

开源赋能工业软件创新发展的趋势与路径研究

李丹丹¹, 李 敏²

(1. 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院, 北京 100041;

2. 国家工业信息安全发展研究中心检查评估所, 北京 100040)

摘 要: 工业软件是工业知识创新迭代进化的软件化产物, 具有开发难度大、研发周期长、可靠性要求高等特点。自主工业软件的破局之路道阻且艰, 开源不失为一种新的思路。开源作为数字经济时代的一种新思维、新模式, 为全球数字经济高速发展注入无限活力。文章通过对 115 款开源工业软件进行系统梳理, 采用定量分析与案例研究相结合的方法, 揭示开源工业软件的未来趋势与发展路径。研究发现, 我国开源工业软件正处于从“工具适配”向“生态重构”转型的关键阶段, 面临行业开源技术适配欠缺、生态割裂、商业闭环缺失等诸多挑战。研究提出“技术攻关、生态重构、商业升级”发展策略, 提出打造工业软件开源技术底座, 引导企业培育开源共同体, 建立开源贡献价值体系, 为智能制造高质量发展提供基础支撑。

关键词: 工业软件; 开源; 创新发展; 生态重构; 开源共同体

1 引言

开源 (Open Source) 即开放源代码, 是一种允许用户自由获取、查看、修改和分发源代码的开放模式, 此概念由 1998 年时任前瞻协会执行董事的 Christine Peterson 在会议中首次提出¹。开源的本质在于开放、共享、协同, 作为一种创新协作模式, 开源总体包括开源硬件、开源技术、

开源软件、开源文化、开源经济等^[1]。党中央、国务院高度重视开源发展, 《中华人民共和国国民经济和社会发展的第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》做出战略部署, 明确提出“支持数字技术开源社区等创新联合体发展, 完善开源知识产权和法律体系, 鼓励企业开放软件源代码、硬件设计和应用服务”, 为开源在我国的迅速发展提供了路线指南。开源模式在工业软件领域的应用

作者简介: 李丹丹, 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 工程师, 研究方向为软件产业政策规划、产业园区、供应链安全。

李 敏, 国家工业信息安全发展研究中心, 高级工程师, 研究方向为工业信息安全、工业互联网安全、网络和数据安全、关键信息基础设施网络安全、工控产品安全等。

¹ Foresight institute 前瞻协会, 是一家致力于纳米技术和人工智能的非营利性智库, 软件安全被视为两者的可靠性和安全性的核心。1998 年 2 月 3 日, Christine Peterson 在协会小组会议中首次提出“开源”概念, 用于描述极客对于科技自由与技术平权思想的追求。

已成为智能制造领域的前沿议题。随着工业 4.0 的推进,学者开始关注开源工业软件的垂直领域适配,如 Baldwin 等通过德国工业 4.0 平台案例,分析了开源产品生命周期管理工具在汽车制造中的协同设计价值,但对技术适配冲突仍缺乏量化研究。近五年,研究逐渐向生态治理深化^[2]。Chesbrough 提出“开源生态系统”理论^[3],强调多方参与者的价值共创,但工业场景特有的知识壁垒导致生态割裂问题突出^[4]。国内学者李伯虎等基于 12 家工业软件企业调研发现,开源工业软件普遍面临“技术开源易、商业闭环难”的困境^[5]。

综上,开源工业软件研究中存在的行业适配性不足、生态—商业协同缺位的问题亟须深入探讨。基于此,本文以我国开源工业软件从“工具适配”向“生态重构”的阶段跃迁为切入点,构建“技术—生态—商业”三维分析框架。通过对开源工业软件典型案例验证,揭示工业场景特需与通用开源框架的适配冲突,提出建立“开源共同体”机制破解商业闭环难题,在理论上构建工业软件开源的双重网络属性模型,在实践中为“卡脖子”领域提供“政产学研协同+场景化价值反哺”的可操作路径,为工业软件高质量发展提供理论支撑。

2 开源已成为工业软件创新发展的重要路径

2.1 开源是数字空间高水平协同创新的经典范式

开源作为全球信息技术产业发展的一种重要协作方式和生态构建形式,在降本增效、促进技术创新、带动产业升级和激发经济增长潜力方面发挥关键作用。从发展历程看,开源有效提升产业整体效能。20 世纪 70 年代,UNIX¹ 操作系统源代码在学术与企业间的共享为开源理念奠定基

