

# 运载火箭多学科概念设计软件构建技术研究

肖 进, 杜可君, 马苏宏

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 为了满足新型运载火箭“通用化、组合化、系列化”的设计要求, 同时朝着降本增效的方向发展, 需要研究多专业一体化设计方法; 通过梳理概念设计时总体、气动、弹道、姿控各专业的工程算法, 结合 MDO 理论与层次式模型管理的软件架构方法, 提出了面向运载火箭概念设计的多学科集成优化软件构建技术, 包括专业模型、CAD 模型、仿真模型、优化模型、迭代模型等在内的 8 类软件模型的定义与有效管理, 并形成专业计算与分析软件; 此软件可实现火箭芯级、助推器、稳定翼面等总体外形的参数化设计, 三维图像的展示与编辑, 基于部件组合法的气动工程计算与性能分析, 质量特性计算, 动力系统选型及弹道计算与分析, 优化设计等功能; 通过此软件构建技术的研究与功能实现, 为运载火箭概念设计过程的多学科集成优化设计提供了工具支撑。

**关键词:** 运载火箭; 概念设计; 软件

## Research on Develop Technology of Launch Vehicle Multi-disciplinary Conceptual Design

Xiao Jin, Du Kejun, Ma Suhong

(Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** To meet the “generalization, combination, series” design requirements of new launch vehicle and for purpose of reducing costs and increasing benefits, study on the multidiscipline integration design method is necessary. Sorting out the engineering algorithms in disciplines of Overall Design, Air Dynamic, Trajectory Design and Attitude Control during concept design, combining with MDO and the software architecture method of hierarchical model management, a multidiscipline integrated and optimized software construction technique is proposed, orienting to launch vehicle concept design, which covers the definition and management on eight types of software models, including the professional model, CAD model, simulation model, optimization model and iteration model. A professional calculation and analysis software is implemented accordingly, with capabilities of parametric design on rocket Core, Booster, Stable Fin and other overall configuration. It supports the calculation and performance analysis of air dynamic based on component combination method, the calculation of mass characteristic, propulsion system selection and trajectory calculation, analysis and optimization. The functionality to display and edit 3D images is also provided. The study and implementation of software constructure technique provides tool support for multidiscipline integration during concept design of launch vehicle.

**Keywords:** launch vehicle; conceptual design; software

## 0 引言

随着国际航天发射领域的商业化竞争日益加剧, 数字化设计技术的不断提升, 新型号、新任务的层出不穷, 在缩短研制周期、节约成本方面提出较高要求, 现有设计手段与设计工具已经无法满足新形势下的总体设计要求。

国外经过 20 多年的发展, MDO 概念已比较明晰, 各种 MDO 方法和应用框架逐步成熟。我国的 MDO 研究开展较晚, 无论是在 MDO 的理论方面, 还是在 MDO 应用水平方面都与国外先进国家相比有明显差距<sup>[1]</sup>。由于国内已经认识到 MDO 对提高设计水平的重要性, 因此近年来 MDO 的理论与应用研究发展较快, 并陆续取得一些研究成果。余雄庆等系统分析了 MDO 算法<sup>[2]</sup>, 并将 MDO 应用于电动无人机的设计; 胡峪等进行了飞机多学科设计的协同优化算法的研究<sup>[3]</sup>; 黄俊等结合飞机的总体优化设计进行了 MDO 的探讨<sup>[4]</sup>; 陈小前应用响应

面法进行了飞行器概念设计的 MDO 设计<sup>[5]</sup>; 卜广志探讨了 MDO 在鱼雷总体综合设计中的应用<sup>[6]</sup>; 陈琪锋进行了飞行器分布式协同进化 MDO 方法的研究<sup>[7]</sup>; 罗世彬将多种 MDO 方法应用到吸气式高超声速飞行器的总体设计中, 初步解决了这类多学科强耦合飞行器的设计难题<sup>[8]</sup>。

