

数字化设计类工业软件发展策略研究

高亮¹, 李培根¹, 黄培², 杨震¹, 高杰³

(1. 华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074; 2. 武汉制信科技有限公司, 武汉 430223;
3. 华中科技大学航空航天学院, 武汉 430074)

摘要: 数字化设计类工业软件是智能制造的“第一步”、工业软件的“中流砥柱”, 但国内相关产业的发展水平与国际前沿差距较大, 亟需着力提升以支撑中国制造迈入国际先进行列。本文论述了数字化设计类工业软件的重要价值, 整理了国内外工业软件的发展现状, 剖析了我国相关产业发展面临的挑战; 提炼了数字化设计类工业软件领域的重点突破方向, 涵盖结构计算机辅助设计/计算机辅助工程软件与优化软件无缝集成、几何特征驱动设计/分析/优化的一体化软件、多体/多态/多物理场耦合的仿真计算与分析、工业软件的云端化和用户可定制化、算法策略支撑的计算机异构并行。研究建议, 梳理细分领域、精准制定行业扶持政策, 促进软件企业优势互补、制定国内统一标准, 给予定向扶持、拓展中小型企业客户市场, 完善人才培育机制、聚集高端研发人才, 深化基础研究、发挥国内创新市场优势, 以此促进我国数字化设计类工业软件产业的稳健发展。

关键词: 工业软件; 数字化设计; 智能制造; 产业瓶颈; 突破方向

中图分类号: T-19 **文献标识码:** A

Development Strategies of Industrial Software for Digital Design

Gao Liang¹, Li Peigen¹, Huang Pei², Yang Zhen¹, Gao Jie³

(1. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Wuhan e-works Technology Co., Ltd., Wuhan 430223, China; 3. School of Aerospace Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Industrial software for digital design is a mainstay of industrial software and the foundation for intelligent manufacturing; however, a large gap exists between relevant domestic industries and the international frontier. Therefore, it is urgent to improve these software to support China's manufacturing sector to enter the international advanced ranks. This study explores the significance of the industrial software for digital design, reviews the development status of industrial software in China and abroad, and analyzes the challenges faced by related industries in China. Key breakthrough directions are summarized, including seamless integration of structural computer-aided design/computer-aided engineering software and optimization software; design, analysis, and optimization integrated software driven by geometric features; simulation calculation and analysis featuring multi-body, multi-state, and multi-physical field coupling; cloudification and customization of industrial software; and heterogeneous parallel computing supported by

收稿日期: 2022-11-22; **修回日期:** 2023-01-24

通讯作者: 高亮, 华中科技大学机械科学与工程学院教授, 研究方向为智能优化与机器学习方法在设计制造中的应用;

E-mail: gaoliang@hust.edu.cn

资助项目: 中国工程科技发展战略湖北研究院武汉分院项目“发展优化驱动的智能设计工业软件——助力武汉工业软件产业升级”(HB2021B12)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

algorithm strategies. Furthermore, we propose the following suggestions: (1) sorting out subdivided areas and formulating targeted industry support policies, (2) encouraging software enterprises to draw on each other's strengths and formulating unified domestic standards, (3) providing targeted support for small- and medium-sized enterprises to expand their customer market, (4) improving personnel training programs to gather high-end research staff, and (5) strengthening basic research and exploiting the advantages of domestic innovation market.

Keywords: industrial software; digital design; intelligent manufacturing; industrial bottleneck; breakthrough direction

一、前言

工业软件的发展背景是依托工业生产需求,提高研发制造、生产管理方面的综合效益;本质上是对工业知识进行编码,通过图形工程将工业生产知识封装在软件中,为工业生产提供服务。在信息技术快速发展的当今时代,受工业互联网^[1,2]、云计算^[3]、人工智能^[4]、智能制造^[5]、大数据^[6]等新兴技术的影响,工业企业在成本控制^[7,8]、效率提升^[9]、跨企业/跨专业协作^[10]等方面的需求显著增加。相应地,工业软件不仅是工业企业运营的能力依托,也表现为支撑产业发展和创新的基础工具。工业软件可分为数字化设计(又称研发设计)、生产制造、经营管理、运维服务等主要类型,是现代化工业水平的集中体现、先进技术融合的产物,具有发展历程久、研发成本高、成功经验难复制等特征。

