

## 基于 MDO 方法的卫星集成设计系统分析与实现\*

赵 勇,许 林,陈小前,王振国

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘 要:**为解决多学科设计优化方法中多学科设计、多学科分析、多学科优化过程与卫星总体设计流程集成的问题,采用变复杂度建模技术,并借鉴产品数据管理思想,设计并实现了面向总体设计的卫星集成设计软件系统。阐述了软件的设计思想、系统组成和功能特点,并给出了月球探测卫星概念设计问题的具体应用实例,结果表明软件在解决多学科设计优化方法应用于卫星集成设计问题时的可行性。

**关键词:**卫星;多学科设计优化;集成设计;软件框架;月球探测卫星

**中图分类号:**V221;V423 **文献标识码:**A

## Analysis and Implementation of Satellite Integrated Design System Using MDO

ZHAO Yong, XU Lin, CHEN Xiao-qian, WANG Zhen-guo

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

**Abstract:** It is a challenge to integrate Multidisciplinary Design (MD), Multidisciplinary Analysis (MA), Multidisciplinary Optimization (MO) processes with the satellite system design flow. A system-oriented software framework was formulated and implemented for the satellite integrated design by using Variable Complexity Modeling (VCM) method and Production Data Management (PDM) technology. The design conception, structural components and functional characteristics were introduced. Then the software was tested by the example of Lunar Exploration Satellite conceptual design. The results show that it is an effective approach to apply Multidisciplinary Design Optimization (MDO) technology to satellite integrated design.

**Key words:** satellite; multidisciplinary design optimization; integrated design; software framework; lunar exploration satellite

卫星是一个高度复杂的多学科耦合系统,最终性能取决于整体最优。多学科设计优化方法(Multidisciplinary Design Optimization, MDO)是实现卫星设计“快、好、省”目标的有效手段。它是在复杂系统的设计过程中,结合系统的多学科本质,充分利用各种多学科设计与多学科分析工具,最终达到基于多学科优化的方法论。可以表述为:

多学科设计优化(MDO) = 多学科设计(MD) + 多学科分析(MA) + 多学科优化(MO)

由于卫星总体设计的复杂性,以及工业部门卫星设计过程过多依赖经验、设计过程数据流的衔接主要依靠人等现状所带来的组织管理的困难性,MDO在卫星总体设计中的应用尚处于理论研究阶段<sup>[1]</sup>。如何将MD、MA、MO与卫星总体设计流程集成,实现设计/分析过程的自动迭代,形成数字化设计流程是MDO应用面临的重要障碍。国外已有将MDO应用于天基红外系统星座的设计<sup>[2]</sup>,天基望远镜的光/热/结构的耦合分析<sup>[3]</sup>,还有用于卫星概念设计的工具框架MuSSat<sup>[4]</sup>,航天器多学科辅助设计系统MIDAS<sup>[1]</sup>,航天器集成设计/仿真软件系统SSDSE<sup>[5]</sup>。国内也有应用MDO进行卫星/星座概念设计<sup>[6]</sup>,出现了通用性较强的飞行器多学科集成设计软件<sup>[7-8]</sup>,但是缺少与卫星总体设计流程相融合的机制,难以实现工作流与数据流的集成,不能很好地适应卫星数字化集成设计的发展要求。

\* 收稿日期:2006-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10302031);国家“863”计划资助项目(2005AA721051)

作者简介:赵勇(1977—),男,博士生。

### 1 系统设计与实现

软件按照卫星总体研制技术流程,以工程数据库为基础,引入产品数据管理和 MDO 技术,实现卫星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,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,最终形成卫星总体设计的初步优化方案。

#### 1.1 设计思想

按照工业部门的研制技术流程,卫星总体设计流程可以分为:任务分析、方案可行性论证和方案设计三个阶段<sup>[9-10]</sup>。对应 MDO 中的多学科设计、多学科分析和多学科优化过程,将 MDO 融入卫星设计,则修改后的卫星总体设计流程如图 1 所示。其中,任务分析阶段的输出是设计指标,需要进行分解的指标主要包括质量、功耗、可靠性、成本、进度等;方案可行性论证阶段的输出是总体方案设想或基线设计方案;方案设计阶段的输入是基线设计方案,输出是总体设计优化方案。为了清晰起见,图中没有给出设计阶段间的反馈迭代关系。软件借鉴变复杂度建模思想,不同研制阶段采用不同精度的模型(理论模型/经验模型),并且集成商业软件 iSIGHT 进行后台优化。

