

文章编号:1001-2486(2011)05-0001-08

飞行器多学科设计优化理论的工程应用*

陈小前,姚雯,魏月兴,赵勇

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:目前,飞行器的多学科设计优化(MDO)方法研究已经成为国际上航天领域的一个研究热点,但在我国,与MDO基础理论研究的迅速发展相比,MDO的工程应用研究相对滞后,甚至导致部分飞行器设计人员对于MDO理论的实用性产生质疑。本文结合我们近十多年来的研究工作,在分析MDO工程应用所面临困难的基础上,总结了MDO工程应用研究的关键技术,归纳了国际上MDO工程应用大致经历的三代研究概况,并以我们所完成的三个飞行器MDO实例来说明这三代研究各自的特点,最后对MDO工程应用研究的发展趋势进行了简要分析。

关键词:飞行器;多学科设计优化;工程应用

中图分类号:V474.3 文献标识码:A

Engineering Application on Multidisciplinary Design Optimization of Flight Vehicles

CHEN Xiao-qian, YAO Wen, WEI Yue-xin, ZHAO Yong

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Multidisciplinary Design Optimization (MDO) of flight vehicles is now a focus of international research in the aerospace field. The engineering application research of MDO, however, falls behind the fundamental theoretical research domestically, which sometimes even leads to the suspicion of the practicability of MDO. On the basis of our research on MDO in the past decade, the difficulties of the engineering application and the relevant key technologies of MDO were analyzed. The international research on engineering application of MDO can be approximately summarized into three stages, the characteristics of which were illustrated with three application examples in flight vehicle design implemented by our group. Finally, the future trends of the MDO engineering application were briefly analyzed.

Key words: flight vehicles; Multidisciplinary Design Optimization (MDO); engineering application

当前,随着技术的进步和应用需求的提高,飞行器越来越凸显出功能先进性和系统复杂性等特点。飞行器设计过程中涉及的学科领域多、专业分工细,且学科间耦合关系错综复杂,给飞行器设计的学科组织、流程管理和性能优化带来很大困难。如何从系统角度综合考虑多个学科的影响,有效组织和利用各种先进的信息化技术对飞行器进行建模、仿真、分析以及优化,提高飞行器的设计开发水平,是目前飞行器设计领域亟须解决的问题之一。

针对飞行器设计固有的多学科本质,1982年,美籍波兰人 J. Sobieszczanski-Sobieski 首次提出复杂系统的多学科设计优化 (Multidisciplinary Design Optimization, MDO) 概念^[1],并迅速得到航

天领域的认同,得到广泛研究和快速发展。在我国,MDO方法约于20世纪90年代中后期进入航天领域,近10年也得到了越来越多的重视,已成为目前飞行器设计领域研究的热点问题之一^[1-14]。但纵观我国近十年来MDO的研究工作,尽管发表的论文众多,但大多数的研究工作着眼于对MDO基础理论特别是数学方面的探讨,真正成功应用于解决实际工程问题的例子较少,因此,在MDO迅速发展的同时,来自于工业部门的质疑不少。近十几年来,我们与工业部门进行了长期的合作,先后完成了10余项直接针对MDO工程应用的项目,对于MDO的工程应用问题有了较深入的认识与体会。本文将结合我们近十多年来的研究工作对MDO的工程应用问题进

* 收稿日期:2011-05-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975280);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0149)

作者简介:陈小前(1975—),男,教授,博士生导师。

行较为系统的探讨。

1 MDO 工程应用所面临的挑战

根据美国航空航天学会(AIAA)发表的MDO白皮书^[15]：“MDO支持设计、分析、优化和评估的全过程，能够通过各学科模块化并行设计缩短设计周期，通过学科间相互耦合挖掘设计潜力，通过系统综合分析选择和评估方案，通过系统高度集成实现复杂产品设计的自动化，通过门类齐全的多学科综合设计提高可靠性并降低研制费用”。因此，以MDO为核心，集成产品数据管理PDM和产品全生命周期管理PLM等数字化技术，构建产品集成设计环境，将成为先进飞行器开发技术的重要发展趋势。虽然MDO理论已得到广泛研究，但是将其直接应用于工程实际的复杂产品数字化开发还具有一定的困难，主要面临以下四个复杂性：

(1) 模型复杂性

对于涉及多个耦合学科的复杂系统，对系统级和子系统级的物理建模、数学建模和计算机编程实现都存在较大困难。首先，子系统级各个学科自身的设计与分析模型十分复杂，如结构有限元分析模型、数值流场仿真模型等。部分学科需要设计人员的定性知识和工程经验进行设计与分析，难以采用合适的数学建模方法建立解析表达式。其次，学科间耦合关系复杂，如何对学科关系、子系统与系统级关系进行数学建模十分困难，即使各学科均采用简单的线性模型，耦合关系影响下系统的组合模型仍有可能是非线性的，难以准确建立关系模型。再次，对于由多个学科组成的系统，设计中可能需要面对多个相互冲突的学科设计目标，因此需要协调多个学科间的不一致，使系统设计成为多目标优化问题，进一步增加了优化模型的复杂性。

