

# 空天飞行器总体布局快速设计系统 研究与实现

满益明<sup>1</sup>, 韩金鹏<sup>1</sup>, 江凌彤, 陈 稗<sup>2</sup>, 罗明强<sup>3</sup>

(1. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076; 2. 海鹰航空通用装备有限责任公司, 北京 100074;

3. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 飞行器总体布局设计作为空天飞行器总体设计的核心工作之一, 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; 基于空天飞行器总体布局“五约束”、“六要求”、“十流程”, 提出了空天飞行器总体布局快速设计系统方案, 并基于 CATIA VPM 数字化设计环境开发了原型系统; 工程实践结果表明, 文章提出的系统方案解决了飞行器外形、结构布置、系统布置和质量特性快速精细化设计及总体布局设计难以自动调整、快速迭代优化的难题, 实现了飞行器外形、结构布置、仪器设备的参数化、实体化、具体化、可视化及质量特性动态分析与评估; 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; 总体布局; 快速设计; 质量特性; 可重复使用运载器

## Research and Implementation of Layout Rapid Design System for Aerospace Vehicle

Man Yiming<sup>1</sup>, Han Jinpeng<sup>1</sup>, Jiang Lingtong, Chen Bai<sup>2</sup>, Luo Mingqiang<sup>3</sup>

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

2. Hiwing Aviation General Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China;

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

**Abstract:** The layout design is a key important work in the development of aerospace vehicle which associated with overall performance and key technical index of aerospace vehicle. Base on “five constraints”, “six requirements”, “ten process” of layout for aerospace vehicle, the system for layout rapid design is presented, which was validated by prototype system on a basis of CATIA VPM in digital environment. The engineering practice shows that the system could resolve problems of detailed design of outline, structure layout, instrument layout, mass property analysis and automatic adjustment and rapid integrated optimization for outline design during layout design, and realized the parametric design, materialization and visualization of outline, layout, equipment and mass property, and dynamic analysis and evaluation of layout. This system can be used as reference for the layout design of other spacecraft.

**Keywords:** aerospace vehicle; layout; rapid design; 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<sup>[1-2]</sup>, 其研制属于典型的系统工程。空天飞行器总体布局设计(包括外形设计、结构布置、系统布置等)是飞行器总体设计的重要工作, 与总体、气动、结构、载荷、控制等专业高度耦合, 与飞行器总体性能和技术指标密切相关, 直接影响飞行器的综合性能及全寿命周期费用<sup>[3-6]</sup>。方案设计阶段, 总体布局设计约束高度耦合、更改来源多, 涉及面广, 常需要详细设计、反复迭代、逐步逼近、多轮优化, 才能形成满足用户需求, 技术、经济和工程实施均

可行的总体布局方案<sup>[7-9]</sup>。传统航天器总体布局所采用的工程估算方法、线性叠加方法, 既无法满足空天飞行器复杂空间曲面的精确表征、气动特性的精确分析、质量特性的精确控制、仪器设备电缆布置空间的精确估算等设计需求, 也无法满足方案设计阶段, 飞行器总体方案快速迭代评估与集成优化的需求。

本文基于空天飞行器总体布局“五约束”, 明确了总体布局设计的“六要求”和“十流程”, 基于 CAD 参数化建模技术, 提出了空天飞行器总体布局快速设计系统总体技术方案, 基于 CAA C++ 和 CATIA VPM 数字化设计环境, 开发了飞行器总体布局快速设计系统, 解决了飞行器复杂外形、结构布置、系统布置难以参数化、实体化、可视化, 质量特性难以动态分析与评估, 专业间多参数快速共享等方案设计阶段总体布局设计过程中所面临的难题, 提高了总体布局设计的经济性、时效性和准确性。

收稿日期: 2020-04-06; 修回日期: 2020-05-06。

作者简介: 满益明(1982-), 男, 湖北鹤峰人, 博士, 高级工程师, 主要从事空天飞行器总体技术方向的研究。

## 1 总体布局设计要求与流程

### 1.1 总体布局设计约束

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,飞行器总体布局应能适应全任务剖面气动特性精确分析、质量特性变化范围小、轨道再入全速域压心变化范围小、长期在轨与轨道再入异类执行机构复合控制策略复杂、紧凑空间仪器设备布局难及调节能力有限等特点。空天飞行器总体布局设计约束主要包括五方面:起降方式、质量特性、性能指标、内部空间、制造装配约束等。

