

飞行器多学科设计 优化理论与应用研究

Research on the Theory and Application of
Multidisciplinary Design Optimization of Flight Vehicles

王振国 陈小前 罗文彩 张为华 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

飞行器多学科设计 优化理论与应用研究

Research on the Theory and
Application of Multidisciplinary
Design Optimization of Flight Vehicles

王振国 陈小前 罗文彩 张为华 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

飞行器多学科设计优化理论与应用研究/王振国等著.
—北京:国防工业出版社,2006.4

ISBN 7-118-04387-7

I. 飞... II. 王... III. 飞行器—最优设计
IV. V42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 014658 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 345 千字

2006 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 52.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

1903年12月17日,由美国莱特兄弟制造的人类第一架有动力可操纵的飞机进行载人飞行并获得成功,这被公认为现代飞行器的起点。从那时到现在的100多年间,飞行器技术不断进步,飞行器的设计要求也越来越多,越来越高。在飞行器发明的初期,设计要求只是升力等于重力,并且具有一定的操稳性。而当今对于各类飞行器的设计要求往往包括飞行性能、结构强度和刚度、可靠性、可制造性、维修性、成本和进度等多种设计要求。这些不同方面的设计要求通常相互影响、相互耦合,使得飞行器设计涉及的学科越来越多,专业分工越来越细,研制过程日趋复杂,设计周期越来越长,开发成本越来越高。为了提高飞行器设计质量,加快设计进度,降低开发成本,人们开始对飞行器的研制过程,特别是飞行器的设计过程,加以考察和研究。

在1991年美国航空航天学会(AIAA)所出版的白皮书中指出,传统的飞行器设计过程可概括为先进行概念设计,确定飞行器布局,然后进行初步设计,飞行器外形冻结后,开始展开全面的细节设计。在概念设计阶段,主要涉及空气动力学和推进系统设计;在初步设计阶段,主要设计内容是结构布局和分析;在详细设计阶段,主要进行各种系统设计和零件设计。在不同的设计阶段,设计人员应用相关的学科知识和经验进行设计和优化,去寻找最优解,如气动性能设计和优化、结构设计和优化等。这种设计模式实质上具有序列性,并没有充分利用各个学科(子系统)之间的相互影响可产生的协同效应,这种对系统进行人为分割的序列设计方法极有可能失去系统的整体最优解。这种设计模式的另一个缺点是

设计过程按序列展开,即设计模式属于串行设计模式,设计周期必然加长,开发成本相应增加。

此外,该白皮书也指出,随着飞行器各学科(如气动计算、结构分析)的研究内容不断深入,分析模型精度越来越高,与之相关的分析工具(如各类计算机程序)更加复杂,功能更加强大。从理论上说,这些精度高的分析模型和功能强大的软件可为设计过程提供更多更精确的信息,有助于设计人员发现更好的设计方案,从而缩短研究周期和降低研制费用。但在实践中,由于计算和组织的复杂性,这些分析模型和计算机程序往往仅作为一种分析工具,在总体设计过程中很难得到充分利用。因此,现有的工程设计方法与各学科所取得的成就是不相称的。

针对传统总体设计方法的缺点,近年来美国等发达国家提出了一种新的设计方法:多学科设计优化(Multidisciplinary Design Optimization, MDO)。其主要思想是在复杂系统设计的整个过程中集成各个学科的知识,并充分考虑各门学科之间的互相影响和耦合作用,应用有效的设计/优化策略和分布式计算机网络系统,来组织和管理整个系统的设计过程,通过充分利用各个学科之间的相互作用所产生的协同效应,以获得系统的整体最优解。

MDO 的优点在于可以通过实现各学科模块化并行设计来缩短设计周期,通过考虑学科之间的相互耦合来挖掘设计潜力,通过系统的综合分析来进行方案的选择和评估,通过系统的高度集成来实现飞行器的自动化设计,通过各学科的综合考虑来提高可靠性,通过门类齐全的多学科综合设计来降低研制费用。