(2) 信息交换复杂性

在MDO中，学科间的输入输出交叉耦合，使MDO中的信息交换成为一个十分复杂的问题。这一点在数字化设计中利用计算机来解决MDO问题时表现尤为明显。在各学科计算机程序之间的信息交换往往表现为数据的传递，而大量的信息交换则会带来数据灾难。同时，MDO需要将多个学科进行集成和协同设计，学科间的大量耦合信息需要进行实时传递，进一步对学科间通讯和信息传递的时效和速率提出要求。因此，在MDO中有效的数据管理和信息传递技术是制约学科协调、集成的重要瓶颈之一。

(3) 计算复杂性

由于集成了多个学科，在MDO过程中设计变量必然增加，问题的规模也随之加大。例如，在飞行器机身的设计问题中，仅结构学科就有上万个分析变量和上千个设计变量，如果再考虑其它学科以及各学科之间的耦合，其计算量是可想而知的。同时，大多数学科分析模型随着问题规模的增加其计算量的增加是超线性的，如果单个学科单次分析需要大量计算时间，则对于需要考虑多个学科协调、多次迭代优化的MDO，则计算量更加庞大。因此，MDO计算成本一般要比各个单学科优化的成本总和还要高很多，使飞行器开发在计算时间和计算复杂度上难以承受。

(4) 组织复杂性

组织复杂性着重考虑MDO在数字化设计中具体如何实现的问题，包含几重含义：一是指物理建模上的困难，即如何建立复杂产品的整体系统模型、子系统级各学科模型、学科间的关系模型等；二是指数学建模上的困难，即如何针对具体的产品特点合理选择设计变量、提取优化目标和约束条件、建立优化问题的数学模型、选择合适的优化算法进行组织求解等；三是指在计算机实现上的困难，即如何进行产品设计中各个学科的分解并行设计、如何实现各个学科内部或学科团队间信息/资源/人员的有效集成与协同、如何建立人机交互环境等。此外，组织复杂性还包括研究人员、部门的安排等MDO文化设施的非技术问题。

能否妥善解决上述MDO的四个复杂性，对于MDO的成功应用至关重要，是MDO在飞行器设计中推广应用面临的主要挑战。

2 MDO 工程应用研究的关键技术

虽然MDO应用于飞行器的工程研制中面临上述困难与挑战，但计算机技术、网络通讯技术以及制造业信息化建设的快速发展，为推进MDO工程应用提供了前所未有的机遇。首先，高性能计算机、大型并行计算技术的出现，为解决MDO的计算复杂性问题提供了有力工具。其次，高速率、大容量、高可靠的网络环境建设，为异地分布的学科设计团队的组织与协同设计提供了途径。再次，随着制造业信息化建设不断发展，产品设计涉及的学科模型、工程知识数据库、学科计算机辅助设计软件等设计、分析工具都逐步实现数字化，有效降低MDO组织实现过程中的建模复杂度。

上述科学与技术的进步等因素从外部条件上为MDO的发展创造了机遇，但同时还需要对

MDO 理论本身进行研究,从内部推进 MDO 的发展。结合 MDO 发展的新趋势与工程应用的新需求,我们归纳总结出如下亟须攻克的关键技术:

(1) 面向 MDO 的建模方法

面向 MDO 的建模指对研究的系统及其组成学科进行建模,对其设计优化问题进行数学抽象和表述。MDO 问题建模包括两个主要的方面:系统级建模和子系统级建模。系统级的建模又可分为用于系统确认与分析的模型和用于系统设计、优化和协调的模型。子系统级的建模属于各学科的具体任务,各学科可根据学科特点和系统给定的设计要求建立合适的模型。特别是对于系统级的建模,其建模方法实际上也是一种建模思想。这种建模方法可指导人们对复杂系统进行有效的确认,逐步明确研究任务并将其分解到各子系统中,如过程建模方法等;或根据任务对于精度的要求,选择合适的近似方法以控制模型的复杂程度,如可变量复杂度建模方法等;或根据研究对象的特殊性,选择专门建模方法,如不确定性建模方法等^[1]。

(2) 近似方法

近似方法是有效解决 MDO 存在的计算复杂性问题的途径之一。一方面,通过近似模型取代复杂学科分析模型参与优化,可大大减少 MDO 求解的计算量;另一方面,可用近似方法处理学科间的耦合关系,实现 MDO 过程中的学科信息交换。目前近似方法主要包括两类:模型近似方法和函数近似方法。模型近似方法主要从减少设计变量和约束函数数目的观点出发,缩小问题规模,提高优化效率。函数近似方法主要通过优化问题中的目标函数和约束函数进行近似,降低复杂系统分析的计算量。在 MDO 中,函数近似方法的研究与应用最为广泛,是目前的研究热点^[17-20]。

