

面向航空领域的多学科优化系统

杜海^{1,*}, 张睿¹, 崔德刚²

1. 中国航空研究院 前沿技术研究部, 北京 100012

2. 航空工业科学技术委员会, 北京 100012

摘要: 本文简述了面向航空领域的多学科优化系统 SAMOS 的概况和发展历程, 分别从分层体系结构设计方案、系统各功能模块构成、工作流的组织方式及具体实现等方面详细描述了该系统的综合情况。本文对该系统在航空领域中的实际应用进行了介绍, 总结了 SAMOS 系统的技术特点, 验证了系统的有效性和实用性, 为航空领域设计人员提供了一个可操作的优化平台构建方案。

关键词: 多学科优化; 航空; 飞行器设计; 工作流; 优化系统

中图分类号: TP399 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.08.001

随着我国工业、制造业的不断发展, 不同行业基于提升创新能力, 对优化设计技术均提出了迫切的需求, 主要包括从单学科优化向多学科发展; 从小变量向大变量、精细化发展两个方面。具体而言, 优化问题本身就是追求更高目标的再设计问题, 越来越高的优化目标和设计要求使得优化变量的规模逐年增长, 传统的简单优化方法已力不从心, 以航空工业为代表的许多行业都建立了基于计算机技术的现代优化平台^[1,2], 向多学科综合设计和精细设计“要油水”已成为各行业设计制造领域中重要的研究方向之一。空中客车公司花费 30 年开发了多学科、大设计变量综合优化系统 LAGRANGE, 构建了飞机综合优化平台, 为空中客车公司研发世界一流飞机打下基础。与之相应, 我国的航空工业也必须建立具有自主知识产权的优化系统, 为构建自身的创新环境做出努力。

1 概述

由于设计复杂性和结构减重等设计目标的要求, 航空领域中的飞行器设计是对优化需求最多的工作之一。现代飞行器是高度复杂的大系统, 是一个综合了多种学科技术的系统工程^[3]。随着新材料、新技术的发展, 飞行器设计的复杂度和综合性越来越高。与此同时, 设计过程中的优化

工作涉及的学科也越来越多, 包括总体参数、气动力、结构强度、气动弹性和噪声等领域。另一方面, 飞行器设计已从单目标、单学科优化转向多目标、多学科综合优化, 并兼具大设计变量、高计算量的特点, 传统的手工优化方法已很难满足设计目标^[4]。开发自动化工具, 改进现有寻优算法, 构建友好、便捷的优化计算平台, 是解决多学科综合优化的必由之路^[5]。

为了满足飞行器设计过程中的优化需求, 我们自行研发了多学科综合优化平台, 历经多年的开发与完善, 形成了一套面向航空领域的基于敏度分析的遗传算法多学科优化系统 (Sensitivity-Analysis based Multidisciplinary Optimization System, SAMOS)。该系统曾对大量算例进行应用计算, 成功地完成了多项科研任务。

2 SAMOS 发展历程

SAMOS 优化系统由多学科大变量优化核心和高性能并行计算平台组成, 历经三个发展阶段。

第一阶段: 1999—2002 年。SAMOS 优化系统创造性地开发了基于敏度分析的遗传算法, 引入了并行计算方法。当时国内高性能并行计算刚刚起步, SAMOS 采用了 Platform 公司的 LSF 并行计算平台, 将设计变量规模

收稿日期: 2018-05-23; 退修日期: 2018-07-10; 录用日期: 2018-07-15

* 通信作者: Tel.: 010-84936712 E-mail: duhaibuaa@163.com

引用格式: Du Hai, Zhang Rui, Cui Degang. Multidisciplinary optimization system in aircraft design[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (08): 01-06. 杜海, 张睿, 崔德刚. 面向航空领域的多学科优化系统[J]. 航空科学技术, 2018, 29 (08): 01-06.

