

基于主模型的协同设计软件架构技术研究

肖进, 孙树森, 杜可君

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 运载火箭总体方案论证过程中, 由于涉及专业多、专业间迭代交互频繁、设计方案多变等特点, 容易造成多专业协同设计时版本与技术状态的不统一, 需要研究针对运载火箭产品的通用建模方法, 并开发相应的软件系统; 基于统一数据源的协同设计理念, 结合运载火箭总体设计与数据模型特点, 通过定义基础信息模型、概念模型、参数模型、外部定义模型 4 种数据模型, 提出了针对运载火箭产品的通用主模型构建方法; 将此通用建模方法软件化, 搭建了基于主模型的协同设计软件系统整体架构; 此架构包含主模型管理系统、主模型建模工具及应用客户端三部分, 实现了多专业协同设计过程中数据与版本的统一管理、技术状态一致性分析、谱系追踪、数据展示与应用等功能; 该主模型建模工具与客户端软件系统的实现, 为运载火箭的总体协同设计提供了工具支撑。

关键词: 协同设计; 软件; 主模型

Research on Software Architecture of Collaborative Design Based on Master Model

Xiao Jin, Sun Shusen, Du Kejun

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

Abstract: In process of launch vehicle overall project conceptual design, due to the characteristics such as multidisciplinary collaboration, frequent iteration and cross disciplinary interaction, and changeable design, the inconsistency between version and technical states among always happen. A general modeling method for launch vehicle is necessary and corresponding software system is desired. Based on the concept of uniform data source collaborative design, combined with the characteristic of launch vehicle system design and data model, through the definition of four kinds of model which included base information model, concept model, parameter model and external definition model, a modeling method of launch vehicle general master model construction is proposed. Further, by developing software to implement the modeling method, a general collaborative software system architecture based on master model is constructed, which included master model management system, master model modeling tool and the application client. It could achieve the version management, the technology consistency analysis, the data lineage tracing and data showing and application, etc. The implementation of modeling tool for master model and the client software system provides tool support for launch vehicle system design.

Keywords: collaborative design; software; master model

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。虽然各类设计工具、软件、系统在总体设计过程中被大量应用, 对提高总体设计水平和设计质量发挥了积极作用。但由于设计过程复杂, 需要使用的软件种类和数量繁多, 在现有设计体系中软件间数据传递不畅、数据不具唯一性、设计数据共享性差、缺乏过程数据的管理与追溯等问题也越来越突出。需要研究基于主模型的协同设计模式, 并构建相应的软件系统。

国外相关企业已开展了统一模型技术研究并建立了相应标准规范。GE 公司结合知识工程, 提出一种“自顶向下”的系统建模方法, 在 UG 环境中建立了涡轮发动机的“智能主模型”^[1]; NASA 在多学科先进设计环境中, 基于参数化 CAD 接口 CAPRI, 建立了下一代运载器的参数化几何模型^[2]; 洛马公司与技术软件 (Technosoft) 公司合作, 在基于 Parasolid

内核的建模环境 AML 中, 构建了交互式导弹设计模型^[3]。国内起步较晚, 目前主要停留在理论与学术研究层面。龚春林等人提出了一种融合各学科模型的主模型建模技术。采用结构—行为—功能三组元描述了多学科设计的概念模型, 并指出 MDO 建模所要解决的耦合问题^[4]; 孙翠莲等人建立了主模型 CAD/CAE 集成框架, 并在该框架下进行了高速卷绕头铰轴结构参数优化设计^[5]; 周高明等人建立了导弹总体结构设计的主模型和导弹参数化模型库, 创建了导弹总体结构设计的过程向导, 能引导用户按步骤完成导弹总体结构设计^[6]。

为了改变传统的“基于文档”的多专业协同设计模式, 达到规范专业间数据接口、实现协同过程技术状态的实时监控、全过程数据的可追溯、从而达到提高协同设计效率与质量的目的, 本文参考 LVL 的“基于统一数据源”的协同设计理念, 结合运载火箭型号总体设计特点, 提出了基于主模型的协同设计软件系统架构, 在有限范围实现了统一有效的模型和数据访问通道, 支持统一的数据来源、各专业工具间数据共享和各设计活动之间的松耦合集成。