传统的型号研制过程中, 由于设计思路、设计工具及建模方法有明显差异, 使得结构类专业(几何建模、强度分析、载荷与动特性计算等)与总体参数类专业(气动、弹道、制导、姿控等)各自分开设计, 这样往往会因为双方信息传递不畅而产生设计结果互相矛盾, 或约束条件难以满足, 需要反复沟通与协调, 导致设计效率不高。针对此现状, 提出以新一代运载火箭总体方案论证为目的, 研究参数化 CAD 模型快速生成方法、从软件上打通结构类专业与总体参数类专业之间的接口, 实现从 CAD 模型中自动提取几何参数、质量特性数据及相关约束条件以驱动后续专业的设计, 从根本上解决这两类专业设计不同步的问题。同时提取各专业核心算法, 形成多学科概念设计软件, 为能高效、准确的进行新型号的总体论证与概念设计, 为探索航天发射领域总体设计新技术、新方法提供工具

收稿日期:2016-12-24; 修回日期:2017-02-27。

作者简介:肖 进(1983-),男,湖南常德人,博士,主要从事运载火箭数字化系统设计方向的研究。

支撑。

## 1 软件框架设计

对模块的有效管理取决于良好的管理策略。在软件框架中,各模块采用1个或多个模型表达,通过管理这些零散的模型实现管理功能。

模型(Model)是采用数学形式抽象表达,具有输入、输出接口和一定执行功能的实体。该实体描述了设计过程中所用到的数据、信息和计算方法。通过模型的创建、修改、执行、交互即可完成设计过程的演化。

由于总体设计过程具有明显的层次性,在模型的管理上也具有层次性,本软件采用图1所示的树形模型管理机制。

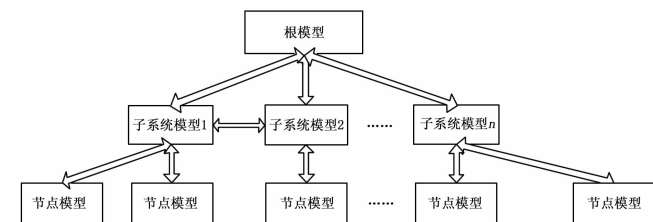


图1 软件框架的层次式模型管理

根据层次式模型管理,总体设计过程可以分解为一系列的功能模型。通过构造这些功能模型,建立其间的关系,并执行各种模型的功能,既可完成总体一体化设计过程的建模。根据软件功能需要,采用以下几种模型:

- 1) 专业模型:对应于专业模块。为了既能合理、全面地描述专业模型的信息,又能适应不同的学科,需要建立统一的数据结构。
- 2) CAD模型:CAD模型是在基本专业模型基础上构造,不同点在于其需要管理CAD实体模型。
- 3) 仿真模型:仿真模型是在基本专业模型基础上构造,不同点在于其需要管理时域仿真相关的信息。
- 4) 优化模型:对应于优化模块,其不单独执行,须依赖于子模型的执行。
- 5) 迭代模型:用于平衡耦合学科(或子模型)的输入/输出关系。
- 6) 试验设计模型:包括两方面功能:取样和参数分析。
- 7) 连接模型:用于建立各模型之间的通信和数据传递关系。
- 8) 组合模型:将多个关联的元模型进行综合,仅暴露外部输入/输出接口。

## 2 软件功能定义

此软件的执行模式为:在设计软件框架中,可按照给定的流程,快速确定总体方案,并对初始方案性能进行分析;其中,总体概念设计包括外形方案设计、部位安排方案设计、液体火箭方案选择、弹道设计及姿控系统;性能分析功能分为气动特性计算、质量特性计算、弹道仿真计算、姿控仿真计算及性能综合计算,如图2所示。

