

江苏省制造业智改数转网联 大飞机部件精密铸造行业实施指南

江苏省工业和信息化厅
二〇二五年

目 录

一、背景与现状.....	1
(一) 指南适用范围.....	1
(二) 行业发展概述.....	2
二、目标与架构.....	10
(一) 总体目标.....	10
(二) 实施架构.....	11
三、基础能力.....	12
(一) 网络基础设施能力建设.....	12
(二) 数据采集能力建设.....	16
(三) 信息系统能力建设.....	20
(四) 信息安全能力建设.....	25
四、环节与场景.....	27
(一) 工厂建设(工厂数字化设计、工业技术软件化应用、数字基础设施集成、数据治理与流通).....	27
(二) 工艺设计(工艺数字化设计).....	33
(三) 质量管控(智能在线检测、质量精准追溯、产品质量优化).....	39
(四) 计划调度(生产计划优化、车间智能排产、资源动态配置).....	46
(五) 生产作业(产线柔性配置、工艺动态优化、先进过程控制).....	53
(六) 仓储物流(智能仓储、精准配送、物料信息管理).....	60
(七) 设备管理(在线运行监测、设备故障诊断与预测).....	68
(八) 安全管控(安全风险实时监测与应急处置、危险作业自动化).....	73
(九) 能源管理(能耗数据监测).....	76
(十) 环保管控(污染监测与管控、废弃物管理).....	79
五、路径与方法.....	85
(一) 实施路径.....	85
(二) 相关评估.....	91
(三) 供需对接.....	96

(四) 赋能政策	100
六、 愿景与展望	106
(一) 未来发展趋势	106
(二) 新技术应用展望	106
附件1: 人工智能典型应用场景	109
附件2: 投入改造清单及图谱	120
附件3: 典型案例	137
典型案例1: 航空发动机铸件智能制造工厂	137
典型案例2: 省级示范智能车间信息化管理系统解决方案	140
典型案例3: 熔模铸造省级示范智能车间	144
典型案例4: 熔模铸造工厂信息化管理系统建设	146
典型案例5: 大飞机航空发动机铸件生产与信息化管理	149
典型案例6: 工艺设计软件与PLM、MES、ERP系统的集成	151
典型案例7: 基于MES系统的智能排产调度	153
典型案例8: 熔模铸造模壳产线智能化协同作业	155
典型案例9: MES系统二次开发及与其他系统集成实践	156
典型案例10: 熔模铸造工厂数字化设备	161
附件4: 服务商目录	163
附件5: 技术缩略语	167
附件6: 江苏省大飞机部件精密铸造行业“智改数转网联”典型场景参考指引	170

一、背景与现状

（一）指南适用范围

《江苏省大飞机部件精密铸造行业智改数转网联实施指南》立足行业智能化改造、数字化转型与网络化联接发展现状，聚焦产品全生命周期各关键环节，包括工厂建设、工艺设计、质量管控、计划调度、生产作业、仓储物流、设备管理、安全管控、能源管理及环保管控等，通过剖析智改数转网联建设中的现存问题，遴选可改造的场景与解决方案并辅以典型场景案例，提出系统架构设计、实施路径规划建议并列举优秀企业实践案例，旨在引导企业推进智改数转网联建设，助力江苏省大飞机零部件精密铸造行业高质量发展。

大飞机制造是一种复杂系统工程，涵盖众多零部件生产，涉及铸造、锻压、粉末冶金等多种工艺，其中铸造工艺凭借其独特优势，成为制造复杂结构、耐高温、高强度、薄壁轻量化零部件的关键技术。当前，国产大飞机零部件精密铸造主要集中于航空发动机铸件。本指南所指“大飞机部件精密铸造行业”，主要涵盖航空发动机的“盘”类（如整体叶盘、叶轮盘、压气机盘）、“匣”类（如进气机匣、风扇机匣等）、“片”类（如风扇、压气机叶片、涡轮叶片）及其他关键零部件的精密铸造领域。

