

附件 3

“网络协同制造和智能工厂”重点专项

2021 年度项目申报指南建议

(征求意见稿)

为落实《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》《国家创新驱动发展战略纲要》《“十三五”国家科技创新规划》等提出的要求，国家重点研发计划启动实施“网络协同制造和智能工厂”重点专项。根据本重点专项实施方案的部署，现提出 2021 年度项目申报指南建议。

1. 基础支撑技术

1.1 工业边缘计算系统级建模语言设计与工具研发

研究内容：针对工业边缘计算高复用、可移植等应用设计的需求，研究支撑控制、组态、数据等多种应用开发的系统级图形化建模语言；研究微服务与轻量化容器的工业边缘应用部署、移植与动态重构方法；研究面向工业边缘计算建模语言的确定性分布式计算模型。

考核指标：形成工业边缘系统级建模语言，实现不少于 10 种常用工业边缘计算语言混合设计编译；研发一套建模语言集成开发环境以及运行时系统，支撑不少于 5 种工业边缘计算应用开发，在汽车、物流等大规模生产行业开展应用验

证；在系统级建模语言与运行时方面，制定国家或国际标准不少于 3 项，获得软件著作权不少于 5 件，申请发明专利不少于 5 项。

1.2 基于区块链的可信工业互联网关键技术

研究内容：针对大规模工业互联网场景下的可信数据交互和协调制造需求，研究网络内生的工业区块链架构，设计大容量、低时延和可扩展的区块链共识机制，研究适配工业制造场景的物联数据智能采集合约和制造实体智能协同合约；研究内置区块链的可信数据传输技术，建立物联节点、边缘设备和制造实体的全局唯一网络标识，基于区块链共识反馈实现标识节点的安全属性评估，基于节点安全属性评估实现内生安全的弹性传输机制；研究去中心化的可信协调制造技术，以区块链共识算法驱动制造任务一致性协同，基于区块链溯源机制实现下发制造指令的全周期监测，基于节点内置智能任务合约，实现下发指令的快速协同处理；研制“区块链+”智慧工业原型平台，验证集成方案和系统指标。

考核指标：围绕“区块链+”智慧工业原型平台，开发软件构件不少于 10 个，具备区块链即服务能力，上链节点不少于 1 千个，最大任务处理能力不少于 1 千条/秒；具备节点安全属性评估和可信数据交互能力，支持最大并发分析流数量不少于 10 万条/秒，支持不少于 6000 种攻击检测；具备去中心化的制造任务协同能力，支持对 OPC、Modbus

TCP/Modbus RTU、Siemens S7、Ethernet/IP(CIP)、MMS、IEC104、DNP3 等不少于 50 种主流工业协议的深度解析；“区块链+”智慧工业原型平台在车辆装配、能源电力等大规模生产行业开展不少于 2 个应用验证，支持不同行业的快速重构；在工业区块链技术方面获得软件著作权不少于 10 件，申请发明专利不少于 10 项。

1.3 场景驱动的产品生态数据空间设计理论与方法

研究内容：面向制造业产品场景化应用的大规模个性化定制需求，针对跨企业产品生态难互通、服务碎片、设计生产交付难同步等问题，围绕产品生态数据生成、汇聚、存储、分析、使用和销毁全过程，研究场景驱动的产品生态数据空间设计理论，研究跨企业产品生态异构数据采集汇聚、数据建模、清洗融合、关联表示、可靠存储、可信交换、快速索引、集成演化等方法；研究场景驱动的产品生态数据空间服务引擎，形成基于跨企业产品生态数据空间的知识图谱构建、知识挖掘、主动决策及智能服务等方法及技术；研制场景驱动的产品生态数据空间管理原型系统，实现场景驱动的产品生态数据空间构建、服务和管理，并形成典型解决方案。

考核指标：建立场景驱动的产品生态数据空间设计理论与方法体系，形成产品生态数据生成、汇聚、存储、分析、使用和销毁全过程的数据体系架构。提出场景驱动的产品生态数据空间服务引擎，开发产品生态数据空间构建及知识挖