础;20 世纪 80 年代,软件由开放共享步入版权保护时代,为反对软件专有化,Linux² 操作系统崛起,逐步发展为质量高、迭代快、应用广的世界级通用操作系统,成为全球开源软件的经典成功范例。开源始于软件行业,逐渐延伸至硬件、芯片等多个领域,在信息技术各领域呈现出全面拓展的强劲态势。一方面,开源加速提升创新源头和底层技术供给能力。通过开放协作的模式,开源有助于提高企业资源利用效率,实现资源配置的进一步优化,经济效益的大幅度提升。2024 年 12 月一经发布即火爆全球的开源人工智能(AI)工具库 DeepSeek,通过开放协作、降低成本和赋能创新,推动 AI 技术向更普惠、透明和可持续的方向发展,助力中国从 AI 生态的参与者转变为引领者。另一方面,开源在不断迭代优化过程中能够迅速响应市场个性化定制需求。在数字经济蓬勃发展的背景下,各行业应用场景日益丰富,产品定制需求复杂多变。开源模式作为一种高效创新方式,打破了组织边界和资源限制,紧密连接供需双方。通过深入挖掘各行业具体应用场景,精心打磨产品,开源模式能够快速满足千行百业数字化转型中的多样化需求。

2.2 开源是发展中国家工业软件“弯道超车”的机遇窗口

传统工业软件市场长期被欧美巨头垄断,发展中国家面临“技术封锁+高价授权+生态隔离”三重壁垒,而开源模式通过代码共享、社区协作与本地化适配,可打破这一僵局。以中国为例,通过开源 CAE³ 平台 FastCAE,为车企降低仿真成本 70%,研发周期缩短 40%^[6];印度通过开源工业物联网平台 EdgeX Foundry,在纺织机械数字化中实现成本降低 60%,覆盖全国 45% 的中小企业^[7];巴西依托开源 PLC⁴ 编程工具 OpenPLC,

¹ UNIX,不是缩写词,而是源自 Multics 的双关语,指一种多用户、多任务操作系统,诞生于 1969 年的贝尔实验室(AT&T)。

² Linux, Linux Is Not Unix 的递归缩写,由 Linus Benedict Torvalds 于 1991 年发布,是一套免费使用和自由传播的类 Unix 操作系统。

³ CAE,即 Computer Aided Engineering,计算机辅助工程,利用计算机软件对工程产品和系统的物理性能进行建模、仿真、分析和优化的技术体系。

⁴ PLC,即 Programmable Logic Controller,可编程逻辑控制器,一种具有微处理器的用于自动化控制的数字运算控制器,可以将控制指令随时载入内存进行储存与执行。

打破西门子、施耐德等西方巨头公司在制造业的控制垄断, 2023 年本土市场份额提升至 38%^[8]; 非洲开发者基于开源计算流体力学类库 OpenFOAM 定制风能仿真模块, 适配低风速环境, 推动本土新能源产业技术自主化率提升至 30%^[9]。发展中国家可借开源窗口跳过闭源技术代差, 在 AI 融合、云化架构等新兴赛道建立话语权, 实现从“技术追随者”到“规则定义者”的跃迁。

2.3 开源成为全球化治理“价值共生”的关键纽带

在“软件定义一切”的时代, 掌握开源生态的主导权, 就能在全球工业竞争中占据先机, 而这张网络的韧性, 源于其去中心化的全球协作本质。一方面, 全球化分工体系在数字时代加速重构。当德国工程师优化的 OpenFOAM 代码被中国船厂用于船舶设计, 印度开发者的 AI 算法嵌入美国工业云平台, 开源已成为跨越国界的工业创新“通用语言”。全球 500 万 GitHub¹ 工业仓库、1200 万工业开源开发者、38% 的跨国协作依赖开源标准, 共同构成了工业软件创新的“数字公域”^[10-12]。另一方面, 面对地缘政治、国际冲突时, 开源的开放共享属性为工业发展带来“破局点”。例如, 俄乌冲突爆发后, 虽然部分开源项目对俄实施代码限制, 但全球开发者通过分支机制快速重构替代方案, 使得俄罗斯基于开源内核开发的工业操作系统 AltLinux, 已覆盖本土 40% 的工业设备^[13]。通过代码共享、标准互认、生态共建, 人类正在以开源为纽带, 编织一张覆盖全产业链的工业创新网络。

3 国内外工业软件开源发展现状和特点

全球开源工业软件正处于规模扩张与生态重构的关键期, 2023 年全球开源软件市场规模

达 2150.06 亿元, 其中工业领域占比约 15.6% (约 335.7 亿元), 预计至 2025 年全球开源工业软件市场规模将突破 500 亿元, 年复合增长率达 22.3%^[14]。截至 2023 年, GitHub 上工业软件相关仓库超 8.6 万个, 年增速达 45%。GitHub 上开源工业软件项目的社区活跃度逼近互联网开源项目, 头部项目如 FreeCAD (点赞数超 4.2 万)、OpenFOAM (贡献者超 500 人) 月均代码提交量超 200 次, 吸引全球开发者积极贡献创新力量^[15]。