本指南不仅适用于大飞机零部件精密铸造行业，对其他航空航天发动机、船用燃气轮机、工业燃气轮机、汽车发动机涡

轮增压器零部件精密铸造行业同样具有指导意义，也可为其他领域采用熔模铸造工艺的零部件制造行业提供参考借鉴。

（二）行业发展概述

1、我国大飞机产业发展战略与配套体系建设

大飞机产业作为国家战略性新兴产业的核心领域，是高端装备制造业全球竞争的战略制高点，其发展不仅关乎突破卡脖子技术与提升精密制造能力，更是维护国家安全、保障战略自主的关键支撑。大飞机产业对推动国民经济高质量发展具有不可替代的战略价值，据统计，每投入1亿美元的航空工业产值，将带动相关产业产生8-12亿美元的经济效应。同时，大飞机产业对科技人才集聚、创新生态系统构建、双循环战略实施以及国家软实力提升具有显著推动作用。

我国大飞机产业正历经着从技术引进到自主创新的跨越发展。作为国家大型飞机重大专项的实施主体，中国商用飞机有限责任公司成功实现C919大型客机商业运营，标志着我国民用航空工业迈入自主研制新阶段。截至2024年底，C919已累计获得超1200架订单，C929也正稳步推进研发。这一系列成果的取得，是在党中央坚强领导下实现的重大突破，有力打破了波音、空客长期垄断的市场格局。随着我国加速推进大飞机事业规模化、系列化发展，预计未来20年，全球将新增超过4万架民用客机，我国市场需求占比有望达20%以上，产业发展前景广阔。



图1 大飞机、航空发动机及其精密铸造件

（1）双轨并行的产业格局：创新驱动的协同发展

我国大飞机航空发动机产业已形成“中国航发体系”与“市场化创新主体”双轨并行的发展格局。中国航发体系依托全产业链布局优势，汇聚了从材料研发到整机制造的专业力量。其中，中国航发商发负责商用发动机研制，航材院主攻先进材料开发，动力所、涡轮院承担核心技术攻关，黎明、成发等企业则构建起量产保障能力。

非航发体系的市场化企业同样展现出强劲创新活力。贵州安吉航空凭借精密铸造技术成为行业标杆，北京钢研高纳在高温合金领域占据领先地位。安徽应流航源、上海万泽、中超航宇等企业通过差异化技术路线，推动精密铸造产业技术创新。

（2）自主配套体系建设：提升产业竞争力的核心路径

培育自主可控的配套铸件生产体系，是提升我国大飞机制造业核心竞争力的战略举措。本土配套企业与主机厂建立深度

协同研发模式，实现从设计端到量产端的全流程优化，可显著缩短交付周期，降低库存。

从产业安全角度看，自主配套体系的完善有效化解了关键零部件进口依赖风险。在中美贸易摩擦背景下，部分航空零部件供应中断风险凸显，而国产配套体系的成熟将为产业发展构筑安全屏障。同时，随着我国配套技术水平提升，已吸引空客、庞巴迪等国际企业寻求合作，加速我国融入全球航空产业链高端环节。

（3）材料创新：驱动航空发动机性能升级的基石

在材料应用领域，大飞机航空发动机精密铸造件呈现显著的分区特性。镍基高温合金与钛铝合金凭借优异的高温性能，成为热端部件的核心材料。以涡轮叶片为例，采用定向凝固技术制造的镍基合金叶片，可在1200℃高温下长期稳定服役。钛合金则以其轻质高强特性，广泛应用于冷端结构件，使发动机重量大幅减轻。材料科学的持续创新，正为我国航空发动机性能提升提供关键技术支撑。

（4）航空发动机铸件：国产大飞机自主化的重要基础

铸件作为航空发动机核心部件的基础，其国产化水平直接影响大飞机产业链的完整性与协同效率。当前，我国航空发动机产业与美国通用电气（GE）、普惠（PW）及英国罗罗（RR）等国际巨头相比仍存在显著差距。在核心技术方面，我国航空发动机的热端部件寿命低于国际先进水平，部分关键材料依赖

进口，C919飞机的发动机仍由美国通用电气(GE)和法国赛峰集团合资的CFM国际公司提供。

为突破这一困境，我国全力推进长江系列发动机研发。对于国产的CJ-1000A发动机，目前已完成多项极端环境测试，预计在2027年前后完成适航认证，并逐步替代C919目前使用的LEAP-1C发动机。

