

附件 1

智能制造系统和机器人国家科技重大专项 2025 年度项目（第二批）申报指南

工业和信息化部

二〇二五年七月

目 录

一、共性与支撑技术.....	1
(一) 三维数字化工艺设计与验证.....	1
项目 1.1.1.3: 异质材料高性能连接工艺智能设计软件研发及验证....	1
项目 1.1.1.5: 高承载结构件焊接成型工艺仿真软件研发及验证.....	7
项目 1.1.1.6: 多车型混线涂装工艺仿真软件研发及验证.....	12
(二) 工业网络与跨域集成.....	17
项目 1.2.1.2: 10Mbps 级长距离低功耗测控网络设备与现场仪表研制 及验证.....	17
项目 1.2.2.1: 超高速运动控制网络通信协议与芯片研制及验证.....	23
(三) 制造智能与行业知识模型.....	28
项目 1.3.2.1: 面向汽车制造典型工艺的作业智能模型系统研发及验证	28
项目 1.3.2.2: 石化装置运行性能智能评估模型与自主优化软件研发及 验证.....	33
项目 1.3.2.3: 大型复杂结构熔焊垂域模型与质量实时调控系统研发及 验证.....	39
项目 1.3.2.5: 高性能锻造工艺智能生成模型与软件研发及验证.....	44
(四) 智能制造新技术标准.....	49
项目 1.4.2.2: 工业机器人安全测评系统及标准研制.....	49
项目 1.4.3.1: 智能制造系统解决方案实施成效测评标准及工具研制	54
二、工业机器人与智能检测装备.....	59

(一) 高端工业机器人	59
项目 2.1.1.1: 工业机器人技术底座研发及验证.....	59
(二) 智能检测装备	73
项目 2.2.1.2: 汽车油漆表面缺陷在线智能检测装备研制及验证.....	74
项目 2.2.1.3: 棉花加工低衬度异物高速在线检测与剔除系统研制及验证.....	78
项目 2.2.2.1: 动力构件微米级内部缺陷断层成像在线检测系统研制及验证.....	82
项目 2.2.2.3: 大型金属叶片内部微裂纹激光超声检测系统研制及验证.....	87
项目 2.2.2.4: 高端装备钢材轧制内部质量状态在线超声检测系统研制及验证.....	91
项目 2.2.2.5: 高速列车焊缝全断面质量可移动在线检测装备研制及验证.....	96
(三) 可重构柔性制造单元	102
项目 2.3.2.1: 先进轨道交通装备承载结构柔性制造系统研制及验证	102
三、先进自动化与智能管控系统	107
(一) 高端控制器与自动化仪表	108
项目 3.1.4.1: 特种钢生产流程质量检测与动态调控系统研制及验证工程.....	108
项目 3.1.4.5: 有机物成分高分辨检测仪表研制及验证.....	115
项目 3.1.5.1: 流程工业智能工厂操作系统底座研制及验证.....	119
(二) 离散制造柔性管控系统	127

项目 3.2.2.2: 轨道交通工艺装备全生命周期管理软件研制及验证	127
项目群一: 支持单件定制模式的敏捷生产管控系统.....	133
项目 3.2.1.4: 大型水电机组单件定制敏捷生产系统研制及验证工程	136
项目 3.2.1.5: 支持供应链协同与零容错质量管控的制造运营管理软件 研制及验证.....	141
项目 3.2.3.1: 无试制工艺路径创成与工艺参数优化软件研制及验证	146
项目 3.2.4.2: 支持设计变更的一体化计划排程软件研制及验证....	152
(三) 过程工业全流程优化系统.....	158
项目 3.3.2.4: 石化生产全链条计划排产软件研制及验证.....	158
项目 3.3.2.5: 石化生产跨工序协同调度软件研制及验证.....	163
四、中试验证平台与行业解决方案.....	168
(一) 中试验证技术与平台.....	168
项目 4.1.1.2: 轨道交通装备典型制造工艺机器人中试平台.....	168
项目 4.1.2.1: 面向钢铁典型工艺的国产高端可编程控制器中试验证平 台.....	174
(二) 新能源汽车高效柔性制造系统解决方案与示范工程.....	178
项目群二: 新能源汽车高效焊装柔性制造系统解决方案.....	179
项目 4.3.2.1: 新能源汽车机器人高效焊装柔性制造系统研制与示范工 程.....	181
项目群三: 新能源汽车高质量涂装柔性制造系统解决方案.....	186
项目 4.3.2.2: 新能源汽车机器人高质量涂装柔性制造系统研制与示范 工程.....	188
(三) 先进轨道交通装备按需柔性制造系统解决方案与示范工程	193

项目群四：先进轨道交通装备按需与柔性制造系统解决方案.....	193
项目 4.3.3.1：支撑多系列混线生产的 CR450 高速列车高精度制造系统研制及示范工程.....	195
项目 4.3.3.2：重载机车脉动式可重构制造系统研制及示范工程....	201
（四）石油化工行业全业务链协同优化解决方案与示范工程.....	207
项目群五：石油化工资源能源集约生产协同优化系统解决方案....	207
项目 4.4.3.1：石化“资源—能源”协同优化系统研制及示范工程.....	210
（五）长流程钢铁冶金低碳运行优化与调控解决方案与示范工程	216
项目 4.4.1.4：面向高品质钢个性化定制生产模式的钢铁行业全流程动态协同优化系统研制及示范工程.....	216

一、共性与支撑技术

（一）三维数字化工艺设计与验证

项目 1.1.1.3：异质材料高性能连接工艺智能设计软件研发及验证

1.研究目标

针对异质材料连接开发中存在的动态界面失效机理不明、工艺参数适配效率低、连接质量稳定性差的核心瓶颈，开展“材料—工艺”多维度联合试验，重点突破异质材料连接多源异构数据的跨层级关联技术、多约束工艺参数智能生成技术及多物理场闭环调优技术，研发异质材料高性能连接工艺智能设计软件，形成覆盖异质材料连接“设计—仿真—验证—制造”全工艺流程的算法、模型及知识库，实现连接工艺开发周期缩短，在新能源汽车多材料电池包、一体压铸车身结构件、钢铝混合车身等典型场景实现工程化应用，提升异质材料连接技术至国际先进水平。

2.研究内容

（1）异质材料连接工艺评估与知识库构建

开展“复材—金属”“钢—铝”等异质材料的连接工艺（如胶接、自冲铆接、电阻点焊、激光点焊、搅拌摩擦焊、热熔自攻螺接、冷金属过渡焊等）联合应用研究，研究异质材料连接界面控制机制，评估各工艺在不同材料组合中的适配性与性能表现；集成不同材料组合的工艺参数、设备约束、连

接强度、疲劳寿命等数据，构建可持续更新的连接工艺知识库；打通材料、连接工艺、装备、产线多层级数据壁垒，建立高效智能跨层级数据平台。

（2）多约束连接工艺智能生成与决策引擎

研究知识与 AI 模型融合驱动的连接工艺方案生成算法，实现工艺决策流程的柔性重构以适配工艺变更，加速方案迭代；集成设备能力边界、生产节拍、成本预算等约束条件，构建多目标协同优化模型，研制强化学习驱动的多约束连接工艺智能决策引擎；开发多场约束空间可视化映射的工艺方案动态权衡组件，实现最优解空间的快速筛选、敏感性分析及多方案权衡决策，提升复杂约束下的连接工艺方案实用性与决策优化效率。

（3）多物理场连接工艺闭环调优算法及模型

研究异质材料连接工艺多物理场耦合建模方法，基于连接过程中的热变形、应力等多重物理效应构建接头高精度耦合仿真模型；研究连接工艺波动快速响应规律，集成大数据模型与优化算法，开发接头几何特征识别与性能预测模型，支持生产过程中连接工艺参数智能调整；建立虚拟仿真与实际产线闭环数据反馈机制和闭环调优模型，有效抑制量产环境下的参数漂移与强度波动。

（4）异质材料连接工艺智能设计软件研发及应用验证

构建从工艺方案设计到仿真、制造的全流程集成架构，

实现工艺方案到产线设备的数据及模型转换；开发三维可视化工艺配置模块，集成工艺知识库、连接工艺智能决策引擎与多物理场连接工艺闭环调优算法及模型，研制异质材料连接工艺智能设计软件，兼容多种仿真工具接口，支持从材料选择、参数生成到产线验证的全流程操作，实现工艺参数“设计—仿真—验证—制造”的闭环优化；针对新能源汽车多材料电池包、一体压铸车身结构件、钢铝混合车身等典型应用场景，搭建不同工况下的工艺性能指标测试体系，在新能源汽车产线上进行应用验证。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）异质材料高性能连接工艺智能设计软件 1 套，兼容不少于 3 种仿真工具接口（AutoForm、LS-DYNA、ABAQUS、Simufact 等），实现工艺“设计—仿真—验证—制造”的闭环优化，工艺规则复用率¹≥85%。

（2）异质材料连接工艺多模态（含文本/图片/3D 模型等不少于 5 类）知识库 1 套，覆盖不少于 8 类连接组合（“普通钢—铝板”“普通钢—铸铝”“高强钢—铝板”“工程塑料—钢”“钢—镁合金”“铝合金—镁合金”“碳纤维—铸铝”“碳纤维—铝板”等）。知识库容量不低于 20 万组²，每组知识单元包

1 工艺规则复用率=（跨车型复用规则数/总规则数）×100%，基线值为 50%。

2 按照连接组合类型为 8 种计算，每种连接组合来对应：5 种/类连接亚型，6 种/类工艺方法，10 种/

含材料特性、工艺参数、接头高速动态力学性能、设备与产线约束、质量与验证指标等，并建立典型材料及其厚度、工艺、接头性能关系数据集。

(3) 具备连接工艺智能生成与决策引擎，可同时优化接头强度、生产节拍、耗材成本等多维指标；工艺方案一次生成准确率¹不低于 90%，方案内容涵盖工艺类型、设备、工装等必要且完整信息；针对产品变更、工艺类型变更、同步工程变更等典型连接工艺变更需求，工艺重构优化响应时间由天级缩短至小时级。

(4) 构建异质材料“热—力”耦合连接工艺与性能仿真模型并嵌入到异质材料高性能连接工艺智能设计软件，实现基于残余应力的接头几何特征仿真精度 $\geq 90\%$ 、接头静态强度仿真精度 $\geq 95\%$ 、接头抗冲击强度峰值力仿真精度² $\geq 90\%$ ；连接工艺闭环调优效率提升 1 倍。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

(5) 异质材料连接工艺审查与优化算法包，包含材料与工艺的选择、连接方式选择等面向汽车焊装工艺设计规则 ≥ 20 种，支持汽车焊装产线可制造性评估分析，算法包核心代码开源比例 $\geq 50\%$ 。

类工艺工况场景，50 组/类场景参数组合，1.67 种/组多模态数据变体（每组参数需存储文本描述 10%，参数表 30%，图片 20%，3D 模型 30%，动态数据 10% 等变体，平均 1.67 种/组），计算得出知识库容量 $=8 \times 5 \times 6 \times 10 \times 50 \times 1.67 \approx 20$ 万组。

1 工艺方案一次生成准确率 = (一次生成的准确工艺方案数量/一次总生成的工艺方案数量) $\times 100\%$ ，其中准确工艺方案需要经领域专家确认，具备必要且完整的连接工艺信息。

2 仿真精度 = |仿真值 - 实测值| / 实测值 $\times 100\%$ 。

工程化指标:

到 2027 年 12 月，完成以下指标:

(1) 异质材料高性能连接工艺智能设计软件应用到专项项目群“新能源汽车高效焊装柔性制造系统解决方案”中项目 4.3.2.1“新能源汽车机器人高效焊装柔性制造系统研制与示范工程”，累计运行时间不少于 3 个月。(项目群考核指标)

(2) 异质材料高性能连接工艺智能设计软件覆盖项目 4.3.2.1 的典型异质材料连接应用场景，包括电池包框架（包含热熔自攻螺接、胶接、电阻点焊、搅拌摩擦焊等连接工艺过程）、一体压铸车身结构件（包含自冲铆接、热熔自攻螺接、胶接等连接工艺过程）、钢铝混合车身（包含自冲铆接、胶接、冷金属过渡焊等连接工艺过程）等。(项目群考核指标)

(3) 异质材料高性能连接工艺智能设计软件在项目 4.3.2.1 中，实现连接（点焊/铆接）工艺参数首次导入一次合格率¹≥95%，非工艺时间²缩短≥35%；通过软件输出工艺方案支持焊接产线节拍≤39s，支撑工程产线生产焊接合格率≥99.5%，工艺质量优化周期缩短≥30%。(项目群考核指标)

到 2028 年 10 月，完成以下指标:

(4) 异质材料高性能连接工艺智能设计软件技术就绪

1 工艺参数首次导入，指新工艺参数（如温度、压力、时间等）首次应用于生产线时，能否一次性达到预期质量要求。一次合格率=（首次检验合格产品数量/参检产品总数量）×100%。

2 非工艺时间，指不直接参与连接成型过程的辅助性、准备性或其他非核心操作时间，如工艺准备、工件预处理与定位等时间。

度 (TRL) ≥ 8 级, 即软件产品经实际环境下充分应用与验证, 各项指标满足使用要求; 软件具有自主知识产权, 算法包核心代码开源比例 $\geq 50\%$ 。

(5) 异质材料高性能连接工艺智能设计软件累计在至少 3 家新能源车企进行规模化应用验证, 累计针对至少 6 个车型进行异质材料连接工艺智能设计。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目, 作为“新能源汽车高效焊装柔性制造系统解决方案”项目群的项目, 采用公开竞争方式, 项目自由申报, 项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类: 重大共性关键技术。

其他来源资金 (包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金) 与中央财政资金比例原则上不低于 2:1。

中央财政投入支持方式: 事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备异质材料高性能连接工艺研发优势的软件企业或科研院所, 鼓励产学研用单位联合申报, 申报联合体应具备较强专业研发团队, 以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、

下设课题不超过 5 个。

项目 1.1.1.5：高承载结构件焊接成型工艺仿真软件研发及验证

1.研究目标

轨道交通重载机车产品结构朝着模块化、复杂化方向发展，针对转向架构架、车体底架、车体侧墙、车体蒙皮等高承载结构焊接成型工艺验证与准备周期长、变形控制难、工艺仿真与优化能力差等难题，突破高承载结构件变间隙长直焊缝变形控制、复杂结构件多道多层焊缝组织与性能调控、多规格曲面蒙皮高精高效成型轨迹规划与优化等关键技术，研究高承载结构件焊接工艺仿真建模、焊接过程仿真与变形预测、薄壁件激光冲击成型仿真、数据与模型融合驱动工艺智能优化等技术，研发重载机车高承载结构焊接成型工艺仿真软件，达到国际先进水平，在重载机车制造过程完成应用验证，缩短高承载结构件焊接成型制造周期，提升焊接成型性能。

2.研究内容

（1）高承载结构件焊接工艺仿真建模技术

开展满足高承载工况条件下的车体变间隙长直焊缝、转向架构架多层多道焊缝、对接与角接高密度布局焊缝等焊接仿真建模技术研究，开发电弧焊、激光焊、“激光—电弧”复合焊等焊接工艺非平衡态微观组织演化、温度场与应力场分

布、焊接结构“热—力”能场耦合下结构变形等仿真建模功能组件，支撑重载机车高承载结构件焊接工艺仿真。

（2）高承载结构件焊接过程仿真与变形预测技术

研究车体变间隙长直焊缝仿真、转向架构架多道多层高密度焊缝仿真、构架横向管全周焊缝仿真等关键技术，形成高承载结构件焊接过程多维度仿真能力；开发局部接头残余塑性应变到高承载结构件的高精高效映射算法，构建高承载结构件焊接残余应力、工装夹持力、前道工序残余应力等复杂力学作用模型，开发基于焊接残余应力与复杂约束力作用下的焊接变形预测功能组件，支持重载机车高承载结构件焊接过程变形预测。

（3）多参量耦合下车体蒙皮激光冲击成型仿真技术

研究材料种类、蒙皮厚度、曲率半径等初始条件下的车体蒙皮激光冲击成型仿真技术，构建多参量耦合作用下的激光冲击塑性变形高效率仿真模型；研究工艺参数与蒙皮变形曲率、应力分布之间的映射关系，建立激光冲击成型工艺基础知识库，开发蒙皮激光冲击成型过程数字孪生系统，实现多规格曲面蒙皮激光冲击成型几何面形的高精度成型过程仿真，满足重载机车车体蒙皮高精度高效率制造需求。

（4）数据与模型融合驱动的工艺智能优化技术

建立重载机车高承载结构件焊接成型工艺仿真与多物理场实测数据库，构建基于专家经验规则的结构化工艺知识

图谱模型，研发数据与模型融合驱动的工艺参数在线自学习优化算法，开发工艺智能优化系统，实现重载机车高承载结构件典型接头焊接工艺与车体典型蒙皮激光冲击成型工艺的智能优化，支撑焊接成型工艺变形预测与工艺参数优化。

（5）重载机车高承载结构件焊接成型工艺仿真软件研发与应用验证

开发重载机车高承载结构件焊接成型工艺仿真软件，集成高承载结构件焊接过程仿真与变形预测、多规格曲面蒙皮激光冲击成型过程仿真、数据与模型融合驱动的工艺智能优化等功能模块，满足重载机车高承载结构件焊接与成型工艺的多维度、高精度仿真需求，并在重载机车转向架构架焊接、车体底架焊接、车体侧墙焊接、车体蒙皮成型等制造过程进行应用验证，缩短焊接成型工艺验证与准备周期，提升焊接成型性能。

3.考核指标

技术指标：

（1）研发重载机车高承载结构件焊接成型工艺仿真软件 1 套，包含变间隙长直焊缝焊接仿真、多道多层高密度焊缝仿真、构架横向管全周焊缝仿真、薄壁件激光冲击成型仿真、焊接成型工艺智能优化等功能模块。

（2）高承载结构焊接工艺仿真可实现不少于电弧焊、激光焊接、“激光—电弧”复合焊等 3 种类型焊接工艺的仿真。

焊接过程非平衡态微观组织演化仿真实现熔池尺寸仿真误差¹≤10%，焊接结构最大变形量仿真结果与实测值误差≤15%，蒙皮激光冲击成型工艺仿真结果与实测误差²≤20%。

（3）形成激光冲击成型工艺基础知识库，包含核心工艺参数、材料种类及属性、设备操作工艺规程、质量检测及应用场景等信息集合，工艺知识条目≥1000 条；开发蒙皮激光冲击成型过程的数字孪生系统，实现蒙皮激光冲击成型仿真结果与实测值误差³≤20%。

（4）数据与模型融合驱动的焊接成型工艺智能优化功能模块具备焊接变形预测、蒙皮成型精度预测与焊接成型工艺优化等功能；焊接最大变形量预测值与实测值误差⁴≤10%，蒙皮激光冲击成型预测值与实测值误差⁵≤15%。

工程化指标:

（1）高承载结构件焊接成型工艺仿真软件技术就绪度（TRL）≥8 级，即软件产品经实际环境下充分应用与验证，各项指标满足使用要求；软件具有自主知识产权。

（2）高承载结构件焊接成型工艺仿真软件应用到专项项目群“先进轨道交通装备按需与柔性制造系统解决方案”中

1 熔池尺寸误差，指仿真结果与实测结果的差值与实测值的比值。

2 蒙皮激光冲击成型工艺仿真误差，指蒙皮激光冲击成型仿真结果与蒙皮激光冲击成型后实测值之间差值的绝对值与实测值的比值。

3 蒙皮激光冲击成型仿真结果与实测值误差，指蒙皮激光冲击成型尺寸精度的仿真结果与实测值的差值的绝对值与实测值的比值。

4 焊接最大变形量预测值与实测值误差，指焊接结构最大变形量的预测值与实测值的差值的绝对值与实测值的比值。

5 蒙皮激光冲击成型预测值与实测值误差，指蒙皮激光冲击成型尺寸精度的预测值与实测值的差值的绝对值与实测值的比值。

项目 4.3.3.2“重载机车脉动式可重构制造系统示范工程”，在轨道交通装备重载机车高承载结构件焊接成型过程应用验证，累计运行时间不少于 3 个月。（项目群考核指标）

（3）高承载结构件焊接成型工艺仿真软件在项目 4.3.3.2 中不少于 3 种型号重载机车高承载结构件焊接成型工艺仿真完成应用验证，实现与转向架构架焊接、车体焊接、车体蒙皮激光成型等不少于 4 套制造装备集成。（项目群考核指标）

（4）高承载结构件焊接成型工艺仿真软件在项目 4.3.3.2 中实现焊接成型工艺优化后，焊接接头主要力学性能¹提升 5%以上，高承载焊接结构件焊后矫形量²减少 50%以上，车体蒙皮激光冲击成型尺寸精度³优于 $\pm 3\text{mm/m}$ 。（项目群考核指标）

（5）高承载结构件焊接成型工艺仿真软件在项目 4.3.3.2 的变间隙长直焊缝焊接、多道多层高密度焊接、构架横向管全周焊接、蒙皮激光冲击成型等场景实现应用验证，焊接成型工艺验证次数减少 50%以上，工艺验证与准备周期缩短 30%以上，制造周期缩短 20%以上。（项目群考核指标）

（6）高承载结构件焊接成型工艺仿真软件进一步推广至动车组车型实现应用验证。

4.实施期限

1 力学性能主要包括焊接接头的拉伸强度与疲劳强度。

2 矫形，指采用热变形方法使焊接结构焊后变形量恢复到设计尺寸精度，矫形量定义为焊接结构件所需要矫形的数量。

3 成型尺寸精度，指经激光冲击成型后的蒙皮尺寸与理论设计尺寸之间的差值。

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 4 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目,作为“先进轨道交通装备按需与柔性制造系统解决方案”项目群的项目,采用公开竞争方式,项目自由申报,项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类: 重大共性关键技术。

其他来源资金(包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金)与中央财政资金比例原则上不低于 3:1。

中央财政投入支持方式: 事前立项事后补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备承载结构焊接工艺研发优势的轨道交通装备制造企业或软件企业,应与国内相关企业、科研院所、高等院校等联合申报,申报联合体应具备较强的专业研发团队,以及完善的试验、研究和软件开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 1.1.1.6: 多车型混线涂装工艺仿真软件研发及验证

1.研究目标

针对汽车多车型混线柔性生产过程中产线适配验证周期长、工艺与装备协同效率低、虚实融合验证能力差等问题,突破模型驱动的工艺与装备协同建模、虚实融合的车型与产线智能匹配等关键技术,开展多车型混线涂装工艺与装备协

同建模与仿真、需求动态响应的产线配置智能优化与创成式设计、数智混合增强的工艺参数动态优化、支持快速换型的涂装机器人虚拟调试技术研究，研制多车型混线涂装工艺仿真软件，并在新能源汽车涂装产线开展工程验证，提升多车型柔性生产模式下产线动态适配能力。

2.研究内容

（1）涂装“工艺—装备”协同建模与仿真技术

研究基于动态约束的多车型混线涂装工艺参数自动匹配方法，开发涂装“工艺—装备”联合仿真模型，构建孪生驱动的多车型混线涂装关键装备通过性评估模型；研究涂装工艺全流程多层级模型融合框架，形成覆盖结构特征、材料属性、工艺参数、设备能力的标准化映射体系，开发覆盖电泳、喷涂、烘干等工艺的统一模块化组件库，支持多车型工艺包的快速切换。

（2）产线配置智能优化与创成式设计技术

研究基于 AI 的多目标优化动态产线配置引擎，构建融合多模态数据的工艺参数关联模型，实现“工艺参数—质量指标”的关联预测与优化；研发基于知识图谱的产线配置创成工具软件，实现设备布局、物流路径、节拍平衡等自动生成；研究“能耗—质量—成本”多维度决策模型，支持复杂决策因素下工艺变更的即时效益评估。

（3）基于混合增强的涂装工艺参数动态优化技术

研究基于多源数据与增强现实混合增强的可视化交互技术、涂装工艺参数动态调优算法，实现喷枪速度、雾化压力等关键参数自适应优化；研究涂装产线关键工艺与装备适配算法，建立多车型混线涂装工艺与装备适配的参数动态调优策略，支持“车型—工艺—装备”的快速协同匹配。

（4）支持快速换型的涂装机器人虚拟调试技术

研究涂装机器人仿真与高精度工艺建模技术、支持多车型/工件快速切换的涂装机器人程序生成技术，开发工艺模板库与规则引擎，研制支持快速换型的涂装机器人虚拟调试工具软件，支持构建具备虚实联调功能的涂装产线机器人工作站数字孪生系统，实现涂装产线膜厚仿真、覆盖度仿真、漆面检测等功能。

（5）多车型混线涂装工艺仿真软件集成开发及应用验证

突破涂装“工艺—装备”性能仿真建模、涂装工艺参数智能匹配等关键技术，构建涂装产线关键工艺装备模块化组件库，集成涂装“工艺—装备”联合仿真模型、基于知识图谱的产线配置创成工具软件与涂装机器人虚拟调试工具软件，集成研制多车型混线涂装工艺仿真软件，在新能源汽车涂装产线开展应用验证，缩短新车型导入周期、降低多车型切换时间。

3.考核指标

技术指标:

到 2027 年 12 月，完成以下指标:

(1) 多车型混线涂装工艺仿真软件 1 套，集成基于知识图谱的产线配置创成工具软件、支持快速换型的涂装机器人虚拟调试工具软件，支持新车型导入过程中“工艺—装备”的集成协同仿真，实现新车型在涂装产线电泳、涂胶、面漆、烘干等关键工艺环节的装备通过性仿真准确率¹≥90%。

(2) 仿真软件包含的模块化组件库覆盖涂装产线的前处理、电泳、涂胶、面漆、烘干等不少于 5 项关键工艺，构建包含内侧密封涂胶机器人站、车身底部焊缝密封涂胶机器人站、身底涂胶机器人站、烘干加热单元、内喷机器人站、干式过滤模块等核心装备的模型库。

到 2028 年 10 月，完成以下指标:

(3) 仿真软件具备涂装工艺参数仿真能力，实现漆膜厚度达标率≥90%，烘干曲线达标率≥95%，满足“新能源汽车高质量涂装柔性制造系统解决方案”项目群中项目 4.3.2.2“新能源汽车机器人高质量涂装柔性制造系统研制与示范工程”技术要求。（项目群考核指标）

工程化指标:

到 2027 年 12 月，完成以下指标:

(1) 多车型混线涂装工艺仿真软件技术就绪度（TRL）

¹ 通过性仿真准确率用于衡量仿真系统对关键工艺装备（如电泳、涂胶、面漆、烘干等）虚拟验证结果与实际生产一致性的核心指标，具体指仿真验证合格的装备在实际生产中一次性通过的比例。

≥8 级，在实际使用环境中验证通过，交付新能源汽车行业用户使用。

（2）多车型混线涂装工艺仿真软件应用到专项项目群“新能源汽车高质量涂装柔性制造系统解决方案”中项目 4.3.2.2“新能源汽车机器人高质量涂装柔性制造系统研制与示范工程”，在涂装产线设计及新车型涂装工艺开发及生产线导入模拟验证环节使用，累计运行时间不少于 3 个月，实现 1 种车型的“工艺—装备”适配仿真验证，喷涂工艺轨迹仿真误差值≤5%。（项目群考核指标）

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（3）多车型混线涂装工艺仿真软件在项目 4.3.2.2 中实现涂装产线前处理、电泳、涂胶、面漆、烘干等不少于 5 项工艺核心装备的数字化建模与仿真，指导现场实车工艺验证，自动生成工艺参数，工艺参数自优化可执行率¹≥80%，一次验证合格率²≥80%。（项目群考核指标）

（4）多车型混线涂装工艺仿真软件在项目 4.3.2.2 涂装产线设计及新车型涂装工艺开发及生产线导入模拟验证环节使用，累计运行时间不少于 3 个月，实现累计不少于 3 种车型的“工艺—装备”适配仿真验证，适配动态产能需求情况下产线配置方案生成效率³提升 80%。（项目群考核指标）

1 工艺参数自优化可执行率=CR/AR×100%。其中，CR 表示工艺参数能够正确执行的数量，AR 表示通过多车型混线涂装工艺仿真软件进行的涂装工艺参数优化总数。

2 一次验证合格率=QT/AT×100%。其中，QT 表示工艺参数可执行情况下喷涂验证合格的数量，AT 表示工艺参数可执行的总次数。

3 产线配置方案生成效率=(T₀-T₁)/T₀×100%。其中，T₀表示采用传统人工或静态规划方式生成产

4.实施期限

本项目为 2024 年未部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置经费需求

拟支持 1 个项目,作为“新能源汽车高质量涂装柔性制造系统解决方案”项目群的项目,采用公开竞争方式,项目自由申报,项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类: 重大共性关键技术。

其他来源资金(包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金)与中央财政资金比例原则上不低于 2:1。

中央财政投入支持方式: 事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具有汽车喷涂工艺研发优势的软件企业或科研院所,鼓励产学研用单位联合申报,申报联合体应具备较强的专业研发团队,以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

(二) 工业网络与跨域集成

项目 1.2.1.2: 10Mbps 级长距离低功耗测控网络设备与现场仪表研制及验证

1.研究目标

线配置方案所需时间, T_1 表示系统生成适配动态产能需求的产线配置方案所需时间。

针对现有低速现场总线测控网络无法支撑流程行业智能工厂大规模联合控制、现场仪表智能运维等方面的问题，聚焦大带宽长距离低功耗测控网络实时可靠安全通信，突破确定性网络调度、多端口全时线速转发调度、大带宽现场仪表低功耗设计等关键技术，研制基于 10Mbps 级长距离低功耗多端口交换设备与新型工业测控关键设备，构建开放解耦、多协议共存、新旧设备兼容的新型工业网络体系架构和测控系统，达到国际同类产品技术水平，在石油、化工等流程行业完成工程验证，推动工业测控系统升级换代。

2.研究内容

（1）开放解耦新型工业测控网络架构

研究基于 10Mbps 级长距离低功耗物理层技术的全新测控网络技术架构，设计开放框架、分层解耦、多协议共存等网络机制；研究 10Mbps 级长距离低功耗物理层网络与 HART-IP、Modbus TCP 等流程行业主流工业协议灵活适配技术，实现全网络化仪表的实时可靠安全通信。

（2）高可靠实时轻量化网络与应用协议栈软件

基于 10Mbps 级长距离低功耗物理层网络，研究终端安全可信接入、数据包防伪通信、软时钟同步控制算法、确定性网络调度等关键技术，研制精简确定性网络层协议栈软件；研究大规模节点自动发现技术，研究测量、控制、报警、远程运维等并发通信需求的隔离传输与高效通信机制，设计

报文异常、事件报警处理等状态机及应用服务集，研制新型工业测控系统通信应用协议栈软件。

（3）多端口交换设备

突破多端口全时线速转发调度算法，研究支持多端口间相互隔离的本安供电技术，研究面向分级分类业务数据的超细粒度优先级隔离转发技术，研究在异构接口条件下的精细队列调度关键技术，上行支持高可靠以太聚合双链路光纤传输，研究大容量流量隔离和转发技术，研制基于 10Mbps 级长距离低功耗物理层网络的多端口交换设备。

（4）新型工业测控关键设备

研究现场仪表高效语义交互、实时测控与运维一体化、故障预测性诊断、整机防爆与低功耗设计等技术，研制基于 10Mbps 级长距离低功耗物理层网络的智能温度变送器、压力变送器、流量计、执行机构等新型现场仪表；研究多网络多设备数据互联、快速组网、网络状态实时监测等关键技术，研制基于 10Mbps 级长距离低功耗物理层网络的新型控制器、智能网关、网络管理软件，实现新型现场仪表及传统仪表的混合接入，支持规模化仪表实时监测与管理。

（5）典型行业工程验证

多端口交换设备、新型工业测控关键设备在石油、化工、钢铁、有色等典型行业开展工程应用，研究典型工艺装置数据采集、实时控制和设备诊断管理等场景应用需求和应用适

配方案，评估验证多端口交换设备、新型工业测控关键设备在恶劣工业环境下的适用性和工作稳定性。

3.考核指标

技术指标:

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）精简确定性网络层协议栈软件，支持灵活的头部封装、异步确定性、高精度软时钟同步等功能，报文载荷比 $\geq 90\%$ ，支持跨域端到端时延抖动 $\leq 30\mu\text{s}$ ，软件同步时钟精度 $\leq 100\mu\text{s}$ ，代码开源率 100%。

（2）新型工业测控系统通信应用协议栈软件，支持设备自发现自寻址、对象化访问、发布订阅等功能，内置智能仪表信息模型库，支持实时控制与语义集成等功能，代码开源率 100%。

（3）多端口交换设备样机，支持 10BASE-T1L 接口数 ≥ 8 个。

（4）新型现场仪表样机 ≥ 8 类，通信速率 $\geq 10\text{Mbps}$ ，支持语义交互、自诊断等功能。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（5）新型工业测控系统通信应用协议栈软件，满足 GB/T 20438 规定的安全完整性等级 SIL3 要求，满足 GB/T 35673 或 GB/T 42456 规定的信息安全等级 SL2 要求。

(6) 多端口交换设备, 支持 10BASE-T1L 接口数 ≥ 8 个, 连接现场仪表的端口支持总线供电和低功耗本质安全防爆, 主干网络支持通信距离 1000m、通信速率 10Mbps 下的全双工数据传输, 分支网络支持 200m、通信速率 10Mbps 下的全双工数据传输, 数据报文单跳转发延时 $\leq 10\mu\text{s}$, 工作温度: $-40^{\circ}\text{C}—+70^{\circ}\text{C}$ 。

(7) 新型工业测控关键设备(包含新型现场仪表、新型控制器、智能网关和网络管理软件), 其中新型现场仪表 ≥ 10 类, 通信速率 $\geq 10\text{Mbps}$, 支持语义交互、自诊断、即插即用等功能, 不少于 3 类仪表满足本质安全要求; 新型控制器支持不少于 2000 台新型现场仪表的控制, 智能网关支持新型现场仪表和传统仪表接入; 网络管理软件具备网络拓扑呈现和网络设备状态监测功能, 支持不少于 50000 台仪表的管理。

(8) 新型现场仪表、多端口交换设备核心元器件(MCU、通信芯片等)、协议栈软件、网络管理软件优先采用本专项或其他国家科技和产业项目形成的芯片、操作系统、工作站等创新成果。

工程化指标:

到 2027 年 12 月, 完成以下指标:

(1) 采用本专项 2025 年第一批部署项目 1.5 研制的芯片开发至少 100 台新型现场仪表并进行工程试用。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（2）精简确定性网络层协议栈软件、新型工业测控系统通信应用协议栈软件、多端口交换设备与新型工业测控关键设备技术就绪度（TRL） ≥ 8 级，产品设计定型，经小批量生产和实际环境下充分使用，获得用户认可。

（3）多端口交换设备与新型工业测控关键设备在石油、化工、钢铁、有色等流程行业开展至少 4 个工程验证项目，其中至少一个工程验证项目规模不少于 1000 台新型现场仪表，累计运行时间不少于 3 个月，实现千台规模现场仪表全部扫描上线时间从小时级降到 10 分钟级，新型现场仪表连接用线缆比传统现场仪表连接用线缆减少 50%及以上；优先采用本专项 2025 年第一批部署项目 1.5 研制的芯片。

（4）相关国家/行业标准 ≥ 2 项。（通过标准立项）

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，采用公开竞争方式。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 2:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备工业测控网络研发优势的科研院所或企业，应与工业仪表、控制系统等研发单位、流程型制造企业、科研院所、高等院校等联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发及应用条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 1.2.2.1：超高速运动控制网络通信协议与芯片研制及验证

1.研究目标

针对高端工业机器人、半导体精密加工装备等先进制造装备对大带宽、超高性能与可靠性运动控制网络的迫切需求，以及国内高端运动控制网络芯片面临的断供风险，突破超高精准时钟同步、超低时延数据转发、链路的超高可靠性实现等技术，设计超高速运动控制网络通信协议，技术水平超越主流运动控制网络（如 EtherCAT、PROFINET IRT）；研制通信协议栈开发包（SDK）、专用通信芯片。在高端工业机器人、半导体精密加工装备等先进制造装备集成并开展应用验证，支撑关键领域运动控制网络迭代升级。

2.研究内容

（1）超高速运动控制网络通信协议技术

研究全链路时延建模、超高精度时钟同步、超低时延数

据转发、超高链路可靠性保障等技术；研究多应用协议灵活适配、实时高效的数据交互模型等工业网络应用层技术；研究安全状态机、安全数据封装及多通道校验、通信异常诊断等功能安全通信技术；设计超高速运动控制网络通信协议，研制适用于主站和从站的超高速运动控制网络通信协议栈开发包。

