

复杂产品多学科设计优化技术*

马明旭 王成恩 张嘉易 黄章俊

(东北大学流程综合自动化重点实验室 沈阳 110004)

摘要: 针对复杂产品设计过程中存在学科组成多、学科高度耦合、复杂产品不能进行全面优化设计的问题, 指出在复杂产品设计中应用多学科设计优化(Multidisciplinary design optimization, MDO)方法的必要性。阐述MDO的国内外发展现状及其基本概念。分析MDO的知识体系, 总结出MDO研究应包括理论和应用两大方面, 前者主要包括数学建模、系统分解、优化框架、近似模型、灵敏度分析和优化算法等理论方法, 后者主要涉及软件集成、数据转换、设计数据管理、可视化、项目管理和并行计算等技术, 并指出这些理论方法与应用技术间的关系。结合实际情况, 建议我国应在理论创新、集成平台开发和技术推广等方向开展MDO研究工作。

关键词: 多学科设计优化 系统分解 优化框架 软件集成

中图分类号: TP391 TH122

Multidisciplinary Design Optimization for Complex Product Review

MA Mingxu WANG Chengen ZHANG Jiayi HUANG Zhangjun

(Key Laboratory for Process Industry Automation, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract: It is very important to implement multidisciplinary design optimization (MDO) method in the complex product design process because there is the problem which the whole optimization design of the complex product can't be executed for the numerous disciplinary kinds and it's high coupling. The state of the art and the concept of MDO are expatiated on, and then a summarization for the knowledge structure of MDO is shown with the theory including mathematic modeling, system decomposition, optimization framework, approximation model, sensitivity analysis, optimization method and the applications including software integration, data transformation, design data management, visualization, project management, parallel computation. The relation between the theoretical methods and the application technologies is indicated. Some future works are pointed out to be practiced in China including theoretical innovation, integration platform design, and MDO methodology spread.

Key words: Multidisciplinary design optimization System decomposition Optimization framework Software integration

0 前言

复杂产品是指客户需求复杂、产品组成复杂、产品技术复杂、制造过程复杂、项目管理复杂的一类产品, 包括航天器、飞机、汽车、舰船、发电机组和武器装备系统等^[1]。它是一个集多种学科知识于一体的综合体, 其中的每种学科都需要专门的领域专家进行各自的设计、仿真和优化等活动。由于学科之间存在复杂的耦合关系, 学科间还必须及时交换设计意图、设计参数等信息, 据此调整各自的

设计参数, 改变设计状态变量, 从而使各学科的综合指标达到最优, 才能使复杂产品的整体性能达到最优。传统的串行设计优化方法忽视了学科间的相互作用, 只片面强调某个学科的重要性, 设计优化时以该学科最优为目的, 所以它只能得到局部最优解而非全局最优, 且其设计周期长、成本高。多学科设计优化(Multidisciplinary design optimization, MDO)技术的出现使我们在复杂产品的设计中获得全局最优成为可能, 其主要思想是在复杂系统整个设计过程中充分利用分布式计算机网络技术来集成各学科的知识, 按照面向设计的思想来集成各个学科的分析工具, 通过有效的设计和优化策略组织和管理设计过程, 充分利用各学科相互作用产生的协调效应获得系统整体最优解^[2]。

* 辽宁省博士启动基金(20071022)和解放军总装备部武器装备预研基金(9140A18010106LN0101)资助项目。20070706 收到初稿, 20080128 收到修改稿

复杂产品的相关产业是一个国家的经济支柱之一，其发展状况决定着该国经济建设发展的进程。其中飞机、卫星、舰船和导弹等大型武器装备在国防建设中更是发挥着重要的作用，可以说，复杂产品的竞争能力直接关系到国力的兴衰。因此，不论是从经济建设还是国防事业哪一方面看，快速高质量地开发复杂产品是极为重要的。在复杂产品设计过程中应用 MDO 技术将大大提高复杂产品的整体性能，缩短设计周期，进而促进国民经济发展，加强国防能力。所以，开展面向复杂产品的 MDO 技术研究具有重大意义。

本文阐述了 MDO 的发展现状、概念和内涵，总结其知识体系，并从理论和实际两方面全面论述了 MDO 的研究内容，最后针对我国实际情况，提出了我国亟待开展的 MDO 问题研究重点和方向。

表 国外 MDO 主要研究机构及相应的研究内容与成果

研究机构	工作内容	研究成果/应用领域
AIAA, MDO-TC	撰写 MDO 白皮书，召开会议，奖励为 MDO 作出突出贡献者	1991 年，MDO 白皮书；1998 年，MDO 工业应用与需求白皮书
NASA, MDOB	识别、发展和演示多学科设计优化方法；向工业界推广 MDO 技术；促进 NASA 与工业界和大学相关的 MDO 基础研究	火星探路者、高速民机、气动塞式喷管、可重复使用运载器以及卫星概念设计；建立用于测试 MDO 方法过程的测试问题集；对多种 MDO 方法过程进行了比较
佐治亚理工学院, ASDL	MDO 基础理论与应用研究	基于代理的 MDO 方法、多极分区相应面方法、多学科的分解协调法
布法罗大学	MDO 基础理论研究	系统分解方法；解耦机制
斯坦福大学, ADG	MDO 基础理论与应用研究	协作优化方法 CO；应用于飞机设计
圣母大学, NDDAL	大型系统的 MDO 设计策略	并行子空间优化(CSSO)、顺序近似方法、多目标协作优化、鲁棒设计和基于决策的设计
佛罗里达大学结构与多学科优化小组	响应面近似技术、遗传算法、全局并行优化技术	结构和多学科设计问题基于数学优化的合理设计过程
俄罗斯空间科学研究院	IOSO，主要是提高优化算法的适应性及精度	航空航天/汽车
欧洲 MDO 项目	开发基于 MDO 的分布式计算设计引擎(CDE)；引入新的设计方法，集成异地异构的专家设计团队；使用 CDE 工具和分布式专家团队完成 BWB 飞机的设计	飞机设计

MDO 的定义尚未统一，AIAA 的 MDO 白皮书中给出 MDO 的三种定义^[6]：① 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。② MDO 是指在复杂工程系统的设计过程中，必须对学科(或子系统)之间的相互作用进行分析，并且充分利用这些相互作用进行系统优化合成的优化设计方法。③ 当设计中多个因素影响到另外的所有元素时，确定应改变哪一个因素以及改变到什么程度的一种设计方法。

这些定义分别反映了人们在各方面对 MDO 的不同见解。虽然其侧重点各不相同，但从这些内容中可分析出 MDO 具备如下特点：① 从理论体系定

1 MDO 发展与概念

MDO 的思想在 20 世纪 50~60 年代已经出现^[3]，当时苏联在米格飞机的设计中就体现了多学科设计优化的思想，这使该飞机虽然使用了很多当时已经过时的设备，但其整体性能却优于美国那些使用当时高技术装备的战斗机。由此，美国认识到了 MDO 发展的重要性，并逐步开展了 MDO 技术的研究工作。1991 年美国航空航天学会的 MDO 白皮书中正式发表了 MDO 的定义、研究内容以及发展方向，MDO 技术从此得到了迅速发展。