卫星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,而工业部门存在着设计资源的分布性、设计流程的阶段性、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,必须考虑下述因素:

- (1) 变复杂度建模:通过分解和协调等手段将卫星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,考虑系统分解的合理性和学科间耦合关系的准确性进行参数化建模,形成包含经验模型、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,逐步缩小系统方案空间,从而不断提高方案分析精度。
- (2) 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。集成方式如可执行程序、动态链接库等,共享方式如数据文件、数据库共享等,保持学科设计分析的相对独立性。
- (3) 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。
- (4) 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 workflow 与过程管理要求,按照卫星研制技术流程与专业划分,定义、运行和监控设计工作流程。根据产品结构管理要求,跟踪管理设计方案的树状版本信息,形成总体方案分析树。根据电子仓库管理要求,数据库集中统一管理,保证数据的唯一性、一致性和可重用性。

#### 1.2 系统组成

软件充分考虑通用性、扩展性、灵活性和易用性,贯穿面向对象思想,从理论上和技术上验证 MDO 在卫星总体设计中的实现途径,并最终形成卫星数字化集成设计平台。

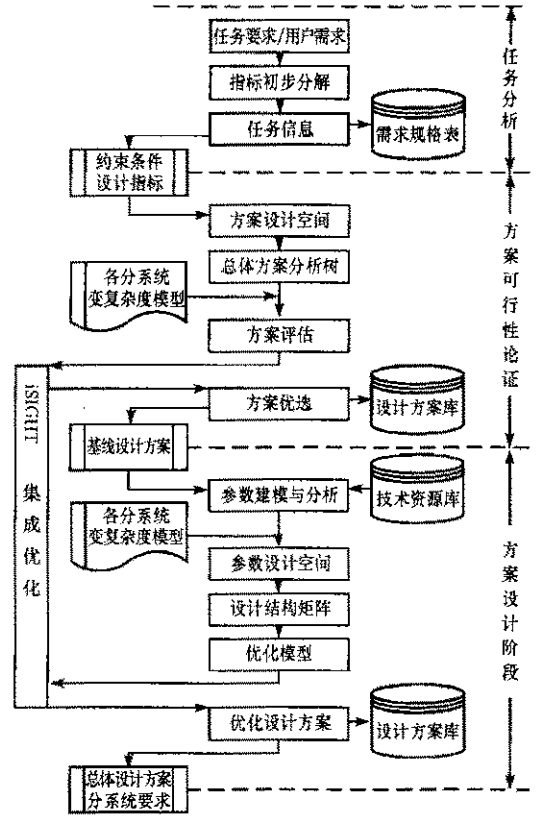


图 1 卫星总体设计流程示意图  
Fig.1 System design flow chart

软件系统由数据服务器、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,进行有效的(a)数据管理 (b)自动化工具/过程集成与封装 (c)MD、MA、与 MO 过程的集成与实现 (d)数据表征。软件总体框架如图 2 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卫星分析与设计工具/代码,以及以 iSIGHT 为基础的后台优化模块。

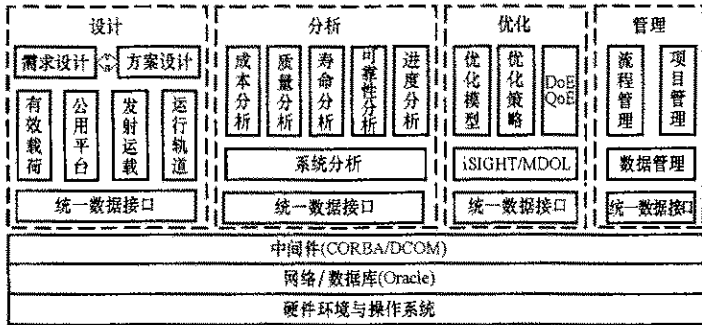


图 2 软件总体框架

Fig.2 Software architecture

(1) 项目与流程管理模块。采用系统管理员、总设计师、主任设计师和一般设计师等四种角色分级负责的方式。系统管理员负责系统安装与维护,进行用户、角色、组、权限定义,进行项目的设计生命流程定义;总设计师负责流程定义、流程监控和分系统方案的审批、总体方案的评估优化,以及指标与设计任务分配,采用一级复杂度模型;主任设计师和一般设计师负责分系统的设计,主任设计师采用二级复杂度模型,一般设计师采用三级复杂度模型,一般设计师的任务由主任设计师分配。