提高至 3000 个以上,实现了满足方向稳定性的垂尾结构优化,达到了传统优化方法多年无法实现的大变量优化的目标。

第二阶段:2003—2006 年。SAMOS 优化系统使用 BOINC 高性能并行计算平台替代了原有的 LSF 平台。开展了克服飞机“副翼反效”和保证滚转力矩不降低的机翼结构多目标综合优化,经过对 4000 个机翼蒙皮设计变量的优化,实现了优化目标,系统工程化向前迈进一步。

第三阶段:2007 年开始至今。2007 年 12 月~2009 年 2 月,中国和欧洲的科研机构共同开展了欧盟第六框架计划的相关课题,全称为 Bilateral Research and Industrial Development Enhancing and Integrating GRID Enabled Technologies (BRIDGE)。BRIDGE 项目的应用领域包括航空、制药、气象等,其中航空应用的目标是实现一个商用飞机机翼的多学科优化设计,验证了采用基于网格技术的遗传算法解决飞机多学科优化问题的可行性和有效性。在 BRIDGE 项目结束后,引进了比利时 NOESIS 公司适用于网格环境的 Optimus 工作流软件,并联合北京航空航天大学共同开发了 Nova 网格平台,在其基础上进行了遗传算法、代理模型、大规模并行计算等问题的相关研究,发展了优化算法和工作流构建技术。课题组经过国家自然科学基金等课题的研究,实现了十万设计变量的多学科优化,进而完善了 SAMOS 多学科优化系统。

3 现有架构方案

3.1 SAMOS 系统体系结构

SAMOS 优化平台由高性能计算平台与优化核心两大子系统组成,采用“高内聚、低耦合”的分层体系结构,优化系统与求解器分开,通过优化系统调用求解器解决工程计算问题。其中高性能平台子系统包括集群、操作系统、服务层和平台层,优化核心子系统包括优化层和集成层。上述各层又细分为各个子层,各层间以消息传递、共享文件、外部调用等方式进行交互,具体结构如图 1 所示。

SAMOS 多学科优化系统高性能计算平台各层的构成为:(1) 集群层,是优化系统的物理硬件载体,对应实际的物理机。多个物理机节点形成了集群计算资源池,共同提供基础算力。(2) 操作系统层,该层的特点是异构,即 Windows 和 Linux 并存,同类操作系统多版本并存。(3) 服务层,该层承载着业务级的解算功能,具体分为多个通用与专用的服务模块,包括有限元求解、颤振求解、响应面等。(4) 平台层,

包括以 Condor/LSF/openPBS/BOINC 为代表的集群管理软件^[6]、Nova 网格平台、用户集成通用接口等。该层屏蔽了底层的异构环境,以统一的应用程序编程接口 (API) 向上提供服务,保证其上各层对底层服务的透明化调用。平台层同时承担着作业调度的功能,通过集群管理软件进行作业的分发、调度、监控与回收,实现作业级的并行计算,提高计算效率,有效缩短大变量优化问题的计算时间。

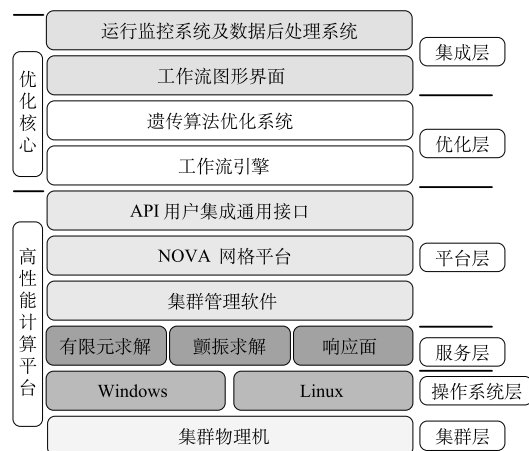


图 1 SAMOS 体系结构

Fig.1 Architecture of SAMOS

SAMOS 多学科优化系统优化核心各层的构成详述如下:(1) 优化层,该层集成了我们自研的基于敏度的遗传算法优化模块,通过敏度求解、“填谷法”等方法较好地解决了设计变量之间的耦合问题,实现十万设计变量的优化。为提高优化过程的自动化程度,减少人工干预,该层引入了工作流引擎,根据优化方案建立工作流模型,进而驱动其中的各个步骤串行或并行执行,实现了无人值守的优化计算。(2) 集成层,该层由工作流图形界面、运行监控系统和后处理系统组成,以桌面客户端和 Web 界面的形式呈现。集成层是 SAMOS 优化系统的顶层,主要功能是进行数据的自动收集、整理与分析,实时显示优化系统的动态指标,为设计人员提供便捷的操作入口,方便进行分析与决策。