### 2.1 运载火箭总体方案快速设计功能

总体方案快速设计的目的是用于确定多学科优化的基准方案。为了充分探索设计空间,概念设计阶段需要建立多种备选总体方案。总体方案的多样性建立在学科方案多样性的基础

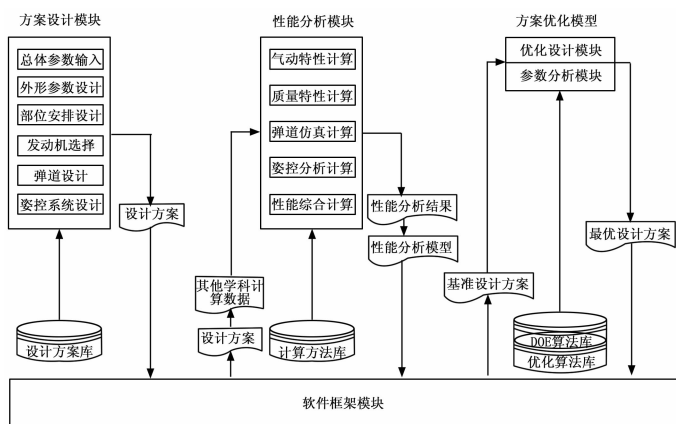


图2 多学科设计软件功能示意图

上。软件必须支持学科构思备选方案,包括:级数、气动布局、发动机选型、部位安排、飞行程序设计等方面。

### 2.2 运载火箭总体多学科优化功能

可利用优化算法,并建立气动、发动机、部位安排、弹道、姿控的内在耦合关系,根据设定的设计变量范围、约束条件、优化目标,自动完成总体多学科性能参数优化。总体设计优化功能模块提供优化变量选择与配置、约束条件设置、优化目标选择、优化算法选择与配置、集成优化计算、优化结果分析等功能界面。

### 2.3 运载火箭总体参数分析功能

利用试验设计方法,快速、批量生成总体设计变量输入,自动完成性能参数的计算与分析。提供总体设计变量选择与配置、试验设计方案选择与配置、多方案批量计算,多方案性能参数比较等功能界面。

## 3 软件模型设计

根据层次式模型管理,总体设计过程可以分解为一系列的功能模型。通过构造这些功能模型,并建立其间的关系,既可完成总体设计过程的建模。

根据本软件的功能设计,以下对所需的各种模型进行设计。

### 3.1 专业模型

专业模型对应于专业模块。为了既能合理、全面地描述专业模型的信息,又能适应不同的学科,需要建立统一的数据结构。专业模型信息由执行、输入、输出组成,数据结构也应包括这三部分内容。DM的形式化描述为:

$DSGModel = \langle inputPort, outputPort, inputEvent, outputEvent, execute \rangle$

其中,

inputPort,outputPort 分别为输入、输出端口集合;

inputEvent,outputEvent 分别为输入、输出事件集合;

executeFederal 为执行算法。

DSGModel 执行过程如下:

- 1) 接收到执行任务时,更新并输入端口;
- 2) 驱动执行体运行;
- 3) 更新输出端口;
- 4) 终止运行,并向执行体传输数据。

由于不同的专业模块的计算功能实体差异较大,因而统一

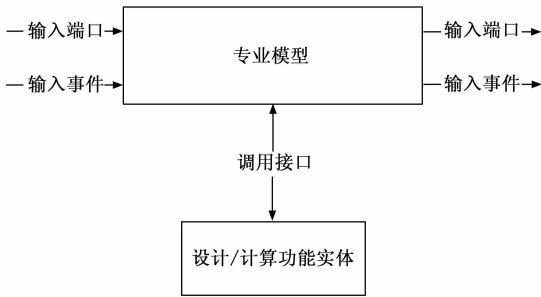


图 3 专业模型组成

的接口函数设计非常重要，主要包括三类接口：

- 1) 设计接口，对应于模块的设计功能，用于确定设计方案特征（输入输出接口）；
- 2) 分析接口，对应于模块的分析功能，用于对给定的设计方案特征，计算其性能；
- 3) 绘图接口，对给定的设计方案特征，完成图形绘制功能。

### 3.2 CAD 模型

CAD 模型是在基本专业模型基础上构造，不同点在于其需要管理 CAD 实体模型。因此，需要额外添加一个实体模型参数 body，其形式化描述为：

$CADModel = \langle inputPort, outputPort, inputEvent, outputEvent, body, execute \rangle$

### 3.3 仿真模型

仿真模型是在基本专业模型基础上构造，不同点在于其需要管理仿真相关的信息，其形式化描述为：

$SIMModel = \langle inputPort, outputPort, inputEvent, outputEvent, body, Y, U, F, X, SimScheme, execute \rangle$

