

多学科设计优化技术发展及在航空航天领域的应用

龙腾^{1,2}, 刘建², 孟令涛³, 史人赫², 刘莉^{1,2}

(1. 北京理工大学飞行器动力学与控制教育部重点实验室, 北京 100081;

2. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081;

3. 中国运载火箭研究院战术武器事业部, 北京 100076)

[摘要] 首先指出了多学科设计优化(MDO)对于现代飞行器设计的意义和多学科设计优化的主要研究内容。在调研国内外参考文献的基础上,分别对面向MDO的飞行器建模技术、灵敏度分析技术、优化算法、代理模型技术、MDO策略以及MDO框架6项关键技术发展状况以及MDO在航空航天领域的应用状态进行了总结和概述,最后指出了技术的未来研究方向以及MDO在航空航天领域进一步推广所需要解决的问题。

关键词: 多学科设计优化; 飞行器设计; 航空航天

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.03.024



龙腾
博士,副教授,主要研究方向为飞行器总体设计、多学科设计优化理论与应用、飞行器协同控制与决策。

飞行器是一个复杂的系统,由气动、结构、动力、控制、隐身等多个学科(子系统)组成,各学科相互影响,相互制约。飞行器的综合性能是各

学科耦合协调的综合体现。传统的串行设计模式在各个阶段未能充分考虑各学科之间的耦合关系,并且时间分配不均衡,概念设计阶段所占比例过小。这样的设计模式难以有效利用概念设计阶段较大的设计自由度来获取尽可能多的飞行器已知信息以提高设计质量,由于没有充分考虑各学科的协调效应,设计结果难以达到系统最优,从而降低了飞行器的综合性能^[1]。串行化模式还导致设计周期拉长,设计成本增加。显然,传统的串行设计模式已经不能满足现代飞行器设计的要求。

为了克服上述弊端,适应现代先进飞行器设计的要求,20世纪80年代起,以美国NASA Langley研究中心的Sobieszczanski-Sobieski等为代表的一批航空领域的科学家和工程技术人员提出并逐步完善了一种新的飞行器设计方法:多学科

设计优化(Multidisciplinary Design Optimization, MDO)^[1]。美国航空航天学会MDO技术委员会(AIAA MDO-TC)对MDO的定义可描述为:“MDO是一种通过充分探索和利用系统中相互作用的协同机制来设计复杂系统和子系统的方法论”。

MDO对飞行器设计有着积极意义^[2-3]:(1)MDO符合系统工程的思想,能有效提高飞行器设计质量;(2)MDO为飞行器设计提供了一种并行设计模式;(3)MDO的设计模式与飞行器设计组织体系一致;(4)MDO的模块化结构使飞行器设计过程具有很强的灵活性。

多学科设计优化的提出引起了各国研究机构、高校和工业界的广泛重视(如NASA、斯坦福大学、麻省理工学院、Boeing、Airbus等),掀起了一股研究热潮。经过20多年的发展,多学科设计优化在理论研究和工程

应用方面都取得了一定的成果^[4-7]。

多学科设计优化主要研究内容

多学科设计优化涉及的研究内容非常丰富, Sobieszczanski-Sobieski 最早将 MDO 的研究内容分为信息科学技术、面向设计的多学科分析和多学科设计优化过程 3 大类^[2,8]。1998 年, MDO 技术委员会根据工业界的需求对其进行了修正, 将 MDO 研究内容扩展为 4 大类共 16 个方面^[6]。综合而言, 为解决 4 个复杂性问题^[2,6], MDO 的主要研究内容包括面向 MDO 的复杂系统建模与分解、灵敏度分析方法、优化算法、代理模型技术、多学科设计优化策略、多学科设计优化框架以及多学科设计优化的工程应用 7 个方面。其中, 灵敏度分析方法、优化算法、代理模型技术、多学科设计优化策略、多学科设计优化框架即为 MDO 研究的关键技术。

1 面向 MDO 的复杂系统建模与分解

数学模型的建立是多学科设计优化的基础, 复杂系统建模需要在系统和全局的高度, 充分综合考虑各学科间的耦合关系和协作机理, 理清学科间的数据流程, 权衡模型精度与计算成本, 并兼顾设计问题的鲁棒性, 同时应考虑优化设计过程中的自动化实现问题。复杂系统建模包括系统级建模和学科级建模。

虽然多学科设计优化强调均衡考虑各学科, 通过探究学科间的耦合关系来提高系统综合性能, 但是受现有计算条件所限, 盲目求全只会使优化问题极度复杂, 导致设计周期拉长, 甚至设计失败。文献 [4] 和 [6] 都指出多学科设计优化的深度和广度存在矛盾。因此, 复杂系统建模应该“有的放矢”, 根据设计需求合理配置学科, 定义优化问题。为了避免“维数灾难”, 可通过方差分析等手段对设计变量进行筛选 (Screen)。此外, 参数化建模有助于实现复杂系统优

化设计自动化。

学科级建模方法与传统的单学科优化相似, 相关技术也相对成熟。根据任务需求, 各学科可建立多种不同精度的分析模型。以飞行器为例, 气动学科在方案论证初期多采用工程估算和半经验公式的方法, 随着设计的进展, 逐步采用涡格法、Euler 方程 CFD 模型、N-S 方程 CFD 模型等高精度的分析模型。在 MDO 研究中, 可根据具体计算条件, 尽可能多地采用高精度分析模型以提高设计的可信度。

由于学科级建模的方法各不相同 (自编代码、商业软件等), 如何实现学科级分析模型的数据交互也应该是复杂系统建模需要考虑的问题。

为了求解方便, 人们通常将复杂系统分解成一系列相对简单的子系统进行求解, 各子系统可根据自身特点选用合适的优化求解方法。基于结构设计矩阵^[9]的分解是最常用的分解方法之一。为了在各子系统优化的基础上得到原系统的最优解, 通常需要对子系统进行协调, 一致性约束是最常用的协调方法之一。由于复杂系统建模与分解的部分内容与代理模型技术、多学科设计优化策略等交叉, 在此不再展开叙述。

2 灵敏度分析方法

灵敏度分析方法与分解技术、代理模型技术相结合, 是降低 MDO 问题复杂性的重要手段。MDO 研究中, 灵敏度分析可用于确定系统设计变量或参数对目标函数或约束函数的影响, 确定学科之间的耦合强度, 并可用于确定搜索方向、辅助决策等。此外, 灵敏度分析还被广泛用于系统解耦和局部近似。

