

# 运载火箭结构动特性分析工具的设计与实现

杨亮, 完颜振海, 杜可君, 聂蓉梅, 孙树森

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 运载火箭的结构模型复杂, 只有通过开发专用的仿真分析软件, 才能高效、便捷的对其开展动力学特性分析; 为保证工具建设的实用性, 该软件基于航天领域应用广泛的 Patran/Nastran 软件进行二次开发; 针对仿真分析流程, 设计实现了运载火箭结构动特性分析工具, 涵盖了建模与计算模块、结果后处理模块、模态筛选模块与模型修正模块, 并提炼了其中的关键技术; 经工程实践表明, 工具可提升设计效率, 且计算结果准确、通用性与扩展性强, 在工程中具备良好的应用价值。

**关键词:** 运载火箭; 结构动特性; 仿真分析; 工程应用

## Design and Implementation of Launch Vehicle's Structural Dynamic Characteristics Analysis Tool

Yang Liang, Wanyan Zhenhai, Du Kejun, Nie Rongmei, Sun Shusen

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

**Abstract:** The structural model of launch vehicle is fairly complex, so it is absolutely necessary to develop a special simulation analysis software for its high efficient and convenient analysis on dynamics. To ensure the practical nature on tool design, this software has been developed by Patran/Nastran which is widely used in aerospace applications. In consideration of the simulation analysis process, we have designed and implemented launch vehicle's structural dynamic characteristics analysis tool with modeling and calculating module, results post-processing module, mode selecting module and model modifying module. The involved key techniques are also summarized. It is verified by engineering practice that the tool has many advantages including high design efficiency, calculation accuracy, good generality and expansibility, thus provided with effective value in use.

**Keywords:** launch vehicle; structural dynamic characteristics; simulation analysis; engineering application

### 0 引言

结构动特性分析是运载火箭姿态控制系统设计、载荷计算的基础, 在火箭总体设计中占有十分重要的地位, 国内外运载火箭高度重视全箭动特性分析及试验工作<sup>[1]</sup>。土星-V 和航天飞机在研制阶段不仅进行了多种尺寸的缩比模型试验, 而且为了确保有限元分析结果的可靠性最终都进行了全箭振动试验<sup>[2-4]</sup>。

结构动特性是运载火箭重要的固有特性之一, 动特性决定结构在—项或多项载荷条件下的响应情况, 合理、精确的结构动特性预示结果是结构稳定性分析的前提, 是姿态控制设计、载荷计算的重要依据, 同时可以为结构设计提供有效的支持。

近年来, 数字化设计水平不断提高, 运载火箭领域逐渐出现了各类数字化设计软件, 如控制系统<sup>[5]</sup>和发动机系统<sup>[6]</sup>, 大幅提升了相关专业的设计效率。在结构设计领域, 随着火箭结构的改进, 以及新连接关系和新材料的出现, 结构动特性分析已成为运载火箭总体优化设计中不可缺少的一环, 其数字化仿真分析需求愈加迫切。

在此基础上, 本文提出运载火箭结构动特性分析软件的设计方案, 包括功能设计、总体设计与详细设计, 旨在实现结构动特性的快速建模、计算与分析工作, 并通过与模态试验相结合, 实现模型的闭环修正工作, 达到预示飞行状态运载火箭结

构动特性的目标。

### 1 运载火箭结构动特性仿真分析流程概述

箭体结构动特性仿真分析工作的流程见图 1。具体工作内容如下:

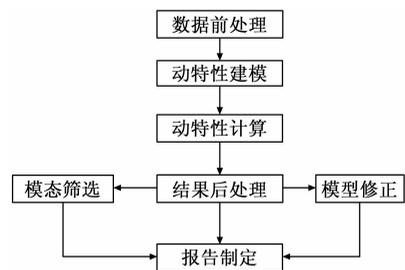


图 1 结构动特性分析流程

第一步是开展数据前处理工作, 主要完成结构动特性建模所需的输入参数梳理及数据设置;

第二步是动特性建模, 即基于模型编程语言或可视化建模方式, 完成火箭不同飞行时刻的结构动特性建模;

第三步是动特性计算, 主要选取求解器, 设置求解算法, 对计算模型进行求解;

第四步是结果后处理, 对计算结果进行处理, 输出频率、广义质量等内容;

