MDO 技术的研究与工程应用,促使企业从传统的串行设计模式向先进的并行、一体化设计模式转换。

2. MDO 研究现状

MDO 技术研究的重点领域集中在 MDO 系统分解、MDO 建模、MDO 策略、MDO 优化算法以及 MDO 计算框架几个方面。

其中,MDO 策略是目前研究最活跃、研究成果也最多的研究方向。例如,Hajela 等利用全局敏感度方程探索了飞机气动/性能/结构/控制一体化设计的方法;Sobieski 提出了 CSSO,使得每个子系统都能独立地进行优化设计,实现了并行化;Renaud 和 Batill 等改进和发展了子空间优化策略,将 CSSO 应用于机械构件的设计,取得了满意的结果;Sellar 等将基于响应面的 CSSO 应用于简化的通用航空飞机和旋翼机初步设计问题,不仅减少了系统分析的次数,而且提高了找到全局最优解的概率;Kroo 等应用 CSSO 实现了中程运输机气动/结构/性能的分分布式计算机并行分析,使优化过程中系统分析的时间缩短了 69%,寻找全局最优解的能力也有所提高;此外,Kroo 提出了协作优化策略,该方法理论上可解决任何耦合问题,适合各种复杂系统,但效率偏低;尹泽勇、米栋等对不同优化策略的适应性感兴趣,考虑了标准优化策略对航空发动机压气机、涡轮叶片等零件级进行多学科设计优化的适用性,以及 CO 策略对涡轮部件级进行多学科设计优化的适用性;韩明红对协作优化策略进行了改进,并对优化策略和 MDO 中的不确定性建模问题进行了研究;Sobieski 提出了 BLISS,综合了 CSSO 和 CO 策略的优点,在列式上有更大的优越性,有可能成为未来极具希望的 MDO 策略;赵勇针对 BLISS 进行了改进,提出了 HBLISS(混合二级集成系统综合优化策略,HybridBLISS)优化策略,并将其运用到卫星总体设计中。

MDO 其他研究领域的成果也比较丰富。如 Golovidov 等人在高速民机(HSCT)的多学科设计优化中用响应面法建立了飞机航程以及三个阻力参数的代理模型;Knill 等人利用缩减项的响应面模型来预测 HSCT 超音速阻力的欧拉解;Jin 等人利用 14 个代表不同类型问题的算例对包括径向基函数在内的 4 种代理模型方法进行系统对比后发现,在同时考虑模型精度和鲁棒性的情况下,径向基函数模型最为可靠;Giunta 在其博士论文中对克里金方法在 MDO 中的应用做了初步研究,并在随后的论文中将该方法与多项式模型做了对比研究;米栋、尹泽勇等利用支持向量机技术建立了某向心叶轮的三维有限元应力计算的代理模型,并用于结构优化,取得了良好效果;穆雪峰等对响应面模型、径向基神经网络模型和克里金模型等 MDO 常用的代理模型进行了研究,指出了各自的适用情况;Widrow 和 Hoff 提出了一种自适应线性神经网络,成功应用于自适应信号处理和雷达天线控制连续可调过程,并用硬件实现人工神经网络方面的工作;Livne 等开发了面向设计的分析软件 LS-CLASS,用于主动控制机翼的结构/控制/气动综合优化;Townsend 等提出了 CAD 系统与多学科设计优化构架结合的具体

手段;虞跨海、岳珠峰等先后开发了叶片气动与强度学科间的载荷及变形信息有效传递、五次多项式涡轮叶片参数化建模技术及克里金代理模型等多种 MDO 工具,建立了一套针对涡轮冷却叶片多学科设计优化的方法和工具;宋迎东等在考虑气动、冷却、强度耦合作用基础上,针对复合冷却方式的燃气涡轮导向叶片进行了多学科设计优化策略研究,取得了良好的效果;舒彪、韩前鹏等重点对叶片的参数化建模进行了研究,解决了优化过程中强度、振动等分析中的自动化建模的需求;Salas 等人对各学科设计软件的开发要求给予了阐述。

在多学科设计优化的分布式网络计算环境的研究中,Olds 等建立了分析和优化的网络集成环境,并基于 UNIX 系统进行了运载器的优化设计;Rogers 等人开发了网络监视系统,可以对分布式计算进行远程控制。

值得一提的是,美国政府部门对推动 MDO 技术基础研究所作出的努力:隶属于 NASA 兰利研究中心的 MDO 分部(简称 MDOB)是美国 MDO 研究最重要的官方领导机构,成立以来,MDOB 已经发起了十余项大型项目以推动 MDO 技术的发展。

