

飞行器多学科协同设计系统的构建与应用

王锦程, 周宇芳, 谢蕾, 苏伟, 赵振杰
北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076

摘要: 飞行器多学科协同设计是困扰当前飞行器综合性能提升、飞行器设计效率提高的关键问题之一, 而工程性的飞行器多学科协同设计系统构建与应用借鉴资料不多。本文介绍了依据飞行器总体设计过程为代表的飞行器设计体系构建的多学科协同设计框架及其在气动设计方面的应用过程及效果, 为飞行器协同设计的工程应用提供参考。

关键词: 飞行器; 多学科; 协同; 气动设计

Construction and Application of Multidisciplinary Collaboration Design System for Aircraft

Abstract: The technology of multidisciplinary collaboration design is one of the keys to improve the areocraftcombination property and design efficiency, but hard to find relative work of how to construct and apply the multidisciplinary collaboration designsystem. This paper present the frame of multidisciplinary collaboration design system which based on areocraft design processes and the application process and effect on aerodynamic design, which provide reference for analogous areocraftmultidisciplinary collaboration design.

Keywords: Areocraft; Multidisciplinary; Collaboration; Aerodynamic design

1 引言

随着飞行环境的综合限制因素增多及航天新理念、新技术的飞速发展, 飞行器呈现出外部形状与内部构成日渐复杂、承载功能与性能要求不断多元化、成本与质量控制要求更严、研制周期明显缩短和等特点^[1]。传统以明确接口关系、子系统独立设计验证、总装总测集成的模式, 总体与分系统沟通形成的接口关系与指标是关键, 通常会留下一定的设计

余量^[2]。但在缺少有效的总体方案协同设计与仿真手段的情况下, 从底层到顶层一级级余量叠加而逐渐增大的设计冗余无法有效降低, 使得总体方案在综合性能方面无法考虑再进行更进一步的优化^[3,4]。

飞行器总体方案设计通常需要经过概要设计、外形设计、飞行轨迹设计等步骤, 互相之间需及时根据设计结果开展讨论与技术协调, 确保总体方案的可行性, 并在可行性的基础

上对总体方案进行优化^[5]。通常情况下，专业间的协调沟通主要通过会议、电话与邮件等形式进行。专业间的设计输入、输出与结果反馈主要通过文档进行。不同软件和工具的使用、前后处理及上下游衔接也主要通过手动形式完成。这种协同设计的方式，设计效率依赖于设计师的熟练程度，无法得到有效提高。设计质量依赖于设计师的经验与水平，无法得到有效提升。设计过程依赖于设计师的规范操作，无法得到有效记录。且最关键之处在于，随着型号任务的增加，设计师工作量加重，不仅无法提高和提升设计效果，还很有可能带来反作用^[6]。

飞行器多学科协同设计系统，可以实现总体参数快速迭代与协同优化、系统指标分解、系统功能逻辑生成、总体方案设计和总体指标分析及评估，开展系统功能及工程指标优化匹配、多方案和技术途径的对比分析等工作，提高型号总体设计指标的完备性和总体闭环性，为当前上级要求、竞争对手和商业航天不断提出新要求和新挑战的环境下的飞行器总体设计提供支撑。

2 飞行器方案设计过程

飞行器方案设计是由总体设计牵头完成的，飞行器设计指标的实现、飞行性能的确定都与方案设计直接相关。方案设计阶段，由总体设计师分配、协调设计指标，综合分析各分系统的性能和接口关系，以保证飞行器总体指标体系对任务要求的满足性及各分系统之间的全局一致性。方案设计由总体指标体系构建开始，具体过程如图1所示。

