

复杂工程系统多学科设计优化集成环境研究*

韩明红 邓家禔

(北京航空航天大学 720 研究所 北京 100083)

摘要: 复杂工程系统的设计是一个多学科互相适应的系统过程, 是一个多学科交叉综合设计优化的多目标决策过程。针对复杂工程系统设计过程, 提出了复杂工程系统多学科设计优化集成环境模型, 作为提高设计自动化的平台, 给出了集成环境的体系结构和技术结构方案, 定义了集成环境优化设计的流程; 详细说明了工程系统多学科设计优化方法、智能产品模型两项关键技术。最后对集成环境的实施和验证做了相应的阐述。

关键词: 多学科设计优化 复杂工程系统 集成环境 智能产品模型

中图分类号: TP312

0 前言

复杂工程系统通常包含若干个具有特定功能的子系统。系统和子系统都有相应的设计目标、设计参数和约束条件, 同时系统之间也存在着复杂的耦合关系。复杂工程系统的设计过程经常面临着多学科的严峻挑战, 综合了多个学科领域的知识。设计过程已经成为一个多学科交叉综合设计的多目标优化决策过程^[1]。通常, 由最优组件和子系统组成的大系统并不一定是整体性能最优的系统^[2]。

复杂工程系统多学科设计优化(Multidisciplinary design optimization, MDO)是在总体设计方案的指导下, 分别进行各子系统的设计, 既要满足子系统的设计目标, 又要兼顾系统之间的约束、耦合关系, 其最终目标是复杂大系统整体性能的最优^[3]。在复杂工程系统设计过程中应用多学科设计优化技术, 可以做到系统方案设计的可预测、可计算, 在短时间内实现多种设计方案的优选, 有效地控制系统的设计过程, 保证复杂工程系统的第一时间设计质量和第一时间运行质量, 同时可大大提高设计效率, 降低系统研发成本。对复杂工程系统多学科设计优化集成环境进行研究, 重点在于复杂工程系统设计求解过程的相关关键技术以及优化集成环境的设计。

1 系统设计优化集成环境——SDOF

系统设计优化集成环境(Systems design optimization framework, SDOF)是面向大规模复杂工程系

统进行多学科设计优化的集成平台。通过环境所提供的网络应用服务、数据服务、设计过程服务、工具服务和用户服务, 配置和集成建模工具、优化算法工具、CAD、CAE、PDM 以及专有学科仿真分析软件, 提供复杂工程系统设计使用。

1.1 SDOF 集成环境的体系结构

复杂系统多学科设计优化在工程实现上是一个系统工程问题, 涉及到系统的需求分析、功能结构、物理结构、配置管理、项目管理和数据管理等内容^[4]。同时多学科设计优化方法是一种系统工程方法, 包含了系统优化模型和仿真模型的建立、制定优化策略、优化计算、仿真分析、优化分析权衡、设计的可靠性和结果验证等内容。因此, 这里构建了支持上述需求的系统设计优化集成环境 SDOF, 其体系结构如图 1 所示。环境围绕着产品数据的建立、管理、访问和验证为系统级和子系统级的优化与仿真分析提供及时、准确的服务。

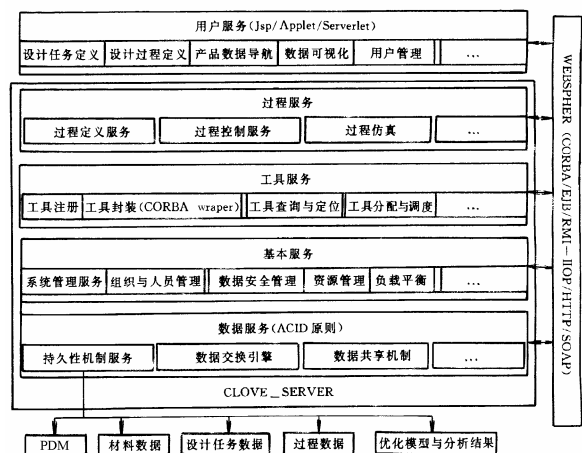


图 1 SDOF 体系结构

SDOF 建立在 J2EE 体系结构基础之上, 应用 IBM 公司的 WebSphere 应用服务器, 所有的功能服

* 国家自然科学基金资助项目 (50275005)。2004105 收到初稿, 20040802 收到修改稿

务都被封装为相应的 Java Bean 或 EJB, 并利用 CORBA 机制集成仿真分析工具和用户遗留过程与数据。用户服务通过其他服务层的支持, 完成设计过程、设计资源、设计策略和设计数据的统一与协调。整个平台的主要功能层包括如下。

