

空天飞行器质量特性管理系统设计与实现

满益明¹, 韩金鹏¹, 罗明强², 康军¹

(1. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076; 2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 质量特性作为空天飞行器总体设计的关键控制参数, 与飞行器总体性能和技术指标密切相关, 其设计与控制贯穿空天飞行器研制全过程; 基于数字化设计环境和飞行器数字样机, 提出了全飞行器质量特性管理系统方案, 并在此基础上开发了原型系统, 对设计思路进行了验证; 相比于传统质量特性的计算及管理方法, 该系统可有效提高设计效率, 实现飞行器质量特性全寿命周期的动态可控、可见和可追溯; 该成果后续还可推广应用于其他航天器研制。

关键词: 空天飞行器; 质量特性控制; 质量特性管理; 可重复使用运载器

Design and Implementation of Mass Property Management System for Aerospace Vehicle

Man Yiming¹, Han Jinpeng¹, Luo Mingqiang², Kang Jun¹

(1. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

2. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The mass property is a key important control parameter which associated with overall performance and key technical index of aerospace vehicle, the design and control of mass property is important in the development of aerospace vehicle. The management system of mass property is presented in this paper, the proposed design of system was validated by prototype system on a basis of digital mock-up in digital environment. The dynamic controllability, visibility and traceability of the change process of mass property are realized by the system, which has faster computing speed and higher data accuracy compared to the traditional mass property of the calculation and management method.

Keywords: aerospace vehicle; mass property control; mass properties; reusable launch vehicle

0 引言

空天飞行器是指一种集航空、航天技术于一体, 兼有航空和航天功能, 既能在轨执行任务又能在机场水平着陆的飞行器^[1]。空天飞行器质量特性(质量、质心、转动惯量和惯量积)是飞行器总体设计的重要依据和关键控制参数, 与飞行器总体性能和技术指标密切相关, 其设计与控制贯穿于空天飞行器全寿命研制周期^[2-7]。

随着先进数字化技术和三维数字样机技术的发展与工程应用^[7-12], 空天飞行器质量特性控制变得相对容易, 易于实现, 可有效解决传统设计模式下全飞行器质量特性数据难以统一管理, 难以精确控制和评估的难题, 从而降低设计成本, 提高质量特性设计工作的准确性和时效性。基于CATIA VPM数字化设计环境, 本文提出了空天飞行器质量特性管理系统总体技术方案, 开发了飞行器质量特性管理系统, 通过工程应用, 证明了总体设计思路的合理性与正确性。相比于传统质量特性管理手段, 该系统计算速度更快、数据更为准确, 实现了飞行器质量特性全寿命周期的动态可控、可见和可追溯。

1 系统设计

1.1 设计思路

空天飞行器任务剖面涵盖地面、发射上升、长期在轨、离轨再入和进场着陆等多个阶段, 飞行器质量特性控制具有全程控制精确化、数据来源多样化、设计过程全程化、数据分析动态化、三维数模数据海量化和多专业需求差异化等特点^[1]。针对上述特点, 空天飞行器质量特性管理系统采用功能层次化、软件模块化、平台通用化、数据动态化、显示多样化的指导思想, 按照一次开发, 多项目全寿命周期使用的总体设计思路, 基于飞行器研制流程, 构建了飞行器质量特性管理系统, 以满足不同研制阶段、不同构型、不同权限用户、不同层级(零部件、部组件、全飞行器级)对全飞行器质量特性的管理需求。

1.2 系统方案

飞行器质量特性管理系统主要包括三部分: 质量特性数据管理子系统、质量特性数据分析与评估子系统和质量分布计算子系统, 总体框架如图1所示。

飞行器质量特性数据管理子系统是设计人员开展整器或部组件质量特性管理和控制的基本数据依据, 管理的目的在于有效地将各类来源的质量特性数据管理起来, 建立一个统一的、有依据的质量特性数据中心, 在此基础之上对飞行器质量特性开展进一步计算、分析、预测、监控和

收稿日期: 2019-03-26; 修回日期: 2019-05-05。

作者简介: 满益明(1982-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事空天飞行器总体设计方向的研究。

