

8-7-2020

Research and Application of Multidisciplinary Optimization Technology Based on Virtual Prototyping

Tao Luan

Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

Junhua Zhou

Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

Baocun Hou

Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Research and Application of Multidisciplinary Optimization Technology Based on Virtual Prototyping

Abstract

Abstract: The main body of the article briefed the total frame, composing, application case of multidisciplinary optimization technology for weapon equipment system, and introduced 5 kinds of multidisciplinary optimization method detailedly. It took a certain equipment's virtual prototyping optimization design requirement in the engineering develop phase as the background, and *advanced the way of multidisciplinary virtual prototyping optimization based on local subsystem analysis viably, shortened form LSA-IDF*. Then through an actual case application, the article *constructed the weapon equipment system's virtual prototyping optimization design flow, actualized intelligent optimization design based on virtual prototyping*. Finally it sums up the applying effect, and advances the project's future direction for the latter research work.

Keywords

virtual prototyping, multidisciplinary optimization method, LSA-IDF, optimization design flow

Recommended Citation

Tao Luan, Zhou Junhua, Hou Baocun. Research and Application of Multidisciplinary Optimization Technology Based on Virtual Prototyping[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 2108-2116.

基于虚拟样机的多学科优化技术研究与应用

陶栾, 周军华, 侯宝存

(北京仿真中心, 北京 100854)

摘要: 以某型号工程研制阶段的虚拟样机优化设计应用需求为背景, 介绍了武器装备系统虚拟样机多学科优化技术的总体框架、系统构成及应用案例等内容和 5 种多学科优化方法。结合复杂武器装备系统优化设计的主要问题, 提出了切实可行的适用于复杂武器装备系统的基于局部子系统分析的 IDF 多学科虚拟样机优化框架(Local System Analysis IDF, LSA-IDF)。通过实际型号应用, 构建了武器装备系统虚拟样机优化设计流程, 实现了基于虚拟样机的智能优化设计, 对课题应用成果进行了总结分析, 提出了课题后续研究工作的方向。

关键词: 虚拟样机; 多学科优化方法; LSA-IDF; 优化设计流程

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2015)09-2108-09

Research and Application of Multidisciplinary Optimization Technology Based on Virtual Prototyping

Tao Luan, Zhou Junhua, Hou Baocun

(Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China)

Abstract: The main body of the article briefed the total frame, composing, application case of multidisciplinary optimization technology for weapon equipment system, and introduced 5 kinds of multidisciplinary optimization method detailedly. It took a certain equipment's virtual prototyping optimization design requirement in the engineering develop phase as the background, and *advanced the way of multidisciplinary virtual prototyping optimization based on local subsystem analysis viably, shortened form LSA-IDF*. Then through an actual case application, the article *constructed the weapon equipment system's virtual prototyping optimization design flow, actualized intelligent optimization design based on virtual prototyping*. Finally it sums up the applying effect, and advances the project's future direction for the latter research work.

Keywords: virtual prototyping; multidisciplinary optimization method; LSA-IDF; optimization design flow

引言

传统的多学科优化设计框架和方法在解决复杂武器装备的多学科优化问题时, 都遇到了不同的

困难。而在武器装备研制的全生命周期内, 概念设计阶段对武器装备的结构和性能起决定性的作用, 影响着武器装备设计开发整个流程的规划与技术资源配置, 即整个开发过程的效率和成本。因此武器装备的虚拟样机设计过程需要研究一种新的多学科系统整体优化设计的方法, 使得在设计中能够充分考虑各学科之间的相互影响和耦合作用。应用有效的分析、设计、优化策略和分布式计算机网络



收稿日期: 2015-05-15 修回日期: 2015-08-03;
基金项目: 总装备部仿真预研项目(51304030304);
作者简介: 陶栾(1979-), 女, 黑龙江省虎林县人, 高工, 研究方向为多学科虚拟样机工程应用, 虚拟采办仿真应用; 周军华(1984-), 男, 湖北监利人, 工程师, 研究方向多学科虚拟样机仿真、优化设计等; 侯宝存(1978-), 男, 陕西宝鸡人, 研究员, 研究方向为工程信息化及虚拟样机工程。

<http://www.china-simulation.com>

• 2108 •

系统, 来组织和管理整个系统的工程设计过程, 同时能够充分利用各学科的先进分析技术和设计工具, 通过各学科之间的相互作用所产生的协同效应, 快速获得虚拟样机工程设计多个可行参数中的整体最优解。

传统的武器装备虚拟样机研制过程中, 面对不同学科模型需要耦合时通常采用串行的方式, 即上游子系统设计师根据任务需求完成本模型的解算后将结果传递给下游子系统设计师, 下游子系统仿真完成后再将结果反馈。如此不但延长了研制周期, 模型的耦合关系也被割裂开, 仿真结果与实际工况误差很大。因此, 在构建复杂武器装备虚拟样机系统时就应注重多学科优化设计, 采用多学科优