（2）超高速运动控制网络以太网物理层技术

研究超高速编解码算法、超低时延和超低抖动数据收发、RGMII 接口的时延抖动消除、信号反射分析测量、信道均衡和回波消除、近端和远端的串扰消除、信号特征提取、快速异常信号检测、高可靠的接口保护等以太网物理层技术，研制用于超高速运动控制网络的超高性能以太网物理层芯片。

（3）超高速运动控制网络数据链路层技术

研究超低时延协议处理、超低时延抖动转发、亚纳秒级的时间戳标注、超高精度时钟同步、确定性流量控制与 QoS、混合拓扑的链路冗余算法、单向传输和主动与被动环回传输、多端口寻址转发、多速率融合、多类型通信接口融合等数据链路层技术，研制超高速运动控制网络数据链路层专用芯片。

（4）运动控制网络协议及通信芯片性能测试验证

研制以运动控制器为主站、伺服驱动器为从站的运动控

制网络测试验证系统；针对通信协议、以太网物理层芯片与数据链路层专用芯片的性能和功能，开展通信速率、端到端数据传输时延及时延抖动等关键性能指标的测试验证，以及主站与从站互通性及复杂工况稳定性、实时数据交互、多设备协同控制等核心功能测试验证。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）超高速运动控制网络通信协议栈开发包（包含主站协议栈、从站协议栈），在 1 台运动控制器主站、8 台伺服驱动器从站环境下循环控制周期 $\leq 31.25\mu\text{s}$ 、时钟同步精度 $\leq 10\text{ns}$ ，60 台伺服驱动器从站环境下完成系统同步的时间 $\leq 10\text{ms}$ ，支持星型、树型网络拓扑结构下的通信链路冗余，通信链路冗余在单点故障下数据帧零丢帧，支持图片、视频等非结构化数据接入，支持功能安全通信，功能安全等级符合 GB/T 20438 的 SIL3 要求，通信协议栈开发包具有自主知识产权，从站协议栈代码开源率 100%。

（2）超高速运动控制网络以太网物理层芯片，同时支持 100Mbps 和 1Gbps 通信速率，在 100Mbps 速率下，接收加发送的数据传输时延 $\leq 300\text{ns}$ 、超 5 类（CAT5E）线缆下的传输距离 $\geq 180\text{m}$ 。

（3）超高速运动控制网络数据链路层专用芯片，支持

100Mbps 和 1Gbps 通信速率，支持混合速率组网通信，数据转发时延 $\leq 300\text{ns}$ ，数据转发时延抖动达 10ns 量级，以太网连接端口数 ≥ 2 ，支持 MII、RGMII、LVDS 等通信接口，支持数字量输入输出的信号管脚 ≥ 10 个。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（4）超高速运动控制网络以太网物理层芯片，在 1Gbps 速率下，接收加发送的数据传输时延 $\leq 400\text{ns}$ 、超 5 类（CAT5E）线缆的传输距离 $\geq 120\text{m}$ ；100Mbps 和 1Gbps 通信速率下，数据传输时延抖动均达 10ns 量级。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）超高速运动控制网络以太网物理层芯片和数据链路层专用芯片的工程样片各 3000 片。

（2）超高速运动控制网络以太网物理层芯片、数据链路层专用芯片、通信协议栈开发包的技术就绪度（TRL） ≥ 8 级，芯片设计定型，经小批量生产和实际环境下充分应用与验证，获得使用方认可；芯片制造流片、封装两项核心工序全部在国内厂家完成。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（3）基于超高速运动控制网络通信协议栈开发包、以太网物理层芯片和数据链路层专用芯片，研制以运动控制器为主站、伺服驱动器为从站的测试样机；搭建测试验证系统，

支持对协议互通性、稳定性、网络带宽、时延、同步等功能与性能指标的测试，建立测试验证条件，实现 1 台主站与不少于 60 台从站的组网验证。

（4）基于超高速运动控制网络的运动控制器主站与伺服驱动器从站样机构建运动控制系统，在高端工业机器人、半导体精密加工装备等不少于 2 种先进制造装备类型进行应用验证，累计运行时间不少于 3 个月；单装备伺服驱动器配置 ≥ 6 台，组建局域控制网络，验证网络通信速率达 1Gbps、循环控制周期 $\leq 250\mu\text{s}$ 的性能指标。

（5）超高速运动控制网络相关国际、国家或行业标准 ≥ 2 项。（通过标准立项）

（6）芯片和协议栈开发包推广应用 ≥ 2000 套。其中，主站协议栈开发包需按照本专项 2025 年度（第一批）部署项目 3.1 承担单位制定的测试大纲通过测试验证，并完成不少于 100 套主站协议栈开发包在该项目研制多轴精密运动控制器上的工程应用；芯片和从站协议栈开发包需按照本专项 2025 年度（第一批）部署项目 3.2 承担单位制定的测试大纲通过测试验证，并完成不少于 100 套芯片和从站协议栈开发包在该项目研制高精密自适应多轴伺服系统上的工程应用。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，采用公开竞争方式。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 2:1。

中央财政资金支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备较强运动控制网络研发能力的企业或科研院所，应与使用运动控制网络的装备制造企业、科研院所、高等院校等联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

（三）制造智能与行业知识模型

项目 1.3.2.1：面向汽车制造典型工艺的作业智能模型系统研发及验证

1.研究目标

针对新能源汽车等装备制造领域工艺知识泛化能力不足、场景动态适配性弱、工艺编程效率低等问题，突破融合机器人作业时序特征的工艺模型架构设计、多源异构工艺数据智能融合解析与工艺特征迁移学习等关键技术，研究机器人柔性制造可泛化工艺知识建模与工艺智能推理、工艺知识模型自优化、适配动态场景的工艺智能编程等技术，研发面

向汽车制造典型工艺的作业智能模型系统，构建机器人智能编程工具集，并在新能源汽车机器人焊装生产线开展柔性制造工艺规划与仿真集成应用验证。

2.研究内容

（1）面向汽车制造典型工艺的作业智能基座模型

研究面向汽车制造典型工艺的作业智能基座模型架构；研究工业机器人作业动态位置编码机制、数据驱动与动态反馈协同的训练策略、知识蒸馏与结构化剪枝等基座模型技术；研究面向汽车制造的机器人作业工艺数据对齐及表征方法，构建机器人焊接、喷涂、涂胶、装配、滚边工艺数据集；研究人机混合增强的工业机器人工艺规划机制，研制具有跨场景泛化能力的多机器人工艺规划通用模型及应用基座。

（2）机器人柔性制造工艺知识建模与智能推理引擎

研究机器人柔性作业工艺知识与机理融合规则、语义关联与拓扑推理技术，构建面向机器人柔性制造“工艺—设备—材料”多源知识图谱，形成覆盖装备制造的机器人作业通用工艺知识库、工艺资源库；研究工艺知识结构化建模、多模态工艺数据融合解析技术；研究作业智能基座模型驱动的多机器人柔性作业智能推理技术，研发跨场景多机器人协同自适应作业工艺推理引擎。

（3）数据与知识融合驱动的典型工艺作业智能模型

研究预测数据与实测数据的匹配对齐技术，构建作业智

能基座模型驱动的典型工艺场景模型；研究人类知识技能与工艺数据智能融合方法，实现作业模型的人机混合增强学习与工艺特征迁移学习；研究工艺场景模型参数在线迭代优化技术，形成“场景模型构建—加工验证—数据采集—模型自更新”的闭环反馈机制。

（4）面向汽车制造典型工艺的智能编程工具集

研究基于大模型的智能编程工具软件架构，研究几何数模与感知数据融合的状态空间表征方法、在线交互式训练技术；突破复杂工况机器人柔性制造工艺智能规划与编程技术，研发低代码智能编程引擎；研究数据与知识融合驱动的轨迹动态调整技术，研制机器人柔性制造工艺智能编程工具集，实现多场景下机器人作业程序的自动生成与自适应调整。

（5）汽车制造典型工艺集成开发系统及应用验证

研究基于微服务架构的工艺引擎开发技术，突破工艺组件标准化封装、多品牌机器人驱动中间件适配、高性能碰撞检测、多机器人轨迹自生成技术，构建“数据层—算法层—应用层”三层架构，集成研制机器人柔性制造工艺集成开发系统，实现“模型构建—知识推荐—程序生成—闭环优化”全链路协同；选择新能源汽车机器人焊装生产线的典型工件，进行机器人柔性作业规划，验证智能模型集成系统的泛化性和自适应优化能力，满足工件精度与产品质量要求。

3.考核指标

技术指标:

到 2027 年 12 月，完成以下指标:

(1) 研制作业智能模型系统 1 套，包含工艺推理引擎、机器人智能编程工具集（包含焊接、喷涂、涂胶、装配、滚边等工艺包），能够在微服务端实现程序自动生成、模型参数自优化、作业环境仿真分析等功能，实现焊接、喷涂、涂胶、装配、滚边等工业机器人典型作业工艺参数自适应优化。

(2) 作业智能模型系统能够适配国内外主流机器人品牌数占比不低于 90%、数量 ≥ 100 个，支持包括 ABB RAPID、KUKA KRL、FANUC KAREL、埃夫特 RPL、埃斯顿 ERL 等国内外主流机器人编程语言种类数量 ≥ 30 种，支持 SCARA、DELTA、6 轴工业机器人、5 轴激光切割机等运动机构构型 ≥ 20 种。

(3) 支持装配、焊接、喷涂、涂胶、滚边等不少于 5 种工艺参数库及工艺包，工艺包中包含的工艺变量数目 ≥ 50 种，实现不少于 10 种工件轨迹程序智能生成，且轨迹程序修正量¹ $\leq 10\%$ ；机器人姿态仿真准确率 $\geq 90\%$ ；经过自优化之后输出的工艺知识准确率² $\geq 90\%$ 。

工程化指标:

到 2027 年 12 月，完成以下指标:

1 轨迹程序修正量：上机时人工修正的轨迹点数与初始规划的整体轨迹点数之比。目前基值：20%

2 工艺知识准确率：通过作业智能模型系统问答输出的工艺参数，经过验证正确可用的，占所有的问答数的比重。目前基值：30%

(1) 作业智能模型系统技术就绪度 (TRL) ≥ 8 级, 在实际使用环境中验证通过, 交付新能源汽车行业用户使用。

(2) 作业智能模型系统应用到专项项目群“新能源汽车高效焊装柔性制造系统解决方案”中项目 4.3.2.1“新能源汽车机器人高效焊装柔性制造系统研制与示范工程”, 累计运行时间不少于 3 个月。(项目群考核指标)

(3) 作业智能模型系统在项目 4.3.2.1 中支持焊装产线至少 6 台机器人同时进行轨迹规划, 单机器人轨迹自主规划时间 $\leq 15\text{min}$, 60 个工作点多机器人轨迹自主规划时间 $\leq 400\text{min}$, 节拍仿真准确率 $\geq 95\%$ 。(项目群考核指标)

(4) 作业智能模型系统在在项目 4.3.2.1 的焊装车间关键区域的点焊、涂胶、上下料等国产工业机器人上进行模型与工具适配, 适配的机器人数量不少于 100 台, 支撑机器人焊装产线工艺质量优化周期缩短 30%。(项目群考核指标)

到 2028 年 10 月, 完成以下指标:

(5) 作业智能模型系统注册用户数 ≥ 50 万、工艺智能编程功能和工艺推理功能年调用次数 ≥ 10 万次; 包含装配、焊接、喷涂、涂胶、滚边等典型工艺包的智能编程工具集销售总台(套)数 ≥ 100 套。

(6) 作业智能模型系统在新新能源汽车行业中累计至少选择 2 家单位, 实现焊接作业场景的应用验证, 实现焊接工艺物理验证和试验成本降低 30%, 焊接工艺试验验证周期缩

短 30%。

4.实施期限

本项目为 2024 年未部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目,作为“新能源汽车高效焊装柔性制造系统解决方案”项目群的项目,采用公开竞争方式,项目自由申报,项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类: 重大共性关键技术。

其他来源资金(包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金)与中央财政资金比例原则上不低于 2:1。

中央财政投入支持方式: 事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具有汽车制造典型工艺数据模型基础及工业机器人相关软件研发优势的企业或科研院所,鼓励产学研用单位联合申报,申报联合体应具备较强的专业研发团队,以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 1.3.2.2: 石化装置运行性能智能评估模型与自主优化软件研发及验证

1.研究目标

针对石化装置运行状态识别依赖经验、性能评估预判不

精准、优化调节缺乏自动推理等问题，突破装置运行多源异构数据表征、运行性能智能评估与诊断、运行优化策略自动生成等关键技术，构建石化装置运行性能评估垂域模型，研制可嵌入工业控制环境的装置运行性能评估优化软件，在典型石化装置中开展工程化部署示范，实现装置运行性能的准确评估与衰退诊断、装置运行策略的自主优化调整，提升装置运行的经济性、稳定性与智能自主决策能力。

2.研究内容

（1）石化装置多源数据表征与特征构建技术

研究石化装置运行知识增强的多源异构数据的自动解析与表征技术。研究多模态数据融合的装置运行关键特征抽取与构建技术。开发石化装置运行状态演化模型，构建装置运行特征与状态的关联图谱，支撑垂域模型理解装置运行机理、表征性能状态演化过程与特征依赖关系。

（2）石化装置运行性能多维评估垂域模型构建技术

研究融合石化装置能质转换传递机理和运行数据的装置运行性能评估方法，构建覆盖装置能效、收率、生产方案与负荷变化响应能力等方面的多维评价指标。突破基于运行状态/性能图谱的运行状态分类与性能衰退根因分析技术，构建适用于乙烯裂解、催化裂化等典型石化装置的运行性能评估与衰退溯源分析的垂域模型。

（3）石化装置运行优化策略生成技术

构建面向多重运行优化目标，融合石化装置能质平衡关系、反应机理约束与专家知识的运行优化数据集与策略库。构建面向石化装置运行优化策略生成的垂域模型，联动生产计划、排产调度与策略执行控制系统，形成具备石化装置数据解析、机理理解和优化策略推理生成能力的应用智能体模块，实现装置运行优化策略的自动生成。

（4）石化装置运行性能评估与优化一体化软件

研究石化装置运行性能评估优化系统的体系构建方法，形成融合任务感知分解、语义交互、垂域模型协同、工具调用于一体的系统架构。研究软件与主流 DCS/PLC 控制平台的数据交互与协同机制，实现性能评估结果与优化策略的在线验证与安全执行。开发具备实时性、可解释性与可靠性的石化装置运行性能评估优化一体化软件。

（5）典型石化装置工程化验证

研究面向工业控制边缘环境的石化装置运行性能评估垂域模型轻量化部署与精简运行技术。开展基于垂域模型的石化装置运行性能评估准确性、优化方案稳定性与实效性测试。形成覆盖“评估—诊断—优化—执行”环节的一体化工程应用体系。在 2 套及以上典型石化装置中开展运行性能评估优化系统部署与对比验证。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）石化装置运行知识增强的多源异构数据的自动解析工具，实现规范化解析的工业数据类型 ≥ 3 种（如时序、文本等数据类型）。构建石化装置运行性能建模与关联图谱系统，图谱节点数目 ≥ 1000 ，支持不少于 2 类典型装置（如催化裂化、轻油裂解、烯烃聚合、甲醇制烯烃等装置）运行状态数据与性能指标间的多层映射与图谱表征。形成不少于 2 类具备性能状态推理与因果识别能力的运行性能评估与优化策略生成垂域模型，形成软件模块。

（2）石化装置运行性能评估与优化软件，实现装置关键运行性能指标（如能耗单耗、产品收率等）趋势预测平均绝对百分比误差降低 $\geq 10\%$ ，评估分析结果相对偏差绝对值 $\leq 5\%$ ；软件具备的运行性能状态理解能力，覆盖装置类型不少于 10 个，运行工况不少于 6 个（如稳态运行、低负荷运行、产品切换、原料切换等）；满足专项项目群“石油化工资源能源集约生产协同优化系统解决方案”中项目 4.4.3.1“石化‘资源—能源’协同优化系统研制及示范工程”的技术要求。

（项目群考核指标）

（3）用于典型石化装置运行优化与控制的策略库，涵盖运行优化策略模板与物理约束规则 ≥ 100 条，支持实时调用、规则校验与专家反馈更新；运行优化策略生成响应时间 $\leq 3s$ ，可执行率 $\geq 85\%$ 。

(4) 石化装置运行性能评估垂域模型与优化软件在工业边缘计算平台(如嵌入式工业 PC 等)上部署包体积 $\leq 8\text{GB}$, 首次加载时间 $\leq 30\text{s}$, 模型调用响应延迟 $\leq 5\text{s}$; 软件具备基于关联图谱的因果链条可视化展示能力及用户交互, 支持策略生成过程的推理溯源。

到 2028 年 10 月, 完成以下指标:

(5) 石化装置运行性能评估垂域模型与优化软件连续运行故障率 ≤ 1 次/月, 关键功能模块故障恢复时间 $\leq 1\text{min}$; 系统支持在不少于 2 类主流 DCS/PLC 控制系统进行数据采集, 策略正确响应率 $\geq 98\%$ 。

工程化指标:

到 2017 年 12 月, 完成以下指标:

(1) 石化装置运行性能评估垂域模型与优化软件技术就绪度 (TRL) ≥ 8 级, 具备在真实石化装置生产运行与控制环境中部署与在线评估优化的能力。

(2) 在包括专项项目群“石油化工资源能源集约生产协同优化系统解决方案”中项目 4.4.3.1“石化‘资源—能源’协同优化系统研制及示范工程”承担单位在内, 完成 2 套及以上典型石化装置实际部署应用, 系统稳定运行时间累计不少于 3 个月, 装置主要运行性能(如能耗降低、装置处理量、原料利用率等)改善幅度 $\geq 2\%$, 装置主要目标产品收率提高 $\geq 1\%$, 生产方案过渡时间缩短 $\geq 20\%$; 装置运行性能评估与优化功能

可在线运行，装置运行性能标定频率 ≥ 2 次/月，单次评估分析时间 ≤ 2 小时。（项目群考核指标）

（3）形成自主知识产权的软件工具或关键组件 5 项以上，申请发明专利 ≥ 3 项。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（4）构建石化装置运行性能评估优化应用示范系统 1 套。

（5）国际标准提案或国家/行业标准 ≥ 1 项。（通过标准立项）

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，作为“石油化工资源能源集约生产协同优化系统解决方案”项目群的项目，采用公开竞争方式，项目自由申报，项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 2:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位需为具备过程工业实时优化、运行性能评

估与先进控制研发优势的科研院所或企业，应与国内相关优势企业、科研院所、高等院校等联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 1.3.2.3：大型复杂结构熔焊垂域模型与质量实时调控系统研发及验证

1.研究目标

针对复杂恶劣工况大型复杂结构熔焊质量不稳、缺陷难控制、总体效率低等突出问题，本项目拟构建高质量熔焊垂域模型，研究熔焊过程多模态数据传感与特征提取方法、面向垂域模型训练的高质量样本集构建平台、熔焊工艺与质量实时调控垂域模型技术，突破熔焊多模数据融合的质量特征提取、熔焊缺陷与熔池数据特征映射关系、高承载结构熔焊垂域模型特征分层设计方法、垂域模型自适应融合的熔焊质量实时调控等关键技术，研制垂域模型驱动的熔焊质量实时智能调控系统，完成熔焊垂域模型模块软件、智能调控系统与成套焊接装备的融合集成，开展高承载大型复杂结构熔焊试验验证与推广应用，形成船舶、轨道交通等重点行业机器人自主智能焊接生产能力。

2.研究内容

（1）熔焊过程多模态数据传感与特征提取方法

研究熔焊缺陷形成过程的影响要素及其表征方法，研究图纸、文本、图片、影像、实时数据等多模态异构数据的自动识别和智能获取、基于多模数据融合的熔焊过程特征参数提取、基于多模数据的熔焊质量特征数据清洗等技术，开发熔焊过程数据建模软件工具，支持多模数据质量特征参数标注，形成熔焊质量特征提取技术体系和支撑工具。

（2）面向垂域模型训练的高质量样本集构建平台

研究数据驱动的构件焊缝接头坡口误差与最佳熔焊工艺、“熔池图像—参数波形”与典型缺陷的映射关系，研制技能大师动作意图感知识别系统，开展“熔池图像—工艺参数—电弧声—技能大师”动作意图协同感知的质量调控试验，研制典型熔焊缺陷过程特征训练样本构建平台，解决典型缺陷形成过程样本难以获取难题，形成高质量熔焊垂域模型训练样本集。

（3）熔焊工艺与质量实时调控垂域模型技术

研究熔焊工艺与质量实时调控垂域模型功能结构设计、模型微调与训练优化等技术，研发焊接方法、材料结构、工艺规则和实时数据特征主导的模块化模型构建方法，开发熔焊最佳工艺实时规划、质量实时调控、“工艺—质量”关系垂域模型，形成焊前工件感知的最佳工艺自主生成、焊接过程多模数据感知的焊接缺陷实时调控和焊后质量在线评估能力。

（4）垂域模型驱动的熔焊质量实时智能调控系统与应用验证

研究机器人熔焊最佳工艺实时自主生成和工艺参数在线实时调整技术，集成高质量熔焊垂域模型，开展多模数据实时感知的过程质量自适应调控工艺试验，研制熔焊质量实时智能调控系统，在组立、分段、管道、车体等复杂结构进行焊接验证，解决高承载结构焊接成型不良、质量不稳定、缺陷频繁等难题，实现船舶、石化管道、特种车辆等重点行业典型产品的工程应用，形成船舶等行业大型复杂结构模型驱动的智能焊接生产能力。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）形成焊接最佳工艺规划、质量实时调控、“工艺—质量”关系等不少于 3 类垂域模型及模块软件，模型组件数量 ≥ 30 个，垂域模型模块软件具有焊缝实时感知的焊接工艺动态规划、焊接过程质量实时调控、质量智能评价等功能；每类模型均需覆盖 34 种以上金属的承载结构，其中船舶高强度钢、低温钢、耐候钢、管道用钢、超高强度钢等承载结构用钢种类 ≥ 24 ，304、316、高氮钢等不锈钢种类 ≥ 5 ，高强铝合金种类 ≥ 5 ，覆盖 PMIG、MAG、PTIG、CMT、双丝 CMT、等离子、激光+PMIG 复合等主要熔焊工艺方法 ≥ 10 种，主要焊

接材料 ≥ 10 种。

(2) 熔焊过程数据建模软件工具 1 套, 具有材质/焊缝/坡口尺寸/质量要求等标注、工艺数据时空定位分级分类、实时数据清洗、训练样本特征嵌入等功能, 单条数据特征提取与标注时间由分钟级提升至秒级、准确率 $\geq 99.5\%$, 实时工艺数据对应的焊缝位置定位精度优于 1mm。

(3) 典型熔焊缺陷过程特征样本构建平台, 形成熔焊垂域模型训练样本集 1 套, 其中典型缺陷样本占样本总数 $\geq 65\%$, 包括气孔、夹渣、未熔合、未焊透、裂纹等缺陷样本; 训练样本包括工件及焊接接头设计、焊接过程实时感知、技能大师动作与意图等数据, 缺陷无损检测、组织性能检测等质量数据; 电流/弧压实时感知频率 $\geq 2\text{kHz}$ 、焊接过程短/断路异常感知准确率¹ $\geq 99.9\%$, 熔池图像尺寸提取误差² $\leq 0.2\text{mm}$, 技能大师动作意图感知准确率³ $\geq 90\%$ 。

到 2028 年 10 月, 完成以下指标:

(4) 研制熔焊质量实时智能调控系统 1 套, 智能规划的最佳工艺一次使用率⁴ $\geq 95\%$ 、关系模型准确率⁵ $\geq 85\%$, 质量

1 焊接过程短/断路异常感知准确率=(实时传感提取正确的短路/断路次数 $\div$ 实际短路/断路次数) $\times 100\%$, 一般按 1s 或 10s 计算。

2 熔池图像尺寸提取误差为熔池实际轮廓长度或宽度, 与实时感知提取的熔池图像轮廓长度或宽度, 二者差值的绝对值。

3 技能大师动作意图感知准确率=(感知预测与技能大师实际操作吻合的动作意图数量 $\div$ 技能大师实际调控动作总数) $\times 100\%$, “动作”主要包括焊枪位置、姿态、焊速、电流等实时调整, 检测对象: 人员是大国工匠或国家级焊接技能大赛前三名级别技能大师, 工件是典型材料典型结构的实际焊接。

4 智能规划的最佳工艺一次使用率=(未经人工修改直接投入实际施焊的智能规划焊接工艺数量 $\div$ 智能规划焊接工艺总数) $\times 100\%$ 。

5 关系模型准确率=(采用关系模型正确预测评估的焊缝内部缺陷和外部成型质量的焊缝数量 $\div$ 参与评估的焊缝总数) $\times 100\%$ 。

实时调控准确率¹≥90%、实时调控时间≤120ms。

工程化指标:

到 2027 年 12 月，完成以下指标:

(1) 以垂域模型模块软件为核心的熔焊质量实时智能调控系统技术就绪度 (TRL) ≥8 级，熔焊垂域模型模块软件或熔焊质量实时智能调控系统在机器人焊接装备中集成，并在船舶、石化管道、轨道交通、特种车辆等重点行业典型产品实际使用环境中验证。

(2) 熔焊垂域模型应用于船舶、石化管道、轨道交通、特种车辆等重点行业高承载结构焊装生产，熔焊垂域模型模块软件或熔焊质量实时智能调控系统部署到装备端侧，应用台 (套) 数≥2，实现在船体组立件、合拢、石化承压管道、机车车头主体结构、特种车辆车体等不少于 2 个典型产品的焊接质量实时调控，焊缝长度≥2000m，典型结构高承载焊缝焊接一次合格率²≥97.0%。

到 2028 年 10 月，完成以下指标:

(3) 熔焊垂域模型应用于船舶、石化管道、轨道交通、特种车辆等重点行业高承载结构焊装生产，熔焊垂域模型模块软件或熔焊质量实时智能调控系统部署到装备端侧，累计应用台 (套) 数≥5，实现在船体组立件、船体合拢、石化承

1 质量实时调控准确率=(射线探伤焊缝合格的 X 光片总数÷焊缝 X 光片总数)×100%，在实际车间环境，采用熔焊质量实时智能调控系统针对典型材料典型结构对接接头对接焊缝进行施焊的焊缝采用 X 射线探伤检测，验证调控准确性。

2 焊接一次合格率=(合格的焊缝数量÷焊缝总数)×100%，检测考核对象是重点行业典型结构高承载焊缝。

压管道、轨道交通装备车体、特种车辆车体等累计不少于 5 个典型产品的焊接质量实时调控，累计焊缝长度 $\geq 12000\text{m}$ ，典型结构高承载焊缝一次合格率 $\geq 97.0\%$ 。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，采用公开竞争方式。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 2:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位需为具有焊接工艺相关数据模型与软件工具研发优势的企业、科研院所或高水平研究型大学，鼓励产学研用单位联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 1.3.2.5：高性能锻造工艺智能生成模型与软件研发及验证

1.研究目标

针对高端装备对大型金属构件高性能锻造质量管控需

求，为提升锻件组织性能的一致性和可靠性，解决锻造工艺复杂度高、过程干扰多、实时调控困难等关键技术难题，突破高性能锻件锻造过程多维数据获取与融合、锻造质量管控模型构建等关键技术，形成高性能锻件锻造工艺智能生成与动态优化模型库，开发涵盖锻造工艺智能规划、参数动态优化、质量实时预测、装备实时控制一体化软硬件系统，在能源、石化、航空等行业难变形金属大型构件锻造生产中应用验证，为高端装备高性能锻件提供质量保障，缩短产品交付周期。

2.研究内容

（1）高性能锻件锻造过程多维数据获取与融合技术

研究高性能锻件锻造全过程多维数据实时协同传感采集技术；研究锻造及辅助工序全过程多场多尺度动态模拟、锻造全过程有限元建模技术；研究涵盖实时采集数据、检测数据与有限元数据在内的锻造过程多模态数据特征提取方法和标注技术；研发高性能锻件锻造过程质量特征提取及数据标注工具，形成模型训练数据集。

（2）高性能锻造工艺生成与动态优化模型构建技术

研究基于混合专家系统（MOE）通用大模型的锻造工艺路线生成技术和工艺参数预决策技术，构建锻造工艺智能生成模型；研究“机理—数据—知识”多模式融合驱动的“材料—装备—工艺—质量—性能”关联关系、耦合传递与演进路径，

建立高性能锻件锻造过程“材料—工艺—装备—质量—性能”知识库；研究“机理—数据—知识”驱动的工艺动态优化模型构建方法，形成锻造工艺动态优化模型库。

（3）锻造过程工艺智能规划与动态优化控制系统

研究基于锻造工艺智能生成和锻造工艺动态优化模型的锻造工艺参数实时调控技术；开发涵盖锻造工艺智能规划、参数动态优化、质量实时预测的一体化软硬件实时控制系统，支持包括锻造压机、操作机、加热炉在内的装备全过程锻造工艺参数实时调控，实现锻造全过程跨阶段耦合传递的质量自动寻优。

（4）锻造工艺智能生成模型集成验证

研究锻造工艺智能生成模型、工艺动态优化模型、一体化软硬件控制系统和典型锻造装备的集成技术，开展典型高性能锻件锻造工艺试验和集成生产试验，完成与典型锻造装备融合集成，形成模型驱动的高性能锻件智能化锻造装备技术，在能源、石化、航空等行业高端装备中大型金属构件锻造场景中应用验证，实现最佳锻造工艺的智能生成和锻造过程智能调控。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）形成高性能锻造工艺样本数据集，数据涵盖锻件

设计、工艺设计、锻造过程、质量检测等环节，包括融合图纸、文本、实时数据、图像、视频、声音等 5 种以上模态的数据，数据集样本 ≥ 100 万条；开发高性能锻件锻造过程质量特征提取及数据标注应用工具 1 套，实现“数据—样本”等工艺和质量特征的标注与融合，单条数据提取标注时间由分钟级提升为秒级，特征标注提取准确率 $\geq 95\%$ 。

（2）锻造工艺知识库 1 套，覆盖低合金高强结构钢、耐热钢、中碳调质钢、钛合金、高温合金等 10 类难变形金属，轴、轮盘、框箱、起落架等 12 种结构的高性能锻件，包含典型材质典型结构锻造工艺、锻造工艺与性能关系等知识条目 ≥ 2000 条。

（3）锻造工艺动态优化模型库 1 套，包括温度、压力、变形量、微观组织等调控模型数量 ≥ 100 个。

（4）高性能锻件锻造工艺智能生成模型及锻造工艺参数实时控制系统 1 套，包括锻造工艺智能生成、锻造工艺动态优化和锻件性能预测 3 类模型，具备工艺智能设计、锻造构件性能预测评估、锻造“压机—操作机—加热炉”工艺参数动态调整等功能，功能组件数量 ≥ 15 个。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（5）形成锻造工艺智能生成、锻造工艺实时调整、超大压力智能锻造工艺规范等相关国家/行业标准 ≥ 3 项。（通过标准立项）

工程化指标:

到 2027 年 12 月，完成以下指标:

(1) 高性能锻造工艺智能生成模型与锻造工艺参数实时控制系统技术就绪度 (TRL) ≥ 8 级，并在典型锻造装备中集成，在能源、石化、航空等装备锻件制造企业实际生产环境中验证通过，并交付锻件制造企业使用。

(2) 通过锻造工艺智能生成等垂域模型开展锻造工艺自主设计，智能生成的锻造工艺一次可使用率 $\geq 98\%$ ，重点行业典型锻件锻造合格率大于 99%。

到 2028 年 10 月，完成以下指标:

(3) 在能源、石化、航空等行业大型高性能锻件锻造生产过程开展模型应用验证，累计运行时间不少于 3 个月，高性能锻造工艺智能生成模型与锻造工艺参数实时调控系统部署到大型锻造装备（公称压力覆盖 40MN 至 800MN）端侧，实现应用台（套）数 ≥ 3 ，连续应用时间 ≥ 3 个月，满足投影面积最大可达 6m^2 的难变形金属模锻件、钢锭总质量 ≥ 500 吨级等不少于 3 类难变形金属构件的锻造生产。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，采用公开竞争方式。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 2:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位需为具备锻压装备研制能力或具有锻造工艺相关数据模型与软件工具研发优势的企业、科研院所或高水平研究型大学，鼓励产学研用单位联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

（四）智能制造新技术标准

项目 1.4.2.2：工业机器人安全测评系统及标准研制

1.研究目标

针对工业机器人安全测评能力和标准研制滞后等行业痛点问题，构建面向新技术融合复杂工业场景的机器人安全测评指标体系，研究部件功能失效与整机安全风险叠加、多物理场耦合多模态感知安全验证、安全隐患与场景风险处置等关键测评方法，开发工业机器人全生命周期功能安全、多场景耦合的工业机器人物理安全、工业机器人信息安全、供应链安全等测评系统，开展测试方法、测评系统集成、测评技术要求、分级评估等重点标准研制及应用验证，形成面向

多品牌多构型工业机器人安全一体化测评公共服务能力。

2.研究内容

（1）面向新技术融合复杂工业场景的机器人安全测评指标体系

围绕人机协作、自主作业、多模态感知与交互等典型工业场景中的高风险环节，制定覆盖“感知—认知—决策—执行”全链条融合安全测评指标体系，明确覆盖功能安全、物理安全、信息安全等多层级测评指标的定义、适用条件、定量/定性设定方法、测评方法等关键要素，构建适用于典型场景的测试用例集。

（2）工业机器人全生命周期功能安全测评系统

研究工业机器人电子/电气/可编程电子系统及气动、液压构成的安全控制系统的功能安全测评验证技术，构建覆盖各类型工业机器人安全元器件平均无危险故障时间的数据库；研究安全元器件及软件失效导致的故障影响机理，开发工业机器人全生命周期安全完整性等级验证评估系统。

（3）多场景耦合的工业机器人物理安全测评系统

研究多物理场景耦合的碰撞风险仿真验证、多模态感知多工况高精度人机交互安全测评、多交互模式碰撞接触测试方法，开发复杂工艺和可变工况场景测评系统；研究力控精度和力反馈灵敏度检测、碰撞检测技术、动力学模型等关键技术，实现工业机器人对人体不同部位组织、静态/暂态等不

同环境下的安全测试验证。

（4）工业机器人信息安全测评系统

研究漏洞挖掘、逆向分析和异常行为识别等关键技术，构建覆盖工业机器人全生命周期的威胁建模和安全防护技术体系，搭建面向复杂工业机器人场景的安全攻防靶场平台，研制针对工业机器人专用操作系统、控制协议和物理行为耦合特性的安全监测、动态诱捕与行为分析、恶意软件检测等工具链，开发机器人信息安全测试验证系统，开展机器人产品信息安全防护能力等级测试评估。

（5）工业机器人安全测评标准制定与应用验证

聚焦工业机器人安全测评标准化需求，制定测试方法、测评系统集成、测评技术要求、分级评估等重点标准；面向汽车、3C 制造等典型行业高端应用场景，开展重点标准、测评指标体系、测评系统的试验验证与优化。

（6）工业机器人供应链和产业安全监测分析系统

研究制定工业机器人供应链安全可控能力评估方法，开展硬件和源代码安全可控水平评估，提出软件供应链安全要求，从硬件和软件两个层面对机器人整机安全可控能力进行评估。研究产业安全监测和质量追溯体系，建立产业安全运行风险监测分析系统，综合提升行业治理能力。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）机器人安全测评指标体系 1 套，建立覆盖人机协作、自主作业、多模态感知与交互等典型工业场景的测试用例集不少于 150 个。

（2）工业机器人全生命周期功能安全性能等级（PL）和安全完整性等级（SIL）测评系统 1 套，具备元件级安全回路的辨识能力及架构分析、故障与失效机理分析、系统平均无危险故障时间计算及软件等测评验证功能，至少支持多关节工业机器人、协作机器人、物流机器人等 3 种类型的性能等级（PL）和安全完整性等级（SIL）评估，支持紧急停止、保护性停止、使能切换、速度控制、手动模式操作、启动/重启联锁、模式切换、轴限制、手动引导、保持运行、速度与距离监控、力与功率限制等安全功能的评估。机器人安全元器件数据库覆盖电子、电气、可编程电子器件等元器件不少于 40 类。

