

火箭发动机向导式仿真流程构建

马晓丹¹, 周晨初², 张晨曦²

(1. 火箭军工程大学, 陕西 西安 710072;
2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要:从提升发动机组件仿真规范化、数字化程度和降低仿真分析难度的目标出发,通过对向导式仿真流程的描述,提出一种基于向导式的火箭发动机仿真流程构建方法。在 ANSYS 软件提供的基本框架的基础上利用接口技术进行二次开发,实现了向导式发动机组件仿真界面和向导式发动机组件仿真流程的开发,完成了发动机向导式仿真流程构建。发动机向导式仿真流程构建基于数字向导技术,依次进行发动机组件模型预处理、网格划分、运行条件、边界设置和后处理等工作。根据该技术路线,给出了在典型发动机组件上的向导式仿真全过程实例,最终展示了数字化仿真流程的实现结果。按照向导式仿真流程构建的发动机仿真系统,在提高设计协作、促使知识沉淀、规范仿真流程方面都有明显的效果。

关键词:仿真流程;火箭发动机;规范化;数字化;向导式

中图分类号:V430 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2020)05-0080-07

Construction of rocket engine wizard simulation process

MA Xiaodan¹, ZHOU Chenchu², ZHANG Chenxi²

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710072, China;
2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Based on the objectives of improving the standardization, digitization and reducing the difficulty of engine component simulation, a construction method of rocket engine simulation process based on the wizard simulation process by describing the wizard simulation process was presented here. Based on the basic framework provided by ANSYS software, the secondary development was carried out by using the interface technology to realize the development of the simulation interface and simulation process of the wizard engine components, and the construction of the engine simulation process was completed. The construction of the engine wizard simulation process was based on the digital wizard technology. The model preprocessing, mesh generation, operating conditions, boundary setting and post-processing of the engine components were carried out in turn. According to the technical route, the example of the whole process of wizard simulation on typical engine components was given, and the result of digital simulation process was finally shown. The engine simulation system constructed according to the wizard simulation process has obvious effects on improving design cooperation, facilitating knowledge precipitation and standardizing the simulation process.

收稿日期:2020-03-14;修回日期:2020-05-11

基金项目:国家自然科学基金(11702204)

作者简介:马晓丹(1985—),女,硕士,研究领域为液体火箭发动机计算机辅助设计

Keywords:simulation flow; rocket engine; standardization; digital; wizard

0 引言

面对航天发射任务密度日益增高、发动机研制任务日渐繁重、质量形势依旧严峻和设计人员流失的形势,通过数字化手段提升设计过程的效率、通过数字化手段提高仿真过程的规范程度是缩短产品研制周期和提升产品质量的一种有效手段。

目前数字化仿真分析软件在设计过程中应用普遍,但由于软件种类多、个体应用程度不同等造成了仿真分析过程规范化程度较低、仿真过程占用设计时间较长的问题。此外,火箭发动机仿真分析具有一定技术门槛,既需要设计人员具备发动机设计基础,也需要积累相关仿真经验,对仿真软件操作更有较高的要求,学习周期长、入门难度高。定制化的仿真二次开发可以将技术、发动机设计仿真经验与仿真流程封装成模板,仅需输入相应参数,模板自动执行仿真计算,快速获取仿真结果。通过对国内外现状调研,向导式仿真流程技术作为新的仿真流程开发框架技术,在国内机械设计领域很少应用,航天领域更是无相关案例。

综上,基于向导式流程的火箭发动机仿真系统目标是:针对基于向导式流程的火箭发动机组件仿真现状,借鉴和吸纳国内外成熟、先进的向导式仿

真分析思想和技术,综合集成不同学科专业的各种建模和分析工具,充分运用先进的仿真技术、数据管理、流程管理等,建设基于向导式流程的发动机组件仿真数字化系统,提高仿真协作、促使知识沉淀、规范仿真程序,从而提升仿真水平,最终建立基于向导式流程的火箭发动机仿真数字化系统。