1) 起降方式约束:飞行器采用的起降方式对总体布局影响至关重要,如:飞行器起飞规模、发射方式、着陆方式、机场跑道条件等。起飞规模决定了飞行器的质量规模,主要由飞行器有效载荷能力确定;起飞方式包括自主水平起飞、自主垂直起飞、运载火箭垂直发射等,其决定着飞行器的外形规模,着陆方式主要有着陆滑跑装置、气囊、伞降、滑撬等;机场跑道条件主要包括跑道长度、宽度及海拔高度等,决定着飞行器外形规模,着陆系统方案和着陆质量规模。

2) 性能指标约束:在飞行器初步方案的快速迭代过程中,总体设计人员主要关注的性能指标包括携带有效载荷入轨和再入返回的能力,速度增量,控制精度和稳定度,最大着陆速度,机翼翼载,轨道再入过程中的最大热流、最大过载、最大动压等。

3) 质量特性约束:飞行器全任务剖面内面临“五化”难点,需要满足五方面设计要求<sup>[1]</sup>,总体设计人员需要将质量特性设计要求转化为对总体布局的要求,如贮箱体积、飞行器结构外形尺寸、典型结构形式的选择、全任务剖面质量特性变化范围等。

4) 内部空间约束:空天飞行器长期在轨的任务需求及携带有效载荷再入返回的能力要求对飞行器内部空间提出了较为严苛的要求。考虑到平台的通用化需求,结合飞行器任务剖面,按照功能独立的设计原则,飞行器总体布局按照仪器舱、有效载荷舱和推进舱分开设计各舱内部空间。仪器舱主要用来布置电气设备,有效载荷舱主要为有效载荷提供足够的空间包络和通用化、模块化、标准化的机电热接口。推进舱主要用于布置贮箱、气瓶、发动机等动力系统设备。除此以外,内部空间设计还需考虑机构类产品的运动包络、高精度设备的标定等其他特殊要求。

5) 制造装配约束:总体布局设计过程中,需要考虑冷、热结构的材料体系及工艺水平,零部件及组件产品生产的工艺性、可加工性和装配性,尽可能降低对生产设备、工装桁架、装配流程的要求,确保总体方案的可实现性和经济性。

### 1.2 总体布局设计要求

飞行器总体布局设计是飞行器总体方案设计的重要工

作之一,设计要求主要来源六方面。

1) 气动特性要求:总体布局中的一项重要工作是确定飞行器外形,供气动专业开展气动特性分析与评估。空天飞行器常采用升力体外形,气动特性要求主要来自于再入返回段,主要包括最大热流、最大热载、升力特性、阻力特性、升阻比特性及对特征部位特征尺寸的特殊要求等。空间运行段气动阻力矩很小,总体布局设计可忽略其影响。发射上升段是否考虑气动特性要求取决于飞行器发射方式。

2) 质量特性精确控制要求:质量特性精确控制需求主要来源于控制系统,质量特性的变化范围主要通过飞行器结构布置、系统布置和仪器设备布置等总体布局设计过程保证。此外,总体布局设计还应预留一定空间,以应对详细设计过程中的不确定性变化。

3) 内部空间最大化要求:空天飞行器内部空间的需求主要来自于三方面:按照目前有效载荷设计水平,飞行器有效载荷能力的首要约束来自于空间包络;其次,飞行器上安装了大量机构组件,总体布局设计还应重点考虑机构运动路径及动态包络对空间的需求;最后,考虑到仪器设备安装及特殊设备标定等操作需求,尤其是需要借助外部工装和光学设备对安装精度进行标定的设备,在总体布局设计过程中,应予以重点关注。

4) 可维修性要求<sup>[10]</sup>:空天飞行器具有重复使用特点,可维修性设计是总体布局设计的一项重要工作,主要包括仪器设备、仪器安装板及仪器设备安装、更换及后期维护过程中的人员可操作性,装配可达性,设备检修的可检测性等。