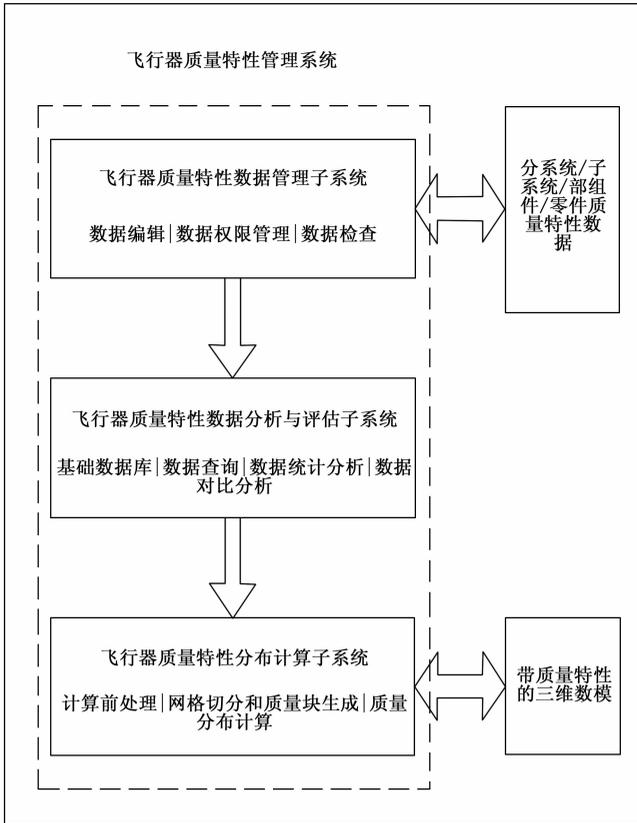


图 1 管理系统总体框架

控制。质量特性数据管理子系统建立的飞行器质量特性数据库是设计人员开展飞行器质量特性数据分析与评估的前提。

质量特性数据分析与评估子系统是设计人员开展飞行器质量特性分析、动态跟踪、监控、预测及评估的专业设计工具，是总体设计人员控制和预测整器或部组件质量特性状态的重要过程及手段。质量特性数据分析工作主要分为三类：第一类是各专业提出的某一项或几项相关数据的统计分析，如纵向质心、质量的统计分析；第二类是根据各零部件的基本质量特性数据与历史统计数据开展的对比分析，如系统/分系统质量系数统计、材料系数统计、不同项目质量特性数据对比等。最后一类是飞行器质量特性的趋势分析，这项工作是飞行器质量特性控制的关键环节。在缺少先验数据的情况下，设计人员通常需要基于分析结果对飞行器质量特性的变化趋势进行预测，给出预测重量及重量裕度。质量特性数据分析与评估子系统是飞行器质量特性控制的有力支撑。

随着计算机技术和设计手段的进步，飞行器总体设计工作越来越精细化。飞行器质量特性分布计算子系统为设计人员开展质量特性的分布计算、载荷及强度的精细化设计与分析、零部件或部组件的结构与传力路线的优化设计、质量特性的优化设计提供了可能。因此，质量特性分布计算子系统是飞行器质量特性控制的重要手段，与质量特性