1 主模型框架设计

所谓主模型是对各专业参数数据结构的提炼, 形成标准的数据结构, 是总体、弹道、气动、姿控、结构等多专业的设计

收稿日期:2016-12-24; 修回日期:2017-02-06。

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。

信息的融合, 可保证协同设计过程中的信息一致性、实现多专业协同设计的高度自动化与智能化, 提升协同设计质量和设计效率。

主模型构建了一个以参数化模型为基础、具有自动化处理数据功能、数据格式标准的“统一数据中心”, 各专业设计分析系统均通过该“统一数据中心”进行数据交互, 并支持设计迭代工作的开展。

基于主模型的总体协同设计应用逻辑如图 1 所示。

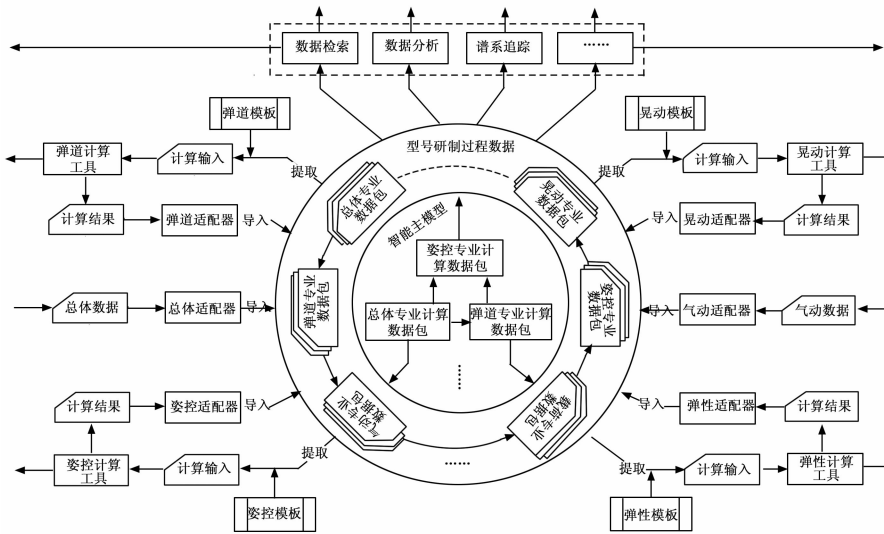


图 1 基于主模型的总体协同设计逻辑框架

该总体逻辑主要体现以下几点:

- 1) 以主模型为核心, 实现数据驱动的协同设计模式;
- 2) 以各专业数据包为基本单元, 实现数据谱系关联、数据版本追溯;
- 3) 工程师可便捷地进行个人相关信息处理、数据提取和更新;
- 4) 通过适配器实现与设计工具的耦合集成;
- 5) 基于完整的设计过程数据和数据逻辑关系, 实现包括数据检索、数据分析、谱系追踪、综合数据看板等在内的数据挖掘与应用模式。

基于以上总体逻辑, 主模型协同设计系统总体框架如图 2 所示。

系统主要包括 6 个方面:

- 1) 主模型建模工具。
创建主模型结构目录, 实现通用主模型创建、检查、管理、图形化展示等。
- 2) 主模型策划。
为各专业协同设计奠定基础, 主要内容包括: 结合设计型号裁剪(修改、删除、添加)及实例化主模型, 建设协同设计任务并组建协同设计团队。
- 3) 基于主模型的总体协同设计。
实现各专业协同设计, 主要内容包括: 协同设计数据管理、技术状态管理与数据集成接口。
- 4) 集成应用客户端。
协同设计客户端为统一用户接口, 主要包括: 实现设计信息获取、提交、查阅等功能; 实现上下游谱系传递消息通知功

能; 实现适配器等设计资源关联集成功能。

5) 数据展示与应用。

基于设计过程数据实现总体设计过程监控, 主要包括: 数据检索与浏览、数据检索、数据谱系追踪视图、数据对比分析等。

6) 系统管理。

系统管理人员参与进行系统管理, 包括数据管理、用户管理、权限管理等。

2 运载火箭主模型建模方法

针对运载火箭总体设计特点, 主模型可由基础信息、概念模型、参数模型、外部定义模型 4 个方面组成。

2.1 基础信息

基础信息是对模型描述的对象进行必要说明的信息。基础信息中包括的内容有型号的名称、代号、技术状态的说明、专业列表、参数数据字典的定义等。

2.2 概念模型

概念模型是代替自然语言文档等不规范的形式, 描述运载火箭设计概念的形式化模型。概念模型的组成见图 3。

主模型中至少包括表达运载火箭模块组成的结构概念模型和表达飞行过程的使命概念模型。各专业可以扩充本专业的概念模型, 比如动力专业可以定义动力系统方案设计的概念模型。