掘、主动决策和智能服务软件构件不少于 10 个，构建跨企业产品生态百万级结点、千万级边知识图谱。研制场景驱动的产品生态数据空间管理原型系统，在家电、电子等大规模生产行业，围绕核心制造企业及不少于 200 个产品生态合作企业开展应用验证，实现产品生态协同服务效率提升不少于 20%。制定国家、行业或企业标准不少于 2 项，获得软件著作权不少于 5 件，申请发明专利不少于 5 项。

1.4 工业大数据驱动的产品质量智能管控理论和方法

研究内容：针对工业环境中资源分散、时延敏感、机理复杂等因素导致的产品质量难以得到有效管控的问题，研究面向产品质量的多过程汇聚的“工业互联网+”大数据集成标准和模式，以及基于工业互联网、OT/IT 融合、云边协同的产品质量大数据服务架构；研究工业大数据驱动的数据模型构建、评估以及数据模型与机理模型的融合理论和方法，揭示生产、运维与设备故障之间的数理因果关系；研究复杂工业场景中基于机器视觉和深度学习的影响产品质量的生产操作行为识别和异常事件探测技术，以及产品质量相关的动态不确定业务过程建模、挖掘、优化和预测方法；面向电气、能源、特种设备等大规模生产行业开展相关理论、方法和技术的应用验证。

考核指标：围绕工业大数据驱动的产品质量智能管控理论和方法，开发多源工业大数据集成融合、生产操作行为识

别、异常事件探测、业务过程挖掘和预测等软件服务构件不少于 10 个；构建不少于 10 个产品质量相关的工业大数据典型应用场景，形成不少于 10 种场景应用算法；开发工业大数据驱动的产品质量智能管控软件系统原型，实现多级覆盖的产品质量大数据汇集、分析、管控和可视化，降低产品缺陷率不低于 10%，面向电气、能源、特种设备（不少于 2 个）等大规模生产行业开展应用验证；在多源工业大数据集成模式、产品质量智能管控等方面，制定国家、行业（联盟）或企业标准不少于 3 项；获得软件著作权不少于 5 件，申请发明专利不少于 5 项。

1.5 制造业价值链多维数据空间及服务理论

研究内容：解决制造业价值链中的数据维度多、综合管理复杂、服务价值受限等问题，研究制造行业全业务流程及价值链多维数据的集成融合方法，研究多维数据空间模型、数据空间全周期过程的可视分析理论和动态数据可视化方案；研究多维协同数据体系架构，探索多维数据空间协同模式与优化管控机理，建立数据交互与共享机制；研究面向制造产品生命周期的价值链多维数据分析方法，探索面向多角色的产品知识生成技术，形成多维数据空间的服务技术体系；在汽车、轨道交通等典型离散制造行业开展应用验证。

考核指标：建立面向制造产品生命周期价值链的多维协同数据体系架构，形成制造业价值链多维数据空间协同服务

理论与方法。围绕制造业价值链数据空间管理与服务，开发多维数据空间集成融合、优化管控、分析服务等软件构件不少于 10 个，并在汽车、轨道交通等典型离散制造行业得到应用验证，实现数据服务价值的提升。获得软件著作权不少于 5 件，申请发明专利不少于 5 项。

1.6 网状结构多价值链协同数据空间设计方法

研究内容：围绕打破制造业传统价值链协同体系造成的数据孤岛、业务孤岛和价值链孤岛，推进链式结构向网状结构价值链发展的重大需求，研究多链协同数据空间模型、体系架构以及网状结构多价值链协同数据运行体系设计方法；研究网状结构多链业务协同技术、业务数据模型以及多链协同数据空间管理引擎设计方法；研究网状结构多链数据融合、智能分析以及多链服务引擎设计技术和方法；研发网状结构多价值链数据空间管理及服务构件，在具有规模数据的典型第三方价值链协同平台得到验证。

考核指标：突破不少于 3 项网状结构多价值链协同数据空间设计的关键技术，形成网状结构多价值链协同数据体系架构、多价值链协同数据空间设计方法，研发数据空间管理和服务软件构件不少于 10 个，获得软件著作权不少于 5 件，申请发明专利不少于 5 项。在具有规模数据的典型第三方价值链协同平台得到验证。