(1) 用户服务——实现应用系统与用户的交互。主要包括设计任务定义、设计过程定义、产品数据导航、数据可视化和用户管理等模块。设计任务定义模块提供了复杂工程系统设计任务向系统进行输入的图形界面接口。设计过程定义模块利用图形化的工作界面定制业务流程, 完成业务逻辑的控制流和数据流建模。产品数据导航模块提供用户透明管理和处理设计工作的灵活方式。数据可视化模块提供用户请求数据的可视化处理与管理。用户管理模块采用基于角色的权限控制方法, 实现用户的登陆与认证、权限管理、访问安全控制和组织管理等功能。

(2) 过程服务——应用相关的业务逻辑过程进行过程建模。过程服务提供业务过程建模与控制的服务机制和接口, 将用户的业务逻辑过程在系统统一的过程管理模型中表示, 为任务的自动控制提供保障。包含过程定义服务、过程控制服务和过程仿真服务等。系统过程建模采用高级着色 Petri 网对高层和系统级设计优化任务进行建模, 优化任务的定义通过任务定义语言(Design task language, DTL)以任务的形式接入到过程网, 在过程管理引擎的驱动下, 设计任务在满足用户定制条件和规则基础上把任务所需资源、数据、控制信息传送或通知正确的节点, 驱动优化任务的进行。

(3) 工具服务——支持组件化的工具相关服务。工具服务提供用户工具在系统中即插即用所需的服务, 用户工具通过工具本身提供的二次接口函数或二次封装后进行系统环境的统一控制和管理。工具服务体现系统的集成能力, 主要包括工具注册、工具封装、工具查询与定位和工具的分配与调度等服务^[5]。

(4) 基本服务——提供系统基本的后勤管理保障功能。包括系统管理服务、组织与人员管理、数据安全、资源管理和负载平衡等服务功能。人员的基本信息、角色信息、权限信息、所隶属的组织机构信息、使用的数据范围、数据密级及相关的加密处理都在基本服务中实现。基本服务主要提供系统门户管理功能和安全控制机制。

(5) 数据服务——提供系统基本的数据服务功能。持久性机制服务模块用来维护所有数据的持久

性、一致性和完整性。数据交换引擎模块提供设计过程中数据交换的所有底层的支持功能, 为产品数据在不同的工具之间共享提供数据转换服务。数据共享机制模块提供设计过程中分布式的信息系统所管理的数据在不同的设计人员之间进行共享的机制和服务, 支持系统开发过程中异地协同地进行设计、分析、仿真和多学科优化。

1.2 SDOF 集成环境的技术结构方案

基于 SDOF 的体系结构, 构建了 SDOF 应用于复杂工程系统多学科设计优化时的技术结构方案, 如图 2 所示。CLOVE_SERVER 是 SDOF 的优化服务器, 提供支持用户操作、优化计算和仿真分析所需的网络环境。系统使用工程系统多学科设计优化方法 ESMDO(Engineering system multidisciplinary design optimization)进行复杂工程系统的多学科设计优化工作, 它是 SDOF 集成环境的关键技术之一, 在第 2.1 节作详细说明。

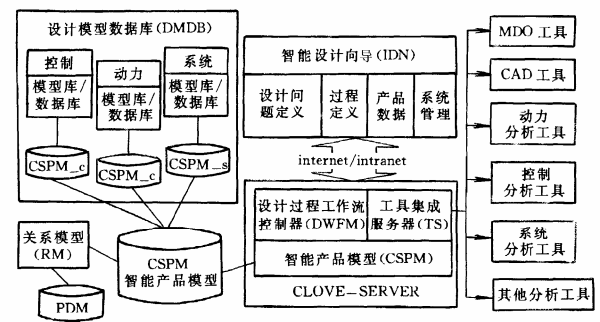


图 2 SDOF 技术结构方案

SDOF 包含四个主要功能部件。

(1) 智能设计向导(Intelligent design navigator, IDN)。由支持用户透明地获取信息的网络服务和客户端的图形用户接口两部分组成。网络服务主要包括数据的传输、负载平衡和消息传递等功能。图形用户接口主要包括设计问题定义、设计过程定义、产品数据导航、数据可视化和系统管理等模块。