根据处理对象的不同, 灵敏度分析可分为单学科灵敏度分析和多学科灵敏度分析, 两种灵敏度分析方法可以混合使用。

3 优化算法

MDO 归根结底仍是一个优化

问题, 因此优化算法是多学科设计优化研究中的一项重要内容。MDO 研究中常见的优化算法有: 梯度优化算法、现代优化算法和组合优化算法^[2]。

然而, 多学科设计优化中的优化算法研究又不同于优化理论研究领域, 后者更注重研究优化算法自身的数学特性 (如收敛速度等)。MDO 中的优化算法研究一方面侧重于根据不同优化问题类型选择合适的优化算法, 例如连续、单峰值优化问题选用基于梯度的优化算法效率更高, 而遗传算法等现代优化算法适用于非连续/离散问题以及全局寻优。此外, 对于特定的问题, 组合优化算法可以在优化效率和优化结果之间达成良好的折衷; 另一方面在于研究不同优化算法与多学科分解方式和计算结构之间的关系 (例如协同优化中系统级优化采用序列二次规划法收敛困难等)。

4 代理模型技术

复杂系统多学科设计优化存在计算量大、学科分析模型之间数据交互复杂和系统集成困难等问题。以飞行器为例, 调用高精度 CFD 模型进行一次学科分析耗时就高达数小时 (甚至数天), 一次完整系统分析所需计算量则更加惊人; 气动、结构、隐身等学科通常采用不同商业软件, 各学科之间数据交互接口的定义是一个复杂的过程; 分析模型与优化器的集成也存在困难。为此, 代理模型技术 (也称近似技术) 成为 MDO 研究的一个重要组成部分, 其本质是通过数学手段构造的一个计算量小, 但计算结果与数值分析或物理试验结果相近的近似数学模型, 以替代原分析模型或物理试验用于优化设计。代理模型技术对 MDO 的意义可概括为^[10-11]: (1) 在满足精度要求的前提下, 降低计算成本, 提高优化效率; (2) 构造代理模型所需样本点信息可以使用多台计算机离线同时分析获取, 从而进一步缩短计算时间; (3)

由于代理模型通常为显式或隐式的数学表达式,与复杂的商业软件相比,更易于系统集成;(4)可使用物理试验结果构造代理模型,从而实现物理试验在多学科设计优化中的集成;(5)通过代理模型可视化设计空间,有助于进行合理的优化定义(优化算法选择、初值选定等),控制优化进程;(6)适合的代理模型方法还能起到平滑数值噪声的作用。

5 多学科设计优化策略

多学科设计优化策略也称为MDO过程或MDO方法,主要研究MDO问题的分解、协调与组织形式,以降低问题复杂度,是MDO研究的核心部分^[1-2,7]。MDO研究中,多学科设计优化策略应该在充分考虑学科间的耦合和协调机制的基础上,尽可能地减小计算成本和计算时间,同时使设计人员能够充分发挥创造性。MDO策略分为单级优化策略和多级优化策略。

6 多学科设计优化框架

多学科设计优化框架就是能够支持和实现多学科设计优化的软硬件计算环境,该环境可集成学科分析模型和MDO方法,自动实现各学科之间的通讯^[12]。MDO框架可以集成和充分利用现有的MDO方法和学科分析模型进行复杂系统多学科设计优化,有助于增强MDO适用性以及拓宽MDO应用范围,因此,广大的MDO研究工作者和工业界也对MDO框架表现出强烈的需求意愿^[1,6,13]。MDO框架应该具有的基本功能和特征^[1,6,12-14]:(1)具有分布式计算环境的特征,支持并行计算(尤指各子学科同时分析);(2)能集成各学科已有的分析计算程序和常用商用软件;(3)提供优化算法库;(4)具有构造代理模型的功能;(5)优化设计过程和结果可视化;(6)统一的数据格式和流程管理;(7)支持基于不确定性的建模与优化设计;(8)友好的图形用户界面(Graphic User Interface,

GUI)。

7 多学科设计优化的工程应用

工程应用是多学科设计优化研究的最终目的,也是推动多学科设计优化发展的源动力。MDO诞生以来一直备受工业界的关注,随着MDO理论研究的深入和相关技术的成熟,多学科设计优化的工业应用日益广泛,应用范围涉及航空、航天、汽车、电子等诸多领域^[1,2,4-6,10]。

MDO 关键技术的发展概况

多学科设计优化源于飞行器结构优化设计,飞行器多学科设计优化研究是开展最早、最活跃也是研究成果最多的领域,同时MDO技术和方法的发展对飞行器设计也产生了积极而深远的影响。下面就国内外飞行器多学科设计优化的发展历史进行回顾。

美国是开展飞行器多学科设计优化研究最早的国家。Sobieszczanski-Sobieski提出MDO的概念之后,航空航天界最先意识到开发MDO研究的必要性和迫切性。1989年,AIAA成立了MDO技术委员会(Multidisciplinary Design Optimization Technical Committee, MDO-TC),为MDO的研究、发展和教学提供了开放的论坛。1991年,AIAA MDO-TC在MDO研究现状白皮书中阐述了MDO发展的必要性,给出了MDO的定义、研究内容和发展方向,该文发表标志着MDO作为一个新兴研究领域的正式诞生^[1]。欧美各国的MDO研究和发展采取了政府(组织)、院校和工业界共同推动的策略^[1,15]。

在近20年里,飞行器多学科设计优化的飞速发展很大程度上得益于“政府(组织)、院校和工业界共同推动”的发展模式。下面将重点介绍国内外各项飞行器MDO关键技术研究的发展概况。

1 多学科灵敏度分析方法

为了提高复杂耦合系统灵敏度分析的效率和精度,Sobieszczanski-Sobieski于1988年根据函数链式求导法则提出了全局灵敏度方程(Global Sensitivity Equation, GSE)^[16]。该方法对MDO发展作出了重大的贡献,在GSE的基础上发展了一大批MDO策略,诸如CSSO和BLISS等^[17-19]。

为了降低求解最优灵敏度的计算量,Sobieszczanski-Sobieski等^[20]从局部最优必要条件即Kuhn-Tucker条件出发,提出了最优灵敏度分析(Optimal Sensitivity Analysis, OSA)方法。该方法不需重新进行优化,计算量小,因而得以广泛应用于飞行器MDO研究中。