虽然 MDO 作为一个专门的研究领域确立不过短短十余年的时间,但已经产生了巨大的效益并引起了广泛的重视,单以其在飞行器设计中的应用来看,目前 MDO 的应用对象已经包括高超声速飞行器、可重复使用运载器、翼身融合飞行器(BWB)、支架翼飞机、下一代太空望远镜(NGST)、X-33、X-43A、F/A-18E/F、F-22、GARTEUR 区域运输机、A3xx 客机等各类飞行器。美国的 MDO 研究领导机构——美国航空航天局朗利研究中心多学科

设计优化分部(MDOB)更是宣言将把 MDO 方法应用到未来的所有飞行器总体设计过程中去。

MDO 在航空航天领域内的成功也引起了其它工程设计领域的重视,以 MDO 的发祥地美国为例,目前已成立了 20 多个以 MDO 为主要研究内容的研究中心,“工程系统的多学科设计优化”已被列为美国工科研究生的必修课。MDO 的应用范围已经拓展到了武器、汽车、计算机、通信、机械、医疗以及建筑等各个领域,部分基于 MDO 思想的软件已经实现了商业化,如 iSIGHT、ModelCenter、AML 等。

在我国,就飞行器设计技术而言,多年以来一直得到普遍使用的仍然是在 20 世纪五六十年代就已得到广泛应用的“参数修正法”等较为传统的方法,近年来虽然随着优化设计理论的不断完善和计算机技术的飞速发展,在某些单学科领域内优化设计方法得到了应用,甚至也出现了多学科之间的简单综合研究(如总体/发动机一体化研究、弹道/发动机一体化研究、弹道/气动一体化研究等),但这些还不能称得上是真正的 MDO 研究,因为它们对于各门学科之间的耦合和协同的研究还远远不够深入,而且覆盖的学科门类还太少。因此,我国的飞行器设计技术还亟待提高。

1997 年,作者第一次接触到 MDO 这一概念,并深感其重要性,遂于 1998 年在国防科技大学航天与材料工程学院成立了一个主要由多个学科的博士生、硕士生参加的“飞行器多学科设计优化研究”课题组,在国内较早开始了对于 MDO 理论的研究。2003 年,在该课题组的基础上,进一步与国内部分航空航天设计部门及软件公司联合成立了“飞行器多学科设计优化研究中心”。近几年来,课题组已先后完成了 8 篇博士论文,11 篇硕士论文,所形成的方法与成果在多种航空器、运载器、航天器、导弹武器的总体设计中得到了成功应用,在国内航空航天领域产生了一定影响。目前,课题组已经受到多项国家 863 高技术研究计划、国家自然科学基金、国防预研和外协课题的资助,有十余名博士与硕士在从事该理论的研究。

在研究工作中,本课题组与国外的多个 MDO 研究中心建立了良好的联系,并通过他们搜集了大量有价值的资料。在阅读资料的过程中我们发现,虽然目前国内外 MDO 的研究已经成为热潮,但 MDO 的出版物主要限于各类会议论文集,至今尚未出现系统介绍 MDO 理论的专著,这使我们萌生了编写一本这类专著的想法,并受到了国内航空航天界诸多同仁的鼓励与支持。特别是美国宾夕法尼亚大学的 Vigor Young 博士和佛罗里达州立大学的 Satchi 博士,为我们提供了美国 20 余所院校开设的研究生 MDO 课程教学大纲及相关文献,正是在对这些教学大纲的整理与综合的基础上,形成了本书最初的写作提纲,并经过多次讨论形成了本书的最终写作提纲。

本书是对课题组近年来研究工作的总结,并试图反映国内外当今研究发展的状况。本书的书名基本上反映了全书的内容,即飞行器 MDO 的理论研究和 MDO 的应用研究。前一部分侧重介绍将 MDO 应用于飞行器设计中时需要解决的几项关键技术;后一部分结合我们所完成的几个飞行器设计的实例来说明 MDO 理论的具体应用。