(2) 设计过程工作流控制器(Design workflow management, DWFM)。使用设计任务定义语言 DTL 对设计优化任务的设计参数、设计资源和内部设计过程、设计策略的使用、所需资源和执行节点等主要信息进行维护。DTL 还是其他应用以及求解操作访问设计任务的接口。DWFM 提供过程网图形化定制界面, 用于实现对过程的基本建模支持, 为过程引擎提供模板支持。DWFM 还提供任务求解服务和过程监控服务, 实现分布式环境下基于软件代理结构的任务求解控制, 实现由引擎服务器监控整个设计流程的进行, 对不同节点的活动进行统一管理。

(3) 工具集成服务器(Tooling server, TS)。主要提供工具注册与发布管理, 工具信息描述器, 工具输入、输出管理和工具封装四部分功能。通过工具集成服务器, 在 SDOF 平台中将集成 MDO 工具、CAD 工具、动力类分析工具、控制类分析工具、系统类分析工具和其他领域分析工具。

(4) 智能产品模型(Central smart product model, CSPM)用来建立产品全生命周期的数字化的统一的模型表达, 包括产品优化模型、行为模型、功能模型、结构模型和环境模型等。CSPM 是一个产品生命周期管理工具, 它为所有的分析工具提供领域独立的分析模板。CSPM 通过设计模型数据库(Design model database, DMDB)来管理和维护动力(CSPM_e)、控制(CSPM_c)、系统(CSPM_s)三类优化模型, 通过关系模型(Relation model, RM)建立优化设计模型数据与用户存储在不同信息系统中的产品数据的接口模型并维护其数据的一致性。CSPM 是 SDOF 集成环境的关键技术之一, 在第 2.2 节作详细说明。

1.3 SDOF 多学科设计优化流程

复杂工程系统在进行多学科设计优化前, 必需建立设计任务的优化模型, 制定优化策略并进行资源配置与分配, SDOF 中的优化流程如图 3 所示。

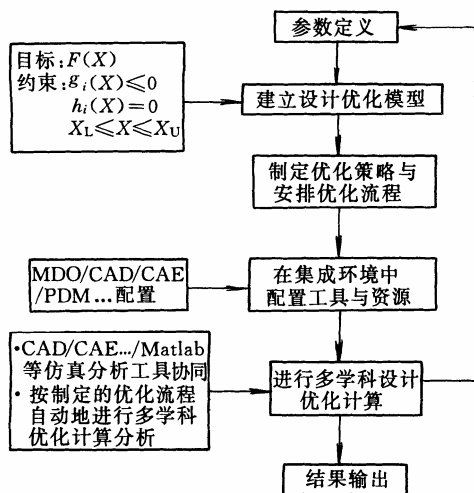


图 3 SDOF 集成环境设计优化流程

(1) 首先, 建立工程系统的设计优化模型, 包括定义系统级和子系统级目标函数、设计变量、约束函数、边界条件和指定各个参数在智能产品模型 CSPM 上的关联关系等。

(2) 其次, 根据设计任务的特点制定优化策略和优化流程。

(3) 在优化流程中配置相关的 CAD、CAE、PDM 和其他用户工具, 配置相关的软硬件资源。

(4) 按照优化流程和优化策略进行多学科设计优化计算。满足用户定制的终止条件或完成整个优化过程时优化计算终止。否则, 调整参数设置、修改优化模型、优化策略和流程, 重新配置工具和资源进行新的计算。

(5) 结果输出。

2 SDOF 集成环境中的关键技术

2.1 工程系统多学科设计优化方法(ESMDO)

复杂工程系统比如卫星、飞机、舰船和汽车等具有数以万计的设计变量, 变量之间的约束关系也错综复杂。对如此众多的变量在同一层次、同一时间进行设计将是一项十分艰巨甚至无法完成的任务。因此, 将复杂工程系统按照一定规则分解成多个子系统有助于简化系统间约束关系, 降低系统设计的复杂性。同时, 将系统分解成适当粒度层次也是进行系统设计优化的前提条件。多学科设计优化方法正是基于上述需求发展起来的。