精确化设计与优化、质量特性的预测与控制密切相关。

飞行器质量特性管理系统业务流程如图 2 所示。

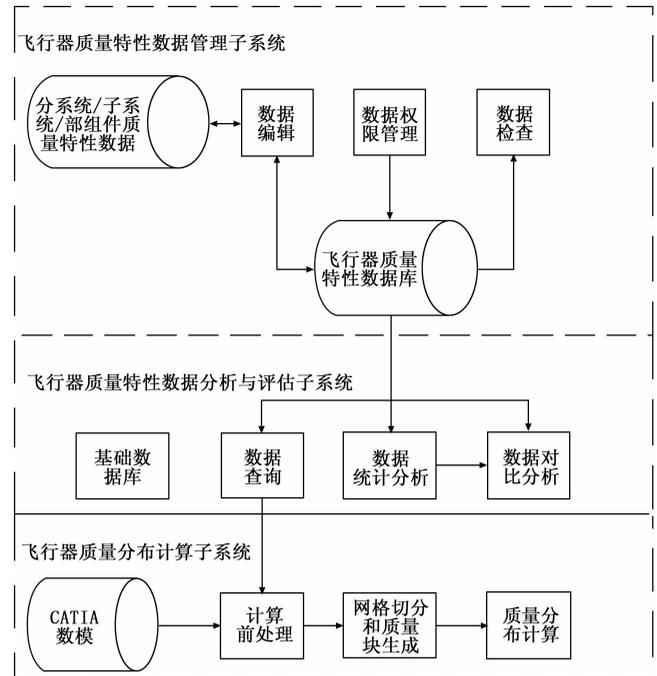


图 2 飞行器质量特性管理系统业务流程

从图 2 可以看出，飞行器质量特性数据管理、分析与评估子系统的相关功能模块均围绕飞行器质量特性数据库展开，质量特性数据库不单独作为功能模块，各功能模块分别依照其业务需求对飞行器质量特性数据库进行读写操作交换数据。质量特性数据库作为该系统的核心，只有基于各零部件、部组件、分系统的质量特性才能建立全飞行器质量特性数据库。飞行器质量分布计算子系统主要功能是围绕对应的质量特性数据和 CATIA 数模展开，通过构建一定的网格，利用成熟的工程算法，对数模进行质量切分，并开展质量分布计算分析。质量特性分析计算子系统是总体设计过程中相关专业对质量特性数据的一个典型应用。

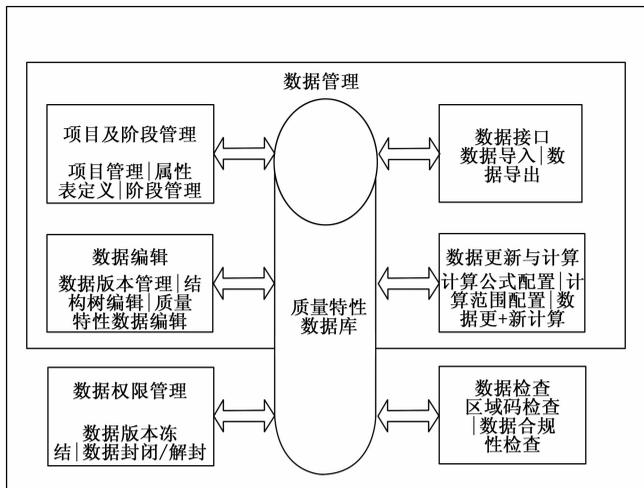
2 关键子系统方案

2.1 数据管理子系统方案

飞行器质量特性数据管理子系统包括项目及阶段管理、数据编辑、数据权限管理、数据检查等模块，用于管理不同项目、不同设计阶段、不同版本的飞行器质量特性数据分解结构树，实现对质量特性数据的数据编辑、数据更新、数据检查和数据权限管理等功能。同时，还可为外部系统提供数据接口，实现飞行器质量特性数据的输入输出。

项目及阶段管理模块主要实现不同项目或同一项目不同阶段质量特性数据的层次化管理，常采用树形结构。项目启动时，除需按照项目的需求建立项目及项目分类的层次结构外，还需确定项目属性表结构和属性项类型的定义。

数据编辑模块用于实现质量特性数据的直接编辑功能，包括质量特性数据版本及其分解结构树的编辑、质量特性



数据编辑等。项目及阶段确定后，管理系统将以数据版本作为质量特性数据封装单位，一个数据版本对应一个完整的质量特性数据分解结构。在项目及阶段明确定义后，设计人员将以数据版本作为质量特性数据封装单位，一个数据版本对应一个完整的质量特性数据分解结构，其中的数据属性表与项目的属性表定义保持一致，且父子节点下的数据可包含继承特性。在数据版本下开展质量分解结构树编辑时，每个节点均可进行无限层级定义，形成质量特性分解结构树，且具有父子关系的节点之间可支持更新计算。质量特性数据编辑的对象是质量分解结构树下各系统、子系统及部组件等节点下的各属性项数据。

数据接口模块主要实现质量特性数据的导入导出功能。通过该功能可将满足管理系统输入接口的质量特性数据与结构树下选中的项目、阶段、版本或质量节点建立关联关系；通过导出功能，可将选中的项目、阶段、版本或质量节点的质量特性数据以一定的格式输出，如 EXCEL 表格文件，当设计人员选中节点为项目、阶段时，可将质量特性数据批量导出，若选中节点为数据版本或质量特性数据节点，则进行单个数据导出。

