

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.04.005

# 基于工作流的多学科优化设计框架研究

江敏<sup>1</sup>,周琴<sup>1</sup>,齐龙<sup>2</sup>,卢风顺<sup>2</sup>

(1. 绵阳职业技术学院 机电工程系,四川 绵阳 621000;

2. 中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所,四川 绵阳 621000)

**摘要:**多学科优化设计框架在飞行器外形设计领域发挥着至关重要的作用。针对国内缺少自主 MDO 框架的状况,基于工作流技术开发出一款 MDO 框架软件。该软件完全遵循软件工程思想,集成了多个学科分析工具链和多套优化算法,支持本地/集群模式的学科分析计算,并借助数据库实现了数据的持久性存储。针对某飞行器进行了多目标多学科优化设计实践,结果表明该框架具有较高的自动化程度和良好的通用性。

**关键词:**工作流;多学科;优化设计;框架;多学科优化设计

**中图分类号:** TP271<sup>+</sup>.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2021)04-0020-04

## Aerodynamic Multidisciplinary Design Optimization Framework Based on Workflow

JIANG Min<sup>1</sup>, ZHOU Qin<sup>1</sup>, QI Long<sup>2</sup>, LU Fengshun<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical &amp; Mechanical Engineering, Mianyang Polytechnic College, Mianyang 621000, China;

2. Aerodynamics Research and Development Center, China Computational Aerodynamics Institute, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** The multidisciplinary design optimization framework plays an important role in designing aerodynamic shape. To address the issue of lack of proprietary MDO framework, a MDO framework based on workflow is developed with strict modular and software engineering strategies, by integrating numerous analysis programs within several disciplines, encapsulating various optimization algorithms, supporting local and backend large scale computation, and through handling the persistent storage with relational database. A multidisciplinary and multi-object design targeting certain spacecraft are performed. The results show that the framework displays higher automation and better universality.

**Keywords:** workflow; multidisciplinary; optimization design; framework; MDO

## 0 引言

一直以来,航空/航天飞行器的设计和研制都涉及许多学科(如空气动力学、结构力学、热力学等),是一个非常复杂的迭代过程。早在 20 世纪 80 年代,SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J<sup>[1]</sup>便指出飞行器设计时必须考虑多个学科之间的交互,否则肯定无法得到最优设计。因此,多学科优化设计(MDO)成为国内外航空/航天领域的一个研究热点<sup>[2-3]</sup>。

多学科优化设计框架是 MDO 的计算机软件载体,美国国家航空航天局(NASA)将其视为实现未来计算流体力学技术革命的六项关键技术之一<sup>[4]</sup>。优秀 MDO 框架的必要技术特征包括友好的人机交互界面、适应分布式计算环境、集成多种学科分析程序、提供丰富的优化算法、易扩展和维护等。目前,国际上已有 iSIGHT 和 ModelCenter 等成熟的商业软件,同时也有诸如 pyACDT<sup>[5]</sup> 和 OpenMDAO<sup>[6]</sup> 等原型系统。而国内的 MDO 框架大多是基于国外商业软件二次开发得到的;西工大的谷良贤等<sup>[7]</sup>

于 2004 年研究了多学科设计优化集成环境的集成模式,但未研制出具体的 MDO 软件;王丽芹等<sup>[8]</sup>基于 iSIGHT 提出了一种多学科综合优化框架的解决方案,探讨了其在导弹武器系统研制中的应用前景;针对机床整机结构方案设计问题,牛文铁等<sup>[9]</sup>利用 iSIGHT 搭建了机床的整机结构方案设计及集成优化系统框架,取得了较好的多学科优化设计效果。

可以看出,在多学科优化设计<sup>[10-11]</sup>框架研究方面,国内与国外还存在非常大的差距,目前主要集中在如何利用商业软件搭建可用的工程解决方案,而在软件系统化、产品化方面还有很长的路要走。因此,在我国航空航天工业大力发展自主计算流体力学软件的大背景下,迫切需要发展一款具有自主知识产权的 MDO 框架软件。