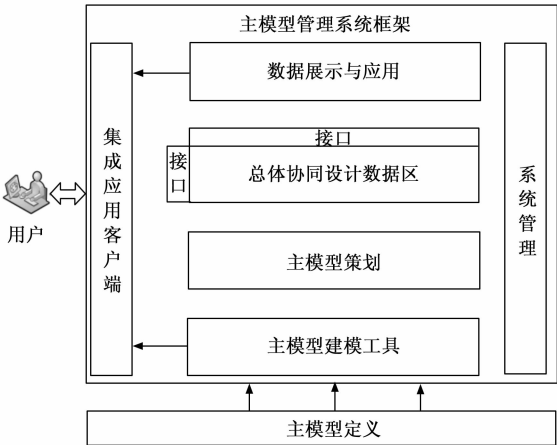


图 2 主模型建模与管理总体框架



图 3 概念模型的组成

概念模型的设计要点如下。

表达方式: 所有的概念模型是能用 UML 类图表达的对象模型。

必备要素: 结构概念模型和使命概念模型具备模块、构

型、使命这 3 种模型对象，它们为多构型、多使命的主模型组织结构提供顶层架构。

支持系列构型定义：结构概念模型利用模块、构型两种对象层次支持在一个模型中定义采用通用模块的多个系列构型。

专业概念模型的扩充方式：专业概念模型建模时，重用结构概念模型和使命概念模型中已经定义的对象，包括但不限于模块、构型、使命等，不能定义含义重复的对象，以消除数据冗余。

2.3 参数模型

参数模型用于描述“参数专业”产生的设计数据，这些数据以 0 维、1 维参数为主。参数化的设计数据与概念模型统一描述运载火箭设计方案，二者关系密切。从建模角度，将参数模型独立建模的主要考虑是为了满足较大数据量，多维度的参数数据的标准交换格式以及统一检索、对比方法的问题。

参数模型设计要点如下。

维度：维度的定义为：0 维参数的值是一个数值，1 维参数的值是 1 维数组，2 维参数的值是二维数组，以此类推。1 维参数的典型例子是随时间变化的时变参数，如弹道数据中的位置、速度等。2 维参数的典型例子是随攻角、马赫数变化的气动参数，如升力系数等。参数模型的设计应至少允许实现 3 维参数。

参数组：在模型的组织形式方面，将紧密关联，总是一同产生、使用的参数组织成参数组。参数组中的各参数共享统一的维度定义。如弹道参数组中的各参数共享一致的时间维度。

参数字典：除定义参数模型数据结构外，还需要给出实际使用的参数组的实例，规定参数的标准名称和定义，起到参数数据标准化的作用。这种标准化的参数组实例称为参数字典。

表 1 参数组定义(参数字典)的数据结构

数据项目	数据类型	含义
名称	字符串	中文名称
ID	字符串	全局标识符
维度列表	列表	“维度”对象的列表
参数列表	列表	“参数”对象的列表

表 2 参数组实例的数据结构

数据项目	数据类型	含义
名称	字符串	中文名称
ID	字符串	全局标识符
参数组定义	字符串	参数组定义的 ID
值	集合	$m+n$ 元组 \lt 维度值 1, 维度值 2, ..., 维度值 m , 参数值 1, 参数值 2, 参数值 $n\gt$ 的有序集, 其中 m 为参数组的维度数量, n 为参数组的参数数量

2.4 概念模型与参数模型的关联

概念模型与参数模型的关联，即概念模型中的设计对象与参数组之间的一对多关联，一个设计对象可以关联多个参数组，一个参数组只能关联一个设计对象。

概念模型都是对象模型。设计对象即概念模型中定义的类的对象。

表 3 参数模型与概念模型关联示例

设计对象类型	参数组
使命	发射点、发射方位角、姿态程序角
级	结构质量特性、气动参数
模块	结构质量特性
液体火箭发动机	各工作状态参数
推进剂贮箱	推进剂加注参数
飞行段	弹道