目前，发达国家对 MDO 已作了较为深入的研究，其研究机构和研究成果也比较多，如下表所示。由此可以看出国外对 MDO 的研究已经涵盖了理论和实际应用的各个方面^[4-5]。

位角度而言，MDO 是一种设计方法论。② 其研究对象是复杂产品设计过程，直接服务于复杂产品设计。③ 其研究时间跨度为全部产品设计生命周期。④ 其基本思想是利用多学科之间的协同作用，实现产品整体性能最优。

2 MDO 知识体系

MDO 的知识体系是随着研究的不断深入而逐步丰富完善的，AIAA 技术委员会^[6]最早给出 MDO 的研究内容包括信息科学技术、面向设计的学科分析和多学科设计优化过程三部分。1998 年，AIAA

根据工业界的实际需求对其作出修正，确认为四项内容^[7]：① 设计表达与分解。② 分析能力与近似方法。③ 信息管理与处理。④ 管理与文化实施。每一部分还包含一些具体研究方向。

在大量分析研究基础上，本文提出 MDO 知识

体系应分为理论方法和支撑平台两大部分。理论方法为 MDO 应用提供理论支持，支撑平台则为理论方法研究提供一个友好的应用环境，它们相互促进，共同发展，其构成关系如图 1 所示。

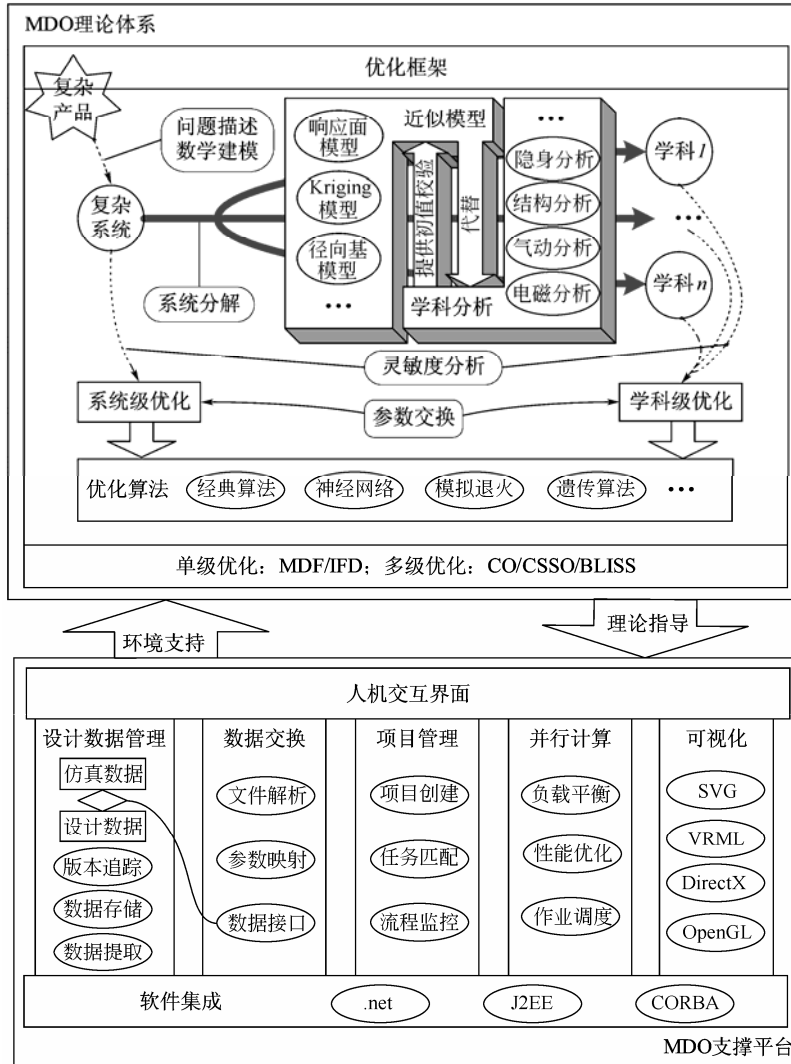


图 1 多学科设计优化知识体系

MDO 理论研究分为问题的数学建模、系统分解、优化框架、近似模型、灵敏度分析和优化算法(设计空间搜索算法)等几个方面。复杂产品设计问题首先经过问题描述(即数学建模)建立出问题的数学优化模型，再经过系统分解，将复杂系统分解为多个学科级子问题，其中每一个学科具有自己的子优化模型，这些子模型应用各自的分析工具(如仿真工具)对问题进行学科分析。学科分析所用分析模型是比较精确的，它的分析时间通常很长。而在系统优化中，须要反复进行学科分析。如果在进行全系统优化时还采用真实的学科分析模型，那么其耗时是极其巨大的。所以在整个的系统优化过程中，往往使用近似模型替代学科分析中较精确模型，以减少系

统优化时间。对于一些连续变量的特殊问题，可以使用灵敏度分析来协调求解系统优化。但对大多 MDO 问题而言，更多采用多级优化框架来求解系统优化问题。不论是系统级优化还是学科级优化，都使用各种优化算法在设计空间中搜索优化解。这些研究都试图从不同的途径解决 MDO 研究中一直存在的两个难题——计算复杂和组织复杂^[2]。

在工程应用中，提供一个友好的 MDO 应用环境以方便人们解决各种实际问题尤为重要。如图 1 所示，MDO 支撑平台必须满足软件集成、数据转换、设计数据管理、可视化、项目管理和并行计算等基本功能要求。MDO 设计思想是在产品设计中利用所有已有的先进技术，所以 MDO 支撑平台的

首要任务就是集成各种已有的设计分析工具。由于这些软件的数据格式各不相同,就必须进行数据转换以达到数据共享的目的。复杂产品的设计数据庞杂,所以也必须进行专门管理才能有效地使用这些数据。为了便于设计人员使用,对设计仿真数据进行可视化工作也是必须的。将复杂产品设计作为一个项目来进行管理已经被认为是一个有效的开发手段,项目管理也是实现各种优化框架的工具。MDO 的计算量非常大,而大型计算机的使用费用又非常高,因此采用并行计算技术相对廉价的 PC 机进行是目前 MDO 发展的一个重要方向。这些这些功能需要在如 CORBA、J2EE、.NET 等分布式信息集成框架上开发实现以适应目前分布式协同设计的要求。

3 MDO 理论方法

MDO 理论中,优化算法是指在设计空间中搜索最优解的方法,它采用传统的搜索方法(如单纯型法)和一些进化算法(如神经网络),这类算法可以广泛地应用到学科级优化和系统级优化中。学科分析工具也就是包括各种仿真系统在内所有的帮助人们分析学科情况的工具,如各种 ANSYS 等商业化软件,一些用户自编的专门分析工具等。由于两方面技术研究比较完善,这里限于篇幅不加以介绍,具体内容可参阅相关文献,下面主要论述其他几个方面内容。