耦合伴随灵敏度分析方法是Martins^[21]提出的又一种多学科灵敏度分析方法,该方法的特点为计算量与设计变量数目无关。

2 优化方法

经过多年的发展,经典的梯度优化算法(如罚函数法、可行方向法、序列二次规划法等)的理论基础已经相当成熟,并且诞生一批优化器。例如,Vanderplaats开发的DOT优化工具包,Matlab的优化工具箱等。梯度优化算法仅具有局部寻优能力,且只能处理连续、凸问题。然而,复杂的飞行器MDO问题可能存在多个局部最优点/非连续/离散/非凸等情况,对于上述问题,梯度优化算法难以获得满意的结果。为此,现代优化算法(如遗传算法、模拟退火算法等)越来越多地应用于飞行器MDO研究^[22]。计算量大是现代优化算法的主要问题。面对优化算法的多样性, Frank等^[22]对MDO中常用优化算法进行了对比研究。为了使各种算法能够优势互补,还诞生了混合优化算法的概念。此外,在飞行器MDO研究中,优化算法还可以与近似方法结合,以降低问题求解的复杂度。目前,全局优化算法、多目标优化算法、进化算法、混合优化算法以及针对大型问题

的优化算法成为当前的研究热点。

3 代理模型技术

代理模型(近似技术)按照在设计空间内的近似范围可分为局部、中范围和全局代理模型^[2];按照构造和使用方式又可分为静态代理模型、动态(Sequential/Adaptive)代理模型^[10]及混和(Multiple)代理模型^[11]。

全局代理模型技术的研究更热门,使用更广泛^[10-11,23]。全局代理模型技术包括试验设计方法和全局代理模型构造方法(本文简称代理模型方法)两方面。通过试验设计获取样本点是构造全局代理模型的基础。常用的试验设计方法包括正交设计、均匀设计、中心复合设计和拉丁超方等。对于缺乏先验知识的飞行器多学科设计优化问题而言,具有良好空间均匀性与投影均匀性的样本点能够更有效地获取响应值在设计空间内的数值特性,从而降低构造代理模型所需的样本点规模。因此,最优拉丁超方设计(Optimal Latin Hypercube Design, OLHD)方法被广泛用于生成代理模型的构造样本点。根据采样机理,OLHD方法可分为4类:(1)随机生成若干组LHD样本点,然后从中选择空间均匀性最好的结果,MATLAB的lhsdesign函数即采用该方法;(2)随机生成一组LHD样本点,然后逐次对样本矩阵进行行列互换,直至迭代收敛,OSLHD^[24]属于此类方法;(3)采用数值优化算法对空间均匀性准则进行优化,此类方法最普遍,包括SA-OLHD^[25]、ESEA-OLHD^[26]与SLE-OLHD^[27]等;(4)定义具有良好空间均匀性的基本种子,通过几何变换进行扩展,直接生成OLHD样本点,如TP-OLHD^[28]。

近年来,多项式响应面、Kriging、径向基函数、神经网络、移动最小二乘法等多种全局代理模型方法被广泛应用于飞行器MDO研究。各种代理模型方法的优劣成为研究人员关心的问题^[29]。为此,文献[30]和[31]

对响应面和Kriging的近似精度进行比较;Jin等^[29]通过一系列数值测试函数对响应面、Kriging、多变量自适应回归样条(Multivariate Adaptive Regression Splines)、径向基函数等方法进行了较全面的对比研究。

虽然全局代理模型的近似精度和适用范围较局部代理模型有大幅度的提高,但是对于大量采用高精度分析模型的MDO问题,构造精度满足要求的全局代理模型需要大规模的样本点,导致计算成本巨大。为此,又出现了动态代理模型技术,也称为序列/自适应代理模型(Sequential/Adaptive Surrogate Model)。动态代理模型技术通常与置信域(Trust Region)等方法相结合,在优化过程中通过自适应采样重点提高关注点(如当前设计点)附近的近似精度,随着优化的进行逐步找到原问题的最优解。常见的动态代理模型优化方法包括ARSM^[32]、EGO^[33]、MPS^[33]、SRBF^[34]以及ISES^[35]等。

代理模型技术是飞行器MDO研究中最具有特色和应用前景的关键技术之一。2004年,Simpson等^[10]以座谈会的形式对代理模型技术的现状和发展方向进行了总结,并指出“MDO工程研究和应用人员在使用现有代理模型工具之前,应该适当掌握其数学基础”。在2008年的第12届多学科设计分析与优化会议上,

Simpson^[10]再次对代理模型技术的历史、现状以及发展方向进行了详细的阐述。

随着代理模型技术的发展和所关注度的提高,许多商业软件提供了现有的代理模型工具包,如表1^[11]所示。

4 多学科优化策略发展概况

多学科优化策略分为单级优化策略和多级优化策略两类。单级优化策略主要包括多学科可行法(Multidisciplinary Design Feasible, MDF或All-in-One, AIO)、单学科可行法(Individual Discipline Feasible, IDF)等^[36]。单级MDO策略中学科内部只进行分析,优化任务仅由系统级优化器完成。单级MDO策略的优点是实现简单,且能够保证系统优化的收敛性,其缺点是优化效率随MDO问题规模的增加而降低。

多级MDO策略将复杂的MDO问题按学科分解成若干相对简单的子优化问题,各学科分别进行优化,最终通过系统级优化进行协调。常见的多级MDO策略包括并行子空间(Concurrent Subspace Optimization, CSSO)、协同优化(Collaborative Optimization, CO)、二级集成系统综合(Bi-Level Integrated System Synthesis, BLISS)、解析目标层解(Analytic Target Cascading, ATC)等。

1989年 Sobieszczanski-

表1 商业软件对代理模型的支持列表

商业软件	支持的代理模型方法
DAKOTA	Taylor级数近似、多项式响应面、移动最小二乘法、神经网络、Kriging模型、径向基函数、多点近似、多精度代理模型、多变量自适应回归样条
iSight	多项式响应面、Taylor级数近似、径向基函数、Kriging模型、神经网络、变复杂度模型
ModelCenter	多项式响应面、Kriging模型、径向基函数
OPTIMUS	多项式响应面、径向基函数、Kriging模型、用户自定义模型
VisualDOC	多项式响应面
modeFRONTIER	多项式响应面、K-Nearest插值、Kriging模型、贝叶斯回归、神经网络
HyperStudy	多项式响应面、移动最小二乘法、Kriging模型

Sobieski^[19]在GSE的基础上首次提出了并行子空间(CSSO)的概念,优化过程中,每个子空间(学科)独立优化一组彼此独立的设计变量。在各子空间优化过程中,本子空间的状态变量由学科分析获得,而其他状态变量和约束则通过近似策略确定。Renaud等^[37]使用Rasmussen累计近似函数对基于GSE的CSSO进行改进,从而避免使用责任系数和平衡系数;Sellar等^[38]提出了基于响应面和神经网络的CSSO;Stelmack和Batill发展了并行子空间设计(Concurrent Subspace Design, CSD)^[39];Chi等^[40]提出了能够处理连续/离散变量的CSSO;Huang等^[41]实现了多目标CSSO优化策略。