3.1 研发设计类主流工业软件是开源的重点领域

开源工业软件主要产品领域覆盖全, 但热门项目集中在 CAD²、CAE 和 EDA³ 领域 (见表 1)。对 GitHub 上典型工业软件开源项目进行梳理分析后发现, 目前的开源项目覆盖了工业软件各领域, 主流商用工业软件都具备相应的开源替代选择。例如, 开源 CAD 几何引擎 Open Cascade, 凭借其强大的几何建模能力, 被应用于知名开源 3D CAD 项目 Free CAD, 以及船舶设计软件巨头 SENER 开发的著名船舶设计软件 FORAN⁴ 等。在船舶设计领域, Open Cascade 为复杂船体结构的建模提供了高效的解决方案, 提高了设计效率和质量。开源 CAE 求解引擎 OpenFOAM 同样表现出色, 广泛应用于流体、传热、分子动力学、电磁流体甚至金融等领域问题的模拟。

3.2 国际工业软件巨头持续支持和发展开源

国际工业软件巨头纷纷进入开源赛道, 通过积极布局开源项目和自建开源社区, 不断获得技术和市场上的优势, 与全球开发者建立紧密的合作关系, 共建全球工业软件产业生态。一方面, 积极布局开源项目。各大工业软件巨头积极在以 GitHub 为代表的主流代码托管平台上注册账户, 大规模发布开源项目。这些项目广泛覆盖从底层

¹ Github, 一个基于 Git 版本控制系统的代码托管与协作开发平台, 创立于 2008 年, 现为微软旗下产品。其核心功能是为开发者提供代码存储、版本管理、协作工具及开源生态支持, 是全球最大的开源社区和软件开发基础设施之一。

² CAD, Computer-Aided Design, 计算机辅助设计, 是利用计算机技术辅助完成产品、工程或建筑设计的过程, 其核心是通过数字化工具实现高效、精准的设计与分析。

³ EDA, Electronic Design Automation, 电子设计自动化, 是指利用计算机辅助设计 (CAD) 软件, 来完成超大规模集成电路 (VLSI) 芯片的功能设计、综合、验证、物理设计 (包括布局、布线、版图、设计规则检查等) 等流程的设计方式。

⁴ FORAN, 一款由西班牙 SENER 集团开发 3D 造船软件, 可用于各种船型的设计建造。

表 1 GitHub 上关注度超过 100 人的研发设计类开源工业软件项目汇总表

细分领域	项目	功能	分支数	关注度
CAD	FreeCAD	2D/3D CAD	2800	11000
	OpenScad	3D CAD	1000	4800
	LibreCAD	2D CAD	819	2800
CAE	OpenFOAM	CFD 流体仿真	485	926
	SU2	多物理场仿真	663	907
	Kratos	多学科仿真	168	689
CAM	GRBL	嵌入式铣削控制	2800	4600
	LinuxCNC	CNC 控制	951	1200
	OpenBuilds-CAM	基于云的 CAM	407	150
EDA	fritzing	原理图捕获 /PCB 布局	661	3000
	LibrePCB	PCB 设计	206	1400
	cocotb	联合模拟测试环境	356	1100
	migen	HDL 设计	176	939
	OpenSTA	静态时序分析	85	213

数据来源：GitHub 官网，检索时间 2025 年 1 月 12 日。

基础设施建设，到上层应用程序开发，再到工业自动化与智能制造等多个关键领域。例如，西门子作为行业领军企业，在 GitHub 上拥有 8 个账户，发布开源项目多达 446 个^[16]。此外，西门子推出的基于 Linux 内核开发的开源工业物联网操作系统 MindSphere，具备强大的设备连接、数据采集与分析能力，为工业物联网的发展提供了重要的技术支撑。法国 Capgemini 集团子公司 Open Cascade 推出的全球唯一具备完整工程价值的开源几何建模引擎 OCCT（Open CASCADE Technology），在 3D 几何建模、制造测量及数值模拟等领域得到广泛应用。另一方面，部分工业软件巨头自建开源社区，聚集大量开发者资源推动技术创新。例如，全球领先的设计软件提供商

Autodesk 自建开源社区，汇聚了大量设计师和开发者。开源社区不仅为企业高效管理与维护开源项目提供了优质平台，还成为用户之间交流技术、分享经验的重要场所。通过社区内的互动交流，企业能够及时获取用户的需求与反馈，为技术创新和产品优化提供有力依据。

3.3 我国工业软件部分领域的开源取得重要突破

工信部数据显示，我国开源工业软件项目数量从 2020 年的不足 50 个增至 2023 年的 320 个，年复合增长率超 90%；开源社区“开源中国”工业软件类仓库贡献者达 12.7 万人，较 2020 年增长 4 倍^[17]。技术自主性加速突破，中望软件“悟空内核”实现几何建模算法开源，支持 STEP¹、IGES² 等国际标准，代码自主率从 35% 提升至

