



复杂装备多学科设计优化软件发展与展望

尹泽勇^{1,4}, 杜辉², 李维³, 尤延铨⁴, 侯乃先², 安波², 米栋³, 曾念寅^{4*}, 邵卫东^{2*}

1. 中国航空发动机集团有限公司, 北京 100097

2. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241

3. 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002

4. 厦门大学航空航天学院, 厦门 361102

* E-mail: shilin1225@126.com; zny@xmu.edu.cn

收稿日期: 2026-01-01; 接受日期: 2026-02-11; 网络版发表日期: 2026-03-17

摘要 复杂装备的设计日益呈现高维、多学科、多目标、多约束的特征, 多学科设计优化软件已成为装备自主研制和性能提升的核心技术工具。本文系统梳理了国际多学科设计优化软件的发展现状、国内自主研发平台的技术演进及工程应用实践, 对比了国内外多学科设计优化软件的发展特点, 并从中总结出对我国多学科设计优化技术发展的启示。在此基础上, 本文进一步探讨了未来发展趋势, 包括算法智能化、多学科耦合优化、平台集成化、工程闭环验证及软件产业生态完善, 同时指出了算法复杂性、整机优化效率、跨工具流程自动化、验证闭环及产业生态建设等关键技术挑战。最后, 提出潜在突破方向与发展策略, 强调通过算法创新、平台工程化、数字孪生应用及产业协同, 推进国内多学科设计优化软件在自主可控、工程可行和产业完善方面的持续发展, 为航空、航天、船舶、能源装备等高端制造领域提供技术支撑与创新能力。

关键词 多学科设计优化, 复杂装备, 工程软件, 人工智能

1 引言

随着现代工业的快速发展, 多学科设计优化(multidisciplinary design optimization, MDO)已由学术方法研究逐步转为复杂装备研制与工程化应用的核心能力^[1]。面对气动、结构、热力、控制与工艺等学科在同一系统中相互影响的复杂问题, 传统的单学科设计难以在系统层面把握权衡并产出既高效又可实施的方案。而图1所示的MDO通过并行耦合与协同搜索, 能够在多目标、多约束与不确定性条件下识别系统级最优

或鲁棒解, 这一能力直接关系到装备的性能极限、可靠性、研制周期与总体成本, 因此在国家重大装备建用与高端制造竞争中具有显著的战略价值^[2-4]。

加快推动MDO从方法走向工程实践, 既有日益增长的技术内在需求, 也有产业与政策层面的外生驱动。首先, 复杂装备体系本身的耦合性和多尺度特性, 要求在概念设计阶段同步考虑跨学科影响, 尽可能避免后期高成本的返工^[5]; 其次, 日益增长的轻量化、能效提升与寿命可靠性等工程目标, 要求工程人员将制造约束与运维信息纳入设计过程, 进而把优化范畴延伸至

引用格式: 尹泽勇, 杜辉, 李维, 等. 复杂装备多学科设计优化软件发展与展望. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 473–491

Yin Z Y, Du H, Li W, et al. Development and prospects of multidisciplinary design optimization software for complex engineering systems (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 473–491, doi: 10.1360/SST-2026-0002

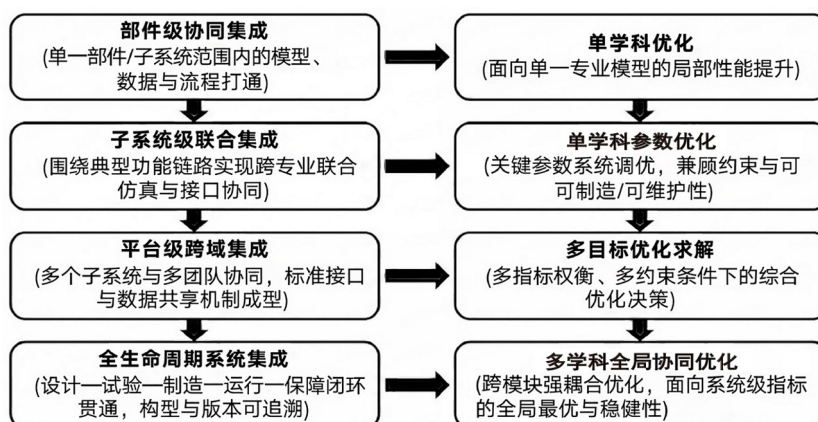


图1 复杂装备MDO技术研究

Figure 1 Research on MDO technology for complex equipment.

制造前的可制造性验证与运行期的性能反馈闭环^[6];再次,产业链国产化和供应链协同的战略目标,促使企业需要可复用的数字化资产以实现跨项目、跨企业的能力沉淀。同时,云算力普及、数字孪生与人工智能技术的发展为高保真仿真与数据驱动近似模型的混合应用提供了可行路径,使得复杂耦合问题在工程周期内可被求解,从而放大了MDO在设计决策与运行优化中的实际影响力^[7~9]。

本文首先从国际视角出发总结MDO软件的技术演进、代表性软件平台与典型应用,并解析欧美等国家在政策支持、产业生态和市场竞争方面形成的体系化优势。其次,回顾我国MDO技术的发展历程与工程实践,重点分析国内在算法能力、平台集成、整机级应用及产业化推进方面的阶段性成果。进一步,通过对照国际,识别国内外MDO技术及软件的发展特点,并从中提炼出对未来发展的战略性启示。在此基础上,从技术趋势、关键挑战及潜在突破方向三个维度提出发展策略,涵盖算法智能化、多学科耦合建模、平台开放集成、数字孪生驱动的工程闭环以及产业生态建设。最后,基于上述分析提出整体性展望,为构建自主可控、工程可行且生态完备的国产MDO软件体系提供系统性的理论依据与路径参考。

2 国外发展现状与趋势

2.1 技术发展与代表性软件平台

总体而言,国际上多学科设计优化软件的发展大

致经历了三个阶段:理论与算法主导的研究阶段、面向工程实现的工具化阶段,以及近年来形成的以平台化和智能化为特征的集成阶段。三个阶段并非完全割裂,而是随着工程规模、求解复杂度和算力条件演进逐步展开,其技术路径在不同阶段不断调整。表1给出了当前工程实践中具有代表性的多学科设计优化软件。需要说明的是,尽管多学科设计优化软件在发展过程中经历了从研究型框架到工程化工具,再到平台化系统的演进,但表1中主要选取的是已在工业界形成广泛应用、以平台化和工程集成为主要特征的主流软件,以突出其在复杂装备工程设计中的实际支撑能力。

在早期阶段,高校与国家实验室是MDO技术发展的主要推动力量。研究重点集中于多目标优化、灵敏度分析、耦合结构以及分解策略等基础问题的数学建模与数值验证。诸如OpenMDAO^[10]、DAKOTA^[11]等研究型框架均在此时期积累了大量多学科设计优化与解耦算法。它们通过模块化组件和并行化求解机制,为气动-结构-推进等复杂耦合问题提供了可重复、可扩展的测试环境,并在方法向工程体系迁移过程中形成了可继承的技术基础。

随着工业界对系统综合性能、研制周期和可靠性要求的提高,MDO开始从方法研究走向工程实践,软件形态逐步由学术原型演变为面向工程的工作流执行工具。代表性产品如ModelCenter^[12]和Isight^[13],强调求解器之间的互操作性、流程自动化及并行调度能力。通过标准化接口,这类工具能够整合计算流体动力学(CFD)、有限元分析(FEA)、系统仿真等异构求解器,

表 1 目前国际上主流的多学科设计优化软件
Table 1 Mainstream multidisciplinary design optimization software worldwide

软件名称	来源/公司	主要特点	优点	缺点
Simcenter HEEDS	Siemens	面向设计空间探索与自动工作流的商用设计探索工具	易上手、支持多算法与自动化、与主流CAE/PLM集成性好; 适合工程团队快速探索设计空间	对超大规模定制求解器或极端自定义流程时灵活性有限; 商业授权成本高
modeFRONTIER	ESTECO	多目标/多学科优化与近似建模、强调过程集成与后处理可视化	强大的代理建模与多目标优化工具箱, 良好的可视化与工业案例积累	高级功能学习曲线较陡; 高级集成功能需要额外配置/插件
OpenMDAO	NASA	开源MDAO框架, 擅长大规模耦合问题与高效导数计算	免费、可扩展、社区与科研支持强; 适合大规模学术/工程问题	需要较强的编程背景(Python)、对非程序员用户不够友好, 前端GUI较少
DAKOTA	Sandia National Labs	面向优化、UQ、灵敏度分析的大型工具包	功能全面, 适合科研/高性能计算环境; 可嵌入现有流程	使用命令行/脚本化, 用户体验不如商业GUI软件; 对工程级集成需额外封装
ModelCenter	Phoenix Integration	强调多工具集成与工作流自动化的MBE/MDO平台	极强的工具互联能力, 适合企业级模型链路自动化与流程复用	商业化产品, 集成配置与维护工作量较大; 授权成本和部署工作需纳入成本考虑
Isight	Dassault Systèmes	面向MDO的流程集成与自动化平台, 支持将CAD/CAE/仿真工具封装为统一流程	与CATIA、SIMULIA、Abaqus等达索生态高度集成, 流程建模直观, 适合复杂工程系统级优化; 支持多种优化算法与DOE方法	商业授权成本高; 对非达索体系工具的深度集成灵活性有限; 在超大规模定制算法与开放性方面弱于开源框架

将原本分散的仿真与分析环节组织为可复用的设计流程, 从而在概念设计阶段实现跨学科的参数探索与多目标权衡. 工程使用需求也推动这些软件在可追溯性、结果表达和工程约束描述方面不断完善, 以满足型号研制与审查体系的要求^[14-17].

进入平台化阶段后, MDO不再仅作为优化工具存在, 而是被嵌入到企业级仿真与产品数据管理体系中. Simcenter^[18]、HyperWorks^[19]、Workbench^[20]等平台通过将优化模块与结构、流体、热力、电磁等分析工具以及PLM数据管理系统进行深度集成, 使模型版本管理、元数据治理和流程审计能够得到系统保障^[21]. 平台化的结果是优化过程可以较早纳入制造约束、成本评估和合规性检查, 从而提高设计方案的可实施性. 同时, 开放式接口体系使第三方求解器得以接入, 逐渐形成以平台为中心的工业软件生态, 推动模型资源和流程模板在项目之间复用.

近年来, 数据驱动与智能化技术的引入进一步改变了MDO的实现模式. 代理模型、降阶建模和主动采样方法在高保真CFD/FEA求解成本受限的场景中得到普遍采用^[22,23], 并已形成较为成熟的“混合优化”流程. 例如, 航空发动机制造商在压气机叶片、换热器等部件的设计中, 通过有限高保真样本构建代理模型, 以不确定性评估样本, 提高了设计空间探索效率^[24-27];

整机厂商则在概念设计阶段实现气动、结构和控制系统的并行耦合优化, 用于耗油率、操稳裕度和结构寿命的联合权衡. 数字孪生技术的应用, 使运行与试验数据能够周期性回流至设计模型, 用于模型修正、参数辨识与阶段性再优化, 使MDO从一次性优化逐步走向周期性闭环^[28,29].