(3) 系统灵敏度分析技术

灵敏度分析在 MDO 组织实现的各个阶段都发挥着重要作用。在系统建模阶段,用于对系统性能和约束受设计变量与系统参数影响的敏感程度进行分析评价,为进一步对复杂优化问题的降维处理和缩减计算复杂度提供参考;在优化搜索过程中,用于对设计变量与系统参数对优化目标和约束的影响规律进行分析,从而指导优化搜索方向;在多学科优化过程中,用于建立全局灵敏度方程,以此近似分析子系统间的相互耦合关系。由于系统的学科间耦合关系复杂,系统灵敏度分析所需的数据计算量十分庞大,因此研究适应性

和鲁棒性较强、计算效率较高的灵敏度技术是重要的发展方向^[9]。

(4) 设计空间搜索策略

MDO 中搜索策略概念涉及最优化理论和试验设计理论。在传统的单学科优化中,针对具体问题选择合适的经典优化搜索策略属于比较成熟的技术。但在 MDO 问题中,许多优化问题具备大规模、高维、非线性、非凸等复杂特性,且存在大量的局部极值点,求解此类问题时许多传统的确定性优化算法易陷入局部最优,且对初值非常敏感,因此需要研究具有与导数无关性、直观性、随机性等特点的智能优化算法,如禁忌搜索、模拟退火、进化算法等。无论是经典优化算法还是智能优化算法,均有其优缺点和适用范围。因此,针对搜索全局性、快速性和鲁棒性,发展新的优化机制和优化操作,尤其是发展高效的混合优化算法,是搜索策略的主要研究方向之一^[6-7, 21-22]。

(5) 优化过程

MDO 优化过程(MDO Procedure)也称 MDO 算法或 MDO 策略,是建立 MDO 问题的数学表述及在计算环境中组织此种表述的过程。MDO 优化过程是 MDO 理论的最核心部分,也是 MDO 研究最活跃的领域。MDO 优化过程的实现可视为分解策略、协调策略和搜索策略的集成,其目标是解决组织与计算复杂性的问题,提高收敛速度并获取全局最优解。目前,MDO 优化过程主要包括两类:单级优化过程和多级优化过程。单级优化过程只在系统级进行优化,而在各学科只进行分析或者计算,不进行优化。多级优化过程在各个学科分别进行优化,控制局部设计变量的选择,而在系统级进行各学科优化间的协调和全局设计变量的优化。常见单级优化过程包括 AAO 方法(All-At-Once)、IDF 和 MDF。典型多级优化过程有 CSSO、CO 和 BLISS 等。目前关于 MDO 优化过程的讨论较多针对算法结构及应用情况展开,需要进一步从分解与协调策略的角度对多级优化过程的数学本质进行深入研究,从而从根本上结合具体的产品特点对设计优化问题进行组织求解,提高优化效率^[7-9, 23-27]。

(6) 信息基础结构

信息基础结构包括产品数据模型技术、产品数据管理技术、可视化技术、分布式计算机网络技术等,主要研究方向包括基于产品模型数据交换标准(STEP)的智能主模型技术、基于 PDM 软件的产品数据管理技术、通过集成工程设计软件实现模型可视化和集成工程计算软件实现科学计算

可视化等。特别是以智能产品控制结构(PCS)为核心的智能主模型技术,代表了未来数字化设计的信息基础结构发展方向。

(7) MDO 集成设计环境

MDO 集成设计环境是 MDO 研究领域的重要内容,也是基于 MDO 的飞行器开发系统的基础。MDO 集成设计环境是指实现多学科设计优化过程中集成、操作和通信功能的软硬件组织结构。随着以信息化为核心的各种数字化技术的交叉渗透,MDO 集成环境将不断与 PDM、PLM 等技术相融合,形成涵盖产品全寿命周期的飞行器开发系统,这也是 MDO 集成设计环境的发展趋势。MDO 集成设计环境的研究需要从分布式、协同设计的要求出发,考虑多学科集成和并行工程需求,研究具有通用性与扩展性的 MDO 集成软件框架^[8-9, 23, 28-29]。

3 MDO 工程应用研究实例

迄今为止,国际上对于 MDO 的工程应用研究已经有近 30 年的研究历程。通过对其详细分析,我们认为,国外的 MDO 工程应用研究大致可以分为三个阶段,分别将其称为第一代、第二代和第三代应用^[1,3]。其中,第一代应用类似于国内所说的“一体化优化设计方法”,这一代应用中使用的典型算法如 AAO、NAND 等,国外属于这一代的典型 MDO 系统如 FLOPS、MIDAS、ACSYNT 等。第二代应用中使用的典型算法如 SAND,国外属于这一代的典型 MDO 系统如 FIDO 等。第三代应用中所采用的典型算法如 CO、CSSO、BLISS,国外属于这一代的典型 MDO 系统如 CJOpt、IMD、IHAT、MOB 等。我们在近 10 多年的研究工作中,先后开发了多个应用系统,并与国外的应用研究走过了类似的发展历程。以下将结合我们完成的几个应用实例简要介绍这三代 MDO 应用系统各自的特点。