（3）多场景耦合的工业机器人物理安全测评系统 1 套，支持人机共融协作场景下的碰撞试验测试，最大碰撞速度 $\geq 5\text{m/s}$ 、速度监控分辨率优于 0.1mm/s 、碰撞压力采样频率 $\geq 500\text{Hz}$ ，最大碰撞力 $\geq 500\text{N}$ ，碰撞力（X、Y、Z 三个方向）精度 $\leq 0.5\text{N}$ ，停止距离测量分辨率 $\leq 0.1\text{mm}$ ，最大碰撞压力 $\geq 600\text{N/cm}$ ，压力测量分辨率 $\leq 0.2\text{N/cm}^2$ 。

（4）机器人信息安全测试验证系统 1 套，具备漏洞扫

描、渗透测试、逆向分析等不少于 3 种机器人信息安全测试方法，研发不少于 5 款信息安全测试工具，支持不少于 15 种品牌主流机器人产品的虚拟化仿真和漏洞挖掘，支持工业机器人产线的资产识别、自动化漏洞扫描和漏洞验证，支持工业机器人生产安全监测和风险审计。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（5）工业机器人产业安全监测分析系统 1 套，覆盖产业链上下游各关键环节，提出工业机器人供应链安全可控能力评估方法不少于 2 项，支持软硬件安全可控水平、软硬件供应链安全风险等评估，研发评估工具不少于 1 项，包括机器人开源组件库、开源组件漏洞库等。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）工业机器人全生命周期功能安全性能等级（PL）测评系统、多场景耦合的工业机器人物理安全测评系统，机器人信息安全测试验证系统，上述系统的技术就绪度（TRL） ≥ 8 级，技术方法实现小规模复制应用，技术成熟稳定，得到用户认可。

（2）覆盖高端工业机器人功能安全、信息安全、物理安全等 ≥ 15 项核心指标的安全测评能力，测评结果一致性水平 $\geq 95\%$ 。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

(3) 工业机器人安全相关国家/行业标准 ≥ 5 项(其中国家强制性标准不少于1项)。(通过标准立项)

(4) 开展不少于200台套20种主流品牌的工业机器人安全测评验证,形成第三方公共服务测试能力。其中,针对专项布局的工业机器人提供不少于7台套测评验证服务。

4.实施期限

本项目为2024年末部署项目。实施期限为2025年11月—2028年10月。

5.项目设置及经费需求

拟支持1个项目,采用公开竞争方式。

所属创新分类:重大共性关键技术。

其他来源资金(包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金)与中央财政资金比例原则上不低于2:1。

中央财政投入支持方式:事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备机器人标准化工作基础及专业测评技术研究优势的科研院所、企业或高水平研究型大学,应与国家级机器人质检中心,以及相关产学研用单位联合申报,申报联合体应具备较强的专业研发团队,以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过15家、下设课题不超过5个。

项目 1.4.3.1: 智能制造系统解决方案实施成效测评标准

及工具研制

1.研究目标

为全面量化分析设计制造一体化、按需与柔性制造和全流程协同优化等典型制造模式解决方案在跨域协同、柔性制造和全局优化等方面的实施成效，研究典型制造模式关键特征表征方法，构建解决方案能力和实施成效测评指标体系，研究典型制造模式解决方案实施成效影响机理分析、指标测评方法、诊断评估模型，研发测评数据采集处理工具集和测评系统，构建行业规则集和基准数据库，研制智能制造系统解决方案测评相关国际/国家标准，在重点行业开展标准试验验证与应用推广，形成智能制造系统解决方案的能力和实施成效测评公共服务能力。

2.研究内容

（1）智能制造系统解决方案能力测评指标体系及方法

研究覆盖智能制造系统解决方案技术先进性、功能完备性、智能化水平等维度的能力表征要素，围绕典型制造模式核心特征构建能力测评指标体系，覆盖研发设计、柔性作业、生产管控、运行维护、经营决策等智能制造场景；研究适用于跨行业、多场景融合、模块化的智能制造系统解决方案综合能力测评模型构建方法。

（2）智能制造系统解决方案实施成效测评指标体系及方法

研究表征智能工厂生产效率、产品质量和生产成本等实施成效的影响因素，研究典型制造模式的关键特征表征方法，构建多维实施成效通用测评指标体系和典型制造模式扩展指标集；研究设计制造一体化模式下跨环节数据和模型协同对制造效率的影响规律，研究数据/模型复用率、协同响应效率等指标测评方法；研究柔性制造模式下多业务成本折算方法，研究换线换产效率、工艺稳定性等指标测评方法；研究全流程协同优化模式下高能耗制造过程多层级能耗模型与资源利用效率指标测评方法。

（3）智能制造系统解决方案实施成效诊断方法

研究指标体系在不同行业的适配性，构建行业测评规则集；研究制造系统多层级测评结果关联分析方法，研制实施成效影响因素的诊断评估知识图谱，构建基于知识推理的系统解决方案实施成效诊断评估模型，研究数据与机理混合驱动的问题溯源分析方法，提供实施成效预测与辅助决策。

（4）智能制造系统解决方案实施成效测评工具与系统

研究工厂业务数据采集和规范化处理、基于语义的数据映射、测评指标自动关联等技术，开发可灵活部署的测评数据采集和处理工具集；研究多模态测评数据融合分析方法、行业解决方案基线模型构建方法，构建典型行业与制造模式实施成效测评案例库、测评数据集，开发智能制造系统解决方案实施成效测评系统。

（5）智能制造系统解决方案实施成效测评标准研制与应用验证

研制智能制造系统解决方案能力测评指标体系、实施成效测评指标体系、测评方法、行业应用指南等国际/国家/行业标准；面向汽车、船舶、钢铁、轨道交通等不少于 5 个重点行业，开展系统解决方案标准化测评服务，指导各系统解决方案的建设实施。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）智能制造系统解决方案能力测评指标体系 1 套，涵盖技术先进性、功能完备性、智能化水平等维度可量化核心指标 ≥ 30 种。

（2）智能制造系统解决方案实施成效测评指标体系 1 套，形成表征设计制造一体化、按需与柔性制造和全流程协同优化等典型制造模式的专用指标集 ≥ 3 套，涵盖协同响应效率、换线换产效率等可量化核心指标 ≥ 20 种。

（3）行业量化测评规则集 ≥ 10 套，涵盖指标测评、行业适配、诊断评估等规则；构建解决方案实施成效诊断评估知识图谱，节点数 ≥ 10 万个。

（4）业务数据接入与处理工具集，对研发、生产、管理等 30 种以上业务类数据进行规范化处理，支持业务数据

可信接入和传输，支持主流工业通信协议 ≥ 6 种，测评指标要素抽取和关联准确率 $\geq 90\%$ 。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（5）系统解决方案实施成效测评系统，测评结果可重复性 $\geq 99\%$ ；构建典型行业实施成效测评数据集 ≥ 5 种，测评案例库 ≥ 5 类，覆盖柔性换产、质量管控、能源管理等测评验证场景 ≥ 5 个。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）智能制造系统解决方案测评工具与系统技术就绪度（TRL） ≥ 8 级，以部署运行的系统解决方案为对象，在真实生产环境下对解决方案实施成效指标体系进行测试及验证。

（2）测评指标体系、测评方法、行业应用指南等国家/行业标准 ≥ 6 项（通过标准立项）；国际标准提案 ≥ 1 项。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（3）累计测评指标体系、测评方法、行业应用指南等国家/行业标准 ≥ 10 项（通过标准立项）；累计国际标准提案 ≥ 2 项。

（4）基于系统解决方案实施成效测评工具和系统为汽车、船舶、钢铁、轨道交通装备等不少于 5 个重点行业的 50

家企业开展深度测评服务。其中，针对本专项布局的不少于 8 个行业智能制造解决方案开展实施成效测评服务。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，采用公开竞争方式。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 2:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备智能制造系统解决方案相关标准化工作基础及专业测评技术研究优势的科研院所、企业或高水平研究型大学，鼓励产学研用单位联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

二、工业机器人与智能检测装备

（一）高端工业机器人

项目 2.1.1.1：工业机器人技术底座研发及验证

1.研究目标

工业机器人技术底座是面向工业领域机器人系统开发者提供的一个共性技术平台和开发工具链，其包含开发所必需的正向设计软件、操作系统、运动控制库、感知语言动作模型算法库、工艺库及对应的集成开发环境。技术底座的推广应用可以推动工业机器人与人工智能结合，让机器人行业企业和下游客户避免重复开发与投入，大幅提升机器人产品和智能化功能的开发效率，降低开发门槛和成本，推动传统工业机器人向智能工业机器人升级换代。同时由于很多高科技领域的竞争很大程度上是应用生态的竞争，研发安全可控的工业机器人通用技术底座，形成开发者生态，是保障机器人产业链安全的基础。

针对我国工业机器人智能化升级中面临的开放开发体系缺失、操作系统依赖国外、多模态感知决策能力不足、正向设计方法滞后以及细分领域工业机器人智能化开发生态薄弱等问题，突破高实时异构调度与跨域算力协同、多模态大模型虚实融合训练、高精度机电耦合与智能控制等关键技术，建成包含支持多品牌协同部署的智能化通用开发系统、国产分层架构操作系统、多模态感知决策动作大模型、正向设计与控制算法库等功能模块的工业机器人智能技术底座共性平台，构建涵盖虚实融合训练场、数字样机验证平台及典型工艺示范产线的多层级验证体系，并在焊接、喷涂、装配等典型场景实现智能应用 APP 开发与验证，打造“基础软

件—算法模型—硬件系统—场景应用”全栈技术安全可控的应用生态，推动我国工业机器人产业技术升级。

2.研究内容

（1）工业机器人正向设计系统和控制算法库研发

工业机器人正向设计技术体系。解析需求指标层级分解机制，分析设计参数与系统性能映射规律，建立“需求指标分析—参数映射—多目标优化—虚拟验证—数字样机与物理样机融合验证”全流程方法体系；研究设计工具链间数据传输格式与转化机制，构建自动化数据格式转化与计算方法，研发机器人平台产品机电控一体化正向设计软件，实现统一平台下机器人系列多机型机电控参数适配优化。

机器人精准建模、标定补偿及协同优化技术。研究机器人运动学与动力学精准建模方法、机器人跨构型的多源动静误差标定和补偿技术、机器人多目标约束的多系统协同优化技术，构建机器人精准建模、高精度标定补偿和协同优化算法库。

机器人控制算法仿真平台与智能运动控制技术。研究机器人通用控制算法的全栈仿真设计技术、精准动力学异构实时计算的高性能运动控制、多类传感器信息特征提取、基于视觉反馈的无标定视觉伺服控制、基于力反馈的高精度力/位混合柔顺控制、自适应补偿抑振实时控制算法，构建机器人仿真场景，开展控制算法验证，形成高性能智能运动控制

算法库。

机器人空间仿真和定位导航、运动规划技术。研究机器人导航和运动控制算法的空间仿真技术，研究多源传感融合的场景通用鲁棒定位技术、机器人多目标约束下的动态最优运动规划算法、移动操作协同导航规划算法，构建适应跨构型、多场景、高精度和强鲁棒性的机器人定位导航与运动规划仿真验证平台和算法库。

数字样机与物理样机融合验证优化。研究部件级、本体级、系统级三级递进测试验证方法，参数双向校准和系统级误差补偿机制，建立“仿真预测优化—实物反馈—数模融合”的闭环流程，实现数字样机与物理样机间的有效衔接与闭环验证。

（2）基于国产内核的智能工业机器人操作系统研制

多样化负载下操作系统实时调度优化技术。在国产异构硬件环境下，设计智能工业机器人操作系统多类型应用的统一调度框架，建立支持机器人应用自定义的实时和非实时调度策略；设计异构资源场景下硬实时任务异构多核调度算法；研究软硬协同优化调度机制，以优化多样化负载下的强实时性能。

复杂应用计算资源按需部署与管理优化技术。建立跨CPU、AI 计算单元和异构外设等异构资源的统一标准化抽象接口，设计资源特征融合与归一化的资源管理方法，研究资

源动态访问信息分析技术、复杂应用环境多类型任务优先级权重动态调整技术。

多层次模块化系统安全隔离增强技术。研究操作系统内核组件与系统虚拟化的安全增强技术及最小可信基验证方法；研究面向全系统安全的虚拟化级、内核级和语言级安全隔离机制；研究以功能模块为安全隔离粒度，构造单向安全依赖系统软件架构，设计安全隔离增强的可信操作系统内核与系统虚拟化软件。

工业机器人操作系统基础中间件研究。研发分页注意力、算子融合、连续动态批处理、混合精度量化等核心技术；研制支持多模态数据实时分发的通信服务中间件，研究中间件协同工作机制，提升中间件系统的性能与可靠性。

工业机器人硬件框架接口规范研究。建立与机器人硬件平台解耦的编程接口标准及领域特定语言体系；构建统一的异构硬件调度系统，实现应用程序跨不同品牌工业机器人运行的分层式框架。

基于国产内核的工业机器人操作系统开发与工程验证。以开源开放 openEuler 社区操作系统为基础底座，研制一套工业机器人操作系统，适配 ARM、LoongArch、RISC-V 和 X86 等处理器架构下的安全可控硬件平台，开展操作系统实时性、可靠性、安全性、可扩展性等各项技术指标的测试与工程验证。

（3）工业机器人多模态感知决策动作基础模型

工业场景大规模虚实融合数据生成技术。搭建工业场景操作数据采集与训练场，研发工业机器人大规模多模态虚实数据融合与生成关键技术；研究机器人虚实融合数据清洗与增强技术，构建工业机器人多场景任务虚实融合训练场，形成规模化高质量虚实融合数据生成能力。

工业场景世界模型构建技术。构建面向工业场景的空间智能世界模型，研发动态环境建模技术；研究多模态视觉语言模型和技能预训练技术，研发时空自适应物理规律学习引擎，构建机器人作业空间内因果关系动态预测模型；开发抗干扰的在线学习和跨模态在线推理技术。

多模态复杂作业推理和决策技术。研究多模态信息融合关键技术，设计多模态决策动作的大模型结构；研制多模态感知决策工具集，分析环境时空变化对作业目标的影响，构建实时反馈机制；研究复杂高精度作业自适应决策模型与策略优化关键技术。

机器人复杂作业动作库构建。基于高质量交互动作数据集，研究强化学习目标引导的生成式动作学习算法；研究高效奖励策略与模型设计方法、高维状态空间稳定训练算法、多重不确定性鲁棒对抗训练架构、渐进式学习策略，支撑机器人精细和序列动作有效训练；设计高速连续学习策略，运用元学习、持续学习和技能蒸馏技术，实现技能动作的快速

获取、迁移泛化和共享复用，构建机器人复杂作业技能动作库。

多模态感知决策动作大模型及工程验证。面向多种类工业场景智能作业应用，构建多模态感知决策动作联合大模型；基于高质量特定领域数据研究剪枝、量化等模型优化与微调技术，实现模型容器化部署与推理加速，在典型工业场景实现机器人作业验证。

（4）工业机器人应用的通用开发系统

工业机器人应用程序抽象架构和接口标准化。基于标准的工业机器人操作系统接口和中间件，研究工业机器人应用程序的通用架构、多机器人系统的协作交互和安全保障机制，制定统一的工业机器人应用程序接口标准。

人工智能辅助的工业机器人编程工具。研究人工智能辅助的应用程序低代码开发、代码和测试用例生成、静态扫描和动态调试分析、系统故障日志辅助分析等方法，设计机器人应用通用开发系统的辅助工具插件，实现人工智能工具辅助工业机器人软件研发。

面向典型工艺的工业机器人应用解决方案模板。研究基于工艺数据的知识抽取与建模，构建工艺数据集与工艺机理的映射关系，建立工艺参数、机器人轨迹、材料特性、作业方式等多模态知识图谱。解析各种行业的典型工业机器人应用，分析机器人应用程序的设计和开发模式，研究工业机器人

人应用程序结构，根据不同应用特点建立支持工艺和运动数据收集分析、外围设备灵活兼容、应用程序持续迭代的工业机器人程序开发模板，辅助工业机器人工艺应用程序开发。

工业机器人应用系统模拟器及虚拟仿真调试。分析跨操作系统时钟同步和实时系统模拟调试机制，研究工业机器人控制系统和外围设备的模拟方法，模拟设备的仿真—真机在线切换和组合调试机制，构建基于工艺机理模型的数字孪生平台与智能数据生成体系，开发机器人与外围系统的高保真模拟和联合调试技术。

机器人应用的通用开发系统及工程验证。研发基于机器人应用程序抽象架构和解决方案模板的应用开发系统，实现对机器人应用设计、开发、调试过程的完整支持，并在汽车、电子等应用重点行业，结合工业机器人焊接、涂装等工艺开展工程验证。建立集成正向设计系统、底层核心算法包、机器人操作系统、开发系统等系统和工具链的工业机器人技术底座平台。

（5）基于技术底座的智能化工业机器人应用开发与验证

面向多场景的典型作业分解与排序技术。研究机器人作业过程关键特性，提取关键特性要素，形成机器人典型作业微动作集；研究机器人作业全过程长动作序列动作的自动分解方法；研发机器人典型作业过程与机器人微动作集排序方

法，形成从作业过程到微动作的自动排列方法。

面向不同构型的机器人和关键组件等要素适配技术。开展不同构型机器人与工业机器人技术底座适配技术研发；开发不同外部工具及附加传感、附加轴等部组件在工业机器人技术底座中的驱动接口，形成外围组件库；开发不同构型机器人及外围设备标定技术。

搭建工业机器人智能化应用典型工艺场景。研究典型工艺场景工艺特征及异常工况，设计面向典型工艺的机器人作业场景，搭建焊接、喷涂、涂胶、装配、切割等机器人典型作业场景测试平台，完成各场景硬件与技术底座平台的适配及虚拟场景搭建。开发面向典型工艺场景的应用 APP 并进行验证。

机器人智能 APP 及工业机器人技术底座应用。基于工业机器人技术底座平台及形成的典型工艺场景模板库，扩展技术底座应用场景，面向焊接、喷涂、涂胶、装配、切割等工艺，批量开发多行业 APP，实现应用推广。

3.考核指标

建立工业机器人技术底座，面向智能工业机器人的设计、开发、仿真、部署、调试、数据采集等环节，形成一体化全流程开发系统及相关工具链；基于工业机器人技术底座，完成不少于 20 款机器人智能应用 APP 开发，形成不少于 10000 名开发者的生态，在不少于 5000 台国产工业机器

人上进行部署，具体指标包括：

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）机电控一体化正向设计软件：实现统一平台下工业机器人系列多机型机电控参数适配优化。

（2）底层核心算法软件包：涵盖联合建模与参数优化、振动抑制与精度保持等功能。机器人动力学模型求解异构并行计算模式时间比串行计算模式时间降低 50%。振动抑制优化后的位置稳定时间减少 30%。点位位置绝对精度、轨迹绝对精度、到点稳定时间和距离准确度的仿真值与实测值偏差小于 20%。

（3）基于国产内核的智能工业机器人操作系统：适配 ARM、LoongArch、RISC-V 和 X86 等不少于 4 种处理器架构下的安全可控硬件平台。网络同步时钟抖动时间 $\leq 10\mu\text{s}$ ，系统任务切换时间 $\leq 10\mu\text{s}$ 。

（4）工业机器人应用通用开发系统：开发代码和测试用例生成等智能辅助工具 ≥ 2 种。建立不少于 2 种工作站级作业场景的工业机器人应用模板。机器人低代码/无代码自主编程软件生成程序准确率优于 95%，提高机器人应用部署效率。

（5）基于技术底座的智能型工业机器人：累计机器人构型数量不少于 3 种。开发涵盖焊接、磨抛、码垛、钻铆、

铣削等不少于 5 种工艺的 15 款 APP 软件。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（6）工业机器人正向设计系统和控制算法库：运动规划算法比多项式轨迹规划算法的典型门型节拍提升 20%。对比计算力矩控制方法，动力学高性能控制的直线轨迹动态跟踪误差和位置超调量¹分别减小 15% 和 20%。相比 Cartographer 方法，地图重建精度提升 30%，重建完整率 $\geq 90\%$ ，典型场景下视觉导航定位误差减小 20%，激光雷达传感器融合导航定位误差减小 20%。静态柔顺性仿真值与实测值偏差小于 5%。正向设计系统和控制算法库具有自主知识产权。

（7）基于国产内核的智能工业机器人操作系统：机器人系统最小实时控制周期 $\leq 1\text{ms}$ 。实时数据分发延迟 $\leq 1\text{ms}$ 。软件安全测评认证达到 EAL4+。实时操作系统具有自主知识产权。

（8）工业机器人多模态感知决策动作基础模型：多模态感知决策动作大模型参数量 $\geq 30\text{B}$ ，支持模态数 ≥ 5 ，支持任务数量 ≥ 10 。单一工业典型应用场景下推理技术指标：物体检测准确率 $\geq 90\%$ ，环境理解准确度² $\geq 80\%$ ，推理延迟³ $\leq 20\text{ms}$ 。机器人复杂作业动作库动作数 ≥ 50 。单一工业典型任务场景

1 参考 GB/T 12642-2013。

2 环境理解准确度=(正确识别的空间关系数量/场景中总空间关系数量) $\times 100\%$ 。

3 模型在边缘设备上完成单次推理的时间。

下任务执行效率指标：任务推理准确率¹≥95%，任务执行成功率²≥95%。虚拟场景生成种类≥5种，作业种类≥10种，数据集规模≥10万条，仿真精度≥90%，数据集构建种类≥5种。基础模型具有自主知识产权。

（9）工业机器人应用通用开发系统：累计开发代码和测试用例生成等智能辅助工具≥5种，实现工业机器人软件的白盒测试代码自动生成，千行代码的测试用例生成时间³<5s，测试用例的语句覆盖率⁴≥90%。累计建立不少于5种工作站级作业场景的工业机器人应用模板，同等复杂度下使用模板的平均开发效率⁵提升50%。工业机器人模拟器仿真准确度≥98%；支持工业机器人应用程序、外部PLC、外部传感器等3种以上关键组件的源码级联合调试。支持设备模拟常用的实时总线类型≥3种，支持仿真模拟的机器人外围设备种类≥10种。数字孪生支持工艺参数自主优化类型≥5类，工艺仿真自主生成时间≤3min。构建多模态工艺知识图谱节点数≥2万，适配机器人典型制造工艺场景≥5种。应用通用开发系统具有自主知识产权。

（10）基于技术底座的智能型工业机器人：累计机器人构型数量不少于6种。累计完成不少于6种工艺，不少于20

1 给定一个工业典型任务描述数据集，任务推理准确率=(正确推理的任务数量/总任务数量)×100%。

2 给定一个工业典型任务描述数据集，任务执行成功率=(成功执行的任务数量/总执行任务数量)×100%。

3 千行代码测试用例生成时间：平均每1000行机器人应用程序代码对应的白盒测试用例生成时间。计算方法为：千行代码测试用例生成时间=测试用例生成总时间/(程序总代码行数/1000)

4 语句覆盖率：执行全部测试用例后实际执行过的机器人应用程序源代码行数和总代码行数的比例。计算方法为：语句覆盖率=被执行的代码行数÷总代码行数×100%。

5 平均开发效率=应用总代码量/总投入人月。

款 APP 的开发，形成典型场景 APP 应用库。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）工业机器人正向设计开发系统 1 套，完成不少于 1 个机型产品研发案例，在不少于 1 家工业机器人整机企业工程应用。开发机器人建模、标定与补偿、运动控制与智能控制等不少于 3 类的底层运动控制核心算法库，算法库适配机器人构型不少于 4 种。

（2）基于国产内核的智能工业机器人操作系统 1 套，搭载基于国产内核的机器人操作系统的企业用户不少于 2 家。

（3）工业机器人应用通用开发系统 1 套，支持不少于 3 种不同品牌工业机器人的联合开发与真机部署，工业机器人应用通用开发系统企业用户 ≥ 8 家，支持汽车、电子等不少于 2 个不同行业 6 种工业机器人应用开发。

（4）建立工业机器人技术底座，基于底座平台完成不少于 15 款机器人智能应用 APP 开发，形成不少于 7000 名开发者生态，在国产工业机器人上部署不少于 3000 台。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（5）工业机器人正向设计系统和控制算法库，技术就绪度（TRL） ≥ 7 级，在实际环境中完成工业机器人正向设计和控制应用验证。累计开发机器人建模、标定与补偿、运动

控制与智能控制、运动规划、环境建图导航等不少于 5 类的底层运动控制核心算法库，累计算法库适配机器人构型不少于 6 种。工业机器人正向设计开发系统累计完成 3 个机型产品研发案例，产品性能达到国际一流水平，在不少于 3 家工业机器人整机企业工程应用。

（6）基于国产内核的智能工业机器人操作系统，技术就绪度（TRL） ≥ 7 级，在实际环境中完成工业机器人操作系统应用验证，累计运行时间不少于 3 个月。搭载基于国产内核的机器人操作系统的企业用户累计不少于 5 家。

（7）工业机器人多模态感知决策动作基础模型，技术就绪度（TRL） ≥ 7 级，在实际环境中完成多模态感知决策动作基础模型应用验证。支持不少于 5 种工业机器人典型应用场景训练与数据采集，数据集总规模 ≥ 150 万条。整机实现不少于 5 类工业典型应用场景应用验证。

（8）工业机器人应用通用开发系统，技术就绪度（TRL） ≥ 8 级，产品设计定型，经小批量生产和实际环境下充分应用与验证，获得认可。累计支持不少于 5 种不同品牌工业机器人的联合开发与真机部署，实现跨品牌跨类型工业机器人协同作业。累计工业机器人应用通用开发系统企业用户 ≥ 20 家。累计支持汽车、电子等不少于 5 个不同行业 10 种工业机器人应用开发。

（9）基于工业机器人技术底座平台累计完成不少于 20

款机器人智能应用 APP 开发，累计形成不少于 10000 名开发者生态，并在国产工业机器人上累计完成不少于 5000 台工程验证。

（10）相关国家/行业标准≥1 项。（通过标准立项）

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，采用公开竞争方式。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为在工业机器人领域拥有较强影响力国家级科研平台的高等院校或科研院所，应与工业机器人主要主机企业（不少于 3 家）、机器人软件开发企业、国家级机器人质检中心，以及相关科研院所、企业、高等院校等联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 30 家、下设课题不超过 5 个。

（二）智能检测装备

项目 2.2.1.2：汽车油漆表面缺陷在线智能检测装备研制及验证

1. 研究目标

汽车油漆表面微小颗粒、划伤等缺陷直接影响车身防腐性能和用户体验，通常需对涂装产线每台车身进行全面检测，检测精度和在线实时性要求高。目前主要采用人工目视或拍照检测等方式，受限于人眼主观判断或灰度图像信息单一等因素，存在微小缺陷检测精度低、形态相似缺陷分类难、车身全表面检测效率低等问题，亟需突破镜面反射表面快速视觉成像与微小缺陷高精度检测、多形态缺陷准确分类与目标定位等关键技术，研发汽车油漆表面缺陷检测仪与在线智能检测软件，研制汽车油漆表面缺陷在线智能检测装备，在汽车涂装产线实现应用，形成汽车高生产节拍下油漆表面缺陷在线智能检测能力。

2. 研究内容

（1）镜面反射表面缺陷高效高精度检测技术

研究油漆类镜面反射表面视觉信息快速高精度传感，纹理、光泽、曲率、形貌等多元信息融合互补增强，拼色、掺杂等复杂背景下多形态微小缺陷高精度检测与分类、大尺寸部件表面缺陷目标准确定位等关键技术，实现镜面反射表面微小缺陷高效高精度检测、分类与定位。

（2）油漆表面缺陷检测仪与在线智能检测软件

研究大幅面程控光源亮度一致性与投射模式高速切换控制、光机组件精密装调、结构稳定性与主动热平衡设计等技术，研制油漆表面缺陷检测仪。研究硬件高速边缘计算、多层业务嵌套下的实时可拓展软件架构，开发油漆表面缺陷在线智能检测软件。

（3）汽车油漆表面缺陷在线智能检测装备开发

研究面向多车型柔性生产线的复杂曲率表面检测站位与检测轨迹规划、兼顾高生产节拍与高可达性下的“检测—运动”协同控制、涂装产线自动化装备集成、检测数据与磨抛修复工艺对接、缺陷修复工艺快速生成与磨抛轨迹实时调控、检测装备批量稳定制造工艺等整机集成技术，研制油漆表面缺陷在线智能检测装备，形成装备稳定量产能力。

（4）汽车涂装产线应用验证

在汽车涂装产线完成装备集成应用，验证针对颗粒、划伤等多类常见油漆缺陷的检测性能与修复效果，建立油漆表面缺陷检测参数预训练模型库、多形态缺陷修复工艺库，研究装备现场快速装调、环境适应性提升、工艺匹配性验证等应用技术，形成汽车油漆表面缺陷在线检测与修复应用规范。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

(1) 油漆表面缺陷检测仪，光源幅面尺寸 $\geq 1000\text{mm} \times 800\text{mm}$ ，投射模式切换频率 $\geq 5000\text{Hz}$ ，单站位检测范围 $\geq 700\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，单站位检测时间 $\leq 0.1\text{s}$ ，最小可检测缺陷尺寸¹ $\leq 20\mu\text{m}$ 。

(2) 油漆表面缺陷在线智能检测软件，每秒可处理 20 亿像素图像数据，实现缺陷检测、分类与定位，具备不少于 10 种车型、每车型 15 种颜色的混线检测能力。

(3) 油漆表面缺陷在线智能检测装备，缺陷检出率² $\geq 99\%$ 、误检率³ $\leq 1\%$ 、分类正确率⁴ $\geq 95\%$ ，缺陷区域三维形貌测量精度优于 $1\mu\text{m}$ ，缺陷定位精度⁵优于 3mm ，兼容车身位置及门盖开合波动范围 $\geq 20\text{mm}$ ，达到专项项目群“新能源汽车高质量涂装柔性制造系统解决方案”中项目 4.3.2.2“新能源汽车机器人高质量涂装柔性制造系统研制与示范工程”技术要求。（项目群考核指标）

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

(4) 装备信息安全等级符合 GB/T 35673 或 GB/T 42456 的 SL2 要求。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

(1) 汽车油漆表面缺陷在线智能检测装备技术就绪度

1 最小可检测缺陷尺寸，指传感器能识别最小缺陷的尺寸。

2 缺陷检出率，指设备检出的缺陷占全部真实存在缺陷总量的百分比。

3 误检率，指检出缺陷中假缺陷占全部检出缺陷总量的百分比。

4 分类正确率，指缺陷正确分类数量占全部检出缺陷总量的百分比。

5 缺陷定位精度，指设备检出缺陷在车身坐标系下的位置精度。

(TRL) ≥8 级，产品设计定型，经小批量生产和实际环境下充分应用与验证，得到用户认可。

(2) 汽车油漆表面缺陷在线智能检测装备在包括专项项目群“新能源汽车高质量涂装柔性制造系统解决方案”中项目 4.3.2.2“新能源汽车机器人涂装高质量涂装柔性制造系统”承担单位在内的企业，通过不少于 3 个月以上的装备可用性验证，完成不少于 15 套系统应用验证（项目群考核指标）；装备检测效率满足 60JPH 涂装产线油漆车身全表面检测的节拍需求，颗粒、划伤等不少于 15 种油漆缺陷的检测、分类与定位性能指标达标；缺陷修复成功率≥90%；装备平均无故障时间≥10000h；通过不少于 2 家用户 12 个月以上的装备可用性验证，并进入不少于 3 家用户供应商目录。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

(3) 汽车油漆表面缺陷在线智能检测装备在包括项目 4.3.2.2 承担单位在内的企业，累计完成不少于 20 套系统应用验证（项目群考核指标）；装备检测效率满足 60JPH 涂装产线油漆车身全表面检测的节拍需求，颗粒、划伤等累计不少于 20 种油漆缺陷的检测、分类与定位性能指标达标；缺陷修复成功率≥95%；装备平均无故障时间≥20000h；累计通过不少于 3 家用户 12 个月以上的装备可用性验证，并累计进入不少于 5 家用户供应商目录；通过用户单位制定测试大纲的测试。

4.实施期限

本项目为 2024 年未部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目,作为“新能源汽车高质量涂装柔性制造系统解决方案”项目群的项目,采用公开竞争方式,项目自由申报,项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类: 重大共性关键技术。

其他来源资金(包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金)与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式: 事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备汽车油漆表面缺陷检测装备研制优势的企业,应与新能源汽车企业,以及相关企业、科研院所、高等院校等联合申报,申报联合体应具备较强的专业研发团队,以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 2.2.1.3: 棉花加工低衬度异物高速在线检测与剔除系统研制及验证

1.研究目标

受气候等因素影响,机采的籽棉、扎花去籽后的皮棉等国内棉花异物含量显著高于美澳棉花,医疗、卫生等民生领

域的高品质原料存在进口依赖。异物在色彩和形态上与棉纤维高度相似，人工分拣法或现有检测装备存在检测速度慢、检出率低、剔除率低等突出问题。本项目拟突破低衬度混杂异物高速高保真图像采集、非规则异物特征精准提取及量化表征、小尺寸异物高精度定位与实时剔除等关键技术，研制高速异物稳定成像仪，开发异物检测、定位与剔除一体化高时效测控软件，集成低衬度异物高速检测与剔除系统，在高品质籽棉、皮棉等国内棉花加工场景完成系统性能验证，形成异物在线检测剔除的棉花加工新模式。

2.研究内容

（1）低衬度异物高精度检测定位技术

研究棉花加工场景中低衬度混杂异物高速高保真图像采集、非规则异物特征精准提取及量化表征、异形异色异质多种类异物高泛化实时检测、高速运行小尺寸异物高精度定位与实时剔除等关键技术，实现棉花加工场景中典型异物的高速高精度检测。

（2）高速异物稳定成像仪及高时效测控软件

研究高速异物成像信号时域噪声在线消除等技术，研制大批量无序棉纤维低遮挡稳定传输单元、低衬度异物特征增强照明单元、非线性高速运动异物清晰成像单元等高速异物稳定成像仪核心部件。研究多相机协同高时效并行运算技术，开发异物检测、定位与剔除一体化高时效测控软件。

(3) 多种类原料高可靠性异物检测装备

研制多种类原料高适配性传输成像机构，研究照明成像单元振动抑制、视觉定位传感器参数漂移自动化校准、棉尘等纺织特殊环境下长期可靠运行等技术，开发适用于籽棉、皮棉加工等多个场景的异物高速在线检测装备，并形成检测装备稳定量产能力。

(4) 异物检测与剔除系统集成与验证

研制满足产业化需求的高精度棉花品质检测仪等配套设备、异物在线精准剔除机构等必要部件，开发高安全等级的装备管控软件，集成开发具备品质检测、异物检出、在线剔杂等功能的异物高速在线检测与剔除系统，在高品质籽棉、皮棉等国内棉花加工生产线中完成系统性能验证并规模应用。

3.考核指标

技术指标：

(1) 高速异物稳定成像仪在棉花最大传输速度不低于 600m/min 条件下，异物分辨力优于 0.2mm。

(2) 高时效测控软件从异物成像到剔除的响应时延 $\leq 5\text{ms}$ 。

(3) 异物检测装备可检出籽棉、皮棉中的地膜等异物种类¹ ≥ 20 种。

¹ 20 种可检异物应当包含对国内高品质籽棉、皮棉等原料质量影响较高且常见的各色地膜、羊毛，各类化纤丝、杂毛等。

(4) 异物检测装备在籽棉、皮棉、羊绒等原料最大传输速度不低于 600m/min 条件下, 平均检出率¹≥95%、误检率≤2%。

(5) 异物剔除机构在棉花最大传输速度不低于 600m/min 条件下, 检出异物在线剔除率≥95%。

(6) 棉花品质检测仪马克隆值²测量范围 2.0—6.5mic, 马克隆值误差优于±0.1mic。

(7) 装备管控软件信息安全等级符合 GB/T 35673 或 GB/T 42456 的 SL2 要求。

工程化指标:

(1) 异物检测与剔除系统平均无故障时间≥5000h。

(2) 异物检测与剔除系统技术就绪度 (TRL) ≥8 级, 产品设计定型, 在工业场景中通过用户不少于 3 个月的异物检测与剔除系统可用性验证, 并进入用户供应商目录。

(3) 核心检测技术具备行业通用性, 可推广应用至化纤长丝卷装等, 在卷装最大传输速度不低于 2.5s/锭条件下, 图片处理能力>540 张/锭, 缺陷平均检出率≥99%、误检率≤3%。