从功能模块角度, SAMOS 系统包含计算资源池、网格平台、前处理模块、敏度分析模块、遗传算法模块、工作流模块、响应面模块、稳定性模块、后处理模块和用户操作界面等,具体结构如图 2 所示。

上述 SAMOS 系统的各个功能模块通过统一的用户界面进行操作,使系统具有“高内聚、低耦合”的结构特点,便于进行“插件式”的集成、替换与扩展。

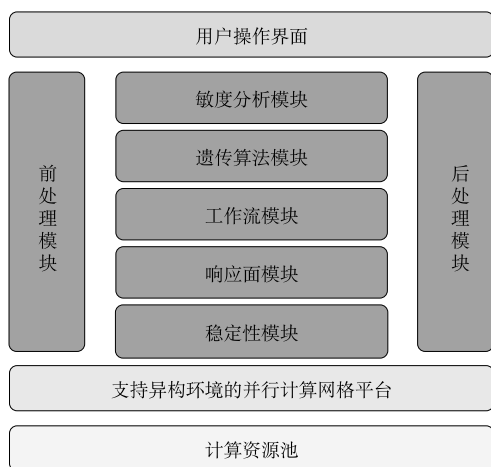


图2 SAMOS 功能模块划分
Fig.2 Function modules of SAMOS

3.2 优化核心与 workflow 构建

3.2.1 优化模块

寻优算法,即通常意义上的优化算法,是一门相对独立的专门学科,可以形成一些通用的方法;但同时又与实际运用到的优化问题密切相关,目前各种常用的优化算法大体框架业已经形成,每一种新算法的提出到证明、检验再到发展和实际应用,均需要行业内的权威学者及工程人员投入大量时间与经验。因此,针对实际工程问题,设计人员往往选择较为成熟的算法框架,再针对实际问题进行改进,如加入额外的算法步骤或者调整算法中的一些参数因子等^[7]。

一类型典型的优化算法是基于进化理论的遗传算法,它所特有的选择、交叉、变异等操作使得优化具有很强的鲁棒性,且遗传算法能够将随机选定的、不依赖于梯度等信息的初始设计进化为更适应设计空间的优化设计,可得到全局优化解。

随着设计变量规模的不断增大,常规优化算法面临的变量耦合问题日益凸显,为解决变量耦合问题,使得优化系统具有解决十万量级设计变量优化问题的能力,设计人员改进了经典遗传算法,引入了灵敏度分析步骤,大幅提高优化效率,缩短寻优时间。灵敏度分析也称为灵敏度分析,是研究与分析一个系统的状态对系统参数敏感程度的方法。在优化方法中引入灵敏度分析来研究原始数据发生变化时最优解的稳定性,并利用其来分析各参数对系统的影响程度,找出有较大影响的设计参数。因此,灵敏度分析被广泛应用于复杂系统的方案评估及优化设计。

飞行器气动、结构、隐身、噪声等多学科优化问题常见设计变量多、搜索空间维度高的情况,导致搜索效率明显降

低以及难度变大等问题。因此,在设计变量规模较大时可以考虑加入灵敏度分析策略来对设计变量筛选分级,进而降低单次搜索空间维度、提高搜索效率。在遗传算法寻优过程中,使用灵敏度分析方法对变量进行分析,并以变量的灵敏度值作为设计参数筛选分级的依据,易于量化设计变量影响程度,缩短优化进程。