化方法对参数进行优化设计, 加强不同学科之间的紧耦合度, 才能有效的提高仿真的准确性, 从而在方案阶段就能指导设计, 起到减少反复, 缩短周期的作用, 使得仿真结果更加贴近物理工况。

1 多学科优化系统构成

为了解决武器装备优化设计的复杂性问题, 在构建虚拟样机系统过程中首先对多学科优化系统的构成进行研究, 武器装备多学科优化设计系统由学科、优化框架、优化方法、数据库等元素组成, 基于虚拟样机的多学科优化设计系统构成如图 1 所示。

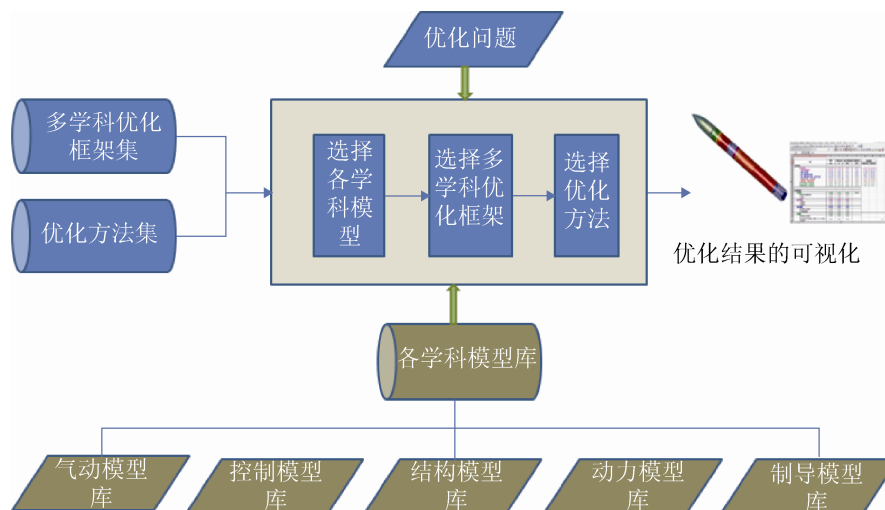


图 1 基于虚拟样机的武器装备多学科优化构成

以各学科模型库、多学科优化框架集和优化方法集为支撑, 针对具体的优化设计问题, 明确设计参数、优化目标等, 选择各学科模型、优化框架和优化方法, 进行快速概念设计, 并将优化和评估结果进行可视化显示。

在武器装备多学科优化设计系统构成中, 重点研究优化框架和方法。一方面结合系统组成, 利用分解技术, 将优化问题分解成一系列的学科优化问题, 构建各级的优化器。并采用协调技术对各子系统的优化结果进行协调。另一方面, 充分借鉴现有的几种典型多学科优化框架的优点, 综合多级优化

策略、响应面、近似和敏感度分析等方法, 并结合系统的特点制定一个切实可行的优化流程。在这个过程中, 主要追求实用性和合理性, 而不是数学意义上严格性, 有效地解决优化问题。

2 基于虚拟样机的多学科优化框架

面向虚拟样机工程实际的优化方法关注的是武器装备作为数字化产品本身的优化设计问题, 主要解决两方面的问题: 第一是武器装备多性能的动态优化问题; 第二是解决武器装备优化中的优化计算和组织设计问题。尽管目前已发展多种标准的多

学科优化方法,包括 MDF、IDF、CO、CSSO、BLISS 等框架,但是还没有一种框架在各项指标的评比上名列前茅,它们对不同的优化设计问题都有着不同的适应程度。在制订武器装备的多学科优化设计框架时,本课题结合复杂武器装备系统优化设计问题,制订出切实可行的基于虚拟样机的多学科优化框架。

2.1 多学科优化方法

(1) MDF 框架

MDF 方法是解决 MDO 问题的最常用的方法。

在这种方法中,需要提供设计变量 Z 和 X ,其中 Z 是全局设计变量, X 为局部设计变量, Y 为状态变量。通过执行一个完全的多学科分析(MDA)确保多学科的一致性,利用获得系统经过 MDA 分析后输出变量 Y ,然后利用设计变量 Z, X 和输出变量 Y 对目标函数 f 和约束函数 g, h 进行评估。MDF 优化模型表述如下:

$$\begin{aligned} \text{Min: } & f(Z, X, Y(Z, X)) \\ \text{S.t. } & g_i(Z, X, Y(Z, X)) \leq 0 \quad i=1, 2, \dots, m \\ & h_j(Z, X, Y(Z, X)) = 0 \quad j=1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