3. MDO 工程应用现状

在 MDO 发展的起初 10 多年中,受计算机软硬件等条件的限制,可开展的工作主要集中于多学科设计优化策略的理论研究方面。自 20 世纪 90 年代中后期以来,随着计算机软硬件技术的快速发展及理论研究所取得的成果,MDO 在工业发达国家得到一定范围的工程应用,并获得了明显的效果。

① 空中客车公司利用 MDO 技术对 A380 机翼进行优化,使飞机起飞质量减轻了 15 900 kg,见图 1-2。

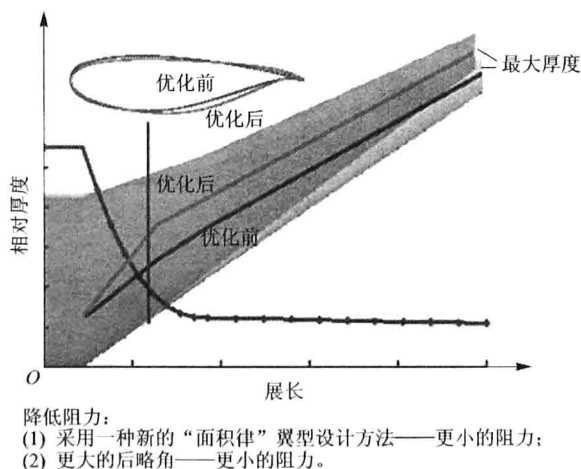


图 1-2 A380 机翼多学科设计优化示意图

② 波音公司在 Boeing777 运输机设计中引入 MDO 技术,使得起飞质量下降 13 382 磅(约 6 070 kg),下降率达 2.57%。

③ 波音公司在 FF/A-18E/F 的改进研制中,通过 MDO 技术对气动、控制、载荷和结构四个方面进行了整体优化处理,并据此做出了设计更改:增大机翼面积 25%;加大边条面积;增加翼型相对厚度;加大进气口,增加第二个武器挂点等。

④ 洛克希德-马丁公司采用 MDO 技术对 F-22“猛禽”开展飞机气动/强度一体化设计。在

满足强度、寿命及颤振裕度要求的情况下减小飞机的总质量,追求各种性能的综合平衡设计。

⑤ 洛克希德-马丁公司利用 MDO 技术对某型战斗机的机身和发动机(见图 1-3)进行匹配设计,最终将推力提高 25%,航程增加 8%。

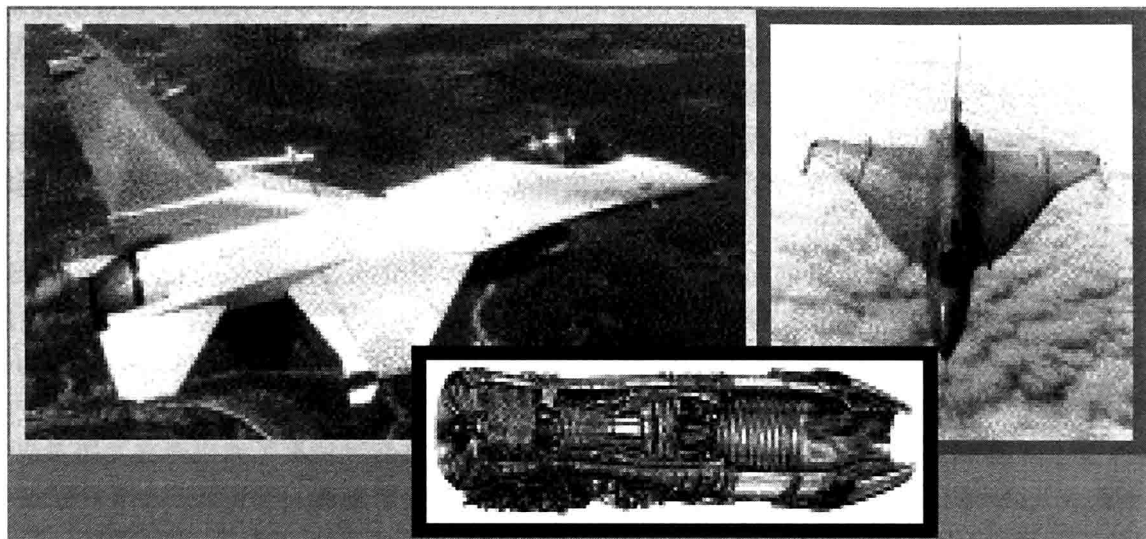


图 1-3 某战斗机/发动机匹配多学科设计优化

⑥ 通用电气公司利用 MDO 技术在两个月内完成 GE90 涡扇发动机(见图 1-4)的改进设计,最终在保证性能的情况下使每台 GE90 发动机质量减少 250 磅(113 kg),成本降低 25 万美元。