1.7 工程知识与数据融合驱动的复杂产品一体化智能设

计方法

研究内容：针对复杂产品设计迭代频繁、仿真验证周期长、成本高，制约设计效率提升等问题，研究数据驱动的复杂产品一体化智能设计方法，重点研究设计知识建模及其统一量化表征方法、知识表征嵌入的模型辨识仿真方法、基于梯度的一体化多学科智能优化方法，搭建工程知识与数据融合驱动的一体化多学科智能设计软件系统。

考核指标：研发 1 套工程知识与数据融合驱动的多学科智能设计软件系统，并在航天、兵器等行业开展应用验证，实现典型复杂产品的总体关键性能指标提升 20%以上，设计效率提升 30%以上；申请发明专利不少于 6 项，获得软件著作权不少于 1 件，出版相关专著不少于 1 部。

1.8 共形几何驱动的建模-分析-设计一体化技术及工具

研究内容：解决航空航天、海洋工程、柔性电子等领域的高端装备中复杂曲面构件描述复杂，分析精度欠佳，以及几何建模、结构分析、优化设计过程割裂等问题：研究复杂曲面参数化建模与连续描述技术，实现三维曲面数字几何到二维标准空间的共形映射，完成 CAD、点云等数据的高精度分析及共形参数化；探索大规模曲面构件的高精度性能分析方法，研究基于共形几何描述的复杂曲面等几何分析策略，实现曲面构件的高精度、跨尺度性能分析计算；研究基于共形几何的跨尺度复杂曲面结构优化设计和功能材料填充技

术，建立共形几何驱动的复杂超轻质装备优化设计理论体系和设计模式；研究复杂曲面构件几何建模-结构分析-优化设计一体化方法，开发覆盖产品设计周期的软件工具，模块化复杂曲面的几何建模、结构分析、优化设计过程，开展共形几何驱动的复杂曲面构件几何建模-结构分析-优化设计一体化技术的典型行业应用。

考核指标：建立基于共形几何的复杂曲面低维标准空间参数化建模、结构性能分析、优化设计、共形映射等方法，形成复杂曲面的几何建模-结构分析-优化设计一体化模式；围绕复杂曲面构件研发，开发共形几何驱动的几何建模-结构分析-优化设计一体化软件工具 1 套，支持 CAD、点云等不少于 2 种典型数据格式；在航空航天、海洋工程、柔性电子（不少于 2 个）等高端装备研制领域开展应用验证，典型设计方案与传统设计相比减重 15%以上，复杂装备完整微结构占总微结构数目的比例 99%以上，低维标准空间结构分析结果较试验分析结果精度差异不大于 5%；获得软件著作权不少于 4 件，申请发明专利不少于 5 项。

1.9 智能生产单元人机交互与自主协同控制技术

研究内容：针对智能工厂环境下人机交互、多机协作等复杂作业需求，围绕智能生产单元人机交互、作业协同、资源适配等核心问题，研究基于增强现实的智能生产单元仿真布局与人机交互验证技术，多机多工序路径规划与自主协同

控制技术，面向柔性产线布局的多工位物流协同配送技术，建立智能生产单元人机交互与自主协同控制核心模型与算法库，研发智能生产单元协同作业控制原型系统，选取典型行业进行应用验证。

考核指标：突破不少于 3 项智能生产单元人机交互与自主协同控制关键技术；研发 1 套智能生产单元协同作业控制原型系统，支持智能生产单元柔性布局、多机协作、多工位物料协同配送等作业活动；形成人机交互与自主协同控制核心模型与求解算法库 1 套，支持基于视线追踪的智能人机交互，申请发明专利不少于 5 项，获得软件著作权不少于 2 件，制定国家、行业/团体或企业相关标准不少于 2 项；在航空、航天、汽车（不少于 2 个）等行业进行应用验证。

1.10 数据/模型混合驱动的生产线智能协同与自主决策理论

研究内容：针对数据/模型混合驱动的定制化产品生产线的智能协同与自主决策需求，研究复杂环境下人机物协同认知与智能交互机理，提出智能生产线自主协同控制与优化决策理论方法；研究不确定环境下数据/模型混合驱动的生产线的协同认知与控制决策方法，攻克数据、模型耦合不足及外界干扰情况下对制造环境的智能认知、协同交互、推理预测、自主决策等核心关键技术，解决残缺数据与不精确模型的智能解析问题；研究数据/模型驱动的复杂场景多任务生产线动