(4) 检测装备量产数量不少于 120 套, 在包含国内高品质籽棉、皮棉加工等在内的多个生产线中集成应用, 在线检测效率提高 1 倍以上。

1 异物平均检出率, 指正确识别的异物数量占全部异物样本数量的百分比。

2 马克隆值是棉纤维品质评价的重要指标, 测试方法参考《GB/T 6498-2024 棉纤维马克隆值试验方法》。

4.实施期限

本项目为 2024 年未部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 4 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，采用公开竞争方式。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事后补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为棉花加工异物检测装备制造企业或用户企业，应与高等院校、科研院所联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 2.2.2.1：动力构件微米级内部缺陷断层成像在线检测系统研制及验证

1.研究目标

研制动力构件微米级内部缺陷断层成像检测系统，旨在满足新能源汽车、航空航天及轨道交通等高端制造领域关键零部件微米级内部缺陷的检测需求，解决三维断层成像射线检测装备检测分辨率低、产线协同能力弱等问题，打破进口

高性能射线检测装备对军工等敏感领域的技术封锁。本项目突破多级电子束聚焦、稀疏角高分辨快速重建、缺陷智能分类与识别等关键技术，研制系列高强度长寿命射线源、高灵敏度小像素探测器等核心部件，开发扫描运动控制与图像分析软件，研制系列动力构件微米级内部缺陷断层成像在线检测系统。在新能源汽车动力电池内部缺陷检测等典型场景开展验证，在航空发动机精密结构件、轨道交通复合材料结构件内部缺陷检测场景中推广应用，形成高端制造领域关键零部件内部缺陷高精度检测保障能力。

2.研究内容

（1）射线高强度发生与高效探测技术

研究高效散热结构设计、多级电子束聚焦等技术，研究高亮度阴极、高寿命阳极靶材，研制系列高强度长寿命射线源；研究高分辨率低串扰像素设计、低噪声高动态范围图像传感器像素设计、高速读出电路和数模转换等技术，研制高灵敏度小像素探测器。

（2）三维断层图像重建与分析技术

研究稀疏角快速重建、材料交界成像干扰抑制等图像处理算法，实现内部结构和缺陷高分辨成像。研究海量三维点云分析处理、亚像素轮廓提取、缺陷智能分类与识别等关键技术，提高算法对不同检测对象的适应性。

（3）微米级内部缺陷断层成像在线检测系统

研究高精度多轴时空同步、运动精度补偿、辐射防护与轻量化设计、扫描装置模块化配置，开发扫描与运动控制系统。开发高效数据接口协议，实现检测数据与生产系统的实时传输与共享。研究面向机械结构的几何校正技术，研究面向高密度复杂构件的射线硬化校正和散射校正、焦点漂移等校正技术，研究面向装备的计量特性校准等技术，研制系列动力构件微米级内部缺陷断层成像在线检测系统。

（4）内部缺陷断层成像在线检测能力验证

建立设备维护和校准机制，保证检测结果的准确性和一致性。在新能源动力电池生产中开展系统集成应用验证，实现检测系统与生产系统高效融合，形成面向电极、电芯、电池包体等零部件的三维分析检测能力。在航空发动机精密结构件、轨道交通复合材料结构件内部缺陷检测场景中推广应用。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）射线源管电压覆盖 160kV—450kV，其中射线源管电压 160kV 时焦点尺寸 $\leq 0.5\mu\text{m}$ ，最大靶功率 $\geq 20\text{W}$ ；450kV 时焦点尺寸 $\leq 400\mu\text{m}$ 。

（2）探测器像元尺寸 $\leq 25\mu\text{m}$ ，成像面积 $\geq 150\text{cm}^2$ 。

（3）跨尺度高分辨率无损检测装备射线源电压不低于

160kV，成像最小分辨力不低于 500nm，单次检测范围 $\geq 2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 。大尺寸异质结构无损检测装备射线源电压不低于 450kV，成像分辨力不低于 200 μm ，单次检测时间 $\leq 5\text{min}$ 。

到 2028 年 09 月，完成以下指标：

（4）检测系统信息安全等级符合 GB/T 35673 或 GB/T 42456 的 SL2 要求。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）微米级内部缺陷断层成像在线检测系统技术就绪度（TRL） ≥ 8 级，产品设计定型，经小批量生产和实际环境下充分使用，获得用户认可。

（2）在动力电池生产线中集成应用，电极裂纹缺陷检出能力优于 5 μm ，高密度夹杂缺陷检出能力优于 10 μm 。电芯内部气孔、裂纹、焊接缺陷等质量问题在线检测精度优于 20 μm ；单次扫描时间最优可达 1.5s，可识别极片折角、打皱、局部断裂、极片数等典型缺陷。电池包体检测范围 $\geq 3\text{m} \times 2.5\text{m} \times 0.4\text{m}$ ，缺陷检出能力优于 1mm。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（3）在动力电池生产线中集成应用，电芯内部缺陷单机在线检测速度 ≥ 24 件/min，缺陷自动化检测准确率 $\geq 99.5\%$ ；电池包体检测装备检测准确率 $\geq 99.5\%$ 。

（4）在航空发动机精密结构件内部缺陷检测场景中推

广应用，金属结构内部缺陷分辨力可达 $3\mu\text{m}$ ，检测误差优于 $\pm 0.5\%$ ，多轴联动的绝对位置精度优于 $\pm 0.01\text{mm}$ ，系统平均无故障时间 $\geq 10000\text{h}$ 。

(5) 在轨道交通复合材料结构件内部缺陷检测场景中推广应用，复合材料结构件线扫描成像分辨力优于 $30\mu\text{m}@$ 检测宽度 600mm ，检测精度优于 $\pm 0.5\text{mm}$ 。

(6) 通过不少于 3 个月的检测装备可用性验证。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，采用公开竞争方式。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备微米级内部缺陷检测装备研发能力的装备制造企业或用户企业，应与国内相关优势企业、科研院所、高等院校等联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 2.2.2.3：大型金属叶片内部微裂纹激光超声检测系统研制及验证

1. 研究目标

面向水轮机叶片、航空发动机叶片等大型金属叶片在制造过程中的微裂纹检测需求，针对现有检测系统在大曲率结构内部缺陷高分辨、全覆盖在位检测方面存在能力不足、安全隐患等问题，研制激光超声智能制造在线检测系统。项目将突破多模态光声激励、高频高灵敏非接触探测、柔性光声内窥镜、大曲率构件自适应扫查与多尺度缺陷识别等关键技术，开发集成智能检测与高精度运动控制的软件系统和机器人平台，研制大型金属叶片内部微裂纹激光超声检测系统，在水轮机叶片、发动机叶片内部微裂纹检测等典型场景中完成验证，实现复杂构件微裂纹的高精度、全覆盖在线检测，形成无人化、智能化、原位检测的新模式。

2. 研究内容

（1）高分辨激光超声检测关键技术

研究多模态光声激励、高频超声非接触激光探测、高灵敏度量子传感等关键技术，建立时空调制的光声激励、传播与探测理论模型，开发集成式光声激励、探测与采集核心模组，为实现在线检测提供高性能、抗干扰的关键检测技术与器件。

（2）大曲率金属叶片的全覆盖内窥检测与随形扫查技

术

研究小尺寸柔性光声内窥镜检测模组、大曲率异形构件自适应智能扫查、多尺度缺陷的高分辨成像与缺陷类型智能识别等关键技术，开发狭窄空间异形结构的随形扫描与智能路径规划等核心算法，研发复杂结构金属叶片的全覆盖、高效率、智能检测模组。

（3）高性能激光超声在线检测系统

研究全自动智能检测、高精度运动控制一体化软件、高负载大行程机器人集成系统等关键技术，实现激光超声仪器与运动控制机构的软硬件适配集成，研制高性能、智能化激光超声在线检测集成系统，实现复杂金属构件在生产制造、服役检修中的内部微缺陷原位在线检测和系统性能验证。

（4）内部微缺陷在线检测验证

针对实际生产工况，开展激光超声在线检测系统的检测效率、抗干扰、可靠性和环境适应性提升研究，在大型水轮机叶片、发动机叶片检测等多场景开展在线检测验证，建立异形构件制造质量检测规范，形成具有全行业推广价值的检测规范和标准。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）光声激励核心模组：可动态激励纵波、横波、声

表面波等多模态超声波，超声激励最高频率 $\geq 80\text{MHz}$ 。

(2) 超声探测核心模组：超声探测最高频率 $\geq 200\text{MHz}$ ，可探测超声最小振幅 $\leq 1\text{pm}$ ，探测激光最小直径 $\leq 0.2\text{mm}$ 。

(3) 在线检测系统的最优检测分辨力优于 1.5mm ，被检对象最大厚度 $\geq 50\text{mm}$ 、最大横向尺寸 $\geq 2\text{m}$ ，其中激光超声的可检出裂纹缺陷最大埋深 $\geq 10\text{mm}$ ，最高运行速度 $\geq 0.5\text{m/min}$ 。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

(4) 内窥检测探头尺寸 $\leq 30\text{mm}$ ，柔性机械臂长度 $\geq 1\text{m}$ ，三维扫描精度优于 0.1mm 。

(5) 在线检测系统的最优检测分辨力优于 0.8mm ，被检对象最大厚度 $\geq 100\text{mm}$ 、最大横向尺寸 $\geq 4\text{m}$ ，其中激光超声的可检出裂纹缺陷最大埋深 $\geq 20\text{mm}$ ，最高运行速度 $\geq 2\text{m/min}$ 。

(6) 在线检测系统信息安全等级符合 GB/T 35673 或 GB/T 42456 的 SL2 要求。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

(1) 不少于 2 套在线检测系统在包含大型水轮机叶片、发动机叶片在内的多个场景中实现检测验证。

(2) 在线检测系统在大型管道、压力容器、航天器舱体等领域推广应用不少于 1 套。

(3) 制定企业技术规范 1 项。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（4）异形金属构件内部微裂纹激光超声检测技术就绪度（TRL） ≥ 8 级，产品设计定型，经小批量生产和实际环境下充分使用，获得用户认可。

（5）在线检测系统在包含大型水轮机叶片、发动机叶片在内的多个场景中实现生产制造过程中的在线检测验证应用累计不少于 2 套，叶片内部微裂纹缺陷的检测效率相较人工提升 2 倍以上；其中，在大型水轮机叶片应用场景中，需通过不少于 3 个月的检测系统可用性验证。

（6）在大型管道、压力容器、航天器舱体等领域推广应用累计不少于 2 套。

（7）相关国家/行业标准 ≥ 1 项。（通过标准立项）

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，采用公开竞争方式。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备激光超声检测技术研发优势的装备制造企业或用户企业，应与国内相关优势企业、科研院所、高等院校等联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 2.2.2.4：高端装备钢材轧制内部质量状态在线超声检测系统研制及验证

1.研究目标

高端装备钢材作为核电、舰船等重大结构装备的关键基础材料，其内部微裂纹、夹杂物等缺陷与残余应力场耦合作用会大幅增加装备服役过程中焊接及疲劳裂纹扩展、应力腐蚀开裂等突发失效风险。当前轧钢产线缺少内部质量状态如内部缺陷和残余应力同时在线检测装备，影响国家高端装备用钢材高质量保障能力。亟需开发内部缺陷及残余应力在线耦合检测系统，实现高端装备用钢材内部缺陷及残余应力“无害化”。项目研究开发多频谱自适应在线换能器、边缘处理模块等核心部件；开发多模态高分辨实时动态响应柔性传感阵列；开发高通量动态增强信号处理与高质量多维成像、精准定位、重构解析模型；开发材料适应性超声智能耦合与数据成像智能化质量与工艺评估系统；研制钢铁轧制产线在线超声一体化检测系统，实现高端装备钢材内部缺陷与残余应力实时高精度在线表征；在钢铁中厚板、棒材及硬质合金生产

线进行验证与推广应用。

2.研究内容

（1）多频谱自适应在线换能技术

开展电磁及复合压电高接触效率、耐磨耐高温涂层、低功耗导电背板等材料优化及高温适应性封装技术研究；进行超声换能器信号强度优化、温度补偿、材料特性适配等技术体系研究；针对不同材料缺陷类型及不同方向残余应力，进行换能器检测信号标定技术研究，确定检测频率范围；阐明不同产线超声换能实时跟踪与补偿、AI 动态调参、分层优化与缺陷聚焦等自适应机制；建立具备宽频多模式切换、跨材料自适应的内部质量在检测超声换能器技术体系。

（2）高分辨实时动态响应柔性耦合传感阵列技术

开展高精度、多模态、模块化、可扩展、实时动态响应的柔性耦合阵列设计及仿真研究；研制集成阵列探头（压电陶瓷或 EMAT）、发射/接收一体超声检测模块、高速数据采集等功能组件；研究开发各阵元发射延时协同控制技术及实时波束控制技术；研究开发波束偏转、聚焦深度在线动态调控及多角度扫描策略优化技术；研究材料中声波衰减、检测盲区控制机制，建立材料衰减数据库及残余应力反演模型，建立不同材质、不同位置超声阵列盲区抑制优化技术体系；开展强干扰、高动态、微弱信号物理增强技术研究，建立信噪比提升优化技术。

（3）高通量动态信号增强与多维成像智能检测技术

开发多通道阵列高通量超声信号边缘处理与可信信号实时动态增强技术；开发优化加速算法等数据处理技术；建立面向材料内部缺陷及残余应力等典型质量状态的动态聚焦高分辨成像及可信缺陷标记技术；开发内部缺陷及残余应力等质量参数转化及分类方法；研发人工智能辅助缺陷及残余应力识别和全自动可视化重建技术；开发信号处理、成像算法、缺陷识别与应力精准解算智能算法。

（4）内部缺陷及残余应力在线超声检测系统

开发钢材轧制生产过程中耐高温、抗干扰、模块化的在线耦合超声检测系统核心架构；设计内部缺陷及残余应力柔性阵列的在线集成耦合超声检测硬件装置；开发集成多模态联合检测、智能算法、高精度标定与验证的软件系统；构建多产线、多规格内部缺陷及残余应力质量数据库；开发集抗干扰、高可靠、实时响应及快速筛查为一体的在线耦合超声检测系统。

（5）金属材料内部质量在线检测工程验证

研究钢材轧制产线空间布置、生产流程、品种规格等工艺特性，设计与工艺特性相匹配的系统工程化架构；研究材料适应性验证及相应材料品种内部质量判定方法，建立质量风险智能评估体系；在钢铁板材、棒材及硬质合金等产线进行数据采集、质量分析、关键参数标定、系统综合评估等在

线验证；完成金属材料内部缺陷及残余应力的在线超声检测系统的工程应用示范，进行生产过程质量评价与追溯、实时工艺优化反馈。

3.考核指标

技术指标：

（1）在线换能器：压电超声现场工作温度范围 25℃—100℃；频率范围 0.5MHz—15MHz。EMAT 现场工作温度范围 100℃—300℃；温漂稳定性优于 $\pm 0.5\%FS/100^{\circ}C$ ；频率范围 0.5MHz—20MHz；信噪比 $\geq 12dB$ 。

（2）耦合式传感阵列：模态激发能力包含 Lamb 波、纵波、横波、临界折射波及剪切波，频谱切换速度 $< 1\ ms$ ，残余应力识别精度优于 $\pm 15MPa$ 。

（3）电子扫查相控阵：具备三维波束调控能力，缺陷分辨率 $\leq 0.2mm$ ，标样缺陷定位精度优于 $\pm 1mm$ 。

（4）智能算法：缺陷尺寸的识别精度 $\leq 0.5mm$ ；缺陷定位精度优于 $\pm 1mm$ ，应力补偿优于 $\pm 10MPa@300^{\circ}C$ ；温度/应力匹配模型增益自适应范围 0—20dB，步进 0.1dB 实时补偿信号衰减。

（5）系统检测能力：数据吞吐量 $\geq 5Gbps$ （128 通道同步）；超声扫描代替机械旋转，波束偏转 $\pm 35^{\circ}$ ；直观显示缺陷形态及分布，缺陷及残余应力识别响应时延 $\leq 100ms$ 。

（6）检测系统信息安全等级符合 GB/T35673 或

GB/T42456 的 SL2 要求。

工程化指标:

(1) 钢板内部缺陷及残余应力在线超声检测系统: 实现钢板检测宽度范围 $\geq 3.5\text{m}$ 、厚度范围为 6mm — 200mm 、检测速度最高可达 2m/s , 信噪比 $\geq 10\text{dB}$, 典型钢铁板材上下表面盲区 $\leq 1.5\text{mm}$, 中间平底孔 $\geq \phi 2\text{mm}$ 、边部横孔 $\geq \phi 1.6\text{mm}$, 残余应力检测精度优于 $\pm 20\text{MPa}$ 。

(2) 钢棒内部缺陷及残余应力在线超声检测系统: 棒材阵列覆盖复杂曲面, 棒材直径 50mm — 150mm 、检测速度 $\geq 8\text{m/s}$, 信噪比 $\geq 10\text{dB}$, 典型钢铁棒材表面盲区 $\leq 1.5\text{mm}$, 短横孔级缺陷 $\geq 0.3\text{mm} \times 5\text{mm}$, 残余应力检测精度优于 $\pm 30\text{MPa}$ 。

(3) 硬质合金内部缺陷及残余应力在线超声检测系统: 硬质合金顶锤直径 $\geq 150\text{mm}$, 表面盲区 $\leq 3\text{mm}$, 内部缺陷尺寸 $\geq 50\mu\text{m}$, 残余应力检测精度优于 $\pm 50\text{MPa}$ 。

(4) 内部缺陷及残余应力在线耦合超声检测系统技术就绪度 (TRL) ≥ 8 级, 产品设计定型, 经小批量生产和实际环境下充分使用, 获得用户认可。

(5) 钢铁板材、棒材及硬质合金数智化超声在线检测系统各 1 套, 适配现有产线工艺流程; 分别通过用户不少于 3 个月的检测系统可用性验证, 并进入用户供应商目录。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11

月—2028 年 4 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，采用公开竞争方式。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事后补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备钢材内部质量超声检测技术研发优势的装备制造企业或用户企业，应与国内相关优势企业、科研院所、高等院校等联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 2.2.2.5：高速列车焊缝全断面质量可移动在线检测装备研制及验证

1.研究目标

面向 CR450 高速列车焊缝全断面高质量检测需求，针对传统超声检测薄板近表面缺陷盲区大、渗透检测表面缺陷宽度窄及闭口缺陷检测能力弱等问题，突破可消除传统超声检测盲区的“涡流—相控阵超声”复合技术，以及具备微小窄缺陷检出能力的磁诱导渗透技术，构建全断面缺陷检测数字仿

真系统，研究多模态传感器与定量评估模型，研发检测路径自适应跟踪模块，开发焊缝质量评价一体化软件，研制长焊缝“涡流—相控阵超声”和短焊缝磁诱导渗透可移动在线检测装备，构建焊缝质量预警系统，提升车体侧墙类长焊缝和减震器座等短焊缝检测效率，并在 CR450、CR400 等车型示范应用，实现焊缝返修率降低至 1% 目标。

2. 研究内容

（1）异质焊缝全断面缺陷检测工艺仿真

研究不同材质及结构型式焊缝涡流电磁场分布、相控阵超声传播路径、纳米磁流体渗透速率与全断面缺陷映射特性，建立轨道交通车辆典型焊缝材料属性和接头型式的“涡流—超声—磁诱导渗透”检测多模态数据库；构建焊缝“电—磁—声”仿真模型，研究不同结构空间位置、接头型式与多模态检测约束规则，集成虚拟机器人与检测传感器，研制长焊缝“涡流—相控阵超声”复合检测和短焊缝磁诱导渗透检测的全断面质量数字仿真系统。

（2）多模态传感器缺陷信号辨识与定量评估技术

研制长焊缝“涡流—相控阵超声”双模态传感器和短焊缝磁诱导渗透检测传感器，研究车体长焊缝余高、转向架侧梁焊缝边界等多参量扰动抑制及涡流信号增强技术，研究薄板长焊缝高分辨率相控阵超声传感阵元激励技术及动态聚焦算法，研究车体短焊缝高梯度强磁场快速磁诱导渗透检测技

术，建立典型缺陷与信号多参数特征融合的量化数据库，构建不同材质和结构型式焊缝典型缺陷的定量评估模型。

（3）复杂焊缝形貌检测路径自适应跟踪技术

研究激光扫描与结构光三维点云几何特征提取技术，建立构件非规则曲面三维数字模型；研究构件边界和非均匀光照等场景扰动的点云数据缺失补偿与特征误差修正算法，实现复杂焊缝形貌快速精准建模；研究机器人与结构光视觉系统多坐标系标定方法，建立机器人末端执行器实时坐标补偿的特征空间配准算法和多坐标系位姿变换模型，研制复杂焊缝实际形貌检测路径自适应跟踪模块。

（4）焊缝质量评价一体化软件

研究“涡流—相控阵超声”复合检测全波列数据采集和缺陷图像重构技术，研究磁诱导渗透检测纳米磁流体原位成像技术，开发缺陷可视化定量模块；构建不同产品结构和焊缝接头型式的典型缺陷数据集，开发焊缝缺陷质量预警模块；集成多机控制、缺陷可视化定量和质量预警等模块，研制焊缝质量评价一体化软件。

（5）全断面质量可移动在线检测装备研制与验证

研制传感器快速自动更换装置，集成数字仿真系统、缺陷定量评估模型、检测路径自适应跟踪模块、装备控制与焊缝质量评价一体化软件，开发机器人“涡流—相控阵超声”可移动在线检测装备，开展车体侧墙和转向架侧梁等部件检测

验证；研制磁诱导渗透可移动在线检测装备，开展车体减震器座等部件检测验证；研究装备检测、定位和缺陷定量等精度的自校验技术，制定全断面质量在线检测规范，并在CR450、CR400等车型示范应用。

3.考核指标

技术指标：

到2027年12月，完成以下指标：

（1）高性能“涡流—相控阵超声”检测主机，涡流模块不少于32通道，激励频率64Hz—5MHz，相控阵超声模块不少于128阵元，采样频率100MHz。构建不少于15类焊缝接头型式的数字仿真模型，建立不少于3类典型缺陷的定量评估模型。磁诱导渗透检测传感器 ≥ 3 种，最大磁场梯度 $\geq 10\text{T/m}$ 。

（2）涡流检测模块：非均匀和多源干扰焊缝表面深度0.3mm及以上的标定试样缺陷检出率100%，深度定位误差优于 $\pm 0.1\text{mm}$ 。相控阵超声检测模块：薄板焊缝内部缺陷0.2mm及以上的标定试样缺陷检出率100%，深度定位误差优于 $\pm 0.5\text{mm}$ 。磁诱导渗透检测模块：磁诱导渗透检测裂纹宽度 $\geq 10\mu\text{m}$ 。

（3）“激光—结构光”模块单元定位精度优于 $\pm 0.2\text{mm}$ 。

（4）搭建试验平台，完成轨道交通列车车体侧墙、地板、枕梁和转向架侧梁等6种典型结构的试验验证。

（5）焊接接头型式的典型缺陷质量预警模型 ≥ 15 类。

工程化指标:

到 2027 年 12 月, 完成以下指标:

(1) 通过专项项目群“先进轨道交通装备按需与柔性制造系统解决方案”中项目 4.3.3.1“支撑多系列混线生产的 CR450 高速列车高精度制造系统研制及示范工程”承担单位参与的中试测试考核, 形成轨道交通复杂结构内部及表面缺陷的“涡流—相控阵超声”在线快速复合无损检测装备 4 套、磁诱导渗透检测装备不少于 1 套。

(2) “涡流—相控阵超声”复合检测装备的检测效率相比传统检测效率¹提升至 3 倍, 磁诱导渗透检测装备的检测效率相比传统渗透检测效率²提升至 3 倍。

(3) “涡流—相控阵超声”复合检测装备和磁诱导渗透检测装备, 应用于专项项目群“先进轨道交通装备按需与柔性制造系统解决方案”中项目 4.3.3.1“支撑多系列混线生产的 CR450 高速列车高精度制造系统研制及示范工程”, 通过不少于 3 个月的检测系统可用性验证; 基于焊缝质量预警实现焊接工艺反馈优化, 将高速列车 CR450 等车型批量生产的焊接返修率³降低至 1%, 通过该项目考核。(项目群考核指标)

到 2028 年 10 月, 完成以下指标:

(4) “涡流—相控阵超声”复合检测装备和磁诱导渗透检测装备技术就绪度 (TRL) ≥ 8 级, 装备设计定型, 经小批量

1 传统渗透检测效率为 25min/m, 传统超声检测效率为 3min/m。

2 传统渗透检测效率为 25min/m。

3 现有车辆批量生产焊接返修率=2.5%。

生产和实际环境下充分使用，获得轨道交通行业主机企业等用户认可。

(5) 研究成果可拓展用于航空领域复杂构件无损检测，完成盘鼓组件、叶片等 4 种关键部件不少于 50 件的试验验证；并在航空领域复杂构件无损检测推广应用不少于 2 套。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，作为“先进轨道交通装备按需与柔性制造系统解决方案”项目群的项目，采用公开竞争方式，项目自由申报，项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备高速列车无损检测技术研究和自动化集成应用优势的企业或科研院所，鼓励产学研用单位联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

(三) 可重构柔性制造单元

项目 2.3.2.1：先进轨道交通装备承载结构柔性制造系统研制及验证

1. 研究目标

面向新一代高速列车、重载机车等先进轨道交通装备承载件对高精度、高质量焊接的迫切需求，针对传统焊接工艺与装备存在构件变形大、返修多、质量控制难等问题，突破承载结构长线程复合能场制造稳定性控制关键技术，开展“激光—电弧—磁场”多能场协同调控、柔性精密组装、焊接状态在线监控及焊接智能控制技术研究，研制多功能激光复合焊接单元，开发“组—焊—控”机器人柔性制造单元与系统，推动新一代高速列车及重载机车等先进轨道交通装备关键部件智能制造升级。

2. 研究内容

(1) 复杂构件柔性化自动精密组装技术

建立车身组装损伤跨尺度有限元模型，揭示“误差—损伤”耦合作用下组装界面应力非均衡分布规律，研究组装应力传递机制与分布优化方法，研制具有多传感信息融合、力位闭环控制等功能的柔性自动化精密组装单元；面向列车承载结构，结合点云扫描建模技术，构建亚毫米级精度的虚拟模型系统；完成大型构件三维组装定位的高精度视觉信息转换，实现复杂构件“测量—匹配—校准”一体化高精密组装。

(2) 复合能场智能匹配及稳定性控制技术

研究“光—弧—磁”复合能场制造过程“热—流—力”多物理场耦合作用机理；针对长大薄壁、中空插接锁底结构熔透问题，开发长线程大跨距连续高速稳定焊接技术，研制高耐热复合焊接柔性制造单元；针对封闭箱型结构单面焊背部成型问题，研究全熔透条件下熔池动态行为，优化工艺过程；面向超厚板激光复合焊接需求，开发大熔深高可靠焊接技术；形成不同工况复合能场智能匹配及调控准则，实现典型产品接头高质量焊接。研究复杂工件的高精度实时测量与三维模型动态生成方法，突破三维空间异形焊缝的几何特征提取与位姿解算技术，开发焊接路径动态规划系统，实现焊接过程自动寻迹。

(3) 焊接状态在线监控与焊接智能控制技术

基于光谱、视觉、电压、声音等传感技术，研究强干扰条件下羽辉、电弧、熔池、匙孔等状态的“光—电—声”检测及信号处理技术，研制多信息融合焊接状态在线监控系统。研究焊接参数与动态工况的耦合映射关系，建立“工况条件—工艺参数—焊接控制”模型；开发多参量耦合条件下焊接过程智能控制算法，研制适应复杂工况的焊接过程自适应控制系统，提高焊接过程稳定性与质量一致性。

(4) 数字物理系统建模与工艺仿真

研究几何、物理、运动和规则等多维信息提取方法，建

立关键结构功能组件数字孪生模型；解析“组—焊—控”多功能机器人柔性制造系统三维布局、空间运动交互、数据流动关系，研究涵盖制造过程的孪生模型构建方法，建立多功能、多工序、全要素大型系统数字孪生模型；针对机器人组装、焊接、监控等需求开发数字仿真工艺包，实现基于产品模型的作业程序自动生成，实现机器人组装、焊接、监控等工艺仿真和工艺优化。

（5）装备研制与应用验证

集成焊前虚拟仿真、复合能场智能匹配、柔性自动精密装配、焊接过程自适应控制、焊接状态在线监控等技术，研制多功能激光复合焊接单元及承载结构“组—焊—控”机器人柔性制造系统，构建“仿真—运行—监控—反馈”多级评价体系，开展柔性制造系统验证，完成高速列车长大铝合金车身、超厚板车钩座、碳钢转向架构架等典型构件焊接试制，实现铁路列车制造示范应用。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）焊接过程控制系统，形成不少于 3 套熔化焊控制软件工艺包，开发不少于 2 款焊接质量检测装备；形成复杂构件焊缝跟踪系统、焊接工艺高效编程软件、激光及电弧焊接电源、安全可控的底层算法平台，具备多品类产品快速适

配、作业程序自动生成、在线智能检测、满足可重构任务需求的关键特性。

(2) 精密组装单元, 大型承载结构组装定位精度优于 $\pm 0.2\text{mm}$, 大型承载结构亚毫米级重构模型误差不超过 0.8mm , 整体组装精度提升 30%。

(3) 高可靠焊接单元, 国产高性能 MIG/MAG 焊接电源输出电流 $10\text{A}—500\text{A}$, 电流输出控制精度 $\pm 1\text{A}$, 控制回路周期 $\leq 200\mu\text{s}$, 弧压输出精度 $\pm 0.1\text{V}$; 激光器具具备可调环形光斑功能, 可实现摆动激光、双光束、激光填丝、“激光—电弧”复合等多种工作模式; 焊接机器人末端重复定位精度优于 0.05mm , 防护等级不低于 IP54; 机器人焊接单道可熔透厚度 $\geq 20\text{mm}$, 大型承载结构 25m 连续焊缝熔深波动 $\leq 5\%$; 线结构光传感器测量精度优于 0.1mm 。

(4) 焊缝路径规划单元, 工件三维建模完整度优于 99%, 空间异形焊缝定位准精度优于 $\pm 0.1\text{mm}$, 轨迹规划系统生成的机器人轨迹准确率 $\geq 95\%$, 且轨迹程序代码可修改。

(5) 涵盖制造过程的大型构件数字孪生系统 1 套, 采集信息种类 ≥ 20 种, 采集信息延时 $\leq 40\text{ms}$, 采集信息 100% 映射到系统中。

(6) 涵盖精密组装单元、高可靠焊接单元(包括电弧焊接单元、多功能激光复合焊接单元)、焊缝路径规划单元及焊接过程控制系统的“组—焊—控”机器人柔性制造系统,

具备不少于 3 种列车型号混流生产的能力，产品切换时间 $\leq 4\text{h}$ 。

工程化指标:

到 2027 年 12 月，完成以下指标:

(1) “组—焊—控”机器人柔性制造系统采用国产机器人，核心装备自研率达到 85%以上，平均无故障时间 $\geq 8000\text{h}$ ；高可靠焊接单元一次焊接合格率优于 95%。

(2) “组—焊—控”机器人柔性制造系统应用于专项项目群“先进轨道交通装备按需与柔性制造系统解决方案”中项目 4.3.3.1“支撑多系列混线生产的 CR450 高速列车高精度制造系统研制及示范工程”，通过不少于 3 个月的系统可用性验证，可适配高速列车铝合金长大薄壁车身、铝合金超厚板车钩安装座、构架等不少于 3 种大型承载结构的焊接工艺，具备空间异形焊缝的自动识别、规划、寻迹作业能力，实现 CR450 大型承载构件焊后免调修，车体焊接返修率由 2.5%降低至 1%，碳钢复杂箱型转向架构架一次交检合格率提升至 99%以上。（项目群考核指标）

到 2028 年 10 月，完成以下指标:

(3) 先进轨道交通装备承载结构柔性制造系统技术就绪度（TRL） ≥ 8 级，“组—焊—控”机器人柔性制造系统设计定型，经小批量生产和实际环境下充分使用，获得轨道交通行业主机厂等用户认可。

(4)集成电弧焊单元的“组—焊—控”机器人柔性制造系统推广应用 ≥ 2 台(套),集成多功能激光复合焊单元的“组—焊—控”机器人柔性制造系统推广应用 ≥ 4 台(套)。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目,作为“先进轨道交通装备按需与柔性制造系统解决方案”项目群的项目,采用公开竞争方式,项目自由申报,项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类:重大共性关键技术。

其他来源资金(包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金)与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式:事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具有焊接工艺技术和激光复合焊接系统集成研发优势的科研院所或企业,应与高速动车组主机企业、高等院校、科研院所、企业等联合申报,申报联合体应具备较强的专业研发团队,以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

三、先进自动化与智能管控系统

（一）高端控制器与自动化仪表

项目 3.1.4.1：特种钢生产流程质量检测与动态调控系统 研制及验证工程

1.研究目标

以高铁轮对、液化天然气罐体、汽车用钢等为代表的特种钢对成分及组织的控制要求严格，但由于其生产过程存在入炉原料关键成分信息缺失、熔炼过程成分信息获取不及时、钢坯加热轧锻过程组织信息反馈慢等问题，造成工艺动态控制难、产品质量不稳定、生产成本低、效率低。针对以上问题，研制再生合金原料关键元素高通量检测仪表、熔体微量元素高灵敏检测仪表和铸坯轧锻产品金相全自动检测仪表，开发特种钢生产流程质量检测与动态调控系统，并在典型特种钢生产线开展集成应用，实现生产过程关键参数的在线检测与工艺动态调控，在提高产品质量稳定性和生产效率的同时降低特种钢生产成本和能耗水平。

2.研究内容

（1）再生合金原料关键元素高通量检测仪表

研究多条件耦合下多模态样品共性特征信息识别提取、关键牌号分类、关键元素成分分级建模等关键技术；研制物料高效预处理模块、高精度位置追踪和形貌识别模块、瞬态高效探测模块、多模态自适应快速分选模块等核心部件；开发一体化应用软件，研制高可靠、高稳定再生合金关键元素

高通量快速检测仪表；搭建仪表测试验证平台；在再生钢铁、钛合金回收料等再生合金资源循环利用场景完成仪表性能验证。

（2）熔体微量元素高灵敏检测仪表

研究极端冶金环境的多源噪声抑制、微量元素的深紫外光谱增强探测与表征、混杂元素成分的高精度分析建模及同步快速解算、软硬件长期漂移智能校准等关键技术；研制高性能激光光源、深紫外高灵敏探测器、高分辨自动标定光谱仪模块等核心部件；开发控制分析一体化软件，研制高可靠、高稳定熔体微量元素高灵敏检测仪表；搭建仪表测试验证平台；在特种钢冶炼、有色金属冶金等场景完成仪表性能验证。

（3）铸坯轧锻产品金相全自动检测仪表

研究多通道试样定位装载、全自动多样品并行处理、微观结构高效可控无畸变显化、金相图像智能识别和量化提取等关键技术；研制大物镜高分辨金相显微镜模块、亚微米级四轴试样定位载物台、多功能高效自动腐蚀模块和自动金相观察控制模块等核心部件；建立非金属夹杂物、脱碳层、晶粒度和组织类型等参数快速精准判定与评级的金相自动分析大模型，开发一体化金相控制分析软件，研制高可靠、高稳定铸坯轧锻产品金相全自动检测仪表；搭建仪表性能测试验证平台；在特种钢、铜合金等产品的浇铸、热处理、轧锻等环节完成检测仪表的性能验证。

（4）特种钢生产流程质量检测与动态调控系统及验证工程

研究融合再生钢铁原料关键元素成分分级数据的炼钢智能配料技术、融合钢液成分在线检测数据的熔炼工艺成分调控技术、融合全自动金相检测数据的铸坯热处理与轧锻工艺制度优化技术；研究 3 类仪表与配料、熔炼、成型工序软硬件协同技术，完成仪表在废钢车间、熔炼车间和铸坯成型车间的安装部署；开发融合在/临线检测数据的特种钢生产线关键工序工艺动态控制软件，研制覆盖配料、熔炼、成型等工艺的质量检测与动态调控系统，开展工程验证。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）再生合金原料关键元素高通量检测仪表，可提供不少于 5 种再生钢铁高价值合金元素（如 Ni、Cr 等）和有害残余元素（如 Cu、Ti 等）的成分分级信息，从待测对象定位识别到完成分级判定时间¹ $\leq 0.1s$ ，核心仪表平均无故障时间 $\geq 1000h$ ；快速预处理模块，处理能力不低于 30 吨/天，处理后样品外观尺寸极值 $\leq 300mm$ ；位置追踪模块的定位精度²（CEP） $\leq 20mm$ ；元素感知模块单帧信号数据读出时间