2、我省大飞机产业配套现状、机遇与战略推进

(1) 深化与央企合作，锚定产业发展战略

江苏省积极推进央地协同，全力推动航空产业高质量发展。2023年5月31日，江苏省与中国商飞签订战略合作协议，聚焦提升大飞机关键系统研发试验能力，致力于在国产大飞机机载系统等核心领域实现技术突破。省委省政府明确指出，国产大飞机正朝着规模化、系列化方向稳步前行，鉴于航空工业产业链长、辐射范围广的特性，其已成为发展新质生产力的关键赛道。未来，江苏省将以更高战略站位、更强推进力度，深入实施创新驱动战略，推进强链补链行动，引导高校院所与企业深化合作，全力打造高水平航空产业集群，服务国家航空产业发展大局。我省制定了《航空航天产业发展三年行动计划（2023—2025年）》，新增了多个领域创新平台与企业，彰显我省在国家航空产业布局中的重要地位与发展潜力。

(2) 构建产业生态，集聚协同发展优势

在产业合作层面，江苏省成绩显著，在大飞机配套、“两

机”关键件制造、航空新材料等细分领域形成较强竞争力。目前，全省已构建起完备的航空产业体系，集聚超400家航空企业，产业规模突破千亿元。南京、苏州、无锡、镇江等地形成特色鲜明的产业集聚发展格局，大飞机规模化华东区域推进办公室落户南京。作为中国商飞重要的供应商基地，江苏省供应商数量位居全国前列，凸显其在大飞机产业配套中的关键地位。

（3）聚焦精密铸造，强化核心领域优势

江苏省在大飞机航空发动机零部件精密铸造领域优势突出，硅溶胶熔模铸造工艺应用广泛。全省拥有276家硅溶胶熔模铸造企业，其中141家为规上企业，构建起完善的区域产业链配套体系。相关企业研发与生产经验丰富，多数在其他航空航天铸件或船用燃气轮机、工业燃气轮机、汽车发动机涡轮增压器铸件生产中积累了成熟技术。据统计，江苏省有8家企业参与大飞机航空发动机零部件精密铸造工艺研发与试生产，其中4家已成功入选商飞大飞机航空发动机铸件供应商名单，具备装机铸件供应能力。从全国范围看，江苏省获此准入资格的企业数量占比约35%，在该领域处于领先地位。

3、大飞机零部件精密铸造行业发展前景展望

中国作为全球顶级航空市场，未来需求增长潜力巨大。中国商飞预测，未来20年中国市场将接收9323架飞机交付，市场价值高达1.4万亿美元。作为我国自主研发的国产干线客机，

C919 从客舱布局到航电系统均深度适配国内航空公司运营需求，在本土市场拥有显著发展优势。而处于研发阶段的宽体机 C929 等新型号，凭借创新设计与前沿技术，有望打破国际航空巨头垄断格局，推动全球航空市场形成由空客（Airbus）、波音（Boeing）、商飞（COMAC）构成的“ABC”三足鼎立新局面。