态重构技术，构建基于知识图谱与数字孪生的生产制造过程资源智能协同与优化决策系统。

考核指标：围绕创新性数据/模型混合驱动的人机物法环生产线智能制造技术体系架构，研制生产线数字孪生协同优化，语境组态以及重构软件构件不少于 10 个。在汽车、电子（不少于 2 个）等大规模生产过程开展理论验证，在数据、模型不完整的复杂环境下，自主智能协同任务完成率提高 30% 以上。形成基于知识图谱的智能生产过程验证原型系统，制定国家、行业（联盟）或企业标准不少于 3 项；获得软件著作权不少于 5 件，申请发明专利不少于 10 项。

1.11 基于增强现实的可视化智能装配关键技术与算法

研究内容：针对复杂产品装配效率低、装配状态不可控等问题，开展人机融合的可视化智能装配技术研究，重点研究基于增强现实的智能装配辅助技术，实现智能装配过程的虚实融合；研究基于人机融合的复杂产品智能化装配状态监控技术；研究基于视线追踪的可视化智能装配检测方法，实现装配质量的在线检测；研发基于增强现实的智能装配可视化分析原型系统，并在典型行业进行应用验证。

考核指标：突破不少于 3 项智能装配可视化、装配质量在线检测等关键技术与算法；开发 1 套基于增强现实的智能装配车间可视化分析原型系统，在航空、航天、兵器、汽车（不少于 2 个）等行业进行应用验证，实现复杂产品的可视

化智能装配，装配效率提升 20%；申请发明专利不少于 5 项，获得软件著作权不少于 2 件，制定国家、行业/团体或企业相关标准不少于 2 项。

1.12 数据驱动的多价值链群智协同服务技术与方法

研究内容：面向制造企业及协作企业群形成的产业价值链，针对基于第三方平台构建的多价值链协同体系，研究价值链协同数据的可信性、多义性、相似性以及制造业多价值链协同数据体系架构；研究数据驱动的多价值链服务感知、价值挖掘、关联匹配、多链服务等群智协同技术和方法，探索基于第三方云平台的多价值链群智协同服务模式；研发数据驱动的多价值链群智协同服务构件，选择典型大规模生产行业、支持多价值链协同的第三方平台得到应用验证。

考核指标：突破不少于 3 项基于第三方平台的数据驱动多价值链群智协同服务技术，构建形成制造业多价值链协同数据体系架构，研发数据驱动的多价值链群智协同服务构件不少于 10 个，获得软件著作权不少于 5 件，申请发明专利不少于 5 项，在制造业多价值链协同数据体系方面，制定国家、行业（联盟）或企业标准不少于 3 项。成果在大规模生产行业、支持多价值链协同的第三方平台上得到应用验证。

1.13 基于云边环境的智能装备精准运维大数据分析技术

研究内容：面向智能装备运行预测与精准运维的需求，

研究机理模型与数据驱动结合的健康评估、故障诊断、寿命预测算法，实现自学习、自诊断功能；研究基于工业云的具有隐私保护、可信认证设备模型构建方法；研究云边协同的数据分析任务全计算过程优化部署方案,开发相应工业云平台及算法库、模型库，并进行平台与软构件的验证。

考核指标：搭建工业云平台，开发 100 项以上的共性算法，构建 10 项以上智能装备自学习，自诊断模型；优化部署方案提升资源利用率不低于 30%；开发支持健康管理、故障溯源、寿命预测等 APP 不少于 3 种；申请发明专利不少于 4 项，获得软件著作权不少于 5 件；在核工业、机器人领域开展应用验证。