5) 可加工性要求:飞行器总体布局设计与生产制造过程环节密切相关,如空间异型曲面、特种材料的可加工性及成品率,生产制造的工艺稳定性等。可加工性将对产品生产周期、方案的工程可实现性和经济性都有较大影响,严重时可对方案造成颠覆性影响。

6) 低关联度要求:总体布局设计一方面应按照低关联度和功能独立的要求将飞行器分成不同舱段,如仪器舱、有效载荷舱和推进舱等,以减少不同舱段间管路及电缆的耦合,降低对内部空间的布置需求;另一方面,分系统间界面应尽量简单、少耦合,对于三个系统以上的耦合设计,要严格控制,降低系统集成难度及设计更改时对其他系统和总体的影响。

### 1.3 总体布局设计流程

空天飞行器总体布局设计是飞行器总体设计的重要工作,设计流程共有10个步骤(如图1所示):(1)确定约束条件;(2)外形快速设计/重构;(3)总体布置快速设计;(4)分析;(5)系统集成与优化;(6)性能指标、设计准则满足性复核;(7)确定飞行器初步总体方案;(8)各分系统方案初步设计;(9)确定总体布局基线;(10)确定飞

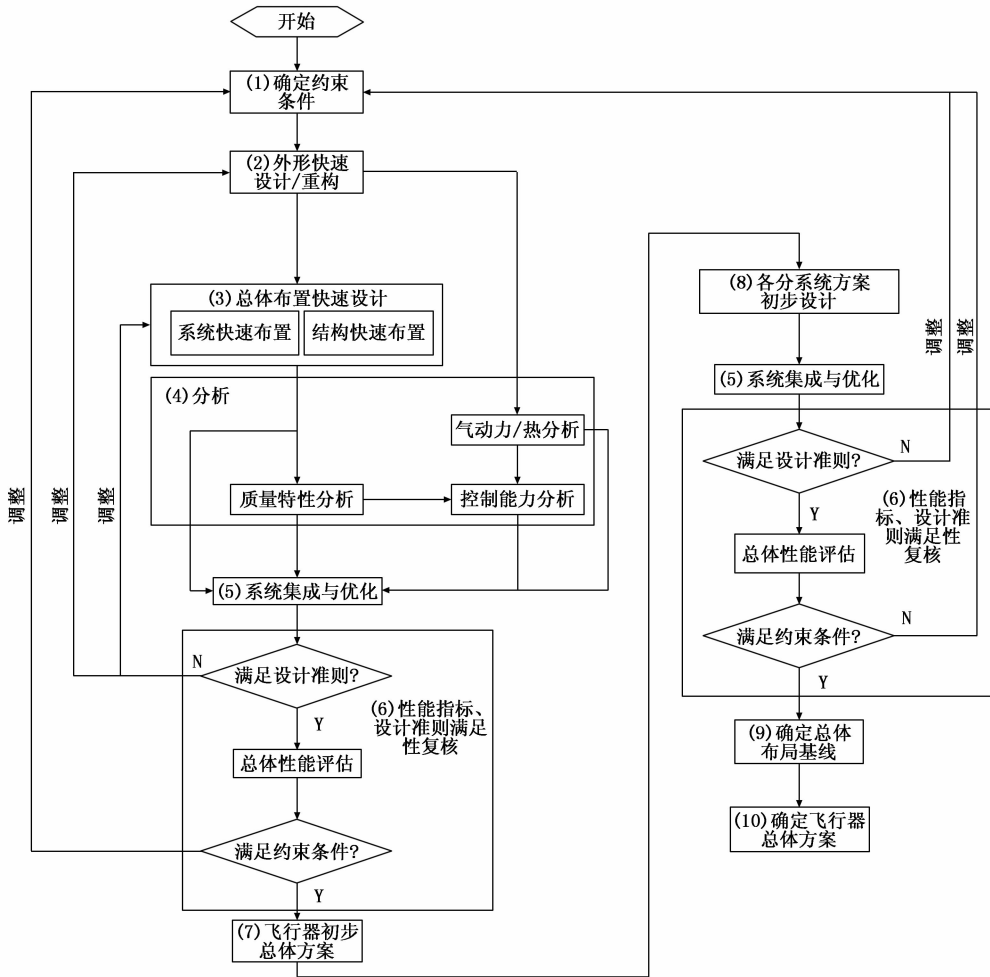


图 1 总体布局设计流程

飞行器总体方案。从图中可以看出，飞行器总体布局设计涉及多个专业多个分系统，需通过反复迭代、多轮逼近，并综合和平衡各方面需求，才能得到初步总体方案。在确定初步总体方案后，各系统将按照总体提出设计要求/设计任务书开展方案设计，在此基础上，总体再开展系统集成与优化，确定飞行器总体布局，只有其满足设计准则和设计约束条件时，才能最终确定飞行器总体布局，进而确定飞行器总体方案。本文研究内容主要涉及初步总体方案确定前需快速开展的总体布局设计与优化工作，即设计流程中的 (1) 至 (7)。