3.1 数学建模

MDO 研究的对象是复杂产品的设计优化问题,首先应以严谨的数学描述方式表达出准确的复杂产品的设计优化问题,即 MDO 问题的数学建模。只有 MDO 问题的数学模型准确的建立起来,我们才能正确的求解问题,后续的研究才能进行。由于 MDO 的数学模型与其具体应用密切相关,这里仅给出 MDO 问题的一般数学表达,具体描述形式如下

$$\min f(x, u(x)) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } g_i(x, u(x)) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中, x 为设计变量矢量, f 为目标函数, g 为约束函数, $u(x)$ 是系统分析方程 $A(x, u(x))$ 确定的状态方程。

$$A(x, u(x)) = \begin{pmatrix} A_1(x, u_1(x), \dots, u_N(x)) \\ \vdots \\ A_N(x, u_1(x), \dots, u_N(x)) \end{pmatrix} = 0 \quad (3)$$

式中, N 为 MDO 子系统的数目。式(3)即是多学科分析(Multidisciplinary analysis, MDA)方程,其中的

N 个子系统分析方程确定了学科分析和交叉学科耦合关系,状态方程 $u(x)$ 一般以耦合差分方程描述。这里假定系统的多目标函数可通过加权法和约束法转化为式(1)的单目标函数 f 。

3.2 系统分解

系统分解就是将整个系统按照某些规则,分解成多个独立的子系统的过程。系统分解不仅能够提高优化效率,更重要的是使原问题简化,使分解前难以求得有效解的复杂系统经过分解后可以获得满足要求的优化结果。系统分解的关键是在保证系统整体性能最优的前提下,将该系统按照所包含的学科(子系统)和一定规则进行分解和重新规划,从而简化系统中的约束和耦合关系,降低系统设计的复杂性。系统分解的一个重要原则就是尽量减少各子系统间的耦合。如图 2 所示^[8],系统调整前有三个学科耦合,而在调整后则减少到两个学科耦合,这大大的减少了系统计算量。MDO 分解算法根据问题目标函数和约束及其相互之间的连接强弱,把系统优化问题转换为主问题和子问题集。文献[9]研究了基于系统分解的多学科集成设计过程,给出了层次式多学科集成管理模型,开发了相应的多学科集成设计工具。文献[10]研究了产品开发过程中三种不同的复杂系统多领域分解方法,即分别基于物理部件、基于学科分析和基于任务过程的系统分解方法,具体分析了 MDO 中决策支持工具的开发和实现。文献[11]研究了 MDO 中的准分解理论,并且将准分解理论中的连续变量约束条件扩展到离散的子系统变量。

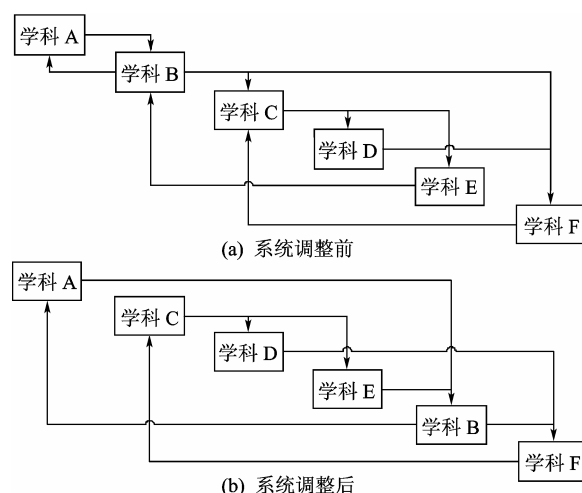


图 2 耦合系统的调整

3.3 灵敏度分析

灵敏度分析^[12]最早应用于控制系统的设计中,用于分析控制系统中参数的对变化系统的影响。在 MDO 理论研究中,SOBIESKI^[13]于 1998 年提出的

全局敏感方程(Globe sensitivity equation, GSE)是将灵敏度分析应用于 MDO 研究的重大进展。GSE 是一组可以联立求解的线性代数方程组,通过 GSE 可将子系统的灵敏度分析与全局系统的灵敏度分析联系在一起。从而得到系统的灵敏度,最终解决耦合系统灵敏度分析和多学科设计优化问题。通过 GSE,可以预测出一个子系统的输出对另一个子系统输出的影响,还可以确定该输出对特定设计变量的导数。GSE 方法通过使用局部灵敏度反映了整个系统的响应,求解 GSE 所得的全导数反映了系统中各子系统之间的耦合。由于 GSE 是专门针对复杂的高度耦合系统提出的,利用一阶灵敏度的性质来分析相互耦合子系统间关系,所以它只能处理连续变量问题,而不能解决离散变量或者混合变量问题,其应用受到很大限制。

3.4 优化框架

优化框架包括单级优化框架和多级优化框架。单级优化是指将系统作为一个整体进行优化设计的策略。单级优化框架^[14]主要有:多学科可行方法(Multidisciplinary feasible method, MDF)和单学科可行方法(Individual discipline feasible method, IDF)等。

由于单级优化仅仅在学科(子系统)之间的耦合情况非常简单时才有效,因此目前国内外学者对于耦合情况复杂的系统进行多学科优化时基本上都采用多级优化框架。多级优化是指将系统分为系统级和学科级两个级别,并且分别进行分析优化的策略。目前研究比较多的多级优化框架有:并行子空间(Concurrent subspace optimization, CSSO)、协同优化(Collaborative optimization, CO)和两级集成系统综合(Bi-level integration system synthesis, BLISS),下面分别论述。

(1) CSSO 将系统设计变量分配到各子系统,每个学科独立进行优化,各学科的优化变量互不重叠,学科分析需要的已分配给其他学科的系统全局变量可以通过耦合函数形式来传递^[15]。每个子空间(子系统)的优化需满足子系统的约束,也可以包含其他子系统的约束。优化过程中,子系统的约束和目标由子系统分析计算,涉及来自其他子系统的耦合变量和约束则用全局灵敏度方程。文献[15]在系统响应连续和离散变量的导数都存在的假设下进行了包含混合变量 CSSO 的初步研究。扩大了 CSSO 适应范围,但对包含各种设计变量的复杂 MDO 问题, CSSO 方法仍难以处理。

(2) CO 是在一致性约束优化算法基础上提出的一种多级 MDO 算法^[16]。CO 将 MDO 问题分解为层次式的两级优化结构。CO 的顶层是系统级优化器,

对多学科变量进行优化,系统级目标以满足学科间约束的兼容性和最小化系统为目标。每个子系统优化器在子空间设计变量子集与子空间分析得到的计算结果以最小方差方法进行优化。在满足子空间约束的同时,求系统设计变量。优化过程中,系统级设计变量作为固定值考虑。由于子空间分析的重要性,学科设计变量与学科间交叉设计变量都在子空间分析中作了设置。实际应用中,学科间一致性约束通常采用不等式处理。CO 方法是由单学科可行方法(IDF)发展而来,所以它具有 IDF 的特点,另外由于设计人员可以使用子系统级求解器或优化器,这样就对子系统的设计有了更大的决策权,并且在优化问题的规模扩大时,CO 并行优化方法不像 MDF 那么敏感,因此比较适合解决大规模复杂工程系统的多学科设计优化问题。