1994年斯坦福大学的Kroo和Braun等^[42]提出了协同优化,并通过最优灵敏度近似学科级优化。协同优化方法将MDO问题分为一个系统级优化和多个并行的学科级优化,系统级向各学科级分配设计变量的期望值,各学科在满足本学科约束条件的前提下使本学科设计变量与系统级所分配的期望值差距最小,系统级优化采用一致性约束进行协调。基于平滑系统级优化问题和降低计算量的目的,Sobieski等^[43]提出了基于响应面的协同优化,并给出两种响应面构造方式;Alexandrov等^[44]对CO的数值特性进行了系统的分析,发现了CO存在的数值困难(如系统级优化KT条件不满足等)并指出引入松弛系数可提高CO的稳定性;Lin^[45]研究了系统级采用不同优化算法及学科一致性约束采用不同形式对CO收敛性的影响,指出利用最优灵敏度近似学科级优化存在理论缺陷;Zadeh等^[46]研究了基于全局代理模型和多精度代理模型的CO。

1998年Sobieszczanski-Sobieski^[47]提出了BLISS方法。BLISS方法将MDO分为系统级和学科级两个层次。学科级优化时,系

统设计变量保持常值,在满足本学科约束的前提下,优化数量相对较多的学科设计变量;系统级优化时,学科设计变量保持不变,在满足系统级约束的前提下,优化数量相对较少的系统设计变量,如此反复,直至收敛。标准BLISS通过GSE获取系统灵敏度,并构造学科级优化的目标函数,根据导数求解方式的不同又可分为BLISS/A和BLISS/B^[47]。1999年,Sobieszczanski-Sobieski^[48]针对结构多级优化提出了BLISS/S;Kodiyalam等^[49]提出了基于响应面的BLISS方法(BLISS/RS),该方法无需计算最优灵敏度,也消除了对Lagrange乘子的依赖,从而有效降低了计算量,响应面的数值平滑能力还有助于提高系统级优化的收敛性。2002年,Sobieszczanski-Sobieski等^[50]提出了BLISS2000,该方法中系统级目标函数由学科级输出的加权表示,权重系数由系统级优化确定,并且通过响应面近似学科级输出,消除了对系统灵敏度和最优灵敏度的依赖。BLISS2000实现更简单,且适合于分布式并行计算。然而,BLISS2000的优化结果和求解效率受响应面近似精度的影响较大。通过对多种MDO策略的比较研究,Brown等^[51]指出BLISS2000对大规模实际工程问题具有较好的应用前景。Phoenix Integration公司还给出了ModelCenter/Centerlink框架下BLISS2000的实现方案^[52]。2006年,Sobieszczanski-Sobieski^[53]又在BLISS的基础上提出了三级集成系统综合方法(Tri-level Integrated System Synthesis, TLISS)。

除上述3种常见的多级MDO策略外,2001年密歇根大学的Kim^[54]还提出了解析目标层解(A analytical Target Cascading, ATC),该方法的协调方式与协同优化相似,但是对复杂问题的分解不再局限于系统级和学科级两个层次。ATC提出后

引起了较大的关注, Kim等^[55]使用Lagrange对偶协调算法改善了ATC的收敛特性, Allison等^[56]将ATC用于飞行器族的设计。

5 MDO框架发展概况

早在1991年,文献[1]就指出了MDO框架对多学科设计优化研究的重要意义。在飞行器MDO发展初期,MDO框架主要由研究机构、高校和工业界针对自身需求或者特定的设计对象所开发的。其中,NASA Langley研究中心围绕高速民用飞机项目开发了FIDO^[57]、CJOpt^[58]等MDO框架;波音公司开发了Access Manager框架^[59];斯坦福大学开发了PASS^[60]。可移植性和扩展性较差、学科分析模型集成困难是前期MDO框架存在的主要问题。随着MDO研究的深入和计算机技术的发展,通用MDO框架逐步面世,具有代表性的包括Enginous公司(已被达索公司收购)的iSight、Phoenix Integration公司的ModelCenter、Technosoft公司的AML(The Adaptive Modeling Language, AML)、Sandia国家研究实验室的DAKOTA、Noesis Solution公司的Optimus、V&D公司的VisualDOC等。除DAKOTA为免费软件外,其余皆为商业框架。为了适应大型企业的应用需求,Enginous公司和Phoenix Integration公司分别推出了Fiper和Centerlink。文献[12-14]分别对各种MDO框架进行了总结和比较。研究表明,各种通用MDO框架各有优劣,其中iSight和ModelCenter应用尤为广泛。商业通用MDO框架面世后,飞行器MDO框架的研发存在两种方案,即自主开发和基于通用MDO框架开发。在自主开发方面,Alzubbi等^[61]使用Java和RMI开发了MDO计算框架;Martins等^[62]使用Python语言开发了PyMDO。在第12届多学科分析与优化会议上,NASA的Moore等^[63]还发起了开发开源MDO框架的倡议。

近年来,在 NASA Glenn 研究中心的带领下,密西根大学等高校参与了 OpenMDAO 的开发,并将其初步应用于飞行器系统的多学科设计优化,例如,立方星的优化设计^[64]与大展弦比机翼的气动结构耦合优化设计^[65]。

多学科设计优化在航空航天领域的应用

MDO 自提出以来一直得到航空航天工业部门的高度重视,随着其关键技术的发展与理论体系的完善,MDO 也越来越多地得以实际应用。文献调研表明,多学科设计优化在航空航天领域的应用主要体现在两方面:一是利用多学科设计优化的思想和技术完成特定对象的分析与优化设计;二是从系统工程的角度建立相应的多学科集成设计平台。下面将对 MDO 在国外航空航天部门的应用进行概述。

波音公司考虑了气动、结构、重量、推进、操稳与控制各学科间的松耦合关系,基于 Genie 优化框架使用中精度分析模型(如气动学科的涡格法与结构学科的简单梁估算等)进行 BWB 起飞质量优化设计,该优化设计过程涉及 134 个设计变量与 705 个约束条件^[66]。在考虑气动结构耦合的前提下,波音公司使用多学科设计优化思想进行了直升机旋翼的多目标优化设计以降低桨毂载荷。首先,建立了气动结构耦合的旋翼分析模型,并使用多种优化算法进行优化,以避免局部收敛,同时还应用了自动微分、试验设计方法、响应面等技术,该优化设计过程涉及 56 个设计变量^[67]。在 2006 年举行的欧美多学科设计优化研讨会上,波音公司还介绍了将 MDO 技术应用于波音 787 客机研制所取得的成效(见表 2)^[4]。