3.2.2 求解器与 workflow

SAMOS 多学科优化系统采用开放式架构,不局限于特定专业学科,以外部调用的形式集成第三方求解器,并可实现“插件式”替换。当优化系统用于不同学科时,仅需将目标学科的求解器以命令调用的形式集成在优化 workflow 中,即可通过该求解器进行优化目标的解算操作。目前 SAMOS 系统已集成的求解器有:(1) 大型结构有限元分析软件;(2) 响应面构建与分析软件;(3) 航空结构分析软件;(4) 金属稳定性计算分析软件;(5) 复合材料蜂窝/加筋板/多墙结构稳定性计算软件;(6) 通用矩阵运算求解软件;(7) 气动弹性求解软件;(8) 三维几何外形设计软件。

为使优化工作能够自动进行,减少人工干预,提高优化系统的效率,开发人员引入了 workflow 机制^[8]。SAMOS 优化 workflow 主要描述优化设计的定义与执行过程,主要包括操作步骤、输入输出数据、指令交换、文件传输、优化参数设定与传递和流程控制等操作,其构建过程如图3所示。

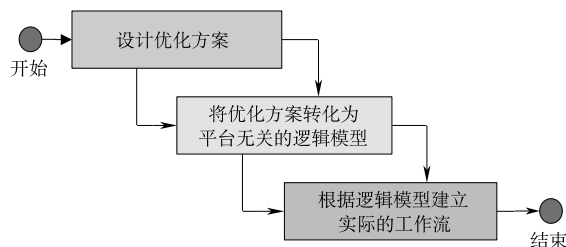


图3 优化设计 workflow 的构建过程
Fig.3 Build the optimization workflow

具体实现方面,SAMOS 系统选用 Optimus 作为 workflow 引擎。Optimus 软件提供了直观的可视化软件界面用于 workflow 建模,业务人员可采用拖拽的形式,灵活添加和删除 workflow 功能模块,确定各模块之间的执行顺序和调用关系,快速构建优化设计 workflow^[9]。Optimus 中的 workflow 模块由如下组件构成:(1) 输入变量及其集合,用于指定优化计算的起始条件、设计变量的初值、外部模块的执行路径等信息。(2) 文件,用于保存优化过程中的中间结果,在各步骤之间传递结构化的数据信息,记录日志和健康状态等信息。(3) 动作,该模块可以执行批处理语句,调用外部程序完成业务

逻辑,是 workflow 引擎的核心部分。(4) 连接,负责建立各模块之间的联系,指定操作顺序和依赖关系,标明控制流和指令流的方向,同时实现在模块之间传递参数的功能。(5) 输出变量及集合,保存优化结果和相应的输出数据,便于后续进一步分析。(6) 第三方案程序抽象,提供专用的交互接口,方便和现有的成熟商业软件进行交互,典型的第三方案程序抽象有 Ansys、CATIA、Matlab 等。(7) 方案抽象,代表另一个 Optimus 工作流的整体,用于实现嵌套双循环的控制结构。具体模型如图 4 所示。在与 SAMOS 优化系统其他层级交

互方面,Optimus 工作流引擎采用集成代理的方式实现:通过在动作模块中集成业务代理,完成跨层级信息的上传下达。目前 Optimus 集成的代理包括集群健康状态监控代理、作业负载监控代理、网格平台作业客户端等。上述这些代理可以看作服务触点,数据和控制信息通过这些触点进行流动,未来也可在这些服务触点处添加控制与审计机制。综上,工作流引擎赋予 SAMOS 优化系统以活力,使该系统实现自动化运行,减轻了工程人员的负担,提高了系统的效率和可用性。