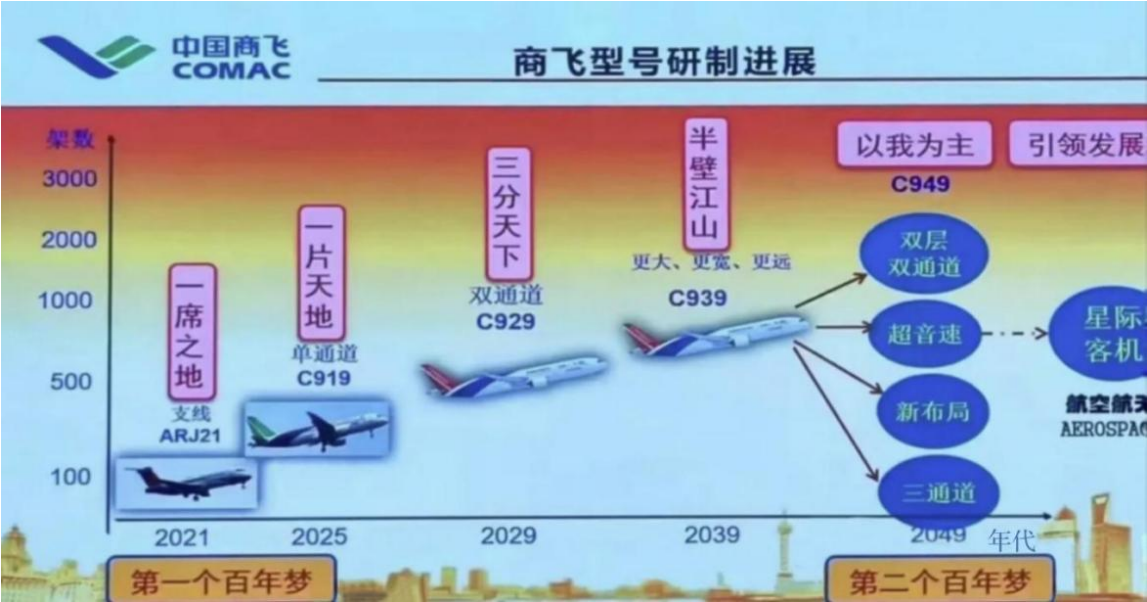


图 2 商飞大飞机研制规划

根据中国商飞 2025 年供应商大会发布的最新规划，C919 产能实现阶梯式增长：2025 年产能目标提升至 75 架，预计下线超 50 架；2026-2029 年产能分别规划为 100 架、150 架、150 架、200 架，对应下线量预计达 80 架以上、110 架、120 架以上、150 架。产能的快速扩张将强力带动上下游产业链协同发展。数据显示，中国商飞 2024 年采购额近 200 亿元，2025

年预计增长 70%，大飞机铸件装机需求将随之激增。鉴于大飞机铸件企业资质培育周期长达十年左右，江苏省把握行业机遇，加速布局，支持本土铸造企业融入大飞机制造产业链，抢占产业发展制高点。

（三）行业智能化、数字化、网络化现状

1、发展潜力与现实难点交织

大飞机零部件精密铸造企业在智改数转网联建设上展现出较强的主动性，具备一定的资金储备与设施基础，但行业发展面临多重瓶颈：关键核心工艺技术研发滞后，基础数据库与工艺库建设薄弱，产品呈现“小批量、多型号、低成品率”的特征。复杂的熔模铸造工艺涉及材料特性、温度场控制、应力变形等多维度变量，难以实现自动化精准控制。这些因素导致企业智改数转网联建设投入产出比偏低，系统运行效率欠佳，阻碍了行业智能化转型进程。

2、硬件设施与管理体系奠定转型基础

在生产硬件配置上，行业整体处于领先水平。新建厂房空间规划科学，生产线布局合理，严格遵循安全生产与环保标准，通过引入除尘净化系统、废水处理设备等，营造出清洁高效的生产环境。生产设备自动化程度达到国内外先进水平：制模工序广泛应用自动化压蜡机、数控脱蜡釜；制壳工序依托配备机器人的自动沾淋单元与输送线实现全自动化；熔化浇注环节采用先进的真空熔化浇注炉，可实现温度精准控制；检测设备涵盖三坐标测量

仪、蓝光三维扫描仪、工业CT等先进自动化检测设备；仓储物流方面，部分企业建成智能化立体仓库，并实现智能AGV小车物料配送。

在管理系统建设中，企业普遍重视质量管理与安全规范，已全面通过ISO9001质量管理体系、GJB9001C军工质量管理体系、ISO14001环境管理体系、ISO45001职业健康安全管理体系认证，并深入推行精益生产管理模式。鉴于军品生产属性，企业多为二级保密单位，构建了完善的信息安全架构，设立专业信息化管理部门，接入5G高速网络，建立了与外网物理隔离的局域网，部分企业还搭建了工业以太网，为数据安全与生产协同提供保障。