## 2 系统方案

### 2.1 设计思路

针对总体布局设计的“四约束”、“六要求”和“十流程”特点，基于 CATIA VPM 数字化设计环境，按照系统集成化、功能模块化、接口通用化、显示多样化、维护便捷化的总体设计思想，采用 CAD 参数化建模技术，构建空天飞行器总体布局快速设计系统，以满足不同项目、不同研制阶段、不同构型、不同专业、多人并行开发对飞行器总体布局快速迭代优化和总体设计精细化的设计需求。

### 2.2 逻辑架构

飞行器总体布局快速设计系统逻辑架构如图 2 所示，包含应用层、功能层、数据层、基础层。

基础层是飞行器总体布局快速设计系统的基础平台，主要基于 Microsoft Visual C++ 和 CATIA CAA 开发，用于实现参数化建模算法和质量特性分析算法，包括 CATIA 软件、参数化外形生成算法模块、空间布局算法模块、质量特性算法模块。

数据层用于完成功能层和基础层间的数据交互，获取功能层输入的外形设计、结构布置、系统布置等参数，提取基础层生成的质量特性数据。此外，数据层还自动实现了系统内各模块间的数据交换和格式转换。

功能层用于完成飞行器外形的参数化创建，结构布置、关键系统和仪器设备的系统布置和全飞行器质量特性的快速分析，包括外形设计、结构布置、系统布置、质量特性分析等核心功能模块，各模块均可单独运行。