洛克希德·马丁公司考虑气动结构耦合,在满足刚度、强度、颤振速度以及疲劳寿命的前提下对 F-22 进行了结构减重优化设计^[68],并将多

表2 MDO技术在波音787客机研制中的应用

应用领域	获得的成效
垂直尾翼设计	显著提高了垂尾的效率
发动机短舱设计	减重 15% 的同时降低了噪音
飞行测试项目	将传统 2~3 年的测试周期缩短至不足 1 年

学科设计优化用于新型 F-16 的布局与梯形翼改进设计,以在尽可能小的影响质量与其他分系统的同时尽可能提高其敏捷性^[69]。

文献[70]对 MDO 在欧洲航空工业界的应用进行总结,包括不同地区协作的运输机结构优化及 EU IMT 项目中对 A3XX 概念机进行气动结构优化,以降低其直接运营成本。

NASA Langley 研究中心成立了多学科设计优化分部(MDO Branch, MDOB),致力于研究发展 MDO 方法,促进 NASA、工业界和院校对 MDO 的基础研究,同时将 MDO 方法向工业界推广。MDOB 成立以来,联合高校和工业界开展了多项 MDO 研究项目,包括 X-33 的塞式喷管发动机设计、高性能计算与通信计划(HPCCP)、高速民用飞机(HSCT)研究。其中,HSCT 多学科设计优化问题最具有代表性,研究中综合考虑了几何外形、气动、结构、热防护、质量、性能等众多学科,并应用了多学科耦合建模、灵敏度分析、近似技术、设计空间探索、MDO 策略以及 MDO 框架等关键技术,优化过程涉及 271 个设计变量和 31868 个约束条件,对于单一载荷条件使用并行计算环境完成一次优化耗时 3 天^[71]。此外,NASA Langley 研究中心还将 MDO 技术用于变形计划(Morphing Program)的新型控制系统的研发,使用自动微分法研究气动力对控制率的影响,并使用遗传算法确定感应器阵列的最佳位置^[72]。

在多学科集成设计平台的研发方面,NASA Langley 研究中心针对下一代可复用运载器(RLV)基于

ModelCenter 框架开发了 B/S 架构的先进工程环境(Advanced Engineering Environment, AEE)^[73],该环境实现了各学科分析模型的分布式集成与调用、分析流程的自动化与人工介入、协同设计与研发、研发流程管理与监控及产品数据管理。

洛克希德·马丁公司指出航空航天企业必须提升产品的设计质量与设计效率以应对激烈的竞争。为此,在飞行器的概念设计阶段有必要使用多学科分析(MDA)与多学科设计优化(MDO)技术。为了解决 MDA 和 MDO 计算耗时的问题,提出了快速概念设计(RCD)方法并实现了 RCD 环境的初步开发,该分布式协同设计环境具有可集成性、可扩展性以及良好的图形用户界面,并提供了试验设计方法、代理模型方法、混合优化技术等设计方法^[74]。

在美国空军的资助下,波音公司开发了一款多学科设计优化系统(MDOPT),用于飞行器的设计优化与分析,MDOPT 大量使用了诸如 CFD 等高精度的分析模型,并集成了试验设计方法、代理模型方法与鲁棒性较高的数值优化算法^[75]。

美国海军基于 ModelCenter 与 DOKOTA 研发了集成高超音速航空力学工具(IHAT)^[76],用于高速战术导弹的多学科设计与优化,IHAT 集成了气动、动力、弹道、热防护、结构、操稳、毁伤以及成本等多个学科的分析模型,使用设计结构矩阵进行系统建模与分析,提供了单点分析、参数研究以及优化算法等分析与设计方法,通过 CVS 实现设计流程中版本控制功能(图 1)。

此外,欧洲航空航天工业部门联合高校也开展了多学科集成设计平台的研究,例如依托于翼身融合布局客机研究计划(MOB)开发的分布式集成设计平台——计算设计引擎(Computational Design Engine, CDE)^[77]。

多学科设计优化的发展方向

1 MDO的理论研究方向

多学科设计优化的理论研究的工程应用的前提和基础,为了更好地解决 MDO 问题的计算复杂性问题,提高 MDO 的效率和质量, MDO 理论研究应该进一步开展深入研究:(1) 深入研究 MDO 分解策略,从数学的角度解决现有 MDO 分解策略存在的局限性,例如协同优化系统级优化难以收敛和数值稳定性较差的问题、目标层级策略收敛速度较慢的问题等;(2) 将代理模型技术、试验设计技术以及优化技术相结合深入研究动态代理模型技术,在多学科设计优化过程中不断更新代理模型,重点提高代理模型在可能存在最优点的设计空间内的近似精度,而不再强调代理模型在整个设计空间的近似精度,从而减少高精度分析模型的调用次数,提高 MDO 的效率;(3) 由于制造工业、装备技术、材料特性以及模型分析误差等因素,飞行器设计中存在较大的不确定性,为了保证设计结果的鲁棒性与可靠性,有必要进行考虑不确定性的多学科设计优化方法

的研究;(4) 在多学科设计优化研究中应该逐步考虑制造过程的影响,这样有助于缩短飞行器的设计研制周期,进而降低飞行器的全寿命周期成本。此外,2014 年 AIAA Journal 出版的 MDO 专辑^[78]也指出:还需要围绕高效的灵敏度分析方法、先进代理模型技术、Pareto 前沿计算方法以及可视化技术等开展深入研究,并深化 MDO 理论与方法在工业界的应用。

2 MDO工业推广需解决的问题

近年来,虽然多学科设计优化在航空航天工业界得到了初步应用,也取得了一定的成效,但是其应用尚未形成规模。综合而言,多学科设计优化在航空航天工业界的全面推广还应该解决 3 个层面的问题:首先是技术层面的问题。目前, MDO 的各项关键技术仍尚不成熟,需要进一步开展理论研究,为多学科设计优化工业界的推广提供坚实的技术支撑。而文献[4]指出:在大多数 MDO 的倡导者与研究人员看来,较其他方面的问题,技术层面的问题是容易解决的;其次是组织层面的问题。如何将现有工业界的组织体系按照多学科