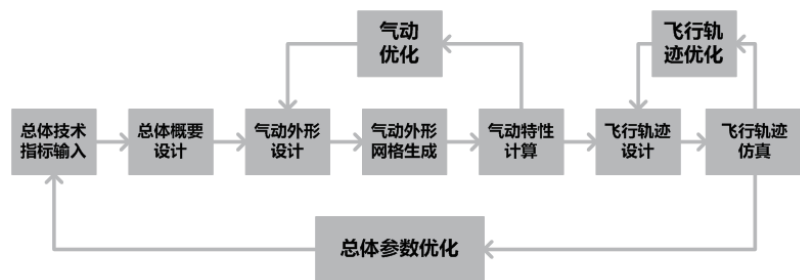


图1 飞行器方案设计流程图

协同设计过程分为五个主要步骤，目标是快速形成满足任务要求的飞行器外部形状和指标体系，作为后续其他专业进行深入论证的基础，具体过程如下。

(1) 指标分解：结合上游单位提供的飞行器设计要求和相关接口要求，确定飞行器关键设计指标，并就设计指标

进行分解与细化。结合当前类似性能的飞行器具体情况，与相关力学、环境和结构等专业沟通与协商，确定具体专业的设计要求，形成初始指标体系。

(2) 外形选取：气动专业基于总体下发的设计要求，结合当前专业前沿发展及相关技术积累，开展外形设计、相关数值计算及优化仿真工作，提出初步的候选外形方案。候选方案需经上下游总体及相关设计师的讨论与验证，形成满足未来应用场景、市场需求与技术前瞻性等综合要素的方案。

(3) 验证性设计：飞行力学专业基于上游设计要求及设计输入，进行方案设计及相关仿真分析工作，对外形方案提出优化要求，并对为下游相关专业提供输入；其他设计师分别基于设计要求与上游输入，进行方案设计及相关验证，反馈对上游相关指标的优化建议，提出本专业的指标子体系。

(4) 布局安排：经过多专业的协同设计过程，依据初选的外形方案形成了新的指标体系。基于外形方案与承载功能，开展设备设施的布局安排设计，并计算相关的物理特性，如质量和质心等，形成初步的候选设计方案。

(5) 迭代优化：针对形成的设计方案，开展局部功能的深入论证，并对指标体系进行修正与细化，减少余量范围，优化外形方案与布局安排，通过多次迭代优化完成方案设计。

3 飞行器多学科协同设计系统架构

飞行器多学科协同设计系统是以基于方案设计过程为代表的飞行器综合设计体系构建的数字化协同设计平台，旨在为方案设计提供总体设计和优化的环境，降低各独立专业设计余量叠加产生的方案综合性能下降程度，提高各专业设计的效率与规范性。飞行器多学科协同设计系统将总体、气动、结构等专业的仿真工具、流程与知识经验进行集成与管理，为设计师提供方案阶段总体方案快速论证、典型设计参数的优化与仿真验证等功能，实现各专业设计与仿真工作的标准化、流程化与协同化。依托于系统的运行，实现设计与仿真工作中模型、算法、参数与操作等过程与结果数据的积累和沉淀，为逐步提炼形成设计和仿真知识库提供条件^[7]。飞行器多学科协同设计系统由门户系统、协同研发过程管理、协同研发专业管理、多学科设计优化、研发数据管理、研发知识管理和系统集成接口等七个子系统组成，各子系统互相支撑与协作，具体如图2所示。



图2 飞行器多学科协同设计系统框架

(1) 门户系统：是整个系统的统一入口，通过对底层工具与功能的封装、抽象和调用，为不同角色用户呈现互相独立的个人工作处理台面。

(2) 任务与流程管理子系统：是联合仿真平台的“数据总线”，对研发过程中的数据流和过程流进行传递和管理，以更好地实现研发任务的管理和执行控制。

(3) 专业管理子系统：把设计和仿真过程中的工具、方法与知识进行集成和封装，形成一系列标准化可重用的基础组件，并以此为基础构建面向飞行器研发的工程模板，提高飞行器研发效率，降低软件和工具使用门槛，实现研发过程的可重复性、可追溯性和可扩展性。