1.14 极端服役功能驱动的超大型结构极限轻量化智能设计技术及软件

研究内容：针对航空、航天、兵器等领域超大型结构的超高承载、极端隔热、高强冲击等力热服役环境需求，以及极限轻量化功能设计难、巨量数据计算处理效率低、材料-结构-功能一体化智能设计软件缺失等瓶颈问题，研究力、热功能驱动的晶格材料跨尺度计算方法，超高承载、极端隔热、高强冲击等极端服役功能驱动的材料分布表征建模及结构性能映射规律，材料、结构与功能的智能匹配优化设计方法，形成服役功能驱动的超大型结构极限轻量化智能设计理论。突破超大型结构设计-仿真-优化统一模型构建、大规模几何

数据多物理信息表达及过程数据高性能高效率处理、超大规模点阵结构主动可控优化设计与智能等效计算、超大型结构高效拓扑智能优化设计等关键技术，研发自主可控的超大型结构极限轻量化智能设计软件原型系统，在航空、航天、兵器等领域开展超大型结构件设计制造应用验证。

考核指标：针对极端服役功能驱动的超大型结构极限轻量化智能设计需求，开发超大型构件材料-结构-功能-工艺一体化建模、高性能高效计算与智能设计等关键软件构件不少于 12 个，形成超大型构件智能设计核心算法库，包括主动可控优化设计、智能等效计算、工艺数据高效处理等核心算法，建立极端服役功能驱动的超大型结构极限轻量化智能设计理论；构建超高承载、极端隔热、高强冲击等极端力热功能微结构，实现结构耐冲击损伤能力提升 20%；研发自主可控的超大型结构件极限轻量化智能设计软件原型系统 1 套，支持 1000 万以上有限元网格模型的高效数值计算，支持不少于 10 万个周期性点阵结构高效建模；在航空、航天、兵器等大规模生产行业开展不少于 5 件超大型构件的设计制造应用验证，构件单向尺寸不小于 2 米或表面积不小于 5m²；相对于传统结构及制造工艺，超大型构件减重 30%以上，设计效率提升 20%以上，工艺数据处理效率提升 50%以上；在超大型构件数值计算、智能优化设计等方面申请发明专利不少于 10 项；在一体化智能设计软件方面获得软件著作权不

少于 6 件。

2. 工业软件技术

2.1 工业智能软件敏捷开发理论与方法

研究内容：针对工业智能应用需要满足非 IT 背景的最终用户开发、基于预测分析精度的模型与服务优化迭代、实现从工业过程驱动转变为工业数据驱动的颠覆性变化，研究工业智能软件工程方法学，研究预测分析智能评估指标驱动的软件迭代过程模型，研究面向工业最终用户、低代码、组件化的工业智能软件开发与运行一体化平台关键技术。

考核指标：面向工业智能软件敏捷开发与持续迭代需求，研发一套融合 CRISP-DM、MDA 框架的工业智能应用软件架构体系，面向特定领域的应用快速组装平台，以及工业数据智能驱动的软件构件库 1 套，并在 3 个以上智能工业互联网应用场景下进行应用验证。制定行业、团体、企业标准不少于 3 项，申请发明专利不少于 5 项，获得软件著作权不少于 5 件。

2.2 智能制造执行系统中生产设备统一信息建模、智能感知及动态集成方法和使能工具

研究内容：针对量大面广生产设备密集型制造车间在 MES 实施与应用过程中多型异构生产设备的智能优化管控需求，研究生产设备全制造过程统一信息模型构建方法，建立面向制造全过程的生产设备特性信息知识库和模型库；攻

克生产设备智能化互联感知、人机交互、云端化普适接入、云边协同优化运行等关键使能技术，开发弱耦合、高内聚及高自治的生产设备优化运行构件；研发支持广域异构生产设备互联感知、动态适配与集成优化管控的智能制造执行系统，并面向典型行业企业开展示范应用。

考核指标：构建生产设备统一信息模型不少于 50 类；围绕生产设备集成优化运行核心功能，开发生产设备智能接入与云边协同软件构件不少于 10 个；研发智能化制造执行原型软件 1 套，并面向航空航天、新能源汽车等不少于 3 家典型行业企业开展示范应用，实现关键生产设备运行状态信息的实时感知与云端管理，支持生产工艺决策、生产质量优化等关键业务执行全过程的云边协同运行，生产设备互联感知覆盖率不低于 90%，生产运行效率提升不低于 10%；在生产设备云边协同管理方面，制定国家、行业（联盟）或企业标准不少于 2 项；申请发明专利不少于 5 项，获得软件著作权不少于 10 件。