在参数模型的具体实现中，应要求为每个参数组实例指定其所属的概念模型对象。

2.5 外部定义模型及其与概念模型的关联

主模型对外部定义模型的文件格式不作限制，只考虑如何将外部定义模型中的实体与主模型中的概念模型进行关联。外部定义模型中实体与概念模型的关联方式与参数模型中参数组与概念模型的关联方式类似，是设计对象与外部模型实体的一对多关联。目前设想实现这种关联有两种方式，如图 4 所示。

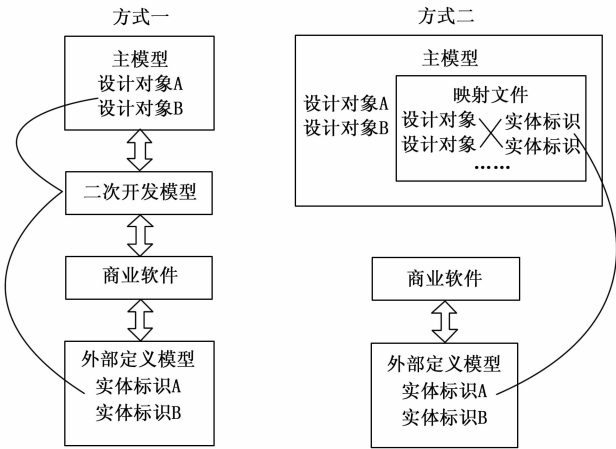


图 4 概念模型与外部定义模型的两关联方式

3 协同设计软件系统实现

3.1 主模型建模工具实现

主模型建模工具主要完成典型运载火箭主模型的结构及数据谱系关系建立，相关建模结果将作为后续协同设计实例初始化使用。建模工具的核心是对运载火箭通用主模型的数据结构定义及逻辑关系描述。

主模型建模工具表现为单机版工具，输出结果为 XML 形式的主模型组织结构，该结构可以被主模型管理系统读取。主要包括以下几方面内容：

3.1.1 运载火箭构型建模向导

运载火箭构型建模向导的主要目的是根据用户输入的运载火箭构型参数，自动生成表达一系列运载火箭构型的主模型目录结构。该向导适用于芯级任意级数，最多带两种助推器的运载火箭设计概念。

运载火箭构型建模向导的基本逻辑如图 5 所示。

运载火箭构型建模向导的输入输出如下：

- 1) 输入：运载火箭构型选择及构型设计参数；
- 2) 输出：主模型数据包（不含）以上主目录结构；
- 3) 构型指定的输入内容包括：

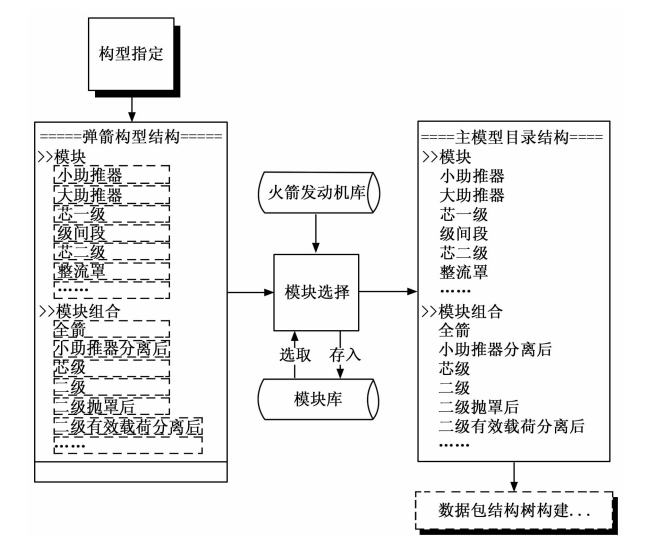


图 5 运载火箭构型建模向导基本逻辑

- a) 芯级级数；
- b) 芯级各级之间有无级间段，级间段是否二次分离；
- c) 助推器种类数量和每种个数；
- d) 助推器是否分离，是否同时分离；
- e) 有无整流罩/头罩，整流罩/头罩分离后的片数；
- f) 整流罩/头罩在哪一级工作时分离；
- g) 有无末修舱/分导舱/上面级；
- h) 载荷是否为分导弹头，如是，给出弹头数量。