MDF 方法的框图如图 2 所示。

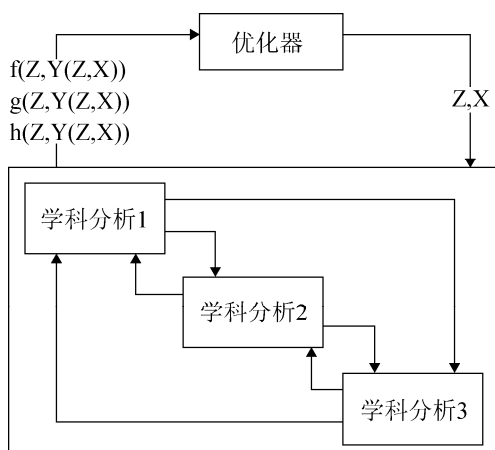


图 2 MDF 方法框图

(2) IDF(Individual Discipline Feasible)方法

单学科可行方法提供了一种在优化时避免 MDA 分析的途径。IDF 保留了单学科的可行性(满足学科约束),同时通过控制学科之间的耦合变量,

驱动单学科向多学科的可行性(满足多学科约束,即学科之间达到一致或相容)和最优解逼近。IDF 优化模型表述如下:

$$\begin{aligned} \text{Min: } & f(Z, X, Y(Z, X)) \\ \text{S.t. } & g_i(Z, X, Y(Z, X)) \leq 0 \quad i=1, 2, \dots, m \\ & h_j(Z, X, Y(Z, X)) = 0 \quad j=1, 2, \dots, n \\ & J_k(Y_{mk}^*, Y_{mk}) = |Y_{mk}^* - Y_{mk}| = 0 \quad k=1, 2, \dots, l \end{aligned}$$

式中: Z 是全局设计变量; X 为局部设计变量; Y 为状态变量; J 为学科一致性约束; Y^* 为系统优化器分配的耦合变量最优值。

IDF 的框图如图 3 所示。

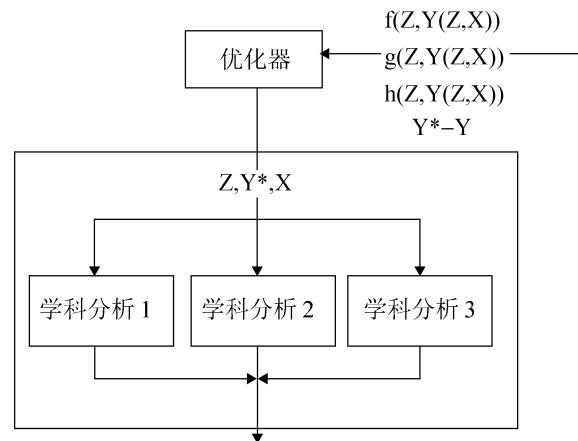


图 3 IDF 框图

(3) CSSO 框架

CSSO 的主要思想是将设计问题进行近似简化,将设计问题分解为若干学科级问题,不同学科领域内的专家采用适合自身的优化算法进行优化设计,而某个学科对其他学科的影响则通过近似模型来获取。CSSO 方法主要有:基于敏感度分析的 CSSO-GSE 方法和基于响应面的 CSSO-RS 方法。CSSO-GSE 的主要缺点在于存在振荡现象,在优化过程中子空间的搜索范围较小。CSSO-RS 方法的主要过程如图 4 所示。

1) 给出一组初始设计变量,进行系统分析,求出一组与设计变量对应的状态变量;

2) 利用这些数据构造响应面,通过响应面对状态变量与设计变量作出近似的关系;

3) 系统分析后各学科级进行优化, 当涉及其它学科的状态变量时, 可以通过响应面来获取;

4) 利用学科级优化的结果, 再次进行系统分析, 更新响应面。然后进行系统级优化, 系统级优化中所有状态变量的计算均基于响应面近似。

系统级优化结束后, 将系统级最优设计变量再次进行系统分析, 并开始新一轮的响应面构造和学科级优化。这样响应面近似越来越精确, 直到相邻两次系统设计方案相差无几, 认为设计过程收敛到最优解, 设计过程结束。