## 1 MDO 软件体系结构

在设计 MDO 软件时,需严格遵循软件工程领域的高内聚、低耦合设计思路,并借鉴一些大型企业级软件的分层特点,将其体系结构设计为图 1 所示的界面层、自适应

**基金项目:**国家重点研发计划“高性能计算”重点专项资助项目(2017YFB0202101)

**第一作者简介:**江敏(1988—),女,四川隆昌人,工学硕士,研究方向为先进制造技术、机电一体化技术。

优化层、通信协议层、管理层和功能支撑层。采用该设计方案有如下两个方面的好处:一是结构清晰,方便自顶向下的整体设计;二是各层之间的关联性较弱,可以按模块分解协同开发时的任务量。

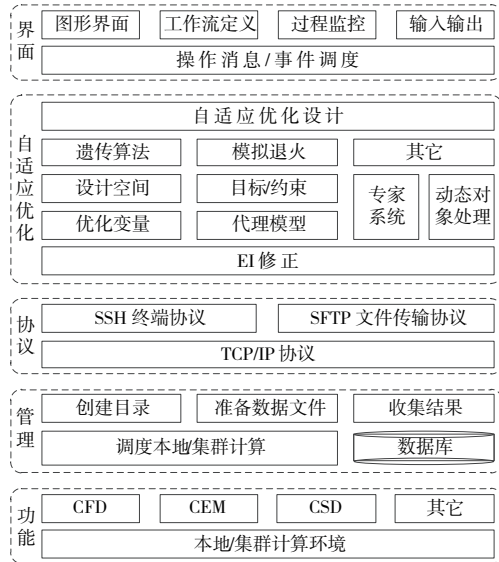


图1 MDO 软件体系结构

### 1.1 各层功能定位

界面层允许用户通过友好的人机交互接口来操作 MDO 框架软件,主要采用 MVC(模型-视图-控制)模式和事件机制来驱动整个系统的运行。该层除包含丰富的界面控件元素外,还提供了工作流定义、过程监控以及输入、输出功能。

自适应优化层是多学科优化设计的核心部分,它集成 EI 修正、代理模型<sup>[12]</sup>、优化目标处理、专家系统等模块和通用的优化设计算法,借助计算流体力学(CFD)技术或试验数据库的数据支撑,完成各种气动外形的优化设计功能。

通信协议层主要用来保证分布式 MDO 框架的整体互通,例如借助 SSH 终端协议实现远程登录,利用 SFTP 文件传输协议实现各种数据文件的上传/下载功能。

管理层主要负责为自适应优化层生产、收集和存储数据,提供目录管理、文件传输等基础功能。根据专家系统模块生成的“静态”计算状态表,管理层将学科分析程序调度到本地或者集群上执行,并根据计算结果自动生成“动态”计算状态表,最终生产出计算目标/约束所需要的数据。这些数据通常需要进行特定的处理和转换,并且按照预定义的规则写入数据库来实现数据的永久性存储。

功能支撑层集成众多的学科分析程序(如计算流体力学 CFD、计算电磁学 CEM、计算结构动力学 CSD 等),为整个优化设计流程提供基础数据,是决定 MDO 框架计算能力和设计精度的关键。另外,该层还包括计算资源相关的基础设施,包括本地计算资源和大规模集群资源。

### 1.2 工作流技术

工作流<sup>[13-14]</sup>就是一系列相互衔接、自动进行的业务

活动或任务,目前已广泛应用到各类信息化系统中,主要用来提高办公效率、规范性和适应性。

图 2 为进行多学科优化设计时的完整流程,包含顺序、循环等复杂逻辑。除此之外,在满足输入条件的前提下,用户可能仅仅需要某些子业务,而不必走完整个设计流程。表 1 仅列出 10 余种优化设计子业务示例,并未覆盖所有的子业务集合。因此,非常有必要借助工作流技术实现优化流程的自由定制,提高 MDO 框架的适应性。

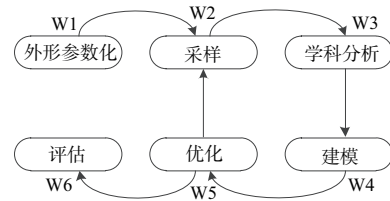


图2 多学科优化时的完整业务流程

表 1 多学科优化设计存在的业务流程举例

序号	业务流	说明
1	W1	只进行外形参数化
2	W2	只进行设计空间的采样操作
3	W3	只进行学科分析操作
4	W4	只进行建模操作
5	W5	只进行优化操作
6	W6	只进行评估操作
7	W1—W2	外形参数化并对设计空间采样
8	W2—W3	采样并进行学科分析
9	W4—W5—W2	建模、优化并生成新样本点
10	W4—W5—W6	建模、优化并对优化后结果进行评估
11	W1—[W2—W3—W4—W5—] <sup>1</sup> * W6	完整流程([ ] <sup>1</sup> * 表示内部的业务链至少执行一次)