应用层是面向用户的使用产品，即飞行器总体布局快速设计系统。基于 CATIA 软件二次开发实现，通过定义面向用户的个性化菜单，集成了该系统全部功能模块。

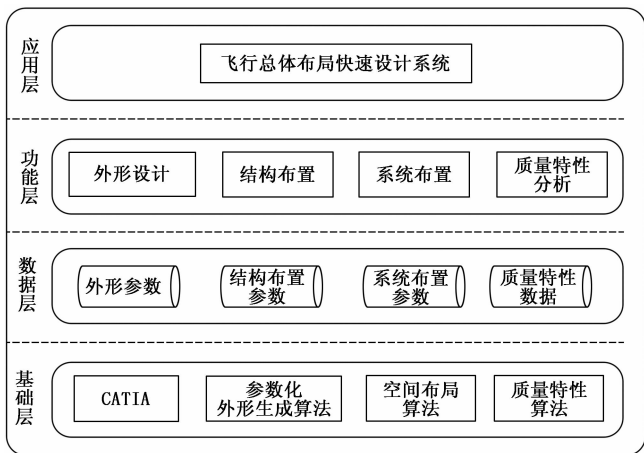


图 2 系统总体架构图

### 2.3 功能模块

飞行器总体布局快速设计系统主要包括六个功能模块: 基础功能、外形设计、结构布置、系统布置、质量特性分析和基础库配置, 如图 3 所示。

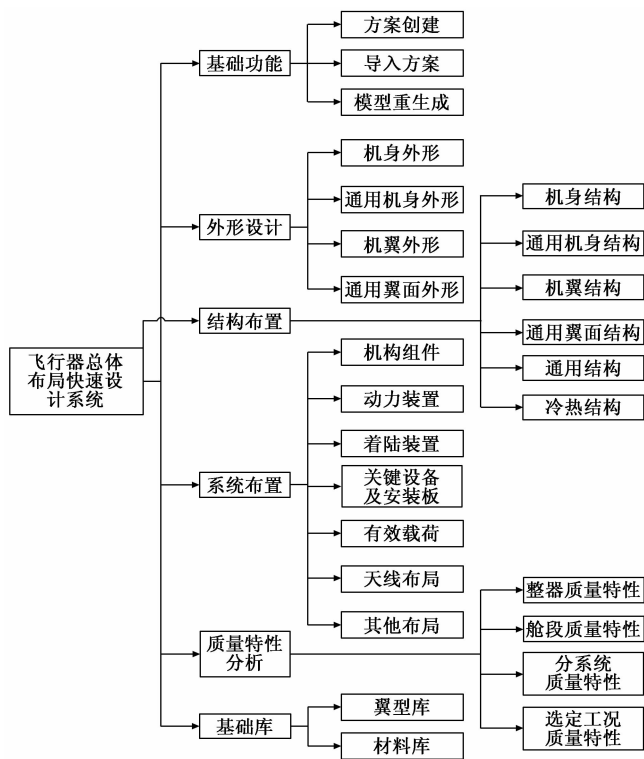


图 3 系统功能架构示意图

基础功能用于创建 CATIA 解决方案, 导入已有 CATIA 方案、重新渲染并生成三维模型等, 包括方案创建、导入方案、及模型重生成等子模块。

外形设计模块采用文献 [11] 提出的参数化建模方法, 快速生成飞行器外形三维数模, 包括机身外形、通用机身外形、翼面外形、通用翼面外形设计等子模块。机身类外形设计采用轮廓线和站位面剖面曲线相结合的方式, 机翼

类外形设计采用参数化定义机翼平面形状和站位面翼型剖面相结合的方式。

结构布置模块采用基于参数化建模的结构快速设计方法<sup>[12-13]</sup>, 通过先批量布置结构构件, 再局部优化实现飞行器框、梁、桁架等主要承力结构的快速设计与调整, 包括机身结构、通用机身结构、翼面结构、通用翼面结构、通用结构布置、冷热结构设计 6 个子模块。

系统布置采用一种基于参数化模型库的快速布置方法, 以简化飞行器系统布置工作<sup>[13]</sup>, 实现对机构、动力、着陆装置等主要分系统及电气设备的快速布局设计, 包括机构组件、动力装置、着陆装置、关键设备及安装板布局、有效载荷布局、天线布局和其他布局等子模块。

质量特性分析模块基于模型法的基本原理, 通过应用统计分析、统一坐标系下自动转换及质量特性相关算法<sup>[2,14]</sup>, 可快速、批量、动态计算并图形化输出各三维实体模型和集成方案的质量特性数据, 包括整器、舱段、分系统、特定工况质量特性分析等子模块。

为充分集成和借鉴已有翼型成果和材料属性, 实现参数化模型的快速实体化, 基础库模块集成了翼型库和常用材料库。

### 2.4 模块化间关联关系

各功能模块间的关联关系如图 4 所示。从图中可以看出, 外形设计、结构布置、系统布置与质量特性分析模块之间具有耦合的关联关系。图中以实线箭头连接的各模块之间为必要依赖关系, 即仅当上一模块输出有效数据时, 后续模块功能才处于可用状态; 以短虚线箭头连接的各模块之间为参考或引用关系, 可单独运行。