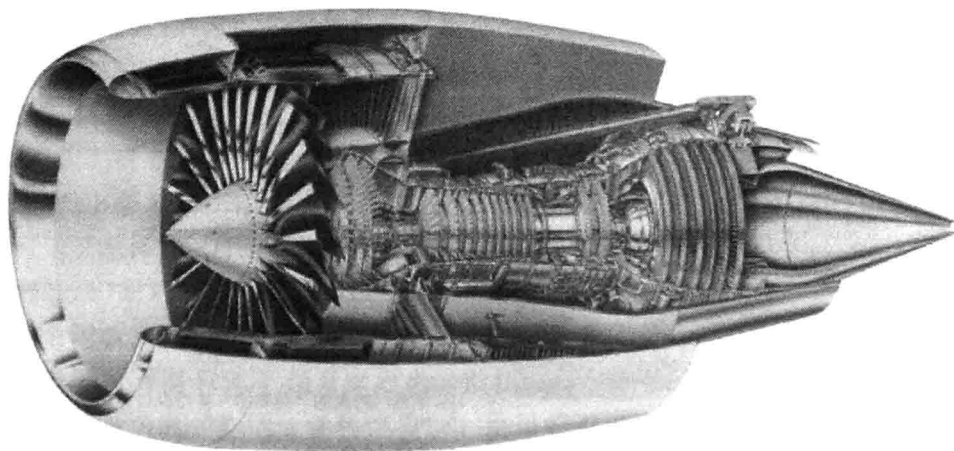


图 1-4 GE90 涡扇发动机

1.2 先进航空发动机设计对 MDO 的需求

航空发动机是飞机的“心脏”,其构形复杂、设计难度高。在一定意义下,它既代表着航空工业的整体水平,又是制约航空工业发展的主要瓶颈之一。因此,如何采用先进设计思想、革新现有设计方法,对于提升航空发动机核心研究能力、提高航空发动机综合技术水平具有极为

重要的战略意义。

航空发动机设计是一个极为复杂的系统工程设计任务(见图1-5),涉及热力、气动、结构、强度、振动、寿命、燃烧、传热、机械传动、控制、润滑、电气、工艺、材料、可靠性、维修性、保障性及计算机(软件工程、数据库技术、网络技术、可视化技术及虚拟现实技术)等众多学科。这些学科之间存在复杂的耦合关系,并且各学科间的性能指标存在严重冲突。如何针对上述特点设计出高综合性能、低成本的先进航空发动机是后工业化时代一个具有战略意义的高难问题,而MDO则是解决这一难题的最佳手段。

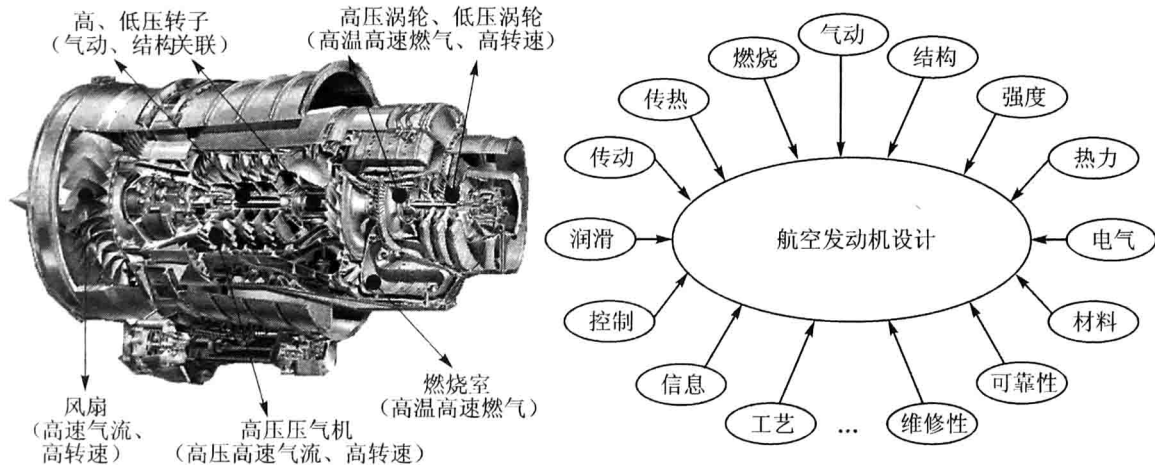


图1-5 典型的航空发动机结构形式及涉及的学科

先进的航空发动机对MDO技术的需求可从如下三个方面来说明:

第一,航空发动机是航空器的“心脏”,研制难度高,其设计方法是竞相重点研究的核心技术。

多次现代局部战争已经证实,现代战争中的战场重心正在由陆地向天空转移,空中打击占主导地位的趋势日益明显,拥有空中威慑和空中优势的一方几乎能够左右战争的进程和最终结局。空中打击正在成为各国的最大军事威慑或威胁。