其中，Y 为仿真模型的输出参数；

X 为仿真模型的状态参数；

U 为仿真模型的输入参数；

F 为仿真模型的右函数参数；

SimScheme 为仿真策略，内容包括：仿真算法，仿真步长，仿真起始时间和终止时间。

### 3.4 优化模型

优化模型（OPTModel）对应于优化模块。不同于 DSG-Model、CADModel、SIMModel，OPTModel 不能单独执行，须依赖于子模型的执行，如图 4 所示。其中子模型可能是 DSG-Model、OPTModel 或其它模型。

一方面，OPTModel 需要调度子模型完成优化；另一方面可能作为其他模型的子模型，此时 OPTModel 表现出与 DSG-Model 相同的接口。为此，采用以下统一的形式描述：

$OPTModel = \langle OM\_Outer, OM\_Inner, Algorithm \rangle$

其中，OM\\_Outer 与 DM 的描述一致，其输入端口包括：算法参数  $\langle AlgPar \rangle$ 、设计变量初始值  $\langle InitVar \rangle$ 、子模型输入端口集合中不作为设计变量，且不被其他模型端口所控制的端口值  $\langle InitPort \rangle$ ；输出端口包括：最优设计变量  $\langle OptVar \rangle$ 、最优目标函数  $\langle OptObj \rangle$ 、最优约束条件  $\langle OptCons \rangle$ ，表示优化完成的结果。

Algorithm 为 OPTModel 与执行算法的语义接口，通过该接口连接 OPTModel 与算法软件的参数和功能。

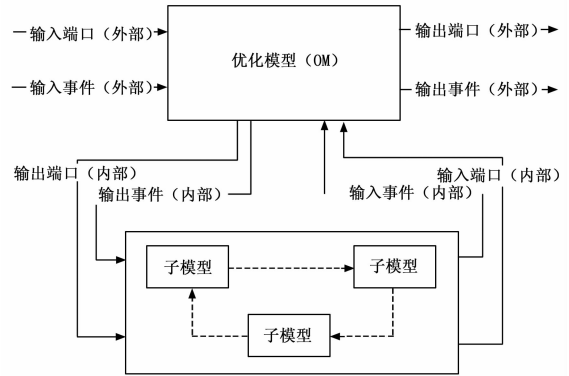


图 4 优化模型

$OM\_Inner = \langle inputPort, outputPort, inputEvent, outputEvent, Md, Couplings \rangle$  描述了优化模型内部结构。其中，Md 是模型集合，包括受控于 OM 的子模型集合以及 OPT-Model 本身；Couplings =  $\langle Cp1, Cp2, \dots, Cpn \rangle$  描述了子模型之间，以及子模型与优化模型之间的耦合关系；inputPort 包括约束条件和目标函数，由子模型解算得到，作为 OPTModel 的内部输出端口；outputPort 包括设计变量，由算法产生并赋值到子模型，作为 OM 的内部输入端口；inputEvent 当子模型执行完成后，向 OPTModel 发布 evStop 事件，通知仿真已完成，OPTModel 可以做出相应的动作；outputEvent 当 OPT-Model 更新了一组设计变量后，将向子模型发布 evStart 事件，通知子模型开始执行任务。

以上将内部和外部接口分开，使得 OPTModel 可以从外部看作与 DSGModel 相同的组件，在多级优化和其他复杂的混合计算构架中需要用到。以下描述的算法模型也采用这种思想。

### 3.5 迭代模型

迭代模型（ITERModel）用于平衡耦合学科（或子模型）的输入/输出关系，与 OPTModel 的操作、调度和组成均类似，不同点在于 ITERModel 采用的算法不同，因而语义接口不同。另外，外部输出端口表示耦合参数的收敛值，而不是最优设计变量、目标函数和约束条件。