3.1 第一代 MDO 应用实例:导弹一体化优化设计

对于飞行器和导弹等工程系统,由于其某些子系统(如发动机)与整个系统关系十分密切,为了充分考虑该子系统的设计对系统性能的影响,导弹系统的总体设计需要考虑总体、控制、动力、结构、载荷、弹道等多个学科,采用一体化设计方法可在很大程度上处理各学科之间的相互耦合。一体化设计方法实际上也是多学科设计优化早期所采用的手段,是第一代飞行器 MDO 应用实例。它初步考虑了飞行器分系统间的相互作用与影

响,是 MDO 研究的雏形。其典型特点是系统不分层,通过优化方法将各学科模型集成起来。缺点是搜索时间长,学科模型只能取近似模型,难以处理大型复杂系统的优化问题。以下以我们完成的导弹一体化优化设计为例进行介绍^[1,26]。

3.1.1 导弹一体化设计模型

导弹一体化设计模型包括发动机设计、质量计算、气动力计算和弹道计算等模型模块。

发动机设计模型包括:采用最小自由能法进行热力计算,利用经验公式计算实际比冲;根据装药量和给定的装填系数,确定发动机主要外形尺寸;按照展开质量模型计算发动机结构质量。

质量计算模型在发动机设计的基础上计算导弹的质量和变化特性。导弹的质量包括各级发动机推进剂质量、发动机结构质量、子级结构质量、电子设备质量、有效载荷质量及其他质量。在飞行过程中,导弹的质量随着时间增加而逐渐减小,需要给出飞行过程中的质量及其质量特性参数变化状况,以便较精确地描述导弹的飞行性能。质量计算模型还需给出弹体飞行过程中的质心位置参数和转动惯量参数随飞行时间和飞行质量的变化规律。

气动力计算模型包括如下计算内容:纵向气动特性参数;横侧向气动特性参数;动导数特性;各子级在给定马赫数下的阻力系数。气动力计算模型采用的方法如下:基本的计算思想是采用部件组合方法,考虑单独弹体和弹翼相互间的干扰效应后进行叠加;采用表面压力系数积分方法计算超声速范围内弹体升力、阻力及俯仰力矩系数;采用牛顿流理论,通过对弹翼表面压力进行积分计算高超声速范围内弹翼纵向气动特性;采用工程估算公式计算其他部分。

弹道计算模型的主要内容为导弹质心运动模型。

3.1.2 总体优化模型

导弹总体优化模型主要是确定设计优化变量、目标函数和约束。

优化目标: $\min TakeOffMass$

优化参数: $Diameter [i]$ 、 $ChamberPressure [i]$ 、 $Thrust [i]$ 、 $WorkTime [i]$

约束: $Range \geq R_0$ 、 $MaxOverloadX \leq OLx_0$ 、 $MaxOverloadY \leq Oly_0$

设计变量的边界约束与初始值可根据设计要求来确定,其中弹径 $Diameter [i]$ 为离散变量。图 1 所示为导弹一体化优化设计流程,其中给出了发动机设计、质量计算、气动力计算和弹道计算模型的组织调用关系。

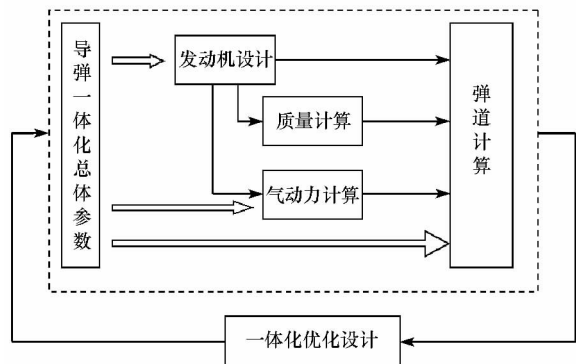


图 1 导弹一体化优化设计流程图

Fig. 1 Flowchart of integral design of missile

3.2 第二代 MDO 应用实例:高超声速飞行器多学科设计优化

第二代 MDO 应用是将大规模复杂系统优化设计问题分解为若干子系统的优化设计问题,由系统级协调各子系统间的耦合作用,充分利用分布式计算机系统进行协调设计,因而能有效处理大规模复杂系统优化问题。此处以我们完成的高超声速飞行器多学科设计优化实例进行说明^[1, 5, 10, 29]。

高超声速飞行器总体设计具有固有的多学科强耦合特性,如机/弹体前体作为来流预压缩面,成为超燃冲压发动机进气道的一部分;机/弹体后体同时又是发动机尾喷管的外扩型面;飞行弹道和控制规律决定的攻角变化规律影响发动机进气道的热流捕获量,进而影响发动机性能,发动机性能又决定了弹道的选择。因此高超声速飞行器的总体设计将涉及空气动力学、气动热力学、燃烧学、飞行力学、控制、结构力学、优化设计理论以及其它应用科学,各个学科相互耦合,是典型的复杂系统设计问题。MDO 方法充分适应了高超声速飞行器总体设计的特点与挑战。