总体而言, 国际MDO的演进呈现出从算法研究到工程工具, 再到面向企业级集成平台的路径. 当前主流平台的发展重点集中在三个方面: 其一, 物理模型与数据驱动模型的协同使用; 其二, 流程可追溯、可验证的工程治理体系; 其三, 对异构算力环境及开放生态的系统化支持.

2.2 国外多学科优化软件的典型应用

在航空航天领域, MDO方法已成为整机厂商与研究机构的常规工具链, 并在概念设计、总体权衡及关键部件优化中形成固定流程. 美国国家航空航天局(NASA)长期投入OpenMDAO的架构建设, 将其作为概念级耦合分析的核心框架^[30]. 在若干航天器推进系统和飞行器总体设计项目中(Hybrid Wing Body^[31]、SLS上级发动机概念评估等^[32]), NASA团队依托OpenMDAO构建气动、推进、质量分配与控制律等模块化子系统, 实现了跨学科灵敏度分析、多目标优化和

不确定性传播的端到端集成。洛克希德·马丁公司在多项载荷投放飞行器和无人机的先进研发项目中, 将OpenMDAO与公司自主研发的气动数据库生成系统深度融合, 构建了一套高效、高精度的多学科协同优化框架。该框架不仅实现了对复杂翼身融合布局的快速参数化建模与气动性能预测, 还支持在设计初期对控制面布局、尺寸及分布进行系统性权衡分析, 全面评估其对飞行稳定性、机动性及任务适应性的影响^[33]。

波音公司自787和737MAX项目以来, 在其概念与初步设计阶段持续采用ModelCenter组织跨学科 workflow, 将CFD、FEA、重量估算工具、气动弹性模块与飞行力学求解器通过统一的流程接口集成, 实现上千参数量级的设计空间探索^[34-37]。在777X的翼型与结构权衡设计中, ModelCenter流程用于并行执行气动优化、结构尺寸设计和载重分配评估, 使方案在概念阶段即获得可追溯的全系统评估记录^[38]。空客则在A350、A320neo系列改型工程中依托Siemens Simcenter构建平台化设计体系, 在PLM环境下实现参数化CAD、仿真数据与优化流程的集中治理, 并在翼梁布局、体系容差分析和结构疲劳评估等环节中实现跨团队共享^[39-41]。

在航天推进领域, 美国Rocketdyne、Blue Origin、Aerojet等公司也采用成熟的MDO工具进行部件级与系统级分析。例如, Blue Origin结合ANSYS Workbench与OptiSlang构建的BE-4液氧甲烷发动机燃烧室的热-结构耦合优化流程, 通过反复迭代实现燃烧室壁厚、冷却通道几何与热负荷之间的设计平衡; Aerojet在火箭发动机涡轮叶片优化中采用OptiStruct进行拓扑与形状优化, 再与流动-传热耦合仿真联动, 完成应力、振动与热梯度的协同设计^[42-44]。

在能源领域, 国外研究机构和企业普遍采用分层MDO架构处理风电、燃气轮机和能源系统规划等问题。美国国家可再生能源实验室(NREL)在大型风电场布局、尾迹相互作用及风机控制策略研究中大量使用DAKOTA, 用于不确定性传播、稳健优化及多场耦合分析^[45]; 其SOWFA与FLORIS平台均通过DAKOTA执行风场级参数优化^[46,47]。丹麦技术大学(DTU)在多级风机叶片的气动-结构耦合分析中, 利用HAWC2与DAKOTA结合开展叶片外形优化与载荷平衡设计。

通用电气(GE)在Haliade-X 12 MW风机研制中, 通

过ANSYS Workbench+OptiSlang的组合实现叶片气动外形、材料铺层和疲劳寿命的联合设计^[48,49], 并采用Siemens Simcenter进行整机系统级优化, 包括塔架高度、变桨控制策略和发电量预测的协同设计^[50]。壳牌与BP在区域能源系统规划中, 借助ModelCenter与内部能源调度平台构建跨能源耦合的MDO流程, 用于完成投资决策分析与运行优化^[51]。

在高端制造领域, MDO的应用重点转向制造约束嵌入与拓扑/形状优化的工程化输出。汽车行业中的多学科设计优化如图2所示, 宝马(BMW)利用Altair HyperWorks开展悬架摇臂、车身连接件等部件的拓扑优化, 并将结果与成形仿真结合, 确保轻量化几何的可制造性; 通用汽车(GM)在电动车平台中采用ANSYS Workbench+OptiSlang进行电池包壳体结构优化, 将冲击、振动、散热等耦合约束纳入统一流程。在航空制造供应链中, Spirit AeroSystems和GKN Aerospace使用HyperWorks完成复合材料翼梁铺层优化, 并通过与增材制造仿真工具(Simufact Additive)联动处理打印方向、残余应力及支撑结构设计^[52-55]。

在金属增材制造领域, 通用电气航空(GE Aviation)在LEAP发动机燃油喷嘴增材制造过程中, 使用Siemens NX+HEEDS构建“设计-优化-制造”的仿真一体化流程, 对喷嘴的流道几何、传热性能与可打印性进行协同优化, 最终将原20个零件整合为1个部件并通过MDO获得可一体化制造的拓扑结构^[56]。罗尔斯·罗伊斯公司运用Altair Inspire与OptiStruct进行支架、涡轮导向件等部件的轻量化设计, 结合金属激光熔化仿真进行工艺校验。

值得注意的是, 多学科设计优化软件并非仅服务于航空航天等高端复杂装备领域, 其方法体系与平台能力近年来已逐步向家电与医疗器械等高端制造业延伸。在家电领域, 以空调、冰箱和洗衣机为代表的产品在能效、噪声、结构强度、热管理与制造成本之间存在显著耦合关系, 设计过程同样呈现多目标、多约束特征。国际家电企业在压缩机结构优化、换热器翅片参数设计及整机系统能效权衡中, 已引入基于MDO的参数化建模与自动化优化流程, 通过热流体-结构-噪声的协同优化, 实现能效提升与振动噪声控制的系统性折中。

在医疗器械领域, 多学科设计优化同样成为复杂系统设计的重要工具。以植入式医疗器械和高端影像

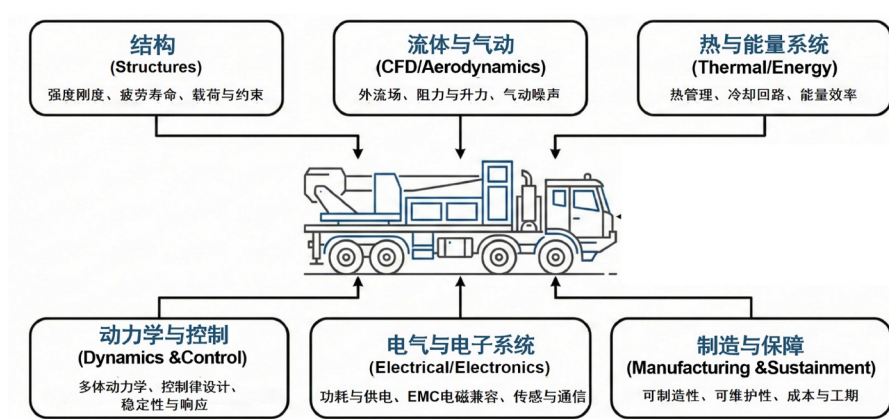


图 2 (网络版彩图)汽车行业的多学科设计优化

Figure 2 (Color online) Multidisciplinary optimization of cars.

设备为例, 其设计需同时满足生物力学性能、结构强度、电磁兼容性、热安全性及人体适配性等多重约束。近年来, 部分国际厂商和研究机构在人工关节、血流导管及磁共振系统结构设计中, 引入多学科设计优化软件对结构几何、电磁场分布与热效应进行联合建模与优化, 从而在保证临床安全性的前提下, 实现器械性能与可靠性的综合提升。

综上, 国外MDO的工程实践呈现出高度工程化、跨工具集成及强数据治理的特征, 不同国家与企业围绕具体任务形成了可复用的软件组合与流程体系, 涵盖从概念设计到制造验证的完整链条。

2.3 政策支持与产业生态

在技术发达国家, MDO软件的工程化推广并非依靠单一投入, 而是与科研资助体系、国防和能源项目采购机制、工业软件标准以及基础设施建设共同作用, 其发展轨迹与具体政策并行推进, 表2总结了国外对MOD软件的支持政策比较。

美国的支持主要体现在“科研资助+工程应用验证”的组合式机制。NASA长期资助OpenMDAO框架的开发, 并要求其在特定航天任务中完成验证, 例如用于推进系统的耦合优化和飞行器概念构型设计。这类项目既支持工具开发, 又要求在工程流程中给出可复现的技术成果, 促使开源工具具备工程级功能。美国国防部(DoD)在装备研制采购中则直接将流程可追溯性、模型验证与不确定性量化写入承包商技术条款, 从而推动洛克希德、波音、诺斯罗普等企业在投标阶

段使用ModelCenter、DAKOTA或自研工具构建跨学科流程。美国能源部(DOE)及其国家实验室体系也在能源系统规划、风电优化、材料成形等领域持续使用并改进DAKOTA, 由此形成“开发-应用-再开发”的循环。

欧盟的政策更强调跨国合作与通用标准建设。在Horizon 2020和Horizon Europe的多个航空与能源项目(如Clean Sky、MAESTRO、MUSIC)中, MDO被要求与金属增材制造、复合材料铺层、数字孪生等验证环节相结合^[57~59]。这些项目不仅资助具体研究任务, 还要求研究机构与主机厂释放部分模型接口、共享材料本构参数和试验验证方案, 从而提升跨机构协作的工具兼容性。欧盟的工业数据与云平台计划(如GAIA-X)进一步推动仿真数据治理、可共享算力平台与工业数据中心建设, 使中小企业能够以较低成本接入高性能计算与专业优化工具^[60]。

英国采取更接近“行业主导的工程试点”策略。Aerospace Technology Institute(ATI)资助的多个项目直接要求“设计-制造-运行”的闭环示范, 例如罗罗公司在复合材料构件设计项目中采用HEEDS与Simcenter绑定其PLM系统, 用于铺层设计、疲劳校核与制造可行性验证^[61]。Innovate UK则通过制造业项目基金推动金属增材制造流程中MDO与工艺仿真的联用, 在政府支持的示范线中明确了接口规范和模型验证流程, 使优化工具必须与制造约束协同工作^[62]。德国产业政策更关注工业4.0体系中的模型管理与工业数据治理, 例如弗劳恩霍夫研究所牵头的多个工业联盟试点中, 将数