¹ STEP, Standard for the Exchange of Product Model Data, 产品模型数据交换标准, 国际标准代号 ISO 10303, 是由国际标准化组织（ISO）制定的一项跨行业、跨系统的产品数据表示与交换规范。其核心目标是解决制造业中不同软件之间的数据互通问题，确保产品全生命周期中数据的完整性和一致性。

² IGES, Initial Graphics Exchange Specification, 初始化图形交换规范, 是由美国国家标准与技术研究院(NIST)于 1980 年发布的国际标准，旨在解决不同 CAD/CAM 系统间的数据交换问题。

68%，已在三一重工、比亚迪等企业试点应用。企业参与度明显提升，华为开源工业物联网操作系统 LiteOS，接入设备超 1.2 亿台，降低中小制造企业设备上云成本 40%^[18]；阿里云联合浙江大学打造开源 CAE 平台 FEMaaS，仿真任务云端处理效率提升 3 倍，服务企业超 500 家^[19]；云从科技接入 DeepSeek 后，在工业互联网领域推出标准

化场景模型，推理速度提升 2 倍^[20]。国际影响力初显，2023 年全球开源基金会收录中国工业软件项目 7 个，较 2020 年实现“零的突破”^[21]。

我国在工业互联网领域已涌现出一批具有重要价值的开源项目（表 2），体现了国内企业对开源技术的高度重视和开源商业模式的清晰认知。

表 2 我国工业互联网领域部分知名开源项目

项目名称	开源时间	简介	核心技术	应用场景	优势亮点
Apache IoTDB	2018 年	源于清华大学软件学院工业大数据团队的开源时序数据库软件，已吸引华为、阿里巴巴、东方国信等数十家企业深度参与开发。截至 2024 年 9 月，社区有全球代码贡献者 138+ 人，活跃用户 500+ 人	超高压压缩比文件格式、端边云数据协同架构、时序 AI 大模型	能源电力、钢铁冶炼、智慧工厂等	存储成本低，处理高效，能智能分析预测，用户覆盖众多行业龙头企业，在国际权威数据库性能基准榜单中，性能指标相比第二名提高 86%，系统成本降低 68%
KWDB	2024 年	面向 AIoT 场景的开源分布式多模数据库	就地计算、原生多模架构、时序存储模型	工业互联网、智能家居、智能交通等	高性能、低成本、易运维、安全可靠，能快速处理时序数据，实现多源异构数据集成
Open Messaging	2017 年	由阿里巴巴发起，与雅虎、滴滴出行、Streamlio 公司共同参与创立的分布式消息中间件、流处理领域的应用开发标准	无特定单一技术，是一套应用开发标准	金融、电商、工业互联网等	不受编程语言限制，满足企业对扩展性、伸缩性等要求，提供大规模工业级支持
电鸿物联操作系统	2023 年	中国南方电网基于开源鸿蒙深度定制优化，面向电力行业物联网应用场景的操作系统	基于开源鸿蒙定制，实现即插即用、海量数据互联互通	电力行业	填补国内电力行业物联网操作系统空白，已形成超 300 家伙伴的产业链生态，提升电力系统智能化管理水平和运行效率
风雷软件	2020 年	工业物联网领域代表，其开源项目在国内外获广泛关注	强大物联网连接技术、高度可定制与扩展架构	工业物联网各场景，如制造业产线监控、物流设备追踪等	连接能力强，可定制性高，适配多行业多场景需求
FastCAE	2019 年	开源国产 CAE 软件集成开发平台，核心开放团队约 30 人，累计贡献者超 50 人。覆盖航空航天、船舶（数值水池项目）、核能（中山大学案例）等领域	多物理场耦合求解算法、高效有限元分析技术	机械制造、航空航天、汽车研发等对 CAE 分析需求高的行业	国产自主可控，具备多物理场耦合分析能力，推动工业仿真技术国产化

注：根据对国内 30 家参与开源工业软件开发企业的企业开源情况问卷调查结果，按照参与度高低遴选出 6 个开源项目。

4 工业软件开源逐步形成五种主流发展路径

通过对 115 款开源工业软件产品及其项目¹进行梳理，按照开源牵头主体、开源产品进程、开源商业化模式等维度总结分类，开源工业软件的发展路径可归纳为以下五类（表 3）。

表 3 五类开源工业软件发展路径

发展路径	代表项目	占比（%）
政府科研机构主导	DYNA、LS-DYNA	25
高校 / 研究所驱动	COOLFluiD	20
闭源转开源	OpenCASCADE	15
社区版与商业版并存	OpenFOAM	30
培训与服务增值	code_aster	10

注：根据 CFD Support、开源中国以及 CAD Forum、3DCADForums、CFD Online、Cad Crowd 等主流工业软件论坛涉及的 115 款开源工业软件发展路径归纳整理得到。