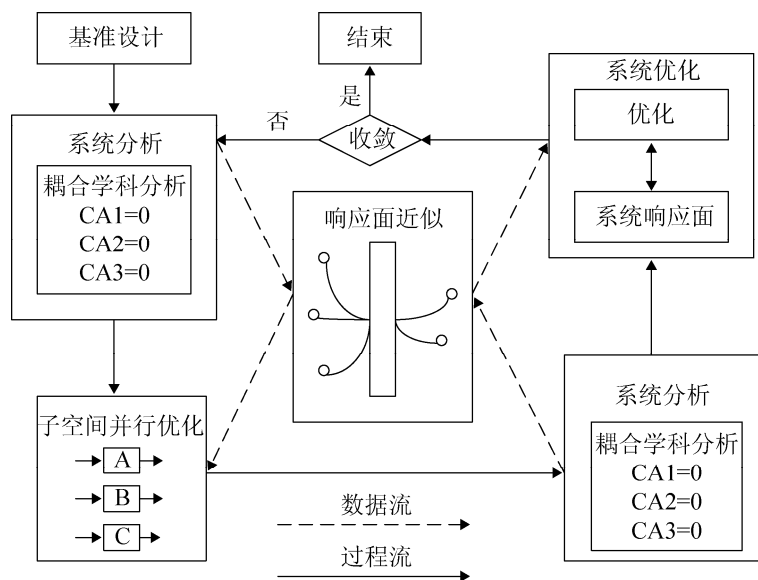


图 4 CSSO 流程图

(4) BLISS 框架

BLISS 方法将多学科问题设计变量分为两层, 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 算法, 在优化过程开始时, 需要一次完全地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。

在 BLISS 方法中, 如果初始点是多学科可行的, 则优化的每一轮循环均能保证所得的结果是多学科可行的; 如果初始点不可行, 则随着迭代的进行, 每一轮的设计结果会在减少约束违背量的情况下逐渐向可行域靠近。

BLISS 方法主要是通过梯度搜索对设计结果进行改进, 因此在运算过程中会用到大量的微分信

息(除类似于 GSE 中的导数外, 还包括最优敏感度导数), 对于微分信息难以获取, 或是设计参数为离散变量的情况下, 该方法就不是太适用了, 这也是该方法一个较大的缺陷所在。

(5) CO 框架

CO 方法是一种新型的耦合系统的多级优化方法, 因其双层结构著称。CO 方法将原有的优化设计问题分为两级, 一个系统级优化和多个子系统的并行优化。各子系统独立进行优化分析, 系统级优化器负责协调。在多学科设计优化中, 状态变量是设计变量的函数, 只有设计变量才是独立的。但在 CO 方法中, 为了保持各子系统的独立性, 必须将状态变量当作设计变量。这样, CO 方法在处理高度耦合的系统或者是学科间交叉变量远多于子系统变量的系统时, CO 方法应用的局限性很大, 处理效果不是很理想。换句话说, CO 方法适合于处理小耦合度系统。协同优化过程的步骤如下:

1) 系统层将设计变量的初值(最好在可行域

内)传给子系统层;

2) 子系统层计算出设计变量的最优值;

3) 子系统层将最优值传给系统层, 各子学科优化得到的解可能出现不相容的情况, 可以将它们进行现行组合以消除不相容性;

4) 系统层比较该值和上次传给子系统层设计变量值的差别, 如果差在某个可允许的范围内, 则迭代结束, 得到最终的结果, 反之, 系统层进行优化, 给出下次迭代的设计变量值, 并跳至第 2)步。

协同优化方法的算法框图如图 5 所示。

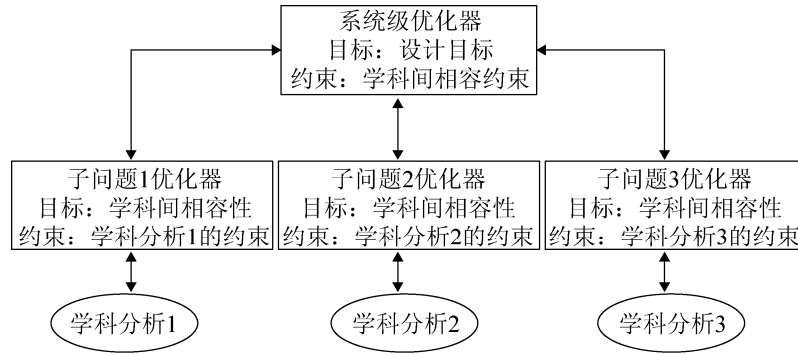


图 5 CO 方法框图

多学科虚拟样机优化强调充分利用各学科比较成熟、精度较高的学科分析软件建立模型, 在系统中通常是隐式模型与显式模型共存, 具有高度复杂性的特点。针对多学科虚拟样机优化的这些特点, 从简单性、显式性、移植性、效率、精度等几个方面对上述多学科设计优化方法进行考虑:

1) 简单性——方便进行执行与修改。主要由执行具体优化工作时所需的优化器总数目和优化设计变量来衡量。

2) 显式性——对模型能用函数表达和修改的能力的要求。

3) 移植性——将给定方法集成到现有的组织结构中的可行性。这个衡量标准考虑的是一个给定结构利用工作分工和学科自治优势的能力。

4) 效率——获得多学科最优设计所需的计算次数。它由学科分析(包括敏感度分析和近似分析)次数来衡量。

5) 精度——在定义的设计空间内, 获得一定精度的最优学科可行设计的能力。通过比较计算值和给定的最优值来衡量。

根据多个测试案例的结果, MDO 方法性能总对比如表 1 所示。

表 1 MDO 方法性能总结表

	精度	效率	显式性	简单性	移植性
最好	MDF	IDF	MDF	MDF	CO
	IDF	BLISS	IDF	IDF	CSSO
	BLISS	CSSO	CO	CO	BLISS
	CO	CO	CSSO	CSSO	IDF
最差	CSSO	MDF	BLISS	BLISS	MDF

从以上的比较不难看出, MDF 和 IDF 框架在单级优化框架, CO 在多级优化框架中显示出了良好的性能。在武器装备系统多学科优化的框架上, 我们将重点考虑 MDF, IDF 和 CO 框架。根据不同的应用需求, 对 MDF, IDF 和 CO 框架方法进行改良, 以适应问题的需要。

2.2 改进单级优化框架

MDF 多学科虚拟样机优化框架具有简单性和工程实用性强的优点, 但是其缺点也是非常明显的, 那就是扩展性很差。CO 多学科虚拟样机优化框架的优点是扩展性好, 但是其复杂的双层优化结构在实际中很难进行管理调度, 阻碍了其应用。再者, 对于耦合度很大的系统, CO 多学科虚拟样机优化框架的寻优能力大打折扣。IDF 多学科虚拟样机优化框架结构简单而且扩展性好。但问题在于

IDF 多学科虚拟样机优化框架同样不适合耦合度很大的系统, 在耦合度很大的系统寻优时, IDF 优化器的寻优能力和寻优效率都严重下降。本课题提

出了一种基于局部子系统分析的多学科虚拟样机优化框架 (Local System Analysis IDF)。MDF, CO, IDF 和 LSA-IDF 优化框架的关系如图 6 所示。

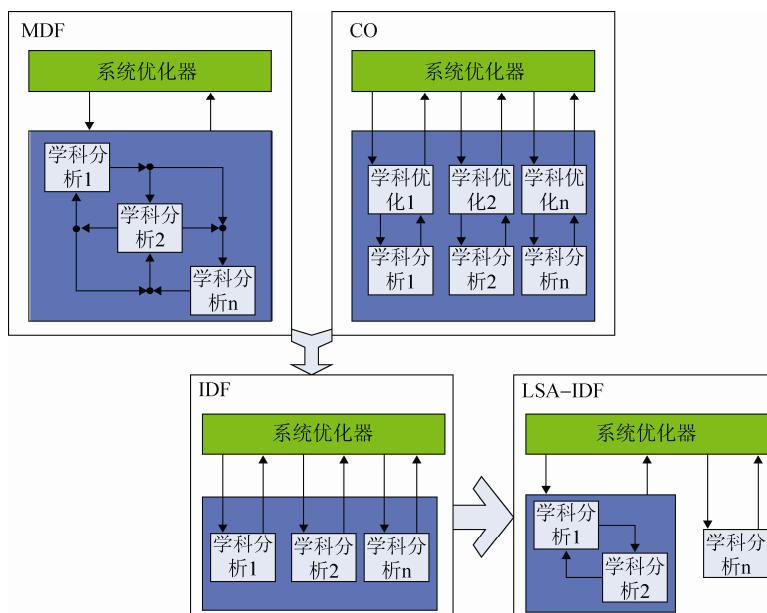


图 6 LSA-IDF 演变过程

LSA-IDF 优化框架继承了 MDF 优化框架简单性和 IDF 优化框架易扩展的优点。LSA-IDF 优化框架的运行过程与 IDF 优化框架的运行过程相似。系统优化器将设计变量的初值传递给各子学科, 接着子学科进行学科内部分析, 然后将分析的结果传递给系统优化器, 系统优化器根据各子学科分析结果, 改变设计变量值进行下一次的循环。LSA-IDF 的系统优化器控制学科之间的耦合变量, 使学科之间达到一致或者相容, 驱动单学科向多学科的可性逼近。LSA-IDF 与 IDF 优化框架最大的区别是: 在 LSA-IDF 优化框架中, 存在局部的全系统分析 (Local System Analysis)。在耦合度很大的子学科之间, 保持多学科可行法, 进行局部的多学科分析。对于耦合度较小的子学科, 采用单学科可行法, 进行单学科分析。这样, LSA-IDF 优化框架在处理耦合度大的系统时, 不需要打断耦合度大的局部子系统, 而是继续保持它们的局部子系统的多学科分析特性。LSA-IDF 优化框架不需要增加过多的辅助设计变量来给系统优化器增加计算负担, 提高了寻优