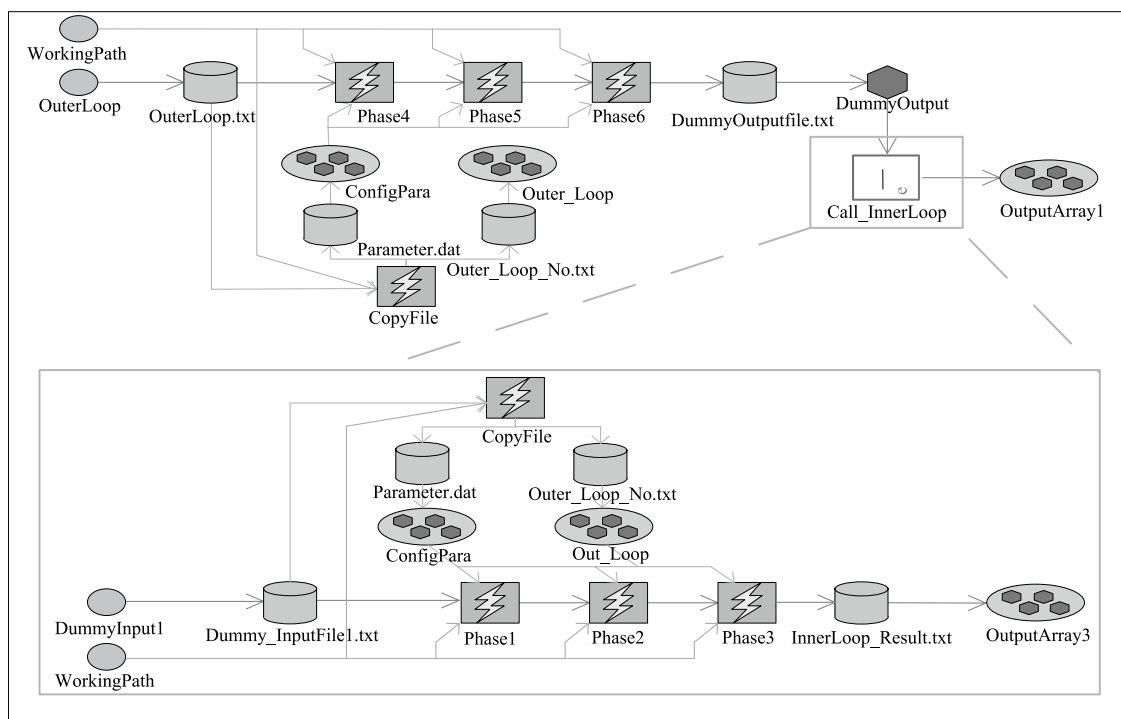


图 4 Optimus 工作流模型
Fig.4 Optimus workflow model

4 典型应用

SAMOS 系统在航空领域的优化设计中得到了充分验证,该优化设计的具体问题是:对于某二维翼型,以最大升阻比为最主要优化目标,兼顾升力系数不降低,阻力系数不增大,低头力矩系数合理降低。优化翼型几何外形如图 5 所示。具体地,多个优化目标可以表述为: $\max\{C_l/C_d\}$, $\max\{C_l\}$, $\min\{C_d\}$, $\min\{C_{my}\}$ 。优化约束条件为:升力系数不低于合理范围^[10]。

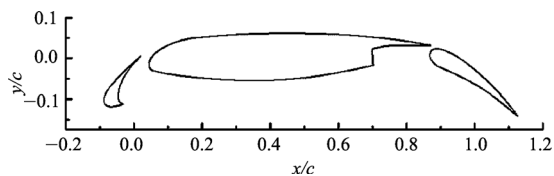


图 5 优化翼型的几何外形
Fig.5 Shape of wing for optimization

本算例中的翼型采用了结构网格划分方式,如图 6 所示。多段翼型网格部件相对较多、整体网格规模大,网格变形效果影响因素复杂,并且优化过程仅涉及增升装置的偏转运动,因此选择采用分块式网格变形的处理方法。这样可以在实现移动前后缘襟翼的同时不影响其他区域网格,只涉及部分网格点的重新计算,满足优化条件,提高解算效率。