第五步是模态筛选, 根据设计需求, 从计算结果中剔除高阶模态, 选出满足条件的相关阶次的弯曲、纵振与扭转模态;

第六步是模型修正, 根据模态试验结果, 完成计算模型修

收稿日期:2016-01-04; 修回日期:2016-01-29。

作者简介:杨亮(1983-),男,山西五台人,博士,工程师,主要从事数字化系统设计及仿真方向的研究。

正, 使得计算与实验相吻合;

最后是报告制定, 主要完成动特性分析结果报告的编制。

## 2 运载火箭结构动特性分析工具的设计

### 2.1 功能设计

动特性分析工具主要基于有限元前后处理软件 Patran 和大型结构分析软件 Nastran 开展相关的建模与计算分析工作。依据图 1 所示的计算流程, 分析工具应具备如下功能:

1) 输入数据前处理: 根据不同构型火箭的质量分站、截面特征、材料属性、推进剂液面高度等数据, 进行推进剂分站质量计算、同位置站点质量合并、梁单元刚度计算等数据预处理操作, 生成建模所需的数据。

2) 参数化建模: 在 Patran 环境下, 基于 PCL (Patran Command Language) 语言形成全箭梁模型参数化建模板, 实现全箭梁模型的自动建模。

3) 动力学特性计算: 调用 Nastran 求解器, 计算指定时刻的全箭梁模型, 输出计算结果。

4) 结果后处理: 根据输出结果, 将模态频率、模态振型、广义质量等数据进行后处理, 完成振型图的绘制。

5) 模态筛选: 首先对初始时刻计算模态进行分类排序, 即按照弯曲、纵振与扭转 3 个方向分类, 从低阶到高阶对模态进行排序, 然后再开展后续时刻模态筛选工作。

6) 模型修正: 分析模态试验结果与动特性计算结果的差异, 并据此选择修正算法, 完成计算模型的自动修正, 使各飞行时刻计算所得的各阶频率、各阶振型与模态试验结果保持一致, 其中主要修正参数为梁单元的刚度。

7) 报告生成: 完成建模、计算、分析过程中输入输出及过程数据的梳理, 生成具有标准格式的动特性分析报告。

### 2.2 总体设计

结构动特性分析工具的总体设计主要分为以下三层:

数据层: 底层支撑框架。采用面向对象的编程方法, 采用数据接口配置、C# 与 PCL 语言混合编程等技术, 通过不同类型输入数据的提取与组合, 并完成输入数据的自动检测, 包括数据的正确性与完整性两方面。

模型层: 以数据层作为输入, 依次建立参数模型、计算模型与分析模型, 实现从前处理、计算到后处理分析的关联, 保证模型处理的一致性, 为应用层提供支撑。

应用层: 包括参数化建模、动特性计算、模态筛选、数据分析、模型修正、报告生成等应用。这些具体的应用将在工具界面中直观地提供给专业设计人员以便使用。

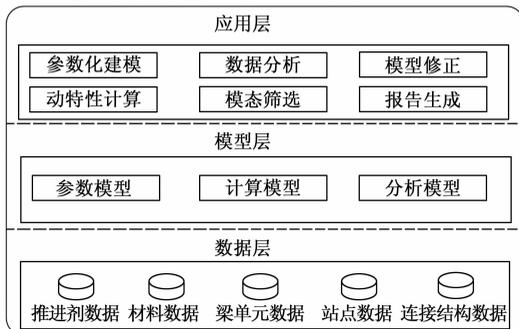


图 2 结构动特性分析工具的总体设计

### 2.3 详细设计

软件工具由 4 个模块组成, 包括建模与计算模块、结果后处理模块、模态筛选模块、模块修正模块。

#### 2.3.1 建模与计算模块

建模与计算模块首先从输入界面或数据文件中获取总体原始数据, 经数据预处理得到建模所需数据, 然后分别完成推进剂建模和箭体梁单元建模, 最后组装生成全箭有限元模型, 提交求解器计算分析, 模块流程如图 3 所示。