1 发动机组件仿真系统

基于向导式流程的发动机仿真^[1-2]系统以 C/S 架构为入口,创建基于 ACT^[3](ANSYS Customization Toolkit)的发动机组件仿真模型的向导化、自动化交互流程。基于向导式流程的发动机仿真系统架构如图 1 所示。

仿真系统主要由应用层、功能层、资源层等组成,各层作用及组成部分如下:①应用层主要是功能层面,通过 WPF 开发的门户软件,实现对向导的管理,材料库的管理,材料库的增、删、改、查功能以及分析报告模板库,实现发动机组件的流体分析向导、强度分析向导、耦合分析向导、临界转速分析向导等应用模式;②功能层主要根据应用场景实现各功能模块或引用相关的功能模块支持,包括几何导入功能、网格划分功能、外界材料库功能、非线性功能、流程引擎功能、外部程序集成功能、知识技巧推

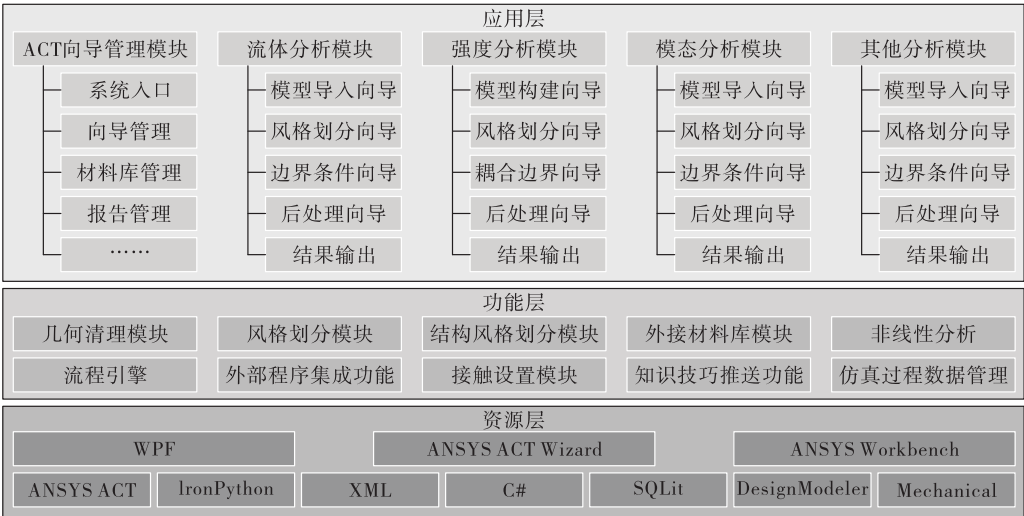


图 1 基于向导式流程的发动机仿真系统架构

Fig. 1 Engine simulation system architecture based on a wizard flow

送功能、仿真过程数据管理功能等;③资源层是基础层,包括 WPF、IronPython、XML、C#、SQLite 数据库、ANSYS ACT Wizard 以及 ANSYS Workbench、CFX、TurboGrid、DesignModeler、Mechanical 软件等。三层构建的基于向导式流程的发动机组件仿真构建系统可以驱动设计、仿真、分析各环节的建模、修正、求解和后处理。

由于发动机组件仿真过程中需要对发动机零组件模型进行交互操作^[4],因此采用混合向导的模式创建,通过二次开发,利用开发的自动化向导仿真流程引导完成自动导入几何模型、组件相关参数、根据模板快速拾取并定义边界以及相关的结构化/非结构化网格划分、边界条件设定、程序化后处理等,以工作流的方式引导完成发动机组件的仿真分析流程。

2 向导式发动机组件仿真二次开发

发动机零组件仿真分析过程从模型获取开始,经过模型网格划分、流场仿真分析、结构仿真分析最终生成仿真分析结论并形成仿真分析报告。在获得了发动机零组件模型的基础上,发动机进行零组件仿真尚无一站式、向导式的仿真数字化流程。目前的仿真过程依赖设计人员的手动传参、手动在各个仿真工具间跳转计算、分析;仿真工具全英文,操作学习门槛高^[5];更无自动化仿真报告生成工具。根据第一部分对发动机组件仿真系统的描述,通过有针对性的发动机零组件仿真个性化二次开发,构建适应于液体火箭发动机各组件的专业仿真分析流程。