表 2 国外对MOD软件的支持政策比较

Table 2 Comparison of overseas support policies for MOD software

国家/地区	政策/计划名	主要支持点	对MDO软件的具体支持形式	典型举措
美国	CHIPS & Science/ DOE/DoD Digital Engineering/NSF TIP	大规模科技资助、国家示范平台 (微电子、数字孪生、HPC)、国防 数字工程采购推动	对高性能计算与数字工程相关研究 给予资金、建设试验台、国防 采购通过合同需求带动软件交付 与标准化	国家实验室与产业合作的 “SMART USA/数字孪生”类研究 所与DoD数字工程战略推动国防 采购采用数字化工具
欧盟	Horizon Europ	研究资助、跨国协作、示范项目 与中试; 聚焦数字化、工业与 空间技术	给予研发经费、示范项目资助、 跨国联合体优先; 支持数字孪生、 仿真工具与MDO相关试验床	企业/科研可通过EU项目获取开 发经费、与跨国工业伙伴建立试 点平台并进入欧盟采购生态
英国	Made Smarter/Advanced Manufacturing Sector Plan/Innovate UK	资助制造业数字化、建造试验 床、产业加速与供需对接	研发补助、试点资金、产业链 协同支持、产学研加速器	中小企业与软件开发者可通过 Made Smarter获得试点资金并接 入High Value Manufacturing Catapult网络
德国	Industrie 4.0	制造业数字化扶持、试点工厂 与标准化推动	政府+产业联合试验室、对中小 企业的技术援助、标准/互操作 性倡议	MDO/仿真厂商可以借助Industrie 4.0生态加入测试床、获得企业级 客户试点与认证机会

值模型视为工业资产, 需要纳入版本管理与数据审计, 进而要求MDO与PLM集成, 而非作为独立工具运行。

总体而言, 各国并非单纯扶持MDO软件本身, 而是通过科研合同、工程试验、接口标准和数据治理要求, 塑造了MDO工具的应用方式与产业生态。这些机制使优化工具从“方法论验证”转入具体的工程流程和供应链体系。

2.4 国际市场格局与竞争态势

全球MDO软件市场呈现出平台型工业软件主导、专业优化工具深度嵌入、大规模算力与智能模型逐步引入的多层合作与竞争格局, 竞争焦点更多集中在完整链条能力而非单项功能。

在顶层平台领域, Dassault Systèmes、Siemens和ANSYS通过3DEXPERIENCE、Simcenter和Multiphysics等体系, 将几何建模、求解器、数据管理和流程验证纳入统一环境^[62-64]。这些平台不仅提供MDO功能, 更强调在PLM体系中进行版本管理、数据追溯及设计验证, 使软件深度绑定企业的设计流程与质量体系。例如, 空客在翼梁与系统布置优化中要求优化结果直接进入PLM流程, 再由制造部门开展可实施性审查; GE航空将喷嘴、导向器等增材制造件的优化完全纳入NX+Simcenter+Teamcenter环境, 避免独立优化产生“无制造路径”的方案。

在专业工作流与优化工具领域, HEEDS、Optimus、ModeFrontier、OptiSLang、OptiStruct等软件占

据主流地位。这些工具的价值主要体现在跨求解器编排、高维优化、稳健性分析以及可复现流程管理, 而非单纯算法性能。例如, 波音和洛马使用ModelCenter维护可复现流程簿, 作为投标与审计材料的一部分^[65,66]。多个风电企业通过DAKOTA执行不确定性传播与稳健布局优化, 而核心CFD/FEA求解由第三方软件完成。这说明流程调度与稳健性处理成为专业优化工具的核心功能^[67-69]。

新兴企业则主要围绕算力与代理模型开展竞争。以Rescale、Parallel Works为代表的平台将HPC以服务形式提供, 并与主流求解器直接对接; 一些新公司(如Neural Concept、Tangent、Monolith)则以ROM、深度几何网络或生成式设计为主要卖点。值得关注的是, 这些新兴企业并未试图替代现有求解器, 而是在设计空间探索与实时推演环节介入, 形成增量式替补。

在竞争方式上, 国际公司普遍采用“软件+数据+算力+工程流程”绑定方式。其渠道优势并非软件功能本身, 而是绑定PLM审计体系、行业认证、模型产权管理和设计责任制度。与此同时, AI与ROM等新技术正在改变工具入口位置, 使优化不再以工作流末端存在, 而可能在几何生成、载荷预测或实时评估阶段介入, 从而动摇传统平台的结构。

综上, 全球MDO软件的竞争不再围绕单一求解器或单一算法, 而是围绕企业级设计生态、工程治理能力与算力资源的整合展开。随着代理模型和云算力的加速成熟, 原有平台体系正在被重新分层, 市场结构

出现了技术窗口期, 但竞争重点仍然落在可验证、可量化、可落地工程能力上, 而非单纯技术指标。

3 国内发展现状与战略布局

3.1 中国MDO软件的技术起点与演进

我国MDO技术的发展历程, 可大体分为理论方法积累、工程化体系建设和平台化产品化三个阶段。最初阶段始于20世纪90年代末至21世纪初, 当时国内的研究重点仍集中在单学科数值方法的突破与验证之上。航空航天、高端装备和能源领域的科研团队在CFD、FEA、热分析和燃烧模拟等方面逐步建立起自主求解能力, 解决了离散方法、求解稳定性、湍流建模、网格生成等一系列基础性问题^[70~74]。与此同时, 工程优化领域也在这一阶段完成了从理论导入到本土化发展的过程。基于梯度的优化技术、敏感性分析方法、序列二次规划策略以及先期的多目标智能优化算法, 逐步被引入典型的结构、气动和热力学设计任务中^[75]。彼时的研究以算法与示范性算例为主, 尚未形成成熟的软件体系, 但为后续跨学科耦合与自动化流程奠定了数学与代码基础。为便于整体把握我国多学科设计优化软件的发展脉络, 本文将其技术演进过程概括为三个阶段: 理论方法积累阶段、工程化体系建设阶段以及平台化与智能化发展阶段, 如图3所示。各阶段在技术目标、软件形态及工程应用深度方面具有明显差异, 但在工程需求牵引下呈现出连续演进关系。

随着国家重大型号工程的系统化推进, 特别是在大型飞机、运载火箭及高性能燃气涡轮发动机等复杂装备领域, 对研发效率与工程一致性的要求显著提升, 我国逐步进入以“工程软件体系化”为特征的发展阶段。在这一阶段, 研究重点不再局限于单一算法或物理模型的可行性验证, 而是转向将分散的计算方法、仿真模型和数据资源整合为可持续运行的软件系统, 实现从“算法可用”到“系统可用”的转变。围绕参数化几何建模、自动化网格生成与更新、求解流程编排、仿真数据管理与版本控制等关键环节, 研究工作逐步以软件架构为核心展开, 推动传统依赖人工脚本的仿真流程向模块化、组件化和流程化方向演进^[76~79]。

在此过程中, 多物理场耦合分析不再以单次计算为目标, 而是通过软件化封装形成可复用的求解模块与接口规范, 使气动-结构、流动-传热、燃烧-气动以

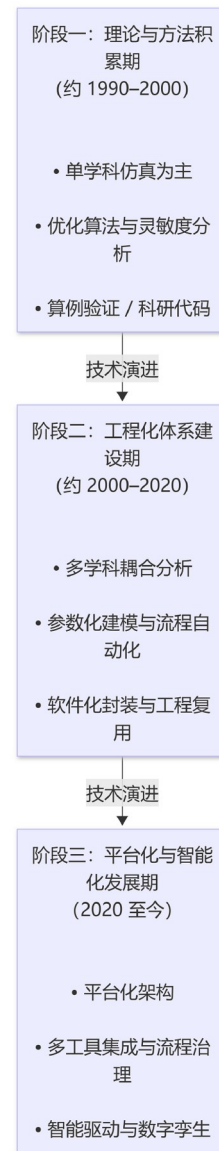


图 3 (网络版彩图)中国MDO软件的技术演进

Figure 3 (Color online) Technological evolution of MDO software in China.

及更复杂的耦合关系能够在统一平台下稳定运行。与此同时, workflow管理思想被系统性引入仿真体系, 通过任务调度引擎、数据接口规范和过程审计机制, 实现多学科分析过程的自动编排、状态追踪与结果回溯, 使复杂工程计算具备可重复、可追溯和可扩展的软件特征。随着上述能力的逐步完善, 我国在气动外形优化、冷却结构设计和轻量化分析等关键领域开始形成面向工程应用的集成化仿真软件体系, 标志着相关技术由“工具级应用”向“工程级软件平台”迈出了实

质性一步。

进入第三阶段后,我国MDO的技术路线显著向体系深度融合和数据驱动特征发展。高保真仿真继续承担关键工况验证和精确物理建模的角色,而中低保真模型与快速求解技术,则逐渐成为设计空间探索和早期决策的重要工具。为了弥补高保真模型在优化循环中的计算瓶颈,我国学界与工业界投入大量力量发展数据驱动的替代模型,包括克里金方法、径向基插值、基于函数逼近的响应面模型以及面向高维场变量的降阶方法^[80~82]。近年来出现的数据同化和模型校准方法,使仿真模型能够吸收试验数据、传感器监测信息与历史验证结果,从而形成早期数字孪生系统^[83]。这种“设计-仿真-测试-运行-反馈”的闭环理念,正在成为我国未来MDO平台演进的重要方向。我国MDO技术发展本身并非孤立进行,而是伴随软件工程体系和国产算力平台的成长。随着高性能计算集群在型号单位内部的大规模部署,我国学界与企业能够在国产处理器和加速平台上进行大规模求解,从而推动多学科耦合仿真从几十维参数扩展到上百维以上的高维决策场景。在软件工程方面,国内团队开始构建模块化框架、标准化求解器接口、统一数据格式、并行调度系统和可审计的工程数据库,这些工作使MDO平台能够满足工程部门关于可靠性、可维护性、可溯源性的要求。需要指出的是,随着MDO从方法研究逐步走向工

程化应用,其核心挑战已不仅在于优化算法本身,还在于多学科模型及优化结果的工程可信性问题。在复杂装备研制环境中,只有经过系统验证与确认(verification and validation, V&V)的模型和流程,才能作为优化迭代与设计决策的依据。因此,V&V体系逐渐成为MDO软件工程化和平台化发展过程中不可或缺的关键支撑环节。在我国MDO技术迈向平台期的同时,如图4所示的模型验证与确认体系(V&V)在型号环境中得到重视,围绕试验数据、仿真基准和不确定性传播建立评估标准,进一步提高了国产MDO工具的可信度^[84,85]。近几年,国内类似如图5所示的中国航发“智周”这类平台化软件的出现,体现了将参数化建模、代理模型技术、自动化流程管理和工程数据库集成到一套体系中的工程能力。此类平台标志着我国MDO技术正在从“研究型工具”迈向“工程型产品”,具备支持复杂装备研发全生命周期的能力。