多学科设计优化是一门方法学, 它用来对系统和子系统之间具有耦合关系的复杂工程系统进行设计, 探索系统协同工作的机理。其关键就在于把复杂工程系统分解成不同的子系统, 分别对每个子系统进行优化, 在保证系统整体性能最优的前提下, 达到子系统设计目标的最优^[1]。

复杂工程系统的设计通常是多目标优化问题, 在不同运行环境下满足性能最优的同时使得系统的体积、重量最小, 成本最低。系统设计空间通常是非线性的, 存在大量局部极小点, 而且约束和边界条件众多, 因此在优化的过程中必须使用全局优化算法, 同时还必须使用稳健性设计方法, 确保优化设计结果的可靠性。系统和子系统的优化模型通常用代数方程、微积分方程表示, 由于系统的复杂性和精度的要求, 这些优化模型必须是物理分布式且高保真的, 因此存在数以万计的设计变量、中间变量和状态变量, 具有单个优化器的传统的优化方法已经无法完成优化任务, 必须在系统级和子系统级使用多个优化器进行设计优化。

针对复杂工程系统优化设计的特点, 本文提出分级分阶段的工程系统多学科设计优化方法 ESMDO。ESMDO 方法包含四个阶段: 子系统多学科设计优化、具有耦合关系的子系统间优化设计、系统级全局优化设计和系统级的多点全局优化设计。ESMDO 方法如图 4 所示。

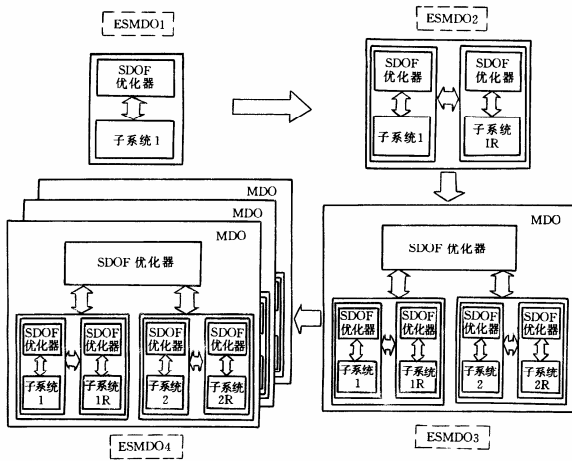


图 4 ESMDO 多学科设计优化方法

ESMDO1——子系统多学科设计优化。优化设计局限于子系统内部的多学科优化,试验设计和 All at Once 优化可以用来决定基本的设计参数和边界,可行的初始设计点,每个设计目标的可达性,找出设计可行区。这些信息提供 ESMDO2 使用。遗传算法和模拟退火算法在本阶段是强有力的搜索工具,基于梯度的优化算法比如修正可行方向法和连续二次规划法不适合在本阶段使用。本阶段不考虑各个子系统之间的耦合关系,即对一个子系统设计参数的修改不会影响到其他子系统,优化结果保证该子系统内部最优。该阶段的优化设计过程还可以类似的分解成四个阶段:单学科优化、多学科优化、子系统全局优化和子系统多点优化。

ESMDO2——耦合子系统间设计优化。该阶段优化设计任务是处理具有耦合关系的子系统之间的多学科设计优化。ESMDO1 中的优化结果保证子系统内部性能最优,但是不能保证具有耦合关系的子系统间的局部最优。例如当子系统 1 的输出参数与子系统 2 的输入参数间存在约束关系时,子系统 1 的最优输出未必是子系统 2 的最优输入,不能保证子系统 2 达到最优,甚至子系统 1 的最优输出使得子系统 2 没有可行解,优化设计无法进行下去。此时可以引入加权目标惩罚函数机制,修改子系统目标函数以使其达到一致。

ESMDO3——系统全局优化设计。该阶段优化设计任务是在系统级进行全局优化。在一定工作环境下,系统级优化表现为多目标形式,系统级优化设计直接决定系统与环境的交互,体现系统的整体性能,可以采用多级系统优化和全局——局域优化方法,比如协同优化方法(CO)等。系统级优化器可以采用遗传算法,子系统级优化器可以采用连续二次规划法和 Hooke-Jeeves 直接搜索法的混和优化算