工业软件处于工业制造的中游位置,连接着硬件设备、操作系统等上游产业环节,航空、航天、航海、汽车等下游应用领域,发挥着“枢纽”作用。值得指出的是,数字化设计类软件在工业软件产业中处于关键位置,是实现工业产品制造的“第一步”,直接影响产品的后续流程^[11];主要分为计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程(CAE)、计算机辅助制造(CAM)、电子设计自动化(EDA)、计算机辅助工艺过程(CAPP)、产品生命周期管理(PLM)等类别。然而,《中国工业软件产业白皮书(2020)》指出,在2018年世界CAD、CAE软件市场中,我国相应市场规模占比仅为8.5%、9%;理性判断,我国在数字化设计类工业软件方向落后国际先进水平20~30年。近年来,科技领域的贸易壁垒有所增强,航空、航天、航海装备研发所采用的高端数字化设计类工业软件多数为国外引进,不利于自主创新发展进程^[4],潜在的“卡脖子”风险不容忽视。

本文着眼智能制造实际需求、多学科交叉及融合、产业安全发展,凝练数字化设计类工业软件的

的重要价值;进而梳理国内外发展现状、剖析我国相关产业发展面临的挑战、提炼领域重点突破方向,提出现阶段数字化设计类工业软件的发展建议,以期辨明一条适合我国数字化设计类工业软件行业的可持续发展路径。

二、数字化设计类工业软件价值分析

(一) 产业安全与国家利益的基石

工业软件是维持工业企业顺畅运营的重要环节,也是我国制造业等产业受国外长臂管辖的“卡脖子”环节之一。近年来,出现了多起与工业软件相关的技术制裁事件,波及了经济、金融、教育、交通等方面,如针对我国特定企业的CAE、EDA类软件禁用事件,将多家中国实体列入出口管制清单事件、一些高校被禁止使用商业数学软件MATLAB事件等。此外,为了保障工业信息安全,防止黑客入侵、病毒扩散、系统漏洞、密码破译等事故的发生,亟需提升工业软件相关的产业链、供应链安全技术。尽快开展包括工业软件在内的关键核心技术攻坚,自主掌握工业软件核心技术能力,才能更好维护产业安全 and 国家利益。

(二) 制造业迈进工业4.0的动力

工业4.0作为以智能制造为主导的“第四次工业革命”生产方法^[12],本质是通过信息物理系统构建智能工厂,将各类工业软件按需嵌入制造流程。CAD、CAE等复杂度高、综合性强的数字化设计类工业软件,事关制造业生产需要,对于制造业向智能化转型升级起着支撑作用。发展数字化设计类工业软件,有利于我国工业核心技术领域的自主可控,从而创造稳定可持续的工业发展环境;支持实现工业4.0带来的诸多技术优势,如高效应对工厂的实时信息变化、以数字化显著提升监测效率、应用由高级电机控制的智能机器人等^[13]。

(三) 学科交叉与融合发展的载体

当前，我国科技领域发展面临“瓶颈期”，打破困境的关键举措之一是促进跨学科、多技术之间的融合，催生学科前沿的新发展形态。在研发数字化设计类工业软件的过程中，需高度关注开发工具、算法、软件工程、交互设计等方向的协同，据此弱化部分方向出现的“短板”效应。例如，为了高质量完成一款CAD软件的自主研发，需要在企业层面培育、吸引上述提及领域的技术人才，在社会层面营造良好的科研和工程环境^[4]。发展数字化设计类工业软件，有利于促进计算机、机械工程等学科的协同发展与优化布局，也就成为多学科交叉、多领域融合的良好载体。

三、国内外工业软件发展现状

(一) 国外工业软件发展现状

经过多年发展，国外工业软件在底层开发、界

面操作、云端等方面较为成熟，形成了优势企业的技术垄断格局（见图1）。在上游，操作系统、开发工具、中间件主要由美国品牌主导。在中游，达索、欧特克等品牌在数字化设计类方向具有领先优势，西门子、霍尼韦尔等品牌在生产制造类方向处于行业龙头地位，思爱普、甲骨文等品牌在经营管理类方向占据主导位置。

国外工业软件企业及市场发展，呈现两类主要特征：大型软件企业持续开展并购，占据着绝大部分市场份额；中小型软件企业发挥专业化、定制化特色，在细分市场方向占据优势。具体而言，大型企业依靠前期的技术和资本积累，制定了实际上的行业标准，以“多方并购”形式继续提高市场份额，如达索公司基于CATIA产品开拓市场，随后收购SolidWorks、Abaqus、Accelrys等软件品牌；其他企业采取了“专精特新”发展道路，以专业化、定制化的软件服务来灵活适应市场需求。