### 3.6 试验设计模型

试验设计模型（DOEModel）主要包括两方面功能：一是取样。在设计空间内合理选取适当的样本点；二是参数分析，在第一个功能基础上，采用曲线、图表方式进行数据分析，得出设计参数对响应参数的影响趋势。这两个功能往往是分开使用的，应该将其划分为两个模型，实验取样模型（doE Sample Model, ESM）和参数分析模型（doE Analysis Model, EAM）。

EAM 一般不直接参与到多学科优化过程。MO 主要应用 ESM 的取样结果，作为近似建模、优化（优化变量初始值）的输入。

ESM 的形式化描述与 OM 一致，不同点仍然是算法语义接口和输入/输出端口的内容。现有的取样方法主要有：参数法、中心复合设计、拉丁超方、全因子、正交矩阵、均匀设计等。外部模型的输入/输出端口为：

$InputPort = \langle AlgPar, InitPort, VarBase, varBound \rangle$

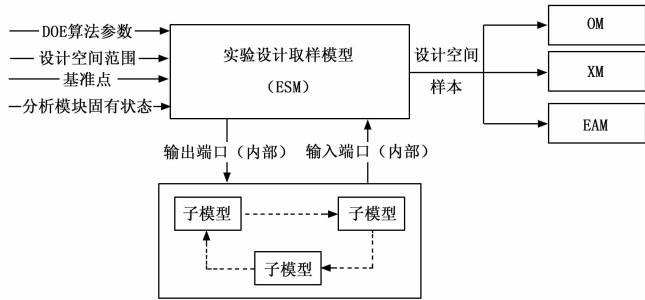


图 5 试验设计模型接口

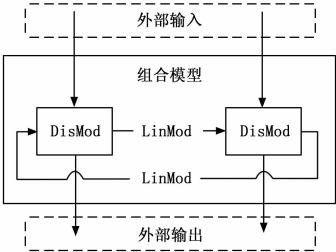


图 7 组合模型的组成与接口

$OutputPort = \langle Samples \rangle = \langle SpItem1, SpItem2, \dots, SpItemn \rangle$

其中,  $\langle AlgPar \rangle$  为取样方法参数、 $\langle InitPort \rangle$  为子模型不作为变量的输入端口、 $\langle varBase \rangle$  为变量的基准点、 $\langle varBound \rangle$  为设计空间范围。 $\langle Samples \rangle$  为输出的设计矩阵, 是一个列表, 每个列表条目  $\langle SpItem \rangle$  对应一个样本点, 存储输入端口和对应的输出端口。

3.7 连接模型

连接模型 (LNKModel) 主要用于建立各模型之间的通信和数据传递关系。在连接关系中, 用作输出对象的模型称为源模型 (source model); 用作输入对象的模型称为目标模型 (object model)。每个连接由多个连接条目 (LinkItem) 组成, 如图 6 所示。每个连接条目确定一条完整的参数传递信息。

LINK\_ITEM<目标模型, 源模型, 目标参数端口, 源参数端口>

模型树中, 每个模型均可能与其它模型存在数据传递关系。本软件的连接原则是: 只能在父模型和子模型、以及同层子模型之间发生数据连接。

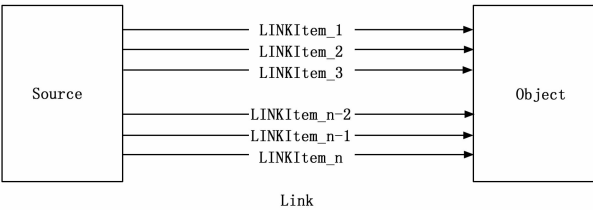


图 6 连接关系示意图

3.8 组合模型

以上描述的模型在 MDO 中是不可分解的元模型。组合模型 (ASSModel) 是将多个关联的元模型进行综合, 仅暴露外部输入/输出接口。其接口特征与基本专业模型相同, 但其本身不作为功能实体。采用 LNKModel 建立内部关系, 通过独立的数据结构描述外部接口信息, 如图 7 所示。