法来确保优化结果的稳健性。

ESMDO4——系统多点优化设计。该阶段优化设计任务是对不同工作环境下的系统进行多点优化,以保证系统在各种环境下都能正常运行,提高系统的适应性。首先建立典型运行环境 P0,执行 ESMDO3 优化;然后在系统其他运行环境 P1、P2, ... 下执行 ESMDO3 优化;最后对 P0、P1、P2, ... 等环境下的系统优化结果进行协同优化,得到满足所有约束条件的最优解。

2.2 智能产品模型 CSPM

复杂工程系统在多学科设计优化过程中,需要把结构参数、行为和性能参数、环境变量统一的放在设计优化模型中进行操作,这些参数都是产品模型数据的一部分。因此,复杂工程系统的多学科设计优化就需要集成的、单一的产品模型的支持。为了设计能满足多学科设计优化需要的单一的产品模型,建立了描述产品模型的理论模型,称为“智能产品模型 CSPM”,描述如下。

“智能产品模型 CSPM”是由一组服务和功能结构所组成的虚拟产品,用来全面地表示产品发育的各个方面,既包括产品结构的发育和结构的描述,又包括描述发育过程中产品与环境交互作用的行为状态,即产品性能。这个概念可以扩展至产品的全生命周期,建立描述产品全生命周期的产品模型。CSPM 的概念结构如图 5 所示。

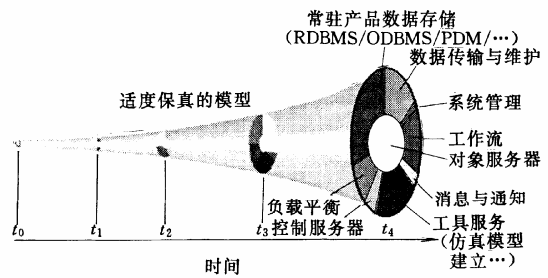


图 5 智能产品模型 CSPM 概念结构图

CSPM 中产品(系统)的行为、功能定义如下。

定义 1 行为 产品在所运行的环境中,本身系统内部结构状态变化的外在表现。产品内部结构定义为几何形状与结构属性的组合。

定义 2 功能 行为作用于环境的效果。性能是功能在性能域上的量度。产品设计的目的是获得产品的预期性能。

根据定义 1、定义 2, CSPM 中的产品(系统)可表示为

$$\text{Product} = (\text{P_arc}, \text{P_beh}, \text{P_func}, \text{Ev}, \text{R})$$

其中

P_{arc} 产品的系统内部结构。

$P_{beh}=F(\int dP_{arc})$ 产品内部结构状态变化的结果,即产品的行为。 $\int dP_{arc}$ 表示产品系统内部结构的变化。

$P_{func}=F1(P_{beh}, Ev)$ 产品的功能。性能是系统的行为在特定目标环境 Ev 条件下所体现的功能的度量。

R_i 特定设计目标环境 Evi 下, $P_{arci}, P_{behi}, P_{funci}, Evi$ 互相之间的关系。

智能产品模型 CSPM 是系统设计优化集成环境 SDOF 的核心。在复杂工程系统设计过程中, CSPM 是一个可被操作运行的程序与框架,可以使用 CSPM 建立新的产品模型组件、运行产品模型产生与环境相互作用中产品的行为状态。CSPM 使设计人员工作在相同的数据上,提供透明的数据定位、查找、获取、更新与存储等公共服务,使设计人员能够更关注产品设计问题本身。

CSPM 负责系统优化模型库的建立,并对优化过程中的相关信息如:设计场景信息、优化过程中的重要中间结果、重要的参数等数据进行管理。同时 CSPM 还负责将这些模型和数据与分别存储在企业不同信息管理系统中的其他数据建立对应的联系,如存储在 PDM 系统中的产品数据、存储在工作流管理系统中的过程数据,存储在材料数据库中的材料数据等。SDOF 集成环境提供系统设计优化过程中建立、访问、使用和维护 CSPM 的服务。