设计优化的需求进行重组,按照学科划分进行部门设置与管理,通过数据共享与交互实现多学科耦合分析,更重要的是,应该逐步建立一个自动化的底层分析与设计构架,一旦某学科(部门)的设计人员进行了修改,将自动调用与之耦合的学科模型进行分析,并将修改对其他部门的影响及时转给相应的设计人员。上述组织层面问题可以通过逐步部门调整并借助信息技术与多学科设计优化框架逐步实现;最后是意识层面的问题。由于航空航天工业界几十年以来一直采用的是串行的单学科设计模式,管理人员与技术设计人员都已经习惯了熟悉的组织形式、设计工具与工作模式,其接受新兴的设计方法与思想需要一个缓冲的过程。文献[4]指出,一般情况下,工业部门的高层管理人员与技术设计人比较容易接受新的设计与思想。考虑到新方法推广过程中存在的风险,中层管理人员对意识转变更为困难。随着 MDO 技术的日趋完善、成功案例的增加、应用风险的降低以及管理与设计人员思想的解放,上述意识层面的问题也将逐步得以解决。

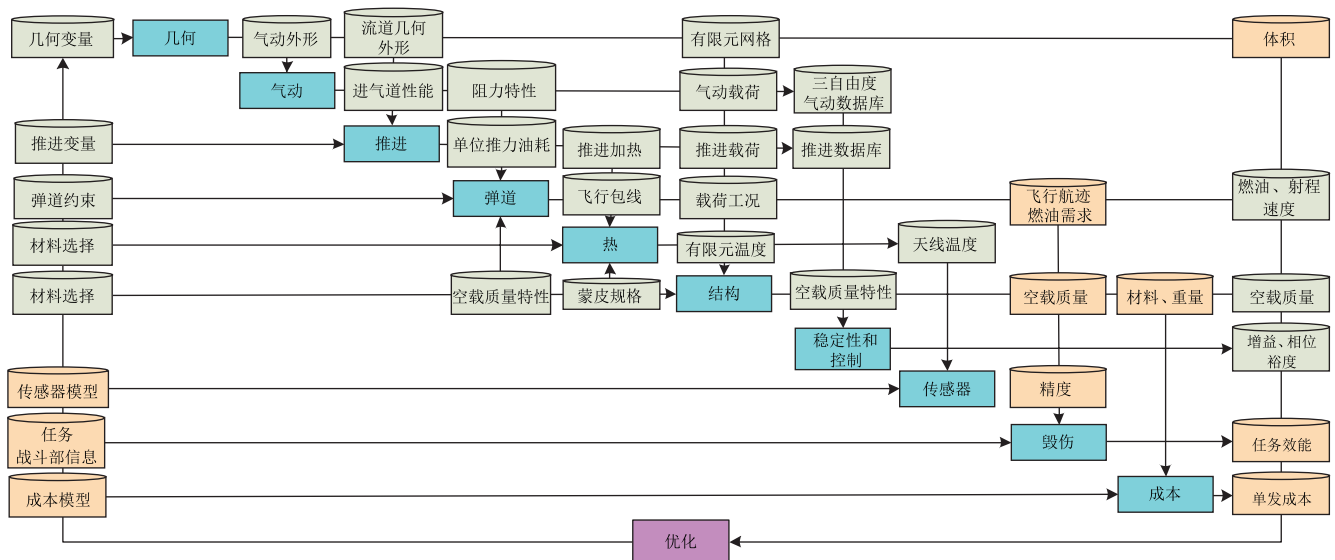


图1 IHAT导弹全系统设计结构矩阵框图

Fig.1 Design structure matrix diagram of a missile system used IHAT

作为一门分析与设计复杂系统的方法论,多学科设计优化目前正处于从理论研究向应用研究和工程推广的过渡阶段。随着理论体系的完善,多学科设计优化将对提高现代飞行器的设计质量与设计效率,增强航空航天工业部门的企业竞争实力起到积极的作用。

参考文献

- [1] AIAA multidisciplinary design optimization technical committee. Current state of the art on multidisciplinary design optimization (MDO)[EB/OL]. (1991-06-25)[2015-12-16]. http://endo.sandia.gov/AIAA_MDOTC/sponsored/aiaa_paper.html.
- [2] 王振国,陈小前,罗文彩,等. 飞行器多学科设计优化理论与应用研究[M]. 长沙:国防工业出版社,2006.
- WANG Zhenguo, CHEN Xiaoqian, LUO Wencai, et al. Research on the theory and application of multidisciplinary design optimization of flight vehicles[M]. Changsha: National Defence Industry Press, 2006.
- [3] 余雄庆. 多学科设计优化算法及其在飞机设计中的应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,1999.
- YU Xiongqing. Multidisciplinary design optimization algorithm and its application in aircraft design[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1999.
- [4] AGTE J, DE WECK O, SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J, et al. MDO: assessment and direction for advancement—an opinion of one international group[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010, 40(1-6): 17-33.
- [5] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J, HAFTKA R T. Multidisciplinary aerospace design optimization: survey of recent development[C]//Proceedings of 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada,1996, AIAA-96-0711.
- [6] GIESING J P, BATHELEMY J M A summary of industry MDO applications and needs[C]//7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. St. Louis, 1998, AIAA-98-4737-CP.
- [7] 余雄庆. 飞机总体多学科设计优化的现状与发展方向[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(4): 417-426.
- YU Xiongqing. Multidisciplinary design optimization for aircraft conceptual and preliminary design: status and directions[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 40(4): 417-426.
- [8] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J. Multidisciplinary design optimization: an emerging new engineering discipline[R]. Kluwer Academic Publishers, NASA-TM-107761, 1995.
- [9] BROWNING T R. Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2001,48(3): 292-306.
- [10] SIMPSON T W, BOOKER A J, GHOSH D, et al. Approximation methods in multidisciplinary analysis and optimization: a panel discussion[J]. Struct Multidisc Optim, 2004, 27(5):302-313.
- [11] SIMPSON T W, TOROPOV V, BALABANOV V, et al. Design and analysis of computer experiments in multidisciplinary design optimization: a review of how far we have come—or not[C]//Proceedings of 12th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Victoria: British Columbia Canada, 2008, AIAA-2008-5802.
- [12] 余雄庆,姚卫星,薛飞,等. 关于多学科设计优化计算框架的探讨[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(4): 286-289.
- YU Xiongqing, YAO Weixing, XUE Fei, et al. A study on the requirements for the framework of multidisciplinary design optimization[J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(4):286-289.
- [13] SALAS A O, TOWNSEND J C. Framework requirements for multidisciplinary application development[C]//7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. St. Louis, MO, 1998, AIAA-98-4740.
- [14] PADULA S L, GILLIAN R E. Multidisciplinary environments: a history of engineering framework development[C]//Proceedings of 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Portsmouth, Virginia, 2006, AIAA-2006-7083.
- [15] DE WECK O, AGTE J, SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J, et al. State-of-the-art and future trends in multidisciplinary design optimization[C]//Proceedings of 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu, Hawaii, 2007, AIAA 2007-1905.
- [16] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J. On the sensitivity of complex, internally coupled systems[R]. NASA-TM-100537, 1988.
- [17] CONSOLI R D, SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J. Application of advanced multidisciplinary analysis and optimization methods to vehicle design synthesis[J]. Journal of Aircraft, 1992, 29(5): 811-818.
- [18] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J, AGTE J S, SANDUSKY R R. Bi-level integrated system synthesis[J]. AIAA Journal, 2000, 38(1): 1-15.
- [19] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J. Optimization by decomposition: a step from hierarchic to non-hierarchic systems[R]. NASA CP-3031, 1989.
- [20] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J, BATHELEMY J F, RILEY K M. Sensitivity of optimum solutions of problem parameters[J]. AIAA Journal, 1982, 20(9): 1291-1299.
- [21] MARTINS J R R A. A coupled-adjoint method for high-fidelity aero-structural optimization[D]. CA: Stanford University, 2002.
- [22] FRANK P D, BOOKER A J, CAUDELL T P, et al. A comparison of optimization and search methods for multidisciplinary design[C]//4th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Multidisciplinary Analysis Optimization Conferences. Bellevue, WA, 1992, AIAA-92-4827-CP.
- [23] SIMPSON T W, PEPLINSKI J D, KOCH P N, et al. Metamodels for computer-based engineering design: survey and recommendations[J]. Engineering with Computers, 2001,17(2): 129-150.
- [24] YE K Q, LI W, SUDJANTO A. Algorithmic construction of optimal symmetric latin hypercube designs[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2000, 90(1):145-159.
- [25] MORRIS M D, MITCHELL T J. Exploratory designs for computational experiments[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 1995, 43(3): 381-402.
- [26] JIN R, CHEN W, SUDJANTO A. An efficient algorithm for constructing optimal design of computer experiments[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2005, 134(1): 268-287.
- [27] ZHU H, LIU L, LONG T, et al. A novel algorithm of maximin latin hypercube design using successive local enumeration[J]. Engineering Optimization, 2012, 44(5): 551-564.
- [28] VIANA F A C, VENTER G, BALABANOV V. An algorithm for fast optimal latin hypercube design of experiments[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010, 82(2): 135-156.