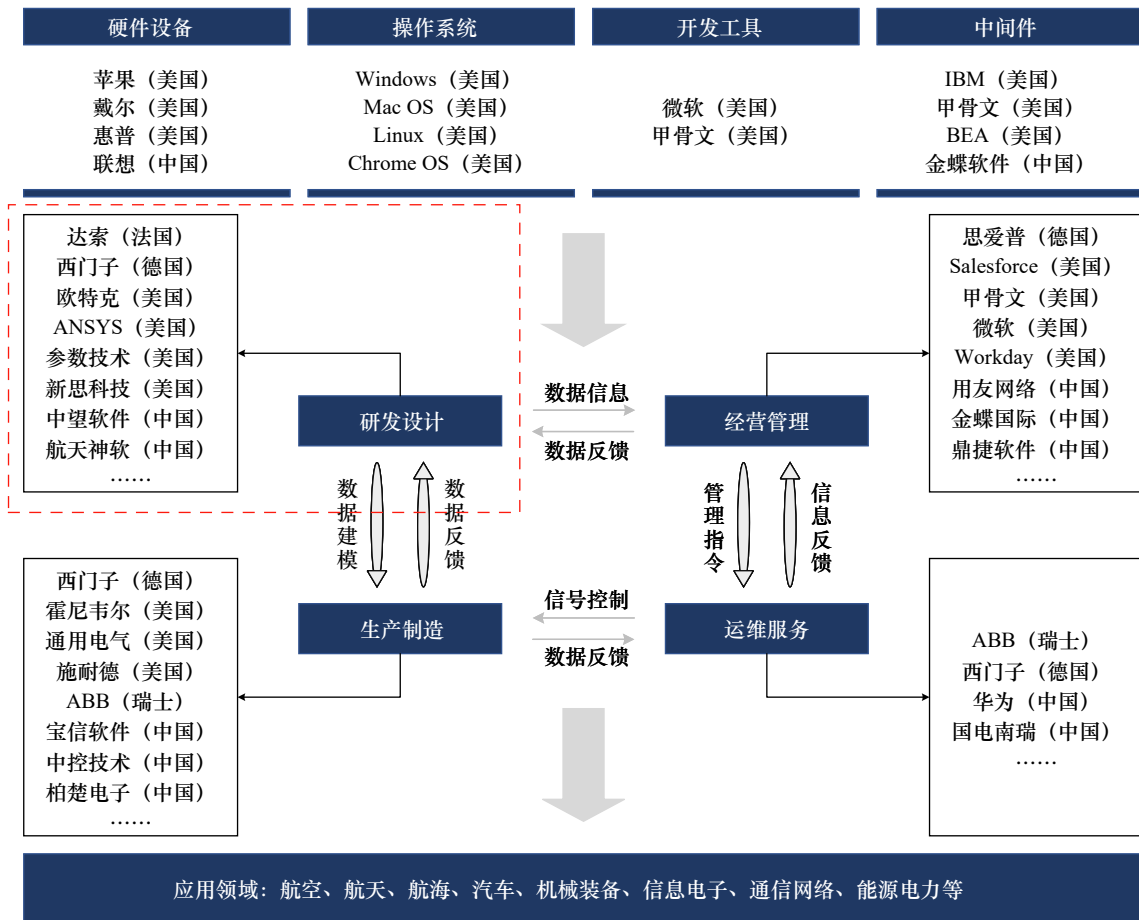


图1 工业领域的上/中/下游、工业软件分类及代表公司

（二）我国工业软件发展现状

根据工业和信息化部发布的《软件业经济运行情况》及相关数据统计^[15]，我国工业软件市场规模逐步扩大，以运维服务类工业软件的占比最高；2016—2021 年工业软件产品营收从 1000 亿元增长至近 2000 亿元，平均增速约为 16%，明显高于同期国际市场增速（约 6%）。这表明，我国工业软件市场在规模方面进入了世界前列。

根据《中国工业软件及服务企业名录》及相关数据，有 12 个省份的工业软件企业数量超过 10 家（见表 1）。北京、上海、广东、江苏等省份的企业数量超过 100 家，分布相对密集，但其他省份的数量明显偏少。工业软件企业的地域分布失衡，必然导致专业人才分布的差异化，也就加剧了各省份在工业软件发展方面的分化现象。