3 SDOF 的实施

目前,复杂工程系统多学科设计优化环境原型系统正在建立之中,图 6 为原型环境示意图。

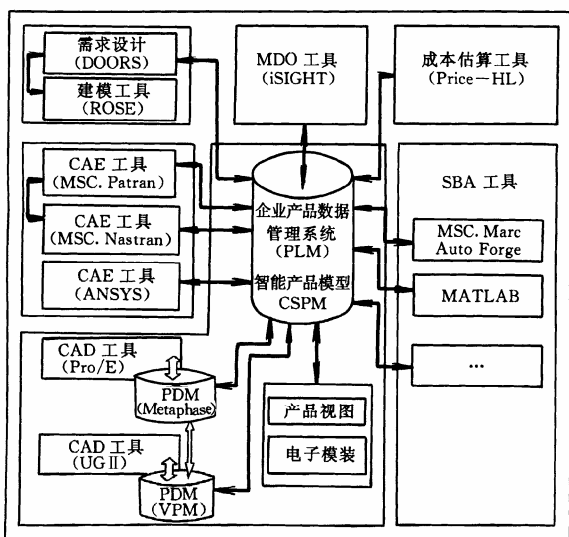


图 6 设计优化集成环境示意图

集成环境的优化器采用美国 Engineous 公司的 iSIGHT 软件,通过工具集成服务器直接嵌入到集成环境中。iSIGHT 提供了多种优化算法和对 MDO 方法的支持^[6]。Engineous 公司已经向本工程系统设计优化研究中心(ESORC)提供了 17 套 iSIGHT 软件,作为实现系统设计优化集成环境 SDOF 的核心组件。

以发动机涡轮盘多学科设计优化为例,对集成环境的有效性进行了验证。涡轮盘的设计加工过程是一个高度耦合的多学科设计过程,涉及到锻造和热处理等工序。涡轮盘多学科设计优化的总目标是在满足最终机械性能和寿命约束的条件下,涡轮盘质量 m 最轻,应力和应变最小。其中涡轮盘锻压优化的目标是通过设计锻模尺寸 R_1, R_2, \dots, R_6 , 仿真锻压过程中工件应力和作用力的变化,在满足锻压反作用压力 p 不超出最大载荷压力 p_{ml} 的约束条件下,使得锻件质量 m_r 最小。涡轮盘热处理优化的目标是通过调整锻件表面 10 个部位的热传导系数 h_1, h_2, \dots, h_{10} , 在满足冷却速率 $v_{ter,c}$ 的条件下,使得锻件的残余应力 $S_{r,obj}$ 最小。

涡轮盘多学科设计优化的流程如图 7 所示,该集成环境的设计工具包括参数化 CAD 建模工具 UG II, 锻压仿真分析软件 MSC.Marc.AutoForge, 优化计算软件 iSIGHT, 有限元分析软件 ANSYS, 使用 MSC.Patran 的 P/THERMAL 模块进行热处理过程分析仿真,提供所需的热传导数据和温度边界条件。

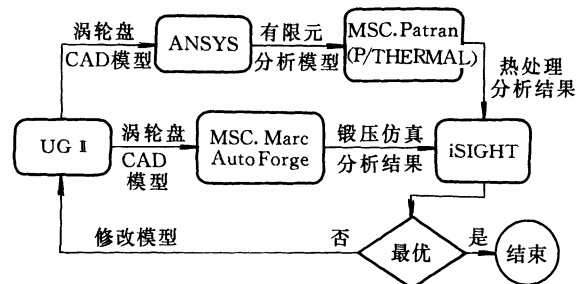


图 7 涡轮盘多学科设计优化流程

在 5 台联想开天 4600 型微机组成的集成环境中,某型号发动机涡轮盘的多学科设计优化和仿真分析过程耗时 59 h,经过 72 次系统级优化迭代获得最优结果。锻件质量从优化前的 42.6 kg 减少为 37.3 kg,减轻约 12.4%,取得了满意的结果。

目前,在原型系统中还集成了参数化的 CAD 工具(Pro/E)、CAE 工具(MSC.Nastran、ANSYS)和仿真计算工具(MATLAB),同时还以减速器多学科设计优化、电子包多学科设计优化为例,对系统设计优化集成环境的有效性进行了验证。需求分析工具(DOORS)、产品建模工具(ROSE)、产品成本估算