¹ 分级判定时间，指检测对象从被识别定位到给出关键元素成分分级结果的时间。

² 位置追踪定位精度，指对目标空间位置的定位结果与其空间实际位置接近程度，这里用圆概率偏差（CEP）表示，即以目标中心为圆心画一个圆，有 50% 击打点落入该圆内，则该圆半径值为 CEP。

$\leq 1\text{ms}$ ；光谱分辨率¹（FWHM） $\leq 0.1\text{nm}$ ；软件具备多模块联动控制、多维信息实时耦合判别决策等功能；验证平台具备大宗混杂合金自动上料和分选、多形态多牌号合金及标准样品在线检测和结果分析等功能。

（2）熔体微量元素高灵敏检测仪表，熔体金属中 C、Si、Mn、P、S 等元素检出限 $\leq 0.01\%$ ，Al、Ti 等金属元素检出限 $\leq 0.002\%$ ，含量 0.1%量级合金元素的检测稳定性优于 10%，核心仪表平均无故障时间 $\geq 1000\text{h}$ ；激光源脉冲能量 $\geq 100\text{mJ}$ ，频率 $\geq 20\text{Hz}$ ，寿命 ≥ 10 亿脉冲，能量稳定性²优于 1%，探测器光谱响应范围 165nm—1000nm，峰值量子效率³ $\geq 80\%$ ，光谱仪模块的光谱解析能力⁴ $\geq 10000@192\text{nm}—750\text{nm}$ ；软件具备复杂工况监测、多模块高精度协同控制、自诊断与自校准等功能；验证平台具备运行流程模拟、高温熔体金属制备、熔体金属微量元素检测验证等功能。

（3）铸坯轧锻产品金相全自动检测仪表，实现试样抓取、表面处理、金相观察、智能评价和报告生成全流程自动化；特种钢中，非金属夹杂物平均检出率⁵ $\geq 95\%$ ，评级准确率⁶ $\geq 95\%$ ，晶粒度评级准确率 $\geq 95\%$ ，脱碳层、组织类型（铁

1 光谱分辨率（FWHM）：谱线信号峰值一半处对应的光谱宽度，用来表征仪器的实际分辨能力。

2 激光能量稳定性，用于衡量激光脉冲能量的波动程度，用相对标准偏差表示。计算公式：能量稳定性=能量标准偏差/能量均值 $\times 100\%$ 。

3 探测器量子效率，指探测器将入射光子转换为电子的效率，即单位时间内产生的光电子数与入射光子数之比，以百分比（%）表示。

4 光谱解析能力，指分辨相邻光谱峰的能力，计算方式：光谱解析能力=波长/可分辨的最小波长差。

5 检出率，是指实际不合格样本中，被仪表正确检出不合格样本的比例 $\times 100\%$ 。

6 评级准确率，是指仪表对样本评级的正确比例 $\times 100\%$ 。

素体、珠光体、马氏体、带状组织等)的错检率¹≤10%;微观结构高效可控无畸变显化的时间≤1min,自动评级时间≤10s;核心仪表平均无故障时间≥1000h;100倍放大倍率下试样图像的扫描速度≥4mm²/s;试样定位载物台的XY轴定位精度优于1μm,轮廓定位误差≤50μm;金相显微镜相机分辨率≥1200万像素,100倍物镜数值孔径≥0.8;软件具备多模块最优协同、端对端软件控制和跨模块数据整合等功能;验证平台具备多类型同步分析、最优化多样品传送转移时序及控制等功能。

到2028年10月,完成以下指标:

(4)特种钢生产流程质量检测与动态调控系统,支持3种仪表检测数据实时传输、历史数据存储、异常报警、控制策略和指令输出与执行,实现关键参数闭环控制。

工程化指标:

到2027年12月,完成以下指标:

(1)再生合金原料关键元素高通量检测仪表、熔体微量元素高灵敏检测仪表和铸坯轧锻产品金相全自动检测仪表研制完成,通过用户参与的中试测试考核,核心部件自研率≥90%。

到2028年10月,完成以下指标:

(2)仪表技术就绪度(TRL)≥8级,产品设计定型,

¹ 错检率,是指实际合格的样本中,被仪表误判为不合格样本的比例×100%。

经小批量生产和实际环境下充分应用与验证。

(3) 在特种钢生产线开展示范应用，即在废钢、熔炼和成型等车间分别部署安装再生合金关键元素高通量快速检测仪表、熔体微量元素高灵敏检测仪表和铸坯轧锻产品金相全自动检测仪表，各仪表系统均通过用户不少于 3 个月的适用性验证。

(4) 再生合金关键元素高通量快速检测仪表，检测合金形态覆盖片块料和屑料，片块料在线分析速度 ≥ 100 件/min，屑料在线分析速度 ≥ 500 次/min；扩展应用于高值再生钛合金资源回收产线，关键牌号在线识别准确率¹ $\geq 85\%$ 。熔体微量元素高灵敏检测仪表，熔体检测最高适应温度 $\geq 1670^{\circ}\text{C}$ ，合金熔炼过程元素成分在线检测时间 $\leq 2\text{min}$ ；扩展应用于有色金属冶炼/熔铸等生产线，成分在线检测时间 $\leq 2\text{min}$ 。铸坯轧锻产品金相全自动检测仪表，全流程金相检测自动化，特种钢单个试样统计平均检测时间 $\leq 10\text{min}$ ；扩展应用于有色金属产品的金相检测，铜合金晶粒度评级准确率 $\geq 95\%$ 。

(5) 特种钢生产流程质量检测与动态调控系统，高合金原料应用成本节约 3% 以上，熔炼过程成分信息反馈时间减少 50%，平均成分调控周期²缩短 20%，目标特种钢的成

1 牌号在线识别准确率，是指物料识别牌号的正确比率，即准确率=(正确识别的牌号物料的个数/测试物料的总数) $\times 100\%$ 。

2 熔炼过程成分调控周期，是指熔炼过程中从开始检测钢液成分到根据检测结果开始加入合金调控成分的时间间隔（秒或分钟）。取不少于 50 炉次的成分调控周期的平均值作为平均成分调控周期。

分统计符合度¹≥99.8%，铸坯热处理、轧锻冷却制度优化周期²缩短 30%，轧制工序批次稳定性 CPK 指数³>1.33(累计 100 次统计结果)。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，采用公开竞争方式。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备特种钢生产制造能力的企业或具备质量检测技术研发优势的仪表制造企业或科研院所，鼓励产学研用单位联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验研究、生产制造、集成应用等条件。原则上申报项目的参与单位不超过 25 家、下设课题不超过 5 个。

1 成分统计符合度，是指在应用测量系统后，产品成分达到预设目标或产品标准的比例。

2 优化周期，是指在铸坯热处理或轧锻等场景，“取样—送实验室—制样—显微镜观察—结果评价—发现问题—调整制度”所用时间，通过对比系统应用前后的用时确定优化周期缩短比例。

3 轧制工序批次稳定性 CPK 指数， $CPK = \min\{(USL - \mu), (\mu - LSL)\} / 3\sigma$ ，USL 和 LSL 为约定参数控制上限和下限， μ 为实际参数平均值， σ 为标准差， $\sigma = R/d_2$ ，R 为样本均差的极值； d_2 是与样本数量相关的量，可查表。

项目 3.1.4.5：有机物成分高分辨检测仪表研制及验证

1. 研究目标

石化原油、成品油生产调制需要对超复杂体系中烃类、醇类、醚类等有机物成分进行高分辨在线检测。当前的有机物成分检测仪表存在检测分辨力不足、原位快检功能缺失、仪表关键部件依赖进口等问题，亟需突破复杂有机分子光谱高效激发、指纹光谱特征精准提取与解析、油品成分定量分析等关键技术，研制高性能激光光源和光谱探测器等核心部件，开发复杂有机成分智能识别与关键组分检测软件，研制有机物成分高分辨检测仪表，搭建仪表性能测试验证平台，在石油化工、药物、锂电池、半导体材料等工业场景完成仪表性能验证。

2. 研究内容

（1）宽谱段激光器和拉曼光谱探测部件

研究宽谱段分子光谱扫描、复杂有机分子光谱高效激发、指纹光谱特征精准提取和快速解析等技术，研制包含激光波长转换模块和纳米级自动光学控制模块的宽谱段可调激光器、宽谱段高分辨拉曼光谱探测部件。

（2）高性能红外光谱探测部件

研究复杂工业环境中红外光谱的高精度和高稳定性干涉分光、低噪声快速检测、高速数据采集与实时信号处理、抗干扰自校准等技术，研制宽谱段高精度、高灵敏度、高可

靠性、具有智能化多通道扩展功能的红外光谱探测部件。

（3）光谱分析算法与一体化软件

研究有机分子成分和石化油品组分性质的分子光谱响应规律、多光谱数据融合的定量分析算法，建立目标检测分子指纹特征光谱数据库和面向生产现场的智能在线分析模型；开发具备光谱数据自动采集与在线处理、分子组分智能识别、组分含量与性质快速评价等功能的一体化配套软件。

（4）有机物成分高分辨检测仪表整机

研究包含拉曼光谱探测部件与红外光谱探测部件协同设计与同步控制、仪表整机环境适应性与维护性提升、面向不同行业应用的系统设计等仪表整机集成方案，开发具备光谱数据自动采集与在线处理、分子组分智能识别与成分含量实时统计等功能的配套软件，研制有机物成分高分辨检测仪表。

（5）有机物成分高分辨检测仪表工程验证

搭建具备化工过程分子成分检测工况模拟、多种烃类化合物检测比较分析等功能的测试验证平台，验证仪表关键技术指标、可靠性和稳定性；在石油化工、药物、锂电池、半导体材料等工业场景开展检测仪表性能验证。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

(1) 部件指标：激光源波长连续可调范围至少覆盖 190nm—850nm，线宽 $\leq 3\text{GHz}@850\text{nm}$ ，机械角度调节精度 $\leq 0.1^\circ$ ，可调范围内平均输出功率 $\geq 200\text{mW}$ ，长波输出功率 $\geq 3000\text{mW}@850\text{nm}$ ，短波输出功率 $\geq 5\text{mW}@190\text{nm}$ ；纳米级自动光学控制模块调节精度优于 10nm；拉曼光谱探测范围 200 cm^{-1} —4000 $\text{cm}^{-1}@632.8\text{nm}$ ，光谱分辨力¹优于 4 $\text{cm}^{-1}@632.8\text{nm}$ ，信噪比 $\geq 1000:1$ ；红外光谱范围 4000 cm^{-1} —12500 cm^{-1} ，光谱分辨力优于 1 cm^{-1} ，信噪比 $\geq 10000:1$ ，波数准确度优于 0.1 cm^{-1} ，波数重复性优于 0.01 cm^{-1} 。

(2) 整机指标：面向石油化工、药物、锂电池、半导体材料等行业应用，最小检测时间可达 0.05s，检测空间分辨率 $\leq 250\text{nm}$ 。

(3) 验证平台指标：在典型石化生产场景中搭建侧线装置，实现仪表的现场测量。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

(4) 整机指标：可检测分子种类 ≥ 100 种，检测石化产品成分种类至少包含直链类、环链类、芳烃类、烯类等；有机小分子检出限可达 ppm 量级以下。

(5) 验证平台指标：实现仪表检测结果与石化行业/国家标准化学检验方法结果的对比分析，分析范围包含烷烃、烯烃、氯代烃、芳烃、醇类、醚类等石油化工常见产品组分

¹ 光谱分辨力，指分子光谱在频域上的光谱宽度。计算公式：分子光谱在频域曲线上，计数值峰值下降一半（即-3 dB 点）时对应的光谱范围（半高全宽，FWHM）。

及浓度。

工程化指标:

到 2027 年 12 月，完成以下指标:

(1) 技术就绪度 (TRL) ≥ 8 级，核心仪表设计定型，具备小批量生产和多场景应用能力，核心部件自研率 $\geq 90\%$ 。

(2) 核心仪表平均无故障时间 $\geq 1000\text{h}$ 。

(3) 在“石油化工资源能源集约生产协同优化系统解决方案”项目群中项目 4.4.3.1“石化‘资源—能源’协同优化系统研制及示范工程”承担单位指定的石油化工原油、成品油调制等环节部署安装有机物成分高分辨检测仪表。(项目群考核指标)

到 2028 年 10 月，完成以下指标:

(4) 在项目 4.4.3.1 承担单位部署安装的有机物成分高分辨检测仪表，累计运行时间不少于 3 个月，对石油化工中原油、汽油的成分性质检测频率 ≥ 6 次/h；烯烃、芳烃等有机组分含量的测量重复性满足 GB/T 28768 标准；原油密度、硫含量、主要馏分油收率、汽油辛烷值等核心指标的测量重复性满足 GB/T 1884、GB/T 17040、GB/T 17280、GB/T 503 等标准。通过该项目承担单位不少于 3 个月的仪表可用性验证，达到项目工程应用要求。(项目群考核指标)

(5) 有机物成分高分辨检测仪表扩展应用至药物、锂电池、半导体材料等行业，应用不少于 4 套。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目,作为“石油化工资源能源集约生产协同优化系统解决方案”项目群的项目,采用公开竞争方式,项目自由申报,项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类: 重大共性关键技术。

其他来源资金(包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金)与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式: 事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备有机物成分检测技术研发优势的智能检测仪表制造企业或科研院所,鼓励产学研用单位联合申报,申报联合体应具备较强的专业研发团队,以及完善的试验研究、生产制造条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 3.1.5.1: 流程工业智能工厂操作系统底座研制及验证

1.研究目标

当前工业软件业务领域单一,缺乏跨业务域协同能力,难以有效支撑企业突破成本与效率瓶颈,需要构建智能工厂

操作系统，实现全域协同、优化资源配置、提升决策效率。针对现有工业互联网平台各业务域生产要素数据难以互联互通，现有低代码开发手段预置组件、算法、工具的业务逻辑相对固化，扩展能力弱的问题，突破工业全域生产要素统一管控与运维，多模态工业数据一体化接入、存储与访问，生产要素语义互操作与按需智能集成，多智能体协同决策与实时优化，多语言工业软件集成开发与统一管理关键技术，研制流程工业智能工厂操作系统底座，开发跨域决策与调控软件，在冶金、石化、精细化工、医药等流程行业开展工程验证。

2.研究内容

（1）工业全域生产要素统一管控与运维技术

研究覆盖人员、设备、物料、工艺、环境等工业全域生产要素统一虚拟化表征技术，工业生产要素虚拟化资源全生命周期管理技术，支持百万 I/O 点全域信息统一接入管控技术，安全运维与资源优化配置技术，实现全域生产要素标准化管理与统一运维管控。

（2）多模态工业数据一体化接入、存储与访问技术

研究兼容 OPC、Modbus、MQTT、RTSP、HTTP/HTTPS 等主流工业协议的多模态数据一体化接入与存储技术，跨尺度时空场景建模技术，多模态语义对齐与数据检索技术，跨尺度时序数据特征提取技术，多模态数据样本标注与抽取技

术，多模态数据融合训练与动态推理优化技术，实现多模态工业数据一体化管理。

（3）生产要素语义互操作与按需智能集成技术

研究数据驱动与机理知识融合的生产要素语义信息统一建模技术，生产要素自适应语义技术，事件驱动工业生产要素柔性组合技术，可视化低代码语义信息模型智能集成技术，构建智能工厂全生命周期语义信息模型库以及模型开发工具集，实现语义信息模型即插即用和模块化集成。

（4）多智能体协同决策与实时优化技术

研究跨业务域工业场景协同决策任务分解与策略规划技术，智能体实时优化与任务动态调度技术，多智能体冲突解决与自适应学习技术，构建覆盖计划、调度、实时优化、控制等智能体的集成开发环境，提升智能工厂操作系统底座的实时决策与自适应优化能力。

（5）多语言工业软件集成开发与统一管理技术

研究 Java、Python、.NET 等开发语言运行环境构建技术，大模型驱动的工业软件预置资源动态扩展技术，高低代码混合开发与持续集成技术，多运行环境协同调度技术，软件即时验证、发布与在线更新技术，实现多语言工业软件自适应统一部署与管理。

（6）智能工厂操作系统底座研制及行业工程验证

研究 IT 基础设施适配的虚拟化内核技术，研制智能工厂

操作系统底座，面向计划排产、生产控制、工艺优化、质量管控、供应链管理等业务域开发跨域决策与调控软件，在冶金、石化、精细化工、医药等流程行业开展工程验证，对系统底座进行迭代优化和推广，打造跨域决策与调控的工厂运营管控新范式。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

研发支持生产要素全域管控与跨域决策的智能工厂操作系统底座技术原型。

（1）在工业全域生产要素统一管控方面，支持不少于 200 种工业生产要素的统一虚拟化表征、集成、建模和管理¹，支持 50 万 I/O 点全域信息统一接入管控²。

（2）在多模态工业数据一体化接入方面，支持 OPC、Modbus、RTSP 等工业协议的接入与存储，支持文本、视频、时序数据、结构化数据等数据模态³≥4 种。

（3）在生产要素语义互操作和按需集成方面，构建智能工厂全生命周期语义信息模型库以及模型开发工具集，涵盖工业装置、控制器、智能仪表等不少于 10 类 200 个以上语义信息模型，支持不少于 300 个设备/系统的集成。

1 在系统中搭建 200 种工业生产要素虚拟化表征模型，可以对所有属性进行增删改查操作。

2 在实验室环境中，模拟接入 I/O 点，总数达到 50 万点。

3 在系统中导入 DOC、PDF、TXT 等文本文件，接入 RTSP 视频流，接入工业控制系统、智能仪表等时序数据，导入 CSV、JSON、XML 等结构化数据，将接入的各类多模态数据，定义成生产要素表征模型的一种属性进行持久化存储，通过标准接口进行访问和操作。

(4) 在多智能体协同决策与实时优化方面, 构建覆盖计划、调度、实时优化、控制等智能体的集成开发环境, 开发智能体不少于 30 种, 输出决策建议的采用率¹≥60%。

(5) 在多语言工业软件统一管理方面, 研发组件、算法、工具 3 大类不少于 50 种预置资源², 支持 Java、Python、.NET 等不少于 3 种开发语言运行环境构建, 支持不少于 20 个异构工业软件统一部署与管理³。

(6) 智能工厂操作系统底座适配国产芯片≥3 种、国产服务器≥5 种、国产操作系统≥3 种、国产数据库≥3 种、国产中间件≥3 种。基于底座研发跨域决策与调控软件不少于 20 种⁴。

到 2029 年 10 月, 完成以下指标:

研发支持生产要素全域管控与跨域决策的智能工厂操作系统底座。

(7) 在工业全域生产要素统一管控方面, 累计支持不少于 400 种工业生产要素的统一虚拟化表征、集成、建模和管理⁵, 累计支持百万 I/O 点全域信息统一接入管控⁶。

1 决策建议采用率=用户认可并采用的决策数量/智能体输出决策数量×100%。

2 搭建 50 种预置资源包括组件、算法、工具, 其中预置组件包括计划排产、设备运维、质量管控等, 预置算法包括生产过程优化、精益质量管控、产品质量追溯等, 预置工具包括数据交换集成、业务流程编排、业务逻辑处理等。

3 在集成开发环境中分别安装 Java (JDK)、Python、.NET (SDK) 3 种语言的运行环境, 准备各语言开发的 20 个典型异构工业软件, 验证多语言环境共存性, 确认无冲突。

4 研发 20 种跨域决策与调控软件, 包含单产能耗协同决策软件、订单交付协同决策软件、设备运维协同决策软件、多牌号切换决策软件、质量偏差协同决策 5 类。

5 在系统中搭建 400 种工业生产要素虚拟化表征模型, 覆盖人员、设备、物料、工艺、环境等要素, 表征模型定义了生产要素的元数据、基础属性、方法服务、状态事件、多模态数据等属性, 可以对所有属性进行增删改查操作。

6 在实验室环境中, 模拟接入 I/O 点, 总数达到 100 万点, 在单个企业中, 物理接入 I/O 点, 总数达到 10 万点。

(8) 在多模态工业数据一体化接入方面, 支持 OPC、Modbus、MQTT、RTSP、HTTP/HTTPS 等协议的多模态数据一体化接入与存储, 累计支持文本、图像、视频、音频、时序数据、结构化数据、3D 数据等数据模态 ≥ 7 种¹。

(9) 在语义互操作的生产要素按需集成方面, 优化智能工厂全生命周期语义信息模型库以及模型开发工具集, 累计涵盖工业装置、控制器、智能仪表等不少于 20 类 500 个以上语义信息模型, 累计支持不少于 1000 个设备/系统的集成。

(10) 在多智能体协同决策与实时优化方面, 开发智能体累计不少于 50 种, 包括计划排产优化、成本经营分析、设备调度协同、原料配比实时优化、工艺参数自适应控制、质量预测与根因分析、能源效率优化、安全智能预警、库存策略优化、物流路径优化等, 实现跨业务域智能决策, 输出决策建议的采用率 $\geq 80\%$ ²。

(11) 在多语言工业软件统一管理方面, 研发组件、算法、工具 3 大类累计不少于 100 种预置资源³, 累计支持 Java、Python、.NET 等 6 种开发语言运行环境构建, 累计支持不少

1 在系统中导入 DOC、PDF、TXT 等文本文件, 导入 JPEG、PNG、BMP 等图像数据, 导入 MP4、AVI、MKV 视频文件, 以及接入 RTSP 视频流, 导入 MP3、WAV 等音频数据, 接入工业控制系统、智能仪表等时序数据, 导入 CSV、JSON、XML 等结构化数据, 导入 STL、OBJ、3DS 等 3D 数据, 将接入的各类多模态数据, 定义成生产要素表征模型的一种属性进行持久化存储, 通过标准接口进行访问和操作。

2 搭建 50 种面向工业决策场景的智能体, 接入文本、图像、视频、音频、时序数据、结构化数据、3D 数据等多模态数据进行决策, 输出决策结果。在工程验证中, 智能体输出决策建议的采用率 $\geq 80\%$ 。

3 搭建 100 种预置资源包括组件、算法、工具, 其中预置组件包括计划排产、设备运维、质量管控等, 预置算法包括生产过程优化、精益质量管控、产品质量追溯等, 预置工具包括数据交换集成、业务流程编排、业务逻辑处理等。

于 50 个异构工业软件统一部署、资源动态分配与管理，支持软件在线更新¹。

（12）基于智能工厂操作系统底座，研发跨域决策与调控软件累计不少于 50 种，覆盖计划排产、生产控制、工艺优化、质量管控、供应链管理等业务域累计不少于 5 种²。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）智能工厂操作系统底座、跨域决策与调控软件技术就绪度（TRL）≥7 级。

（2）在石化行业进行工程验证，连续运行时间不低于 3 个月，为项目 4.4.3.1 提供多模态工业数据一体化接入、全域生产要素统一管控等工厂操作系统底座能力，支撑项目 4.4.3.1 实现石化行业原料性质表征、资源排产、能源优化、性能评估等核心功能。

（3）在不少于 20 家流程企业进行智能工厂操作系统底座的工程验证与推广，覆盖冶金、石化、精细化工、医药等流程行业，其中典型企业实现设备非计划停机减少 20%，订单交付周期缩短≥15%，典型企业占比≥10%，累计工程应用时间≥3 个月³。

1 在集成开发环境中分别安装 Java（JDK）、Python、.NET（SDK）及其他 3 种语言的运行环境，准备各语言开发的 50 个典型异构工业软件，包括 MES、ERP、SCM 等，在集成开发环境中运行 50 个工业软件，验证多语言环境共存性，确认无冲突，为单个工业软件分配计算、存储、网络等资源。

2 研发 50 种跨域决策与调控软件，包含单产能耗协同决策软件、订单交付协同决策软件、设备运维协同决策软件、多牌号切换决策软件、质量偏差协同决策 5 类。

3 基于智能工厂操作系统底座的研究成果，按要求进行工程验证，并对比工程应用前后的相关指标，统计成本与效率提升幅度是否达标。

到 2029 年 10 月，完成以下指标：

（4）智能工厂操作系统底座、跨域决策与调控软件技术就绪度（TRL） ≥ 8 级。

（5）在累计不少于 100 家流程企业进行智能工厂操作系统底座的工程验证与推广，覆盖冶金、石化、精细化工、医药等流程行业，其中典型企业实现设备非计划停机减少 20%，订单交付周期缩短 15%，典型企业占比 $\geq 10\%$ ，累计工程应用时间 ≥ 3 个月。

（6）在中小型冶金企业进行工程验证，典型企业实现吨产品（如每吨钢产量）综合能耗降低 3%，提升冶金企业能源利用效率。

（7）在中大型精细化工企业进行工程验证，典型企业实现生产过程产品牌号切换时间缩短 15%，确保多牌号生产过程稳定。

（8）在中大型医药企业进行工程验证，典型企业实现药品质量标准偏差降低不少于 10%，提升产品质量稳定性。

（9）构建智能工厂操作系统底座生态联盟，发展生态集成商 ≥ 50 家，共同推进跨域决策与调控软件的研发与应用。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2029 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，采用公开竞争方式。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备智能工厂操作系统研发优势的企业，应与国内相关优势企业、科研院所、高等院校等联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 25 家、下设课题不超过 5 个。

（二）离散制造柔性管控系统

项目 3.2.2.2：轨道交通工艺装备全生命周期管理软件研制及验证

1.研究目标

轨道交通工艺装备是实现整车及转向架等核心部件组焊、机加工、装配、检测等生产工艺所需的定位工装总称，具有种类繁多、结构大型复杂、精度要求严苛等特点，多型号轨道交通装备生产中需要根据产品变更对工装精准调度和调控。针对跨系列高速列车、重载机车等生产过程中工艺装备多、切换调试时间长（包括设计周期长、模块复用

率低)、精度保持难等问题,突破工艺装备跨域知识体系建模表征、面向产品变更的工艺装备智能辅助设计、工艺装备运维管理、工艺装备在役与维护协同调度等核心技术,研制轨道交通工艺装备全生命周期管理软件,支撑先进轨道交通装备按需与柔性制造系统,并在其他不少于3个行业进行验证和推广,实现轨道交通制造工艺装备的快速设计、全生命周期精度保持,降低设计管理成本,提高轨道交通装备制造质量。

2.研究内容

(1) 工艺装备跨域知识体系建模表征技术

研究工艺装备“几何—结构—功能”关系模型构建技术,研究包含设计域、制造域、维护域的跨域知识体系模型及域间映射技术,研究多维异构知识自动化抽取方法,研究多维异构知识关联分析与智能推荐技术,研制工艺装备跨域知识体系建模工具。

(2) 面向产品变更的工艺装备智能辅助设计

研究支持知识工程等技术的工艺装备设计生成框架,研究支持文本、图片、CAD模型等异构数据的设计输入提取方法,研究符合设计规范、结构功能与可制造性等要求的工艺装备几何结构推理与快速生成技术,研究知识与智能算法驱动的工艺装备几何结构优化技术,研制面向产品变更的工艺装备智能辅助设计引擎。

(3) 工艺装备运维管理技术

研究多源传感器数据融合的工艺装备关键几何特征监测与定位跟踪技术，研究包含图像、点云、三维 CAD 模型等多模态数据的模型重建与几何特征拟合技术，研究考虑弹性变形的工艺装备定位误差在位评估技术，研究集成历史数据、监测数据与物理模型的工艺装备定位误差预测模型，研究保持工艺装备精度的工艺装备维修、再制造策略生成技术，研究“工艺装备定位误差评估—工件制造精度预测—工件制造工艺补偿—工艺装备维护”的闭环管控策略，研制工艺装备运维管理模块。

(4) 工艺装备在役与维护协同调度

研究工艺装备寿命状态与生产任务执行的量化关联规律，研究列车生产计划与工艺装备维护任务的协同关系，建立以工期延误、质量缺陷等为核心的多目标在役与运维协同调度模型，研究考虑关键路径上生产任务时间窗与风险等级的工艺装备预检测机制，研究基于滚动时域与异常扰动的工艺装备在役与运维联合调度方法，研制工艺装备在役与维护协同调度算法库。

(5) 轨道交通工艺装备全生命周期管理软件研制及验证

研制轨道交通工艺装备全生命周期管理软件，以工艺装备跨域知识体系建模为数据基础，集成面向产品变更的工艺

装备智能辅助设计、工艺装备运维管理、工艺装备在役与维护协同调度等技术，开发面向工艺装备的立项、设计、验证、点检、运维、改造、报废等功能，在轨道交通等行业进行验证。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

初步完成研制轨道交通工艺装备全生命周期管理软件 1 套，包含以下三个模块。

（1）工艺装备跨域知识体系建模表征模块，构建包含设计、制造、维护 3 个领域的工艺装备知识库，涵盖焊接、机加工、冲压折弯、装配、检测等 5 类以上工艺，支持 CAD 模型、工艺文档、图纸等 3 种以上工艺装备文件的知识抽取、检索和推荐，工艺装备 CAD 模型、工艺文档、图纸检索推荐准确率¹≥80%。

（2）面向产品变更的工艺装备智能辅助设计引擎，支持焊接、机加工、冲压折弯、装配、检测等 5 类工艺装备设计的快速生成，工艺装备的平均设计模块复用率²≥70%，提升高速列车、重载机车等行业的混线制造的工艺装备设计效率。

1 推荐准确率，指单次检索推荐结果中符合用户需求的结果占比，即推荐准确率=检索推荐的相关文档数/检索推荐的总文档总数×100%。

2 设计模块复用率，指生成的工艺装备设计方案中，重复使用现有零部件模块（含模型与实物）的数量占零部件模块总数的比例。当前复用率：焊接类 86.4%，模具类 7.7%，加工类 77%，检测类 15.2%，装配类 60%，平均：50%。

(3) 工艺装备运维管理模块, 支持对焊接、机加工、冲压折弯、装配、检测等 5 类工艺装备的定位误差在位评估, 评估误差 (与实测值对比) $\leq 0.1 \times$ 理论容许最大定位误差; 支持对工件的直线度、平面度、同轴度、平行度等 4 种以上几何特征进行预测, 实现预测误差 $\leq 0.1 \times$ 理论容许最大加工误差, 直线度预测误差 $\leq 0.005\text{mm/m}$, 平面度预测误差 $\leq 0.01\text{mm}$, 同轴度预测误差 $\leq 0.01\text{mm}$, 平行度预测误差 $\leq 0.01\text{mm/m}$; 维修再制造策略生成准确率¹ $\geq 85\%$, 满足专项“先进轨道交通装备按需与柔性制造系统解决方案”项目群中项目 4.3.3.1“支撑多系列混线生产的 CR450 高速列车高精度制造系统研制及示范工程”和项目 4.3.3.2“重载机车脉动式可重构制造系统研制及示范工程”的技术要求。(项目群考核指标)

到 2028 年 10 月, 完成以下指标:

(4) 完成研制轨道交通工艺装备全生命周期管理软件 1 套, 增加工艺装备在役与维护协同调度模块, 提供包括焊接、机加工、冲压折弯、装配、检测等 5 类以上工艺装备运维知识库, 提供考虑工期延误、质量缺陷、维护成本等不少于 3 种目标的在役与维护协同调度模型, 提供不少于 5 种的工艺装备在役与运维联合调度算法。

工程化指标:

到 2027 年 12 月, 完成以下指标:

¹ 维修再制造策略生成准确率, 指在一定使用时间内, 软件生成的维修再制造策略被采用的数量占需要维修再制造的工艺装备总数的比例, 即维修再制造策略生成准确率=被采用的维修再制造策略数量/维修再制造的工艺装备总数 $\times 100\%$ 。

(1) 轨道交通工艺装备全生命周期管理软件经实际环境下充分应用与验证,除工艺装备在役与维护协同调度功能外,其他各项功能指标满足使用要求,软件具有自主知识产权,为轨道交通行业提供首套基础的工艺装备全生命管理软件。

(2) 在专项“先进轨道交通装备按需与柔性制造系统解决方案”项目群中项目 4.3.3.1“支撑多系列混线生产的 CR450 高速列车高精度制造系统研制及示范工程”和项目 4.3.3.2“重载机车脉动式可重构制造系统研制及示范工程”进行验证,连累计运行时间不低于 3 个月,达到项目 4.3.3.1 和项目 4.3.3.2 技术要求;对现有和新增工艺装备不少于 200 套进行保持精度的运维管理,工艺装备的平均设计周期¹缩短(相较于当前人工设计周期²) $\geq 50\%$;支持项目 4.3.3.1 实现高速列车全工序一次交检合格率由 95%提升到 99%,支持项目 4.3.3.2 实现 20 种以上重载机车脉动式总装生产。(项目群考核指标)

到 2028 年 10 月,完成以下指标:

(3) 轨道交通工艺装备全生命周期管理软件技术就绪度(TRL) ≥ 8 级。经实际环境下充分应用与验证,各项指标满足使用要求,软件具有自主知识产权,为轨道交通行业提供首套完整的工艺装备全生命管理解决方案。

(4) 在轨道交通行业以外不少于 3 个行业的混线制造

1 设计周期,指从设计需求输入被软件系统识别开始,到软件系统输出设计方案为止的耗时。

2 当前人工设计周期,焊接类 3 到 5 周,模具类 5 到 8 周,加工类、检测类、装配类 1 到 3 周。

场景进行验证。

4.实施期限

本项目为 2024 年未部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目,作为“先进轨道交通装备按需与柔性制造系统解决方案”项目群的项目,采用公开竞争方式,项目自由申报,项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类: 重大共性关键技术。

其他来源资金(包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金)与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式: 事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备工艺装备管理软件研发优势的轨道交通装备制造企业、软件企业或科研院所,鼓励产学研用单位联合申报,申报联合体应具备较强的专业研发团队,以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目群一: 支持单件定制模式的敏捷生产管控系统

1.设立目标

单件定制模式下,产品复杂度及非标准化程度高,设计与制造并行推进,缺乏实物试制验证,设计制造过程面临极

大不确定性，客户需求、设计、工艺、计划、制造等多环节月均千次变更，使得产品高质量与高准时交付成为行业面临的核心挑战。800MW 冲击式水电机组是国家首台套关键装备，本项目群的目标是针对 800MW 大型冲击式水电机组单件定制过程中，工艺路径规划周期长、制造工艺不成熟、多环节频繁变更难以快速响应、高精度高柔性制造与检测装备缺乏，导致产品质量与交付周期难以保证的问题，研发工艺路径创成与工艺参数优化软件、支持设计变更的一体化计划排程软件、支持供应链协同与零容错质量管理的制造运营管理软件，集成单件定制敏捷生产管控系统，研制大容量水轮机部件高柔性高精度制造与检测装备，实现高效高质量工艺路径规划、敏捷变更响应及大型零部件高精度制造与检测，支撑国家重大水电工程机组高质量准时交付。

2.项目群构成

本项目群包含 4 个项目：项目 3.2.1.4“大型水电机组单件定制敏捷生产系统研制及验证工程”（验证工程项目）、项目 3.2.1.5“支持供应链协同与零容错质量管控的制造运营管理软件研制及验证”（产品研发项目）、项目 3.2.3.1“无试制工艺路径创成与工艺参数优化软件研制及验证”（产品研发项目）、项目 3.2.4.2“支持设计变更的一体化计划排程软件研制及验证”（产品研发项目）。

项目 3.2.1.5、3.2.3.1、3.2.4.2 分别研制支持供应链协同

与零容错质量管理的制造运营管理软件、工艺路径创成与工艺参数优化软件、支持设计变更的一体化计划排程软件 3 类业务软件，项目 3.2.1.4 结合典型行业单件定制要求，集成项目 3.2.1.5、3.2.3.1、3.2.4.2 的 3 类业务软件及相关企业信息化软件，构成单件定制敏捷生产管控系统，并集成大型复杂构件高精度制造与检测装备，形成大型水电机组单件定制敏捷生产系统，进行工程验证。项目群采用单件定制工程拉动敏捷生产管控系统开发的研发模式，由项目 3.2.1.4 作为主项目。群内项目既要完成项目群任务目标，又要完成本项目任务目标。

3.考核指标

研制单件定制敏捷生产管控系统，在 800MW 大型高水头冲击式水电机组上开展应用验证。核心零部件制造精度¹提升 20%；工艺设计周期缩短 60%、关键路径阻塞时间占比小于 15%、返工率降低 20%、核心工序²制造效率提升 15%，支撑机组制造周期³缩短 20%，完成机组全部部件交付。