3.2.1 高超声速飞行器变复杂度建模

本文研究的高超声速飞行器为轴对称高超声速飞行器。高超声速飞行器总体设计主要包括以下几个学科分析:外形设计、气动分析、推进分析、结构分析、弹道分析和质量分析等。图 2 所示为飞行器的设计结构矩阵,其中箭头表述了学科间的数据耦合。弹道分析采用 3 自由度弹道方程,用程序俯仰角作为控制变量。外形和质量除了受到弹道学科、推进学科、气动学科的影响之外,主要还是由结构学科决定的。对上述几个学科,本文不予以详细介绍。为了提高飞行器总体方案的精度,对结构分析、气动分析和推进分析等主要学科建立了变复杂度模型,以下分别进行介绍。

(1) 结构分析变复杂度建模

高超声速飞行器结构分析主要包括强度分

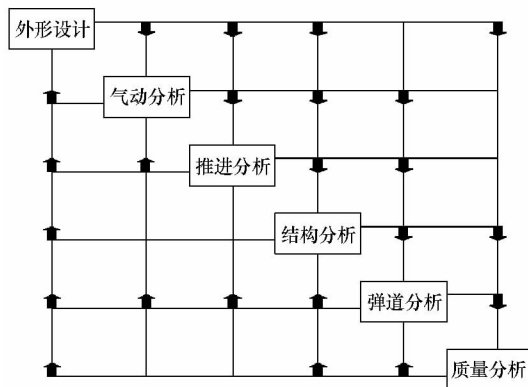


图 2 设计结构矩阵

Fig. 2 Design matrix

析、稳定性分析和振动分析。其中强度分析和稳定性分析利用工程算法就可以达到分析精度,在引入数值分析校正之后,分析精度更是可以得到保证。结构分析的低精度模型采用工程算法,主要根据强度校核和稳定性校核的经验公式。高精度模型采用数值方法,可利用 Pro/E、Patran、Nastran 等工具软件来实现。Pro/E 建模生成的 igs 文件导入 Patran 中进行网格划分和加载,生成的文件再导入 Nastran 中进行分析。

(2) 推进分析变复杂度模型

高超声速飞行器的推进系统包括助推发动机和巡航发动机两部分,前者采用固体火箭发动机,后者为轴对称双燃烧室超燃冲压发动机。固体火箭发动机技术比较成熟,采用工程估算模型即可满足设计精度要求,其中燃烧室性能采用热力计算方法获得。推进学科的变复杂度模型主要考虑超燃冲压发动机的变复杂度。轴对称双燃烧室超燃冲压发动机主要包括以下部件:进气道、亚燃燃烧室、超燃燃烧室、尾喷管等。可针对超燃冲压发动机的各部件建立二级复杂度的设计分析模型,然后综合成超燃冲压发动机的设计分析模型。在推进学科的低精度分析模型中,锥形进气道的流场计算采用特征线法;亚燃燃烧室性能采用热力计算方法;超燃燃烧室流场计算采用准一维燃烧流动模型;尾喷管性能采用等熵膨胀流模型进行计算。推进学科的高精度模型采用基于 NS 方程的计算流体力学(CFD)模型,由于头部和进气道以及燃烧室构型比较复杂,需要采用结构化网格对推进系统的进气道、亚燃燃烧室、超燃燃烧室、尾喷管等复杂流道进行三维数值模拟,此时计算量相对于低精度模型增加很大。

(3) 气动分析变复杂度模型

对于常规外形飞行器的亚、跨、超声速的气动学科来说,工程估算基本上可以满足飞行器总体

设计要求,高精度模型主要体现在超声速和高超声速下的气动模型。气动学科变复杂度模型采用三级复杂度模型,分别如下:一级复杂度模型:工程估算模型(采用 Missile DATCOM 软件估算);二级复杂度模型:工程估算和 CFD 结合模型;三级复杂度模型:CFD 模型(采用 Fluent 软件计算)。工程估算模型中采用 Missile DATCOM 软件进行计算,其中首先单独计算弹头、进气道、弹身、机翼、尾翼的气动力,然后采用部件组合法计算气动力。工程估算和 CFD 结合模型采用工程估算分别计算机翼和尾翼,CFD 模型计算弹头、进气道和弹身,然后采用部件组合法计算气动力,其中 CFD 模型计算得到的参数直接替代部件组合法中相应部件的工程估算参数,作为高精度参数对工程估算参数进行校核。

3.2.2 高超声速飞行器多学科设计优化模型

(1) 系统优化模型

高超声速飞行器多学科优化设计包括弹道模块、气动模块、推进模块、结构模块、质量模块等,各个模块可以独立运行,通过文件传递参数。优化问题数学定义如下:

优化目标: $\min \text{TakeOffMass}$

优化参数: $\text{Diameter}, \text{SeparateMach}, \text{Fi}[i], \text{Thrust}[i], \text{StructCo}[i]$

约束: $\text{Range} \geq R_0, \text{MaxOverloadX} \leq \text{OLx}_0, \text{MaxOverloadY} \leq \text{OLy}_0$

(2) 优化过程

图3所示为采用 SAND(Simultaneous Analysis and Design)优化过程进行高超声速飞行器多学科设计优化的框图。整个系统层包括两层优化,内层是弹道参数优化,目标是在给定了结构和推进

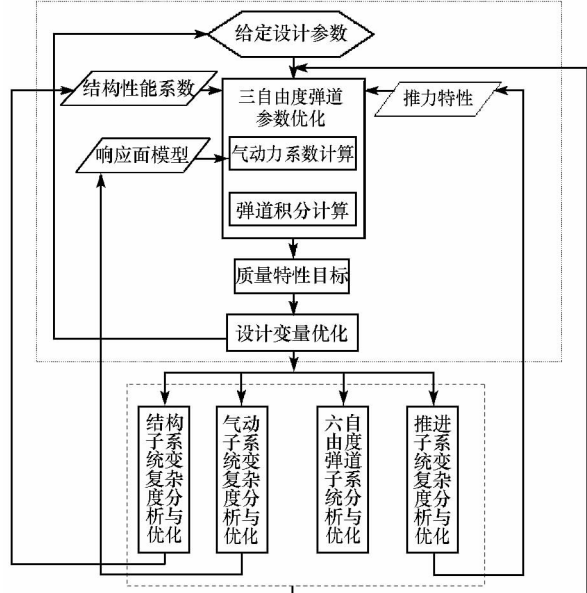


图3 基于 SAND 过程的系统优化框图
Fig.3 System optimization based on SAND

等其他子系统性能参数的情况下,寻找最优化的弹道设计变量值以验证飞行可行性并给出质量特性目标;外层是质量特性目标的优化,即寻找最优化的导弹估算设计变量值,确定子系统的性能参数,交由子系统分析优化,并在子系统分析优化之后更新结构系数和推力特性。

3.3 第三代 MDO 应用实例:卫星总体方案多学科综合设计系统

第三代 MDO 充分利用 MDO 的思想,将基于 MDO 的工具与产品的设计流程、管理流程等相结合,实现技术线与管理线的有机融合,构成完整的应用系统。本文以我们开发的航天器总体 MDO 集成设计环境软件(Satellite Integrated Design Environment, SIDE)为例,对基于 MDO 的飞行器开发应用进行阐述^[1, 7, 28]。

航天器是一个典型的高度复杂的多学科耦合系统,最终性能取决于整体最优,因此 MDO 是实现航天器设计“快、好、省”目标的有效手段。针对 MDO 与航天器设计流程结合问题,我们以工程数据库为基础,通过采用变复杂度建模技术与产品数据管理思想,设计开发了面向总体的航天器集成设计环境软件 SIDE。SIDE 按照航天器总体研制技术流程,以工程数据库为基础,引入产品数据管理和 MDO 技术,实现航天器总体设计过程中任务分析、方案可行性论证和总体方案设计的综合集成,提供分布式多学科协同设计、分析、优化以及流程管理的功能;作为专业人员的辅助设计分析与决策工具,能够支持快速形成总体方案分析树,进行方案评估与优选,以及总体参数优化,最终形成航天器总体设计的初步优化方案。

(1) 设计思想

航天器总体设计具有设计领域的复杂性、设计学科的层次性、设计变量的相关性、方案类型的多样性、优化准则的模糊性等特点,而工业部门存在设计资源的分布性、设计流程的阶段性和设计队伍的松散性等问题,给 MDO 的实际应用带来了困难,必须采取新的设计手段和组织管理模式。因此,软件针对面向设计的系统集成,重点考虑以下因素实现 MDO 与工程产品数字化设计的集成:a. 变复杂度建模。通过分解和协调等手段将航天器系统分解为与现有工程设计组织形式相一致的若干子系统,对各子系统建立包含经验模型、近似模型及精确分析模型在内的多种精度模型,在设计过程中不同研制阶段采用不同精度的模型,以此降低计算复杂度。b. 多学科集成。以灵活的方式集成学科模型代码和现有的专业分析工

具,实现设计、分析、优化过程的集成与模型交换信息的共享。c. 异地协同设计。支持分布式资源条件下异地协同与异步并行设计,建立基于网络的协同工作环境,快速形成总体方案。d. 产品数据管理。根据项目管理要求,定义相关角色及其数据操作权限(包括模型复杂度),建立用户与角色之间的直接关系。根据工作流与过程管理要求,按照航天器研制技术流程与专业划分,定义、运行和监控设计工作流程。