3、业务环节数字化发展水平不均衡

从业务流程来看，产品设计环节主要由上游主机制造企业主导，在工艺设计方面，CAD、CAE、CAPP等数字化工具已成为标配，应用覆盖率达95%以上，部分关键装备引入CAM技术；ERP系统在企业管理中广泛应用，实现采购、库存、财务等模块的集成管理。此外，部分企业根据生产需求，集成应用MES、PLM、APS等系统，实现生产全流程的数字化管控。

4、企业间发展梯度分化显著

企业在智能化、数字化和网络化水平上呈现两极分化态势。

大型企业：航发体系内国企及大型民营上市企业凭借雄厚的资金与技术实力，在研发、生产、管理等环节积累了丰富经验。这些企业在智改数转网联建设上累计投入超亿元，已构建起较为

完善的信息化管理体系。例如，航空工业某下属企业搭建的数字化工厂平台，实现了设计、生产、质量等全流程数据贯通。但仍面临数据孤岛、系统协同性不足等问题，不同系统间数据交互效率仅为人工处理的30%，在设计制造一体化、产供销联动、运维管理协同等方面亟待优化，未来将向数据深度挖掘、智能化升级、核心软件自主可控等更高阶目标迈进。

中小型企业：生产规模较小的民营企业多处于发展初期，主要承接零部件试制或小批量生产任务，生产线利用率不足50%。其数字化应用主要集中于工艺研发与产品测试环节，部分企业依托高校科研力量自主开发数字化技术，并引入自动化设备与简易数据采集系统。尽管已初步具备智改数转网联基础，但受限于规模与资金，现阶段建设需求尚不迫切，需伴随行业发展逐步完善。随着国产大飞机订单量的突破，预计将在未来5年迎来产业智能化改造的关键窗口期。

二、目标与架构

（一）总体目标

国家《“十四五”智能制造发展规划》明确提出战略目标：到2035年，实现规模以上制造业企业数字化网络化全面普及，重点行业骨干企业基本达成智能化转型。江苏省委、省政府积极响应，在《加快建设制造强省行动方案》中部署智能升级行动，聚焦打造智能制造标杆企业，强化产业链网络化协同能力，推动中

小企业数字化转型全面覆盖，为全省制造业高质量发展注入新动能。

我省紧扣《江苏省深化制造业智能化改造数字化转型网络化联接三年行动计划（2025—2027年）》，为大飞机部件精密铸造行业制定智改数转网联近期规划：以设备更新、工艺革新、数字技术融合、生产模式创新为核心，推动数字技术在工厂建设、研发设计、生产运营、经营管理及绿色发展等全链条关键环节的深度应用。依托工业互联网平台，实现生产要素的高效互联与协同。基于行业发展基础与市场趋势，设定本行业2027年底量化目标：设备数字化率提升至40%，设备联网率达到30%；智能工厂建设实现阶梯式发展，基础级、规范级、先进级及以上智能工厂占比分别达 65%、25% 和10%。通过持续创新驱动，构建智能化、数字化、网络化生产新模式，全面提升行业综合竞争力，培育新业态、新模式，激发产业发展新动能。

（二）实施架构

江苏省大飞机零部件精密铸造行业智改数转网联系统实施整体架构如图 3 所示，通过深度融合自动化、信息化、网络化等前沿技术，构建起生产过程智能化、高效化、柔性化的新型工厂模式。该架构的实施，贯通工厂建设、工艺设计、质量管控、计划调度、生产作业、仓储物流、设备管理、安全管控、能源管理、环保管控等关键环节，实现各层级业务协同联动、资源优化配置、过程实时监控、数据互通共享与可视化管理，

以工艺创新与装备升级为核心，以数字化为根基，依托制造单元、车间及工厂等载体，深化新一代信息技术与行业的融合应用，打造虚实交融、知识驱动、动态优化、安全可靠的智能制造系统，有力推动新一代信息技术与行业的深度融合和高质量发展。



图3 大飞机零部件精密铸造行业智改数转网联实施总体架构

三、基础能力

(一) 网络基础设施能力建设

1、企业内网

企业内网作为工厂或园区内部的核心网络，承担着生产、办公、管理及安防等多场景连接，实现生产要素互联互通与企业IT管理系统高效协同任务，其建设核心聚焦于车间层与企业层两大关键层级。