的速率。另一方面, LSA-IDF 优化框架最大可能地保持原系统的结构特征, 保证了寻优的概率和精度。

2.3 改进多级优化框架

MCO, 即改进 CO 方法 (Modified CO, MCO), 继承了标准 CO 方法算法模块和学科自治性的特点, 通过改进系统级优化函数和学科一致性约束函数、增加学科一致性约束权重降低了计算难度, 收敛和解耦效果更好。改进如下:

(1) 系统级优化函数的改进

采用罚函数法将系统级优化函数由约束优化问题转化为无约束优化问题, 即通过将约束最优化问题转化为一个无约束最优化问题或多个无约束最优化问题。在原约束最优化问题的目标函数中引进约束影响的附加项, 构成一个新的无约束最优化问题的目标函数, 当取罚因子充分大时最优解可以无限逼近原约束优化问题的最优解。改进的系统级优化模型为:

$$\text{Min} : F(z) + \gamma \sum_{i=1}^n (J_i^*(z))^m$$

其中 γ 为惩罚因子, m 为罚函数次数, 一般取 2, 构成二次罚函数。

(2) 学科一致性约束函数的改进

CO 方法子系统的一致性约束函数采用 2 范数形式可能导致优化的不稳定, 同时计算量也较大。通过牺牲部分算法性能提高计算效率并消除不稳定性, 保证其非负性。工程实际中, 在保证非负性的前提下, 可以将二次函数转化为一次函数。虽然牺牲了部分计算精度, 但大大提高计算效率。即:

$$J_j(X) = \sum_{i=1}^n (|X_{ij}^s - Z_{ij}^s|^2 + |Y_{ij}^s - Z_{ij}^c|^2)$$

变换为:

$$J_j(X) = \sum_{i=1}^n (|X_{ij}^s - Z_{ij}^s| + |Y_{ij}^s - Z_{ij}^c|)$$

其实质是将式中的偏差由 2 范数变为 1 范数。

(3) 增加学科级一致性约束权重

在实际应用中, 存在两个子系统(学科)数量级差距很大或者两个学科对系统整体性能影响因子不同的情况。MCO 的计算过程及方法均与 CO 相似。

MCO 框图如图 7 所示。

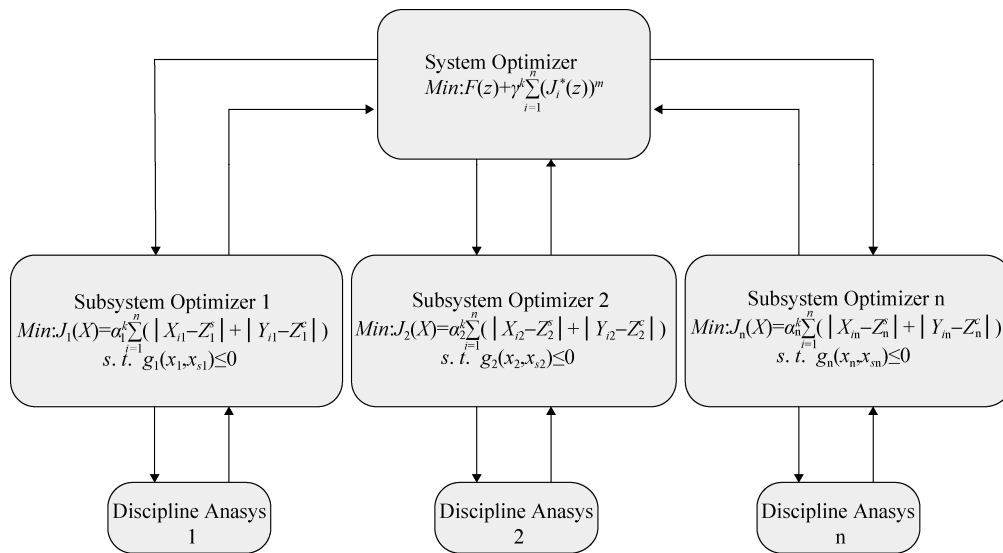


图 7 MCO 框架

3 虚拟样机多学科优化方法的应用与实现

以某型号武器装备系统优化设计应用需求为背景, 开展了基于虚拟样机的多学科优化设计与应用建模、开发, 构建了应用系统, 实现了该系统动力学仿真的多学科耦合, 首次在该型号武器装备动力学仿真中应用了动力学仿真模型和流体仿真模型优化设计, 取得了一定效果。