4.组织方式

项目群采用链主制，由主项目牵头承担单位担任链主，公开竞争择优遴选链主及项目承担单位。各项目均自由申

1 核心零部件制造精度，指球阀轴孔同轴度、球阀螺栓孔位置度、轴瓦支撑面平行及垂直度等指标。

2 核心工序，指对产品质量、生产效率或成本有重大影响的环节，包括配水环管焊接、球阀高精度加工、球阀装配等。

3 机组制造周期，指内部订单生成到所有部套工厂内完成交付的时间。该装备为国内首台套，目前世界上已投入运行的最大单机容量的冲击式水电机组是瑞士的毕奥德隆水电站项目，其单机容量为 423MW，由奥地利安德里茨公司制造，整机制造周期超过 48 个月。在研 500MW 冲击式水电机组制造周期预计接近 48 个月。

报，确定承担单位后组成项目群，在链主单位组织下，共同支撑群目标实现。

项目群采用群/项目二级管理方式。在群层面，各项目承担单位需与链主单位明确项目群目标、指标，并纳入项目任务书考核指标；在项目层面，按照常规项目实施管理，各项目须完成本项目指南提出的全部研究内容和考核指标。

项目 3.2.1.4：大型水电机组单件定制敏捷生产系统研制及验证工程

1.研究目标

针对单件定制模式下，跨业务域数据贯通集成与变更协同决策难、大型部件高精度定制制造与装配难、异形构件几何精度与部件物理性能高精度高效检测与分析难的问题，研究全要素数据集成与融合技术，研究设计、工艺、采购、生产间跨业务域变更评估与协同决策技术，集成工艺路径创成、计划排程、制造运营管理软件及 PLM、ERP 等企业信息化软件，构建单件定制敏捷生产管控系统，研制大型复杂构件高柔性高精度制造与检测装备，构建大型水电机组单件定制敏捷生产系统，在 800MW 大型冲击式水电机组上开展验证，实现机组高质量准时交付。

2.研究内容

（1）支持跨域变更评估与协同决策的敏捷生产管控系统集成

研究跨平台全要素数据集成和多源数据融合技术，构建贯穿多 BOM 层级的产品全生命周期数据模型；研究低代码与数据模型联动的业务编排框架；研究产品实物信息全流程追溯技术；研究跨业务变更评估与实时决策优化技术，构建变更快速评估与协同决策机制；研究云原生平台集成技术，集成工艺路径创成、计划排程、制造运营管理软件与设计仿真、LTC、PLM、ERP、WMS、EMS、SCADA、SCM 等信息化软件，构建支撑变更评估决策与数据穿透式管理的单件定制全链路敏捷生产管控系统。

（2）大型复杂构件高柔性高精度制造工艺装备

研究焊接构件应力应变定量分析与控制技术，研制适用于球阀、转子支架等大型复杂构件的高精度焊接装备；研究有限空间约束下的高强度环形焊缝全位置焊接技术，研制配水环管高柔性高性能移动式焊接装备；研究装配位姿自适应动态调整和力矩精密控制技术，研制大型球阀自动化装配工艺装备；研究狭窄空间下的重型构件动态力位感知与高精度协同控制方法，研制重型喷射机构精密装配工艺装备。

（3）水电机组部件几何与物理特性高精度检测系统

研究大型复杂构件多种类特征的复合测量方法，研制适用于配水环管、球阀等部件的全域空间结构信息多传感器融合测量分析系统；研究“声—光—视觉”多参量融合的定子线棒防晕质量综合评估和缺陷识别定位技术，研制定子线圈防

晕性能多信息融合检测及分析系统。

（4）单件定制敏捷生产系统构建与工程验证

集成项目研制的单件定制敏捷生产管控系统、大型构件高柔性高精度制造与检测装备，构建单件定制敏捷生产系统，并在 800MW 大型高水头冲击式水电机组进行工程验证。

3.考核指标

技术指标：（项目群考核指标）

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）支持跨域变更评估与协同决策的敏捷生产管控系统，建立需求模型、结构模型、制造模型等不少于 3 类数据模型，支持研发、设计、仿真、试验等不少于 4 类业务域的数据集成与业务智能编排。

（2）研制大型复杂构件高柔性高精度制造工艺装备 2 套，包括：球阀大型螺栓自动化装配工艺装备，适应 M100×500—M160×1200 范围的螺栓装配，装配精度优于 $\pm 0.1\text{mm}$ ；重型喷射机构精密装配工艺装备，适应最大重量不小于 40 吨的重型部件自适应精密装配，装配精度优于 $\pm 0.2\text{mm}$ 。

到 2029 年 12 月，完成以下指标：

（3）支持跨域变更评估与协同决策的敏捷生产管控系统，建立需求模型、结构模型、质量模型、成本模型、制造模型、变更模型等不少于 10 类数据模型，支持研发、设计、

仿真、试验、采购、生产等不少于 6 类业务域的数据集成与业务智能编排；行业标识编码覆盖全部零部件；支持订单变更、工艺变更、设备异常变更等不少于 3 种集成联动策略；跨系统 API 响应速度 $\leq 2s$ 。

（4）研制大型复杂构件高柔性高精度制造工艺装备 2 套，包括：大型复杂构件高精度焊接装备，实现 $4m \times 5m—6m \times 8m$ 复杂结构件焊接，焊接变形量优于 $\pm 3mm$ ；配水环管高柔性高性能焊接装备，适应直径 $2000mm—5500mm$ 管节焊接，焊缝位置精度优于 $\pm 1mm$ 。

（5）研制水电机组部件几何与物理特性高精度检测系统 2 套，包括：大型复杂构件空间结构信息多传感器融合测量分析系统，最大采集范围 $20m \times 20m \times 10m$ ，全局空间点位采集精度优于 $\pm 0.025mm + 0.015mm/m$ ；定子线圈防晕性能多信息融合检测分析系统，适应 $10.5kV—24kV$ 线圈，检测范围 360° ，放电检测精度 $1pC$ 。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）单件定制敏捷生产系统在 800MW 大型高水头冲击式水电机组配水环管等核心部件开展应用验证，缩短核心部件制造周期 20%，完成配水环管等核心部件交付。（项目群考核指标）

到 2029 年 12 月，完成以下指标：

(2) 单件定制敏捷生产系统技术就绪度 (TRL) ≥ 8 级, 经实际环境下充分应用与验证, 各项指标满足行业应用要求, 连续无故障运行 3 个月。(项目群考核指标)

(3) 单件定制敏捷生产系统在 800MW 大型高水头冲击式水电机组上开展应用验证。核心零部件制造精度提升 20%; 工艺设计周期缩短 60%、关键路径阻塞时间占比小于 15%、返工率降低 20%、核心工序制造效率提升 15%, 支撑机组制造周期缩短 20%, 完成机组全部部件交付。(项目群考核指标)

(4) 单件定制敏捷生产系统在国产 F 级 G50 重型燃气轮机、600MW 及以上汽轮机、超超临界二次再热锅炉、万吨特深钻机等重大装备推广应用。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2029 年 12 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目, 作为“支持单件定制模式的敏捷生产管控系统”项目群的主项目, 采用公开竞争方式, 项目自由申报, 项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类: 应用示范研究。

其他来源资金 (包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金) 与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事后补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备水电机组制造能力的企业，应与国内相关科研院所、高等院校、应用企业、系统集成商等联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 3.2.1.5：支持供应链协同与零容错质量管控的制造运营管理软件研制及验证

1.研究目标

单件定制模式下，产品边设计、边生产、边采购，多环节月均千次变更，内外部供应链生产过程持续波动，导致内外部供应链物料齐套、生产稳定性保证、高价值部件零容错质量控制面临挑战。针对无备料缓冲的内外部供应链物料齐套保障难、频繁变更下生产执行快速响应难、多源扰动下关重件质量缺陷分析决策难、多维异常耦合的全生产要素动态维护难的问题，突破总装拉动的物料齐套控制、多源变更下的敏捷生产执行、关重件零容错质量管控与溯源、生产异常耦合感知分析与动态维护等关键技术，开发库存与物流管理、生产执行管理、质量全流程管控、异常感知与动态维护等功能模块，研制支持供应链协同与零容错质量管控的制造运营管理软件。支撑项目 3.2.1.4 大型水电机组验证工程，并

在水电机组以外不少于 3 个行业的单件定制场景进行验证和推广，提升内外部供应链协同的生产敏捷响应与关重件质量管控能力。

2.研究内容

（1）总装拉动的内外部供应链物料齐套控制技术

构建面向关键物料需求变更的内外部供应链快速响应机制，建立总装拉动的多级多仓协同动态库存调控模型，研究面向 MBOM 动态重构的制造资源物流优化调度技术，研究高频物料需求变更下的内外部供应链物料齐套控制方法，研究长制造周期下生产物料与在制品精准跟踪与可信追溯方法，研制库存与物流管理模块。

（2）多源变更下的敏捷生产执行技术

研究面向设计、工艺、物料、工装、质量等多源变更的多维异构数据跨系统集成技术，研究模型驱动的跨车间跨工序生产联动变更影响评估机制，构建多制造状态下的生产执行变更响应模型，研究多源变更下的多阶段生产过程跟踪与执行验证反馈技术，研制生产执行管理模块。

（3）关重件零容错质量全流程管控与溯源技术

研究多阶段多模态内外部供应链质量数据动态集成技术，研究非稳态生产过程的质量预防性控制技术，研究面向“设计—制造—交付”全过程的单件产品正反向质量追溯技术，构建质量缺陷的根因分析模型与“分析—评估—处理”

机制，研究质量零容错的缺陷处置策略自动匹配技术，研制质量全流程管控模块。

（4）生产异常耦合感知分析与动态维护技术

研究生产现场多类型异常耦合感知技术，构建面向时变工况小样本数据的异常感知模型，设计面向产品高可靠生产的多维异常风险评估机制，研究跨系统异常反馈与联动决策的敏捷动态维护技术，研制异常感知与动态维护模块。

（5）制造运营管理软件研制及验证

研发支持供应链协同与零容错质量管控的制造运营管理软件，并在大型水电机组等行业进行验证，验证内容包括制造运营管理软件的总装拉动的多级物料齐套保障能力、多源变更下的敏捷生产响应能力、零容错质量控制能力、多维异常感知分析能力。

3.考核指标

技术指标：（项目群考核指标）

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

研制支持供应链协同与零容错质量管控的制造运营管理软件 1 套，包含库存与物流管理、生产执行管理、质量全流程管控、异常感知与动态维护等模块。其中：

（1）库存与物流管理模块，支持需求预测动态调整、多级库存协同调拨、物流时效动态补偿等不少于 3 种库存调控模型；支持面向资源利用率、准时交付率、库存周转率等

多目标的物流优化调度方法 ≥ 5 种；支持多级多仓物流动态调度，调度优化算法响应时间 $\leq 5s$ 。

（2）生产执行管理模块，支持事件触发的设计变更信息分钟级自动同步与下达，覆盖物料清单、工艺标准、工艺程序、生产计划等信息；支持覆盖工艺准备、零件制造、部套装配和检测验证等多阶段生产过程跟踪。

（3）质量全流程管控模块，支持文本、图像、音频、传感器信号等不少于4种模态的质量数据动态集成；支持质量零容错的缺陷处置策略 ≥ 5 种；支持“设计—制造—交付”全过程质量信息记录与追溯。

（4）异常感知与动态维护模块，支持人员、设备、物料、方法、环境等不少于5个维度的异常风险评估。

到2029年12月，完成以下指标：

研制支持供应链协同与零容错质量管控的制造运营管理软件1套，包含库存与物流管理、生产执行管理、质量全流程管控、异常感知与动态维护等模块。其中：

（5）库存与物流管理模块，支持面向初估物料、长周期物料、通用料、工程专用料等的齐套性自动校验。

（6）生产执行管理模块，提供设计可靠性、资源适配性、计划可行性等信息的执行验证反馈功能。

（7）质量全流程管控模块，质量缺陷追溯率¹ $\geq 95\%$ 。

¹ 质量缺陷追溯率，指成功追溯并明确缺陷原因的质量问题数量占有所有已发现质量问题总数的比例。
质量缺陷追溯率=（成功追溯的缺陷数量/总缺陷数量） $\times 100\%$ 。

(8) 异常感知与动态维护模块, 异常漏检率¹≤3%。

工程化指标:

到 2027 年 12 月, 完成以下指标:

(1) 在 800MW 大型高水头冲击式水电机组配水环管等核心部件进行验证, 部套装配物料齐套率²≥90%, 返工率³降低≥20%。(项目群考核指标)

到 2029 年 12 月, 完成以下指标:

(2) 制造运营管理软件技术就绪度 (TRL) ≥8 级。经实际环境下充分应用与验证, 各项指标满足使用要求, 连续无故障运行 3 个月。(项目群考核指标)

(3) 在 800MW 大型高水头冲击式水电机组进行验证, 部套装配物料齐套率≥90%, 返工率降低≥20%, 工艺变更响应时间⁴≤120s。(项目群考核指标)

(4) 在水电机组以外不少于 3 个行业的单件定制场景进行验证, 推广数量≥5 套。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2029 年 12 月。

1 异常漏检率, 指在检测过程中, 实际为异常但被系统错误判定为正常的样本比例。异常漏检率=(漏检的异常样本数/实际异常样本总数)×100%。

2 部套装配物料齐套率: 是衡量部套装配环节中所有生产所需物料按时、完整配备到位的比例指标。部套装配物料齐套率=(实际齐套的订单或生产套数/计划齐套的订单或生产套数)×100%。

3 返工率, 指衡量整个生产流程中所有工序的综合返工情况, 考虑各工序之间的质量传递关系。返工率=(1-(1-第 1 工序返工产品数量/第 1 工序总投入生产数量)×...×(1-第 n 工序返工产品数量/第 n 工序总投入生产数量))×100%, 其中, n 为工序总数。

4 工艺变更响应时间, 指系统从接收到工艺变更请求(含参数/路线/资源约束变更)开始, 到完成跨车间工序影响评估、执行验证反馈、生产状态同步的全闭环响应所需的最长时间。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目,作为“支持单件定制模式的敏捷生产管控系统”项目群的项目,采用公开竞争方式,项目自由申报,项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类: 重大共性关键技术。

其他来源资金(包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金)与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式: 事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为通过 CMMI3 级以上认证、具备制造运营管理软件研发及工程实践经验的软件企业,应与国内相关科研院所、高等院校、软件应用企业等联合申报,申报联合体应具备较强的专业研发团队,以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 3.2.3.1: 无试制工艺路径创成与工艺参数优化软件研制及验证

1.研究目标

单件定制模式下,制造工艺非标准化程度高,无实物试制验证,导致工艺路径规划周期长、工艺质量不稳定。针对无试制条件下,定制产品工艺知识沉淀难、工艺路径快速准确规划难、制造过程工艺参数动态优化难、变工艺路径下控

制程序快速调整难等问题，突破工艺知识表征提取、工艺路径自动快速创成、工艺过程孪生建模与参数优化、控制程序自动生成等关键技术，开发工艺知识建模、工艺路径自动创成、工艺参数优化、设备控制程序生成等模块，研制无试制工艺路径创成与工艺参数优化软件。支撑项目 3.2.1.4 大型水电机组验证工程，并在水电机组以外不少于 3 个行业的单件定制场景进行验证和推广，大幅缩短工艺路径规划与优化周期，提高工艺质量。

2.研究内容

（1）少样本多模态工艺知识表征与提取方法

研究设计制造跨域统一的工艺知识建模方法，构建生产工艺知识本体模型，研究产品设计模型多维信息解析技术，研究少样本多模态工艺知识提取和融合技术，研究控制程序功能块代码自动抽取及验证技术，研制工艺知识建模模块。

（2）模型与知识融合的工艺路径自动创成技术

研究非定型 EBOM 下的工艺方案自动规划技术，研究复杂曲面特征智能识别技术，研究面向制造效率和质量的工艺流程自动推理技术，研究模型与知识推理融合的工艺要素自主规划技术，研究生产工艺内容智能生成技术，研究知识驱动的可制造性分析与工艺路径评价技术，研究设计变更驱动的工艺更新技术，研制工艺路径创成模块。

（3）工艺过程孪生建模与工艺参数优化技术

研究宽温条件下的数据融合和孪生模型修正机制，研究多部件集成的装配误差孪生预测技术，研究面向误差补偿的装配工艺参数优化方法，研究孪生体驱动的零部件修调策略自动生成技术，研制工艺参数优化模块。

（4）动态任务驱动的设备控制程序自动生成技术

研究控制任务自动识别与拆解技术，研究动态任务下的控制程序自动生成技术，研究物理仿真驱动的刀具路径质量评估与切削参数优化技术，研究控制程序语法形式化验证技术，研究控制程序功能仿真及验证技术，研究控制程序错误修复及程序结构优化技术，开发控制程序生成模块。

（5）工艺路径创成与工艺参数优化软件研制及验证

研发无试制工艺路径创成与工艺参数优化软件，并在大型水电机组等行业进行验证，验证内容包括工艺路径创成与工艺参数优化软件的工艺知识建模能力、工艺路径创成能力、工艺参数优化能力、控制程序生成能力。

3.考核指标

技术指标：（项目群考核指标）

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

研制无试制工艺路径创成与工艺参数优化软件 1 套，包含工艺知识建模、工艺路径创成、工艺参数优化、设备控制程序生成等模块。其中：

（1）工艺知识建模模块，工艺知识本体模型涵盖不少

于机加、焊接、装配等 3 大类典型工艺；支持三维模型、工艺文件、控制程序等数据源的自动知识提取¹；生产工艺通用知识库知识量²不少于 5000 条。

（2）工艺路径创成模块，支持铣削、车削、钻孔等不少于 3 类机加工工艺的 30 种制造结构特征识别；可制造性分析规则数不少于 200 条，涵盖机加、焊接、装配等不少于 3 类工艺；支持工艺流程、工艺方法、工艺资源、质量控制点等不少于 4 类关键要素的工艺路径自动规划。

（3）工艺参数优化模块，支持间隙、同心度、同轴度、平行度等不少于 4 类装配误差预测；支持长度、直径、角度等不少于 3 种类型的修调量计算。

（4）设备控制程序生成模块，支持叶片、叶盘、转轴等不少于 3 类零件的三轴 NC 程序自动生成，支持行宽、进给率等不少于 2 类切削参数的优化；支持机加、焊接、装配等不少于 3 类典型工艺的制造任务识别与拆解³，支持梯形图语言、功能块图、结构化文本等 3 种主要编程语言的 PLC 程序自动生成，支持触点使用错误、逻辑条件冲突、状态机设计错误等不少于 3 类主要控制程序错误的识别与修复。

到 2029 年 12 月，完成以下指标：

研制无试制工艺路径创成与工艺参数优化软件 1 套，包

1 知识提取，指从数据源中识别并结构化提取出符合本体模型语义规范的知识要素。

2 知识量，指每一个独立的、完整且不可再分的制造工艺相关知识点为一条知识，如制造工艺要素推理规则、工艺路径评价规则、制造资源模型等内容。

3 制造任务识别与拆解，指对下发的工艺文件进行辨识，并进行工步级任务拆分，形成结构化控制程序辅助生成文件的过程。

含工艺知识建模、工艺路径创成、工艺参数优化、设备控制程序生成等模块。其中：

（5）工艺知识建模模块，生产工艺通用知识库知识量不少于 10000 条。

（6）工艺路径创成模块，支持铣削、车削、钻孔等不少于 3 类机加工工艺的 50 种制造结构特征识别；支持以自然语言描述的生产工艺内容自动生成；工艺路径评价规则涵盖工艺方法可行性、设备与工具适应性、人员技能要求、生产工艺复杂度、制造工时等不少于 5 类。

（7）工艺参数优化模块，支持对关键零部件六自由度装配位姿的最优化求解。

（8）设备控制程序生成模块，支持精度、效率、轨迹平顺度等不少于 3 类刀具路径质量指标评估；支持触点使用错误、逻辑条件冲突、状态机设计错误、数据处理错误、协议解析错误、中断程序设计错误等不少于 6 类主要控制程序错误的识别与修复。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）在 800MW 大型高水头冲击式水电机组配水环管等核心部件进行验证，创成的工艺路径采用率¹≥90%，工艺路

¹ 创成的工艺路径采用率：是指生产工艺自动创成软件生成的工艺要素，被发布的工艺文件采用的比例。自动创成工艺路径采用率 = (发布的工艺文件采用的工艺要素数量/生产工艺自动创成软件生成的工艺要素总数量) × 100%。

径规划周期¹缩短 $\geq 60\%$ ；自动生成控制程序采用率² $\geq 90\%$ ，程序编制周期³缩短 $\geq 60\%$ ；装配验证时间⁴缩短 $\geq 50\%$ 。（项目群考核指标）

到 2029 年 12 月，完成以下指标：

（2）无试制工艺路径创成与工艺参数优化软件技术就绪度（TRL） ≥ 8 级。经实际环境下充分应用与验证，各项指标满足使用要求，连续无故障运行 3 个月。（项目群考核指标）

（3）在 800MW 大型高水头冲击式水电机组进行验证，创成的工艺路径采用率 $\geq 90\%$ ，工艺路径规划周期缩短 $\geq 60\%$ ；自动生成控制程序采用率 $\geq 90\%$ ，程序编制周期缩短 $\geq 60\%$ ；部套装配验证时间缩短 $\geq 50\%$ 。（项目群考核指标）

（4）在水电机组以外不少于 3 个行业的单件定制场景进行验证，推广数量 ≥ 5 套。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2029 年 12 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，作为“支持单件定制模式的敏捷生产管

1 工艺路径规划周期 = 工艺发布时间-工艺开始编制时间。

2 自动生成控制程序采用率：是指控制程序自动生成软件生成的控制指令，被部署的控制程序采用的比例。自动生成控制程序采用率=（部署的控制程序采用的控制指令数量/控制程序自动生成软件生成的控制指令总数量） $\times 100\%$ 。

3 程序编制周期=程序完成并通过人工审核的时间 - 程序编制任务下发时间。

4 装配验证时间：是指基于实际加工的零件，验证部套装配过程干涉、装配精度等所耗费的时间。部套装配验证时间 = 装配验证合格完成时间 - 首个零部件参与装配验证的时间。

控系统”项目群的项目，采用公开竞争方式，项目自由申报，项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为通过 CMMI3 级以上认证、具备工艺创成软件研发及工程实践经验的软件研发企业，应与国内相关科研院所、高等院校、软件应用企业等联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 3.2.4.2：支持设计变更的一体化计划排程软件研制及验证

1.研究目标

单件定制模式下，跨业务域、多层级的项目计划割裂，客户需求、产品设计、工艺迭代、制造执行等多环节变更月均达千次，导致计划失准、响应滞后、资源冲突等问题频发，存在交付延迟风险。针对非标件计划期量不准、高频变更后果量化评估能力弱、多项目计划资源动态协调困难，以及计划可行性分析手段缺乏等难题，突破非标件计划期量精细化

评估、全生命周期变更耦合的计划影响度动态分析、跨域多层级动态计划排程，以及变更场景模拟分析等核心技术，开发计划期量评估、计划影响度分析、跨域多层级动态计划排程、多场景模拟分析等模块，研制支持设计变更的一体化计划排程软件。支撑项目 3.2.1.4 大型水电机组示范工程，并在水电机组以外不少于 3 个行业的单件定制场景进行工程验证和推广，实现项目全生命周期计划分钟级精准排程。

2.研究内容

（1）非标件计划期量精细化评估方法

建立项目“设计—制造—安装”过程多资源关联知识网络，研究长周期工艺期量解析方法，构建支持项目全生命周期变更的非标件计划期量模型，研究多资源耦合与协同约束的期量精细化评估算法，研究支持多工艺路径和替代资源的多因子动态权重“设计—制造—安装”弹性能力推荐策略，研制计划期量评估模块。

（2）全生命周期变更耦合的计划影响度动态分析方法

构建客户需求、工艺、物料、工装、质量、安装等变更表征模型，研究跨计划层级的变更解析技术，建立跨业务域的变更影响传播模型，研究项目全生命周期变更耦合的计划影响度动态评估方法，研究面向“设计—制造—安装”全流程的变更快速响应机制，设计兼顾全局最优与局部敏捷的计划响应策略，研制计划影响度分析模块。

（3）跨域多层次动态计划排程方法

研究“设计—制造—安装”高频变更下关键路径及关键资源动态识别方法，研究关键路径驱动的跨域多层次协同排程机制，研究缓冲时间与缓冲资源的动态配置策略，研究客户优先级、成本、能耗等多目标权衡的关键资源动态分配方法，研究考虑设计、采购、工装、制造、安装和维修等计划的跨部门多层次多约束协同优化方法，研制跨域多层次动态计划排程模块。

（4）变更场景模拟及计划可行性分析技术

研究包含订单变更、技术变更、物料变更、安装变更等变更场景生成方法，研究面向高频变更的仿真推演技术，研究“设计—制造—安装”高频变更下多计划方案对比分析技术，研究订单交付延迟根因定位及因果追溯方法，研究多变更场景模拟预排驱动的关键路径阻塞风险分析技术，研制多场景模拟分析工具。

（5）一体化计划排程软件研制及验证

研发支持设计变更的一体化计划排程软件，在大容量水电机组工程验证，并在水电机组以外不少于3个行业的单件定制场景进行推广。验证内容包括支持设计变更的一体化计划排程软件的非标件计划期量精细化评估、全生命周期变更耦合的计划影响度动态分析、跨域多层次动态计划排程以及计划可行性分析等能力。

3.考核指标

技术指标：（项目群考核指标）

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

研制支持设计变更的一体化计划排程软件 1 套，包含计划期量评估、计划影响度分析、跨域多层级动态计划排程等模块，及多场景模拟分析工具。其中：

（1）计划期量评估模块，长周期工艺期量误差率¹≤30%，形成支持交付周期、成本、质量等不少于 3 种因子的弹性能力推荐策略。

（2）计划影响度分析模块，提供变更模型库 1 个，支持技术变更、物料变更、订单变更、供应链中断、安装变更等不少于 5 种变更类型信息获取，支持交付周期、成本、质量等不少于 3 种目标的变更计划影响度评价，变更信息获取准确率²≥80%，提供变更响应策略≥5 种。

（3）跨域多层级动态计划排程模块，支持关键资源识别误差率³≤25%，支持优先级、成本、能耗等不少于 3 种目标的关键资源动态分配，支持不少于 3 个分厂/车间的协同计划，支持设备、工装夹具、订单、供应链等多约束下的计划协同优化。

1 工艺期量误差率：指期量解析计算值与实际生产期量之间的误差占实际生产期量的比例。计算公式： $\text{工艺期量误差率} = |(\text{期量解析计算值} - \text{实际生产期量})| / \text{实际生产期量} \times 100\%$ 。

2 变更信息获取准确率：指在统计周期内，系统获取变更信息的次数占实际发生的变更总次数的比例。计算公式： $\text{变更信息获取准确率} = \text{系统获取变更信息的次数} / \text{实际发生变更总次数} \times 100\%$ 。

3 关键资源识别误差率：指在统计周期内，系统未正确识别关键资源的次数占实际发生的关键资源总次数的比例。计算公式： $\text{关键资源识别误差率} = (\text{实际发生的关键资源总次数} - \text{关键资源的正确识别次数}) / \text{实际发生的关键资源总次数} \times 100\%$ 。

(4) 多场景模拟分析工具，提供订单变更、技术变更、物料变更等不少于 3 种类型变更生成方法，支持不少于 35 次并发变更事件的仿真推演，支持计划可行性分析图表 ≥ 5 种。

到 2029 年 12 月，完成以下指标：

研制支持设计变更的一体化计划排程软件 1 套，包含计划期量评估、计划影响度分析、跨域多层级动态计划排程等模块，及多场景模拟分析工具。其中：

(5) 计划期量评估模块，长周期工艺期量误差率 $\leq 12\%$ 。

(6) 计划影响度分析模块，变更信息获取准确率 $\geq 99\%$ ，提供变更响应策略 ≥ 8 种。

(7) 跨域多层级动态计划排程模块，支持关键资源识别误差率 $\leq 15\%$ ，支持不少于 5 个分厂/车间的协同计划，支持设备、工装夹具、订单、供应链、安装等多约束下的计划协同优化。

(8) 多场景模拟分析工具，提供订单变更、技术变更、物料变更、供应链中断、安装变更等不少于 5 种类型变更生成方法，支持不少于 50 次并发变更事件的仿真推演，支持计划可行性分析图表 ≥ 8 种。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

(1) 在 800MW 大型高水头冲击式水电机组配水环管等

核心部件进行工程验证，支持周级不少于 3 个工厂/车间联动排程，精度为分钟级。单次排程时长从周级缩短至天级，当月锁定计划可执行率¹≥80%，关键设备利用率²提升≥3%，关键路径阻塞时间³占比≤25%。（项目群考核指标）

到 2029 年 12 月，完成以下指标：

（2）计划排程软件技术就绪度（TRL）≥8 级。经实际环境下充分应用与验证，各项指标满足使用要求，连续无故障运行 3 个月。（项目群考核指标）

（3）在 800MW 大型高水头冲击式水电机组进行验证，支持周级不少于 5 个工厂/车间联动排程，精度为分钟级。单次排程时长从周级缩短至小时级，当月锁定计划可执行率≥90%，关键设备利用率提升≥5%，关键路径阻塞时间占比≤15%。（项目群考核指标）

（4）在水电机组以外不少于 3 个行业的单件场景进行工程验证，推广数量≥5 套。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2029 年 12 月。

1 当月锁定计划可执行率：是指在一个自然月内，已确认且不可变更的生产计划（锁定计划）中，实际按计划要求（如时间、数量、质量等）完成任务或工单数量占锁定计划总任务或工单数量的百分比。计算公式：当月锁定计划可执行率 =（实际按时完成且符合要求的锁定任务数 / 当月锁定计划总任务数）× 100%。

2 关键设备利用率：指在统计周期内，衡量关键设备有效工作时间占其理论最大可用时间的比例。计算公式：关键设备利用率 =（关键设备有效加工时间 / 理论最大可用时间）× 100%。

3 关键路径阻塞时间：指在统计周期内，关键路径上包括设备故障、物料短缺、人员等待、工序间排队等导致的延误时间。关键路径阻塞时间占比 =（设备故障时间 + 物料短缺时间 + 人员等待时间 + 工序间排队时间）/ 总生产制造时间 × 100%。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目,作为“支持单件定制模式的敏捷生产管控系统”项目群的项目,采用公开竞争方式,项目自由申报,项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类: 重大共性关键技术。

其他来源资金(包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金)与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式: 事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为通过 CMMI3 级以上认证、具备计划排程软件研发及工程实践经验的软件企业,应与国内相关科研院所、高等院校、软件应用企业等联合申报,申报联合体应具备较强的专业研发团队,以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

(三) 过程工业全流程优化系统

项目 3.3.2.4: 石化生产全链条计划排产软件研制及验证

1.研究目标

针对石化生产全链条计划排产中存在的多环节、多时间尺度协同难、小批量多品种化学品生产过程切换频繁等问题,突破跨链条生产计划协同建模与多时间尺度协同优化技术,开展石化长链条生产计划模型库、跨链条耦合生产计划

建模技术、多时间尺度可变周期任务分解与协同优化、小批量多品种化学品计划排产技术等研究，研制石化生产全链条计划排产软件，在具备炼油、化工生产链条的石化企业进行应用验证，实现从原油到终端产品的全链条生产计划智能优化。

2.研究内容

（1）石化生产长链条生产计划模型库

针对典型石化生产链条，包括“原油加工—乙烯裂解—聚烯烃装置—工程塑料”以及“原油加工—催化重整—芳烃装置—聚酯纤维”，研究原料性质、加工方案、操作条件对长链条多品种化学品收率 and 产品性能的影响机制，建立生产计划模型库。研究基于分层建模体系的模型库架构，构建炼油、化工和聚合等单元级子模型库和长链条集成模型库。

（2）原料跨链条生产协同计划优化技术

构建“炼油—化工—工程塑料—聚酯纤维”多产业链协同计划模型框架，实现从原料采购到多品种化学品出厂的全链条计划高效衔接；以整体效益最优为目标，基于装置特性与过程机理，开发约束参数动态可调整的生产排产模型，实现跨装置、跨工序的协同优化，确保资源高效配置与生产效益最大化。

（3）多时间尺度可变周期任务协同计划优化技术

综合考虑原料采购成本、装置能耗、产品附加值和碳排

放等多维优化目标，实现原料采购到多品种化学品出厂的全产业链最优生产经营计划自动编排；研究面向多时间尺度可变周期的混合整数非线性规划求解策略，支持从季度到月度计划的全周期任务协同。

（4）小批量多品种化学品生产计划排产技术

针对小批量多品种化学品牌号种类多、需求不确定性大、生产切换频繁等问题，研究基于工艺机理和历史数据的生产切换数据预测方法，构建生产切换过程矩阵数据库；研究生产切换次序表征、切换时间表征和切换效益表征方法，建立基于混合时间的多产品排产模型，研究混合整数线性规划求解策略，实现以价值最大化为目标的柔性排产优化技术。

（5）石化生产全链条计划排产软件

研发石化生产全链条计划排产软件，包含长链条生产计划模型库，跨链条生产计划模型生成模块、小批量多品种计划排产，混合整数线性与混合整数非线性优化求解模块，实现石化生产全链条排产优化，排产结果包含原料选择与采购、装置加工方案、产品配置、库存管理等。软件在石化化工企业应用验证。

（6）全链条计划排产软件熟化和推广应用

熟化全链条生产计划智能排产功能模块、适配石化行业长链条、跨链条计划排产特点，优化月、旬、周多时间尺度

协同排产模块，迭代小批量多品种化学品计划排产模块，提升产量误差率预测性能和决策效率，满足不同类型企业的高效排产要求。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）研发石化生产全链条计划排产软件，软件具有自主知识产权。

（2）支持高附加值产品生产计划排产，包括“炼油—乙烯—树脂”长链条排产（汽油、航煤、柴油、乙烯、聚乙烯等高附加值产品 ≥ 10 类）、“炼油—芳烃—纤维”长链条排产（汽油、航煤、柴油、对二甲苯、对苯二甲酸、聚酯纤维等高附加值产品 ≥ 10 类）、多链条协同排产（跨生产链数量 ≥ 2 条，链条交互的流股数 ≥ 10 条）。

（3）长链条排产、跨链条协同排产的决策时间¹ $\leq 2h$ （非线性约束 ≥ 10000 个，决策变量 ≥ 20000 个，整数变量 ≥ 100 个）；支持季、月多时间尺度计划动态调整。

（4）支持多品种化学品（品种数量 ≥ 100 种）计划排产；决策时间 $\leq 15min$ （决策变量 ≥ 30000 个，整数变量 ≥ 200 个），满足“石油化工资源能源集约生产协同优化系统解决方案”项目群中项目 4.4.3.1“石化 ‘资源—能源’协同优化系统研制及

¹ 决策时间指排产模型求解时间，对标美国 BARON 求解器，目标值 2h。

示范工程”技术要求。（项目群考核指标）

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）石化生产全链条计划排产软件产品技术就绪度（TRL） ≥ 8 级，经实际环境下充分适用，各项指标满足使用要求。

（2）完成“炼油—乙烯/芳烃—下游化学品”长链条生产经营计划决策优化编排；在大型炼化企业（炼油产能 ≥ 1500 万吨/年）进行应用验证，系统稳定运行时间 ≥ 3 个月。

（3）在“石油化工资源能源集约生产协同优化系统解决方案”项目群中项目 4.4.3.1“石化‘资源—能源’协同优化系统研制及示范工程”承担单位指定的计划排产业务系统部署，排产方案与实际产量对比，汽油、煤油、柴油、丙烯、对二甲苯、聚丙烯、苯乙烯等高附加值产量误差率¹ $\leq 3\%$ 。（项目群考核指标）

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（4）完成推广应用的全链条计划排产软件数量 ≥ 2 套。在应用企业的计划排产业务系统部署，排产方案与实际产量对比，汽油、煤油、柴油、丙烯、对二甲苯、聚丙烯、苯乙烯等高附加值产量误差率 $\leq 3\%$ 。

4.实施期限

¹ 产量误差率=|模型预测产量-实际产量|/实际产量 $\times 100\%$ ，基线值 5%，目标值 3%，误差降低 40%。

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目,作为“石油化工资源能源集约生产协同优化系统解决方案”项目群的项目,采用公开竞争方式,项目自由申报,项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类: 重大共性关键技术。