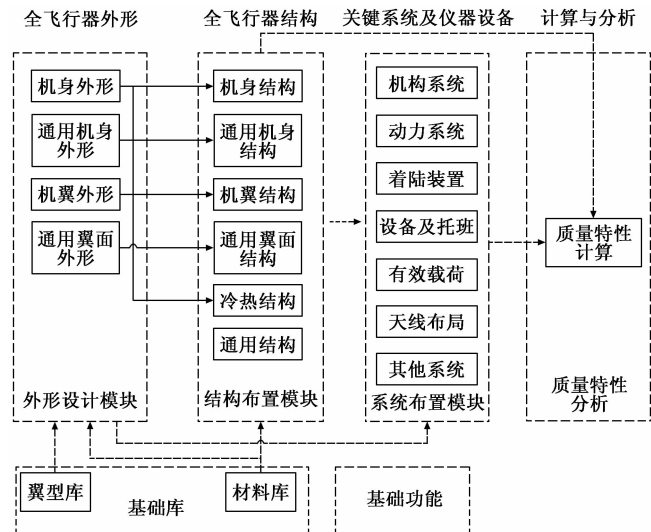


图 4 模块间关联关系示意图

### 2.5 关键技术

#### 2.5.1 外形参数化建模技术

飞行器外形设计和三维建模是飞行器总体设计的一项重要工作。方案设计前期, 总体方案常需要反复迭代、多

轮优化, 飞行器 CAD 模型将被反复修改和重建, 因此, 需要建立快速生成飞行器三维外形模型的方法。外形参数化建模技术是快速生成飞行器三维外形模型的有效途径。考虑到飞行器外形曲面的连续性和可加工性要求, 外形建模时需确保外形曲面光滑连续, 且二次导数连续, 不能有明显的瑕疵。飞行器外形参数化建模技术主要包括机身类部件和翼面类部件参数化建模。

机身类部件可根据需要分为若干子部件分段造型, 每个子部件基于轮廓线和剖面线通过放样的方式生成外形曲面模型。每个机身部件都包括一个或几个子部件, 每个子部件的描述参数主要包括部件名称、部件定位点坐标、部件长度、部件轮廓线的信息列表和部件剖面线的信息列表<sup>[12,15-16]</sup>。空天飞行器翼面类部件包括机翼、水平尾翼、垂直尾翼和鸭翼等部件, 且都具有文献 [13] 提到的三类特点, 每个翼面类部件由一个或多个翼段<sup>[17]</sup>组成, 每个翼段由平面形状参数、空间定义参数、定位参数及翼型数据四部分参数描述。

### 2.5.2 参数化模型数据库技术

为提升飞行器系统布置设计迭代效率, 提高既有模型资源的重用程度, 确保模型数据准确性和可追溯性, 统一管理三维模型, 在方案设计阶段, 采用参数化方法建立系统布置的几何模型, 构建面向飞行器布局设计的模型库至关重要。参数化模型库构建流程如图 5 所示<sup>[13]</sup>。从图 5 中可知, 模型库主要功能包括两部分: 与模型储存、管理、浏览等相关的参数化模型库管理功能; 与模型布置设计相关的参数化模型选择、模型参数设置、模型布局等功能。从图中可以看出, 参数化模型库的构建首先需要搜集资料和数据, 提取共性几何特征, 利用参数化建模方法, 建立参数化模型, 并按照一定格式提交数据库存储; 需使用模型库中模型时, 按需从参数化模型库中提取可用模型, 并布局中设置具体位置。文献 [13] 详细给出了参数化模型布置功能实现流程及应用模型库进行快速布置的 6 个步骤: 模型插入节点的选择、参数化模型类别的选择、模型参数定义、模型定位参数、参数化模型材料属性或质量特性定义、参数化模型预览与生成等, 详见图 6。

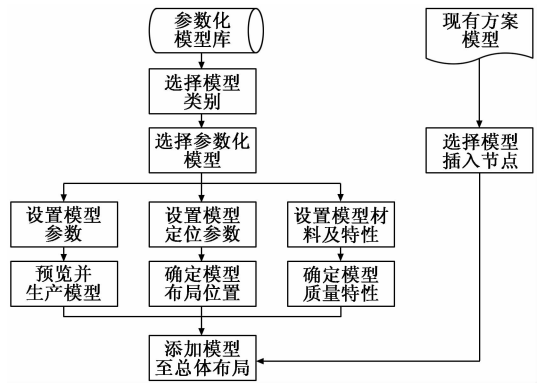


图 6 系统布置过程示意图

### 3 典型案例应用

目前, 飞行器总体布局快速设计系统已应用于某项目研制工作。方案设计过程中, 基于 CATIA 数字化设计环境, 总体设计人员利用飞行器总体布局快速设计系统, 通过外形设计、结构布置、系统布置、质量特性分析模块等, 快速完成了飞行器机身、机翼、舵面等外形, 机身、机翼(见图 7)、舵面等结构布置, 机构组件、动力装置、着陆装置、仪器设备、安装板、载荷等系统布置, 建立了全飞行器数字化三维模型, 获得了多个状态下的质量特性数据。经多轮优化, 快速确定了飞行器总体布局。该系统的应用不仅实现了总体布局设计的参数化、实体化和质量特性的快速评估, 而且还降低了设计人员方案迭代过程中的重复性工作, 提高了设计效率, 保证了数据准确性。