2.3 面向增材制造的多物理场耦合优化方法研究及工具开发

研究内容：针对航空航天、汽车、能源动力等工业领域对产品结构功能和性能的创新需求，研究面向力学特性、散热、导流、电磁辐射等多物理场耦合的基于密度梯度的变边界载荷隐式加载方法、边界控制拓扑优化方法；研究综合考

考虑结构支撑/表面粗糙度/打印方向/多工序协同加工等增材制造工艺约束的产品结构创成式设计方法；开发面向增材制造的固、热、流、电磁等多物理场耦合优化软件工具。

考核指标：攻克面向增材制造的多物理场耦合优化的关键技术 3 项以上；研发一套软件工具，支持固、热、流、电磁等多物理场的耦合优化，支持结构支撑/表面粗糙度/打印方向/多工序协同加工等增材制造工艺约束，设计变量规模 500 万以上；开发面向热固耦合、热流耦合、热光耦合新型结构不少于 3 个，采用增材制造加工优化结构并验证散热导流等性能；申请发明专利不少于 5 项，获得软件著作权不少于 2 件。

2.4 大型复杂颗粒-流体系统的高精度建模优化关键技术与软件开发

研究内容：针对大型复杂极端条件下的大规模颗粒-流体系统的高精度数学建模需求：提出具有广泛尺寸分布的大规模颗粒群与流体耦合作用以及颗粒群碰撞的高精度建模优化理论和技术；提出高速度和温度梯度以及复杂多相等极端情况下流-固耦合动量、热量或质量传递的高精度稳定数值算法；提出复杂运动情况下颗粒-壁面磨蚀或高温烧蚀的高精度模型和算法。

考核指标：围绕复杂极端工况下颗粒-流体多物理场耦合作用工程问题，攻克关键技术 3 项以上，开发数值模拟软件

不少于 3 套，在航天发动机、矿物加工、水泥工业和能源环保等工业产品设计中开展工程试用，模拟的颗粒数量达到 10^{12} 以上并考虑颗粒群碰撞，颗粒对壁面的磨蚀或烧蚀模型支持运动情况下壁面形状的快速改变，其两相或多相流动损失等关键指标预测精度高于颗粒追踪模型（LPT）5%以上或者达到物理实验的 85%以上；申请发明专利不少于 5 项，获得软件著作权不少于 3 件。

2.5 面向网络协同制造的开放性知识融合与服务技术

研究内容：针对网络协同制造的多源知识融合、智能检索和主动服务等需求，研究制造服务领域知识组织和融合方法、知识图谱的智能构建技术及方法；研究开放性知识融合与服务技术标准体系和基于知识图谱的智能服务支持模型，并在典型网络协同制造平台中开展应用验证，实现基于知识图谱的制造服务领域知识智能推送、智能检索和智能问答服务。

考核指标：面向网络协同制造的开放性融合与服务，突破关键技术不少于 3 项，形成技术标准体系；研发基于知识图谱的智能服务支持模型，在家电、航空航天、新能源等行业网络协同制造平台中开展应用验证，提升平台服务效率不低于 20%；在知识建模、数据管理、应用集成扩展等方面，制定国家、行业（联盟）或团体标准不少于 3 项；获得软件著作权不少于 3 件；申请发明专利不少于 5 项。

2.6 离散智能车间制造资源自适应动态集成方法及优化运行支持技术

研究内容：针对离散制造车间分散异构制造资源的多源信息集成交互难题，研究离散智能车间制造资源全信息模型及建模方法；研究制造资源多模态信息融合感知方法及多协议自适应交互和互联技术，研究多工位柔性布局的资源协同配送与路径优化方法；研发支持多协议智能交互的边缘网关，构建离散制造车间全互联制造网络；攻克工艺参数网络化决策、制造过程能效优化提升、制造资源智能动态调度等离散智能车间优化运行支持技术，开发支持制造资源动态集成优化运行的工业 APP，并开展应用示范。