按照 SAMOS 优化系统工作流构建方法,设计了面向工程方案的计算独立模型,并转换为平台独立模型和平台特定模型,构建了优化工作流并自动进行计算寻优。

在优化过程中,初始设计状态为原始翼型构型,经过 9 轮外循环(每个外循环嵌套 4 个内循环)优化迭代,调整前后缘襟翼的位置,优化结果如图 7 所示。

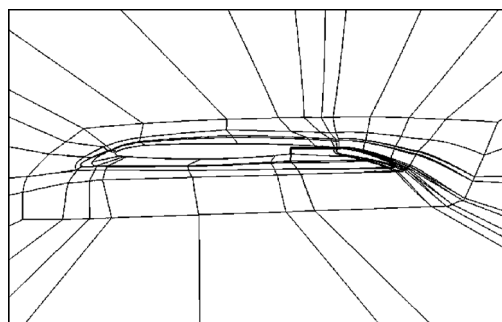


图6 二维翼型结构网格 block 划分示意
Fig.6 Grid block partition of two-dimension wing

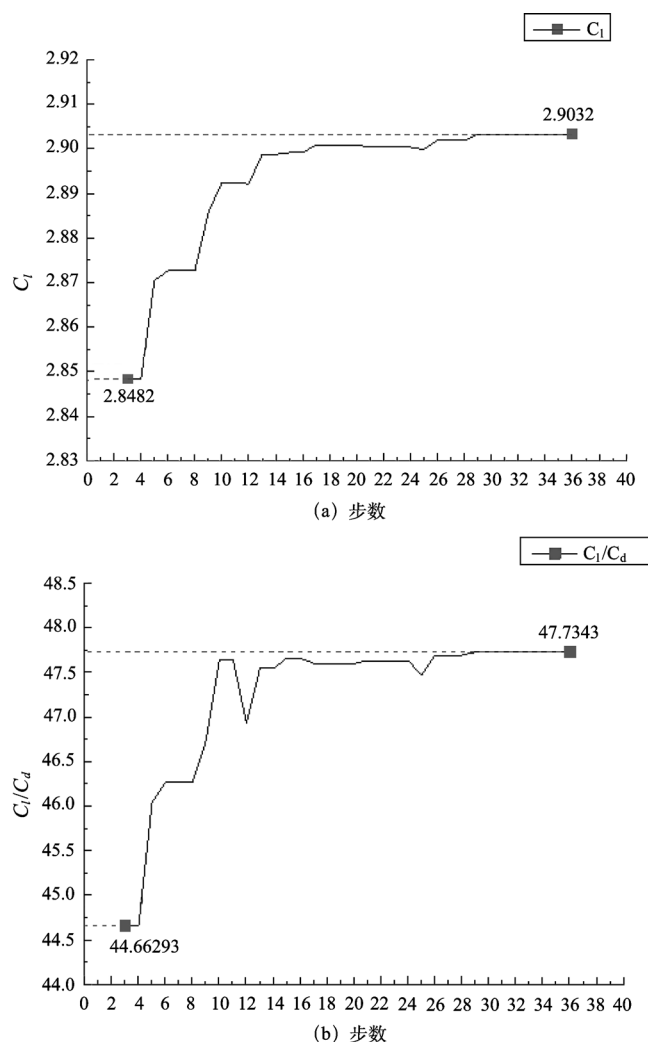


图7 优化过程中升力及升阻比的变化
Fig.7 Changes of C_l and C_l/C_d during optimization

此外, SAMOS 系统还用于某复合材料垂尾铺层优化设计、飞机襟翼与噪声多学科优化设计、复材垂尾铺层稳定性优化设计、飞机型架外形优化设计、复材气动弹性设计剪裁等诸多方面,均取得了良好的效果,充分验证了系统的有效

性和工程实用性。

5 结论

SAMOS 多学科优化系统采用分层结构,集成了计算平台和优化核心,可方便构建优化 workflow,实现不同目标的优化计算。

SAMOS 多学科优化系统的具体技术特点如下:(1) 可方便集成各学科求解器,用以求解不同领域的优化问题。(2) 具有大规模设计变量的优化设计能力,可实现精细化设计。(3) 具有多目标、多学科优化设计能力,可解决复杂优化问题。(4) 具有复杂非线性问题优化设计能力,可解决长求解时间优化问题。(5) 具有复材结构优化设计能力,可满足复材各向异性结构设计需求。

SAMOS 多学科优化系统经过多年的研究与积累,形成了一套特有的优化方法和技术手段,系统采用开放式体系结构,操作简便,用户友好,可有效解决飞行器设计过程中面对的多学科优化问题。