相对于其他方式的仿真流程开发技术^[6-7],向导式仿真流程的开发技术可在完成仿真流程向导化的基础上最大程度地保留应用层的自由度,减少仿真分析工作中的约束性,满足发动机组件仿真流程应用灵活操作的需求。

向导式发动机组件仿真二次开发的目标是:实现自动传递发动机零组件专业参数;实现代码引导的仿真工具自动化分析;编制明晰且规范化的仿真向导和流程节点;开发适用于发动机专业的全中文仿真流程;开发全自动化的仿真分析报告生成工具。

发动机组件仿真流程设计包含仿真流程设计开发和界面设计开发两个阶段。在仿真流程设计

开发阶段,首先需要对仿真流程进行参数化,开发方式有两种:WB 参数化和脚本参数化;然后通过 WB 脚本对仿真流程进行集成和调用。界面设计开发阶段,封装仿真流程,提供与仿真流程中输入和输出参数间交互的使用界面。

2.1 向导式发动机组件仿真二次开发流程

向导式发动机组件仿真的开发包括仿真流程开发及界面开发。仿真流程的实现通过以几何模型为对象^[8-9],对其关键几何及拓扑结构进行提参,形成参数化的脚本,然后运用参数化脚本文件及发动机零组件的仿真文件作为界面开发的回调及批处理调用。实际开发过程中,使用 SCDM (SpaceClaim DesignModeler) + Mechanical 的组合开发模式,即向导 (Wizard) 的方式开发仿真流程。利用 SCDM 的直接建模能力和丰富的 CAD 接口、模型修复功能和脚本建模能力,为 Mechanical 分析提供所需的几何模型输入,完成从几何建模或导入、Mechanical 前处理、仿真求解和后处理报告的自动化仿真过程,固化整个仿真分析流程。

界面开发通过 XML 定义向导界面,定义流程的输入输出参数,定义文本框、下拉、浏览等控件,并声明调用仿真流程界面实现的回调函数,实现输入输出参数的替换,WB 界面交互操作的调用等,需要调用仿真文件时通过批处理命令完成调用。在仿真分析完成时读取结果完成报告并更新向导界面参数显示。向导式发动机组件仿真流程开发流程如图 2 所示。

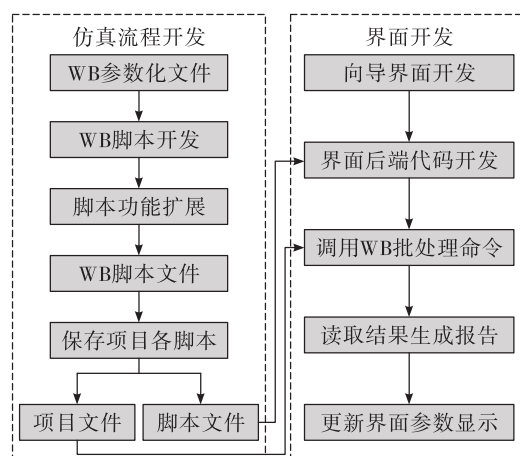


图 2 基于向导式的发动机仿真流程开发流程

Fig. 2 Engine simulation process development process based on wizard

2.2 向导式发动机组件仿真流程开发

通过访问对象的方式将界面中的各种操作转化成代码,执行代码并设定相应的参数,可实现向导式发动机组件仿真流程开发。以 Mechanical 为例说明实现 ACT 访问 Mechanical 结构树的功能。

Mechanical 对象结构树通过 ACT 访问 Mechanical 结构树时,ExtAPI.DataModel.Project 是所有对象的根节点。脚本对象访问遵循和 Mechanical 结构树相同的结构,访问所有子节点上的对象及选项。如访问 Mesh 对象,输入 ExtAPI.DataModel.Project.Model.Mesh。采用相同方式访问模型所有第一级对象如 Geometry、CoordinateSystems 等。除了 Environment 对象(如边界载荷、后处理等)之外,结构树中的所有对象都遵循单例模式,即第一级对象的实例对象不可能同时存在两个。Environment 对象作为第一级对象的子对象,存在一个或多个实例对象,不存在直接的访问点。如添加多个 Pressure 载荷,访问这些对象,就必须通过 Children 属性或 GetChildren 方法访问。Mechanical 对象结构树与应用结构树之间的对应关系如图 3 所示。