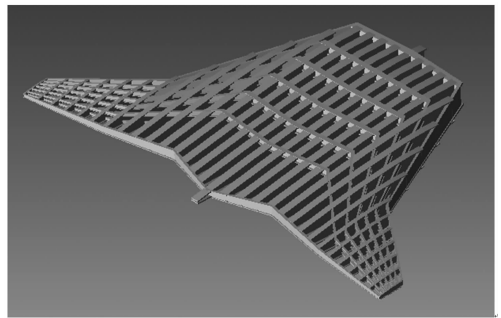


图 7 翼面结构布置示意图

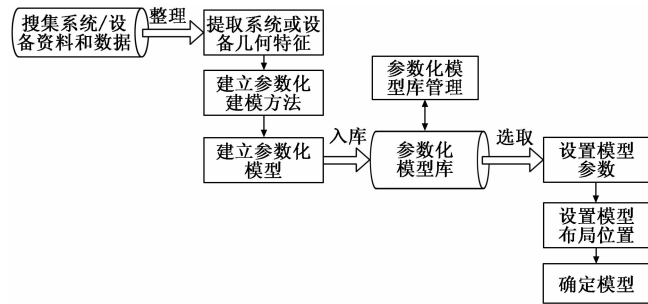


图 5 参数化模型库构建流程示意图

### 4 结束语

本文从空天飞行器研制出发, 明确了总体布局五方面约束条件, 梳理了飞行器总体布局“十步”设计流程, 完成了飞行器总体布局快速设计系统建设, 并在航天项目中进行了工程应用。工程应用结果表明, 该系统满足了飞行器总体布局的参数化、实体化、具体化、可视化设计和质量特性的精细化设计需求及总体布局设计结果的动态分析和快速评估, 降低了设计人员方案迭代过程中的重复性工作, 大大提高了设计效率, 保证了数据准确性。飞行器总体布局快速设计系统的相关成果, 后续还可推广应用于

其他航天器总体布局设计优化。

#### 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] 满益明, 韩金鹏, 罗明强, 等. 空天飞行器质量特性管理系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (9): 133-136.
- [3] 滕弘飞, 张 宝, 刘 峻, 等. 航天器布局方案设计 [J]. 大连理工大学学报, 2003, 43 (1): 86-92.
- [4] 游 进, 田 政, 侯向阳. 基于遗传算法的再入航天器配重布局优化 [J]. 航天器工程, 2015, 24 (1): 56-61.
- [5] 荣成成, 左 光, 陈 冲, 等. 充气式再入航天器总体方案及关键技术初探 [J]. 航天返回与遥感, 2015, 36 (1): 16-23.
- [6] 周奉香. 设备外形与布局优化的关系 [J]. 航天器环境工程, 2012, 29 (4): 450-453.
- [7] Grantz A. X-37B orbital test vehicle and derivatives [A]. AIAA Space 2011 Conference & Exposition [C]. 2011: 7315.
- [8] 魏昊功, 陆亚东, 李 齐, 等. 欧洲“过渡试验飞行器”再入返回技术综述 [J]. 航天器工程, 2016, 25 (1): 131-140.
- [9] 马 明. 总体设计在现代工程系统研制中的地位与作用 [J].

工业工程与管理, 1999, 4 (6): 46-49.