与国外类似,我国复杂装备MDO软件的发展也呈现出阶段性演进特征:从早期针对单一物理场的求解工具,逐步发展为支持多学科耦合分析的工程软件平台,并进一步向智能框架延伸。目前,我国在多学科建模理论、优化算法方法、工程化流程以及专用软件平台方面已具备一定基础,能够支持复杂装备的设计优化与性能评估。但从整体工程软件体系来看,在通用接口标准、跨行业互操作性、全生命周期不确定性管

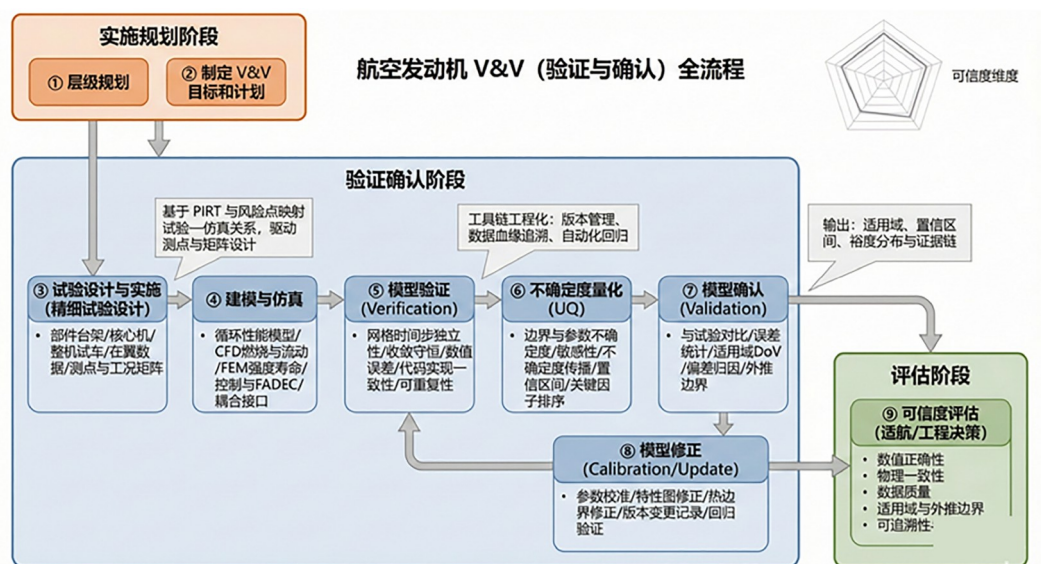


图4 (网络版彩图) 仿真模型V&V业务流程

Figure 4 (Color online) Business workflow for simulation model V&V.

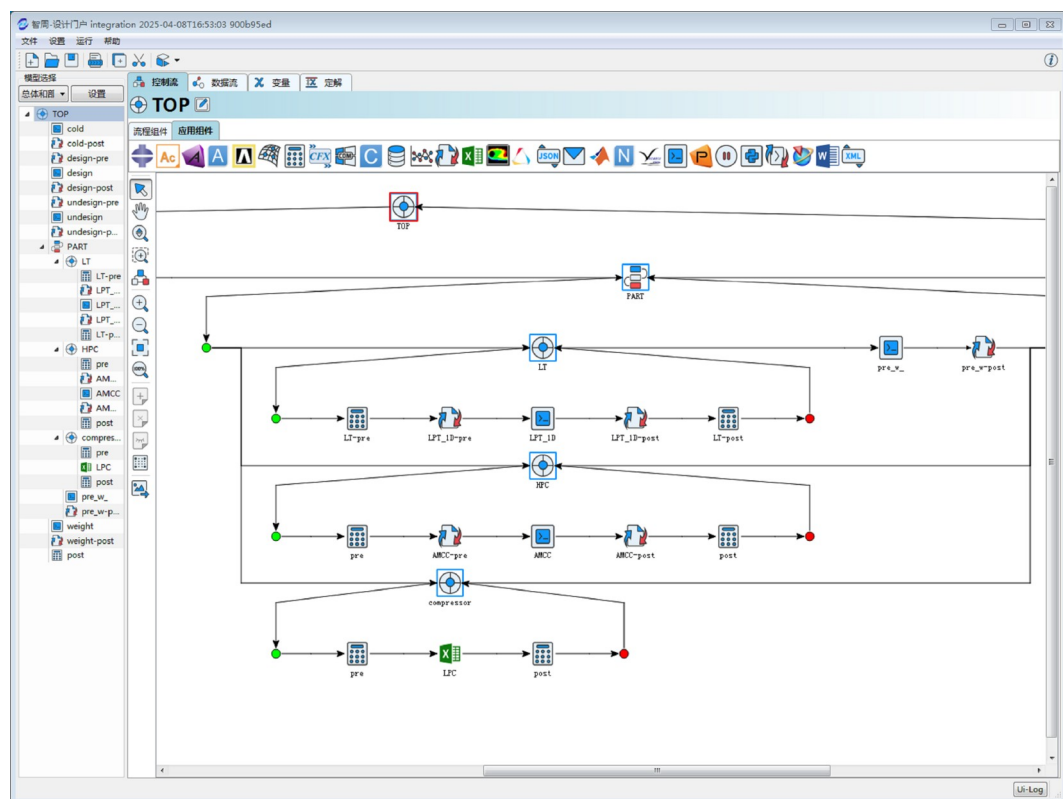


图 5 (网络版彩图)智周软件界面

Figure 5 (Color online) Zhizhou software interface.

理以及工业级软件生态建设等方面仍存在不足,有待进一步完善和提升。

3.2 国内多学科优化软件的典型应用

在航空航天领域,中国航空发动机集团及其下属研发机构是MDO工程应用最早、成果最明确的主体之一^[86~90]。以中国航发商用航空发动机有限公司为例,其研发团队在民用涡扇发动机概念设计与总体方案优化过程中承担关键的多学科多目标优化工作。该单位与中国航发湖南动力机械研究所合作,构建了面向某型大涵道比涡扇发动机的总体MDO平台,集成了热力循环计算、尺寸与质量估算、整机燃油消耗与排放预测、噪声分析及气动-结构耦合计算等模块。该平台采用非支配排序遗传算法执行多目标优化,结果显示涵道比与压气机进口温度对燃油消耗与整机重量具有主导性影响,Pareto解集揭示了典型的性能平衡与折中规律。同时,中国航发湖南动力机械研究所在涡轴发动机的气动布局优化、叶型设计参数敏感性分析及燃油消

耗最优化等方面也取得了重要成果,其研究进一步验证了MDO方法在整机性能提升和设计折中中的有效性,为我国民用航空发动机的多学科协同设计提供了坚实的工程实践基础^[91~95]。

在整机级的自动化设计方面,中国航发于2024年11月在第十五届中国国际航空航天博览会上首次公开发布了“智周”软件。该平台由中国航发商用航空发动机有限责任公司牵头,联合中国航发湖南动力机械研究所和厦门大学开发,以发动机内部气动、燃烧、结构、热传递等多学科耦合为核心,通过高自主度的优化算法和标准化仿真接口,实现跨指标约束下的整机综合权衡。公开资料显示,“智周”早已在涡轴发动机研制中实现工程化应用,某型发动机在引入该平台后整机油耗降低约1.8%,功率提升约2.6%,表明该类自主平台对整机性能优化已经具备实际工程价值。

近年来,随着国内装备制造向低碳化与柔性化方向发展,风电、水电及氢能装备逐渐成为MDO的新应用领域。超大尺寸风电叶片在气动载荷、材料疲劳与

制造工艺之间存在显著冲突, 常规流程难以处理其高维参数空间。国内研究者通过构建跨尺度设计框架, 将外形气动、复合材料铺层与结构稳定性统一建模与优化, 使叶片轻量化水平得到显著提升^[96]。在水轮机及泵水电装备中, 设计流程由经验驱动逐步转向水动-结构联合设计、噪声与振动抑制等多目标策略, 从而兼顾效率与寿命可靠性^[97]。针对氢能装备中的高压储氢瓶、膜电极与流道设计, 也开始应用结构-流动-传热一体化优化, 使MDO获得更广泛的产业适配性^[98]。

总体来看, 航空航天与能源装备成为我国MDO技术走向成熟与工程化的核心驱动力。这些领域不仅对多学科耦合具有天然需求, 也通过长期型号研制和工程闭环验证, 逐步形成适应本土装备体系的数学方法、参数化策略、流程集成技术与验证体系。它们共同构成我国MDO技术从理论研究迈向产品化平台发展的主要实践基础, 也将持续推动复杂装备设计向智能化、协同化方向演进。

3.3 政策支持与产业生态

我国复杂装备MDO软件的发展始终受到国家政策体系和战略性专项工程的强力引导。政策层面的支持不仅为基础理论研究提供了资金保障, 也为技术攻关、软件平台建设和工程应用创造了制度条件。

在国家“十四五”规划和工业软件发展战略中, 工业软件与复杂装备自主研制被明确列为重点方向, 强调要构建自主可控, 面向航空发动机、燃气轮机、高速列车等重大装备的设计软件体系, 推动装备研制的数字化、智能化和全生命周期优化。政策文件中提出的目标涵盖多学科耦合建模、优化算法、协同设计和工程仿真平台, 形成了从基础研究到工程化落地的政策链条, 为MDO技术发展提供了明确的战略定位和实施路径。

在科研资助和专项布局方面, 国家自然科学基金、国家重点研发计划以及国家重大科技专项均将MDO纳入核心资助范围。国家重点研发计划对发动机总体设计、压气机叶片气动与结构耦合、燃烧室多目标优化等方向提供资金, 并强调在高保真仿真与快速优化之间建立可调节的工程方法体系。燃气轮机、高速列车动力系统及核电装备的相关项目也提出了系统级多学科耦合分析、跨学科优化和工程化平台建设的

要求。这些项目不仅提供了研发经费, 更通过技术指标和验收机制, 推动科研机构和企业形成可落地的工程应用能力。

政策导向还体现在人才培养和学科交叉建设上。教育部、科技部等部门联合推动“人工智能+工程设计”等复合型学科建设, 鼓励高校与科研机构培养具备优化算法、仿真建模与工程实践能力的复合型人才。该类人才培养为航空发动机总体设计、燃气轮机叶片拓扑优化及系统级多目标优化提供了人才保障, 也使企业在技术攻关和工程化应用中能够快速吸收新方法并实现技术落地。高校与科研院所通过政策引导, 积极承担多学科建模、算法研发、试验验证和工程仿真任务, 形成了理论与工程应用的紧密耦合。

在产业生态建设方面, 政策和专项也起到了主导推动作用。科研院所所在优化算法、模型降阶和多学科耦合方法研究方面提供技术支持, 高校承担算法创新、数值验证及人才培养任务。燃气轮机、核电装备和高速列车动力系统领域也逐步形成企业主导、科研院所支撑、高校协同的人才和技术联合体。通过政策引导, 这种多层次协作机制逐渐形成覆盖研发、工程应用、验证和人才培养的完整产业链, 实现了从基础理论、算法研发到软件平台及整机工程应用的闭环生态。