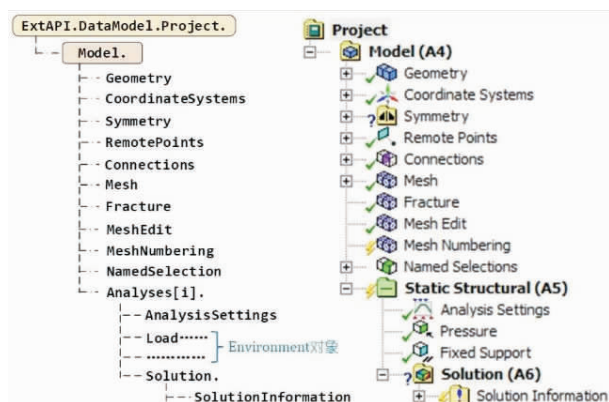


图 3 Mechanical 对象结构树与应用结构树之间的对应关系

Fig. 3 Correspondence between the mechanical object structure tree and the application structure tree

2.3 向导式发动机组件仿真界面开发

针对发动机组件仿真流程特点^[10-12],仿真分析流程中的界面开发通过 XML 的方式实现。在向导式发动机组件仿真流程开发过程中采用 XML 方式

实现。XML 界面开发过程包括:界面代码开发、后端代码回调、界面布局设计 3 个部分。

2.3.1 界面代码开发

运用 ACT 界面开发框架规定的 XML 标记,定义 Wizard 向导标签元素。

<extension> 元素定义为 XML 文件的根元素,包含以下的属性:name-名称、version-版本、icon-图标、minorversion-小版本。

<wizard> 为向导定义元素,包含 name-名称、version-版本号、context-执行环境等强制属性和 caption-说明、layout-布局等可选属性。

<step> 向导步骤定义元素,其中包含了 name-名称、version-版本等强制属性、caption-说明、callback-回调、HelpFile-帮助文本等可选属性。

针对发动机组件仿真过程,通过 XML 定义 ACT 标签元素,设计了发动机组件流体分析、强度分析、模态分析、临界转速分析等向导式仿真流程,每个向导式仿真流程均根据仿真分析流程中的模型导入、网格划分、边界定义、求解计算及后处理等通用步骤创建相关步骤。界面开发时对仿真分析时需要输入的如网格类型、网格大小、边界面选择、载荷大小、迭代步设置等参数通过定义 <step> 向导步骤元素开放到界面,向导执行时通过界面对这些参数的定义实现仿真流程的参数化。

2.3.2 后端代码回调

<step> 中的 callback 属性用于函数回调,用于调用仿真流程代码中已定义的函数,函数回调包含 3 种方式:

onupdate,当 callback 回调属性为 onupdate 时,单击 Next 按钮或者 Finish 按钮时调用此回调函数。例如,运用向导界面划分网格,执行调用外部程序等。

onrefresh,当 callback 回调属性为 onrefresh 时,ACT 每次刷新向导界面都会调用此回调函数。例如,用来绘制图形、刷新结果参数等。

onreset,当 callback 回调属性为 onreset 时,一般用于单击 Back 按钮时调用。onreset 回调函数需要在步骤 N 中定义,并且单击步骤 N+1 的 Back 按钮时将调用。

2.3.3 界面布局设计

向导的界面布局设计通过对 < uidefinition > 元素的定义,确定向导界面中的 Title 模块、Steps 模块、Properties 模块、Help 模块及 Submit 模块的物理位置布局,这些布局形式在 < Step > 元素中被调用引用,用于定义该步骤中各界面模块的排列方式。ACT 允许通过 web 开发技术中的 css 文件对向导页面默认布局进行调整。