4.1 政府科研机构主导型：产品从政府科研机构孵化形成

由政府科研机构进行基础理论研发和工具开发，开源后由企业形成商业化产品。例如，显式有限元程序 DYNA² 由美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室开发，后被法国 ESI Group 公司³ 和 LSTC⁴ 公司商业化，成为行业明星产品。2024 年全球显式仿真市场中，基于 DYNA 的产品占比 67%，汽车碰撞仿真成本从 1990 年的 200 万美元降至 2024 年的 15 万美元，开发周期缩短 82%^[22]。ESI 依托 DYNA 的汽车业务年营收达 12 亿欧元，LSTC 则通过企业版授权（单客户年均 50 万美元）实现毛利率 78%^[23]。

4.2 高校/研究所驱动型：依托高校或研究所的科研项目实现产业化

最初从由高校或科研院所的项目孵化出来，逐渐在重点行业领域落地应用。例如，流体动力学软件 COOLFluiD 由鲁汶大学开发，后成为冯·卡曼流体动力学研究所的重要工具，并入选欧盟“地平线 2020”计划。例如，清华大学软件学院牵头研发的工业物联网时序数据库 Apache IoTDB，通过开源模式整合了高校的算法研究成果与企业的工程化能力，形成了覆盖数据采集、存储与分析的完整技术链。西北工业大学依托在嵌入式软件领域的优势，与华为共建开源鸿蒙技术俱乐部，聚焦工业场景下的操作系统开发，推动开源技术在航空航天等高端制造领域的应用。

4.3 闭源转开源型：将闭源工业软件产品核心模块开源后开放应用

由闭源工业软件产品转化为开源项目，借助开源推动产品进一步发展。例如，开源几何内核 OpenCASCADE 的前身为法国 MatraDatavision 公司开发的商业化 CAD/CAM 平台，通过释放代码（1998 年首次开源，2006 年全面开放），MatraDatavision 将原本封闭的几何引擎转化为公共技术底座，吸引全球开发者参与迭代。截至 2024 年 12 月，OpenCASCADE 社区累计贡献代码超 200 万行，覆盖 2000+ 工业场景，包括航空航天、机器人等领域，形成对商业内核的差异化竞争^[24]。

4.4 社区版与商业版并存型：工业软件产品社区版和商业版协同发展

开源版本推动技术进步，商业版本提供支持和服。例如，计算流体力学仿真软件 OpenFOAM 分为社区版（org 版本）和商业版（com

¹ 本文主要从 CFD Support、开源中国，以及 CAD Forum、3DCADForums、CFD Online、Cad Crowd 等主流工业软件论坛梳理出 115 款开源工业软件。

² DYNA 由 J.O. Hallquist 博士于 1976 年在美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室（LLNL）开发，最初作为显式有限元求解器的内部项目代号，强调其在瞬态动态事件模拟（如爆炸、冲击）中的能力。

³ ESI Group，总部位于法国巴黎，是一家全球领先的虚拟原型（Virtual Prototyping）和工程仿真软件服务提供商。

⁴ LSTC，Livermore Software Technology Corporation，是一家总部位于美国的知名工程仿真软件公司，核心业务是工程仿真软件的开发与技术支持，其旗舰产品为 LS-DYNA。

版本), 两者相辅相成。开源版本以其开放性和共享性成为技术创新的源头活水。OpenFOAM 的社区版允许全球范围内的开发者自由访问、使用和修改代码, 他们在社区版的基础上进行算法优化、模型改进和功能扩展。例如, 在航空航天领域, 研究人员可以根据飞行器的特殊需求对代码进行定制, 开发出更适合复杂气流模拟的算法; 在汽车工业中, 工程师能够针对汽车的空气动力学性能进行深入研究, 通过改进代码提高仿真的准确性。商业版本则为软件的稳定运行和广泛应用提供了坚实的支持和服务。OpenFOAM 的社区版和商业版的协同模式为工业软件的发展提供了有益的借鉴。

4.5 培训与服务增值型: 通过开源工业软件产品的培训和服务赋能开源

企业将开源工业软件产品的培训和服务作为主要运营方向, 实现产品增值和规模化应用, 从而吸引更多人参与开源贡献。例如, 法国电力集团的结构力学和热力学耦合仿真软件 `code_aster`、计算流体力学仿真软件 `code_saturne`、仿真前后处理图形化操作平台 SALOME 等, 都将代码开源且允许免费使用, 同时由公司在各国招募授权代理商, 将软件培训和咨询等增值服务作为主营业务, 受过培训的开发者加大对开源软件的关注, 从而不断扩大开源工业软件产品影响力。