车间层网络优化策略：针对实时设备监控、自动化控制、工

业视觉分析及能耗管理等新兴业务需求，当传统工业控制网络难以满足时，可灵活采用两种升级模式。其一为**叠加模式**，借助5G、时间敏感网络（TSN）、工业无源光网络（工业PON）、确定性网络、软件定义网络（SDN）及工业无线等前沿技术，在现有网络架构上构建新型业务支撑网络。例如，基于工业无线网络，在自动控制网络基础上增设智能传感器与高清工业相机，实现机械臂、自动喷淋等设备的运行状态实时监测，为设备全生命周期管理及故障预测性维护提供数据支撑。其二为**升级模式**，通过对机械臂、自动喷淋等传统生产设备进行改造，加装通信接口，实现网络技术升级，如将模拟式仪表替换为5G智能仪表，可实现工艺参数在线监测、工序信息即时交互、质量缺陷自动判定及质量控制模型开发等功能。

企业层网络架构方案：企业层网络架构通常采用经典的**三层网络架构**，即核心层、汇聚层与接入层，构建园区主干网络（见图4）。其中，核心层设备部署于企业数据中心，负责高速数据传输；汇聚层设备分布于区域汇聚机房，实现网络流量汇聚；接入层设备设置在车间设备间（工业互联网边缘设备间），连接终端设备。此外，企业也可选择**大二层扁平化架构**，结合SDN技术实现网络管理的灵活配置与极简运维，有效降低管理复杂度。针对高可靠性、大带宽需求，企业可按需建设5G专网，以高性价比方案打造优质无线网络环境。在数据处理方面，建议企业数据中心采用云边协同技术，将办公、生产及安防系统进行云化部署，

实现数据的高效汇聚、智能分析与实时交互。

各层级网络技术选型建议：核心层推荐采用支持TSN的高端工业以太网交换机，提供100G/400G高带宽、低延迟传输及冗余链路保障，确保生产调度等关键业务稳定运行；汇聚层部署工业以太网三层交换机，实现办公网络（IT）与产线控制网络（OT）的深度融合；接入层则根据业务场景差异灵活选择：在低数据量、高实时性场景中，采用Profibus、CANopen等现场总线技术，以单根电缆简化布线；在高带宽、确定性通信场景（如视觉检测系统）中，部署支持微秒级同步的工业以太网（如TSN交换机），满足复杂业务需求。