## 2 MDO 框架原型系统实现

### 2.1 开发环境

MDO 框架采用的开发工具基本上属于开源或者免费软件。下面逐个进行介绍。

集成开发环境采用 Eclipse (Juno 版)。它是一个开源的、基于 Java 的可扩展开发平台,借助插件机制来构建集成开发环境,已支持 Java、C/C++、Fortran、Python、PHP 等众多语言。

编程语言采用 C++ 和 Python。它们都是面向对象的程序设计语言,其中 C++ 为编译型,而 Python 为解释型的。C++/Python 混合编程已被广泛用于复杂系统的开发实践。Python 版本号为 2.7.5。

图形开发包采用 wxWidgets。它是一款针对桌面端或者移动应用的图形界面开发框架,包含大量的图形用户接口,拥有默认的程序执行方式和事件处理机制。同时,它是完全跨平台的并且具备很好的本地视窗效果。此处采用 2.9.5 版本的 wxWidgets。

数据库服务器采用 MySQL。它是世界上比较流行的开

源关系型数据库,可支持拥有上千万条记录的大型数据,具备较好的可移植性。MDO 框架借助它实现均匀设计、学科分析结果的持久性存储。MySQL 采用的是 5.1.73 社区版。

远程访问采用针对 Python 的 SSH 模块 Paramiko。它是一款免费软件,实现了针对安全远程连接的 SSH2 协议,具备远程访问、文件传输等功能。在此采用的 Paramiko 版本为 1.9.0。

## 2.2 关键功能模块

### 1) 自适应优化设计

自适应优化设计模块能够根据寻优结果自动判断是否进行修正。该过程不需要用户的任何干预性操作;更重要的是,它可以提高得到优化结果的可能性。

以采用代理模型的优化为例来阐述自适应优化设计。整个优化过程包含一个自适应迭代步骤:如果目标寻优后未得到优化解,该模块会根据 EI 修正准则生成新的采样点,对它们再次进行学科分析,并根据新采样点和原采样点的学科分析结果,重新构建代理模型和目标寻优,直到获得满意的优化解为止。关于采用代理模型和 EI (expected improvement) 修正准则的算法细节,请参考孙俊峰等人的研究成果<sup>[15]</sup>,在此不再赘述。

### 2) 目标/约束定义

目标和约束在数学形式上可以非常灵活,但在数值计算时需要遵循某些约定。假设  $\lambda_i (0 \leq i \leq n)$  为优化变量,则目标或者约束  $\varphi = \sum_{i=0}^n c_i \lambda_i$  ( $c_i$  为系数),即将它们定义为优化变量的线性组合。这主要是基于如下两点考虑:一是将其从形式上固定下来,便于优化程序的软件平台化;二是只需要求解并处理优化变量  $\lambda_i$ ,使涉及的优化变量数目大大少于目标和约束个数。

下面以一个简单的例子来说明如何定义目标和约束。假设某优化问题的目标为最大化马赫数 0.6 时的最大升力系数,约束为最大升力系数  $> 0.94$ ,那么可以将该目标和约束组合定义为

$$\begin{cases} o_{bj} = -\text{clmax0d6} \\ c_{on} = \text{clmax0d6} - 0.94 \end{cases}$$

其中 clmax0d6 为优化变量,而等号右侧的数学形式依赖于具体的优化程序。

### 3) 专家系统

专家系统模块实际处理的是优化变量,目前可支持切片型、插值型和定制型三类优化变量。

对切片型优化变量来说,其变量值可以从学科分析计算结果中直接提取或者经过简单整理得到。例如,假设优化变量 clmax0d6 表示马赫数 0.6 时的最大升力系数,那么 clmax0d6 便属于切片型。求解切片型优化变量时,专家系统模块会生成一系列静态的计算状态表;所有状态计算完毕后即可整理计算结果,得到切片型优化变量的值。