4 多学科协同与优化设计的软件实现

为了实现方案论证阶段的总体一体化方案优化设计, 本文基于以上软件框架与各专业计算模型理念, 开展了运载火箭总体多学科优化设计。

运载火箭总体性能多学科优化设计的问题可以概括为在满足起飞质量约束、运载能力约束、落区约束和姿态稳定性约束的基础上, 优化火箭构型、质量等设计参数, 实现有效载荷与起飞质量比最大化的设计目标。

具体的设计流程如图 8 所示。

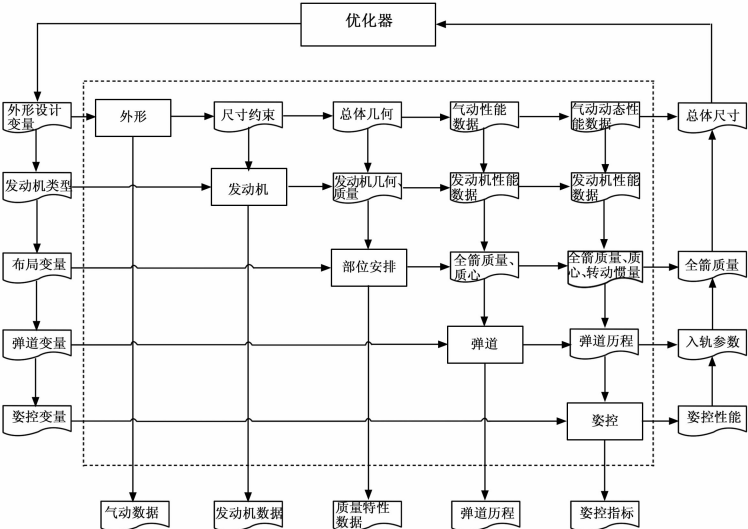


图 8 总体设计流程示意图

运载火箭的总体概念设计包括外形方案设计、液体火箭发动机方案设计、气动设计、弹道方案设计四部分。

4.1 外形方案设计

支持从外形部件库中选择常用部件几何外形, 并组合形成运载火箭外形。在界面中可以对各种备选方案进行选择, 并设定相关参数, 构造外形布局方案, 包括: 头部母线类型、连接段几何参数、助推器几何参数、稳定翼参数等, 如图 9 所示。

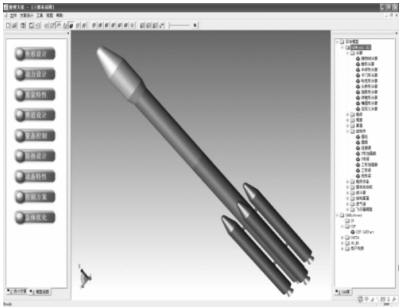


图 9 总体外形设计

4.2 液体火箭发动机方案设计

建立一套发动机数据库, 包括: 几何、质量、性能等信息。可通过选择火箭方案类型, 确定相关性能参数。

4.3 气动设计

气动模块旨在确定在不同飞行状态下的气动力和气动力矩

系数,为弹道设计模块、姿态控制模块提供数据支撑。计算模型采用比较成熟的部件组合法,可以对箭体外形进行快速估算,其精度在箭体初步设计阶段是比较满意的。本模型将整个箭体按部件拆分为:箭体模块、助推器模块、翼(舵)模块,其中,箭体模块可拆分为:头部、锥段、圆柱段、尾部等部件。由各个部件气动数据并考虑部件相互干扰,整合形成全套气动数据。计算流程图如图 10 所示。