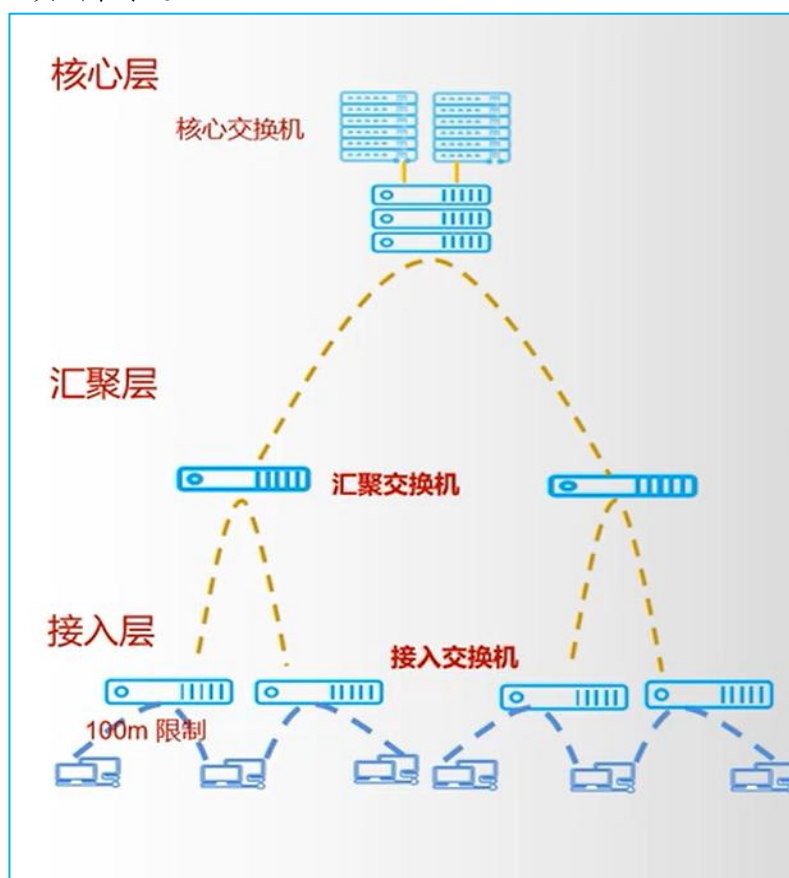


图4 企业内网拓扑结构

2、标识解析体系建设

工业互联网标识解析体系作为连接物理世界与数字空间的核心枢纽，是实现全要素互联互通的关键基础设施。该体系由标识编码、标识解析系统和标识数据服务三大核心模块构成，通过为物料、设备、产品等物理资源，以及工序、软件、算法模型等虚拟资源赋予唯一标识编码，实现实体与虚拟对象的精准定位和信息高效检索，从而打破企业、地域及行业间的数据壁垒，推动数据的深度共享与协同应用。

车间层：构建标识解析基础生态。车间层的标识解析体系建设聚焦设备侧与边缘侧双维度。设备侧通过RFID标签、二维码等载体，结合数据采集终端，依托企业节点标识注册功能，对大飞机零部件精密铸造产业链中的物理实体（如生产设备、作业人员、成品和半成品）与虚拟实体（如生产订单、物流单据、工艺模型）实施“一物一码”精准标识。边缘侧部署标识解析中间件，实现数据对象的标准化管理与有序流转，同时提供标准化接口与CAD、MES等工业软件无缝对接，快速赋能企业构建标识注册、解析能力，为生产全流程数据追溯奠定基础。

企业层：打通内部数据协同链路。企业层面需通过独立建设或委托托管的方式，搭建企业级标识解析节点，并接入行业二级节点。企业节点深度整合设备侧与边缘侧能力，横向贯通ERP、PLM等内部工业软件及工业互联网平台，形成集标识注册、解析查询、统计分析、数据存储于一体的综合性服务能力，构建企业

专属标识数据资源池，实现生产要素数据的统一管理与高效调用。

产业层：构建分级管理服务网络。产业层面鼓励行业龙头企业或具备技术服务能力的机构申请建设行业二级节点。作为连接国家顶级节点与企业节点的桥梁，二级节点承担服务器搭建、日常运维及服务供给职责，面向企业和个人提供标识注册、解析及数据管理服务，通过“分级管理、全网联动”模式，实现跨企业、跨行业的标识解析服务全覆盖，推动产业链协同升级。

实施建议：企业节点建设。企业应基于工业互联网标识解析体系，打造独立的企业级节点，重点实现压蜡机、熔炼浇注炉等核心设备，以及产品、工艺参数的唯一编码管理，确保生产数据的精准标识与高效追溯。**编码规则设计**采用“设备编码+工艺参数编码+批次码”复合编码规则，将涡轮叶片、机匣等核心铸件的生产工艺参数（如熔炼温度、浇注时间）、质量检测数据与产品批次深度关联，实现全生命周期质量追溯与工艺优化。

（二）数据采集能力建设

数据采集是数字化基础能力建设的重要一环，智能制造的价值很大程度上取决于采集数据的数量和质量。在工业企业中只有少部分数据来自互联网，大部分是企业自身拥有的生产经营环节的数据，数据通过新技术如人工智能处理后，可使工业企业更全面更迅捷掌握自身经营情况。

生产车间是工业企业产生和运用数据的重要场所，这些数据既包括MES等信息化系统里运行与产生的数据，也包括生产设备产生的各种状态与制造参数等数据。结合知识、模型对数据进行进一步处理和挖掘，以量化、可视化等方式，定位生产中存在的问题并进行优化，可通过哑设备改造和智能设备网联加强数据采集能力建设。