- [29] JIN R, CHEN W, SIMPSON T W. Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modeling criteria[J]. *Struct Multidisc Optim*, 2000, 23(1): 1–13.
- [30] GIUNTA A A, WATSON L T. A comparison of approximation modeling techniques: polynomial versus interpolating models[C]//7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. St. Louis, MO, 1998, AIAA-98-4758.
- [31] SIMPSON T W, MAUERY T M, KORTE J J, et al. Comparison of response surface and kriging models for multidisciplinary design optimization[C]//7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. St. Louis, MO, 1998, AIAA-98-4755.
- [32] WANG G G, DONG Z M, AITCHISON P. Adaptive response surface method—a global optimization scheme for approximation-based design problems[J]. *Engineering Optimization*, 2001, 33(6): 707–733.
- [33] WANG L Q, SHAN S Q, WANG G G. Mode-pursuing sampling method for global optimization on expensive black-box functions[J]. *Engineering Optimization*, 2004, 36(4): 419–438.
- [34] 彭磊, 刘莉, 龙腾. 基于动态径向基函数代理模型的优化策略[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(7): 164–170.
- PENG Lei, LIU Li, LONG Teng. Optimization strategy using dynamic radial basis function metamodel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(7): 164–170.
- [35] LONG T, WU D, GUO X L, et al. Efficient adaptive response surface method using intelligent space exploration strategy[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2015, 51(6): 1335–1362.
- [36] CRAMER E J, DENNIS J E, FRANK P D, et al. Problem formulation for multidisciplinary design optimization[J]. *SIAM Journal of Optimization*, 1994, 4(4): 1–28.
- [37] RENAUD J E, GABRIELE G A. Improved coordination in non-hierarchical system optimization[J]. *AIAA Journal*, 1993, 31(12): 2730–2739.
- [38] SELLAR R S, BATILL S M, RENAUD J E. Response surface based, concurrent subspace optimization for multidisciplinary system design[C]//Proceedings of AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, 1996, AIAA-96-0714.
- [39] STELMACK M A, BATILL S M, BECK B C, et al. Application of the concurrent subspace design framework to aircraft brake component design optimization[C]//Proceedings of 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit. Long Beach, CA, 1998, AIAA-98-2033.
- [40] CHI H W, BLOEBAUM C L. Concurrent subspace optimization of mixed-variable coupled engineering systems[C]//6th AIAA/AFOSR/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Bellevue, WA, 1996, AIAA-1997-1229.
- [41] HUANG C H, BLOEBAUM C L. Visualization as a solution aid for multi-objective concurrent subspace optimization in a multidisciplinary design environment[C]//Proceedings of 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Multidisciplinary Analysis Optimization Conferences. Albany, New York, 2004, AIAA-2004-4464.
- [42] KROO I, ALTUS S, BRAUN R, et al. Multidisciplinary optimization methods for aircraft preliminary design[C]//5th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Panama City Beach, FL, 1994, AIAA-94-4325.
- [43] SOBIESKI I P, KROO I M. Collaborative optimization using response surface estimation[J]. *AIAA Journal*, 2000, 38(10): 1931–1938.
- [44] ALEXANDROV N M, LEWIS R M. Analytical and computational aspects of collaborative optimization for multidisciplinary design[J]. *AIAA Journal*, 2002, 40(2): 301–309.
- [45] LIN J G. Analysis and enhancement of collaborative optimization for multidisciplinary design[J]. *AIAA Journal*, 2004, 42(2): 348–360.
- [46] ZADEH P M, TOROPOV V V, WOOD A S. Metamodel-based collaborative optimization framework[J]. *Struct Multidisc Optim*, 2008, 38(2): 103–115.
- [47] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J. Bi-level integrated system synthesis (BLISS)[C]//7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium On Multidisciplinary Analysis and Optimization. St. Louis, MO, 1998, AIAA-1998-4916.
- [48] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J. Bliss/S: a new method for two-level structural optimization[C]//Proceedings of 40th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit. St. Louis, MO, 1999, AIAA-99-345.
- [49] KODIYALAM S, SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J. Bilevel integrated system synthesis with response surfaces[J]. *AIAA Journal*, 2000, 38(8): 1479–1485.
- [50] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J, ALTUS T D, PHILLIPS M, et al. Bilevel integrated system synthesis for concurrent and distributed processing[J]. *AIAA Journal*, 2003, 41(10): 1996–2003.
- [51] BROWN N F, OLDS J R. Evaluation of multidisciplinary optimization techniques applied to a reusable launch vehicle[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2006, 43(6): 1289–1300.
- [52] KIM H, RAGON S, MULLINS J, et al. A web-based collaborative environment for bi-level integrated system synthesis (BLISS)[C]//Proceedings of 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Newport, Rhode Island, 2006, AIAA-2006-1618.
- [53] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J. Integrated system-of-systems synthesis[J]. *AIAA Journal*, 2008, 46(5): 1072–1080.
- [54] KIM H M. Target cascading in optimal system design[D]. Ann Arbor, MI: University of Michigan, 2001.
- [55] KIM H M, CHEN W, WIECEK M M. Lagrangian coordination for enhancing the convergence of analytical target cascading[J]. *AIAA Journal*, 2006, 44(10): 2197–2207.
- [56] ALLISON J, ROTH B, KOKKOLARAS M, et al. Aircraft family design using decomposition-based methods[C]//Proceedings of 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Portsmouth, Virginia, 2006, AIAA-2006-6950.
- [57] WESTON R P. A distributed computing environment for multidisciplinary design[C]//5th AIAA/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Panama City Beach, 1994, AIAA-94-4372-CP.
- [58] DOVI A R, SU P, MURTHY T. A distributed object approach to multidisciplinary analysis of aerospace vehicles[C]//8th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Long Beach, CA, 2000, AIAA-2000-4898.
- [59] RIDLON S A. A software framework for enabling multidisciplinary analysis and optimization[C]//6th AIAA, NASA, and ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Bellevue, WA, 1996, AIAA-96-4133.
- [60] KROO I M, TAKAI M. A quasi-procedural, knowledge-based system for aircraft design[C]//Proceedings of AHS, and ASEE, Aircraft Design, Systems and Operations Meeting.