本向导根据上述输入，自动生成运载火箭主模型中的模块和模块组合子目录，模块组合包括飞行全过程所有阶段的主体和主要残骸。

数据包目录结构树构建基本界面如图 6 所示。



图 6 目录结构树构建基本界面

3.1.2 专业数据包填充向导

通过专业数据包与所属对象的映射关系，自动生成空白的专业数据包，实现运载火箭方案论证阶段专业数据包的填充功能。

输入：1) 运载火箭主模型目录结构；2) 专业数据包所属对象映射规则；

输出：包含空白专业数据包的主模型结构。

根据专业数据包映射规则，自动生成包含专业映射的专业数据包，同时支持自由编辑数据包条目。

典型专业数据包及其所属对象如表 4 所示。

在选定参与的专业范围以后，系统自动根据以上规则将各数据包构建在所在的对象下。

表 4 专业数据包所属对象映射关系		
专业	专业数据包	填充至子目录
总体	原始数据	每个模块
	理论图	每个模块、每个模块组合
动力	液体火箭发动机性能参数	基础
	固体火箭发动机性能参数	每个固体动力模块
气动	集中式气动特性、分布式气动特性	每个模块组合
弹道	弹道计算结果	每个任务
晃动	晃动特性	每个模块
弹性	模态	每个模块组合
姿控	攻摆角	每个任务
载荷	飞行载荷、地面载荷	每个任务

数据包构建的基本界面如图 7 所示。



图 7 数据包构建示意界面

3.2 主模型客户端实现

主模型客户端的用户是设计工程师，其得多专业协同设计过程中应具备如下特征：

- 1) 减少对现有工作方式的冲击，达到“日用而不自知”效果；
- 2) 尽量少的处理工作量，将大量数据和逻辑处理工作放到后台。

主模型客户端的主要功能有：通知与消息、数据提取、数据展示与应用。

3.2.1 通知与消息

协同设计消息提示来自于主模型驱动。在客户端用户可接收相关信息所发送的通知及消息，并可以通过简单方式进行回复反馈。具体的通知及消息来源包括但不限于：

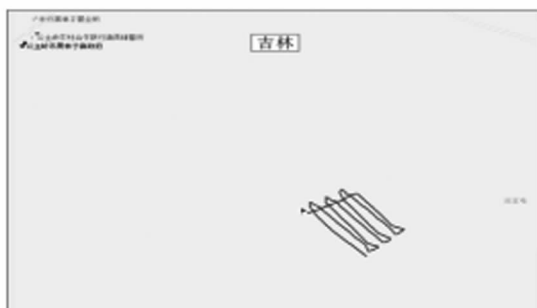
- 1) 协同数据管理员对协同数据区的处理（启动、撤销、关闭等）；
- 2) 上游数据包更新通知；
- 3) 用户订阅的数据包更新消息；

用户收到的通知及消息可链接到数据包信息。通知与消息的关闭在用户做出适当响应的情况下关闭，如鼠标点击或更新自身数据版本后。

3.2.2 数据提取与应用

数据提取基于可自定义配置的数据提取模板实现。其中，数据提取模板具有如下特点：

- 1) 数据提取模板采用文件模板解析模式或解析程序模式；
 - 2) 模板与专业相关；
 - 3) 部分导出结果可直接应用于专业工具的计算。
- 数据提取与应用具有如下特点：



(a) 二维电子地图航迹回放



(b) 三维电子地图航迹回放

图 8 航迹回放结果

(上接第 149 页)

1) 自动提取。

依照模板自动从统一数据看板中提取设计所需的数据；

2) 缺省模板。

专业人员使用数据提取功能时，可配置缺省模板，每次提取时无需额外操作；

3) 模板选择。

可依照不同的设计需求，选择不同的数据提取模板进行数据提取；

模板设计：

可自定义配置数据提取模板,满足不同设计人员的数据提取需求。

3.2.3 数据展示与应用

数据的展示与应用是通过统一数据看板来实现，统一数据看板的核心内容是以主模型为基础形成的方案快照，用于集中展示方案技术状态。

方案快照是指主模型各数据包某版本下的集合,该集合描述了所对应主模型的技术状态。如果集合中所有数据包版本的谱系关系均完整,则构成一个方案快照。方案快照的获取方式基于数据包、数据包的结构化数据表单和数据包谱系关系,可自动抽取,如图 8 所示。