(3) BLISS^[17]方法将多学科问题的设计变量分成两层:系统级设计变量和学科级设计变量,相应地存在系统级优化过程和学科级优化过程。其中,系统级优化过程优化少量的全局设计变量,并行的学科优化则优化本学科的局部设计变量。在 BLISS 优化过程中,用最敏感分析数据将学科优化结果和系统优化联系起来。类似于 CSSO 方法,在优化过程开始时,需要进行一次完全的系统分析来保证多学科可行性,并且用梯度导向提高系统设计,在学科设计空间和系统设计空间之间进行交替优化。BLISS 方法的最大好处在于它将整个系统分析与细节分析分离。

目前大多 MDO 框架研究都是基于这三类多级优化框架展开,如文献[18]研究了基于约束网络的并行协同设计模型和框架,提出了采用一致性检验算法确定参数区间,并给出了相应的多学科设计优化的方法。文献[19]阐述了多学科优化设计的主要思想和内容,分析了 MDO 的求解策略和代理模型技术。文献[20]归纳了 MDO 框架应该具有的特征和功能,分析、评估了几种主要的通用 MDO 计算框架。文献[21]提出的分布式 MDO 框架利用网络技术、 workflow 技术、适配器和代理(Agent)等技术,实现了多学科设计问题的协同、设计过程的自动执行、工具模块的封装、系统资源的协调及动态的负载平衡,并开发了基于 J2EE 的原型系统。文献[22]提出的 MDO 框架采用面向代理协商的方法来解决计算资源的管理和负载平衡问题。文献[23]提出的基于多代理的框架使代理具有混合(连续的和离散的)特性和交互能力。文献[24]采用基于 Web 的 MDO 系统平台来满足 MDO 工程实践的需要,并且在该平台上实现了 BLISS 框架。尽管人们已经做了许多工

作,但目前优化框架研究还处于探索阶段,还远未成熟,还都存在一些相应问题,并且没有得到实际工程上的广泛应用。

3.5 近似算法

在优化过程中,不可避免地要对设计空间进行有效地搜索,这样就必须将设计空间的搜索程序同学科分析结合起来。但是设计空间的搜索程序无法与多学科分析直接耦合,而是对目标函数和约束给予近似地表达,并且这种近似必须易于计算,然后将设计空间的搜索与目标函数和约束的近似耦合起来,得到近似耦合问题的最优解后,通过最优解处的重分析结果修改近似模型,如此往复。这样就避免了在设计空间搜索过程中频繁地进行极其耗时的多学科分析,从而大大降低了设计空间搜索工作的计算量。

近似算法中比较重要的有响应面模型、Kriging 模型和径向基函数模型。响应面模型^[25]是一种利用统计学和数学的知识,通过简单的表达式,通常是低阶的多项式对实际的分析代码作逼近处理,以获得较简单的模型,同时也有利于分析计算的方法。Kriging 模型^[26]是一种基于随机过程的估计方差最小的无偏估计模型,具有局部估计的特点,而且相关函数的连续性和可导性也比较好,在解决非线性程度较高的问题时往往也能取得比较理想的拟合效果。径向基函数是以待测点与样本点之间的欧氏距离为自变量的一类函数。以径向函数为基函数,通过线性叠加构造出来的模型即为径向基函数模型^[27]。在同时考虑模型精度和鲁棒性的情况下,径向基函数模型是最为可靠的。

国内外学者利用近似算法在多学科优化方面做了许多研究工作,如文献[28]在一致性约束算法和并行子空间算法基础上提出了一种基于神经网络响应面的多学科优化设计算法,并通过实例初步证明了该方法的可行性和有效性。文献[29]介绍了多学科设计优化中的多项式响应面模型、径向基函数模型和 Kriging 模型,初步分析这些近似模型的构造方法、基本特征和适用范围。文献[30]分析并提出了一种可以用作协同优化方法中系统级协调算法的动态松弛算法,并利用实例初步证明了给算法的有效性。文献[31]提出的 MDO 框架采用神经网络构建响应面的方法,在多学科设计优化的稳健性方面取得了较好的效果。文献[32]研究了多目标并行子空间优化方法中设计参数的消减和综合,提出了三种实现多目标并行子空间优化框架中消减设计参数的具体方法。

4 MDO 支撑平台

一个完善的 MDO 支撑平台应具备^[33]:界面友好、稳定性、有效性、可重构性、模块化设计、支持交互设计、支持多种数据源,开放性,支持以多种方式加入到设计空间、支持优化算法交叉使用,设计结果的可视化、支持与定义输出格式、提供全方位的帮助文档,支持产生数据转换成预设计模型和代码等多种功能。从 20 世纪 90 年代开始,对多学科设计优化集成平台的研究已经成为国际研究的热点。科研人员不断将理论研究成果向工程应用转化,并已演化成一些商业软件。其中比较成熟的集成平台有 Engineous 的 iSIGHT, LMS 的 Optimus, Phoenix 的 ModelCenter, NASA 的 FIDO、AEE, Altair 的 HyperWorks, CFD 研究公司的 MDICE-AE 等。本文认为 MDO 支撑平台至少应包括如图 1 所示的软件集成、数据交换、设计数据管理、项目管理、并行计算和可视化等技术。这些技术已被成功验证并得到实际应用的。这里不详细介绍这些技术细节,仅简单介绍概况及其在 MDO 支撑平台中的应用。

4.1 软件集成

MDO 中的软件集成技术主要研究商业软件和已有的遗留软件的集成。对商业软件的集成主要研究主要包括:① 对复杂产品设计过程中经常使用的 CAD 设计软件、CAE 分析软件、有限元分析软件(如 ANSYS)、结果仿真软件等进行集成的方法。② 研究如何利用商业软件各自提供的 API 接口实现功能和界面的合理有效集成,并给出相应的软件集成模型的结构和相关文档。对遗留软件的集成研究主要是对企业和研究机构在长期的工程实践中自行开发和积累的计算程序和专业软件的集成,包括:① 分析遗留软件自身的复杂构成和封装约束。② 研究对遗留软件进行分析、封装和集成的方法。

软件集成技术的研究主要是基于三种分布式信息架构:CORBA、J2EE 和 VS.NET,每种信息架构基础上都有许多软件集成的研究成果。如文献[34]的 WebBlow 是一个基于 J2EE 平台开发的 Web/Agent 的多学科设计优化环境。文献[35]研究的 MEDIC 系统框架,利用软件集成技术和多代理技术对一些商业软件和遗留软件的进行集成,实现了 workflow 管理、并行计算和容错处理等功能。文献[36]给予 CORBA 实现了复杂系统(产品)集成制造工程平台。文献[37]研究了航空发动机涡轮设计的多学科综合集成方法,建立了航空发动机涡轮设计集成