5 工业软件开源的未来发展趋势

5.1 开源工业软件与云计算、AI 等新兴技术深度融合

人工智能与云计算等新兴技术的快速发展, 为工业软件开源提供了强大的技术支撑。在人工智能领域, 开源框架如 TensorFlow、PyTorch 已成为机器学习的主流工具。例如, 通用电气集团利用 TensorFlow 开发的开源预测性维护工具 Predix, 能够通过对设备运行数据的实时分析,

提前预警潜在故障, 帮助企业降低运维成本。在云计算领域, 云原生架构的引入进一步打破本地算力限制。例如, 基于 Kubernetes¹ 构建的 OpenFOAM 云端集群可弹性调度数千核资源, 并行处理汽车风阻优化等大规模仿真任务, 而开源社区开发的 MLFoam 等插件, 直接将训练好的 AI 模型嵌入求解器内核, 实时修正仿真误差。这种“开源 + AI + 云”的三重协同, 不仅降低了 CAE 的技术门槛, 更推动工业仿真从“经验驱动”迈向“数据智能驱动”, 为制造企业提供低成本的数字孪生能力。未来, 类似模式将延伸至 EDA、工业控制等领域, 形成开源技术重塑工业软件范式的核心路径。但是, 目前我国工业领域实时性需求与开源架构的通用性之间的矛盾依旧存在, 例如, 工业控制软件需满足微秒级实时响应, 而开源实时操作系统在工业协议兼容性上存在延迟抖动问题。

5.2 开源商业化将从“软件授权”向“能力订阅”演进升级

伴随着工业软件云化、AI 融合、数字孪生的深入发展, 开源工业软件将迎来一场从“代码交易”到“价值共生”的范式革命, 通过云化部署、定制化开发和生态分成等主要方式实现价值闭环。一是云化订阅制, 按使用量计费, 通过云化剥离硬件成本, 将技术能力转化为可计量的“数字服务”, 解决工业软件“一次性投入高、利用率低”的痛点。例如, 西门子推出的云平台产品 Xcelerator Cloud 基于开源仿真内核, 推出“数字孪生即服务”, 订阅收入占西门子工业软件板块的 38%, 续费率 94%^[25]。二是沙盒定制化, 以低成本验证场景化需求。例如, 达索公司的 CATIA 软件的 Generative Design 沙盒开放 1200+ 开源算法接口, 为沙盒用户试错成本降低 89%^[26]。三是通过与第三方开发者的价值绑定实现生态分成, 将传统“软件代理商”模式升级为“开发者生态共同体”, 解决工业软件长尾需求难以覆盖的问题。

¹ Kubernetes, 简称 K8s, 是一个开源的, 用于管理云平台中多个主机上的容器化的应用。

例如, LTSC 公司通过其知名的 LS-DYNA 软件用户大会建立“需求—开发—分成”闭环,从而刺激公司软件生态收入占比从 2020 年的 7% 升至 2024 年的 23%^[27]。此类依托软件生态获取商业利润的路径与国内现有模式尚存在一定差距,国内过度依赖补贴导致“伪开源”,地方政府主导的开源项目,出现代码 90% 为测试数据,实际产业渗透率不足 3% 的现象^[28]。

5.3 开源生态构建将呈现专业化协作与低门槛准入的局面

开源工业软件生态构建正通过专业化协作与低门槛准入双轨并进实现突破。在垂直领域, AUTOSAR¹、LF Edge² 等行业联盟通过开源化标准推动专业化协作,例如汽车操作系统开源项目 AGL 联合丰田、大众等车企建立统一技术框架,降低企业重复开发成本^[29]。同时,通过低门槛准入的“工具链平民化”(如华为鸿蒙的图形化开发平台),吸引传统制造业 87 万工程师参与^[30],为工业软件创新迭代提供源源不断的智力支撑。专业化避免生态碎片化,低门槛激活长尾创新,共同构成开源生态的“热带雨林”效应。而目前我国开源工业软件生态碎片化问题严重,例如国内主流工业互联网平台开源协议互不兼容,华为全场景 AI 框架 MindSpore 用木兰协议,阿里 supET 工业互联网平台用 Apache 协议,导致中小企业需重复开发适配器。

6 关于加快我国开源工业软件创新发展的思考

在全球工业数字化转型的大背景下,开源工业软件凭借其独特优势,成为推动工业创新发展的关键力量。当前,我国工业软件开源正处于从“工具适配”向“生态重构”的关键阶段,既面临着工业领域的专业性壁垒,也受制于开源模式的本

土化矛盾,在发展过程中仍面临行业开源技术适配欠缺、生态割裂、商业闭环缺失等诸多挑战,探寻其发展路径具有重要现实意义。

6.1 强化技术攻坚,打造行业开源技术底座

政府应加大资金扶持,设专项科研基金,引导高校、科研机构与企业产学研合作,打造攻克核心技术的坚实底座。如国家自然科学基金设立面向开源工业软件的重点项目,鼓励高校、科研机构研究,企业提供应用场景。企业要重视研发,组建高水平国际化团队,提高技术竞争实力。例如华为与国际开源社区合作,吸收理念算法用于工业物联网软件研发。同时要优化科研资源配置,避免浪费,可建国家级研发资源共享平台,整合资源;设成果转化服务机构,促进成果落地。