2.4 向导式发动机组件仿真过程数据管理

从不同工况下仿真过程数据的管理需求出发^[13-15],对向导式仿真过程中每个设计点上的仿真数据进行管理。通过对单次执行数据的本地缓存、单次流程数据的本地缓存和最终结果数据的服务器统一管理,实现仿真数据管理和分析。

仿真过程数据通过数据池进行管理^[16],将仿真任务数据、输入参数、仿真结果、过程变量及过程文件通过数据服务中心保存到本地数据库,流程执行完成后上传到服务端。

仿真过程数据管理以 SQLite 数据库为载体^[17-19],以每次启动仿真任务的信息作为实体核心,对不同的仿真分析流程建立不同的存储实体,每次向导式分析流程完成都会采用唯一 Key 值作为实体标记,实体核心主要记录仿真任务信息,包括操作人员、仿真时间、运行时间及计算资源等。各实体分别记录仿真流程信息,包括模型处理、网格划分、边界加载及结果提取等步骤的过程数据。

3 向导式发动机组件仿真实例

以典型发动机组件仿真过程为例^[4],对发动机零组件的向导式仿真分析流程进行构建。从模型库或文件系统导入发动机组件模型,对导入的模型进行网格划分,通过引用流场分析结果作为发动机组件强度分析的输入条件。在流场分析的基础上,获取发动机组件流体域流场分析温度场、压力场分布,自动提取发动机组件结构分析所需的相关载荷,应用于结构分析模块,获取温度、压力数据的插值并将其耦合到壳体边界进行强度分析,最后根据模板中保存的报告模板信息生成对应的分析报告。

基于向导式流程的发动机组件仿真构建系统应用流程如图 4 所示。

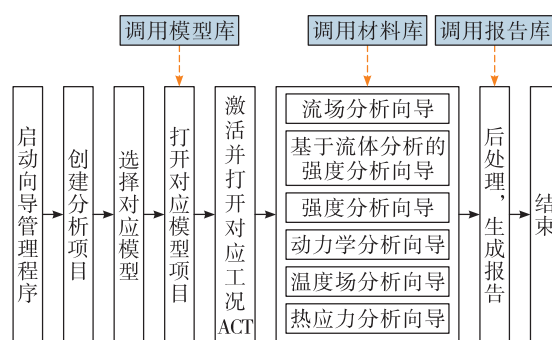


图 4 发动机组件仿真构建系统的应用流程

Fig. 4 Application flow of engine component simulation construction system

3.1 仿真分析向导构建

以发动机组件的多个仿真分析向导流程为例,给出发动机组件仿真分析向导的构建过程和仿真实现。

向导封装静强度分析过程中的模型导入、边界类别定义、网格划分、物理模型、边界、求解、后处理功能,以向导的方式引导完成以上仿真分析过程。此向导是由模型导入向导、网格划分向导、求解设置等向导组成的混合向导,集成多种向导为一个强度分析向导完成强度分析计算(见图 5)。

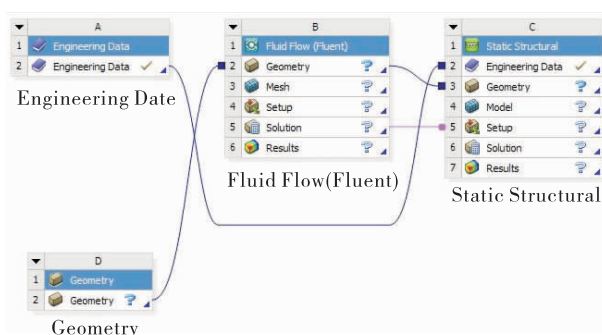


图 5 发动机组件结构强度分析 workflow

Fig. 5 Engine component structural strength analysis workflow

发动机组件结构强度分析向导的输入输出参数如表 1 所示。

表 1 发动机组件结构强度分析向导输入输出参数
Tab.1 Input and output parameters of engine component static strength analysis wizard