在经营管理类软件方向，主要由金蝶、用友等国产品牌主导，中低端市场基本实现国产替代，高端市场的国产化率接近 40%，整体进入稳定发展期。在生产制造类软件方向，主要由中控、宝信等国产品牌占据市场；因贴近国内市场，分散控制系统、分布式数据采集和监控系统等软件的国产化率超过 50%，发展势头良好。在运维服务类软件方向，华为、国电南瑞等国产品牌在市场上具有引领地位，发展前景广阔。然而，国外品牌在我国数字化设计类工业软件市场占据主导地位，结构设计、仿真分析等功能软件的对外依存度超过 95%，固有的技术鸿沟难以在短期内逾越。在 CAD 软件方面，主要有数码大方、中望、天河智造、浩辰等品牌；在 CAE 软件方面，用于国防军工领域的 HAJIF 软件、云端 CAE 平台 Simright 等是代表性的自主可控软件；少数企业在 CAD/CAM 软件产品中初步拓展了的结构仿真分析功能。

四、我国数字化设计类工业软件发展面临的挑战

（一）前期研发投入不足，难以缩短固有差距

随着科技领域贸易壁垒的增强，较多依赖进口的高端工业软件面临“断供”风险，暴露出数字化设计类工业软件应用“受制于人”的隐患。应当认识到，我国工业软件行业为了实现自主创新发展，需要彻底放弃对进口软件的“拿来主义”思想，努

表 1 各省份的工业软件企业分布(数量>10家)

省份	数量/家
北京	203
上海	161
广东	145
江苏	115
浙江	56
湖北	33
山东	21
辽宁	16
福建	14
四川	13
陕西	12
重庆	11

注：统计时间截至 2021 年 8 月。

力实践内生发展之路；积极争取中长期投入，吸引社会资源参与行业发展，弥补我国自 20 世纪以来对软件研发投入不足的缺口。

在数字化设计类工业软件方面，为了稳步缩短与国际领先企业近 30 年的发展差距，国内工业软件公司及研发团队需要克服难度大、周期长、前期收益低等一系列突出问题。不可忽视的是，这类问题往往导致工业软件企业难以下定研发投入信心，叠加市场竞争的短视效应，明显阻碍了数字化设计类工业软件自主可控的发展进程。

（二）行业交流合作不深入，行业标准严重缺失

基于现阶段我国工业软件行业的发展环境，相关企业无法简单复制“先自立门户、再陆续收购”的发展路线。从数字化设计类工业软件发展的整体角度看，需要联合行业内的优势企业以协调发展步骤/路径，减弱“单打独斗”的发展思想。然而，为了保护代码等核心资产及潜在利益，相关企业之间鲜有交流合作；虽有管理部门、学术机构组织过企业参与的研讨交流，但距离预期目标相差甚远。

目前，我国数字化设计类工业软件行业事实上的标准，多由国外大型工业软件企业主导；但国外软件企业之间也有激烈竞争，在行业标准层面并未统一。国内用户在使用不同企业的软件产品时，程序/数据之间难以贯通，显著增加了软件使用的“壁垒”效应。尚未统一的行业标准，不利于国内

相关企业发展研发、制造、运维一体化的软件产品；尤其在重大装备制造领域，直接制约了工业软件作用的发挥。

（三）市场占比失衡，稳定客户难以聚集

从我国数字化设计类工业软件的客户类型分布可见，应用市场集中在大型制造类企业。大型制造类企业为了提高产品质量、降低研发成本、控制生产成本，通常优选使用成本低、技术成熟的进口软件产品。这就导致国产数字化设计类工业软件的客户市场聚集在中小型制造类企业。中小型制造类企业从产品附加值、市场风险等角度考虑，往往无法稳定投入使用工业软件所需的资金，也就无法构建基于工业软件的独特产品优势，相应的市场竞争力逐步弱化。

大型制造类企业难以提供数字化设计类工业软件的应用合作机会，中小型制造类企业又较少依赖数字化设计类工业软件。受各类因素的共同作用，企业自主研发数字化设计类工业软件，往往缺失稳定的客户；既造成工业软件企业生存困难的问题，还因用户数据不足而难以持续优化工业软件，成为工业软件行业发展受限的直接原因。

（四）底层核心技术缺失，自主研发能力不强

当前，多数的数字化设计类工业软件底层核心技术由国外企业垄断；国内一些企业作为国外工业软件产品的代理商，尚未具备独立研发高端工业软件产品的能力。相应地，一些企业软件产品的底层核心多为国外企业的算法与软件内核。工业辅助设计、仿真模拟测试等工业领域的核心技术，不可避免地受制于国外供应。

以数字化设计类工业软件为代表的高端工业软件，开展自主研发主要受限于两方面：对于CAE等软件，除编程技术要求外，涉及理学、工学中的多学科核心知识，对研发团队的技术能力要求极高；功能全面且稳定的底层开发平台是开展工业软件自主研发的前提，这是当前缺失的基础性环节。