平台。

4.2 面向复杂产品设计的项目管理

项目管理是一种为了在确定的时间范围内完成一个既定的项目,通过一定的方式合理地组织有关人员并有效地管理项目中的所有资源(人员、设备等)与数据,控制项目进度的系统管理方法。相对于一般项目而言,复杂产品协同开发集成平台中的项目管理更为复杂,具有参与人员多、协作部门多、应用学科种类多、操作平台各异、数据结构各异以及设计流程复杂等诸多特点。

复杂产品的开发是以项目的形式出现的,通过任务分解(遵循系统分解结果),制定任务执行计划,绑定任务与设计数据(如仿真程序、近似模型、搜索算法的输入输出参数),分派任务,监控任务的执行。MDO理论中各种优化框架直接由项目管理实现,其他的近似模型、搜索算法也是通过项目管理的任务绑定与整个复杂产品设计过程联系在一起。所以,MDO中的项目管理除了完成一般项目管理系统必备的功能(如项目创建、监控、修改等功能)外,还需解决如下问题:① MDO框架与近似算法如何与项目管理的无缝灵活融合。② 实现相关资源的优化配置及业务过程的集成化运行^[38]。③ 采用工作流技术和数据接口技术实现项目管理中子任务间信息交互,任务流的嵌套、监控和修改^[39]。

4.3 设计数据管理

对产品设计数据最相关的研究是PDM/PLM。但传统的PDM/PLM设计数据管理都以文档管理和产品结构为基础,粗粒度大,不适合处理复杂产品设计不同阶段的设计数据。MDO的设计数据具有粗粒度多样,交换频繁,要求具有历史纪录追踪等特点。从产品设计生命周期角度考虑,根据产品设计数据在产品生命周期中的位置分为四种:过程设计数据(设计数据)、半成品产品数据(受控数据)、成形产品数据和系统数据。从数据存在形式上分为两种:文档(文件)数据管理和离散逻辑数据管理。

文档(或者文件)格式数据管理的优点是以文件为原子管理单位进行处理^[40-41],简化了管理逻辑,技术上便于实现,但是这种管理方法只能实现文档文件中极少数关键数据实现查询/比较等管理,不能深入到数据内部,很难了解文档文件的深层次内容,造成极大不便。离散逻辑数据管理^[42]采用关系数据库的方法实现数据的管理,在保证各数据之间关系的同时能深入到数据内部,缺点是离散数据格式的不定性很难统一化。针对这两种管理形式的优点和缺点,采用文件管理结合离散数据管理的综合方式,是目前实现复杂产品设计全生命周期数据管理的重

要途径。

4.4 数据交换

在MDO优化过程中,学科间信息的交换是极为频繁的,特别是由于复杂产品设计过程中存在设计成员异地、操作系统异构,设计工具异种,设计结果存储方式异类等诸多差异情况,使得MDO中的信息交换异常困难。数据交换技术是解决上述问题的关键技术之一。

数据交换就是对现有的CAD、CAE软件的输入输出文件格式进行转化,以利于设计信息参数的自动化提取及模型数据的标准化格式网络传输。另外,不同CAD软件之间的模型数据转化多以IGES格式及STEP标准为基础^[43-44],但STEP标准不如IGES格式普及,因而一般都选用IGES格式标准,通过标准格式文件进行CAD软件间模型数据的一致化共享。CAD与CAE之间的模型数据交换主要是各种CAD软件设计结果通过IGES格式标准转化为CAE软件可识别的数据模型。

在MDO研究中^[45-46],设计参数代表复杂产品的设计优化信息,学科间信息交换主要是通过设计参数完成的。目前主要从研究设计参数的形式化定义和标示方法,在数据文件中定位和操作设计参数。在此基础上,提出通用设计参数映射方法,将非结构化参数转化为结构化参数,并且动态关联非结构化数据集和结构化数据集。在设计数据全生命周期内,将设计数据从逻辑和物理上关联起来,管理设计数据的创建、获取、存储、传递、处理和维护等活动。目前在数据映射方面研究比较多的是基于本体和XML技术的研究^[47-48]。

4.5 并行计算

解决MDO优化过程中遇到的计算困难的通常办法是使用高性能计算机,而高性能计算机的使用成本又很高,所以采用多台相对廉价的服务器进行并行计算成为必然。并行计算^[49]指通过网络相互连接的两个以上的处理机相互协调,同时计算同一个任务的不同部分,从而提高问题求解速度,或者求解单机无法求解的大规模问题。其目的为提高计算速度和扩大问题求解规模。并行计算研究包括负载均衡、性能优化和作业调度等内容。

在MDO平台研究中,主要利用现有比较成熟的并行算法,将它们应用到MDO平台中。一般情况下,已有的请求分配算法能很好解决分布式计算中服务器地址选择的问题,减少计算响应时间,但是MDO应用涉及到许多异地、异构的情况,采用Web形式是技术发展的必然,而现有网络资源的有限、生命力脆弱、服务质量等级较差的特性是Web

服务最基本的瓶颈问题。在处理分布式计算问题中,主机地址选择占据有重要的地位。当前的地址选择大多从解决并行计算的负载均衡角度进行处理,现有的负载均衡研究主要有 8 种基本调度算法,在这些算法基础上派生出很多算法,如 WRR num 和 WRR time^[50]是基于轮转法的动态加权算法,前者依据活跃进程个数而后者依据请求响应时间计算每台服务器当前的负载权值。Round-trip 和 Xmitbyte^[51]是基于最小连接数的动态加权算法。

4.6 可视化

在 MDO 中,可视化是一项基础技术,它广泛地应用于产品设计优化的各个方面。可视化技术的核心是数据场的可视化^[52]。从研究对象看,可视化技术可用于:① 近似模型的可视化。为了提供优化速度,在 MDO 中大量使用近似模型替代高精度仿真模型,不同类型的近似模型适合替代不同的高精度模型。设计人员在可以直接观察到的图形化显示近似模型的情况下,可以更加方便准确的选出更为逼近高精度仿真模型的近似模型。② 搜索算法的可视化。MDO 中可以利用多种搜索算法寻找设计空间中的最优解。每种算法均有各自的使用范围。搜索算法的可视化交互环境便于设计人员选择合适的搜索算法。③ 结果数据的可视化。针对企业已经拥有的较为成熟的产品设计计算模块,将其输入、输出数据或计算过程进行仿真,辅助设计人员对设计数据进行图形查看、控制、比较、优化和管理,实现更高效的设计开发。

从技术实现上看,可视化技术包括设计数据的实时处理及显示、设计数据的交互处理、设计结果数据的数据后处理、可视化仿真的生成算法等内容。可视化技术主要采用 STEP-IGES 转换器或者 XML 矢量图来转换各种 CAD 文件和其他产品图形数据,开发通用的产品数据可视化工具系统^[53]。