其他来源资金(包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金)与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式: 事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备石化生产计划排产软件开发优势的软件企业、国家技术创新中心或软件用户,应与国内相关科研院所、高等院校、实施类单位等联合申报,申报联合体应具备较强的专业研发团队,以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 3.3.2.5: 石化生产跨工序协同调度软件研制及验证

1.研究目标

针对石化行业全流程生产过程波动和原料产品市场不确定性,导致生产方案频繁切换、高附加值产品调度响应滞后等问题,突破多工序调度模型构建、跨工序分解协同和优

化算法等关键技术；开展事件驱动的单工序调度模型、多工序全流程调度模型、基于工序分解协调的调度算法研究；研发知识驱动的调度方案快速生成策略，研制石化生产跨工序协同调度软件；在石化企业开展应用验证。

2.研究内容

（1）单工序调度模型库

研究单工序产品收率和质量精准预测模型，综合考虑计划任务、原料性质、加工方案、需求变动、罐存调配等事件，构建炼油、化工、塑料、纤维等不同工艺流程下单工序的事件库和非线性调度模型库。

（2）全流程调度排产模拟器

研究含炼油、化工、塑料、纤维多工序全流程调度模拟技术，研究多时间尺度下不同工序调度模型聚合与线性化策略，研究突发事件触发下全流程调度敏捷响应机制，研究设备、产线、订单、库存、物料等多约束平衡下全流程动态调度模拟器。

（3）基于工序分解协调的调度优化引擎

研究多任务多约束条件下全流程调度优化技术，研究包括原料接卸、原料混配、物料走向、产品调合、罐区收付、小批量多牌号产品排程等多工序的分解协调和优化策略，研发复杂非线性调度优化模型的快速求解引擎。

（4）知识驱动的调度方案快速生成

研究高维动态决策场景下，涵盖质量标准、工艺规范、流程特征、操作规程、调度经验等多学科知识规则库，开发领域知识驱动的多工序全流程调度技术，研究非计划事件下的应急调度方案快速生成策略。

（5）跨工序协同调度软件

研发调度决策软件整体架构，适配上述模型库、事件库、知识库、全流程调度模型、优化策略等模块的集成调用需求；开发外部接口模块，实现包含计划任务、原料采购、原料装卸、生产状态、罐区状态、产品需求等调度敏感信息的实时采集与整合；开发调度方案发布模块，实现调度方案推送、执行进度可视化监控等功能，形成适用于跨工序石化生产过程的调度软件；实现典型石化化工行业应用验证。

（6）跨工序协同调度软件熟化和推广应用

熟化单工序调度和跨工序全流程调度功能模块，研究适用于油化塑纤多工序石化生产过程的调度敏捷决策解决方案，支持工厂级、产线级、装置级多层级排产调度优化决策，丰富调度优化和应急决策模块功能，提升调度排产效率和决策优化性能。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成如下指标：

（1）研发石化生产跨工序协同调度软件，软件具有自

主知识产权。

(2) 石化生产跨工序协同调度软件，具备图形化建模、排产排程仿真和优化功能，支持混合整数非线性优化和知识驱动的调度优化求解；具备基于滚动优化策略和事件驱动的调度排产功能，支持旬/周/天多时间尺度的调度优化，支撑高附加值产品结构动态优化调配。

(3) 构建多任务多周期调度求解算法库，集成包括元启发算法、强化学习、分布递归、分枝定界等不少于 5 种优化算法。

(4) 开发炼油、化工等领域的装置级调度模型¹模块，数量 ≥ 50 个，建立涵盖原油、中间物料、成品储罐、料仓等关键物料仓储模型库，实例 ≥ 20 个；企业级生产调度模型样例 2 个，各包含原油收储、不少于 2 套常减压和 20 套二次加工等装置。

(5) 开发生产事件定义 ≥ 500 种，在物料走向方面，覆盖原油、石脑油、蜡油、渣油等不少于 10 种物料的走向分配事件，支撑成品油、烯烃、芳烃等高附加值产品结构优化；在装置停工方面，包含催化重整、催化裂化、加氢裂化、渣油加氢、延迟焦化、汽柴油加氢等不少于 6 套核心装置停工事件，支撑平稳生产。

工程化指标：

¹ 装置级调度模型：炼油例如：常减压、催化裂化、加氢裂化、延迟焦化、催化重整等装置，化工例如：PX、PTA、苯乙烯、聚酯等装置。

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）软件产品技术就绪度（TRL）≥8 级，经实际环境下充分适用，各项指标满足使用要求。

（2）在本专项“石油化工资源能源集约生产协同优化系统解决方案”项目群中项目 4.4.3.1“石化‘资源—能源’协同优化系统研制及示范工程”承担单位指定的生产调度业务系统部署，提升调度排产效率，缩短旬/周调度方案的排产时间≥50%¹；减少调度方案切换次数²，降幅≥20%；提升计划任务执行率³，增幅≥5%；系统稳定运行时间累计≥3 个月。（项目群考核指标）

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（3）完成推广应用的石化生产跨工序协同调度软件数量≥3 套。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，作为“石油化工资源能源集约生产协同优化系统解决方案”项目群的项目，采用公开竞争方式，项目

1 调度排产时间=开始排产到形成可执行方案的起始时间，对标 Aspen petroleum Scheduler 软件，基线值 8h，目标值 4h。

2 调度方案切换次数指单位时间内生产方案和物料走向变更次数，基线值 10 次/月，目标值 8 次/月。

3 计划任务执行率指在实际生产执行与月度计划的一致性程度，基线值 90%，目标值 95%以上。计算公式为：

$$\left(\sum \left(1 - \frac{|\text{某产品产量} - \text{该产品计划产量}|}{\text{该产品计划产量}} \right) / \text{产品种类数} \right) \times 100\%$$

自由申报，项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.25:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备石化生产调度软件开发优势的软件企业、国家技术创新中心或软件用户，应与高等院校、科研院所、实施类单位等联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

四、中试验证平台与行业解决方案

（一）中试验证技术与平台

项目 4.1.1.2：轨道交通装备典型制造工艺机器人中试平台

1.研究目标

针对轨道交通装备制造中机器人加工质量保证难、移植性差、工艺适配性验证不足、可靠性缺乏测试等问题，突破工业机器人与典型工艺的集成优化、机器人系统工艺适配性测评技术，开展中试平台架构与测评体系、机器人与典型制造工艺集成、基于数字孪生的虚拟化测评、机器人系统性能与可靠性测评技术研究，构建轨道交通装备典型工艺机器人

中试平台，打造轨道交通行业典型工艺验证和熟化、国产机器人应用验证等中试验证公共服务能力。

2.研究内容

（1）典型制造工艺机器人中试平台架构与测评体系

面向轨道交通装备焊接、打磨、装配、再制造、检测、探伤等典型工艺中试需求，研究建立涵盖基础设施建设、数据管理、工艺验证、装备测评与运营服务的典型制造工艺机器人中试平台架构与规范体系；基于国内轨道交通装备制造先进特色工艺，研究国内外机器人系统的对比测评方法，建立机器人系统虚拟化测评、实体性能测评及可靠性测评等多维度指标评价体系。

（2）机器人与轨道交通装备制造工艺集成技术

研究不同品牌机器人与末端执行器硬件连接、控制信号与传感器数据协议适配方法，形成中试平台标准化软硬件接口；研究工艺参数智能匹配策略和工艺路径规划方法，开展机器人与典型工艺集成应用，形成面向典型部件与结构的焊接、打磨、装配等场景工艺包，支撑机器人系统工艺适配性与可行性验证；研究机器人系统制造工艺加工程序自动生成及跨厂家程序适配方法，研制中试平台机器人系统通用编程平台，支撑机器人系统进行快速工艺测试。

（3）基于数字孪生的虚拟化测评技术

研究机器人系统视觉重构技术和基于特征驱动的虚拟

可视化方法，构建柔性可重构的虚拟工艺场景；研究机器人等装备的虚实映射方法，构建数字孪生模型，实现虚拟环境与物理平台之间数据的有效协同，支撑机器人系统潜在故障预测；研究典型场景机器人系统虚拟化测评方法，构建轨迹可达性、节拍偏差、环境影响评估等测评模型，研制具备极端工况模拟、异常场景注入的数实融合验证平台，支撑焊接、打磨等工艺的虚拟测评，加快机器人系统测评速度。

（4）机器人系统性能与可靠性测评技术

面向焊接、打磨、装配等实际工艺场景，研究机器人系统焊缝轨迹跟踪精度、装配力/力矩控制测试精度等性能指标检测方法，研制机器人系统性能测评工具；研究机器人系统在变负载、高频启停与多任务切换等复杂工况下的关键部件失效机理，构建加速寿命模型，分析机器人系统性能退化规律；研究基于失效物理的可靠性分析方法，研制可靠性测评系统，开展典型工艺下国内外机器人系统连续运行精度保持性等可靠性指标对比测试，并提出可靠性优化建议。

（5）典型制造工艺机器人中试平台构建与验证

建设涵盖轨道交通装备焊接、打磨、装配、再制造、检测、探伤等工艺场景，研究柔性工装夹具及高效切换方法，支撑典型部件制造中机器人系统在各类工艺下的可行性验证；研究机器人系统工艺适配测试、数据采集与应用、性能测评与加工工艺优化等集成方法，构建支撑工艺适配性、装

备性能及可靠性测评的中试平台；开展典型工艺机器人中试应用验证，面向轨道交通行业装备制造提供典型工艺验证与熟化、国产机器人应用验证等公共服务。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）面向轨道交通装备典型部件与结构的焊接、打磨、装配、再制造等场景的机器人系统工艺包 ≥ 12 个。

（2）面向典型工艺的机器人系统数实融合验证平台 1 套，支持 PLC、机器人、执行器等不少于 20 种类型设备虚拟映射与分布式集成验证，虚实数据同步时间差 $\leq 200\text{ms}$ ；具备环境干扰、设备故障等不少于 10 种异常场景注入功能，支持对机器人系统进行鲁棒性测试，故障预测及健康状态模型评估准确率不低于 95%；支持机器人轨迹可达性、节拍偏差、运行稳定性、工艺切换适配率、环境影响评估等不少于 5 项测试指标验证。

（3）轨道交通装备典型制造工艺机器人中试平台，构建轨道交通装备焊接、打磨、装配、再制造、检测、探伤等不少于 6 种典型工艺中试场景，柔性工装夹具切换时间 $\leq 2\text{min}$ ；形成中试验证用例不少于 6 类；

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（4）面向典型工艺的机器人系统性能测试工具 ≥ 10 个，

支持焊缝轨迹跟踪测试精度优于 $\pm 0.2\text{mm}$ 、重复定位测试精度优于 $\pm 0.01\text{mm}$ 、装配力/力矩控制测试精度优于 1%F.S.（满量程），并支持焊接速度、末端工具绝对定位精度、位置超调量测试、调节时间、负载能力测试、响应时间、碰撞安全等指标测试验证。

（5）面向典型工艺的机器人系统可靠性测评系统 1 套，负载加载稳定性精度优于 1%F.S.，支持连续运行精度保持性测试，运行位置测试精度优于 0.05mm ，连续测量时间不低于 8h。

（6）轨道交通装备典型制造工艺机器人中试平台，具备不规则焊缝的识别精度优于 $\pm 0.2\text{mm}$ ，实现焊接返修率降低至 1%；具备焊缝余高测量精度优于 $\pm 0.05\text{mm}$ ，实现机器人系统打磨焊缝余高误差优于 $\pm 0.5\text{mm}$ ；具备关键承载部件再制造形位测量精度优于 $\pm 0.05\text{mm}$ ，实现机器人系统再制造精度偏差优于 $\pm 0.5\text{mm}$ ；实现关键承载部件自动上料装配一次性合格率优于 95%，支持毫米级间隙范围装配精度中试验证。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）支撑 CR450 等型号高速列车车体不规则空间曲面焊接、转向架复杂曲面焊缝精细化打磨、关键承载部件再制造、关键承载部件自动上料装配等制造工艺中试验证。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

(2) 轨道交通装备典型制造工艺机器人中试平台技术就绪度 (TRL) ≥ 8 级, 中试平台测试验证的典型工艺, 经小批量生产和实际环境下充分使用, 累计运行时间不低于 3 个月, 获得轨道交通行业主机厂认可。

(3) 为不少于 3 家轨道交通行业主机厂提供工艺验证服务, 为不少于 4 家国内机器人厂家开展装备工艺适配性与集成应用测试, 支持对采用国产操作系统的机器人系统开展中试。

(4) 构建面向轨道交通装备制造企业的机器人系统和制造工艺推广应用机制, 形成不少于 6 套轨道交通装备制造工艺规范与测试大纲。

(5) 轨道交通装备典型制造工艺机器人中试技术相关国家/行业标准 ≥ 1 项。(通过标准立项)

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目, 采用面向中国中车集团有限公司定向择优方式。

所属创新分类: 重大共性关键技术。

其他来源资金(包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金)与中央财政资金比例原则上不低于 3.5:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备轨道交通装备典型制造工艺机器人研发或集成应用优势的新型研发机构或企业，具备行业服务以及推广应用能力，并取得中国中车集团有限公司书面授权作为本项目牵头申报单位。牵头申报单位应与国内相关主机制造企业、科研院所、高等院校等联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 4.1.2.1：面向钢铁典型工艺的国产高端可编程控制器中试验证平台

1.研究目标

钢铁生产工艺复杂，动态响应速度和控制精度要求极高，针对国产品牌高端可编程控制器在钢铁行业难以进入核心控制业务的问题，以控制要求高、中试验证场景丰富的热轧、冷轧、平整等轧制过程为对象，研究可编程控制器平均无故障运行时间、通信周期、响应时间、抗干扰能力等关键性能测试方法，开发逻辑顺序控制、液压伺服控制、带钢尺寸控制等轧制过程专用工艺控制软件包，构建适用于多品牌、多类型国产高端可编程控制器的钢铁典型轧制工艺验证环境，验证可编程控制器在连续运行条件下的稳定性、可靠

性，形成面向国产高端可编程控制器的中试验证服务能力，解决国产控制器在钢铁生产过程应用的熟化问题。

2.研究内容

（1）钢铁轧制过程国产高端可编程控制器关键性能测试方法

研究网络拓扑模拟、负载模拟、故障注入、冗余切换等测试环境模拟技术，研究可编程控制器控制规模、多任务实时调度能力、控制响应时间、平均无故障运行时间、平均故障修复时间、通信周期、扫描周期等通用性能指标测试技术，研究轧制工艺条件下逻辑控制、轧制力、辊缝、带钢尺寸、张力等工艺性能测试技术，研制面向国产高端可编程控制器的综合性能测试工具集。

（2）面向多品牌、多类型可编程控制器应用的轧制过程工艺控制技术

研究钢铁热轧、冷轧、平整等轧制过程中专用的逻辑顺序控制、主辅传动控制、高精度液压伺服轧制力/辊缝控制、带钢尺寸控制、张力控制、模拟轧制等关键工艺控制技术，开发适用于多品牌、多类型国产可编程控制器的轧制过程工艺控制软件包，实现变工况、强干扰等状态下轧制过程关键质量指标的高精度控制。

（3）钢铁典型轧制过程国产高端可编程控制器中试验证平台

结合轧制生产和控制系统软硬件需求，设计适用于中试验证的典型轧制工艺、装备和控制系统架构，构建轧制过程逻辑顺序控制、传动控制和尺寸控制等工艺控制场景和测试用例。研究不同类型控制器硬件连接、控制信号与通信协议等适配方法，集成平均无故障运行时间、通信周期、故障注入、控制响应时间等控制器性能测试工具，构建适用于多品牌、多类型国产高端可编程控制器的中试验证平台。

（4）国产高端可编程控制器中试验证与熟化

研究轧制过程数据采集与应用、控制性能测评与反馈优化等集成方法，支撑国产控制器工艺适配性、控制性能及可靠性测试。研究无负载轧制技术和有负载轧制技术，进行长时间轧制运行测试和薄带钢高速轧制，形成钢铁轧制过程国产高端可编程控制器中试验证工艺规范，实现国产控制器在钢铁轧制过程的工业级应用。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）面向钢铁轧制过程的国产高端可编程控制器综合性能测试工具集 1 套，提供不少于 10 个测试工具，涵盖网络拓扑负载模拟、故障注入、入侵与攻击等。

（2）形成适用于多品牌、多类型可编程控制器应用的热轧、冷轧、平整等轧制过程工艺控制软件包 1 套，具备逻

辑顺序控制、工艺控制、质量指标控制、模拟轧制、数据通信和人机交互界面等功能。

（3）面向钢铁典型轧制的国产高端可编程控制器工艺中试验验证平台，提供不少于 6 个国产高端可编程控制器中试验验证测试用例，涵盖逻辑顺序控制、传动控制、高精度液压伺服控制、带钢尺寸控制、模拟轧制等场景。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（4）形成钢铁轧制过程国产高端可编程控制器中试验验证工艺规范 1 套，包括无负载轧制模式和有负载轧制模式。无负载轧制模式下，传动、液压和工艺润滑等系统正常运行，模拟带钢轧制运行 100h 以上，测试控制器在辊缝自动调零、升降速轧制和各类生产故障等条件下的运行状态；有负载轧制模式下，轧制钢卷 10 卷以上并完成 0.2mm 薄带钢高速轧制。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）面向钢铁典型轧制过程的国产高端可编程控制器中试验验证平台，具备每年 20 万吨以上带钢生产能力，最小轧制厚度 0.2mm，最大轧制宽度 1200mm，最高轧制速度 500m/min，可组织连续测试和规模化生产，支持大型可编程逻辑控制器控制规模、安全防护、平均无故障运行时间等指标验证，支持应用可靠性、计算任务实时性等指标验证。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（2）中试验证平台技术就绪度（TRL） ≥ 8 级，经实际环境下充分应用与验证，累计运行时间不低于 3 个月，各项指标满足使用要求。

（3）完成不少于 2 个厂家的国产高端可编程控制器中试验证，形成中试验证公共服务能力。

4.实施期限

本项目为 2024 年未部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，采用公开竞争方式。

所属创新分类：重大共性关键技术。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.5:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事前补助。

6.申报条件

牵头单位应为可编程控制器广泛应用的大型钢铁企业，应与高等院校、科研院所、可编程控制器研发企业、钢铁企业等联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家，下设课题不超过 5 个。

（二）新能源汽车高效柔性制造系统解决方案与示范工

程

项目群二：新能源汽车高效焊装柔性制造系统解决方案

1.设立目标

项目群聚焦解决新能源汽车行业焊装高节拍生产需求，开展关键装备、软件的研制与验证，同步开展系统集成和工程化示范，将新能源汽车焊装高效柔性制造能力提高到国际领先水平。项目群各项目相对独立，可形成系列化产品，具备良好的推广应用价值。

2.项目群构成

本项目群包含 4 个项目：项目 4.3.2.1“新能源汽车机器人高效焊装柔性制造系统研制与示范工程”（示范工程项目）、项目 1.1.1.3“异质材料高性能连接工艺智能设计软件研发及验证”（产品研发项目）、项目 1.3.2.1“面向汽车制造典型工艺的作业智能模型系统研发及验证”（产品研发项目）、项目 2.1.1.2（产品研发项目）。

项目 1.1.1.3、1.3.2.1、2.1.1.2 分别研制高性能连接工艺设计软件、机器人作业工艺轨迹模型、200kg 级焊装机器人，项目 4.3.2.1 结合新能源汽车焊装高节拍需求，集成项目 1.1.1.3、1.3.2.1、2.1.1.2 的装备与软件，搭建生产线进行工程示范。由项目 4.3.2.1 作为主项目。群内项目既要完成项目群任务目标，又要完成本项目任务目标。

3.考核指标

(1) 研制 1 条新能源汽车机器人焊装高节拍生产线，生产节拍 $\leq 39s^1$ ，产线工艺质量优化周期²缩短 30%以上，在焊装车间关键区域应用点焊、涂胶、上下料等国产工业机器人不少于 100 台。

(2) 连接（点焊/铆接）工艺参数首次导入一次合格率 $\geq 95\%$ 。

(3) 支持至少 6 台机器人同时进行节拍最优的轨迹规划，单机器人节拍最优轨迹自主规划时间 $\leq 15min$ ，60 个工作点多机器人节拍最优轨迹自主规划时间 $\leq 400min$ ，节拍仿真准确率 $\geq 95\%$ 。

(4) 200kg 级焊装机器人的最大直线运动速度不小于 3m/s，末端最大加速度 $\geq 2g$ ，标准门型运动测试的时间 $\leq 4.1s$ ，机器人平均单点焊接时间 $\leq 2s$ 。

4.组织方式

项目群采用链主制，由主项目牵头承担单位担任链主，公开竞争择优遴选链主及项目承担单位。各项目均自由申报，确定承担单位后组成项目群，在链主单位组织下，共同支撑群目标实现。

项目群采用群/项目二级管理方式。在群层面，各项目承担单位需与链主单位明确项目群目标、指标，并纳入项目任务书考核指标；在项目层面，按照常规项目实施管理，各项

¹ 基线值，生产节拍为 50—60s。

² 工艺质量优化周期，指从工艺参数导入焊接第一台车，到车身焊接质量达到客户要求的总时间周期。基线值：2 个月。

目须完成本项目指南提出的全部研究内容和考核指标。

项目 4.3.2.1：新能源汽车机器人高效焊装柔性制造系统 研制与示范工程

1.研究目标

针对现有新能源汽车车型订单激增与焊装线产能提升响应慢、焊装机器人等核心装备安全可控的问题，突破高速高精度输送、高速同步控制等关键技术，研制高节拍产线工艺规划知识平台、通用装备和专用装备、精准协同管控技术、焊接机器人及工艺设备测试验证平台，应用国产焊接机器人、连接工艺开发软件、机器人柔性制造工艺轨迹模型，形成新能源汽车机器人焊装高节拍生产线解决方案，实现焊装生产节拍由 50—60s 缩短至 39s 以内，打造国际领先的新能源汽车机器人焊装高节拍生产线。

2.研究内容

（1）高节拍产线工艺规划

应用项目 1.1.1.3 开发的异质材料连接工艺开发软件和 1.3.2.1 开发的机器人柔性制造工艺轨迹模型，研究高节拍的工艺和物流布局优化、高密度多机多工序协同规划技术、工位间高速传输和非工艺时间消减的平衡调度技术，形成适用于高节拍焊装产线的多要素集成知识平台。

（2）高速高精输送与工装动作技术

研究超高速输送的动力驱动技术，建立电机动态性能优

化模型；研究超高速输送的自适应自动高精定位技术，解析动态误差补偿机制，搭建实时调控系统，减少产线输送非工艺时间；研究工装设备高精定位技术及其新型机构，分析机构的结构力学特征，构建优化设计模型；研究工装设备及其内部夹紧机构的高速驱动与动作技术，解析夹紧力传递机制，开发快速响应驱动系统，缩短工装设备非工艺时间。

（3）分布式高速同步与协同技术

研究保障焊装产线各环节高速精准协同的控制技术、确保生产时序精准把控的高速追踪控制技术、输送与工艺设备高速精准并行协同工作的视觉引导控制技术，实现高节拍下机器人及工装设备的协同精准控制。研究分布式控制方式，开发工装设备边缘控制器，实现高速高精控制。

（4）面向高节拍产线的精准协同管控技术

研究网络资源约束下的高节拍产线大容量数据高速获取机制及全要素数据链构建方法，实现数据精准同步与实时映射；研究焊接工艺参数与质量缺陷间的多层级耦合映射关系建模机理，研制小样本下高节拍产线质量诊断评估模型；研究产线高速高负载下的机器人、输送辊床、焊枪焊机等关键设备的失效机理，研制关键设备高性能故障预测模型。

（5）焊接机器人及工艺设备测试验证

研究新能源汽车焊接机器人虚实融合验证方法及系统、基于典型工艺质量分析的焊接机器人反馈验证与优化技术、

焊接机器人可靠性和性能保持性验证及评价方法，形成新能源汽车高速产线焊接机器人及工艺设备的应用测试验证体系。针对项目 2.1.1.2 研制的 200kg 级焊装机器人制定测试大纲，并开展满足高节拍焊装的关键技术指标测试。

（6）新能源汽车机器人焊装高节拍解决方案

依托高效工艺规划、高速同步控制、高速产线管控等技术，集成项目 2.1.1.2 研制的 200kg 级焊装机器人等关键装备，形成可复制推广的新能源汽车机器人焊装高节拍解决方案，在国内车企焊装车间关键区域进行应用示范，打造国际领先的新能源汽车焊装高节拍生产线。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）高节拍产线工艺规划，支撑工艺质量优化周期缩短 30%以上。

（2）高速台车输送系统负载 $\geq 1000\text{kg}$ ，速度 $\geq 2.5\text{m/s}$ ，加速度 $\geq 2\text{m/s}^2$ ，重复定位误差优于 $\pm 0.1\text{mm}$ ，输送节拍¹（6m 间距） $\leq 3.5\text{s}$ 。

（3）高节拍控制设备同步运动控制周期 $\leq 12\text{ms}$ ，同步速度 $\geq 1\text{m/s}$ ，同步跟随误差 $\leq 1\text{mm}$ ；视觉引导抓件精度优于 $\pm 0.5\text{mm}$ ，抓取循环节拍 $\leq 20\text{s}$ 。

¹ 输送节拍=工位间距（6m）/平均输送速度。基线值：输送节拍（6m 间距）6—8s。

(4) 新能源汽车焊装工艺实际工况验证场景，工艺场景种类 ≥ 3 种（点焊、涂胶、上下料等工艺场景），具备焊接机器人与不少于3类工艺设备的数字孪生调试与评价能力；形成1套机器人焊装工艺实现性、机器人本体及应用体系指标，开发应用测评模型，建立工艺、易用性、维修性、安全性、数字化等不少于9个维度的测评体系和测评方法。

到2028年10月，完成以下指标：

(5) 研制精准协同管控模块，关键设备故障误判率和漏判率均不大于10%，焊点质量误判率和漏判率均不大于5%。

工程化指标：

到2027年12月，完成以下指标：

(1) 研发新能源汽车机器人焊装高节拍生产线解决方案，围绕整车焊装应用场景开展解决方案应用验证，集成项目1.1.1.3、项目1.3.2.1、项目2.1.1.2研制的高性能连接设计软件、机器人作业工艺轨迹模型、200kg级焊装机器人，建成1条新能源汽车焊装高节拍生产线，在焊装车间应用点焊、涂胶、上下料等国产工业机器人不少于100台。

到2028年10月，完成以下指标：

(2) 新能源汽车焊装高节拍生产线，支撑新能源汽车焊装高节拍生产线生产节拍 $\leq 39s$ ，非工艺时间 $\leq 6s$ ，工艺机器

人平均有效利用率¹≥75%，综合开动率²≥85%，焊接合格率≥99.5%。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，作为“新能源汽车高效焊装柔性制造系统解决方案”项目群的主项目，采用公开竞争方式，项目自由申报，项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类：应用示范研究。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.5:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事后补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为新能源汽车制造企业，应与国内相关汽车焊装生产线研制企业、高等院校、科研院所等联合申报，申报联合体应拥有汽车焊装高节拍生产线开发经验，并具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

1 工艺机器人平均有效利用率=实际运行时间/生产节拍×100%。基线值：在生产节拍<39s，工艺机器人平均有效利用率<60%。

2 产线综合开动率=时间开动率×性能开动率×合格品率。基线值：在生产节拍 50—60s 情况下，产线综合开动率 85%。

项目群三：新能源汽车高质量涂装柔性制造系统解决方案

1.设立目标

项目群聚焦解决装备安全可控和涂装质量控制均质化水平低的重大问题，开展关键装备、软件的研制与验证，同步开展系统集成和工程化示范，将新能源汽车涂装提高到国际先进水平。项目群各项目相对独立，可形成系列化产品，具备良好的推广应用价值。

2.项目群构成

本项目群包含 3 个项目：项目 4.3.2.2“新能源汽车机器人高质量涂装柔性制造系统研制与示范工程”（示范工程项目）、项目 1.1.1.6“多车型混线涂装工艺仿真软件研发及验证”（产品研发项目）、项目 2.2.1.2“汽车油漆表面缺陷在线智能检测装备研制及验证”（产品研发项目）。

项目 1.1.1.6、2.2.1.2 分别研制多车型混线涂装工艺仿真软件、汽车油漆表面缺陷在线智能检测装备，项目 4.3.2.2 结合新能源汽车涂装高质量需求，集成项目 1.1.1.6、2.2.1.2 的软件和装备，以及本专项 2024 年度已部署项目 1.1 研制的防爆型喷涂机器人，搭建生产线进行工程示范。由项目 4.3.2.2 作为主项目。群内项目既要完成项目群任务目标，又要完成本项目任务目标。

3.考核指标

(1) 建设 1 条新能源汽车车身涂装生产线，色漆膜厚均匀度优于 $\pm 2\mu\text{m}$ 、清漆膜厚均匀度优于 $\pm 5\mu\text{m}$ ，产线工艺质量优化周期¹缩短 30%以上，在涂装车间关键区域应用喷涂、涂胶、检测等国产工业机器人不少于 20 台，应用国产漆面质量在线智能检测装备不少于 2 台。

(2) 汽车油漆表面缺陷在线智能检测装备，缺陷检出率 $\geq 99\%$ 、误检率 $\leq 1\%$ 、分类正确率 $\geq 95\%$ ，缺陷区域三维形貌测量精度优于 $1\mu\text{m}$ ，缺陷定位精度优于 3mm。在包括“新能源汽车机器人高质量涂装柔性制造系统研制与示范工程”项目承担单位在内的企业，应用不少于 20 套系统。

(3) 应用多车型混线涂装工艺仿真软件，实现漆膜厚度达标率不低于 90%，烘干曲线达标率不低于 95%。

4.组织方式

项目群采用链主制，由主项目牵头承担单位担任链主，公开竞争择优遴选链主及项目承担单位。各项目均自由申报，确定承担单位后组成项目群，在链主单位组织下，共同支撑群目标实现。

项目群采用群/项目二级管理方式。在群层面，各项目承担单位需与链主单位明确项目群目标、指标，并纳入项目任务书考核指标；在项目层面，按照常规项目实施管理，各项目须完成本项目指南提出的全部研究内容和考核指标。

¹ 产线工艺质量优化周期，指设备安装完成到工艺质量满足需要的时长。基线值：5 个月。

项目 4.3.2.2：新能源汽车机器人高质量涂装柔性制造系统研制与示范工程

1. 研究目标

针对新能源汽车车身涂装生产过程中质量控制均质化水平低、核心装备安全可控的问题，突破涂装质量关键参数在线虚拟调控、任务自主动态调配等关键技术，研制涂装机器人集群控制系统、涂装数字虚拟仿真系统等，构建面向新能源汽车涂装的工艺装备验证生产线，集成并验证国产防爆型喷涂工业机器人和汽车漆面缺陷在线智能检测装备等，形成“任务自主调配—自适应编程—工艺虚拟调控—在线质量监测管控—智能生产”为一体的定制化、多车型车身涂装高质量解决方案，建设新能源汽车机器人高质量涂装柔性制造系统。

2. 研究内容

(1) 高质量涂装工艺规划

基于项目 1.1.1.6 开发的多车型混线涂装工艺仿真软件，研究工艺参数与涂层性能的动态映射关系，开发喷涂轨迹、涂料流量、烘干参数的全局协同优化技术；研究多车型混线生产的工艺柔性适配技术，建立快速切换的工艺参数数据库与自适应调漆模型；研究面向车身复杂曲面的涂装机器人路径与轨迹规划策略，研制基于国产工业机器人的“任务自主调配—工艺参数动态调整—多曲面自适应喷涂”的精准涂装工

艺及装备协同规划体系。

（2）喷涂工业机器人集群控制系统

基于专项 2024 年度已部署项目 1.1 研制的防爆型喷涂工业机器人，开发任务动态分配与协同优化算法，研究喷涂机器人集群异构通信网络融合及互操作技术，研究喷涂机器人作业任务动态变更的抗干扰与容错机制，研制高度集成且具备跨品牌兼容性的国产涂装工业机器人集群控制系统。

（3）虚实数据实时融合技术

基于项目 1.1.1.6 开发的多车型混线涂装工艺仿真软件，开发虚拟与实体数据实时融合的涂装过程可视化与远程监控技术，研究面向涂装工艺参数、设备运行状态等多目标管控的涂装产线能效提升策略，开发数字孪生模型，搭建高适配性且能实现虚实映射调控的涂装仿真验证环境。

（4）多维质量诊断与闭环管控技术

应用项目 2.2.1.2 研制的汽车油漆表面缺陷在线智能检测装备，研究基于数据反馈与多参数调控的质量闭环优化策略，开发检测结果与工艺参数的映射模型、拥有自主决策能力的反馈调控模型，研制涂装质量诊断与闭环管控系统。

（5）车身涂装工艺及关键装备集成验证

开展涂装工艺装备集成应用稳定性关键影响因素、汽车涂装全工况（包括涂胶、喷漆、漆面检测、漆面打磨、漆面抛光）模拟验证等研究，构建面向新能源汽车涂装的工艺装

备验证生产线；制定测试大纲，重点实现涂胶和喷漆工业机器人、漆面质量检测装备等国产装备的工艺适配性、集成系统可靠性和性能保持性等多维度指标测试。

（6）新能源汽车机器人高质量涂装柔性制造系统解决方案

集成专项 2024 年度已部署项目 1.1 研制的防爆型喷涂工业机器人，基于生产线输送系统的工件属性信息，开展喷涂机器人工艺包自动调度策略研究；集成验证生产线验证的汽车油漆表面缺陷在线智能检测装备，构建覆盖喷漆、烘干等工艺环节的数据驱动协同体系；集成高速精准涂胶设备、自适应烘干固化单元、智能物料配送系统等通用装备，研究多设备动态协同控制技术，构建涂装全流程智能化生产架构，形成新能源汽车机器人涂装高质量涂装柔性制造系统解决方案，在国内新能源汽车整车企业实现工程示范。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）应用项目 2.2.1.2 研制的汽车油漆表面缺陷在线智能检测装备，研制涂装质量诊断与闭环管控系统 1 套，对于颗粒、坑包等涂装表面缺陷的诊断准确度不低于 90%。

（2）应用项目 1.1.1.6 研制的多车型混线涂装工艺仿真软件，开发涂装仿真验证环境，实现喷涂工艺轨迹仿真误差

率¹≤5%。

(3) 国产涂装工业机器人集群控制系统，兼容车型数量≥3 种，跨品牌工业机器人接入数量≥2 种。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

(4) 新能源汽车机器人涂装高质量涂装柔性制造系统，色漆膜厚均匀度²优于±2μm，清漆膜厚均匀度³优于±5μm。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

(1) 建设 1 条新能源汽车涂装工艺装备与集成应用验证生产线，其验证典型场景≥5 种（包含面漆自动喷漆、自动涂胶、自动漆面质量检测、自动打磨、自动抛光），并支持检测与监测不少于 200h 的工艺装备系统性能保持性试验与评价。依据本专项 2024 年度已部署项目 1.1 研制的防爆型喷涂工业机器人和汽车漆面缺陷在线智能检测装备的考核指标，制定测试大纲，完成应用测试。

(2) 研发新能源汽车机器人涂装生产线解决方案，围绕整车涂装应用场景开展解决方案应用验证，建成新能源汽车机器人涂装高质量涂装柔性制造系统，产线工艺质量优化周期缩短 30%以上。整条产线集成应用本专项 2024 年度已部署项目 1.1 研制的防爆型喷涂工业机器人，包括但不限于

1 喷涂工艺轨迹仿真误差率=(仿真轨迹位置-实际轨迹位置/实际轨迹位置)×100%，基线值：≥10%，。

2 先测量多个不同位置的漆膜厚度值，如 T1,T2,...,Tn，膜厚均匀度=漆膜厚度值最大值-漆膜厚度最小值，基线值：色漆膜厚均匀度未达到±4μm 水平，。

3 先测量多个不同位置的漆膜厚度值，如 T1,T2,...,Tn，膜厚均匀度=漆膜厚度值最大值-漆膜厚度最小值，基线值：清漆膜厚均匀度未达到±8μm 水平。

涂胶、喷漆、油漆表面质量检测等方面的国产工业机器人不少于 20 台。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