（五）智能化成为发展潮流，挤压后发企业的生存空间

国外工业软件优势企业积极转向工业云服务、人工智能方向；在工业云服务的开发阶段，软件不

再是独立存在，而是整合各类基础软件并提供“软件+服务”整体解决方案；人工智能技术通过大量学习特定领域的的数据，进而实现结果预测，为工业软件创新应用提供了新思路。

与此同时，我国正处于工业软件协同应用阶段，尚未转入工业云服务阶段。在上述革新技术受到制造类企业青睐的情况下，国外工业软件优势企业进一步抢占国内工业软件市场，对国内软件企业的整体性自主研发能力提出了更高要求；软件客户的使用黏性削弱，研发进度的上限则受时间积累和使用经验影响。此消彼长之下，国内软件企业的生存和发展面临着更大压力。

五、我国数字化设计类工业软件的重点突破方向

（一）结构CAD、CAE、优化软件无缝集成

CAD、CAE、结构优化分别针对结构建模、结构分析、寻找合适的材料分布问题而开发^[16]，都基于有限元方法，通过求解结构内的数值响应来分析结构适应性，从而判定结构能否满足性能需求。为了压缩开发周期、提高经济效益，产品设计阶段即涉及结构几何建模、数值分析、设计优化等环节，这需要CAD、CAE、结构优化之间进行数据的无障碍传递，对数字化设计类工业软件能力提出了新要求。然而，有限元方法存在模型逼近的精确度受限、创建模型消耗大量时间成本、场变量的连续性仅为低阶、高阶分析的节点数呈指数式增长等问题，加之CAD几何模型与CAE分析模型的构造机理不同、结构的表征数据不兼容，导致CAD、CAE、结构优化之间出现数据交互繁琐、几何特征信息丢失等一系列应用不足。

拓扑优化技术以结构数值分析为基础，基于优化拓扑结果来实现结构超轻量、高性能的设计目标^[17-19]，因而有限元软件集成拓扑优化技术也是重要趋势之一。例如，美国Altair公司从网格划分、导入CAE、拓扑优化、后处理等多个模块着手，对每个独立步骤分别进行集成操作，初步实现了上述功能。

研究统一的CAD、CAE、结构优化技术，发展具有自主可控核心知识产权的工业数字化软件（如等几何拓扑优化软件），是突破当前主流的数字化

设计类工业软件生态的关键方向。基于等几何分析方法^[20]（见图2），通过非均匀有理B样条曲线（NURBS）构建基函数，确保结构的CAD几何、CAE分析模型具有一致性；打破相关数据的交互壁垒^[21,22]，建立等几何拓扑优化的技术框架。

（二）几何特征驱动的设计、分析、优化一体化软件

针对计算机底层的数值计算关键技术，结合以几何特征驱动拓扑优化的设计理念、共行几何一体化优化的设计理论、等几何拓扑优化与CAD直接交互技术，开发基于几何特征驱动，设计、分析、优化一体化的工业软件。

对于重大装备的多类型复杂曲面构件，应用共形参数化建模与一体化优化设计等理论及技术^[23]，适应高承载、低振动等性能需求。等几何拓扑优化用于二维/三维拉胀超材料研究^[24]，以NURBS基函数构造兼顾平滑度、连续性的密度分布函数，与CAD直接交互，消除几何误差，克服求解困难。发展的基于特征驱动的拓扑优化方法^[25]，将一组特定的工程特征通过相互运动或变形方式得到拓扑构型；从CAD的设计理念出发，迭代选取与CAD特征模型相关的几何变量，从设计源头确保了工程结构的特征属性。

（三）多体、多态、多物理场耦合的仿真计算与分析

随着计算处理、数据支持等支撑技术的提升，面向多体、多态、多尺度乃至多物理场等复杂耦合

模拟分析的新型数字化设计类工业软件逐步出现。实现多物理场耦合仿真的主要形式有：①通过公开的数据接口标准，串联多个仿真软件开展联合仿真，如Dymola平台软件，可基于功能模型接口/功能模型单元来结合Simulink、AMESim等十余种建模工具，依据所属系统分别进行模拟；②通过数个仿真模块实现单系统的多领域仿真，如COMSOL不断集成结构、流体、热、电磁等分析功能，形成了包含30多个附加模块的多物理场仿真能力。

发展上述耦合仿真功能工业软件，本质上需要深入开展基于多学科交叉理论的研究。分析不同系统之间相互作用的多物理场，提升描述上述现象的偏微分方程求解精度，削减主观条件影响，使得仿真结果良好反映客观规律。