## 2.3 使用流程

图 3 描述了 MDO 框架运行时的逻辑流程,即经过项目配置、问题定义、采样、学科分析等必要步骤,然后才能进行建模和优化。下文着重介绍整个 MDO 框架的数据流关系。

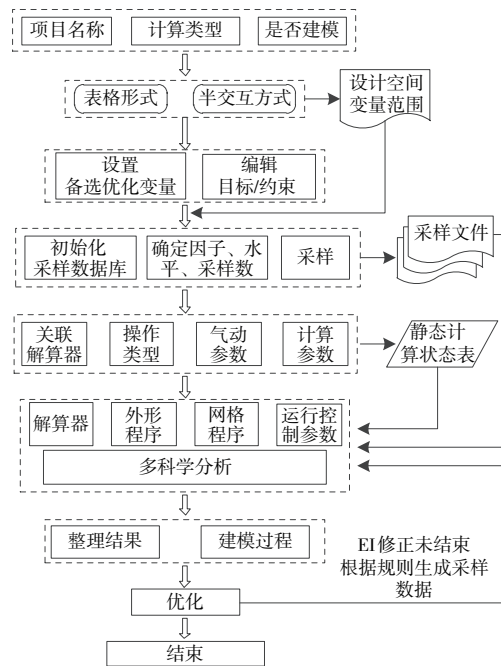


图 3 MDO 框架运行流程

MDO 框架的数据流涉及设计空间变量范围、采样文件、静态计算状态表和修正采样数据等四种数据,其中第一种数据是采样步骤的输入,而后三种是学科分析的输入。

在设计空间定义步骤,MDO 框架以表格形式和半交互方式帮助用户定义设计空间,其最终输出是每个设计变量的范围。

对于所有的设计变量,当在其相应范围内给每个设计变量取值,便形成了一个采样点;依此类推,可以得到规定数量的采样点(即初始采样点集,主要用于学科分析阶段的网格生成步骤)。

在优化变量配置部分,专家系统模块辅助生成“静态”计算状态表,方便多学科分析过程的实现。需要注意的是,在执行多学科分析时,MDO 框架会根据学科分析结果自动生成“动态”计算状态表,从而进行某些特定类型(例如插值型和定制型)的学科分析。

## 2.4 性能测试

为检验 MDO 框架的实际性能,本节基于该优化框架对某航天器外形进行多学科多目标优化设计,对应的优化问题如下式所示:

- 1) 最大化升阻比  
 $\text{Max } C_L/C_D, \text{ when } Ma = 7.0 \text{ and } \alpha = 15.0^\circ,$   
 $\text{subject to: } C_L/C_D > (C_L/C_D)_0$
- 2) 最小化迎风面中心线热流和  
 $\text{Min } \text{heat}, \text{ when } Ma = 7.0 \text{ and } \alpha = 15.0^\circ,$   
 $\text{subject to: } \text{heat} < \text{heat}_0$
- 3) 最大化升力系数  
 $\text{Max } C_L, \text{ when } Ma = 0.2 \text{ and } \alpha = 12.0^\circ,$   
 $\text{subject to: } C_L > C_{L0}$

其中下标 0 代表基准外形。

该航天器的外形由多个部件构成,其中机身是此次优

化重点关注的部位,选取的设计变量为机身头部半径、机身最大宽度、第三段后部上半部高度、第四段长度、机身后部 V 尾切平面起点对应角度、机身后部 V 尾切平面角度和机身座舱起始处角度。针对上述 7 个设计变量,试验设计采用 7 因素 6 水平的均匀设计表  $U_{60}(6^7)$ ,样本数为 60,即对 60 个外形进行学科分析。多目标优化算法的运行参数设置如下:种群规模 400,优化代数 400,交叉概率 0.8,变异概率 0.2。

在进行多学科分析、建模和优化后,可以得到包含 14 个样本的解集。经验证,其中 10 个样本是优化解,它们相对于基准外形的优化效果如图 4 所示。从图中可以看出,整体性能较好的外形为 opt2、opt3 和 opt9,这些外形的 3 个指标性能都提高 2% 以上。对于指标 Heat\_m7a15,外形 opt4、opt8 和 opt10 表现较好,性能都比基准外形提高 8% 以上。对于指标 Cl\_m0d2a12,性能最好的外形为 opt1、opt2 和 opt3,它们都比基准外形的性能提高 5% 以上。因此,设计者可根据实际情况选择自己所需要的优化外形。