3.1 虚拟样机系统构建

某型号武器装备系统模型由三大部分构成: 起竖系统多体动力学模型、流场模型以及带显示的优

化模型, 见图 8。多体动力学模型采用多体动力学仿真软件 ADAMS 开发, 流场模型则用 Fluent 建立, 用于分析流场参数。带显示的优化模型则是实现人机界面操作、优化设计参数, 同时对起竖、回平状态进行三维动画显示的功能。构建的静态结构模型如图 9 所示。

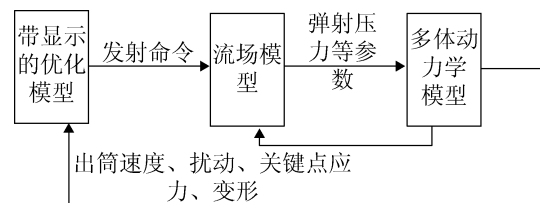


图 8 仿真应用系统模型组成

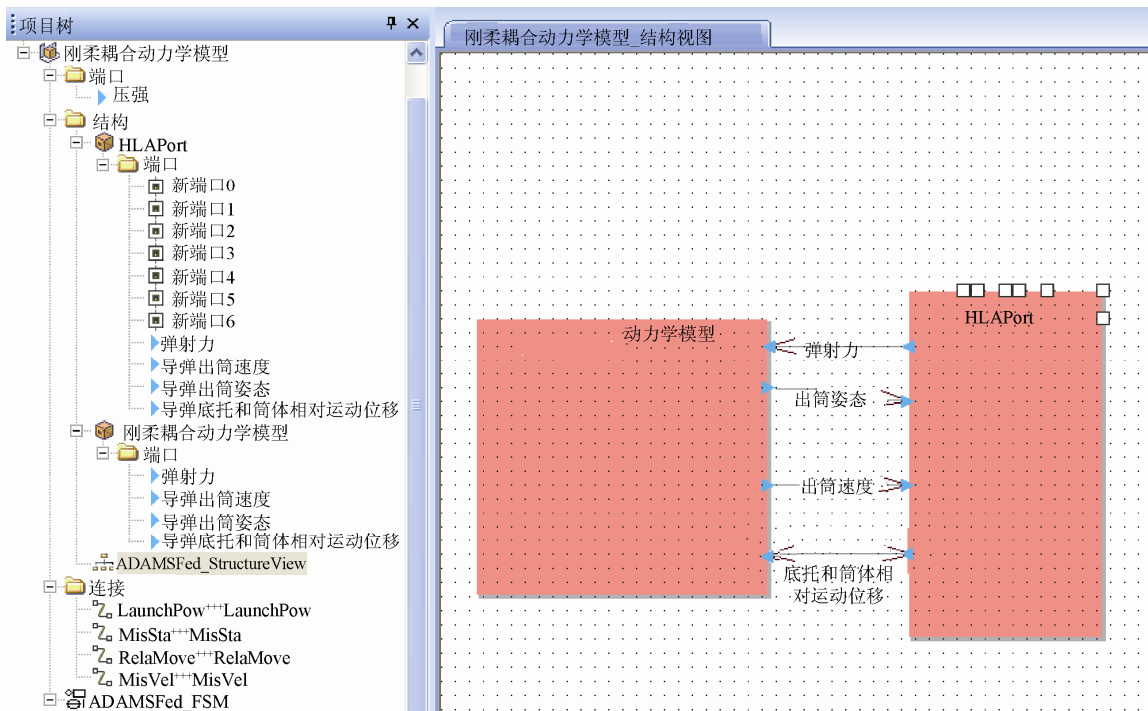


图 9 应用系统的静态结构图

3.2 单学科建模

基于商用软件 ADAMS MD R3 完成了对某型号弹射过程的动力学仿真, 多体动力学模型采用刚柔耦合的建模思想, 即对车架、发射架、发射筒这些部件先在有限元软件中建立模态模型, 进行柔性化, 输出 MNF 文件后再导入 ADAMS 形成柔性体。基于商用软件 Fluent6.3.2 完成了对该型号内弹道二维旋转轴对称的仿真, 仿真过程采用压力求解器, 湍流模型采用 $K-\epsilon$, 入口边界条件为压力进口, 导弹的运动采用动网格技术, 计算结果输出导弹受力的 $F-t$ 值。此 $F-t$ 曲线即为 Adams 的输入条件。

3.3 多学科优化设计

基于虚拟样机构建的多学科优化设计流程如图 10 所示, 首先根据产品设计需求和已有的技术资料确立产品的功能和优化问题的描述形式, 进行产品的多学科建模, 通过产品分解, 将产品的复杂设计工作划分为多个较小子系统的设计任务, 与现有的设计组织形式相匹配。采用模块化技术进行产