此外, 地方政府在国家政策指导下, 通过科技计划、产业示范项目和创新基金, 推动工业软件和MDO技术在地方重大装备制造业落地。例如, 航空航天和动力装备集群在多个省市形成区域示范效应, 带动了软件开发企业、仿真服务机构和应用单位协同发展。这种政策驱动的生态建设不仅加快了国产MDO平台的成熟, 也促进了软件企业、科研单位和装备制造企业形成创新联动机制, 提升了整体自主可控能力。

综上所述, 国家政策通过战略布局、经费投入、人才培养以及产业生态建设, 为我国MDO软件的发展提供了全方位支撑。政策保障了自主平台研发和国产高性能计算环境的适配, 重大项目推动了工程化落地, 产业生态的形成则确保了技术成果能够快速转化为工程实践。这种多层次、多维度的支持体系, 使我国复杂装备MDO技术在理论研究、方法创新、平台建设和工程应用各环节呈现协同发展态势, 为航空航天、能源装备及高端制造领域的数字化设计和智能化优化奠定了坚实基础。

4 中外MDO软件典型特征对比分析

4.1 国际主流MDO软件特征

如前文所述,国际航空发动机领域的MDO软件体系经历了从工具集成、流程自动化到模型融合与智能化的发展路径,其核心特征是面向整机研制的流程标准化和跨学科耦合能力的系统化。目前国际MDO平台通常以模块化架构为基础,将参数化几何建模、网格生成、仿真求解、代理模型构建、全局与局部优化算法等功能按统一框架组织,使得各模块能够在流水线式流程中自动衔接。其关键技术特征包括:一是流程驱动的设计思想,即将发动机各子系统的仿真分析抽象为可重用节点,通过流程编排形成可视化的设计任务链;二是模型驱动的设计思想,即通过高保真仿真模型与降阶模型的结合,实现从概念设计到多工况优化的连续分析能力;三是数据库驱动的系统思想,即仿真数据统一管理、关联追踪和质量控制,使设计过程具备可审计性和可追溯性。

国际MDO体系的另一个显著特征是智能化与自动化程度不断提高^[99-102]。例如广泛应用的多保真建模方法、主动学习的样本自适应选取策略、代理模型精度自动评估机制等,使平台能够在设计空间大、变量多、工况复杂的场景下仍然保持稳定的优化效率。总体而言,国际主流MDO软件体系呈现出高度集成、数据闭环、智能驱动、流程透明等特征,逐步形成从单机到整机数字工程链的完整解决方案。

4.2 国内主流MDO软件特征

由于国有经济在我国市场中的重要地位,国内航

空发动机MDO软件建设形成了与国际体系不同的发展逻辑,其特点是紧密围绕型号研发的工程需求推动软件化进程,通过任务牵引逐步构建专业工具集成、跨学科协同设计和多目标优化求解能力。当前国内MDO软件通常以工程可用性和设计环节落地为核心导向,强调工具链与型号设计流程的高度适配性,注重满足复杂工况下的分析可靠性、仿真稳定性以及设计流程的工程闭环。

从架构特征来看,国内MDO软件在多学科仿真工具集成、参数化几何建模、优化算法库以及流程可视化等方面已经形成体系化实现路径。在工具集成方面,以“智周”为代表的国内平台普遍具备对主流CFD、FEA、传热和燃烧仿真软件的标准化耦合能力,支持基于几何参数、工况参数和边界条件的自动化驱动;在流程编排方面,多采用图形化流程链方式,实现任务链的构建、节点监控以及状态追踪;在优化求解方面,支持多目标、多约束、多工况的求解模式,能够通过遗传算法、代理模型、梯度方法等组成多策略优化框架,以兼顾搜索能力与局部精细化需求。

在软件工程实践中,国内MDO体系还展现出鲜明的工程取向和科研取向并行发展的特点。工程取向强调在型号周期中支撑几何迭代、系统校核、性能评估、结构优化等关键流程,注重计算效率、数据一致性和可重复性;科研取向则注重先进算法的引入,例如多保真建模、神经网络代理模型、自适应DOE采样方法、基于物理先验的降阶技术等,为未来更复杂的跨系统跨学科优化奠定算法基础。

表3中给出了国内外主流软件特征对比,可以发现

表 3 国内外主流软件特征对比

Table 3 Comparison of key features of mainstream domestic and international software

对比维度	国际主流软件(以Isight、Simcenter、OpenMDAO等为主)	国内代表软件(以智周等为主)
架构设计	以流程驱动为核心的MDO平台架构,将CAD/CAE/仿真工具封装为统一工作流;与CATIA、Abaqus等深度集成	面向型号任务的平台化架构,聚焦复杂装备多学科耦合,强调与既有仿真工具链的工程适配;兼容国内外主流软硬件平台,具备高度可扩展性
算法能力	内置DOE、多目标优化(如NSGA-II)、梯度法及代理模型,支持多算法组合与并行执行	以工程可用性为导向,支持多目标智能优化与代理模型及DOE等,算法配置随需求灵活调整
集成性	支持多学科、多软件的标准化流程集成,接口成熟,跨工具互操作能力强	重点集成气动、燃烧、结构、传热等核心学科工具,支持用户自定义二次开发集成,跨行业通用性仍在逐步拓展
工程化案例	公开工程案例显示,通过流程自动化与优化集成,可使设计周期缩短约30%~50%,显著降低人工干预	公开工程应用表明,引入“智周”后,某型涡轴发动机整机油耗降低约1.8%、功率提升约2.6%
软件生态	商业化程度高,形成稳定的软件、用户与工程服务生态,全球应用广泛	以重大型号与工程任务牵引为主,用户与产业生态处于持续建设阶段

国内MDO软件体系的形成路径更加面向实际工程问题驱动,在工具集成、流程工程化和优化求解方面不断拓展;而国外体系则在长期积累基础上形成高度模块化、标准化、智能化的平台结构。两者在发展方向上趋同,均朝向高保真仿真融合、全流程自动化、智能决策支持等方向演进,但国内体系更强调对型号任务的快速适应性与工程闭环能力,其演进模式在未来复杂装备研发体系内具有明显的应用价值和独特优势。

5 挑战与展望

5.1 技术发展趋势

未来复杂装备MDO软件的发展,将呈现出高度智能化、集成化与工程闭环化的趋势。在算法层面,传统的梯度优化、响应面方法和多目标优化将与人工智能技术深度融合,尤其是深度学习、强化学习、高斯过程及神经网络代理模型的应用将成为常态。这类数据驱动与模型驱动相结合的优化方法能够在高维、多目标、多约束条件下实现快速收敛,提升复杂装备整机设计效率与优化精度,同时增强在不确定性环境下的鲁棒性和可靠性。此外,多尺度、多物理场、多工况的耦合建模能力将进一步强化,使软件能够覆盖航空发动机、燃气轮机、航天器及高端能源装备的整机级优化需求。

在平台集成层面,未来MDO软件将更加模块化、开放化和可扩展,实现跨学科、跨工具、跨算力环境的高度融合。设计人员将能够在统一平台内调用CFD、FEA、热力、声学、结构及系统仿真工具,并结合高性能计算和云计算资源,完成整机级多工况、多参数优化问题。这种集成化趋势不仅提高了设计迭代效率,也为不同学科、不同工况和不同型号装备的快速适配提供了可能。此外,平台在数据管理、流程自动化、结果可视化及工程知识库建设方面的能力将成为未来软件核心竞争力之一。

工程应用方面,MDO软件将实现从概念设计、参数化建模、优化求解到物理验证的全流程闭环化。数字孪生和虚拟试验技术将与优化算法深度结合,使设计方案在虚拟环境中即可进行多工况、多学科、多约束的性能预测和优化,减少实际试验成本,提高设计可靠性。同时,基于历史优化案例和工程数据的知识库,

将逐渐支撑经验驱动与数据驱动的混合设计方法,使新型号装备设计可快速生成初始优化方案,进一步加速装备研制周期。

在产业生态与支撑体系方面,未来发展趋势将强调开放协同与可持续性。核心软件开发企业、科研机构、高校及算力资源提供方将形成深度协作网络,实现算法创新、平台开发、工程应用、算力支撑及人才培养的全链条生态闭环。开放化的生态环境将促进方法共享、工程案例积累和跨行业推广,推动MDO平台在自主可控性、通用性及工程应用能力上不断提升。同时,标准化接口、模块化流程和统一的数据管理体系将成为产业竞争力的重要标志,为复杂装备全生命周期设计优化提供系统保障。

5.2 关键技术与工程挑战

从当前的发展趋势来看,MDO优化正从以独立仿真为主体的离线工具,逐步过渡到服务于产品全生命周期的数字化基础设施。随着材料行为、制造工艺、控制系统与服役退化等因素逐渐进入设计阶段,MDO所承担的任务不再局限于几何参数或单一性能指标的搜索,而是面向跨尺度、跨阶段、跨部门的数据协调。这一扩展并非简单增加优化变量数量,而是使设计流程本身变成一个动态系统。因此,未来面临的挑战更接近体系协同问题,而非单项技术欠缺。

在这种趋势下,跨尺度与跨保真模型如何协同工作成为首要难题。如前文所述,现有实践普遍依赖“高保真验证、低保真探索”的经验做法,但随着制造约束、材料退化和运行状态被纳入优化变量,这种做法的局限逐渐显现:不同尺度模型涉及不同的变量定义方式、数值稳定性特征和建模假设,很难在同一优化循环中取得一致作用。例如用于疲劳寿命估计的材料模型,其时间尺度远长于气动载荷计算^[103];用于制造成形分析的热-力耦合模型,其变量与结构尺寸优化变量并不对应。如果缺乏对模型贡献度、误差传播与模型切换条件的统一描述,优化结果可能在不同阶段出现不可预期的偏移。因此,更关键的不是构建更高保真的单一模型,而是建立能够管理多尺度模型协同关系的设计规则与软件机制,使模型间的贡献、衔接与置信度能够被解释与控制,而不是依靠工程经验调节。

与此同时,随着数据驱动模型越来越多地参与优化,模型可信化已经成为影响工程采纳的决定性因素。

代理模型、降阶模型和机器学习模型虽然显著降低了优化迭代成本,但其适用范围往往取决于训练数据的覆盖性与物理一致性。一旦工程对象发生几何尺度变化或运行工况跨越数据分布范围,模型预测便可能失效。目前的研究多关注精度提升,而对模型可靠性的界定、置信区间的量化和偏差校正的策略仍缺乏工程化的实现方式。如果未来的MDO平台无法对数据模型的使用范围、有效性和更新机制加以控制,那么数据模型将很难承担长期设计循环中的实际决策任务。因此,数据驱动能力与其说是计算加速工具,倒不如说是一个需要与物理模型并行管理以及交互沟通的“第二建模体系”,其工程可信度必须通过校准、辨识与风险约束机制加以保障^[104]。