#### 参考文献:

- [1] 杨 超, 黄 超, 吴志刚, 等. 气动伺服弹性研究的进展与挑战 [J]. 航空学报, 2015 (4): 8-30.
- [2] 胡海岩, 赵永辉, 黄 锐. 飞机结构气动弹性分析与控制研究 [J]. 力学学报, 2016, 48 (1): 1-27.
- [3] 刘伏虎, 马晓平. 弹性飞机阵风减缓气动伺服弹性系统鲁棒性研究 [J]. 飞行力学, 2015, 33 (6): 514-518
- [4] 李道春, 向锦武. 非线性气动弹性模型参考自适应控制 [J]. 航空学报, 2008 (2): 29-33.
- [5] 袁 刚, 李爱军, 王长青, 等. 多舵面大型民机阵风减缓系统设计 [J]. 飞行力学, 2011 (4): 67-69.
- [6] 吕 畅, 万小朋. 大型飞机机动载荷减缓控制系统设计与仿真 [J]. 航空工程进展, 2011 (3): 104-108.
- [7] Fezans N, Schwithal J, Fischenberg D. In-flight remote sensing and identification of gusts, turbulence, and wake vortices using a Doppler LIDAR [J]. CEAS Aeronautical Journal, 2017, 8 (2): 313-333.
- [8] Nicolas Fezans, Hans-Dieter Joos, Combined Feedback and LIDAR-Based Feedforward Active Load Alleviation [A]. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference [C]. 2017.
- [9] Ga'etan X. Dussart, Mudassir Loneand Shijun Guo. Multidimensional discrete gust loads of a large civil flexible aircraft [A]. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference [C]. 2017.

- [10] 魏鹏威. 载人航天器设计中的可维修性技术研究 [J]. 航天器工程, 2008, 17 (6): 68-72.
- [11] 冯昊成, 罗明强, 刘 虎, 等. 基于结构件实例库的飞机机体结构快速建模 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38 (5): 579-584.
- [12] 陈 稗, 罗明强, 武 哲. 民用飞机机身结构快速设计及自动化调整 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40 (6): 782-787.
- [13] 陈 稗. 民用飞机总体综合设计支持技术与原型系统研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2015.
- [14] 罗明强, 魏城龙, 刘 虎, 等. 基于三维参数化模型构建的飞机重量重心快速估算方法 [J]. 航空学报, 2013, 34 (3): 566-573.
- [15] 罗明强, 刘 虎, 武 哲. 开放式飞机总体设计环境的原型研究 [J]. 中国学术期刊文摘, 2008, 14 (22): 14.
- [16] 罗明强, 冯昊成, 刘 虎, 等. 民用飞机机翼结构快速设计及自动化调整 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35 (4): 73-80.
- [17] 王钢林, 孙义东, 武 哲. 飞机总体设计中基于参数的类翼面部件快速统一建模 [J]. 航空学报, 2002, 23 (6): 575-578.
- [10] Zeng J, Moulin B, Callafon R D, et al. Adaptive Feedforward Control for Gust Load Alleviation [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33 (3): 862-872.
- [11] 杨建忠, 王立宝, 杨士斌, 等. 阵风减缓系统传感器失效影响研究 [J]. 飞行力学, 2017 (4): 27-31.
- [12] Karpel M, Moulin B, Presente E, et al. Dynamic gust loads analysis for transport aircraft with nonlinear control effects [J]. AIAA, 2008, 25 (1): 1-25.
- [13] Karpel M, Moulin B, Chen P C. Dynamic response of aero servo elastic systems to gust excitation [J]. Journal of Aircraft, 2005, 42 (5): 1264-1272.
- [14] 杨建忠, 徐 丹, 杨士斌, 等. 考虑非线性因素的阵风减缓系统建模与仿真 [J]. 飞行力学, 2018, 36 (4): 51-55.
- [15] Hoffmann A, Loftfield K, Luckner R. Broadband Wind Estimation Algorithm for Gust Load Alleviation [M]. Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control. 2011.
- [16] Gromiec, M. J. Atmospheric diffusion: Study of the dispersion of windborne material from industrial and other sources [Z]. 1984, 26 (3): 314-315.
- [17] 杨铁军, 顾仲权, 鲁明月, 等. 基于误差通道在线辨识的结构振动主动控制系统 [J]. 振动与冲击, 2004 (3): 57-61.
- [18] Wildschek A, Maier R, Hoffmann F, et al. Active Wing Load Alleviation with an Adaptive Feed-forward Control Algorithm [A]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit [C]. 2006.

(上接第181页)