(2) 优化集成模块。优化集成包括建立优化模型,选择搜索策略(优化算法)和执行优化过程。优化模型的建立包括设计变量、约束条件和优化目标的定义;搜索策略根据 iSIGHT 提供的优化算法库进行选择 and 配置;优化过程由用户通过界面操作定制如 AAO(All At Once)、IDF(Individual Discipline Feasible)、CO(Collaborative Optimization)等 MDO 算法的组织结构。优化过程的执行由 iSIGHT 自动完成。

(3) 数据库管理模块。数据库管理的信息主要包括:项目信息、流程信息、用户角色信息,设计方案数据、技术资源数据、优化方案数据、文档数据(包括数据文件、图)等。数据库采取集中管理,分散执行的模式,所有数据集中于服务器端,功能分散于各客户端。

### 1.3 功能特点

本软件系统具有分布式的信息集成、过程集成和组织集成的特征,从而实现了面向总体设计,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。

(1) 集中的数据管理,体现信息集成;

(2) 以工作分解和流程控制进行设计进程的协调和控制,体现过程集成;

(3) 基于分布式资源,分散的设计人员异地参与协同设计,体现组织集成,实现项目管理;

(4) 把多学科设计、分析与优化与设计流程有机融合,体现多学科设计优化的集成。

(5) 按快速设计优化,快速的综合(关联)各个分系统的设计数据,形成总体方案分析树,并采取嵌入式优化方式,灵活的进研优化问题的定义、执行和结果的查看。

(6) 软件设计贯穿面向对象思想。所有程序,包括学科模块、GUI 完全采用 VC++ 进行开发,数据库采用 Oracle9i。软件目前支持的学科模型包括载荷、结构、推进、GNC、测控、数管、电源、热控、发射、轨道、构型以及质量、功率、成本和可靠性。集成的商业工具软件有进行轨道分析的 STK、几何构型设计的 Solidworks 和多学科优化软件 iSIGHT。

## 2 系统应用实例

软件以月球探测卫星的概念设计为初步应用实例。基本步骤如下:系统管理员完成项目定义,用户、角色及权限的分配;总设计师建立设计流程,如图 3 所示,分配设计任务与目标;主任设计师建立分

系统设计流程,分配分系统的设计任务,进行分系统方案选择/设计;一般设计师对分系统方案进行进一步详细分析,分系统设计根据设计流程可以并行或串行展开,分系统方案须经过总设计师的审批才能进入设计方案数据库;然后总设计师合成分系统设计形成总体设计方案,所有设计人员完成工作后即形成了总体方案树;总设计师可以选择基线设计方案进行进一步的分析与优化。图4给出了合成后的以版本信息关联的总体方案树结构。

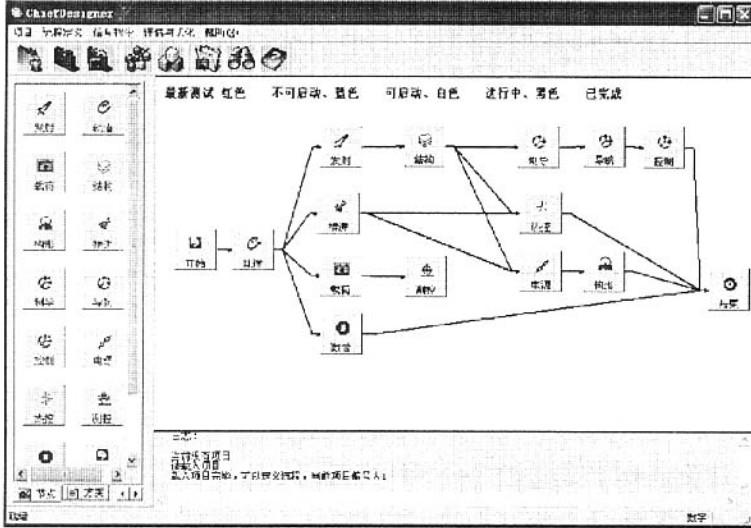


图3 流程管理主界面  
Fig.3 Design flow management interface



图4 分系统方案与总体方案树  
Fig.4 Design trade tree

设计流程中模型复杂度的演变如下(以轨道设计为例):总设计师利用简单的经验模型,估算轨道寿命、轨道机动与轨道维持所需的速度增量;主任设计师采用二体假设下的轨道模型,分析轨道速度增量需求、轨道覆盖、光照条件、测控条件等;一般设计师采用的轨道模型则考虑复杂摄动因素,在上述基础上进一步分析发射窗口、可测控弧段、飞行程序等。