(4) 多学科优化设计子系统：提供多学科自动优化的功能，并通过其数据管理与流程管理的功能支持，为学科间数据传递提供便利，有效提高快速方案设计的效率。

(5) 数据管理子系统：对工程研发过程中设计参数、设计模型、分析模型、分析结果、报告等过程数据以及产生这些数据的操作和过程进行统一管理。

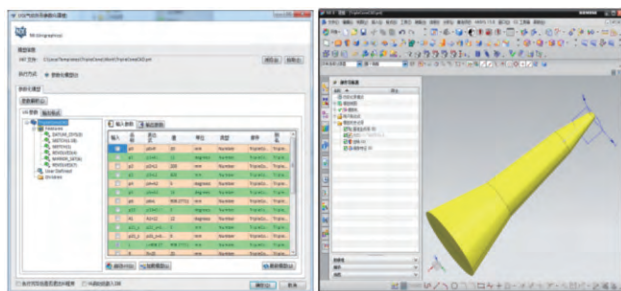
(6) 知识管理子系统：收集、保存、转换、传递、更新和维护整个产品研发过程中的知识、经验、数据等信息，为产品研制过程中的决策服务。知识与具体的研发活动相结合，把设计人员的经验和知识封装到系统中，使得知识与设计形成良好互动，实现知识共享、分发，真正做到知识驱动产品研发的整个过程。

(7) 应用集成接口：实现与外部系统的调用，如与计划层面与 AVPLAN 的对接，三维设计模型与 AVIDM4.0 的连接，文档管理与 AVIDM3.5 的连接，基础数据系统，单点登录集成与所门户系统等。

4 基于协同设计系统的气动设计

外形设计是飞行器方案设计中最重要的环节，飞行器方案设计的过程是在气动设计不断优化与完善的伴随下开展的。典型气动设计过程主要包括几何模型构建，网格生成、性能计算及优化迭代。而作为多学科协同设计中的典型过程，几何模型构建通常都采用参数化建模技术来完成，网格生成主要通过宏的录制或预编译的脚本，通过气动计算的不断优化迭代，达到对几何外形的修正与优化。在多学科协同设计系统中的气动设计过程及相关效果如下。

(1) 基于 UG 的参数化外形驱动：三维 CAD 软件 UG、Creo 或 CATIA 通常是进行外形设计的主要工具，每种软件在特定的几何建模方面有各自的特点且参数化建模方式有一定差异，在具体实施与使用中结合设计师的使用习惯及工作需要选择，本文采用了 UG 软件作为参数化建模的工具。参数化建模主要是将三维建模软件中直观观察到的模型通过形式化的描述，抽象出可变的参数，形成相关几何模型，通过修改可变的参数，达到修改几何模型尺寸的目的。在气动设计中，将优化过程拟调整的尺寸，例如总长、角度等作为优化参数（图 3a），形成参数化模型（图 3b），并输出网格生成所需的几何文件。



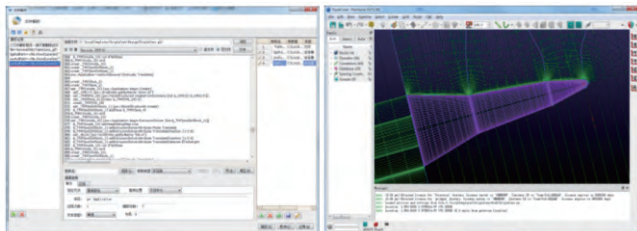
(a) 模型参数化示意图

(b) 参数化模型的几何表现

图3

(2) 网格自动生成：如何将气动设计的几个环节中用到的软件统一的串联起来，解决不同软件版本、架构差异性带来的数据传输问题，是气动设计自动优化的关键。网格生成工具商用和自研的有许多种，本文选择设计师长期使用的 Pointwise 进行了应用案例的演示。针对上述参数化模型，在软件中预先录制了生成网格的宏文件（图 4a）。在实际运行过程中，上游传递的参数化模型文件（根据网格生成软件选择相应的中间或文件格式）传入网格生成软件中，根据预定义的生成过程，完成网格的自动构建（图 4b）。一般说来，