(3) 生产线节拍 $\leq 120s$ ，设备开动率¹ $\geq 93\%$ 。

(4) 应用国产汽车油漆表面缺陷在线智能检测装备不少于 2 台。

4.实施期限

本项目为 2024 年未部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，作为“新能源汽车高质量涂装柔性制造系统解决方案”项目群的主项目，采用公开竞争方式，项目自由申报，项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类：应用示范研究。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.5:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事后补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为新能源汽车制造企业，应与国内汽车涂装生产线研制企业、高等院校、科研院所等联合申报，联合体应拥有新能源汽车机器人涂装高质量涂装柔性制造系

¹ 设备开动率=(成果设备实际运行时间/设备计划运行时间)×100%。基线值：设备开动率 $\leq 90\%$ 。

统开发经验，并具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

（三）先进轨道交通装备按需柔性制造系统解决方案与示范工程

项目群四：先进轨道交通装备按需与柔性制造系统解决方案

1.设立目标

本项目群聚焦解决轨道交通行业既有制造系统难以适配新型号快速研制和多品种、小批量制造等重大问题，支撑“CR450 制造一次交检合格率从 95%提升至 99%，形成多系列高速列车混线生产能力；重载机车制造周期从 7 个月缩短至 4 个月，满足 20 种以上重载机车脉动式总装需求”的目标实现，研制机器人化柔性制造单元、检测装备、制造管控软件等面向高速列车、重载机车的战略产品，形成现实生产力，将轨道交通装备行业的智能化制造水平提高到国际领先，实现多系列高速列车混线精益生产制造模式和重载机车脉动式可重构制造模式的创新。

为实现重大工程牵引战略产品落地，采用项目群方式，加强系统、软件、装备等多类型项目跨任务高效协同组织，为成果目标实现提供组织实施保障。

2.项目群构成

本项目群由 6 个项目组成，包括：项目 4.3.3.1“支撑多系列混线生产的 CR450 高速列车高精度制造系统研制及示范工程”（示范工程项目）、项目 4.3.3.2“重载机车脉动式可重构制造系统研制及示范工程”（示范工程项目）、项目 3.2.2.2“轨道交通工艺装备全生命周期管理软件研制及验证”（产品研发项目）、项目 2.3.2.1“先进轨道交通装备承载结构柔性制造系统研制及验证”（产品研发项目）、项目 2.2.2.5“高速列车焊缝全断面质量可移动在线检测装备研制及验证”（产品研发项目）、项目 1.1.1.5“高承载结构件焊接成型工艺仿真软件研发及验证 6”（产品研发项目）。

项目 4.3.3.1、项目 4.3.3.2 作为项目群的主项目，集成其他项目的研发成果。项目 4.3.3.1 通过 CR450 高速列车高精度制造系统，集成项目 2.3.2.1、2.2.2.5、3.2.2.2 研制的承载结构柔性制造系统、焊缝全断面质量可移动在线检测装备、工艺装备全生命周期管理软件等成果。项目 4.3.3.2 通过重载机车脉动式可重构制造系统，集成项目 1.1.1.5、3.2.2.2 研发的结构件工艺仿真软件、工艺装备全生命周期管理软件等成果。群内项目既要完成项目群任务目标，又要完成本项目任务目标。

3.考核指标

（1）CR450 高速列车全工序一次交检合格率由 95%提升到 99%，车体焊接返修率由 2.5%降低至 1%，总装一次装

配合合格率从 90%提升至 98%，产线综合利用率由 70%提升至 90%以上，高速列车平均故障率从 0.34 件/百万公里降低至 0.15 件/百万公里，建成多系列高速列车 200 组/年生产能力。

（2）重载机车制造周期从 7 个月缩短至 4 个月，车体焊接成型工艺准备与验证周期缩短 30%；产线构型满足 20 种以上重载机车脉动式总装生产需求，节拍达成率达 90%，产线设备综合利用率优于 85%。

4.组织方式

项目群采用链主制，由主项目牵头承担单位担任链主。

主项目 4.3.3.1、4.3.3.2 采用面向中国中车集团有限公司定向择优方式遴选承担单位。经中国中车集团有限公司组织推荐的优势单位，按项目分别申报、分别竞争择优，确定承担单位后担任项目群链主。

项目 1.1.1.5、2.3.2.1、2.2.2.5、3.2.2.2 采用公开竞争方式择优遴选承担单位。4 个项目自由申报，确定承担单位后加入项目群，共同支撑群目标实现。

项目群采用群/项目二级管理方式。在群层面，各项目承担单位需与链主单位明确项目群目标、指标，并纳入项目任务书考核指标；在项目层面，按照常规项目实施管理，各项目须完成项目指南提出的全部研究内容和考核指标。

项目 4.3.3.1：支撑多系列混线生产的 CR450 高速列车高精度制造系统研制及示范工程

1. 研究目标

为满足下一代高速列车 CR450 高精度制造需求，同时解决 CR450 与 CR400、CRH6 多系列混线制造带来的一致性差、效率低、成本高等难题，急需探索多系列高速列车混线精益生产新模式，在不显著增加制造成本前提下，满足不同系列高速列车个性化制造工艺要求。本项目突破机器人精密作业、自动化检测、数字化管控等关键技术，开展高精度作业的机器人装备、多系列高速列车柔性工装、转向架生产线协同控制与工艺参数优化等技术研究，开发支持多系列高速列车混线生产的制造管控平台，研制支持 CR450 与 CR400、CRH6 多系列混线精益生产的高精度制造系统，并在高铁制造领军企业验证，建成 CR450 高速列车批量生产示范线。

2. 研究内容

（1）高精度作业的机器人装备

围绕焊接、打磨、探伤、涂装、装配、检测等典型场景，研究融合视觉、力觉、激光扫描的横梁变形量检测与自动矫正，研究构架焊缝超声波检测的机器人自适应控制，研究转向架定位识别与精密对接装配控制，研究复杂曲面部件机器人粘接控制，研究关键部件外观缺陷高精度识别等技术，开发机器人典型作业工艺库，研制典型场景的机器人成套装备。

（2）多系列高速列车柔性工装

针对多系列高速列车生产过程中各型号产品对应专用工装多，导致切换调试时间长等问题，研究多列车体、转向架工装感知、分析、自适应补偿技术，研究机器人与柔性工装协同控制技术，研究车体机电复合工装快速换型技术，开发适配 CR450、CR400、CRH6 等系列高速列车生产的柔性化工装，实现制造单元快速响应多系列产品换型。

（3）转向架生产线协同控制与工艺参数优化技术

针对高速列车可靠性要求最高的转向架制造质量一致性控制难、多机设备协同弱等问题，研究通用化数据交互模型的异构设备集成技术，研究多模态感知的机器人作业协同控制技术，研究工艺参数感知与工件质量在线监测技术，研究质量预测评估模型与工艺参数优化技术，研制转向架生产线控制系统，实现产线工艺参数在线优化的闭环控制。

（4）支持多系列高速列车混线生产的制造管控平台

针对 CR450、CR400、CRH6 等系列产品涉及十万级零部件和不同工艺环节上千道工序混线生产管控复杂、装配累积误差导致的研配工作量大等问题，研究跨工艺段的有限资源计划调度与任务协同分配方法，研究管路和内装件动态干涉检测与尺寸公差分析的虚拟预装配技术，集成工艺装备管理等功能，研制支持多系列高速列车混线生产的制造管控平台，实现多车型产品高效柔性制造。

（5）高速列车精益生产的高精度混线制造系统

集成应用高速列车承载结构多功能激光复合焊接系统、焊缝全断面质量可移动在线检测装备，建设机器人柔性作业单元为主体的车体、转向架生产线；应用产线集中控制系统及制造管控平台，构建多系列高速列车精益生产的高精度混线制造系统，在 CR450、CR400、CRH6 等高速列车开展应用验证，形成可推广的多系列高速列车混线精益生产新模式。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）涵盖焊接、打磨、尺寸检测、无损检测、外观检测、涂装、装配等不少于 10 个机器人作业工艺库；机器人末端定位精度优于 $\pm 0.1\text{mm}$ ，装配精度优于 $\pm 0.5\text{mm}$ ；集成应用激光复合焊，支撑车体轮廓度由 6mm 提升至 3mm；除应用激光复合焊接系统、焊缝全断面质量可移动在线检测装备外，研制不少于 8 类工艺装备，优先采用本专项或其他国家科技和产业项目支持的机器人创新成果，国产机器人应用台套数 ≥ 50 套。

（2）柔性工装数量 ≥ 5 类，车体和转向架焊接工装适配新产品换型时间 $\leq 2\text{h}$ 。

（3）采用国产控制器的产线控制系统 1 套，多机器人

协同控制同步误差¹≤2ms，转向架焊接关键过程能力指数CPK≥1.33。

（4）制造管控平台 1 套，支持从订单到交付的全流程管控，支持 CR450、CR400、CRH6 等系列产品混线生产。制造管控平台自研率达到 90%，支持转向架生产线三维虚拟仿真建模。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）协同部署本项目群中项目 2.3.2.1“先进轨道交通装备承载结构柔性制造系统研制及验证”、项目 2.2.2.5“高速列车焊缝全断面质量可移动在线检测装备研制及验证”、项目 3.2.2.2“轨道交通工艺装备全生命周期管理软件研制及验证”研制的“先进轨道交通装备承载结构柔性制造系统”“焊缝全断面质量可移动在线检测装备”“工艺装备全生命周期管理软件”等成果，建设高速列车转向架焊接智能化示范线，集成 40 套以上自动化辅助工装工具和 6 套以上变位机，5 套以上柔性机器人焊接单元，构架焊接自动化率由 40%提升至 80%，构架探伤返修率²由 40%降低至 20%。形成转向架数字化制造解决方案，具备转运、存储、定位、拧紧、焊接、对接装配及检测等功能，制造工装通用化率提升至≥95%，多谱系产品换产时间缩短 50%，自动化装配效率提升 15%，实现转向

1 多机器人协同控制同步误差，指多机器人在进行时间对齐的协同任务时所存在的时间延迟误差。

2 探伤返修率，指被探伤检测出的缺陷件需返修的比例。

架单日产能达到 9 辆。

(2) 车体焊接返修率¹由 2.5%降至 1%。

(3) 高速列车精益生产的高精度混线制造系统，形成轨道交通装备柔性协同制造解决方案，支持 CR450、CR400、CRH6 系列下不少于 15 种车型的混线生产，产线综合利用率从 70%提升至 90%，实现 CR450 高速列车一次交检合格率²从 95%提升至 99%，一次装配合格率³从 90%提升至 98%，高速列车百万公里故障率⁴由 0.34 件降至 0.15 件。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

(4) 高速列车车体焊接智能化示范线，车体焊接自动化率由 64%提升至 75%。

(5) 解决方案支持 100 套换产通用工装，转产换产效率提升 60%，示范产线数字化率⁵达到 90%，建成多系列高速列车 200 组/年生产能力。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

1 焊接返修率，指焊接缺陷需返工或返修的比例，焊接返修率=工件焊缝返修长度/工件焊缝长度×100%。

2 一次交检合格率，指衡量生产过程中一次性通过质量检验的产品比例。

3 一次装配合格率，指产品在首次装配过程中无需返工或调整即达到质量标准的比例。

4 百万公里故障率，指每百万公里运行距离内发生的故障次数。

5 产线数字化率=具备数字化接口支持数据采集与控制的设备/产线中设备总数量×100%。

拟支持 1 个项目,作为“先进轨道交通装备按需与柔性制造系统解决方案”项目群的项目,采用面向中国中车集团有限公司定向择优方式,并按照该项目群要求统一申报。

所属创新分类: 应用示范研究。

其他来源资金(包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金)与中央财政资金比例原则上不低于 3.5:1。

中央财政投入支持方式: 事前立项事后补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备轨道交通装备高速动车组制造能力的主机企业,并取得中国中车集团有限公司书面授权作为本项目牵头申报单位。牵头申报单位应与国内相关优势企业、科研院所、高等院校等联合申报,申报联合体应具备较强的专业研发团队,以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

项目 4.3.3.2: 重载机车脉动式可重构制造系统研制及示范工程

1.研究目标

为满足国家重大战略物资长距离铁路运输需求,适应重载机车脉动式生产,针对制造过程中产线构型固化、生产节拍失衡、制造周期变长等难题,突破模块化工位单元、产线数字孪生、生产节拍控制等关键技术,开展模块化制造单元

与装备集成、产线虚拟仿真与数字孪生、脉动式可重构产线与动态调整等技术研究，开发制造全流程数据即时交互与协同平台，研制重载机车脉动式可重构制造系统，满足重载机车脉动式生产需求，在重载机车头部企业实现验证。

2.研究内容

（1）模块化工位单元与装备集成技术

针对重载机车脉动产线的模块化与高节拍生产需求，研究“激光—视觉”多维度数据融合感知、机械臂空间姿态调整与轨迹规划、大负载高精度协同控制、装备集成与多智能体并行管控等关键技术，研究面向重载机车车体焊装、整车总装脉动产线生产需求的模块化工位单元技术，构建满足脉动产线多工序应用场景，包含核心制造工艺装备的模块化工位单元集成系统，在重载机车焊装、总装产线实现应用。

（2）产线虚拟仿真与数字孪生技术

针对重载机车车体焊装、整车总装脉动产线生产需求，研究产品三维数字化、产线静态建模、产线全要素仿真等技术，研究基于模块化工位单元的产线虚拟动态调整与重构策略优化关键技术，研究产线数字孪生系统静态模型构建、单向数据驱动、实时状态映射、双相交互控制等技术，构建脉动式产线数字孪生系统与产线构型可预测的数字化重构技术体系，支撑重载机车脉动式生产。

（3）脉动式可重构产线与动态调整技术

研究重载机车及关键结构解耦与模块化技术，开发标准化和统型化车体模型库与产线工装库，研究基于最小模块的焊装、总装产线脉动式节拍优化技术；构建以模块化工位单元为基础、核心制造工艺装备集中布局、涵盖时空高精度排程调度与产线全要素虚拟仿真的脉动式可重构产线架构，研制通用型与模块化自动化产线工装，支持产线构型按需重构与制造计划快速切换，满足重载机车脉动式生产需求。

（4）制造全流程数据即时交互与协同技术

针对重载机车多车间联动、多产线并行、多工序衔接的复杂制造需求，研究产品模型三维标注、轻量化数据交换及高带宽数据传输等数据贯通技术，构建集成 ERP、PLM、MES 和 WMS 等信息系统的数据传输系统，实现产品从结构设计、工艺设计、工艺生成到工位加工的制造全流程数据即时交互与协同，建立制造全流程数据交互管控平台，满足重载机车脉动式生产数据交互与协同要求。

（5）重载机车脉动式可重构制造系统研制与验证

以重载机车典型制造工艺流程为主线，集成应用产线模块化工位单元与装备集成、产线虚拟仿真与数字化重构、脉动式可重构产线与动态调整、制造全流程数据即时交互与协同等关键技术，开发重载机车多产线并行集中管控平台，研制重载机车脉动式可重构制造系统，实现重载机车车体焊装和整车总装脉动式生产需求，缩短重载机车制造周期，并在

重载机车头部企业实现验证。

3.考核指标

技术指标:

到 2027 年 12 月，完成以下指标:

(1) 产线模块化工位单元装备不少于 5 套，支持车体焊装产线与整车总装产线焊接、打磨、装配等制造场景需求，机械臂末端定位精度优于 $\pm 0.1\text{mm}$ ，加工精度优于 $\pm 0.2\text{mm}$ ，装配精度优于 $\pm 3\text{mm}$ ，单个场景作业覆盖率¹高于 95%。

(2) 重载机车脉动产线虚拟仿真与数字孪生系统 1 套，实现包含产线主设备、辅助设备、作业人员等在内的产线全要素仿真，支持对车辆制造计划切换与转移产线过程的分钟级时间尺度模拟，仿真精度² $\leq 5\%$ ，单条产线仿真时间 $\leq 15\text{min}$ ，产线数字孪生能力成熟度等级³从 L1 级升级至 L3 级。

到 2028 年 10 月，完成以下指标:

(3) 制造全流程数据即时交互与协同平台 1 套，实现产品从结构设计、工艺设计、工艺生成到工位加工的数据一体化协同，并在重载机车转向架、管道与线束等数字化制造车间完成应用，产品制造全流程数据贯通率⁴达 90%，产品工

1 作业覆盖率，指衡量单元适应多品种生产的能力，作业覆盖率=（当前周期内完成任务种类数/单元可支持的总任务种类数） $\times 100\%$

2 仿真精度=（|仿真值-实际值|/实际值） $\times 100\%$ （离散制造场景计算对象：单位时间内产出数量；连续制造场景计算对象：生产节拍时间）。

3 参考国家标准 20230976-T-469《信息技术 数字孪生能力成熟度模型》（报批稿）。

4 数据贯通率，指数据传输率与数据有效率的乘积。数据传输率定义为统计时段内实际接收的数据量占应收数据总量的百分比，反映数据传递的完整性。数据有效率定义为统计时段内有效数据组数量占应收数据组数量的百分比，衡量数据的准确性与合规性。

艺设计周期¹缩短 50%。

工程化指标:

到 2027 年 12 月，完成以下指标:

(1) 协同部署本项目群中项目 1.1.1.5“高承载结构件焊接成型工艺仿真软件研发及轨交行业应用验证”、项目 3.2.2.2“轨道交通工艺装备全生命周期管理软件研制及验证”开发的“高承载结构件焊接成型工艺仿真软件”“轨道交通工艺装备全生命周期管理软件”等成果,构建重载机车脉动式可重构制造系统,包含车体焊装脉动产线 1 条、整车总装脉动产线 1 条,产线虚拟仿真与数字孪生系统 1 套、制造数据即时交互与协同平台 1 套,开发模块化工位单元装备不少于 5 套,支撑车体焊装、整车总装脉动产线中的焊接与总装制造场景需求。

(2) 重载机车脉动式可重构制造系统可实现车体焊装与整车总装的产线构型调整和车体转运功能,支持 100 套换产通用工装、50 套快换工装夹具、30 套自动化装配工装工具的应用。

到 2028 年 10 月,完成以下指标:

(3) 重载机车车体焊装脉动产线 1 条,产线站位数不少于 6 个,可满足 6 种以上平台车型的车体组焊需求;建设重载机车整车总装脉动产线 1 条,产线站位数不少于 5 个,

¹ 工艺设计周期,指通过基于三维模型的数字化平台进行工艺设计的时间。

可满足 20 种以上重载机车的总装需求。

（4）重载机车脉动式可重构制造系统可实现重载机车车体组焊及整车总装的脉动式生产，产线设备综合效率优于 85%，节拍达成率¹达到 90%，车体组焊周期²从 30 天缩短至 24 天，整车总装周期³从 8 天缩短至 5 天，整车制造周期⁴从 7 个月缩短至 4 个月。

4.实施期限

本项目为 2024 年未部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，作为“先进轨道交通装备按需与柔性制造系统解决方案”项目群的项目，采用面向中国中车集团有限公司定向择优方式，并按照该项目群要求统一申报。

所属创新分类：应用示范研究。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.5:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事后补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为具备轨道交通装备重载机车整车制造能力的主机企业，并取得中国中车集团有限公司书面授权

1 实际生产节拍与设计节拍的吻合度=（实际完成节拍数/计划节拍数）×100%。

2 车体组焊周期，指完成车体所有结构焊接的时间，包含车体小部件组焊、车体底架组焊、车体总组焊等。

3 总装周期，指机车各部件制造完成后，开始整车总体装配至整车下线的时间。

4 整车制造周期，指从重载机车图纸设计归档后，整车制造从车体开始下料生产至整车下线的时间。

作为本项目牵头申报单位。牵头申报单位应与国内相关优势企业、科研院所、高等院校等联合申报，申报联合体应具有较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

（四）石油化工行业全业务链协同优化解决方案与示范工程

项目群五：石油化工资源能源集约生产协同优化系统解决方案

1. 设立目标

石油和化工（石化）是保障国家基础原材料与能源安全的根基命脉产业，不仅为国民经济建设提供能源和大宗原材料，也为战略性新兴产业提供高端材料。针对我国石化企业原料资源和能源多元化、品位差异大，导致资源能源供应链与工厂长流程生产链难匹配，造成高附加值产品收率低、能耗碳排高等瓶颈问题，研制原油与成品油等有机物成分高分辨检测仪表，研发石化生产全链条计划排产、跨工序协同调度、装置运行性能评估模型与优化等智能制造业务关键软件，形成石化“资源—能源”协同优化系统，开展软件系统集成、应用技术研发和工程示范，显著提升石化制造过程资源和能源利用率，为企业高质量发展提供核心科技引擎，实现从“并跑”到部分领域“领跑”。为加强产品研发、工程示范等

多类型项目协同研发，设立石油化工资源能源集约生产协同优化系统解决方案项目群，通过石化资源能源协同优化系统研制及示范工程牵引检测仪表、计划排产、协同调度和性能评估等软硬件技术研发应用，加强组织实施、提升项目研发效率与效果。各项内容相对独立，都可以形成独立产品进行推广应用。

2.项目群构成

本项目群包含 5 个项目：项目 4.4.3.1“石化资源能源协同优化系统研制及示范工程”（工程示范项目）、项目 1.3.2.2“石化装置运行性能智能评估模型与自主优化软件研发及验证”（产品研发项目）、项目 3.1.4.5“有机物成分高分辨检测仪表研制及验证”（产品研发项目）、项目 3.3.2.4“石化生产全链条计划排产软件研制及验证”（产品研发项目）、项目 3.3.2.5“石化生产跨工序协同调度软件研制及验证”（产品研发项目）。

项目 1.3.2.2 研制石化装置运行性能智能评估模型与自主优化软件并开展工程验证，项目 3.1.4.5 研制原油与成品油等有机物成分高分辨检测仪表开展工程验证，项目 3.3.2.4 研制石化生产全链条计划排产软件并开展工程验证，项目 3.3.2.5 研制石化生产跨工序协同调度软件并开展工程验证；项目 4.4.3.1 建设石化资源能源多元化供应与长链加工需求匹配数字化工程，研制资源能源协同优化系统并开展工程示

范。在集成项目 1.3.2.2、3.1.4.5、3.3.2.4、3.3.2.5 的检测仪表和工业软件基础上，建设石化资源能源多元化供应与长链加工需求匹配数字化工程，研制资源能源协同优化系统并开展工程示范。项目群采用石油化工资源能源集约生产协同优化系统拉动检测仪表和工业软件研制的研发模式，由项目 4.4.3.1 作为主项目。群内项目既要完成项目群任务目标，又要完成本项目任务目标。

3.考核指标

（1）研制资源能源协同优化系统，采炼联合资源配置决策效率提升 $\geq 30\%$ ，高附加值产品收率 $\geq 70\%$ ，炼油、油气煤制烯烃装置吨产品能耗降低 $\geq 2.5\%$ ，综合碳排放减少 $\geq 10\%$ 。

（2）研制完成石化装置运行性能评估与优化软件，实现装置关键运行性能指标（如能耗单耗、产品收率等）趋势预测平均绝对百分比误差降低 $\geq 10\%$ ，评估分析结果相对偏差绝对值 $\leq 5\%$ ；软件具备的运行性能状态理解能力，覆盖装置类型不少于 10 个，运行工况不少于 6 个（如稳态运行、低负荷运行、产品切换、原料切换等）。

（3）研制完成有机物成分高分辨检测仪表，对石油化工中原油、汽油的成分性质检测频率 ≥ 6 次/h；烯烃、芳烃等有机组分含量的测量重复性满足 GB/T 28768 标准；原油密度、硫含量、主要馏分油收率，汽油辛烷值等核心指标的测

量重复性满足 GB/T 1884、GB/T 17040、GB/T 17280、GB/T 503 等标准；通过用户不少于 3 个月的仪表可用性验证。

（4）研制完成石化生产全链条计划排产软件，支持多品种化学品（品种数量 ≥ 100 种）计划排产；决策时间 $\leq 15\text{min}$ （决策变量 ≥ 30000 个，整数变量 ≥ 200 个）；排产方案与实际产量对比，汽油、煤油、柴油、丙烯、对二甲苯，聚丙烯，苯乙烯等高附加值产品误差率 $\leq 3\%$ 。

（5）研制完成石化生产跨工序协同调度软件，提升调度排产效率，缩短旬/周调度方案的排产时间 $\geq 50\%$ ，减少调度方案切换次数，降幅 $\geq 20\%$ ；提升计划任务执行率，增幅 $\geq 5\%$ 。

4.组织方式

项目群采用链主制，由主项目牵头承担单位担任链主，公开竞争择优遴选链主及项目承担单位。各项目均自由申报，确定承担单位后组成项目群，在链主单位组织下，共同支撑群目标实现。

项目群采用群/项目二级管理方式。在群层面，各项目承担单位需与链主单位明确项目群目标、指标，并纳入项目任务书考核指标；在项目层面，按照常规项目实施管理，各项目须完成本项目指南提出的全部研究内容和考核指标。

项目 4.4.3.1：石化“资源—能源”协同优化系统研制及示范工程

1.研究目标

针对石化企业原料资源和能源多元化、品位差异大，导致资源能源供应链与工厂长流程生产链难匹配，造成高附加值产品收率低、能耗碳排高等瓶颈问题，突破多品位原料物性在线表征、“装置—产线—全流程”多层级能质协同调控技术，开展多元化资源供需精准匹配、多介质能源梯级综合利用、资源与能源协同调控等研究，形成资源能源供给侧与生产需求侧动态协同优化系统，在原料多元化、长生产流程石化龙头企业进行应用验证，实现“供应—生产”跨链协同调控，显著提升资源和能源利用率。

2.研究内容

（1）多元化原料表征与“供应—生产”匹配规则库

分析原油、馏分油、油气、煤等原料性质特征，研究多品位原料物性在线表征技术；解析加工装置的物理网络连接关系，研究气体分离与有序转化路径匹配、重质油转化与轻质油循环加工路径耦合、价值导向的原料煤转化平行路径筛选、基于物性传递的加工路径自动重构等关键技术，建立多路径联产与多原料供给匹配规则库，支撑“供应—生产”协同决策。

（2）多品位资源供应与长流程生产协同配置技术

研究石蜡基、环烷基、中间基等多品位原油资源性质分布规律，建立原油仓储、输转、混配、炼油、化工等长加工

流程生产工艺要求与原油性质精准匹配规则；研究融合生产装置工艺机理的油气价值评价机制，开发价值最大化油气资源与炼油、化工生产装置负荷精准匹配技术；基于煤转化工工艺知识和联产规范，研究原料煤和加工炉型的品位、数量智能匹配技术，支持合成气高效转化，支撑企业优化产品结构，提升高附加值产品收率。

（3）多介质能源梯级综合利用技术

解析原料多元化企业燃料气/燃料煤/蒸汽/电等多介质能源互补和碳排放机制，建立关键产能/耗能单元、不同等级能源管网、能源系统全流程模型；研究面向热值稳定的多品位燃煤混配技术、集成可再生能源的冷/热/电联产协同优化技术、“蒸汽—电—水”协同的多等级蒸汽管网优化技术；研究基于生命周期评价的能源系统碳足迹溯源诊断、工艺需求驱动的多等级能源梯级利用决策技术，支撑石化装置深度节能与低碳化。

（4）供需平衡的资源与能源动态协同调控技术

开发装置工艺参数导向的热交换集成（装置级）、产品收率导向的跨装置能质协同加工（产线级）、全厂综合能效指标导向的跨部门运行资源能源配给（全流程级）等技术，研究加工负荷、原料性质、装置状态等工艺参数动态变化下装置运行性能评估技术、多层级资源转化需求与能源供给协同调控技术，提高资源和能源利用率。

（5）石化生产资源能源协同优化系统研制与应用

在企业资源能源优化相关的生产计划、调度等业务系统协同部署项目群其他软硬件成果，研究日级别原油加工、蒸汽/燃料气消耗、碳足迹等数据平衡规则，基于原料物性在线表征、多品位资源供需精准匹配、多介质能源梯级综合利用、资源与能源协同调控等技术，开发功能模块，建立模块间数据交互通道、跨业务模型调用逻辑，形成资源能源协同优化系统，并在多元化资源/能源、炼油和化工流程兼具的石化行业龙头企业进行工程验证。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）协同部署项目 3.1.4.5、3.3.2.4、3.3.2.5、1.3.2.2 研制的软硬件。在满足应用成熟度要求情况下，优先集成石化领域基础物性数据库、流程模拟等工业软件攻关成果。

（2）形成资源能源协同优化系统，支持“油—气—煤”等资源型企业计划排产、生产调度、能质协同优化等核心功能。

（3）资源配置模型覆盖油品加工、天然气及煤化工等装置 ≥ 3 类。

（4）能源系统模型覆盖燃料气、燃料煤、蒸汽、电等能源介质 ≥ 5 种。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（1）完成项目 3.1.4.5、3.3.2.4、3.3.2.5、1.3.2.2 研制的软硬件工程验证。

（2）完成油品在线检测功能，多元化原料表征技术覆盖原油、成品油等不少于 2 类油品，在线检测关键物性指标偏差 $\leq 5\%$ 。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）项目 3.3.2.4、3.3.2.5、1.3.2.2 研制的软件成果在经营计划、生产调度、油品调合等业务系统进行部署。

（2）资源配置模型包含装置数量 ≥ 80 套；能源系统模型包含产能/耗能装置数量 ≥ 45 套；运行性能评估技术支持收率异常、物料失衡、能耗异常、工艺参数优化等不少于 5 个场景，应用装置数量 ≥ 2 套。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

（1）项目 3.1.4.5 研制的硬件在原油、成品油等输送工业场景进行现场安装部署；形成的资源能源协同优化系统在多元化资源/能源、炼油和化工流程兼具的行业龙头企业开展工程验证，原料性质表征、资源排产、能源优化、性能评估等系统核心功能稳定运行时间 ≥ 3 个月。

（2）采炼联合资源配置决策效率¹提升 $\geq 30\%$ ，原油、天

¹ 决策效率以天为单位，按开始编制计划到生产经营业务系统下达进行计算。基线值为 3 天，目标值 2 天（提升率 33%）。

然气和煤炭资源供需平衡偏差率¹≤3%；汽/煤/柴油、聚乙烯、聚丙烯、醇类、橡胶类、EVA 等产品配置计划完成率²≥98%。

（3）炼油综合能耗³降低≥2.5%，油气煤制烯烃装置吨产品能耗⁴降低≥2.5%，碳排放强度⁵减少≥10%。

（4）汽油、柴油、液化气、聚乙烯、聚丙烯、甲醇、乙醇、醋酸等高附加值产品收率⁶≥70%。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，作为“石油化工资源能源集约生产协同优化系统解决方案”项目群的主项目，采用公开竞争方式，项目自由申报，项目任务书签订阶段与项目群目标集成绑定。

所属创新分类：应用示范研究。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.5:1。

中央财政投入支持方式：事前立项事后补助。

6.申报条件

1 供需平衡偏差率=|原料实际供应量-原料计划需求量|/原料计划需求量×100%。

2 计划完成率=实际产量/计划产量×100%。

3 炼油综合能耗=炼油综合能源消耗量/（原油及外购料总量×炼油能量因数）。基线：炼油综合能耗为 8.5kgoe/(t·能量因数)，目标值：炼油综合能耗为 8.28kgoe/(t·能量因数)。

4 油气煤制烯烃装置吨产品能耗=油气煤制烯烃装置综合能源消耗量/合格产品产量。基线：油气煤制烯烃装置吨产品能耗为 1800kg 标煤/吨，目标值：油气煤制烯烃装置吨产品能耗为 1755kg 标煤/吨。

5 碳排放强度=总碳排放量/原油加工量或产品产量。基线（炼油 0.36 吨 CO₂/吨原油，煤油气化工 4.8 吨 CO₂/吨产品），目标值：炼油 0.32 吨 CO₂/吨原油，煤油气化工 4.4 吨 CO₂/吨产品。

6 高附加值产品收率=（高附加值产品产量）/原料总消耗量×100%。基线 60%，目标值 70%。

牵头申报单位应为具备原料多元化型制造能力的石化企业，应与国内相关高等院校、科研院所、软件和系统部署的服务企业等联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

（五）长流程钢铁冶金低碳运行优化与调控解决方案与示范工程

项目 4.4.1.4：面向高品质钢个性化定制生产模式的钢铁行业全流程动态协同优化系统研制及示范工程

1. 研究目标

针对钢铁企业特殊钢个性化小批量订单规则多、极窄窗口成分性能难控制等带来的能耗碳排高、产品批次质量波动影响大的问题，突破钢铁生产全流程“炼铁—炼钢—轧钢”的个性化、多品种、高质量动态协同关键技术。开展“炼钢—精炼—连铸—轧钢”多工序界面有序运行、个性化小批量高效组批排程、多介质能源梯级利用、生产全过程质量极窄窗口控制等系统研究，围绕“生产—质量—能源”协同的复杂不确定场景，形成全流程动态有序运行解决方案，在特钢企业开展工程化示范，实现跨工序分钟级动态协同调控，显著降低能耗和碳排放。

2. 研究内容

（1）“炼钢—精炼—连铸—轧钢”多工序界面有序运行

技术

解析特殊钢工艺路径结构对特钢质量的影响，分析个性化订单组合和高质量约束条件对跨工序协同运行的影响规律，研究“炼铁—炼钢”界面、“炼钢—连铸”区段、“连铸—轧钢”界面物质流高质量稳定模式，建立个性化高质量的“炼铁—炼钢”界面、“炼钢—连铸”区段、“连铸—轧钢”界面物质流有序运行规则。

（2）个性化多品种高效组批排程技术

梳理钢水洁净度、铸坯缺陷和钢材性能等特殊钢约束条件对排程、调度的影响，研究组炉组浇、热轧排程、“炼钢—热轧—冷轧”计划协同优化等关键技术，实现全流程跨工序连续紧凑、动态有序运行。

（3）多能源介质梯级利用技术

研究“煤气—自发电”峰平谷协同、能源“发生单元—缓冲单元—消耗单元”动态能源调配技术、“煤气—蒸汽—电力”高效转化等关键技术，实现多介质能源能级匹配、高效利用。

（4）全过程质量极致窄窗口控制技术

研究“脱硫站—转炉—精炼炉”钢水洁净度协同控制、连铸坯偏析和夹杂质量判定、热轧材性能参数在线识别以及稳定性控制等关键技术，提升全过程钢水、铸坯和钢材的一次合格率。

（5）个性化高质量生产全流程动态协同优化系统

研制具有个性化多品种高质量动态协同、多能源介质闭环调控、全过程质量极致窄窗口控制等功能个性化高质量生产全流程动态协同优化系统，并在具备炼铁、炼钢、轧钢等工序的特钢企业进行工程化示范。

3.考核指标

技术指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

（1）协同部署 3 个及以上由本专项 2025 年度（第一批）部署的项目 3.9—3.14 研制的过程工业全流程优化软件成果，并完成工程验证。

（2）形成个性化多品种高质量动态协同、多能源介质闭环调控、全过程质量极致窄窗口控制解决方案，完成钢铁行业个性化高质量生产全流程动态协同优化应用示范。生产流程覆盖炼铁、炼钢、精炼、连铸、热轧等工序数 ≥ 10 ，覆盖生产钢种品种 ≥ 300 种，生产、能源、质量等动态管控功能模块 ≥ 100 个。

工程化指标：

到 2027 年 12 月，完成以下指标：

在钢铁企业进行工程化示范（企业钢铁产能 ≥ 300 万吨/年）。

从高炉出铁到热轧生产连续化程度提高 10%以上、生产连续化程度达到国际先进水平（ $\geq 48\%$ ）；高端特殊钢吨钢能

耗降低 3.2%；铁后碳排放强度达到短流程国际先进水平（ ≤ 0.5 吨 CO₂/吨钢）。

到 2028 年 10 月，完成以下指标：

特殊钢产品一次合格率提高 0.3%；订单交付整体周期缩短 5%；炼钢连铸区段从铁水进站到连铸开浇平均时间在原来的基础上减少 10%、连铸坯热装率提高 10%、热装温度提高 15%。

4.实施期限

本项目为 2024 年末部署项目。实施期限为 2025 年 11 月—2028 年 10 月。

5.项目设置及经费需求

拟支持 1 个项目，采用公开竞争方式。

其他来源资金（包含地方财政资金、单位自筹资金、其他渠道资金）与中央财政资金比例原则上不低于 3.5:1。

所属创新分类：应用示范研究。

中央财政资金支持方式：事前立项事后补助。

6.申报条件

牵头申报单位应为特殊钢生产企业，应与软件研发企业、系统集成商、科研院所、高等院校等联合申报，申报联合体应具备较强的专业研发团队，以及完善的试验、研究和开发条件。原则上申报项目的参与单位不超过 15 家、下设课题不超过 5 个。