5 我国 MDO 研究现状及方向

我国学者对 MDO 的研究起步较晚,从最早有公开发表文献的 1999 年到目前不过 8 年时间。但随着国际间技术交往的不断加深,我国也逐渐开始重视起 MDO 技术的研究。包括航天二院、西北工业大学、北京航空航天大学、国防科技大学、南京航空航天大学、东北大学和大连理工大学等一些科研院所陆续加入到研究 MDO 技术的行列中。在我国科研人员的不懈努力下,这些科研部门已经取得了许多研究成果。这些成果可分为以下三类。

(1) 介绍学习国外多学科优化设计技术。如文

献[29]介绍了多项式响应面模型,径向基函数模型和 Kriging 模型等 3 种多学科设计优化中常用的代理模型。通过构造某机翼展向气动载荷分布的代理模型,对这 3 种模型的效果进行了评估,并对这些代理模型的构造方法、基本特性和适用范围进行了分析研究。文献[54]对多学科可行法(MDF)、单学科可行法(IDF)和协同优化方法(CO)三种多学科优化方法进行比较,阐述了各种方法的结构体系及其特点。

(2) 对已有多学科优化方法的改进验证。如文献[55]在现有的 CO 方法和基于响应面 CSD 方法的基础上,提出基于响应面的协同优化方法——RS-CO。该方法继承了 CO 方法无需系统分析的优点,同时克服了 CO 方法子系统分析计算量过多和不能处理混合变量的优化问题的缺点。文献[56]分析了引起协同优化方法计算困难的原因,提出一种改进的协同优化方法——ICO 方法,改变学科一致性约束,增加系统级罚函数等手段来克服该困难。文献[5]在协同优化方法的基础上提出协同进化 MDO 方法,给出其基本过程。如文献[57]和文献[58]应用基于响应面的并行子空间方法分别对某飞机总体方案和反舰导弹的设计进行优化。文献[3]利用 CSD 方法实现了机翼气动结构一体化设计优化。这一类应用大多属于理论验证研究,还不能真正在工程意义上指导实践应用。

(3) 开发多学科优化设计集成平台。多学科优化设计集成平台研究分为两类,一是在已有平台基础上二次开发,在国外多学科设计集成系统的基础上进行二次开发,建立面向本行业的多学科设计集成平台,如国防科技大学的“月球探测卫星总体设计系统”^[59]和北京航空航天大学的“系统设计优化集成环境——SDOF”^[60]都是在 iSIGHT 的基础上开发的。二是自主开发具有完全自主知识产权的多学科设计集成平台,如在航天领域,由航天二院李伯虎院士主持完成的“多学科虚拟样机协同建模与仿真平台”^[1, 36],该系统已在某航天器的多学科联合设计仿真分析中得到有效应用。在航空领域,由东北大学王成恩等^[37]负责的研究团队在专业设计软件和通用商用软件的系统集成、动态产品设计项目、设计资源与访问权限控制、设计进程的控制与调度方案版本管理、可视化设计等多学科设计优化集成技术进行了深入研究,完成“航空涡轮发动机集成设计系统”。目前,该系统已通过部级鉴定,并在某航空涡轮发动机设计中得到实际应用。

尽管我国科技工作者取得了上述诸多成果,但不论在理论上还是实际应用中,我国对 MDO 技术

的研究与国外差距都较大,具体表现如下所述。

(1) MDO 理论研究中,国外的 MDO 研究已经形成一个比较完整的理论体系,虽然还存在缺陷,但其对 MDO 理论的研究正处于上升阶段,可以在各种知名国际期刊中发现许多有关 MDO 理论研究的最新进展。而我国 MDO 理论的研究还处于学习理解阶段。在目前国内公开发表的期刊和博士论文中,多数为应用 MDO 理论到某些具体产品优化设计中,而有关 MDO 理论方面的自主创新性研究较少见到。

(2) 在 MDO 应用中,国外在复杂产品协同设计集成平台研发上起步早,投入大,技术基础好,企业推广应用较多。如:在发达国家的航空航天、船舶、汽车及电动机行业都有应用。而目前我国重点行业如:航空航天、武器系统及汽车行业大多进行些尝试性应用。我国在复杂产品设计领域缺乏技术成熟、应用广泛的具有完全自主知识产权的复杂产品设计优化平台。应用国外成套集成平台系统不仅存在着高技术封锁,价格昂贵等困难;而且不利于协同设计系统的更新换代,不利于新技术的应用和技术创新,最为重要的是对于重点行业的安全保密工作带来许多消极因素!

鉴于我国 MDO 研究的实际情况,参照国际上对 MDO 研究与应用概况,本文提出我国开展 MDO 研究的重点内容如下。

(1) 支持一部分重点科研单位,集中力量赶超国际先进水平,争取在 MDO 理论上取得一些突破。目前的 MDO 理论还存在许多不足,如目前的系统分解还必须由人工完成,如何能够以智能的方式实现系统分解是一个非常困难而有意义的问题,而这一点涉及到具体各个学科知识库、规则库、专家库的设计和建立。现有的优化框架研究还处于探索阶段,没有成形。目前的优化框架还都存在一些相应问题,并且没有得到实际工程上的广泛应用。一个简单、可靠、高效、并有较强适应性的优化框架或者一个优化框架集是目前 MDO 理论研究的难点。如何提高近似模型的逼近精度、减少近似模型的复杂度、简化构造近似模型的过程是近似模型研究的难点。在具体应用中,CCSO、CO 和 BLISS 这类优化框架都需要定义一个复杂的多学科优化过程,该优化过程可能由几个不同地点,不同类型的人员和系统共同完成。这里涉及到优化任务分配(系统分解)、中间结果映射(参数映射),近似模型的建立,优化进程监控等诸多难题,这些都是我国科研人员努力解决的目标。

(2) 加强对开发自主知识产权的 MDO 集成平

台的支持力度。在 MDO 平台上开发复杂产品具有开发周期短、成本低、综合性能指标高等诸多优点,这也是复杂产品开发的必然趋势。然而复杂产品的相关产业是我国的经济支柱之一,它们的兴衰决定着我国经济建设发展的进程,其中飞机、卫星、舰船和导弹等大型武器装备更是涉及到我们的国家安全。因此,在开发复杂产品过程中,使用国外的 MDO 集成平台存在巨大的安全隐患。而且国外 MDO 平台要价极高,购买国外 MDO 平台需要大量资金。目前我国从事完全自主知识产权 MDO 集成平台开发工作的仅有航天二院、东北大学等几家科研单位,国家应该对这类单位的开发工作进行大力扶植,并将其科研成果推广到我国各个复杂产品开发单位中,以加强我国复杂产品的开发能力,进而提高我们的经济实力和国家安全。

(3) 加快对 MDO 理论的学习推广。如在高等院校开设 MDO 课程,在科研院所进行 MDO 知识讲座等 MDO 理论的推广工作会让更多的人了解 MDO 基础知识及其重要性,尤其是承担复杂产品开发工作的单位和个人,使他们更新设计观念,提高复杂产品设计水平,进而提高我国的竞争力。