序号	参数名称	参数类型	输入输出属性
1	组件名称	字符串类型	输入
2	模型环境	枚举类型	输入
3	模型	文件类型	输入、输出
4	网格划分方法	枚举类型	输入
5	网格类型	枚举类型	输入
6	单元尺寸	实数类型	输入
7	网格过渡参数	实数类型	输入
8	最小间隙网格层数	整数类型	输入
9	网格文件	文件类型	输出
10	求解类型	枚举类型	输入
11	热传递模型	枚举类型	输入
12	入口边界	特征类型	输入
13	出口边界	特征类型	输入
14	Interface	特征类型	输入
15	收敛监控	枚举类型	输入
16	液动力	实数类型	输出
17	速度云图	文件类型	输出
18	压力云图	文件类型	输出
19	Mises 应力	实数类型	输出

3.2 模型预处理向导

模型处理技术含模型导入、模型边界的拾取及定义、组件参数等,快速在相应的导航面板中对对应的部件进行快速定义^[20]。通过模型导入向导导入符合特定要求的模型,对导入模型的边界进行拾取及定义(包括 Inlet、Outlet、Wall、Rotor、Stator 等)。

向导式发动机组件仿真流程支持导入前端设计工具产生的各类模型文件,并对导入的模型文件、前端设计工具产生的模型文件和仿真过程数据进行集成管理。仿真向导通过可视化界面给出了参数的约束条件、说明、图示等。

以电磁阀的模型预处理向导为例:①应用仿真过程数据管理技术,对前端设计工具(Pro/E、NX)产生的电磁阀三维模型文件进行管理;②按照电磁阀模型预处理向导中提供的模型导入约束条件对仿真过程数据库中的电磁阀模型进行筛选、导入;

③对导入后的模型文件进行预处理,同时建立该文件与后续仿真过程数据的数据包,为仿真模型和仿真过程数据集成管理提供条件。

3.3 网格划分向导

网格划分包含非结构化网格划分向导和结构化网格划分向导 2 种。

非结构网格划分向导对导入并定义好边界类型的几何模型或模型部件进行快速的非结构网格划分,网格参数定义是通过前端网格参数设置面板来实现的,网格参数包括网格划分方法、网格类型、网格过渡比、棱柱层、最小间隙网格层数等,网格划分完成后可现实网格数量的查看及网格质量的评价。

结构化网格划分向导主要是用来对发动机组件中特定组件(如涡轮等转动部件)进行结构化网格划分。部件模型构建是通过组件参数导入及边界条件定义向导来实现的,重构的几何模型划分全结构化六面体网格。

发动机组件网格划分向导为非结构网格划分向导:定义细化网格选择,细化分段定义等选项,向导根据页面定义自动划分非结构网格。

3.4 工况及边界设定向导

发动机组件仿真流程集成发动机仿真各物理场分析所需的边界条件,将仿真分析涉及到的物理模型设置及参数设置封装集成到求解向导模板,通过对向导页面中开放的边界设定选项的定义,向导执行时按照页面定义对模型进行边界条件的自动设定如约束、载荷等。半交互式的向导也允许在完成边界定义后对模型边界进行干预式调整、增加边界条件等操作。

发动机组件边界设定要定义固支面、载荷面及压力大小等选项。边界的选择通过界面操作应用于向导选项。

3.5 后处理向导

后处理向导定义要提取的结果数据及结果云图,也可自定义提取结果。向导的开发通过代码方式实现后处理结果的提取、处理、展示等功能。半交互式的向导也允许在完成分析后对仿真结果进行查看等操作。以推力室模态分析向导的实现为例,展示后处理向导的实现结果,如图 6 所示。