全书共分为 13 章:第 1 章介绍 MDO 产生的背景和发展状况;第 2 章~第 9 章为 MDO 的理论研究,包括 MDO 的基本概念和主要研究内容、基础理论、建模方法、近似方法、系统灵敏度分析方法、设计空间的搜索策略、优化过程、计算环境;第 10 章~第 13 章为 MDO 的应用研究,包括 MDO 方法在导弹集成设计、高超声速飞行器总体设计、飞机概念设计、卫星系统设计中的应用。本书第 1 章由陈小前、吴先宇编写,第 2 章由陈小前、许林编写,第 3 章由陈小前、赵勇编写,第 4 章由吴先宇、罗文彩编写,第 5 章由李晓斌、张为华编写,第 6 章由颜力编写,第 7 章由李晓斌、罗文彩编写,第 8 章由许林、赵勇编写,第 9 章由许林、张为华编写,第 10 章由吴先宇、张为华编写,第 11 章由吴先宇、许林编写,第 12 章由罗文彩、杨维维编写,第 13 章由赵勇、陈小前编写。全书由王振国统稿和审校。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金(资助号:10302031)和国家 863 计划(资助号:2004AA721051)的资助,并感谢中国运载火箭研究院的陈海东、沈重,中国空间技术研究院的刘霞、胡凌云,航空发展研究中心的龚旭东、段勇等的指导帮助,还要感谢赛特达公司的戎雷,ATE 公司的张苏、李义章,MSC 公司的隋俊友,古天联成公司的赵秋光等的一贯支持。最后,特别感谢国防科技出版基金的资助。

本书可供从事飞行器或其它工业设计的研究人员和工程设计人员参考,也可作为高等院校飞行器设计及相关专业研究生和本科高年级学生的教材。希望本书的出版对推动 MDO 理论在我国飞行器及其它工程设计领域的研究与应用能起到良好的作用。

由于 MDO 是一个很新的研究领域,并仍处于在不断的发展变化当中,本书必然还存在许多疏漏之处,恳请读者批评指正。

编著者
2006 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 飞行器设计简史	1
1.2 MDO 方法的提出	2
1.3 国内外 MDO 研究进展	6
1.3.1 美国的 MDO 研究现状	10
1.3.2 俄罗斯的 MDO 研究现状	16
1.3.3 欧洲和其它国家的 MDO 研究进展	17
1.3.4 国内 MDO 研究进展	22
1.4 MDO 的发展展望	23
参考文献	25
第 2 章 MDO 的基本概念	27
2.1 MDO 的定义与特点	27
2.1.1 MDO 的定义	27
2.1.2 MDO 的系统学描述	28
2.1.3 MDO 的内涵	31
2.1.4 MDO 的特点	32
2.2 MDO 的主要研究内容和研究模式	34
2.2.1 MDO 的主要研究内容	34
2.2.2 MDO 的研究模式	42
2.3 飞行器 MDO 的重要意义与关键技术	43
2.3.1 MDO 对飞行器设计的重要意义	43
2.3.2 飞行器 MDO 研究中的关键技术	44
参考文献	45
第 3 章 MDO 的基础理论	46

3.1	复杂系统的分类	46
3.1.1	系统的一般概念	46
3.1.2	系统的分类方法	49
3.2	系统优化与子系统优化的关系	50
3.2.1	局部最优与子规划问题	50
3.2.2	全局最优与总规划问题	51
3.2.3	局部最优组合为全局最优的条件	52
3.2.4	一般系统中局部最优组合非全局最优的 原因	54
3.3	复杂系统的分解—协调法	56
3.3.1	分解—协调法的一般描述	56
3.3.2	基于分解—协调法的系统优化求解方法	59
3.4	一类特殊系统的分解—协调法	60
3.4.1	系统数学模型	60
3.4.2	系统的分解—协调算法	63
	参考文献	70
第4章	面向MDO的建模	71
4.1	概述	71
4.1.1	MDO问题建模的特点	72
4.1.2	MDO问题建模的一般原则与步骤	74
4.1.3	MDO问题建模的常用方法	75
4.2	过程建模	76
4.2.1	过程建模方法	76
4.2.2	MDO问题中的过程建模	77
4.3	可变复杂度建模	86
4.4	不确定性建模	90
4.4.1	不确定性设计理论概述	90
4.4.2	MDO问题中的不确定性建模与分析方法	93
4.5	参数化建模	103
4.5.1	参数化建模方法	103