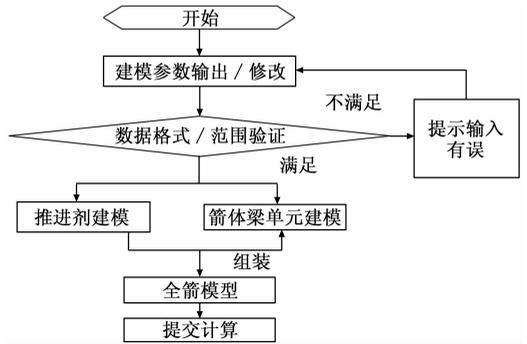


图 3 建模与计算模块流程

#### 2.3.2 结果后处理模块

结果后处理模块通过读取建模与计算模块的计算结果, 提取出模态频率、模态振型、广义质量等数据, 自动生成标准格式的数据文件传递给姿态控制模块, 并生成标准格式的分析报告。同时, 绘制生成振型图、频率随时间变化曲线图等。

#### 2.3.3 模态筛选模块

模态筛选模块提供初始时刻筛选功能与后续时刻筛选功能。首先, 根据姿控专业提供的筛选规则, 对初始时刻的模态计算结果进行分类筛选。在起飞时刻之后, 从后一时刻的模态计算结果中筛选出与前一时刻中各阶模态振型最相似的模态, 使每阶模态的变化具有连续性。最后根据所有筛选结果, 绘制模态频率随时间的变化曲线图等, 并生成所需的分析报告。图 4 给出了模态筛选模块的流程。

#### 2.3.4 模型修正模块

模型修正模块根据动特性计算结果, 与模态试验结果的差异, 自动调整建模参数 (一般为梁单元刚度), 实现计算模型的自动修正, 最终使得各飞行时刻建模计算所得的各阶频率、振型与模态试验结果的误差满足用户要求。

## 2.4 软件关键技术

运载火箭动特性分析软件的设计与实现过程中, 重点梳理了以下关键技术:

1) 模型转换技术: 动特性分析是以总体原始数据、弹道参数以及 Pro/E 模型作为输入, 通过参数化建模等手段将 Pro/E 模型转化为可供 Nastran 分析的有限元模型。一般来说, Patran 分析功能强大, 但建模能力相对较弱。该技术的关键是结合火箭 Pro/E 模型, 利用其模型信息快速建立有限元模型。通过建立一套 Pro/E 与 Patran/Nastran 的数据接口, 实现参数化建模, 完成两个系统之间的信息交换, 将 Pro/E 模型信息读出, 写入有限元模型 (\*. bdf) 文件中。

2) 模型组装技术: 运载火箭的结构是由各个部段组件而成。在动特性分析时, 首先完成各部段的有限元建模, 再组装成整个火箭考核其整体性能。各个部段有限元模型组装需要按

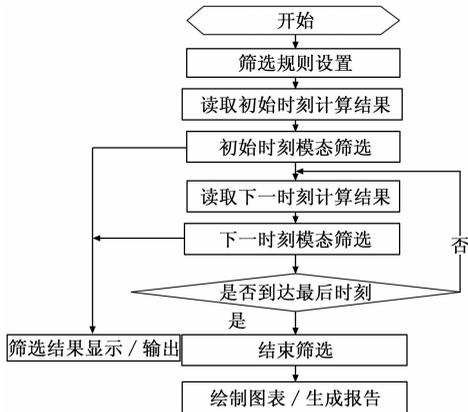


图 4 模态筛选模块流程

照一定的规则才能完成, 尤其是各个部段有限元单元划分规则及单元、节点编号等需要制定一套合理、可行的规则。

3) 推进剂建模技术: 运载火箭中推进剂的质量占全箭起飞质量的 90% 左右, 在飞行中推进剂不断消耗, 贮箱内推进剂液面高度不断变化, 全箭质心也随之发生变化。全箭有限元模型能否正确反映推进剂的特性是模态分析中的关键, 因此需要开展推进剂建模技术研究, 将推进剂的纵横分析模型统一, 采用国内外先进的推进剂模拟技术, 如虚拟质量法<sup>[4]</sup>等, 应用到箭体模态分析, 提高分析精度与计算效率。

4) 计算后处理技术: Nastran 软件的计算结果 (\*. f06 文件) 数据量大且复杂, 因此数据提取困难, 不利于动特性分析, 需开展后处理技术研究, 将计算结果处理成姿控专业所需的节点模态数据; 同时直接输出全箭各主要部段之间的传递关系, 实现方便、快捷的目的。