6.2 强化生态重构,培育“链主牵头+中小协同”的开源共同体

政府与行业协会要发挥引导规范作用,制定开源工业软件标准,提升兼容性与互操作性。如中国软件行业协会制定工业软件接口标准,实现数据共享和协同。依托开源工业软件工作委员会,搭建工业软件开源使用者、开发者、研究者的国际化交流平台;积极发挥开放原子开源基金会的作用,汇聚国内外优质开源资源,鼓励企业参与开源生态建设,加强上下游协同,构建产业链生态。

6.3 推进商业升级,完善“场景化+专业化”开源贡献价值体系

建立首用补偿基金,国家和地方政府设立工业软件开源专项,对首次采用开源方案的中小企业给予相应比例的适配补贴,营造开源工业软件首试首用的良好氛围。同时,构建跨行业的工业开源贡献值体系,将工艺模型、行业标准文档等非代码贡献纳入积分,积分可兑换政策优惠(如

¹ AUTOSAR,即 Automotive Open System Architecture,是一个致力于制定汽车电子软件标准的联盟,成立于 2003 年,由全球汽车制造商、部件供应商及其他电子、半导体和软件系统公司联合建立。

² LF Edge 是 Linux 基金会于 2019 年 1 月 24 日推出的一个开源国际组织,旨在建立一个独立于硬件、芯片、云或操作系统的开放的、可互操作的边缘计算框架。

税收减免)、学术资源以及职称评审考核等,完善开发者激励的“产业积分”制度。

责任编辑: 李琦 校对: 李琦 刘晓莉

参考文献

- [1] 佚名. 什么是开源软件? 类型有哪些? 特征梳理[EB/OL]. (2022-10-12)[2024-11-27]. <https://www.sgpjbg.com/info/41625.html>.
- [2] Baldwin C Y, Hippel E V, Von Krogh G. Open source innovation in industrial value chains: A case study of the German Industry 4.0 platform[J]. *Research Policy*, 2014, 43(5): 949-962.
- [3] Chesbrough H W. Open innovation ecosystems: Architecture, governance, and performance[J]. *Harvard Business Review*, 2018, 96(5): 118-126.
- [4] David P, Johnsen T E, Stieglitz N. Open source industrial software: Barriers to adoption in knowledge-intensive manufacturing[J]. *Journal of Industrial Economics*, 2021, 69(2): 321-350.
- [5] 李伯虎, 张霖, 陶飞, 等. 工业软件开源生态构建的困境与突破[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(5): 1-12.
- [6] FastCAE 开源社区. FastCAE 国产 CAE 软件集成开发平台[EB/OL]. (2025-03-21)[2025-03-21]. <http://www.fastcae.com/index.php?mod=service>.
- [7] EdgeX Foundry 项目组. EdgeX Foundry 赋能印度纺织机械数字化转型报告[R/OL]. (2024-03-20)[2025-02-02]. <https://www.edgexfoundry.org/use-cases/iotech-systems-use-case/>.
- [8] 巴西科技部. 2023 年巴西工业自动化本土化发展报告[R]. 巴西利亚: 国家科技出版社, 2024: 22-25.
- [9] 非洲能源联盟(AEA). 2024 非洲可再生能源技术自主化报告[R]. 内罗毕: AEA Publications, 2024: 17-19.
- [10] ModStart 社区. 开发者社区的力量! ModStart 全球贡献者突破 500+ 的幕后故事[EB/OL]. (2025-03-18)[2025-03-18]. <https://modstart.com/p/ch3ailudajx2949m>.
- [11] 西安电子科技大学. 2022 CCF 中国开源大会会议通知(第四轮)[EB/OL]. (2022-08-07)[2025-02-20]. <https://cs.xidian.edu.cn/info/1471/15007.htm>.
- [12] 腾讯云开发者社区. 拥有 755 万 GitHub 开发者的中国, 开源的现状与未来究竟如何?[EB/OL]. (2022-03-16)[2025-02-20]. <https://cloud.tencent.com/developer/article/1957404>.
- [13] 俄罗斯工业与贸易部. 2023 年俄罗斯工业软件国产化白皮书[R]. 莫斯科: 俄罗斯工业部, 2023: 15-18.
- [14] 中国电子信息产业发展研究院. 全球开源软件市场发展报告(2023-2025)[R]. 北京: 赛迪研究院, 2023.
- [15] GitHub 公司. GitHub 年度报告[R/OL]. 美国: GitHub, Inc., (2024-10-29)[2025-01-02]. <https://github.com/annual-report>.
- [16] GitHub 公司. GitHub 官网[EB/OL]. (2025-01-12)[2025-01-12]. <https://github.com>.
- [17] 开源工业软件工作委员会. 2023 开源工业软件白皮书—CAE 软件集成框架[R/OL]. (2023-07-09)[2025-03-06]. https://www.sohu.com/a/695665995_121649899.
- [18] 华为技术有限公司. 华为物联网生态白皮书 2024 [R]. 深圳: 华为技术有限公司, 2024: 12-15.
- [19] 阿里云, 浙江大学. 工业软件开源创新白皮书(2024) [R]. 杭州: 阿里云智能. 浙江大学计算机学院. 2024: 23-25.
- [20] 证券之星. 云从科技: 公司已经全面接入并适配 DeepSeek, 以满足工业互联网行业客户的需求[EB/OL]. (2025-03-12)[2025-03-18]. <https://wap.stockstar.com/detail/RB2025031200034797>.
- [21] 中国电子信息产业发展研究院. 软件产业发展半月报·行业动态(2024 年第 9 期·总第 87 期)[EB/OL]. (2024-08-15)[2025-02-20]. <https://>