4.5.2 MDO 问题中的参数化建模	106
参考文献	108
第5章 近似方法	110
5.1 近似方法的分类	111
5.1.1 模型近似	112
5.1.2 函数近似	112
5.1.3 二级近似	114
5.1.4 组合近似	114
5.2 模型近似方法	114
5.2.1 约束函数缩并法	115
5.2.2 包络函数	116
5.2.3 基于约束缩并的组合近似法	118
5.3 函数局部近似方法	119
5.3.1 基于泰勒级数展开的近似	120
5.3.2 基于正项式级数展开的近似	125
5.3.3 基于微分方程的近似	126
5.3.4 近似方法的改进	127
5.4 函数全局近似方法	129
5.4.1 响应面构造过程	130
5.4.2 响应面建模及方差、回归分析	133
5.4.3 响应面法的实际应用	140
5.4.4 基于神经网络的响应面	143
5.4.5 基于计算机试验分析与设计理论的插值 模型响应面	144
5.5 中范围近似方法	145
5.5.1 概述	145
5.5.2 近似函数模型	147
5.5.3 移动限制策略	154
5.5.4 设计点的选择	156
参考文献	157

第 6 章 系统灵敏度分析方法	159
6.1 单学科灵敏度分析方法	161
6.1.1 手工求导方法	162
6.1.2 符号微分方法	163
6.1.3 有限差分方法	163
6.1.4 复变量方法	165
6.1.5 自动微分方法	166
6.1.6 解析方法	173
6.1.7 半解析方法	178
6.2 多学科灵敏度分析方法	179
6.2.1 最优灵敏度分析	180
6.2.2 全局灵敏度方程	184
6.2.3 滞后耦合伴随方法	189
参考文献	193
第 7 章 设计空间的搜索策略	195
7.1 经典优化方法	195
7.1.1 间接最优化方法	196
7.1.2 直接最优化方法	197
7.2 全局最优化方法	198
7.3 现代优化算法	199
7.3.1 模拟退火算法	201
7.3.2 进化算法	203
7.3.3 禁忌搜索算法	208
7.4 混合优化策略	210
7.5 多方法协作优化方法	211
7.5.1 多方法协作优化基本概念	212
7.5.2 若干性质	221
7.5.3 实例	224
7.5.4 多方法协作优化方法与混合优化策略	226
参考文献	227

第 8 章 优化过程	229
8.1 递阶优化过程	231
8.1.1 各级系统优化模型的建立	232
8.1.2 递阶系统的优化迭代过程	236
8.2 并行子空间优化过程	236
8.2.1 基于灵敏度分析的 CSSO 过程(CSSO - GSE)	238
8.2.2 改进的基于灵敏度分析的 CSSO 过程 (CSSO - GSE)	249
8.2.3 基于响应面的 CSSO 过程(CSSO - RS)	257
8.2.4 改进的基于响应面的 CSSO 过程(CSSO - RS)	260
8.2.5 并行子空间设计方法(CSD)	264
8.3 协同优化过程	267
8.3.1 相容性约束	269
8.3.2 标准的协同优化过程	270
8.3.3 基于响应面近似的协同优化过程	271
8.4 二级系统一体化合成优化过程	273
8.4.1 标准的 BLISS 优化过程	274
8.4.2 基于响应面的 BLISS 优化过程	280
参考文献	283
第 9 章 MDO 计算环境	286
9.1 MDO 计算环境体系结构	286
9.1.1 MDO 计算环境的性能要求	286
9.1.2 MDO 计算环境的体系结构分析	288
9.2 软件工程方法	290
9.2.1 复杂系统的分析与设计方法	290
9.2.2 快速原型技术	291
9.2.3 构件	292
9.3 分布式应用支持	293