4 结论

本文基于统一数据源的协同设计理念,结合运载火箭型号总体设计与数据模型特点,提出了基于主模型的协同设计软件系统整体架构,系统包括主模型建模工具与主模型应用客户端两部分,具有运载火箭构型建模向导、数据包填充向导、消息与通知、数据提取、数据展示等主要功能,并给出了各功能模块示意图,可为运载火箭的总体协同设计提供工具支撑。

4 结论

本文开发了一套操作简便、功能完善的多旋翼无人机地面控制站软件系统。根据多旋翼无人机地面控制站软件总体分析,建立了地面控制站软件系统的总体结构。采用功能模块化方法,将地面控制站软件系统进行独立设计,分别实现了飞行监控、飞行任务管理、二维与三维结合的导航电子地图以及数据库技术等多个功能。最后,通过地面控制站软件系统的测试实验有效地验证了该地面控制站软件系统是一个具有完善功能、满足无人机实时监控需求的友好人机交互平台,目前已经在实际工程中得到了良好的应用。

参考文献:

- [1] 宁金星, 卢京潮, 闫建国. 基于 VC++ 的无人机飞控地面站软件的开发 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (3): 596-598.
- [2] 乔志华, 李一波, 康绍鹏, 等. 基于虚拟现实技术的无人机地面控制站系统设计 [A]. 系统仿真技术及其应用学术会议论文集 [C]. 2008: 415-418.
- [3] 翟亚栋, 陈怀民, 吴成富, 等. 基于 MapX 开发的无人机导航系统 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (11): 1626-1628.
- [4] 马俊, 杨忠, 杨成顺, 等. 基于 Google Earth 的人机交互平台设计 [J]. 应用科技, 2010, 37 (7): 6-10.
- [5] 李想. 无人机地面导航控制系统软件研究与设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.

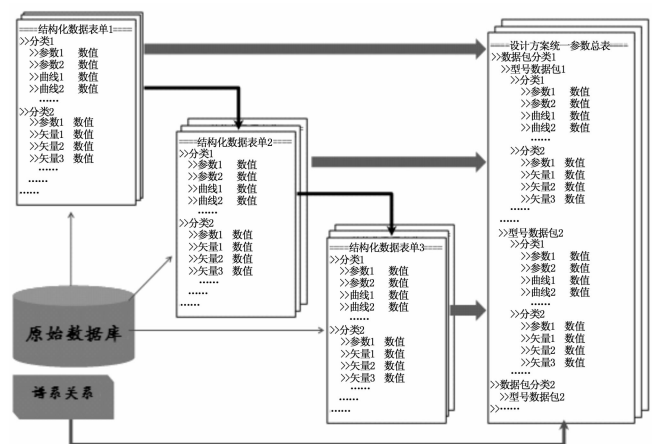


图 8 方案快照抽取逻辑

参考文献:

- [1] Peter, Raymond M, Kolonay, Rohinton K, Irani, et al. A Federated Integrated Intelligent Product Environment [R]. AIAA-2000-4902, New York, NY, USA; AIAA, 2000.
- [2] Manning T A, Gage P J, Nguyen J M, et al. ComGeom2: A Geometry Tool for Multidisciplinary Analysis and Data Sharing [R]. AIAA-2004-4303, New York, NY, USA; AIAA, 2004.
- [3] Zwber J V, Kabis H. Towards an Integrated Modeling Environment for Hypersonic Vehicle Design and Synthesis [R]. AIAA-2002-5172, New York, NY, USA; AIAA, 2002.
- [4] 龚春林, 等. 面向飞行器多学科设计优化的主模型技术 [J]. 宇航学报, 2009, 30 (3): 914-918.
- [5] 孙翠莲, 等. 基于主模型 CAD/CAE 集成的卷绕旋轴结构参数优化 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22 (11): 2622-2626.
- [6] 周高明, 等. 导弹总体结构设计主模型技术的研究与实现 [J]. 机械工程师, 2011 (2): 35-38.