航空发动机除了为军用航空装备提供动力,决定其速度、机动性、作战半径等性能之外,也为民用航空器的高可靠性、环境友好性及低成本提供最重要的支持。因此,航空发动机技术是推动国民经济发展和军事实力提升的最关键的科学技术。

航空发动机设计技术是知识密集型的尖端技术,难度极大。目前,世界能制造飞机的国家很多,但能独立研制航空发动机的只有美、英、法、俄、中等少数国家。正是基于以上认识,为获得航空优势,目前世界各强国投入了大量人力、物力进行包括MDO等先进设计技术在内的航空发动机技术研究及发展,所投入的经费甚至超过了作为载体的飞行器本身。

第二,高综合性能、低成本是未来先进航空发动机设计的必然方向。

20世纪70年代,美国推重比8一级的F100发动机仅用了4.75亿美元和5年时间研制就投入使用。但由于片面追求高气动性能指标,忽视了强度、寿命及可靠性方面的性能,投产使用后故障不断,5年内先后发生各类故障120多起,严重影响了飞机的战斗力。为此不得不再追加约150%的经费,历时10年进行排故和改进。在汲取教训之后,美国航空工业界的发动机设计思路发生重大转变,提出了气动与可靠性等指标综合平衡发展的准则。

1988年,为了在21世纪取得军事和商业竞争的优势,美国实施了一项由空军、海军、陆军、国家航空航天局、国防部预研局(DARPA)和工业界共同参与的国家级战略性发动机技术预研计划,即综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)计划。总目标是到21世纪初,在满足强度、寿命指标的前提下,使航空涡轮发动机的能力较1988年的提高1倍。具体指标是:使推重比提高100%,耗油率降低30%,成本降低35%。该计划进展顺利,收效明显。

随着航空技术的发展,航空装备越来越先进,成本也越来越高。鉴于此,在IHPTET计划还未完全结束时,美国在21世纪初开始进行IHPTET的后续计划——通用、经济可承受先进涡轮发动机(VAATE)计划。该计划的目的是采用一系列技术手段来降低发动机的成本(含设计、制造及使用成本)。

在这些计划中,已经并正在继续研究和应用航空发动机多学科设计优化技术。

第三,传统的设计方法难以满足未来先进航空发动机设计的需求,基于MDO技术的综合设计方法是解决此难题的最佳途径,因此,开展MDO技术的研究十分必要。

目前,研制高综合性能、低成本的先进航空发动机的困难突出表现在如下3个方面。

1. 各学科间存在复杂的耦合关系

复杂设计系统可划分为3类:层次系统、非层次系统以及涵盖层次系统与非层次系统的混合系统。层次系统是一种“树”状结构;非层次系统是一种“网”状结构;混合系统具有“树”状

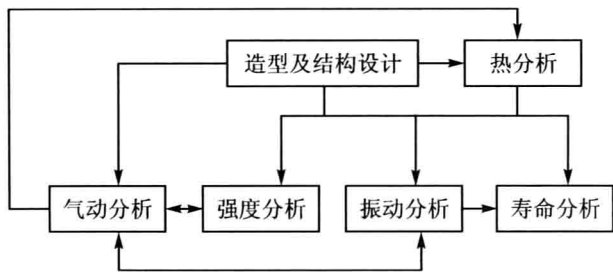


图 1-6 压气机叶片设计系统学科耦合关系示意

和“网”状结构的双重特点。发动机设计属于混合系统,图1-6为压气机叶片设计系统学科耦合关系示意图。混合系统设计的关键(同时又是难点)在于如何处理各学科间的复杂耦合关系,即各学科间的双向数据交换及相互影响机制。以图1-6中气动分析与强度分析为例,这种耦合关系表现在强度分析需要气动分析输出的压力载荷,同时强度分析输出的

叶片变形结果又会对叶片气动分析结果产生影响,从而引起压力载荷的变化。可以说,能否充分考虑各学科间的耦合关系是设计正确与否的基础。

2. 各学科指标要求之间存在严重冲突

航空发动机设计是典型的多目标设计问题,例如,要求有高的推(功)重比,长的服役寿命,等等。然而这些目标又多是相互冲突的,如高的推重比通常意味着发动机转速与燃气温度提高,导致零件应力提高以及材料性能退化,从而降低发动机的寿命。如何合理平衡各学科指标之间的冲突,并在此基础上找出综合性能最优的设计方案,是航空发动机设计无法避开的问题。

3. 设计周期长,经费投入多,研制风险大

航空发动机设计及整个研制工作是一项非常耗时耗力的事,研制周期动辄上十年,经费动辄几十亿。其设计成败对于国家安全乃至国民经济都有重大影响。