9.3.1	.NET 平台	293
9.3.2	J2EE 平台	294
9.3.3	通用对象请求代理结构	295
9.4	并行计算支持	296
9.5	数据库支持	298
9.5.1	文档管理	298
9.5.2	元数据管理	299
9.5.3	模型管理	300
9.6	MDO 框架	301
9.6.1	iSIGHT	301
9.6.2	AML	303
9.6.3	ModelCenter	304
9.7	设计分析工具集成	305
9.7.1	自编程集成	306
9.7.2	商业软件集成	306
9.8	科学计算可视化	308
9.8.1	数据可视化	308
9.8.2	多学科设计优化对可视化的要求	310
9.9	MDO 计算环境实例分析	311
9.9.1	AS 环境	311
9.9.2	AEE 环境	313
	参考文献	317
第 10 章	导弹多学科集成设计优化	318
10.1	设计优化模型	319
10.1.1	学科模型	319
10.1.2	总体优化模型	321
10.2	导弹一体化在 MDO 框架中的表述	322
10.3	导弹一体化设计优化	326
10.3.1	优化方法选择及优化结果	326
10.3.2	综合探索策略	331

参考文献	337
第 11 章 高超声速飞行器的多学科设计优化	338
11.1 高超声速飞行器变复杂度建模	338
11.1.1 结构分析变复杂度建模	339
11.1.2 推进分析变复杂度模型	340
11.1.3 气动分析变复杂度模型	341
11.2 高超声速飞行器多学科设计集成	343
11.2.1 自编代码集成	343
11.2.2 商业软件集成	344
11.3 高超声速飞行器多学科设计优化	347
11.3.1 系统优化模型	347
11.3.2 优化过程	349
11.3.3 优化问题在 MDO 框架中的集成	352
11.3.4 优化结果	353
参考文献	357
第 12 章 飞机总体设计多学科设计优化	358
12.1 飞机总体设计模型	360
12.1.1 推进学科模型	362
12.1.2 气动学科模型	364
12.1.3 重量学科模型	367
12.1.4 飞行性能	371
12.2 飞机总体多学科设计优化	377
12.2.1 集成	378
12.2.2 系统优化模型	378
12.2.3 优化过程	379
12.2.4 优化结果	379
参考文献	381
第 13 章 卫星系统多学科设计优化	382
13.1 卫星系统组成	383
13.1.1 有效载荷	384

13.1.2	卫星平台	384
13.2	MDO 在卫星总体设计中的应用	386
13.2.1	卫星总体 MDO 的主要特点	386
13.2.2	卫星总体 MDO 问题分析	388
13.3	卫星总体设计问题分解	388
13.3.1	学科关系	390
13.3.2	设计模型	394
13.4	卫星总体优化问题分解	395
13.4.1	学科关系	395
13.4.2	优化模型	397
13.5	卫星总体方案多学科综合设计与优化软件	400
13.5.1	总体流程	401
13.5.2	软件设计	403
13.5.3	软件实现	407
	参考文献	409

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 History of Flight Vehicle Design	1
1.2 Formation of MDO Methodology	2
1.3 MDO Research; State of the Art	6
1.3.1 Current Status of MDO Research in America	10
1.3.2 Current Status of MDO Research in Russia	16
1.3.3 Current Status of MDO Research in Europe and Other Countries	17
1.3.4 Current Status of Domestic MDO Research	22
1.4 Prospect of MDO	23
References	25
Chapter 2 Basic Concepts of MDO	27
2.1 Definitions and Characteristics of MDO	27
2.1.1 Definition of MDO	27
2.1.2 Systematic description of MDO	28
2.1.3 Connotation of MDO	31
2.1.4 Characteristics of MDO	32
2.2 Contents and Research Modes of MDO	34
2.2.1 Main Contents of MDO	34
2.2.2 Research Modes of MDO	42
2.3 Importance and Key Technologies of MDO of Flight Vehicle	43
2.3.1 Importance of MDO of Flight Vehicle Design	43
2.3.2 Key Technologies of MDO of Flight Vehicle	44
References	45