考核指标：形成离散智能车间制造资源全信息模型动态建模工具 1 套；研发 1 套软硬一体化的制造资源多协议智能交互边缘网关及互联网络，实现多协议互联互通，支持不少于 20 种典型制造业务数据的边缘处理；开发支持制造资源动态集成与优化运行的工业 APP 不少于 10 套，并在不少于 3 家汽车、装备制造等典型离散制造企业开展示范应用，资源接入节点数不少于 200 个，配置效率提高不低于 20%；在离散智能车间信息建模规范与边缘交互方面，制定国家、行业（联盟）或企业标准不少于 2 项；申请发明专利不少于 5 项，获得软件著作权不少于 5 件。

2.7 支持增量集成的装备 CAE 开源软件理论与方法

研究内容：围绕装备研发设计中的仿真软件计算规模受限，自主发展不足，价值生态欠成熟等问题，研究支持增量集成的装备 CAE 开源软件理论与方法。研究知识/经验驱动的设计参数智能优化理论，研制仿真计算规模自适应的异构可扩展算法；研究装备 CAE 软件中设计任务驱动的关键核心模块，研发支持主流商业仿真软件的开放数据接口标准，构建装备 CAE 的开源软构件体系，形成基于开源软构件的增量集成方法；研发面向装备设计用户的在线云编程环境，开发盾构、高铁等复杂装备领域的开源 CAE 原型系统，培育基于 CAE 开源软件的产业价值生态，在典型场景开展应用验证。

考核指标：提出支持增量集成的装备 CAE 开源软件理论与方法，建立计算规模自适应的异构可扩展仿真算法库，开发关键算法不少于 6 个；开发数据接口、增量集成、在线编程等软构件不少于 10 个；在盾构、高铁等复杂装备领域的典型设计仿真场景应用验证，开源生态融入装备制造产品全生命周期价值网络。获得软件著作权不少于 5 件，申请发明专利不少于 5 项，制定国家/行业/企业标准不少于 1 项。

2.8 自由曲线曲面设计与求交理论与方法

研究内容：针对我国 CAD 几何引擎稳定性差等瓶颈问题，研究自由曲线曲面高精度高效拟合与逼近理论与算法，攻克自由曲线曲面投影、偏置和过渡算法以及自由曲面上的

自由曲线设计难点，在自由曲线曲面求交及其误差分析方面取得突破，建立自由曲线曲面设计与求交质量自动评测机制，研发自由曲线曲面设计与求交及其评测开源软件工具。

考核指标：面向任意次数的 Bezier、B 样条和 NURBS 类型自由曲线曲面，提出自由曲线曲面设计与求交理论与方法，形成一系列相关理论与技术报告，涵盖不少于 100 种拓扑类型分析；研发一套自由曲线曲面高精度设计与求交开源软件、一套完备的自由曲线曲面设计与求交误差度量与评测开源工具；在航空、船舶等产品核心零件造型中应用验证。获得软件著作权不少于 5 件，申请发明专利不少于 5 项。所有报告与代码在互联网上对全社会公开。

2.9 面向工业互联网的智能制造管理软件快速构建方法

研究内容：针对我国制造企业数字化转型过程中管理软件需求多样化、工业互联网等新技术架构体系融合门槛高，创新迭代周期短等挑战，研究面向领域需求的知识表述与融合方法、需求到软件模型的智能化辅助转换方法；研究工业管理软件多层次统一建模方法及其代码生成技术；研究基于云原生技术的在线开发运维一体化方法；形成开源工业管理软件模型描述体系，支持多团队在线协同开发、模型智能化辅助生成、动态个性化定制、按需弹性扩容，提升智能制造管理软件开发效率。

考核指标：围绕智能制造管理软件快速构建，突破关键

技术不少于 3 项,形成开源工业管理软件模型描述体系一套,支持的模型数量不低于 30 个;在汽车、大型装备制造等行业的采购、销售、质量等三类以上管理软件领域开展应用验证,实现需求规格向软件模型的智能化辅助转换,提升软件开发效率 60%以上,支持 100 个以上微服务实例节点的运行与管理;在软件快速构建等方面制定国家、行业(联盟)或企业标准不少于 2 项,获得软件著作权不少于 2 件,申请发明专利不少于 5 项。