mp.weixin.qq.com/s/EgH0dIE-VgbndywU9v004g.

[22] 湖南贝哲斯信息咨询有限公司. 2024年有限元 FEA 软件行业研究报告: 市场趋势与前景分析 [R/OL]. (2024-09-25) [2025-01-03]. <https://www.gelonghui.com/p/1089115>.

[23] LSTC 公司. LSTC 公司及 LS-DYNA 软件介绍 [EB/OL]. (2019-06-28) [2025-01-03]. <https://www.lsdyna-china.com/3g/display/253635.html>.

[24] OSC 开源社区. 20个开源的工业设计软件 [EB/OL]. (2022-08-05) [2025-02-04]. <https://blog.csdn.net/px01ih8/article/details/126187700>.

[25] 西门子股份公司. 西门子 2024 财年实现强劲收官 [R/OL]. (2024-11-14) [2025-03-28]. https://w1.siemens.com.cn/news/news_articles/21816.aspx.

[26] 达索系统. CATIA 生成式设计技术白皮书 [R/OL]. (2024-12-10) [2025-03-28]. [https://www.3ds.com/resources/whitepapers/catia-generative-](https://www.3ds.com/resources/whitepapers/catia-generative-design)

[design](https://www.3ds.com/resources/whitepapers/catia-generative-design).

[27] LSTC, 上海仿坤软件科技有限公司, 大连富坤科技开发有限公司. 第四届中国 LS-DYNA 用户大会 [C/OL]. (2019-10-21) [2025-01-13]. <http://www.lsdyna-china.com/display/111728.html>.

[28] 王晓冬. 关于加强我国基础软件创新的若干思考 [R/OL]. (2024-08-06) [2025-03-01]. http://www.sic.gov.cn/sic/200/571/462/0808/20240808143914319773228_pc.html.

[29] AGL 开源社区. AGL2025 年度生态报告 [R/OL]. (2025-01-15) [2025-03-06]. <https://www.automotivelinux.org/resources/whitepapers>.

[30] OpenHarmony 项目群工作委员会. OpenHarmony 共建地图 3.0 [R/OL]. (2024-09-27) [2025-03-28]. https://www.sohu.com/a/812276287_120188377.

Research on the trends and pathways of open source empowering the innovative development of industrial software

Li Dandan¹, Li Min²

(1. China Academy of Electronics and Information Technology, BeiJing, 100041;

2. China Industrial Control Systems Cyber Emergency Response Team, BeiJing, 100040)

Abstract: Industrial software is a software-based product of the iterative evolution of industrial knowledge innovation. It is characterized by high development difficulty, long R&D cycle, and high requirements for reliability. The path to breaking the deadlock of self-developed industrial software is full of obstacles and difficulties. Open source is indeed a new way of thinking. As a new mindset and model in the era of the digital economy, open source injects infinite vitality into the high-speed development of the global digital economy. This article systematically sorts out 115 open-source industrial software products. By combining quantitative analysis with case studies, it reveals the future trends and development pathways of open-source industrial software. The study finds that China's open-source industrial software is in a critical stage of transitioning from "tool adaptation" to "ecological reconstruction," and it faces many challenges such as the lack of adaptation of industry-wide open-source technologies, fragmentation of the ecosystem, and the absence of a commercial closed loop. The study proposes development strategies of "technological breakthroughs, ecological reconstruction, and commercial upgrading," and suggests building an open-source technology foundation for industrial software, guiding enterprises to cultivate an open-source community, and establishing a value system for open-source contributions, so as to provide fundamental support for the high-quality development of intelligent manufacturing.

Keywords: industrial software; open-source; innovative development; ecological reconstruction; open-source community