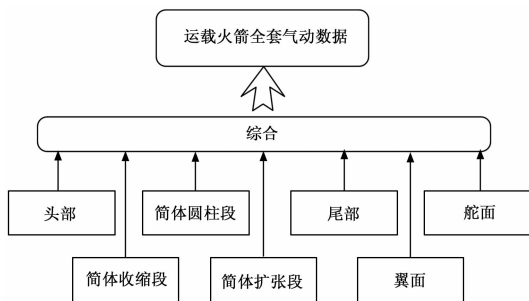


图 10 气动模块计算流程

软件采用数据报表和曲线,对不同飞行状态下的气动参数进行分析。根据运载火箭的级数不同,分别计算各级相应的气动参数,满足弹道计算对气动参数的需求。

#### 4.4 弹道方案设计

运载火箭弹道设计包括六个模块:初始化,飞程序角设计,主动段弹道计算,自由段弹道计算,残骸落区计算和弹道参数输出。其关系如图 11 所示。

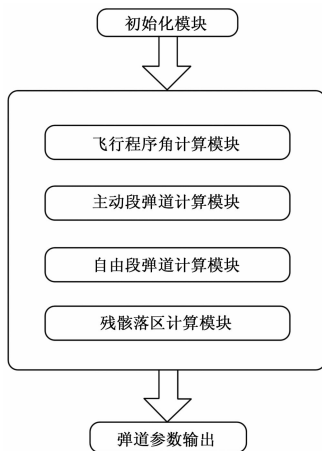


图 11 弹道设计流程

1) 初始化模块。根据运载火箭气动模块,发动机模块,质量特性模块以及用户界面输入,对运载火箭发射前状态进行初始化。

2) 飞程序角设计模块。用户通过设定运载火箭每级的俯仰程序角始末值,并选择程序角变化方式(按攻角变化或者按俯仰角变化),得到运载火箭每级的飞程序角变化规律,用于主动段飞行。

3) 主动段弹道模块。根据初始化模块,飞程序角设计模块以及环境模块提供的数据,在发射坐标系下解算运载火箭弹道的各项参数。

4) 自由段弹道模块。根据 LEO、SSO、GTO 三种轨道的不同需求,由用户设定相应参数,在发射惯性坐标系下解算运

载火箭弹道的各项参数。

5) 残骸落区计算模块。由用户输入残骸阻力系数特性,将残骸分离点的飞行状态作为初始状态,估算残骸落区。

6) 弹道参数输出模块。由弹道计算得到的速度,位置等各项参数,通过各种公式解算出其他模块或者用户需要的用于输出的参数。

弹道方案和相关制导参数确定后,进行各段弹道仿真计算。弹道计算所需的气动、发动机和质量特性等数据可以通过软件提供的计算模块给出,也可从外部输入(风洞试验、发动机试验、质量质心测试数据)。

#### 4.5 优化设计

在以上协同设计基础上,可利用优化算法,根据设定的设计变量范围、约束条件、优化目标,自动完成多方案性能参数优化。总体设计优化功能模块提供了优化变量选择与配置、约束条件设置、优化目标选择、优化算法选择与配置、集成优化计算、优化结果分析等功能界面,如图 12 所示。



图 12 优化设计

## 5 结论

本文基于运载火箭总体外形参数化方法、气动力部件组合工程算法、考虑液体消耗的质量特性计算方法和 3 中典型弹道计算方法构建总体多学科设计模型。结合软件框架的层次式模型管理技术,形成集总体外形设计、气动计算、发动机选型设计、质量特性计算、弹道设计的多学科协同设计与优化软件,并通过实例验证此软件具备总体方案快速设计、性能分析与优化设计 3 大功能,对运载火箭的总体概念设计有一定的指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 吕晶晶,等.复杂耦合系统新兴的多学科设计优化方法[J].计算机测量与控制,2009,17(5):933-939.
- [2] 余雄庆,等.考虑不确定性的飞机总体参数优化方法[J].航空学报,2009,30(10):1883-1888.
- [3] 胡 峪,等.飞机多学科设计的分级优化方法[J].西北工业大学学报,2001,19(1):144-147.
- [4] 黄 俊,等.飞机总体优化设计的新进展[J].航空学报,2000,21(6):481-487.
- [5] 陈小前,等.近似方法在 multidisciplinary design optimization 中的应用研究[J].弹箭与制导学报,2004,24(1):212-215.
- [6] 卜广志,等.使用多学科设计优化方法对鱼雷总体综合设计的建模思路研究[J].兵工学报,2005,26(2):163-168.
- [7] 陈琪峰,等.分布式协同进化 MDO 算法及其在导弹设计中应用[J].航空学报,2002,23(3):245-248.
- [8] 罗世彬,等.基于响应面模型的二维高超声速进气道优化[J].宇航学报,2007,28(5):1127-1132.