数据更新与计算主要实现对质量特性数据的计算和检查功能，包括数据更新与计算、数据权限管理和数据检查等。通过设置数据节点间相关数据项目的计算关系及设定的计算范围，设计人员可实时进行数据更新与计算。在计算范围内，按照提前设置好的计算公式，自底向上进行数据计算，计算过程中冻结版本的数据因无修改权限而不参与计算和更新，锁定的数据虽无更新权限，但仍可向上一级节点传递本节点数据，并参与上一级节点的计算与数据更新。典型的计算关系包括刚体的质心计算、转动惯量计算和惯性积计算。

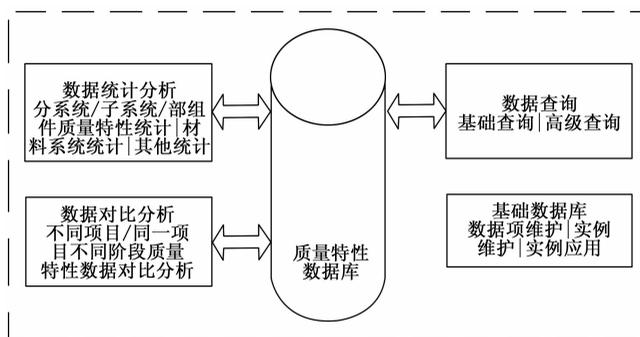
数据权限包括版本的修改权限和数据的更新权限，可分为版本冻结/解冻和数据锁定/解锁两部分，通过该功能，设计人员可对数据状态进行动态管理，按需进行更新计算。

版本冻结状态仅针对某个确定的版本，冻结状态下对应的数据无法进行编辑和更新；数据锁定/解锁状态仅针对某一数据节点，解锁状态的数据节点不参与上一节点的数据更新。

数据检查的对象为某个数据版本，包括区域码检查和数据合规性检查，系统允许设计人员建立多组检查项开展切换检查。设计人员可按需配置检查规则，对每一组检查项的出错状态可进行自主标示，当数据被修改为正确数值后，状态即可自动恢复。

2.2 数据分析与评估子系统方案

数据分析与评估子系统包括基础数据库、数据查询、数据统计分析、数据对比分析等模块，主要功能是建立飞机、卫星、飞船等飞行器质量特性的基本数据库，对数据库中的数据进行关键字及多条件查询，动态监控飞行器质量特性变化，并开展统计分析。



数据统计分析模块用于按需对数据库中的质量特性数据进行统计分析，获取整器或分系统/部组件等的共性或特殊类型信息，如分系统质量系数统计、材料系数统计等，并以直观图示展示统计结果。

数据查询模块主要是对质量特性数据库中不同项目、不同阶段、不同版本下的各类数据进行查阅和条件检索，包括基础查询和高级查询。通过关键字进行基础查询，重点体现各专业人员对项目相关数据的查询需求；高级查询主要通过设置数据属性项（如质量、材料等）的过滤实例，满足用户自由查询需求，如进行部件+材料+质量范围的查询。

结合各零部件基本特性和统计特性，数据对比模块主要用于满足各专业设计人员对质量特性数据信息的对比分析需求，如不同项目同一种材料的所占百分比、同一项目不同阶段质量特性变化、不同项目同一阶段质量特性变化等。

基础数据库框架是基础数据库建设的核心内容。基础数据库以用户定义的参数表为基础，辅以数据查询、分析及分类管理等，提供与通用数据资源库的接口，可调用通用数据资源库中的实例参数进行分析；此外，基础数据库通常还包含飞机、航天器等质量特性相关的基本数据库。

基础数据库框架主要由数据项维护、实例维护、实例应用以及实例分析等部分组成。

2.3 质量分布计算子系统方案

飞行器质量分布计算子系统通过对数模的前处理和网格划分,可快速完成飞行器及其主要部件的质量块生成及质量分布计算,以图像化形式显示计算结果,输出特定格式数据。质量分布计算子系统功能框架如图 5 所示。

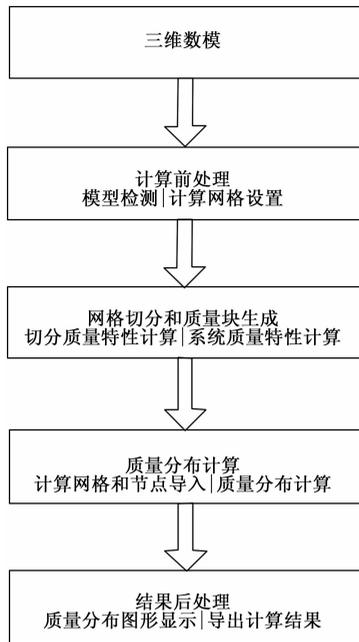


图 5 质量分布计算子系统功能框架

计算前处理模块主要功能是对质量分布计算用的模型进行合规性检查和设置质量切分所用的有限元网格。模型检查功能可自动过滤筛选开展质量分布计算所需的实体模型。通过直接在建模环境中选择节点的方式,选择需进行质量分布计算的模型,针对选定的模型,系统将自动识别出其中的质量信息和可用于分布计算的实体模型。