6 结论

从国外 MDO 发展过程看,作为一个专门的研究领域,MDO 从确立到现在不到短短十几年,但已产生巨大经济效益,并引起广泛重视。MDO 的应用范围已从最初的航空航天领域扩散到其他各个复杂工程设计领域。由此可见,在复杂产品开发过程中应用 MDO 技术已成为历史发展的必然趋势。我国也不例外,为了提高自己复杂产品的综合性能,进而提高我国的经济与国防实力,采用 MDO 方法已是我们的必然选择。

参 考 文 献

- [1] 李伯虎,柴旭东,朱文海. 复杂产品集成制造系统技术[J]. 航空制造技术, 2002(12): 17-20, 40.
LI Bohu, CHAI Xudong, ZHU Wenhai. Integrated manufacturing system technology of complex product[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002(12): 17-20, 40.
- [2] SOBIESKI J S. Multidisciplinary aerospace design optimization: survey of recent developments[R]. AIAA 96-0711, 1996.
- [3] 李响. 多学科设计优化方法及其在飞行器设计中的应用[D]. 西安:西北工业大学, 2003.

- LI Xiang. Multidisciplinary design optimization method and its application to aircraft design[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.
- [4] 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]. 北京: 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]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [5] 陈琪锋. 飞行器分布式协同进化多学科设计优化方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.
- CHEN Qifeng. Distributed coevolutionary multidisciplinary design optimization methods for flying vehicles [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.
- [6] AIAA Technical Committee. MDO white paper on current state of the art[R]. AIAA, Washington, DC, January 15, 1991.
- [7] GIESING J P, BARTHELEMY J M. A summary of industry MDO applications and needs[C]// 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, St. Louis MO, September 2-4, 1998, AIAA 98-4737.
- [8] STELMACK M A. A user interactive, response surface approximation based framework for multidisciplinary design[D]. Indiana: University of Notre Dame, 1999.
- [9] 龚春林, 谷良贤, 袁建平. 基于系统分解的多学科集成设计过程与工具[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(3): 334-338.
- GONG Chunlin, GU Liangxian, YUAN Jianping. Multidisciplinary integrated design process and tool based on system decomposition[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(3): 334-338.
- [10] PARASHAR S, BLOEBAUM C L. Decision support tool for multidisciplinary design optimization (MDO) using multi-domain decomposition[C]// 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, Austin, Texas, April 2005, AIAA 2005-2200.
- [11] HAFTKA R T, WATSON L T. Decomposition theory for multidisciplinary design optimization problems with mixed Integer quasiseparable subsystems[J]. Optimization Engineering, 2006(7): 135-149.
- [12] RADANOVIC L. Sensitivity methods in control theory[M]. Oxford, England: Pergamon Press, 1966.
- [13] SOBIESKI J S. Sensitivity of complex, internally coupled systems[J]. AIAA January, 1990, 28(1): 153-160.
- [14] ALEXANDROV N M, LEWIS R M. Algorithmic perspectives on problem formulations in MDO[C]// 8th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Long Beach, September 2000, AIAA 2000-4719.
- [15] CHI H W, HUANG Chenhung, BLOEBAUM C L. Incorporation of preferences in multi-objective concurrent subspace optimization for multidisciplinary design[C]// 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Albany, New York, 30 August-1 September 2004, AIAA 2004-4548.
- [16] BRAUN R D. Collaborative optimization: An architecture for large-scale distributed design[D]. Stanford, CA: Stanford University, 1996.
- [17] KODIYALARN S, SOBIESKI J S. Bi-level integrated system synthesis with response surfaces[J]. AIAA Journal, 2000, 38(8): 1479-1485.
- [18] 胡洁, 彭颖红, 熊光楞. 基于系统论的并行协同设计方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(2): 151-156.
- HU Jie, PENG Yinghong, XIONG Guangleng. Research on concurrent and collaborative design based on system theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(2): 151-156.
- [19] 贾建东, 姚卫星, 吴德海. 飞行器多学科优化设计技术概论[J]. 航空科学技术, 2005(6): 21-25.
- JIA Jiandong, YAO Weixing, WU Dehai. An introduction to multidisciplinary design of aircraft optimization Technique[J]. Aeronautical Science and Technology, 2005(6): 21-25.
- [20] 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, 32(3): 286-289.
- YU Xiongqing, YAO Weixing, XUE Fei, et al. A study on the requirements for the framework of multi-disciplinary design optimization[J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 32(3): 286-289.
- [21] WOYAK S, KIM H, MULLINS J. A web centric architecture for deploying multidisciplinary engineering design processes[C]// 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 30 August - 1 September 2004, Albany, New York, AIAA 2004-4498.
- [22] SHEN Weiming, GHENNIWA Hamada. A distributed multidisciplinary design optimization framework: technology integration[J]. Journal of Integrated Design and Process Science, 2003(7): 95-108.
- [23] NAHM Y E, ISHIKAWA H. A hybrid multi-agent system architecture for enterprise integration using computer networks[J]. Robotics and Computer Integrated