5) 模型修正技术: 建模过程常会采用各种假设, 且连接条件、边界条件、材料参数及阻尼等与实际也存在差异, 导致计算与实验存在一定偏差。因此, 在实际工作中需使用模态试验结果修正有限元模型并据此开展动特性分析工作。常用的模型修正方法有两种: 基于参数的模型修正与直接矩阵逼近模型修正。上述方法各有利弊, 可根据运载火箭自身结构特点选择合适的方法开展修正工作。

### 3 运载火箭结构动特性分析工具的实现

为充分说明运载火箭结构动特性分析工具, 本节将结合仿真分析流程, 说明该工具的功能实现情况。

打开动特性分析工具软件, 其主界面如图 5 所示, 依次完成以下操作:

1) 点击“数据前处理”, 输入材料参数、站点参数、发动机参数、贮箱参数以及推进剂参数等数据, 并完成数据自动检查与预处理;

2) 点击“参数化建模”, 软件将调用 Patran 软件, 根据数据前处理阶段生成的参数模型, 生成对应的有限元模型;

3) 点击“动特性计算”, 设置归一化方法与求解阶次, 调用 Nastran 软件, 完成模型动特性的自动求解;

4) 点击“结果后处理”, 可完成提取模态频率、模态质量与模态振型等信息, 其界面如图 6 所示;

5) 点击“模态筛选”, 完成相关设置, 即可进行初始时刻和后续时刻的模态筛选;

6) 点击“其他功能”, 选择“模型修正”, 输入目标模态与频率, 选取模型修正算法, 即可完成模型自动修正;

7) 点击“报告定制与生成”, 即可自动收集模型输入、输出参数, 生成分析报告。

此外, 工具还通过“一键分析”功能, 实现数据前处理、参数化建模与动特性计算等功能的自动运行, 减少人工操作, 达到提升分析效率的目的。

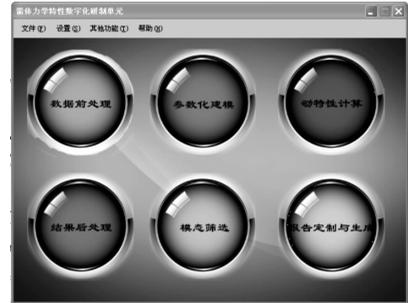


图 5 工具的主界面窗口

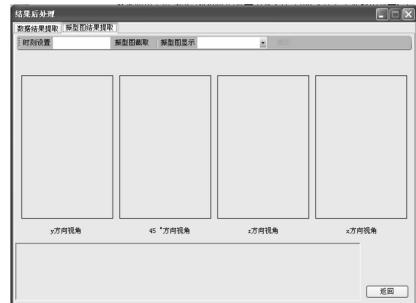


图 6 结果后处理界面

## 4 结论

运载火箭结构动特性分析工具作为载荷与结构设计的重要工具, 通过采用可视化界面和向导式应用, 提供参数化建模、模态筛选、模型修正等功能, 为快速动特性计算、虚实比对分析等工作提供支撑, 帮助分析、定位以及改进火箭结构设计薄弱环节, 保证火箭的结构动态品质满足设计要求。同时, 该工具还开发了下游专业的接口, 用于姿态控制、POGO 分析等, 以便建立一体化工作流程, 开展多专业联合设计, 达到提升研制效率、改进特性品质的目标。

### 参考文献:

- [1] 王毅, 朱礼文, 王明宇, 等. 大型运载火箭动力学关键技术及其进展综述 [J]. 导弹与航天运载技术, 2000, 2 (1): 29-37.
- [2] Leadbetter S. A. Application of analysis and models to structural dynamic problems related to the Apollo-saturn V launch vehicle [J]. NASA TN D-5831, 1970.
- [3] 邱吉宝, 王建民. 运载火箭模态试验仿真技术研究新进展 [J]. 宇航学报, 2007, 28 (3).
- [4] 潘忠文. 运载火箭动力学建模及振型斜率预示技术 [J]. 中国科学 E 辑, 2009, 39 (3).
- [5] 权赫, 张嗣锋. 运载火箭控制系统的 BIT 设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (11): 2.
- [6] 殷延祥, 李亦, 鞠玉涛, 等. 基于 CATIA 的固体火箭发动机系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (5): 1580-1583.