- Atlanta, GA, 1988, AIAA-1988-4428.
- [61] ALZUBBI A, NDIAYE A, MAHDAVI B. On the use of java and RMI in the development of a computer framework for MDO[C]//8th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Long Beach, CA, 2000, AIAA-2000-4903.
- [62] MARTINS J R R A, MARRIAGE C. An object-oriented framework for multidisciplinary design optimization[C]//Proceedings of 3rd AIAA Multidisciplinary Design Optimization Specialist Conference. Waikiki, Hawaii, 2007, AIAA-2007-1906.
- [63] MOORE K T, NAYLOR B A, GRAY J S. The development of an open source framework for multidisciplinary analysis & optimization[C]//Proceedings of 12th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Victoria, British Columbia Canada, 2008, AIAA-2008-6069.
- [64] HWANG J T, LEE D Y, CUTLER J W, et al. Large-scale multidisciplinary optimization of a small satellite's design and operation[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2014, 51(5): 1648-1663.
- [65] CHEN S, LYU Z, KENWAY G K. W, et al. Aerodynamic shape optimization of common research model wing-body-tail configuration[J]. Journal of Aircraft, 2015, 36(10):3195-3207.
- [66] WAKAYAMA S, KROO I. The challenge and promise of blended-wing-body optimization[C]//7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. St. Louis, MO, 1998, AIAA-1998-4736.
- [67] TARZANIN F, YOUNG D K. Boeing rotorcraft experience with rotor design and optimization[C]//7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. St. Louis, MO, 1998, AIAA-1998-4733.
- [68] RADOVCICH N, LAYTON D. The F-22 structural/aeroelastic design process with MDO examples[C]//7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. St. Louis, MO, 1998, AIAA-1998-4732.
- [69] LOVE M H. Multidisciplinary design practices from the F-16 agile falcon[C]//7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. St. Louis, MO, 1998, AIAA-1998-4704.
- [70] BARTHOLOMEW P. The role of MDO within aerospace design and progress towards an mdo capability[C]//7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. St. Louis, MO, 1998, AIAA-1998-4705.
- [71] ZANG T A. Multidisciplinary optimization in airframe design[M/OL]. [2015-12-05]. <http://fmad-www.larc.nasa.gov/mdob/MDOB/>.
- [72] PADULA S L, ROGERS J L, RANEY D L. Multidisciplinary techniques and novel aircraft control systems[C]//8th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Long Beach, CA, 2000, AIAA-2000-4848.
- [73] MONELL D, VERHAGE M, KAM J V, et al. The advanced engineering environment (Aee) project for Nasa's next generation launch technologies (Ngl) program[C]//Proceedings of 42nd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, 2004, AIAA 2004-0202.
- [74] CARTY A. An approach to multidisciplinary design, analysis & optimization for rapid conceptual design[C]//9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Atlanta, Georgia, 2002, AIAA-2002-5438.
- [75] LEDOUX S T, HERLING W W, FATTA G J. MDOPT—a multidisciplinary design optimization system using higher order analysis codes[C]//Proceedings of 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Albany, New York, 2004, AIAA-2004-4567.
- [76] BAKER M L, MUNSON M J, HOPPUS G W, et al. The integrated hypersonic aeromechanics tool (ihat), build4[C]//Proceedings of 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Albany, New York, 2004, AIAA-2004-4565.
- [77] MORRIS A, ARENDSSEN P, LAROCCA G, et al. MOB—a European project on multidisciplinary design optimisation[C]//Proceedings of 24th International Congress of the Aeronautical Sciences. Yokohama Japan, 2004. ICAS 2004:1-13.
- [78] WILLCOX K, HAFTKA R. Special section on multidisciplinary design optimization[J]. AIAA Journal, 2014, 52(4): 670-690.

Development of Multidisciplinary Design Optimization Technology and Its Application in Aerospace Industry

LONG Teng^{1,2}, LIU Jian², MENG Lingtao³, SHI Renhe², LIU Li^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Dynamics and Control of Flight Vehicle, Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. Tactical Weapon Division, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] The significance of multidisciplinary design optimization (MDO) to modern flight vehicle design and the major research contents are first pointed out. According to comprehensive literature review, the state of six key MDO technologies including flight vehicle modeling techniques, sensitivity analysis methods, optimization algorithms, surrogate model, MDO strategies, and MDO frameworks are presented, and a number of typical applications of MDO technologies in aerospace engineering are also briefly summarized. Finally, the future trends of MDO technologies and the bottlenecks restricting extensive applications of MDO in aerospace industrials are discussed.

Keywords: Multidisciplinary design optimization; Flight vehicle design; Aerospace

(责编 玲犀)