（四）工业软件云端化、用户可定制化

基于云计算、物联网形成的软件即服务（SaaS）逐渐成为软件企业的主流经营模式^[3]。SaaS是通过云服务向用户提供软件使用的新兴方法，供应商负责构建企业信息化所需的网络基础设施、软硬件运营平台，承担预实施、后期维护等服务。企业无需建立机房、购买软硬件，而是直接通过互联网使用信息系统；结合自身需求，向SaaS供应商租赁软件服务，登录网络后即可在设备上使用相关工业软件。

工业软件企业发展SaaS服务，要在保持优势领域持续领跑的前提下，按模块、按精度合理拆分软件到各个子程序，以满足各类客户的使用需求。目前，已有部分企业的工业生产基于SaaS应用展开，如国外的Predix工业物联网平台、从数字化到自动

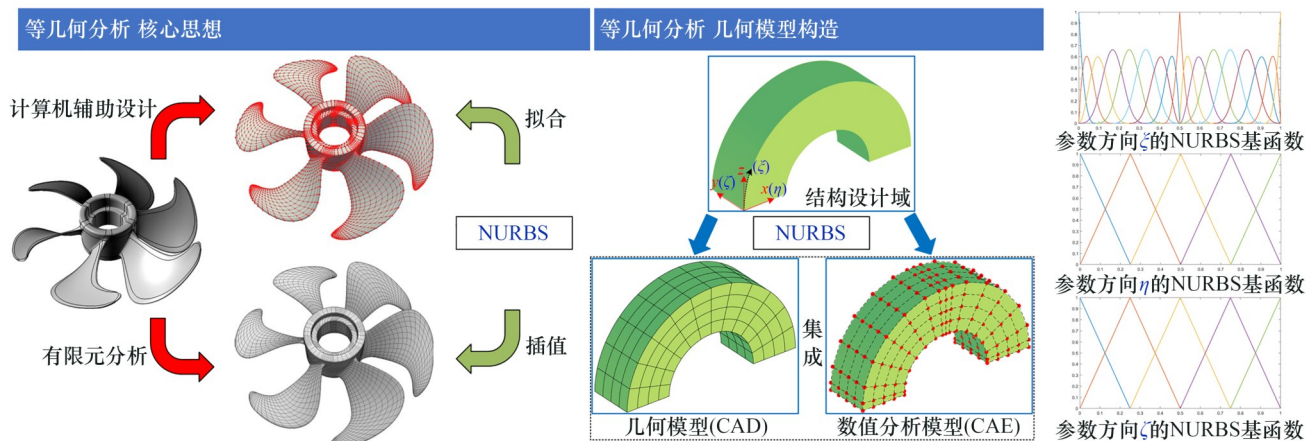


图2 等几何分析方法示意

化的一体化解决方案等，国内的美云智数工厂仿真软件、船舶结构设计及生产管理一体专用化软件平台等。

（五）引入算法策略，支持计算机异构并行

在设计优化过程中，高精度结构几何表征模型的缺失，导致CAE分析精度偏低，带来了后续优化设计的收敛性差、不易寻求可行设计解等问题。引入模型降阶、收敛加速等算法策略，针对性解决求解耗时、算法运行效率低下、计算架构僵化、综合使用成本过高等问题。发展适应中央处理器/图形处理器异构并行架构的等几何拓扑优化软件，实现底层算力的灵活扩展和高效运用。

六、我国数字化设计类工业软件发展建议

（一）梳理细分领域，精准制定行业扶持政策

针对数字化设计类工业软件前期研发投入不足的实际问题，建议把握工业软件的类型特征、研发周期、技术难易等行业要素，据此研究制定扶持政策；从高端人才引进、研发团队壮大、企业运营顺畅等维度，找准扶持政策的着力点，提高政策的实施成效；同步完善产业投资基金、协同研发平台等配套服务体系建设。

建议地方管理部门将工业软件列为独立的产业类别，发布区域性扶持政策，促进特色工业软件、细分领域应用等的布局与优化。例如，与工业和信息化部推进的智能制造试点示范项目相配套，进一步规划工业软件核心技术、垂直行业应用等具体发展内容，实质性改善国产工业软件的研发与应用环境。

（二）促进软件企业优势互补，制定国内统一标准

针对国内工业软件企业之间合作不深的问题，建议地方管理部门发挥牵头组织作用，引导大型工业软件研发企业在工业制造、基础学科、软件工程等方向开展意向交流，以定向扶持等形式引导跨企业的工业软件技术合作。

建议国内工业软件优势企业积极合作，率先开展四类工业软件的产业体系标准建设。保证工业软件产品数据格式的一致性，以互联互通提高不同产品数据的兼容性，提高国产工业软件综合集成的应