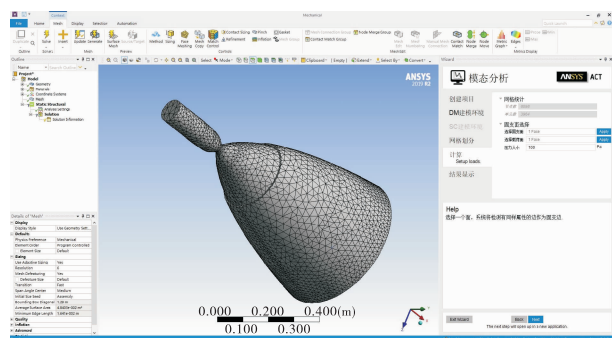


图6 推力室模态分析向导

Fig. 6 Thrust chamber modal analysis wizard

4 结论

利用火箭发动机向导式仿真系统实现了仿真过程的规范化、数字化。通过与一般仿真分析过程的实际对比,向导式仿真分析的高度集成的特性降低了仿真分析用时;对一般仿真分析软件的兼容和嵌入式集成保证了仿真分析结果的一致性和准确性;向导式操作和统一的数据管理模式提升了仿真流程的规范性,降低了设计人员的学习门槛。

火箭发动机向导式仿真系统达到了提升发动机组件仿真规范化、数字化程度和降低仿真分析难度的目标,提高了设计协作、促使知识沉淀、规范仿真流程,从而提升仿真效率和水平,为液体火箭发动机设计效率提高和质量提升提供支持。

参考文献:

- [1] 魏鹏飞, 吴建军, 刘洪刚, 等. 液体火箭发动机一种通用模块化仿真方法[J]. 推进技术, 2005, 26(2): 147-150.
- [2] 张黎辉, 李伟, 段娜. 液体火箭发动机模块化通用仿真[J]. 航空动力学报, 2011, 26(3): 687-691.
- [3] 唐家鹏. ANSYS FLUENT 16.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- [4] 张晨曦, 马晓丹. 火箭发动机涡轮增压集成设计系统[J]. 火箭推进, 2015, 41(4): 79-83.
ZHANG C X, MA X D. Integration design system for turbo pump in rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(4): 79-83.
- [5] 蔡国飙. 液体火箭发动机设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [6] 聂饶, 程玉强, 吴建军. 航天器推进系统气液路故障仿真[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(2): 32-41.
- [7] 郭敬, 宋晶晶, 孔凡超. 发动机推进剂增压输送系统建模仿真技术综述[J]. 火箭推进, 2015, 41(5): 1-6.
GUO J, SONG J J, KONG F C. Overview of modeling and simulation technology for propellant pressurization feed system of liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(5): 1-6.
- [8] 晏政, 刘泽军, 程玉强, 等. 航天器推进系统模块化建模方法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(4): 28-32.
- [9] 王倍乐. 航天器推进系统组态化模型仿真研究与软件实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [10] 史锻. 面向集成设计平台的姿轨控液体火箭发动机设计方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [11] 何文会. 航天器仿真平台与数据库设计研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [12] 姚华廷, 王曦, 苏三买. 航空发动机数控系统综合仿真平台设计[J]. 航空动力学报, 2010, 25(9): 2148-2154.
- [13] 张海波, 姚文荣, 陈国强. 涡轴发动机/直升机综合控制仿真平台设计[J]. 推进技术, 2011, 32(3): 383-390.
- [14] 李磊, 敖良波, 王心美, 等. 航空发动机涡轮动叶设计平台的构建与验证[J]. 航空发动机, 2012, 38(3): 24-28.
- [15] 丁亦凡. 冲压发动机设计仿真平台研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [16] 全静, 汪伟, 郝明. 基于 SOA 的航空发动机设计/仿真集成管理系统[J]. 机械设计, 2017, 34(6): 82-87.
- [17] 贾玥, 李英梅, 董雪. 一种大流量快响应四机组合电磁阀的集成设计[C]//中国航天第三专业信息网第四十届技术交流会暨第四届空天动力联合会议论文集. 昆明: 中国航天第三专业信息网, 2019.
- [18] 尹嘉娃. 低冰点双模式姿轨控推进系统建模与仿真研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2009.
- [19] 孙晓玉. 基于 Ansys 双螺杆膨胀机动态特性有限元仿真[J]. 技术与市场, 2020(2): 32-36.
- [20] 赵万里, 郭迎清, 王哲, 等. 液氧/甲烷火箭发动机建模仿真与特性分析[C]//中国航天第三专业信息网第四十届技术交流会暨第四届空天动力联合会议论文集. 昆明: 中国航天第三专业信息网, 2019.