品的智能重分析, 利用近似方法, 构造学科响应, 协调各学科的优化求解策略, 建立适应多学科设计优化要求的产品分析与优化的数学模型。根据不同学科和不同优化阶段的特点, 选择优化算法, 得到一个收敛满意解。通过平台框架, 评价决策优化结果, 对设计优化过程发送指令进行控制。

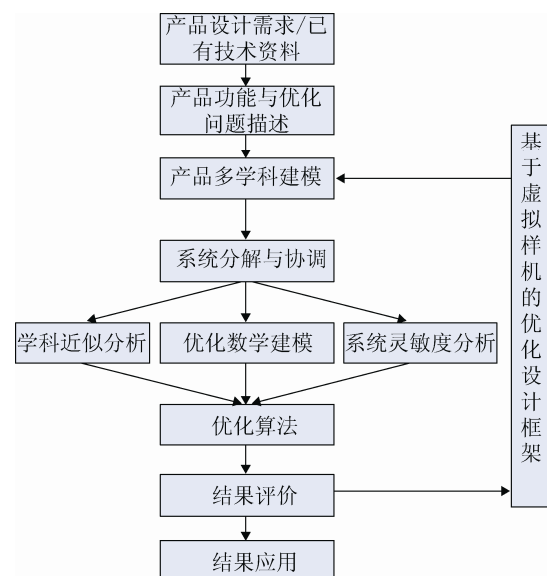


图 10 基于虚拟样机的优化设计流程

本课题设计开发出系统优化模型, 利用 LSA-IDF 方法将设计变量的初值传递给动力学和流场子学科, 由子学科进行学科内部分析, 然后将分析的结果传递给系统优化器, 系统优化器根据各子学科分析结果, 改变设计变量值进行下一次的循环。ADAMS 支持用户自定义的子程序 (Subroutine), 用户通过优化模型在外部编写 ADAMS 的子程序, 可以在外部与 ADAMS 进行数据通信及控制 ADAMS; Fluent 能够根据计算的结果调整网格, 这种网格自适应能力对于精确求解有较大梯度的流场有很实际的作用。在优化模型中通过一个批处理命令脚本文件, 提交计算任务, 控制流场模型的运算, 并获得输出结果。

3.4 仿真系统运行

在 COSIM 平台的支撑与管理下, 各分系统仿真联邦成员进行协同仿真, 每个仿真周期, 各分系统仿真联邦成员中的分系统模型之间通过 HLA/RTI 中间件交换解算数据, 协调时间推进。实现了该武器系统动力学仿真的多学科耦合, 首次考虑了动力学仿真模型和流体仿真模型由于耦合而带来的相关问题。优化了燃气发生器设计、起竖油缸、调平油缸刚度、阻尼参数、出筒姿态角速度等参数, 为该型号其它系列虚拟样机的设计打下良好的基础。

4 结论

本课题针对复杂武器装备系统虚拟样机优化设计的需求, 提出了融合专业模型库、优化算法和

框架、灵敏度分析、试验与近似技术的多学科优化总体框架, 能够实现基于虚拟样机的复杂武器装备多学科优化设计。结合某型号构建了多学科虚拟样机优化应用系统, 基于 LSA-IDF 方法建立了优化模型, 改变了该型号传统的学科之间串行仿真方式, 提高了虚拟样机不同学科之间的耦合度, 提升了武器装备系统虚拟样机优化设计能力。

后续课题组还将深化应用多学科优化设计方法, 在更多型号虚拟样机仿真系统中实现优化设计与分析, 从而辅助武器装备系统的科研设计、研制及生产。

参考文献:

- [1] 李伯虎, 柴旭东, 朱文海, 等. SBA 支撑环境技术的研究 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 181-185.
- [2] 张菲, 任全彬, 杨军, 等. 基于多学科设计优化的空地导弹概念设计[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(2): 149-154.
- [3] 邢必达, 龚光红, 李妮, 等. 基于多粒度模型的导弹 MDO 方法研究 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(11): 2639-2645.
- [4] 王平, 郑松林, 吴光强. 基于协同优化和多目标遗传算法的车身结构多学科优化设计 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 102-108.
- [5] 王晓东, 谢中朋, 崔亚辉. 基于 Isight 的 BLISS 算法框架 [J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(增 2): 15-17.
- [6] 邢永刚, 唐硕. 耦合系统协同进化多学科设计优化算法研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(2): 257-259.
- [7] 纪国华, 李彦, 李文强, 等. 一种面向复杂系统的多学科设计优化方法 [J]. 机械设计与研究, 2011, 27(4): 6-12.
- [8] Fan Hui, Li Weiji. An Efficient Method for Reliability-based Multidisciplinary Design Optimization [J]. Chinese Journal of Aeronautics(S1000-9361), 2008, 21(4): 335-340.