(2) 体系结构

软件充分考虑通用性、扩展性、灵活性和易用

性。软件由数据服务器、优化服务器及数台客户端构成 C/S 架构的分布式局域网,以数据库为中心形成协同设计环境。

(3) 软件功能

软件功能组成如图 4 所示,核心模块包括自主开发的基于 Oracle 的 PDM 模块,支持变复杂度建模的航天器分析与设计工具/代码,以及以 iSIGHT 为基础的后台优化模块,以进行有效的数据管理、流程管理、自动化工具/过程集成与封装、MDO 过程的集成与实现。总体方案 MDO 的优化问题可以进行灵活定义、执行和结果查看。

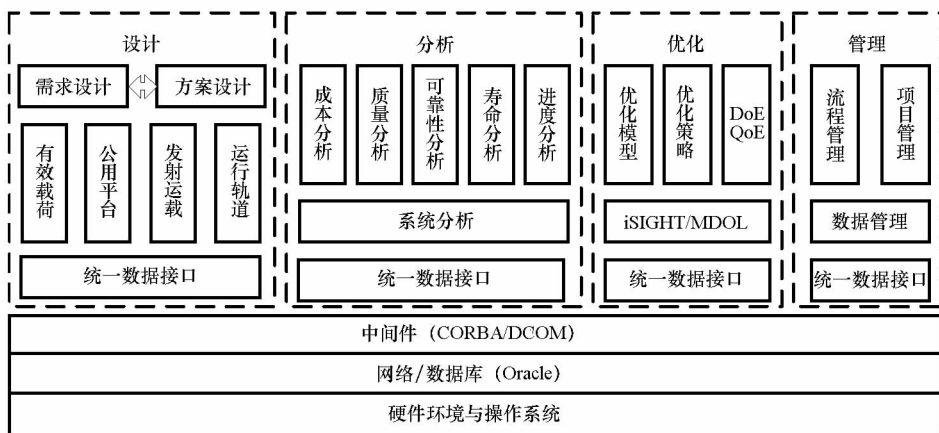


图 4 SIDE 功能层次结构示意图
Fig. 4 Function structure of SIDE

综上,SIDE 实现了 MDO 与航天器总体设计流程的集成,并进一步实现了组织多学科专业设计人员进行分布式协同设计的工作模式,从而为大大提高航天器产品的数字化设计效率与质量提供了有效手段。

4 结论

由于 MDO 在处理复杂系统多学科设计优化方面的优势,为产品开发阶段充分利用创造和设计的自由度、提高设计水平、降低产品全寿命周期费用提供了有效手段。以 MDO 为核心实现数字化设计优化与过程集成必将对产品设计理念、管理模式等方面的创新与转变产生深远影响。结合工程实际应用需求和飞行器开发技术的发展需求,未来 MDO 工程应用研究的发展趋势和研究重点有以下几个方面:

(1) 不确定性 MDO。工程实际中,产品开发、生产、使用、维护的各个环节都存在大量不确定性因素影响,在直接决定性能、成本和研制周期的飞行器开发过程中,就需要充分考虑各类不确定性因素广泛存在的客观实际,在进行产品设计优化的同时,提高产品稳健性和可靠性。因此,考虑不

确定性因素的 UMDO 是 MDO 的发展趋势,将其应用于工程实际将大大提高产品的设计水平^[30-32]。

(2) 产品族与系统的系统 (System of System, SoS) 的设计与联合优化。当前,许多系统不再视为单独的独立的产品,而是一个大的产品或系统族的一部分。产品设计过程中需要在考虑产品自身性能的同时,还需考虑该产品与所在大系统及其他产品之间的联系。因此,MDO 需要能够灵活解决产品开发中面临的系统优化、系统的系统优化等多层系统优化问题,从大系统的角度提高产品设计质量^[11]。

(3) 从概念设计一直延伸到制造的 MDO。在未来,MDO 将不仅局限于概念设计和初步设计,必将从设计延伸到制造与维护,沿着 CAD-CAE-CAPP-CAM 的路线发展。从美国洛克希德马丁公司的 IMD/WDE 环境和 NASA 的 AEE 环境中,就已清楚地看到 MDO 的这种拓展^[7, 28]。

(4) 面向 MDO 的可视化技术。如何在烟波浩渺的数据中查找有用数据,如何有效表示设计方案的各个方面以利于使用人员理解多维多目标的设计空间,如何将多学科的物理现象进行直观

表述,都需要利用可视化技术,这是复杂产品MDO工程应用必须解决的问题^[33]。

(5)多处理器并行MDO计算。在当前计算水平下,并行计算是MDO不可或缺的工具,同时这也带来了组织上的复杂性,能够方便实施多目标设计的并行计算工具将大大提高MDO的能力,并加大MDO的应用深度。

未来MDO的工程应用研究除了需要在上述几个方面深入展开外,为了提高MDO研究水平和应用效果,还应大大加强政府、工业部门和院校之间的合作,根据工程实际需要指导开展MDO理论研究,通过MDO理论的进步促进工业部门产品开发水平的提高。

参考文献:

- [1] 王振国,陈小前,罗文彩,等. 飞行器总体多学科设计优化理论与应用研究[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [2] Chen X Q, Yan L, Luo W C, Xu L, et al. Research on Theory and Application of Multidisciplinary Design Optimization of Flight Vehicles [R]. AIAA 2006 - 1721, 2006.
- [3] Chen X Q, Gao S W, Luo W C, et al. Study on Multidisciplinary Design Optimization Theory and Application in Flight Vehicles [C]//8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, June 1 - 5, 2009, Lisbon, Portugal.
- [4] de Weck O, Agte J, Sobieszcanski-Sobieski J, et al. State-of-the-Art and Future Trends in Multidisciplinary Design Optimization [R]. AIAA 2007 - 1905, 2007.
- [5] 陈小前. 飞行器总体优化设计理论与应用研究[D]. 长沙:国防科技大学,2001.
- [6] 罗文彩. 飞行器总体多方法协作优化设计理论与应用研究[D]. 长沙:国防科技大学,2003.
- [7] 赵勇. 卫星总体多学科设计优化理论与应用研究[D]. 长沙:国防科技大学,2006.
- [8] 许林. 飞行器MDO过程及相关技术研究与应用[D]. 长沙:国防科技大学,2009.
- [9] 颜力. 飞行器多学科设计优化若干关键技术的研究与应用[D]. 长沙:国防科技大学,2006.
- [10] 吴先宇. 超燃冲压发动机一体化流道设计优化研究[D]. 长沙:国防科技大学,2007.
- [11] 昂海松,余雄庆. 飞行器先进设计技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [12] 钟毅芳,陈柏鸿,王周宏. 多学科综合优化设计原理与方法[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2006.
- [13] 刘组源,冯佰威,詹成胜. 船体型线多学科设计优化[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [14] 岳珠峰,等. 航空发动机涡轮叶片多学科设计优化[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [15] AIAA Multidisciplinary Design Optimization Technical Committee. Current State of the Art on Multidisciplinary Design Optimization (MDO) [R]. An AIAA White Paper, ISBN 1 - 56347 - 021 - 7, 1991.
- [16] Sobieszcanski-Sobieski J, Haftka R T. Multidisciplinary Aerospace Design Optimization Survey of Recent Development [R]. AIAA - 96 - 0711, 1996.
- [17] Wei Y X, Chen X Q, Luo W C. Approximation Based Combined Optimization Methodology [C]//6th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, 2010, Kyoto, Japan.
- [18] Zhu X F, Luo W C, Wei Y X. An Evaluation Method of the Generalization Ability of Surrogate Model [C]//6th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, 2010, Kyoto, Japan.
- [19] 魏月兴. 多学科设计优化近似方法理论与应用研究[D]. 长沙:国防科技大学,2009.
- [20] 朱雄峰. 飞行器MDO代理模型理论与应用研究[D]. 长沙:国防科技大学,2010.
- [21] Luo W C, Gao S W, Yang W W, et al. Subspace Decomposition and Discarding Optimization [C]//8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, June 1 - 5, 2009, Lisbon, Portugal.
- [22] Luo W C, Chen X Q. Multimethod Collaborative Optimization Algorithm and Its Application on Multidisciplinary Design Optimization [C]//6th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, 2010, Kyoto, Japan.
- [23] 郭忠全. 多学科设计优化方法在卫星总体设计中的应用研究[D]. 长沙:国防科技大学,2005.
- [24] 杨维维. 快速机动小卫星总体设计及控制技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2006.
- [25] Yao W, Chen X Q, Wei Y X, et al. A Game Theory Based Composite Subspace Uncertainty Multidisciplinary Design Optimization Procedure [C]//8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, June 1 - 5, 2009, Lisbon, Portugal.
- [26] Xu L, Wu X Y, Yan L, et al. System Design of Missile Based On CO With Variable Complexity Modeling [R]. AIAA 2006 - 2058, 2006.
- [27] Xu L, Yan L, Chen X Q, et al. Enhanced Bi-level Integrated System Synthesis 2000 [R]. AIAA 2009 - 2202, 2009.
- [28] Zhao Y, Chen X Q, Wang Z G. SIDE: A Tool for Integrated Multidisciplinary Design Optimization of Spacecraft [R]. AIAA - 2006 - 7119, 2006.
- [29] Wu X Y, Xu L, Jin L, et al. The MDO Environment for Hypersonic Vehicle System Design and Optimization [R]. AIAA 2006 - 5191, 2006.
- [30] 李晓斌. 不确定性设计优化理论与方法及其在固体助推发动机设计中的应用研究[D]. 长沙:国防科技大学,2006.
- [31] 姚雯. 不确定性MDO理论及其在卫星总体设计中的应用研究[D]. 长沙:国防科技大学,2007.
- [32] 姚雯,陈小前,赵勇. 基于不确定性MDO的卫星总体优化设计研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 68 - 76.
- [33] 欧海英. 固体火箭发动机设计优化可视化方法及其应用研究[D]. 长沙:国防科技大学,2006.