- Manufacturing, 2005(21): 217-234.
- [24] SHI Dongcai, YIN Jianwei, ZHUANG Wenyu, et al. A distributed collaborative design framework for multidisciplinary design optimization[C]// CSCWD 2005, LNCS 3865, 2006: 294-303.
- [25] STELMACK M A, BATILL S M. Neural network approximation of mixed continuous/discrete system in multidisciplinary design[C]// 36th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, January 1998, AIAA 1998-0916.
- [26] GIUNTA A A. Aircraft multidisciplinary design optimization using design of experiments theory and response surface modeling methods[D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute, 1997.
- [27] JIN R, CHEN W, SIMPSON T W. Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modeling criteria[J]. Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 23(1): 1-13.
- [28] 陈建江, 孙建勋, 常伯浚, 等. 基于人工神经网络的多学科优化设计研究[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(10): 1 351-1 356.
- CHEN Jianjiang, SUN Jianxun, CHANG Bojun, et al. Multidisciplinary design optimization based on artificial neural network[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(10): 1 351-1 356.
- [29] 穆雪峰, 姚卫星, 余雄庆, 等. 多学科设计优化中常用代理模型的研究[J]. 计算力学学报, 2005, 22(5): 608-612.
- MU Xuefeng, YAO Weixing, YU Xiongqing, et al. A survey of surrogate models used in MDO[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2005, 22(5): 608-612.
- [30] 李响, 李为吉. 利用协同优化方法实现复杂系统分解并行设计优化[J]. 宇航学报, 2004, 25(3): 300-304.
- LI Xiang, LI Weiji. A new collaborative optimization algorithm and its applications to complex system parallel design[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(3): 300-304.
- [31] CHEN Jianjiang, XIAO Renbin, ZHONG Yifang. A response surface based hierarchical approach to multidisciplinary robust optimization design[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 26(4): 301-309.
- [32] HUANG Chenhung, BLOEBAUM C L. Incorporation of preferences in multi-objective concurrent subspace optimization for multidisciplinary design[C]// 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization conference, 2004, Albany, New York, AIAA 2004- 4548.
- [33] EISLER C A, ENG B. Multidisciplinary optimization of conceptual aircraft design[D]. Ottawa: Carleton University, 2003.
- [34] WANG Y D, SHEN Weiming, GHENNIWA H. WebBlow: A web agent-based multidisciplinary design optimization environment[J]. Computers in Industry, 2003(52): 17-28.
- [35] JIN S, KIM K, JEONG K, et al. MEDIC: A MDO-enabling distributed computing framework[C]// FSKD 2005, Changsha, China, August 27-29, 2005, LNAI 3613: 1 092-1 101.
- [36] 夏国洪, 李伯虎, 唐晓青, 等. 复杂系统(产品) 集成制造工程的技术研究与应用[J]. 中国工程科学, 2005, 7(9): 49-55.
- XIA Guohong, LI Bohu, TANG Xiaoqing, et al. Research and application of technologies for complex system (product) integrated manufacturing engineering [J]. Engineering Science, 2005, 7(9): 49-55.
- [37] 王成恩, 刘震. 航空发动机涡轮设计集成技术[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(5): 485-488.
- WANG Chengen, LIU Zhen. Integration technologies for design of aero-gas turbine[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2006, 27(5): 485-488.
- [38] NIGHTINGALE P. The product process organization relationship in complex development projects[J]. Research Policy, 2000, 29: 913-930.
- [39] 孔建寿, 张友良, 汪惠芬, 等. 协同开发环境中项目管理与 workflow 管理的集成[J]. 中国机械工程, 2003, 14(13): 1 122-1 125.
- KONG Jianshou, ZHANG Youliang, WANG Huifen, et al. Study on integration of distributed PM and workflow in collaborative product development environment [J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(13): 1 122-1 125.
- [40] MENON R, TONG L H, SATHIYAKEERTHI S. Analyzing textual databases using data mining to enable fast product development processes[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2005, 88(2): 171-180.
- [41] 尹建伟, 王冰冰, 陈刚, 等. 集团级分布式产品数据管理系统的研究与实现[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(5): 656-663.
- YIN Jianwei, WANG Bingbing, CHEN Gang, et al. Development of distributed product data management system for group-scaled enterprises[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(5): 656-663.

- [42] HARRIS D, KHAN L, PAUL R, et al. Standards for secure data sharing across organizations[J]. Computer Standards & Interfaces, 2007, 29(1): 86-96.
- [43] ROY U, KODKANI S S. Product modeling within the framework of the world wide web[J]. HE Transactions, 1999(31): 667-677.
- [44] KIM N K, KIM Y, KANG S H. Subdivision methods of converting STEP into VRML on web[J]. Computers and Industrial Engineering, 1997(33): 497-500.
- [45] REZAYAT M. Knowledge based product development using XML and KCs[J]. Computer Aided Design, 2000 (32): 299-309.
- [46] SHYAMSUNDAR N, GADH R. Collaborative virtual prototyping of product assemblies over the internet [J]. Computer Aided Design, 2002, 34(10): 755-768.
- [47] 周受钦, 凌卫青, 谢友柏. 集成信息 CAD 系统中的知识建模与数据映射分析[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(9): 77-81.
ZHOU Shouqin, LING Weiqing, XIE Youbai. Knowledge modeling and data mapping for integrated information CAD system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(9): 77-81.
- [48] 胡耀光, 范玉顺, 王田苗. 基于 XML 的企业流程信息协同交互方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(11): 1 558-1 563, 1 570.
HU Yaoguang, FAN Yushun, WANG Tianmiao. Research on enterprises process information collaboration based on XML[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(11): 1 558-1 563, 1 570.
- [49] GRAMA A, GUPTA A, KARYPIS G, et al. Introduction to parallel computing(second edition)[M]. New York: Addison-Wesley, 2003.
- [50] CASSLICCHIO E, TUCCI S. Static and dynamic scheduling algorithm for scalable web server farm[C]// Proceedings of the IEEE 9th Euromicro Workshop on Parallel and Distributed Processing, 2001: 369-376.
- [51] BRYHNI H. A comparison of load balancing techniques for scalable web servers[J]. IEEE network, 2001(7/8): 58-64.
- [52] 唐泽圣, 孙延奎, 邓俊辉. 科学计算可视化理论与应用研究进展[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(4/5): 199-202.
TANG Zesheng, SUN Yankui, DENG Junhui. Advances in the study of visualization in scientific computing [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2001, 41(4/5): 199-202.
- [53] 陈玉敏, 龚健雅, 贾文珏, 等. 基于 XML 的空间数据互操作与可视化研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(10): 2 367-2 371.
CHEN Yumin, GONG Jianya, JIA Wenjue, et al. Research on spatial data sharing visualization based on XML[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(10): 2 367-2 371.
- [54] 谷良贤, 龚春林. 多学科设计优化方法比较[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(1): 60-62.
GU Liangxian, GONG Chunlin. A comparison of multidisciplinary design optimization methods[J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2005, 25(1): 60-62.
- [55] 余雄庆, 丁运亮. 多学科设计优化算法及其在飞行器设计中应用[J]. 航空学报, 2000, 21(1): 1-6.
YU Xiongqing, DING Yunliang. Multidisciplinary design optimization a survey of its algorithms and applications to aircraft design[J]. Journal of Astronautics, 2000, 21(1): 1-6.
- [56] 韩明红, 邓家禔. 协同优化算法的改进[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11): 34-38.
HAN Minghong, DENG Jiati. Improvement of collaborative optimization[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(11): 34-38.
- [57] 邢小楠, 徐元铭, 李烁. 飞机总体设计的并行子空间方法[J]. 飞机工程, 2004(3): 5-8.
XING Xiaonan, XU Yuanming, LI Shuo. The application of the concurrent subspace optimization to aircraft preliminary design[J]. Aircraft Engineering, 2004(3): 5-8.
- [58] 曾声宇. 基于响应面近似的反舰导弹并行子空间优化设计技术[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
ZENG Shengyu. A based response surface method concurrent subspace optimization of antiship missile [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.
- [59] 赵勇, 颜力, 陈小前, 等. 基于 MDO 方法的月球探测卫星总体设计[J]. 上海航天, 2006(2): 37-41.
ZHAO Yong, YAN Li, CHEN Xiaoqian, et al. The system design of lunar exploration satellite using MDO[J]. Aerospace Shanghai, 2006(2): 37-41.
- [60] 韩明红, 邓家禔. 复杂工程系统多学科设计优化集成环境研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(9): 100-105.
HAN Minghong, DENG Jiati. Study on integrated framework of multidisciplinary design optimization for complex engineering system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(9): 100-105.

作者简介: 马明旭, 男, 1973 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为先进制造, 多学科设计优化, 产品生命周期建模。

E-mail: mmx73274@sohu.com