本文采用 AAO(All At Once)方法,并利用 iSIGHT 中的多岛遗传算法进行求解。在定义设计变量、约束变量及目标后,优化过程由 iSIGHT 后台执行,优化集成与实现如图5所示。以成本最低为优化目标,优化结果:卫星质量 2365.4kg,环月轨道高度 350.0km,与文献[11]提供的数据比较接近,同时结果受学

科模型的精度影响较大。

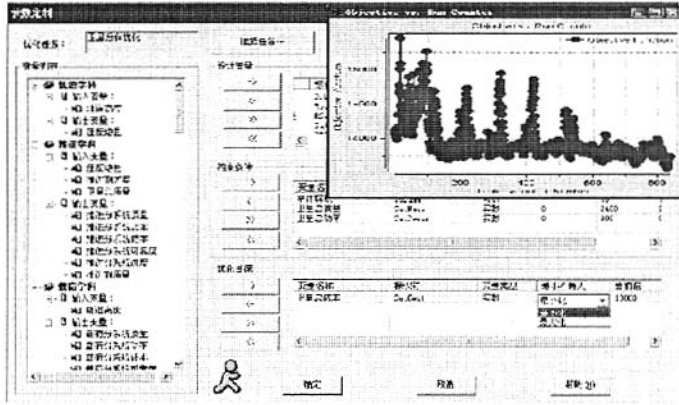


图 5 优化集成与执行

Fig.5 Integration and execution of optimization procedure

### 3 结束语

借鉴 MDO 和 PDM 技术,以数据库为中心,在分布式计算机网络上集成卫星各个子系统的不同复杂度的模型代码与专业分析工具,实现了多学科设计、分析、优化过程与总体设计流程的融合。该软件能够快速形成总体设计方案,并对设计方案进行分析优化。在月球探测卫星概念设计中的初步应用证明了软件的有效性,及 MDO 在卫星集成设计中应用的技术途径。

软件是一个不断扩展和完善的开放式系统,目前从理论上和技术上验证 MDO 在卫星集成设计中的实现途径,需要进一步考虑:

- 集成效率高的多级 MDO 算法进行分解协调,如 CSSO、CO 与 BLISS;
- MDO 与商业 PDM 系统的集成;
- 支持协同设计、分析、优化及更多专业分析工具的灵活集成;
- 支持基于 Web 的协同设计优化;
- 支持设计结果的仿真分析,把设计(虚拟样机、数字化设计)与仿真相融合,扩展为设计/仿真一体化的协同环境。

### 参考文献:

- [1] 胡凌云.多学科设计优化技术在卫星总体设计中的应用[J].中国制造业信息化,2004,(1):17-21.
- [2] Budianto I, Olds J. A Collaborative Optimization Approach to Design and Deployment of a Space Based Infrared System Constellation [A]. In: Proceedings of 2000 IEEE Aerospace Conference [C]. USA: Big Sky Montana, 2000.
- [3] Cullimore B, Panczak T, Baumann J, et al. Automated Multidisciplinary Optimization of a Space-based Telescope [R]. SAE 2002-01-2445, 2002.
- [4] Wilke M, Quirnbach O, Schiffner M, et al. MuSat-A Tool for Satellite Design in Concept Design Centers [A]. In: Proceedings of EuSEC 2000 [C].
- [5] Ferebee M J, Troutman P A, Monell D W. Satellite Systems Design/Simulation Environment: A Systems Approach to Pre-Phase A Design [R]. AIAA 97-0231.
- [6] 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.
- [7] 王书河,何麟书,张玉珠.飞行器多学科设计优化软件系统[J].北京航空航天大学学报,2005,31(1):51-55.
- [8] 韩明红,邓家提.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.
- [9] 徐福祥.卫星工程[M].北京:中国宇航出版社,2002.
- [10] Wertz J R, Larson W J. Space Mission Analysis and Design [M]. Third Edition. USA: Microcosm Press, 1999.
- [11] 欧阳自远.我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J].地球科学进展,2004,19(3):351-357.