由于整个过程将会是自动迭代执行，更加需要重点关注负体积问题。

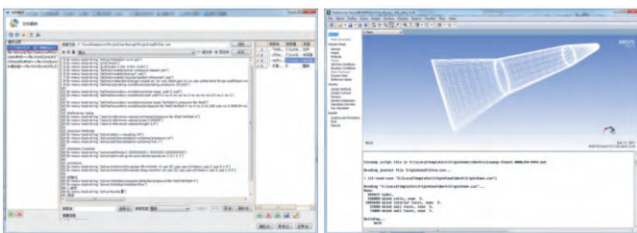


(a) 网格生成宏文件

(b) 通过宏文件自动生成的网格

图 4

(3) 气动计算：本文采用的气动计算软件是 Fluent，结合上游生成的网格文件，预先配置相关的求解器及其相关参数，在迭代优化的过程中，通过更新网格文件或相关的变量区间，完成目标计算次数的求解，并输出求解结果。

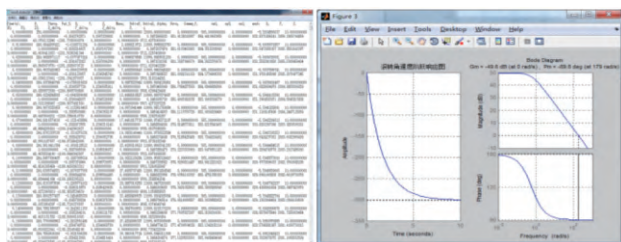


(a) 气动求解脚本文件

(b) fluent 求解

图 5

(4) 设计优化：基于气动设计的目标，本文采用遗传算法作为优化选择算法进行迭代优化。经过迭代优化，得出优化的目标参数，反馈至参数化构建的外形中，对外形进行修改与更新，形成新的优化设计过程，最终得到最优的外形相关参数。



(a) 优化过程数据

(b) 部分优化趋势曲线

图 6

气动设计的迭代优化过程是飞行器设计中最典型的迭代优化过程，涉及的环节、计算的方式、驱动的软件及对飞行器的影响均具有较强的代表性。尤其需要注意的是，自动迭

代优化对计算、存储及交换资源有较高的要求。因此，硬件资源的支撑也是多学科协同设计的重要条件。

5 结语

当前，许多高校及科研院所正在研究和尝试多学科协同设计在各领域的工程应用，取得了许多成效，也遇到了一些问题。工程性的飞行器多学科协同设计经验可参考的示例不多，也受到多方面的制约。本文结合飞行器协同设计面临的困难，阐述了飞行器方案设计的主要过程，介绍了依据飞行器设计构建的多学科协同设计平台的组成框架，并通过在气动专业的应用，验证了平台的功能有效性。这些工作为后续开展飞行器协同设计系统的深化建设理清了思路，明确了方向。

参考文献

- [1] 龚春林, 谷良贤, 孙建勋, 陈建江, 于红艳. 基于多学科设计优化技术的导弹方案设计 [J]. 计算机集成制造系统, 2009(05):842-848.
- [2] 马树微, 李静琳, 陈曦, 陈万春. 多级固体运载火箭分级多学科设计优化 [J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(3):542-550.
- [3] 张辰. 基于近似模型的亚轨道飞行器多学科设计优化研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [4] 赵伶丰, 王海龙, 白光明, 刘霞. 航天器多学科设计优化技术综述 [J]. 航天器工程, 2007, 16(05):104-109.
- [5] 余庆雄. 机总体多学科设计优化的现状与发展方向 [J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(4):417-426.
- [6] 张阳. 多学科协同设计过程优化研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013.
- [7] 龙腾, 刘建, 孟令涛, 史人赫, 刘莉. 多学科设计优化技术发展及在航空航天领域的应用 [J]. 航空制造技术, 2016(03):24-33. 