网格切分和质量块生成模块利用计算前处理的有限元网格划分信息完成对所选中数字模型的切分计算,以 Panel 单元形式统计切分落入各单元内的质量特性数据,并自动生成相关结果。在切分质量特性计算结果后,通常需要补充及合并系统质量特性,以形成可用于质量分布用的质量特性数据。

质量分布计算模块主要用于将各部件的质量特性数据按照一定的工程计算方法(如面积法、虚功原理法等)合理等效地分布在给定的有限元网格节点上。

结果后处理模块主要用来实现对计算结果及有限元网格的浏览查阅,通常以图片或表格的形式显示处理结果,如以图形化三维显示方式展示质量分布计算结果时,常包括各质量块、质量块的质点、质量分布节点、分布质量大小等。

3 典型案例应用

目前,飞行器质量管理体系已应用于某项目研制工作,并形成了不同研制阶段各零部件、部组件、子系统、分系统及全飞行器质量特性变化历程数据库,完成了典型部组件的质量分布计算。通过该系统的设计与研制,设计团队不仅完成了质量特性原始数据的高效、集中、统一管理和精确的、持续的动态评估,实现了全飞行器质量特性数据的全过程动态可控、可见和可追溯,而且还降低了设计人员重复性工作,提高了设计效率,保证了数据准确性。

4 结束语

本文针对空天飞行器质量特性控制的特点与难点,基于数字化设计环境和飞行器数字样机,提出了飞行器质量特性管理系统方案,结合工程应用需求,完成了飞行器质量特性管理系统建设与应用。工程应用结果表明,该系统可有效提高设计效率,确保质量特性变化历程的准确性和时效性,实现全飞行器质量特性数据的全过程动态可控、可见和可追溯。飞行器质量特性管理系统的相关成果,后续还可推广应用于其他航天器的质量特性控制。

参考文献:

- [1] 满益明, 吴俊辉, 康 军, 等. 空天飞行器质量特性设计方法研究 [J]. 航天器工程, 2018, 27 (4): 22-27.
- [2] 李兴乾, 白明生, 苟仲秋, 等. 载人航天器系统重量控制方法研究 [J]. 航天器环境工程, 2012, 29 (2): 201-204.
- [3] 王秋晓, 王 迎. 飞行器质量特性参数测量 [J]. 重庆大学学报. 2011, 34 (12): 23-28.
- [4] 高庆玉, 王 悦, 葛健全, 等. 基于 Pro/E 二次开发的飞行器质量特性计算技术 [J]. 导弹与航天运载技术. 2013, 41 (3): 79-82.
- [5] 李拴芳, 张润宁. 一种海洋测高卫星质心在轨估计算法 [J]. 航天器工程, 2014, 23 (5): 29-34.
- [6] 张洪波, 武向军, 刘天雄, 等. 一种在轨卫星质量特性计算方法 [J]. 航天器工程, 2013 (6): 30-36.
- [7] 沈 重, 郑宏涛, 董 伟, 等. 复杂航天器数字化装配仿真平台及应用研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2015, 43 (6): 42-45.
- [8] 蔡亚宁, 肖鹏飞, 何德华, 等. 数字化技术在高分三号卫星总装设计中的应用 [J]. 航天器工程, 2017, 26 (6): 137-142.
- [9] 周建斌. 基于 CATIA 二次开发的飞机质量特性批量提取方法 [J]. 民用飞机设计与研究, 2011 (3): 48-51.
- [10] 郭 鹏, 廖 韬, 梁 硕, 等. 航天器热试验查询统计系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (11): 295-298.
- [11] 王建军, 向永清, 赵 宁. 航天器质量信息大数据技术的研究与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 24 (4): 200-204.
- [12] 郑小鹏, 张丽晔, 彭 健, 等. 航天试验数据管理系统的设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2014, (12): 4154-4156.