用水平，缓解工业软件企业的低层次竞争，驱动行业发展的高端高值化。

（三）给予定向扶持，拓展中小型企业客户市场

针对国产数字化设计类工业软件缺失稳定客户的问题，拓展工业软件在中小型制造类企业的应用规模是适宜的突破口。建议地方管理部门发布扶持政策，缓解中小型制造类企业应用工业软件资金匮乏的现状，促成中小型制造类企业提升核心竞争力、工业软件企业拓展市场规模的共赢局面。还可引导工业软件企业提供区域性、细分行业性的优惠应用措施，策略性扩大客户规模，为优化工业软件产品、把握新兴市场需求确定基础条件。

积极营造中小型制造类企业增强国产工业软件认知与应用的社会氛围，鼓励企业用户发掘工业软件在成本控制、效率提升、质量改进等方面的中长期收益；吸引中小型制造类企业主动增加工业软件产品的应用投入，为国产数字化设计类工业软件的整体性提升创造条件。

（四）完善人才培育机制，聚集高端研发人才

针对数字化设计类工业软件底层核心技术自主研发能力不强的问题，坚持技术发展的正向思维，积极培养并留住高技术人才，再由人才来筑牢行业发展基础。高质量实施“新工科”建设等高校学科改革方案，批量培养兼具工业领域知识、信息技术知识的复合型人才。建议地方管理部门发布高层次人才专项政策、高校毕业生及专业技术人员当地留用政策，促进高校培育软件编程与多学科基础能力兼备的人才队伍，缓解工业软件行业从业人员的待遇保障问题。

鼓励工业软件企业制定股权分配、股票期权等激励方案，激发专业技术团队的积极性以形成长期主义思想。引导工业软件企业加强行业自律、工业软件研发人才合理有序流动，避免恶性竞争导致的行业人才流失、行业发展潜力损耗。从培养人才到留住人才再到用好人才，以各环节的理性行动来支持国产工业软件底层核心技术攻关。

（五）深化基础研究，发挥国内创新市场优势

针对国内数字化设计类工业软件企业受到相关国际企业智能化技术挤压的问题，建议国内企业从

具备比较优势的产品方向着手,积极融入国内市场的应用生态体系。工业软件企业应追求“纵向”深入,建立自身优势领域的底层研究能力,再由工程实际应用来完善工业软件产品的成熟度;将工业软件优化算法与行业积累的管理规律相结合,发展本质安全可靠、聚焦市场需求的工业软件,据此打破国际工业软件企业的“头部效应”、先发优势。

相较国外数字化设计类工业软件企业从大型军民装备应用起步的发展路线,国内企业应探索出具有自主特色、以新兴领域应用为先的发展道路。发挥国内市场的规模优势,积极探索与物流、电动汽车等优势行业的合作方式,提供优质的工业软件定制化服务,支持客户构建产品市场竞争力;稳步积累行业应用经验并形成特色技术优势,从而快速缩小工业软件行业的后发劣势。