AST

参考文献

- [1] 王锦程,王刚,刘军虎,等. 知识驱动的飞行器快速设计平台构建[J]. 航天工业管理, 2017 (04): 55-57.
Wang Jincheng, Wang Gang, Liu Junhu, et al. Knowledge driven aircraft rapid design platform construction [J]. Aerospace Industry Management, 2017 (04): 55-57. (in Chinese)
- [2] 孙建勋,张立强,陈建江,等. 飞行器总体多学科集成设计平台[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18 (01): 1-8.
Sun Jianxun, Zhang Liqiang, Chen Jianjiang, et al. Integrated design platform of conceptual multidisciplinary for aerocrafts [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18 (01): 1-8. (in Chinese)
- [3] 崔德刚,王玉娟,钱德佩,等. 基于网格的多学科飞机优化技术[J]. 航空制造技术, 2009 (12): 26-31.
Cui Degang, Wang Yujuan, Qian Depei, et al. Grid-based multidisciplinary optimization technology for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009 (12): 26-31. (in Chinese)
- [4] 余雄庆. 飞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 (04): 417-426.
Yu Xiongqing. Multidisciplinary design optimization for aircraft conceptual and preliminary design: Status and directions [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,

- 2008 (04): 417-426. (in Chinese)
- [5] 龙腾, 刘建, 孟令涛. 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.
- Long Teng, Liu Jian, Meng Lingtao. Development of multidisciplinary design optimization technology and its application in aerospace industry [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016 (03): 24-33. (in Chinese)
- [6] 郭绍忠, 黄永忠, 余丽琼. 机群作业管理系统 Condor 综述 [J]. 信息工程大学学报, 2004, 5 (01): 73-76.
- Guo Shaozhong, Huang Yongzhong, Yu Liqiong. Research and analysis on cluster job management system Condor [J]. Journal of Information Engineering University, 2004, 5 (01): 73-76. (in Chinese)
- [7] 郑伟. 多学科设计优化算法及其在飞行器设计中应用 [J]. 科技与企业, 2014 (03): 260.
- Zheng Wei. Multidisciplinary design optimization algorithm and its application in aircraft design [J]. Science-Technology & Enterprise, 2014 (03): 260. (in Chinese)
- [8] 赵瑞东, 陆晶, 时燕. 工作流与工作流管理技术综述 [J]. 科技信息 (科学教研), 2007 (08): 105-107.
- Zhao Ruidong, Lu Jing, Shi Yan. Summary of workflow and workflow management technology [J]. Science & Technology Information, 2007 (08): 105-107. (in Chinese)
- [9] 周健, 姜晓菡, 周喻虹. 基于 OPTIMUS 的控制系统参数优化计算 [J]. 弹箭与制导学报, 2008 (03): 13-14.
- Zhou Jian, Jiang Xiaohan, Zhou Yuhong. Optimization of parameters for control system based on OPTIMUS [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008 (03): 13-14. (in Chinese)
- [10] 刘俊. 基于代理模型的高效气动优化设计方法及应用 [D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- Liu Jun. Efficient surrogate-based optimization method and its application in aerodynamic design [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015. (in Chinese)

作者简介

杜海 (1986-) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞行器多学科优化设计。

Tel: 010-84936712

E-mail: duhaibuaa@163.com

Multidisciplinary Optimization System in Aircraft Design

Du Hai^{1,*}, Zhang Rui¹, Cui Degang²

1. Advanced Technology Research Department of Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100012, China

2. AVIC Science & Technology Committee, Beijing 100012, China

Abstract: This paper described the general situation and development process of multidisciplinary optimization system SAMOS, including scheme of layered architecture, functional modules, organization of the workflow, et al. We introduced the practical application of the system in the field of multidisciplinary optimization design. The technical characteristics of SAMOS were summarized and the validity and availability of the system were verified. It provides an operational optimization platform construction scheme for aircraft multidisciplinary optimization designers.

Key Words: multidisciplinary optimization; aeronautics; aircraft design; workflow; optimization system

Received: 2018-05-23; Revised: 2018-07-10; Accepted: 2018-07-15

*Corresponding author. Tel.: 010-84936712 E-mail: duhaibuaa@163.com