值得关注的是,当MDO逐渐介入制造验证、试验计划与运行维护决策时,流程治理层面也必须做出相应的修改。优化结果要真正进入型号研制环节,必须能够被追溯、被版本化、被审查,并且能够被制造部门和试验部门复检。如果数据结构不统一、元数据不规范、模型无法审计,那么优化结果即便在局部试验中有效,也无法成为设计更改的依据。换言之,在未来的工程实践中,MDO不仅是计算工具,其本身也是工程文档体系的一部分,需要与PLM系统、试验数据库、制造仿真平台共享一致的数据语义和验证规则。这种治理要求强调的并不是数学算法,而是提升软件平台对工程责任、数据权限与结果可用性的支撑。

最后,随着本地集群、国产处理器平台、云端计算与专用加速设备共同成为设计资源,优化与仿真任务本身需要具备算力感知能力。未来的MDO平台不再仅依赖更快的硬件或更多的计算节点,而是必须在不同阶段自动选择合适的计算策略。例如,在全局搜索阶段采用更快速的低保真模型,在关键验证阶段集中调用高保真模型,在模型训练阶段或数据同化阶段迁移至专用加速平台,并在整个过程中保持计算结果的一致性与可复查性。只有当计算资源调度被视为设计过程中的一项工程行为,而不是后台黑箱执行,MDO才可能适应复杂装备设计的迭代需求。

由此可见,未来MDO的挑战来自设计体系的扩展。跨尺度模型需要以协同方式定义,不确定模型需要以可信机制管理,优化流程必须能够进入工程治理体系,算力调度需要从资源调用转向策略设计。因此未来真正的突破将来源于模型理论、软件架构、数据

规制与工程验证的共同推进,而不是某个单项技术的孤立跨越。

5.3 潜在突破方向与发展策略

针对复杂装备MDO软件未来的发展趋势以及当前的差距态势,未来的发展策略应围绕算法创新、平台集成、工程闭环和产业生态四个维度展开,明确潜在突破方向。

首先,在算法与建模方面,应重点发展面向高维、多目标、多约束及多学科耦合问题的智能优化方法。通过引入深度学习、强化学习、图神经网络、高斯过程回归及智能代理模型等人工智能技术,软件能够在大幅降低计算成本的同时提升全局搜索能力和优化收敛速度。与此同时,应加强基于人工智能的不确定性优化与鲁棒性设计方法研究,使复杂装备在多工况、多参数及非线性耦合条件下能够实现可靠性能优化。借助多尺度、多物理场耦合建模与数据驱动方法,人工智能可实现气动、结构、热力、声学及材料行为的协同预测与优化,从而为整机级设计提供更加精确、高效且自适应的决策支持。

其次,在平台集成与工程化方面,应以模块化、开放化和标准化为核心。平台需要实现跨学科、跨工具、跨算力的统一集成,使不同仿真软件和优化模块能够无缝协作,同时支持高性能计算和云计算环境下的大规模并行计算。流程自动化与工程化能力的提升,将大幅缩短设计迭代周期,减少人工干预,提高设计效率和可靠性。此外,统一的数据接口、模型标准和版本管理体系的建设,将有助于整合不同学科和不同单位的设计数据,形成可复用的优化知识库。

第三,在工程应用闭环方面,应着力构建虚拟仿真、优化求解和物理验证的全流程闭环体系。通过数字孪生技术,将优化计算结果与整机试验、台架测试及使用验证相结合,实现设计方案的实时评估和反馈迭代。典型装备的工程案例积累,将为优化方法的迁移性和通用性提供基础支持,同时推动多型号、多工况整机优化在实际研制中的可行性和可靠性。

第四,在产业生态与支撑体系方面,应构建覆盖算法研发、平台开发、工程应用、算力支撑及人才培养的完整产业链。通过企业、科研院所、高校及算力平台的协同合作,形成开放共享、长期可持续的创新生态。同时,注重复合型、多学科人才的培养,提升算法

研究、平台开发、工程应用和算力资源整合能力, 为技术迭代和工程落地提供人力保障。政策和专项引导也将发挥重要作用, 通过资金、标准和基础设施支持, 推动国产MDO平台在自主可控、工程应用能力和产业生态完整性方面快速发展。

综合来看, 我国未来MDO软件发展的潜在突破方向包括: 算法智能化与耦合优化能力提升、平台集成化与工程化流程优化、工程应用闭环建设与数字孪生融合以及产业生态完善与人才培养体系建设。通过这些策略的协同推进, 可有效缩小与国际各方面最先进水平的差距, 实现复杂装备研制的自主创新、数字化和高效化目标, 为航空航天、能源装备及高端制造领域提供核心技术支撑。

6 结论

本综述系统分析了复杂装备MDO软件的国际发

展、国内现状及未来趋势。研究表明, 国内平台在算法深度、多学科耦合能力、整机级多目标优化和工程闭环应用方面与国外平台持平, 而国外平台在整机优化效率、智能代理模型工程化应用以及跨工具流程自动化方面有一定领先优势。

目前国内已经在航空发动机、燃气轮机及船舶车辆等装备优化中取得阶段性成果, 但多工况变几何优化、工程闭环建设及产业生态完整性仍需提升。未来发展应聚焦算法智能化、多学科耦合能力提升、平台集成化及流程自动化建设、工程闭环体系完善, 以及产业生态和人才培养体系建设。

总体来看, 复杂装备MDO软件的发展既是技术创新的核心驱动力, 也是装备研制数字化、智能化的重要支撑。通过算法、平台、工程和产业生态的协同推进, 我国有望在不长时期内建立自主可控、工程可行、产业完善的MDO软件体系, 为高端装备设计与制造提供持续技术支撑和创新能力。

参考文献

- 1 Yin Z Y, Mi D, Zhang L Z, et al. Multidisciplinary design optimization methods for aero-propulsion systems at the whole-engine level (in Chinese). *J Aerosp Power*, 2022, 37: 2025–2045 [尹泽勇, 米栋, 张立章, 等. 航空动力系统整机多学科设计优化方法. *航空动力学报*, 2022, 37: 2025–2045]
- 2 Papageorgiou A, Tarkian M, Amadori K, et al. Multidisciplinary design optimization of aerial vehicles: A review of recent advancements. *Int J Aerosp Eng*, 2018, 2018: 4258020
- 3 Ghadge R, Ghorpade R, Joshi S. Multi-disciplinary design optimization of composite structures: A review. *Compos Struct*, 2022, 280: 114875
- 4 Yin Z Y, Mi D, Wu L Q, et al. Research on multidisciplinary design optimization technology for aero-engines (in Chinese). *Eng Sci*, 2007, 9: 1–10 [尹泽勇, 米栋, 吴立强, 等. 航空发动机多学科设计优化技术研究. *中国工程科学*, 2007, 9: 1–10]
- 5 Li K M, Dong D Y, Liu Y, et al. Application of digital mock-up in technical training for complex equipment systems and analysis of future development trends (in Chinese). *Digital Transform*, 2025, 2: 109–115 [李可民, 董道远, 刘洋, 等. 数字样机在复杂装备系统技术培训中的应用及其未来发展趋势分析. *数字化转型*, 2025, 2: 109–115]
- 6 Wang F L, Liu K, Tong M B, et al. Reliability analysis of fatigue life for multi-site damage structures in aircraft (in Chinese). *J Jinling Inst Technol*, 2025, 41: 52–60 [王芳丽, 刘凯, 童明波, 等. 飞机多部位损伤结构疲劳寿命可靠性分析. *金陵科技学院学报*, 2025, 41: 52–60]
- 7 San O, Rasheed A, Kvamsdal T. Hybrid analysis and modeling, eclecticism, and multifidelity computing toward digital twin revolution. *GAMM-Mitteilungen*, 2021, 44: e202100007
- 8 Alghamdi W Y, Alshamrani R M, Aloufi R K, et al. Exploring the synergy between digital twin technology and artificial intelligence: A comprehensive survey. *Int J Adv Comput Sci Appl*, 2025, 16: 3
- 9 Hafeez M A, Procacci A, Coussement A, et al. Challenges and opportunities for the application of digital twins in hard-to-abate industries: A review. *Resour Conserv Recycl*, 2024, 209: 107796
- 10 Gray J S, Hwang J T, Martins J R R A, et al. OpenMDAO: An open-source framework for multidisciplinary design, analysis, and optimization. *Struct Multidisc Optim*, 2019, 59: 1075–1104
- 11 Eldred M S, Bohnhoff W J, Hart W E. DAKOTA, A multilevel parallel object-oriented framework for design optimization, parameter estimation, sensitivity analysis, and uncertainty quantification. Sandia National Labs Report, No. SAND99-0000, 1999