参考文献

- [1] 魏津瑜,李翔.基于工业互联网平台的装备制造企业价值共创机理研究[J].科学管理研究,2020,38(1):106-112.
Wei J Y, Li X. Research on value co-creation mechanism of equipment manufacturing enterprises based on industrial Internet platform [J]. Scientific Management Research, 2020, 38(1): 106-112.
- [2] 陶永,蒋昕昊,刘默,等.智能制造和工业互联网融合发展初探[J].中国工程科学,2020,22(4):24-33.
Tao Y, Jiang X H, Liu M, et al. A preliminary study on the integration of intelligent manufacturing and industrial Internet [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(4): 24-33.
- [3] 赵飞宇.云架构CAD软件及其关键技术与应用综述[J].计算机集成制造系统,2022,28(4):959-978.
Zhao F Y. Key technologies and applications for cloud CAD software [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(4): 959-978.
- [4] 邵珠峰,赵云,王晨,等.新时期我国工业软件产业发展路径研究[J].中国工程科学,2022,24(2):86-95.
Shao Z F, Zhao Y, Wang C, et al. Development path of China's industrial software industry in the new era [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(2): 86-95.
- [5] 臧冀原,王柏村,孟柳,等.智能制造的三个基本范式:从数字化制造、“互联网+”制造到新一代智能制造[J].中国工程科学,2018,20(4):13-18.
Zang J Y, Wang B C, Meng L, et al. Brief analysis on three basic paradigms of intelligent manufacturing [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(4): 13-18.
- [6] Shang C, You F Q. Data analytics and machine learning for smart process manufacturing: Recent advances and perspectives in the big data era [J]. Engineering, 2019, 5(6): 1010-1016.
- [7] 高立兵,吕中原,索寒生,等.石油化工流程模拟软件现状与发展趋势[J].化工进展,2021,40(Z2):1-14.
Gao L B, Lyu Z Y, Suo H S, et al. Market analysis and development trend of petrochemical process simulation software [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(Z2): 1-14.
- [8] 丛力群,张云贵,刘强,等.钢铁行业工业软件发展探讨[J].中国工程科学,2022,24(4):167-176.
Cong L Q, Zhang Y G, Liu Q, et al. Development strategy of industrial software for iron and steel industry [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 167-176.
- [9] 胡雅涵,寇贞贞,江源,等.建材行业工业软件发展研究[J].中国工程科学,2022,24(4):177-187.
Hu Y H, Kou Z Z, Jiang Y, et al. Development of industrial software for building materials industry [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 177-187.
- [10] 阳春华,刘一顺,黄科科,等.有色金属工业智能模型库构建方法及应用[J].中国工程科学,2022,24(4):188-201.
Yang C H, Liu Y S, Huang K K, et al. Intelligent model library for nonferrous metal industry: Construction method and application [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 188-201.
- [11] 李郁佳,孟嫣.加快研发设计软件发展,增强竞争力[J].中国科技信息,2022(12):125-128.
Li Y J, Meng Y. Accelerate the development of R & D design software to enhance competitiveness [J]. China Science and Technology Information, 2022 (12): 125-128.
- [12] 钟志华,臧冀原,延建林,等.智能制造推动我国制造业全面创新升级[J].中国工程科学,2020,22(6):136-142.
Zhong Z H, Zang J Y, Yan J L, et al. Intelligent manufacturing promotes the comprehensive upgrading and innovative growth of China's manufacturing industry [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 136-142.
- [13] 李飞,乔晗.数字技术驱动的工业品服务商业模式演进研究——以金风科技为例[J].管理评论,2019,31(8):295-304.
Li F, Qiao H. Research on the business model evolution of digital technology driven industrial service—A Case study of Goldwind [J]. Management Review, 2019, 31(8): 295-304.
- [14] 胡朝斌,梁昌平,易风,等.多学科交叉复合的新兴工科专业建设与人才培养的探索与实践——以机械电子工程为例[J].高教学刊,2021,7(21):23-26.
Hu C B, Liang C P, Yi F, et al. The exploration and practice of multi-disciplinary cross-combined emerging engineering major construction and talent training: Taking mechatronics engineering as an example [J]. Journal of Higher Education, 2021, 7(21): 23-26.
- [15] 工业和信息化部运行监测协调局.2018年软件和信息技术服务业统计公报[J].智能制造,2019(1):34-37.
Operation Monitoring and Coordination Bureau of Ministry of Industry and Information Technology. Software and information technology services industry statistics bulletin in 2018 [J]. Intelligent Manufacturing, 2019 (1): 34-37.
- [16] 张健,周乃春,李明,等.面向航空航天领域的工业CFD软件研发设计[J].软件学报,2022,33(5):1529-1550.
Zhang J, Zhou N C, Li M, et al. R & D and design of industrial CFD software for aeronautics and astronautics [J]. Journal of Software, 2022, 33(5): 1529-1550.
- [17] Sigmund O, Maute K. Topology optimization approaches [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2013, 48(6): 1031-1055.

- [18] Wu J, Sigmund O, Groen J P. Topology optimization of multi-scale structures: A review [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, 63(3): 1455–1480.
- [19] Wang C, Zhao Z, Zhou M, et al. A comprehensive review of educational articles on structural and multidisciplinary optimization [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, 64(5): 2827–2880.
- [20] Nguyen V P, Anitescu C, Bordas S P A, et al. Isogeometric analysis: An overview and computer implementation aspects [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2015, 117: 89–116.
- [21] Gao J, Wang L, Luo Z, et al. IgaTop: An implementation of topology optimization for structures using IGA in MATLAB [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, 64(3): 1669–1700.
- [22] Gao J, Gao L, Luo Z, et al. Isogeometric topology optimization for continuum structures using density distribution function [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2019, 119(10): 991–1017.
- [23] Zhou Y, Gao L, Li H. Graded infill design within free-form surfaces by conformal mapping [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 224: 107307.
- [24] Gao J, Luo Z, Li H, et al. Topology optimization for multiscale design of porous composites with multi-domain microstructures [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, 344: 451–476.
- [25] Zhou Y, Zhang W H, Zhu J H, et al. Feature-driven topology optimization method with signed distance function [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2016, 310: 1–32.