工具(Price_HL)和其他仿真分析工具将在进一步更加复杂的实例验证过程中集成到原型系统中。

4 结论

对复杂工程系统设计优化的特点进行了分析,给出了适合复杂工程系统的多学科设计优化方法ESMDO,详细描述了智能产品模型CSPM,构建了基于上述关键技术的系统多学科设计优化集成环境SDOF,阐明了复杂工程系统在该集成环境中的优化流程。最后对集成环境进行了原型验证。

复杂工程系统在设计优化过程中必须注意以下几个问题,才能够顺利得到预期的最优结果。

(1) 优化设计问题必须能够表示成计算机可处理的形式,明确设计变量、状态变量和中间变量之间的关系。必须对设计空间有全面的了解,才能建立高精度的优化模型,保证优化结果的精度。

(2) 必须建立高保真度的系统、子系统的数学模型,才能够保证优化过程中仿真分析结果的精度。

(3) 优化过程中必须引入中间变量来降低系统、子系统之间的耦合程度和系统的复杂性,要求设计人员必须对设计问题有很深的理解。

(4) 系统必须分解成合适粒度的子系统,使子系统具有合适数量的设计变量,才能不至于因粒度大而使问题不可解或粒度小而带来不必要的冗余。

(5) 软件使用人员必须具有一定的工程设计经验并对优化技术有一定的了解,才能根据特定的优化设计问题选择最合适的优化算法。

复杂工程系统多学科设计优化集成环境的原型系统处于开发阶段,由于优化过程的自动化驱动涉及到多方面问题,比如优化器的自主执行,仿真中相关的工程服务管理以及自动的服务调用,任务求解所需数据、文件的自动传递,基于消息的任务驱动机制等。因此,目前建立的是基于服务的以自动化为主,人工参与为辅的优化过程自动化驱动。提高优化过程自动化的水平是进一步研究的重点。另外,对于无法以形式化表达的优化设计相关问题还无法处理,比如设计人员的经验知识等,知识工程也是进一步研究的重点。

参 考 文 献

- Han M H, Deng J T. Multidisciplinary design optimization methods for complex engineering systems. In: Yang H C eds. *Advances in Agile Manufacturing ICAM 2003*, the International Conference on Agile Manufacturing, Beijing, 2003: 347~354
- Sobieszcanski-Sobieski J, Haftka R T. Multidisciplinary aerospace design optimization: survey of recent developments. In: 34th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 1996: AIAA-96-0711
- Kikuo F, Shinichi K. Distributed design support system for concurrent process of preliminary aircraft design. In: *Proceedings of the TMCE 2002*, Wuhan, 2002: 571~584
- Kodiyalam S, Sobieszcanski-Sobieski J. Multidisciplinary design optimization—some formal methods, framework requirements, and application to vehicle design. *International Journal of Vehicle Design*, 2001, 25(2): 3~22
- Peter J, Raymond M. A federated intelligent product environment. In: 8th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Long Beach, CA, 2000: AIAA-2000-4902
- Siu S T. Driving optimized products through automated software collaboration. In: Roy R ed. *Advances in Concurrent Engineering*. International Conference on Concurrent Engineering, Anaheim, CA, 2001: 19~26

STUDY ON INTEGRATED FRAMEWORK OF MULTIDISCIPLINARY DESIGN OPTIMIZATION FOR COMPLEX ENGINEERING SYSTEM

Han Minghong Deng Jiati

(720 Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract: Design of complex engineering system is a multi-object decision-making and multidisciplinary coupling optimization process. SDOF, a system design optimization framework, is presented to improve design efficiency of complex engineering system. SDOF also is built as the platform for design automation. The functional model and system architecture model of SDOF are put forward, and optimization process for complex engineering system is defined. Engineering system multidisciplinary design optimization method and central smart product model have been explained detailedly as key technologies of SDOF. Finally the implementation and case study are described.

Key words: Multidisciplinary design optimization

Complex engineering system

Integrated framework Smart product model

作者简介:韩明红,男,1974年出生,博士研究生。主要研究方向为多学科设计优化技术、优化算法、产品设计理论和设计自动化集成环境。
E-mail: hanminghong@sina.com