- 12 Ko A, Keel W, Beale J. ModelCenter MBSE for OpenMBEE: MBSE analysis integration for distributed development. In: AIAA AVIATION 2022 Forum. 2022. 3235
- 13 Koch P N, Evans J P, Powell D. Interdigitation for effective design space exploration using iSIGHT. *Struct Multidisc Optim*, 2002, 23: 111–126
- 14 Cignoni G A. Reporting about the Mod software process. In: European Workshop on Software Process Technology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. 242–245
- 15 Viana F A C, Simpson T W, Balabanov V, et al. Special section on multidisciplinary design optimization: Metamodeling in multidisciplinary design optimization: How far have we really come? *AIAA J*, 2014, 52: 670–690
- 16 Simpson T, Toropov V, Balabanov V, et al. Design and analysis of computer experiments in multidisciplinary design optimization: A review of how far we have come- or not. In: 12th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. 2008. 5802
- 17 Benaouali A, Kachel S. Multidisciplinary design optimization of aircraft wing using commercial software integration. *Aerosp Sci Tech*, 2019, 92: 766–776
- 18 Irimia C, Grovu M, Sirbu G M, et al. The modeling and simulation of an Electric Vehicle based on Simcenter Amesim platform. In: 2019 Electric Vehicles International Conference (EV). IEEE, 2019. 1–6
- 19 Meyghani B, Awang M B, Teimouri R. Prediction of the temperature behaviour during friction stir welding (FSW) using Hyperworks®. In: Awang M, Emamian S S, eds. *Advances in Material Science and Engineering: Selected articles from ICMPE 2020*. Singapore: Springer, 2021. 119–130
- 20 Chen X, Liu Y. *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. Boca Raton: CRC Press, 2018
- 21 Zhang S, Tang Y, Zou Y, et al. Optimization of architectural design and construction with integrated BIM and PLM methodologies. *Sci Rep*, 2024, 14: 26153
- 22 Mosca C, D'Amico F. Data-driven reduced-order models for multidisciplinary design optimization process. In: Data-Driven Intelligence. eCAADe 2024: Proceedings of the 42nd Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe. University of Cyprus, Department of Architecture, 2024. 499–508
- 23 Leng J, Wang Z, Huang W, et al. Multidisciplinary design optimization processes for efficiency improvement of aircraft: State-of-the-art review. *Int J Aeronaut Space Sci*, 2025, 26: 2020–2042
- 24 Poursaeidi E, Javadi Sigaroodi M, Aienerravaie M. Failure investigation of fatigue crack initiation and propagation in compressor blade. *Eng Fail Anal*, 2024, 162: 108370
- 25 Pytko J, Jóźwik J, Tofil A, et al. Identification of fatigue wear of compressor rotor blade of a general electric J85 turbojet engine. In: 2024 11th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). IEEE, 2024. 361–365
- 26 Gerengl M, Polat F. Structural and thermal analysis of F class gas turbine compressor blade. *Duzce Univ J Sci Technol*, 2022, 10: 1045–1066
- 27 Blinov V L, Zubkov I S, Bogdanets S V, et al. Studies of erosive wear of the blading in axial compressors of gas turbines. *Therm Eng*, 2023, 70: 430–442
- 28 Zorchenko N V, Tyupina T G, Parshutin M E. Technologies used by general electric to create digital twins for energy industry. *Power Technol Eng*, 2024, 58: 521–526
- 29 Fukawa N, Rindfleisch A. Enhancing innovation via the digital twin. *J Product Innov Manag*, 2023, 40: 391–406
- 30 Rösmann C, Feiten W, Wösch T, et al. Efficient trajectory optimization using a sparse model. In: 2013 European Conference on Mobile Robots. IEEE, 2013. 138–143
- 31 Cai Y, Xie J, Harrison E, et al. Assessment of longitudinal stability-and-control characteristics of hybrid wing body aircraft in conceptual design. In: AIAA Aviation 2021 Forum. 2021. 2448
- 32 Rivord T, Williams B. Multiphase simulations of the SLS launch environment. In: The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis (SC22). 2022
- 33 Harris G W, He P, Abdelkhalike O O. A coupled spacecraft system and trajectory optimization framework using GMAT and OpenMDAO. In: AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference. 2022
- 34 Strauss M P, Scott M W. Progress in rotorcraft design: 1974–2024. *J Am Helicopter Soc*, 2025, 70: 1–33
- 35 McDonald R A, German B J, Takahashi T, et al. Future aircraft concepts and design methods. *Aeronaut J*, 2022, 126: 92–124
- 36 Halversen H, Mitchell R, Spear M, et al. Optimal design of an N+1 narrow-Body transport aircraft. In: AIAA Scitech 2020 Forum. Orlando, 2020. AIAA 2020-0270

- 37 Espinosa-Juárez E. A model-based systems engineering exploration of three sustainable regional aircraft concepts. Dissertation for the Master's Degree. Linköping: Linköping University, 2024
- 38 Friedland B, Eschbacher G. Implementing SysML into a feasible systems engineering solution. In: IISE Annual Conference. Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE), 2013. 4066
- 39 Novikov S V, Sazonov A A. Digital certification of aviation equipment on the basis of "Siemens PLM Software" technologies. *Econ J*, 2019, 1: 13–19
- 40 Pietrzak R, Naldi L, Canavesi S, et al. The future of full engine dynamic simulation for gas turbines. *J Eng Gas Turbines Power*, 2026, 148: 041002
- 41 Carpentier T, Zhang J, Van Heerden A S J, et al. Performance and economic assessment of mechanically integrated parallel hybrid aircraft. In: Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2022. V004T06A018
- 42 Joyner R, Osburg J, Lentati A, et al. Evolving conceptual propulsion design using preliminary multidisciplinary design analysis and optimization. In: 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2006. 4614
- 43 Bil C. Multidisciplinary design optimization: Designed by computer. In: Concurrent Engineering in the 21st Century: Foundations, Developments and Challenges. Cham: Springer International Publishing, 2015. 421–454
- 44 Castellini F. Multidisciplinary design optimization for expendable launch vehicles. Dissertation for the Doctoral Degree. Milano: Politecnico Di Milano, 2012
- 45 Deline C, Deceglie M, Jordan D, et al. Reducing uncertainty of fielded photovoltaic performance (Final Technical Report). Technical Report. Golden: National Renewable Energy Lab. (NREL), 2022
- 46 Lundquist J K, Clifton A J, Dana S, et al. Wind energy instrumentation atlas. Technical Report. Golden: National Renewable Energy Lab. (NREL), 2019
- 47 Harrison-Atlas D, Glaws A, King R N, et al. Artificial intelligence-aided wind plant optimization for nationwide evaluation of land use and economic benefits of wake steering. *Nat Energy*, 2024, 9: 735–749
- 48 Verelst D R, Hansen M H, Pirrung G. Steady state comparisons HAWC2 v12.5 vs HAWCStab2 v2.14: Integrated and distributed aerodynamic performance. Technical Report. DTU Wind Energy, 2018
- 49 Koragappa P. Aerodynamic design optimization of large-scale offshore wind turbine blade using CFD. Dissertation for the Doctoral Degree. Cranfield: Cranfield University, 2022
- 50 Dumitrescu C, Chiriță A P, Sefu S M, et al. Hydrostatic power transmission system for wind turbines. In: Proceedings of 24th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2024. Bulgaria, 2024. 115–121
- 51 Zhang Q, Yuasa M, Nagashino H, et al. Single dipole source localization from conventional EEG using BP neural networks. In: Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Vol. 20 Biomedical Engineering Towards the Year 2000 and Beyond (Cat. No. 98CH36286). IEEE, 1998. 2163–2166
- 52 De Gaetano G, Mundo D, Maletta C, et al. Multi-objective optimization of a vehicle body by combining gradient-based methods and vehicle concept modelling. *Case Studies Mech Syst Signal Processing*, 2015, 1: 1–7
- 53 Egerland M, Will D R J. Optimization of a fan shroud by ANSYS/DesignModeler and optiSLang. In: ANSYS Conference & 25th CADFEM Users' Meeting. 2007
- 54 Prus C, Vinuesa R, Schlatter P, et al. Impact simulation of elastic fuel tanks reinforced with exoskeleton for aerospace applications. *Intl J Crashworthiness*, 2017, 22: 271–293
- 55 Peña D. Design of aero engine structures using additive manufacturing. Dissertation for Master's Degree. 2015
- 56 Skarka W, Nalepa R, Musik R. Integrated aircraft design system based on generative modelling. *Aerospace*, 2023, 10: 677
- 57 Rao S J. Efficient topology optimization and design methods for an aerospace component. Dissertation for Master's Degree. 2025
- 58 Veugelers R, Cincera M, Frietsch R, et al. The impact of Horizon 2020 on innovation in Europe. *Intereconomics*, 2015, 50: 4–30
- 59 Europe H. What is Horizon Europe. Recuperado el, 2021, 10: 2022
- 60 Braud A, Fromentoux G, Radier B, et al. The road to European digital sovereignty with Gaia-X and IDSA. *IEEE Netw*, 2021, 35: 4–5
- 61 Beale S. Precision engineering for future propulsion and power systems: A perspective from Rolls-Royce. *Phil Trans R Soc A*, 2012, 370: 4130–4153
- 62 Fourgeau E, Gomez E, Adli H, et al. System engineering workbench for multi-views systems methodology with 3DEXPERIENCE Platform.

- The Aircraft Radar Use Case. In: Cardin M A, Fong S, Krob D, et al., eds. *Complex Systems Design & Management Asia: Smart Nations-Sustaining and Designing: Proceedings of the Second Asia-Pacific Conference on Complex Systems Design & Management, CSD&M Asia 2016*. Cham: Springer International Publishing, 2016. 269–270
- 63 Bisson M, Palmieri S, Ianniello A. SimCenter. Guidelines to develop a medical simulation center. *PROJECT*, 2019, 2: 239–252
 - 64 Keyes D E, McInnes L C, Woodward C, et al. Multiphysics simulations. *Int J High Perform Comput Appl*, 2013, 27: 4–83
 - 65 Novikov S V, Sazonov A A. Digital certification of aviation equipment on the basis of “Siemens PLM Software” technologies. *Econ J*, 2019, 1: 13–19
 - 66 Suydam A, Pyles J. Lockheed Martin Conceptual Design Modeling in the Dassault Systemes 3DEXPERIENCE® Platform. In: *AIAA Scitech 2020 Forum*. 2020. 1391
 - 67 Hou Y, Peng Y, Johnson A L, et al. Empirical analysis of wind power potential at multiple heights for North Dakota wind observation sites. *Energy Sci Technol*, 2012, 4: 1–9
 - 68 Knoll A, Klink K. Residential- and commercial-scale distributed wind energy in North Dakota, USA. *Renew Energy*, 2009, 34: 2493–2500
 - 69 Bangsund D A, Hodur N M. Wind Energy Industry’s Contribution to the North Dakota Economy in 2019. Technical Report. North Dakota State University, 2021
 - 70 Lian X C, Wu J S, Chen F Q, et al. Study on a new concept of combined-cycle propulsion system for aerospace planes—Optimization of combined engines (in Chinese). *J Aerosp Power*, 1992, 7: 305–308, 392–393 [廉小纯, 吴健生, 陈辅群, 等. 空天飞机复合循环推进系统新概念研究——组合发动机优化. *航空动力学报*, 1992, 7: 305–308, 392–393]
 - 71 Zhao D W, Li C J. Study on optimal design of a single-stage axial-flow fan (in Chinese). *J Xi’an Jiaotong Univ*, 1990, 3: 101–108 [赵德文, 李超俊. 单级轴流风机优化设计的研究. *西安交通大学学报*, 1990, 3: 101–108]
 - 72 Feng Z P, Li J, Shen Z D. Genetic algorithms and their application in optimal design of turbomachinery (in Chinese). *Gas Turbine Technol*, 1997, 2: 13–22, 38 [丰镇平, 李军, 沈祖达. 遗传算法及其在透平机械优化设计中的应用. *燃气轮机技术*, 1997, 2: 13–22, 38]
 - 73 Zhao S H, Li J M, Li K, et al. Study on optimal design of a combined gas turbine-heating furnace system (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 1990, 2: 120–122 [赵士杭, 李健民, 李昆, 等. 燃气轮机-加热炉联合系统优化设计研究. *工程热物理学报*, 1990, 2: 120–122]
 - 74 Wang J Y, Zhang J, Zhu Y K. Research on an integrated aircraft/engine evaluation system (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 1992, 13: 517–526 [汪家芸, 张津, 朱一锟. 飞机/发动机一体化评估系统研究. *航空学报*, 1992, 13: 517–526]
 - 75 Hu M H, Gao J J, Jiang Z N, et al. Research progress in aero-engine vibration monitoring and fault diagnosis technologies (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2024, 45: 7–35 [胡明辉, 高金吉, 江志农, 等. 航空发动机振动监测与故障诊断技术研究进展. *航空学报*, 2024, 45: 7–35]
 - 76 Wang C E. *Geometric Modeling Methods and Turbine Blade Design Technology* (in Chinese). Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2021. 315 [王成恩. 几何建模方法及涡轮叶片设计技术. 武汉: 华中科技大学出版社, 2021. 315]
 - 77 Gao J L, Tang S, Che J, et al. Research on parametric geometric modeling of hypersonic vehicles (in Chinese). *Comput Simulat*, 2008, 2: 49–52, 140 [高建力, 唐硕, 车竞, 等. 高超声速飞行器参数化几何建模研究. *计算机仿真*, 2008, 2: 49–52, 140]
 - 78 Liu W J, Chang H, Wang D, et al. Full-process simulation of underwater ignition and launch of a solid rocket engine based on numerical virtual flight technology (in Chinese). *J Propul Technol*, 1–10, in press [柳文杰, 常浩, 王东, 等. 基于数值虚拟飞行技术的固体火箭发动机水下点火发射全过程仿真研究. *推进技术*, 1–10, 待刊]
 - 79 Xu J. Research on resource management strategies for intelligent systems in edge computing (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Hefei: Anhui University, 2022 [徐佳. 边缘计算中智能系统的资源管理策略研究. 博士学位论文. 合肥: 安徽大学, 2022]
 - 80 Huang M, Li Z G, Li J, et al. Uncertainty quantification of heat transfer characteristics and aerodynamic performance of grooved blade tips for turbine rotor blades (in Chinese). *J Propul Technol*, 2022, 43: 233–245 [黄明, 李志刚, 李军, 等. 涡轮动叶凹槽状叶顶传热特性和气动性能的不确定性量化研究. *推进技术*, 2022, 43: 233–245]
 - 81 Shao W D, Wu F S, Li B W, et al. Aerodynamic performance analysis and optimal design of low-pressure steam inlet structure for steam turbines (in Chinese). *Thermal Turbine*, 2017, 46: 69–75 [邵卫东, 吴方松, 李伯武, 等. 汽轮机低压进汽结构气动性能分析与优化设计. *热力透平*, 2017, 46: 69–75]
 - 82 Hu D Y, Li J J, Deng S, et al. Multi-objective optimization of laser shock peening parameters based on residual stress (in Chinese). *J Propul Technol*, 2018, 39: 1590–1596 [胡殿印, 李金俊, 邓珊, 等. 基于残余应力的激光冲击强化参数多目标优化. *推进技术*, 2018, 39: 1590–1596]
 - 83 Tao F, Liu W R, Zhang M, et al. Five-dimensional model of digital twins and applications in ten major domains (in Chinese). *Computer*

- Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25: 1–18 [陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用. 计算机集成制造系统, 2019, 25: 1–18]
- 84 Zhang Y F, Huang G M, Liu R M, et al. Research on business processes and methods for engineering simulation verification and validation (in Chinese). In: China Simulation Society. Proceedings of the 33rd China Simulation Conference. Shanghai: AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai Aero-engine Digital Twin Key Laboratory, 2021: 300–308 [张翼飞, 黄干明, 刘瑞媚, 等. 面向工程仿真验证与确认的业务流程及方法研究. 见: 中国仿真学会. 第三十三届中国仿真大会论文集. 上海: 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海市航空发动机数字孪生重点实验室, 2021. 300–308]
- 85 Ding L J, Zhao X F. Research on key technologies of VV&A system architecture for complex products (in Chinese). In: Chinese Mechanical Engineering Society, Automation Branch in Mechanical Industry, Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, Industry-University-Research Working Committee, China Computer Federation, Technical Committee on High Performance Computing, et al. Proceedings of the 14th China CAE Engineering Analysis Technology Annual Conference. Luoyang: China Air-to-Air Missile Research Institute, Anhuaixin Technology Co., Ltd., 2018. 153–159 [丁来军, 赵新芳. 复杂产品的VV&A体系架构关键技术研究. 见: 中国机械工程学会机械工业自动化分会, 中国力学学会产学研工作委员会, 中国计算机学会高性能计算专业委员会, 等. 第十四届中国CAE工程分析技术年会论文集. 洛阳: 中国空空导弹研究院, 安怀信科技股份有限公司, 2018. 153–159]
- 86 Zhang L Z, Yin Z Y, Mi D, et al. Multidisciplinary design optimization of a centrifugal compressor based on proper orthogonal decomposition (in Chinese). J Propuls Technol, 2017, 38: 323–333 [张立章, 尹泽勇, 米栋, 等. 基于本征正交分解的离心压气机多学科设计优化. 推进技术, 2017, 38: 323–333]
- 87 Zhang L Z, Yin Z Y, Mi D, et al. Multidisciplinary design optimization of a turbine stage based on adaptive proper orthogonal decomposition (in Chinese). J Propuls Technol, 2017, 38: 1249–1258 [张立章, 尹泽勇, 米栋, 等. 基于自适应本征正交分解的涡轮级多学科设计优化. 推进技术, 2017, 38: 1249–1258]
- 88 Luo J, Guo F S. Overall multidisciplinary design optimization of civil turbofan engines (in Chinese). China Mech Eng, 2019, 30: 1813–1820 [罗钜, 郭福水. 民用涡扇发动机总体多学科设计优化研究. 中国机械工程, 2019, 30: 1813–1820]
- 89 Long D, Guo F S, Luo J, et al. Multidisciplinary optimization method for multi-stage low-pressure turbines considering flow passage and disk structures (in Chinese). Gas Turbine Experiment Res, 2018, 31: 18–24 [龙丹, 郭福水, 罗钜, 等. 考虑流道和轮盘结构的多级低压涡轮多学科优化方法研究. 燃气涡轮试验与研究, 2018, 31: 18–24]
- 90 Gong C Y, Guo N X. Application of surrogate models in multidisciplinary design optimization for aero-engines (in Chinese). Aerosp Power, 2025, 2: 62–65 [巩萃颖, 郭纳贤. 代理模型在航空发动机多学科设计优化中的应用. 航空动力, 2025, 2: 62–65]
- 91 Lu Y G. Optimal design and reliability analysis of the primary circulation pump for a lead-bismuth cooled fast reactor (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019 [卢永刚. 铅铋冷却快堆主循环泵优化设计与可靠性分析. 镇江: 江苏大学, 2019]
- 92 Chai T Y, Ding J L, Wang H, et al. Hybrid intelligent optimal control methods for operation of complex industrial processes (in Chinese). Acta Automat Sin, 2008, 34: 505–515 [柴天佑, 丁进良, 王宏, 等. 复杂工业过程运行的混合智能优化控制方法. 自动化学报, 2008, 34: 505–515]
- 93 Yu Y. Theoretical and experimental research on the working process of a scramjet combustor (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2004 [余勇. 超燃冲压发动机燃烧室工作过程理论和试验研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2004]
- 94 Cao X. Simulation and experimental study on engine thermal management (in Chinese). Dissertation for the Master's Degree. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008 [曹旭. 发动机热管理仿真与试验研究. 硕士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2008]
- 95 Dong P. Numerical study on aero-thermal coupling of air-cooled turbine blades for aero-engines (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009 [董平. 航空发动机气冷涡轮叶片的气热耦合数值模拟研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009]
- 96 Dai C H, Liu J, Zeng J C, et al. Development status of composite wind turbine blades and countermeasures for several issues (in Chinese). FRP/Composites, 2008, 1: 53–56 [戴春晖, 刘钧, 曾竟成, 等. 复合材料风电叶片的发展现状及若干问题的对策. 玻璃钢/复合材料, 2008, 1: 53–56]
- 97 Zhang L, Li X Z, Geng J, et al. Research status of tidal current energy (2013) (in Chinese). Adv New Renew Energy, 2013, 1: 53–68 [张亮, 李新仲, 耿敬, 等. 潮流能研究现状2013. 新能源进展, 2013, 1: 53–68]
- 98 Yin Z C, Yang G, Liu H, et al. Research status and prospect analysis of key technologies for hydrogen storage and transportation (in Chinese).

- Modern Chem Ind, 2021, 41: 53–57 [殷卓成, 杨高, 刘怀, 等. 氢能储运关键技术研究现状及前景分析. 现代化工, 2021, 41: 53–57]
- 99 von Davier M. Training Optimus prime, MD: A case study of automated item generation using artificial intelligence—From fine-tuned GPT2 to GPT3 and beyond. In: Advancing Natural Language Processing in Educational Assessment. London: Routledge, 2023. 90–106
- 100 Goswami S, Rizzo J. Artificial intelligence drives industry response to Project Optimus. Appl Clin Trials, 2024, 33: 5
- 101 Raja V. On the design of functionally integrated aero-engine structures: Modeling and evaluation methods for architecture and complexity. Dissertation for the Doctoral Degree. Gothenburg: Chalmers University of Technology (Sweden), 2019
- 102 Nerubasskyi V. PD-14—Is it so good. *Aerosp Tech Technol*, 2022, 4(sup1): 17–24
- 103 Kim W, Lee H J, Kim J Y. Fatigue life estimation of an engine rubber mount. *Int J Fatigue*, 2004, 26: 553–560
- 104 Patterson E. On the credibility of engineering models and meta-models. *J Strain Anal Eng Des*, 2015, 50: 218–220

Development and prospects of multidisciplinary design optimization software for complex engineering systems

YIN ZeYong^{1,4}, DU Hui², LI Wei³, YOU YanCheng⁴, HOU NaiXian², AN Bo², MI Dong³, ZENG NianYin⁴ & SHAO WeiDong²

¹ Aero Engine Corporation of China, Beijing 100097, China

² AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China

³ AECC Hunan Power Machinery Research Institute, Zhuzhou 412002, China

⁴ School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China

The design of complex equipment is increasingly characterized by high dimensionality, multi-disciplinarity, multi-objectives, and multiple constraints. As a result, multidisciplinary design optimization (MDO) software has become a core technological tool for independent development and performance enhancement of such equipment. This paper systematically reviews the current development status of international MDO software, the technical evolution of domestically developed platforms in China, and their engineering application practices. It compares the development features of MDO software both domestically and internationally, and draws valuable insights for the advancement of China's MDO technology. Building on this analysis, the paper further explores future development trends, including algorithmic intelligence, coupled multidisciplinary optimization, platform integration, closed-loop engineering implementation, and the maturation of industrial ecosystems. It also identifies key technical challenges, such as algorithmic complexity, system-level optimization efficiency, cross-tool workflow automation, engineering validation closed loops, and industrial ecosystem development. Finally, the paper proposes potential breakthrough directions and development strategies, emphasizing the need for algorithmic innovation, platform engineering, digital twin applications, and industrial collaboration to drive continuous progress in domestically developed MDO software—toward autonomy, engineering feasibility, and industrial maturity. This will provide essential technical support and innovation capacity for high-end manufacturing sectors such as aerospace, shipbuilding, and energy equipment.

multidisciplinary design optimization, complex engineering systems, engineering software, artificial intelligence

doi: [10.1360/SST-2026-0002](https://doi.org/10.1360/SST-2026-0002)