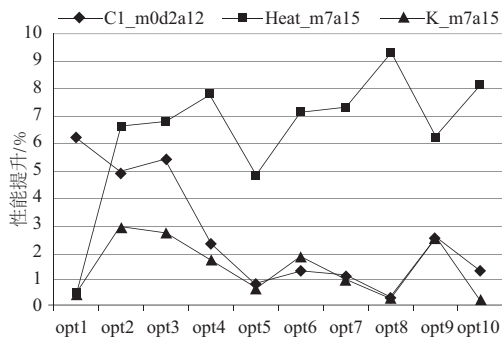


图 4 优化外形相对基本外形的性能提升

对于该航天器外形,MDO 框架得到的优化结果与人工操作的完全相同,但前者具有更高的自动化程度。

### 3 结语

针对国内自主知识产权优化设计框架欠缺的问题,本文基于工作流技术设计实现了一款多学科多目标气动外形优化设计框架。该 MDO 框架能够整合气动力、气动热等学科分析程序,集成各类多目标优化算法、代理模型以及模型参数化技术,支持本地计算和后台大规模集群计算,借助数据库实现关键数据的持久存储,可提高优化设计过程的自动化程度。该 MDO 框架的实现,有助于解决国内优化设计领域自主软件欠缺的问题。

下一步的工作内容包括两个方面:一是升级软件的工

作流引擎;二是利用其他工程算法,进一步对所研制的 MDO 软件进行大规模测试。

#### 参考文献:

- [1] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J. A linear decomposition method for large optimization problems[J]. Blueprint for Development. Acta Anatomica, 1982, 113:56-60.
- [2] 韩虎,曾庆良,孙成通,等.复杂产品虚拟样机协同开发平台设计与实现[J].计算机工程,2009,35(1):260-262,265.
- [3] 赵良臻,王波兴.协同仿真平台中仿真组件的封装技术研究[J].计算机工程,2014,40(9):66-70.
- [4] SLOTNICK J, KHODADOUST A, ALONSO J. CFD vision 2030 study: a path to revolutionary computational aerosciences[R]. [S.I.]: NASA/CR,2014;218178.
- [5] ALLISON D, MORRIS C, SCHETZ J, et al. A multidisciplinary design optimization framework for design studies of an efficient supersonic air vehicle[C]//12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Indianapolis, Indiana, Reston, Virginia:AIAA, 2012.
- [6] GRAY J, MOORE K, NAYLOR B. OpenMDAO: an open source framework for multidisciplinary analysis and optimization[C]//13th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis Optimization Conference, Fort Worth, Texas. Reston, Virginia:AIAA, 2010.
- [7] 谷良贤,龚春林.多学科设计集成环境的模式和应用[J].宇航学报,2004,25(4):459-461,472.
- [8] 王丽芹,王志勇,刘怀勋.导弹系统的多学科设计与优化框架技术研究[J].航空兵器,2008(5):54-56,61.
- [9] 牛文铁,田建伟,王俊强.基于 iSIGHT 的机床整机结构方案设计与集成优化[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(2):120-127.
- [10] 温渊,张大伟,汪自军,等.基于 MDO 的低轨多载荷遥感卫星轨道设计优化[C]//第六届高分辨率对地观测学术年会论文集.成都:[s.n.],2019:480-491.
- [11] 徐兆可,夏健,高宜胜.三维机翼气动结构多学科优化方法[J].航空动力学报,2018,33(5):1065-1075.
- [12] 衣春轮,刘燕斌,曹瑞,等.基于代理模型的高超声速飞行器外形参数优化[J].航空动力学报,2019,34(11):2354-2365.
- [13] 李少波,徐璐.基于工作流的物资调拨管理信息系统研究[J].计算机与网络,2016,42(18):70-72.
- [14] 梁丽勤,王岩.分阶段的云计算 workflow 系统的优化调度算法[J].计算机工程与设计,2019,40(12):3505-3513.
- [15] 孙俊峰,刘刚,江雄,等.基于 Kriging 模型的旋翼翼型优化设计研究[J].空气动力学报,2013,31(4):437-441.

收稿日期:2020-07-10