1、哑设备改造

哑设备是指缺乏数据采集、远程监控及通信能力的传统设备，导致生产状态、故障信息无法实时获取，形成信息“孤岛”。哑设备改造的目的是实现设备运行状态、工艺参数的实时采集与传输，支持设备远程启停、故障诊断及预测性维护，打通设备数据与MES/ERP系统，优化生产调度与资源分配。

建议通过对现有设备进行技术评估，筛选初期需改造的哑设备，并制定分阶段改造计划，优先升级高危、高能耗设备。

加装数据传感器。在选定的哑设备上加装高精度传感器（如红外测温仪、压力传感器），覆盖温度、压力、位移等关键参数。通过工业网关兼容PROFINET、Modbus等协议，实现异构设备联网（如模壳预烧炉与熔炼浇注炉）。在车间侧配置边缘服务器，实现数据预处理与实时反馈（如熔炼炉温度波动毫秒级调整）。

数据采集模块集成。在加装传感器的基础上，进一步集成数据采集模块，将传感器采集到的模拟信号转换为数字信号，

并通过有线或无线方式传输到数据采集系统中。数据采集模块的选择应根据设备的实际工况和采集需求，确保数据的准确性和实时性。

设备联网与数据传输。通过工业以太网、5G、Wi-Fi等通信技术，将改造后的“哑设备”接入企业内部的工业互联网平台，实现设备数据的实时传输和集中管理。通过设备联网，企业可以实时监控设备的运行状态，及时发现异常情况，避免设备故障导致的生产中断。

数据存储与管理。采集到的设备数据需要进行有效的存储和管理。企业可以建立本地或云端的数据库，存储设备的历史运行数据，并通过数据管理平台对数据进行分类、归档和分析。数据的长期存储为设备的故障诊断、性能优化和预测性维护提供了数据基础。

2、智能设备网联

将大飞机零部件精密铸造设备联网，并实现数据的归集、分析和利用，是企业提升数据采集能力的关键。

实用的联网技术。可以通过工业网关适配PROFINET、Modbus等协议，实时读取核心装备（如熔炼炉、压蜡机等）的工艺参数。采用以太网或串口连接工控机与PLC，实现铸造产线设备的集中调度与指令下发。针对支持以太网接口的数控设备（如定向凝固熔炼浇注炉），通过TCP/IP协议实现毫秒级数据传输。对无通信接口的设备，部署IO模块采集开关量信号（如

电流超限报警），转化后通过工业Wi-Fi路由器传输。在边缘计算节点（如工业网关）执行数据清洗、异常值过滤，例如剔除熔体温度传感器的瞬态干扰数据。建立统一数据模型，将异构设备参数转换为标准OPC UA格式，支持跨系统调用。

数据采集模块的扩展应用。在智能设备联网的基础上，企业可以进一步扩展数据采集模块的应用范围。通过加装更多的数据采集模块，企业可以采集到更多的设备运行参数，如电流、电压、功率等，进一步提升数据的全面性和准确性。同时，数据采集模块还可以与企业的MES、ERP等系统进行集成，实现数据的无缝对接和共享。

工控机的数据归集与处理。工控机作为工业现场的数据处理中心，能够对多台设备的数据进行集中采集和处理。通过工控机，企业可以实现对设备运行数据的实时监控、分析和存储，并生成各类报表和趋势图，帮助企业管理者及时了解生产状况，做出科学决策。

数据分析与利用。数据采集的最终目的是为了分析和利用。企业可以通过大数据分析技术，对采集到的设备数据进行深度挖掘，部署轻量化AI算法（如LSTM神经网络），基于历史数据预测设备运行中的潜在问题和优化空间。还可以通过数字孪生技术构建铸造工艺仿真模型，动态优化工艺参数（如浇注速度误差控制）。此外，数据分析还可以为企业的生产计划、质量控制、供应链管理等提供数据支持，全面提升企业的运营

效率。

（三）信息系统能力建设

1、基础架构

大飞机零部件精密铸造企业信息化管理系统的基础架构通常是ERP（企业资源计划）与MES（生产制造执行）集成系统。

ERP系统是制造企业的核心管理软件，旨在协调和整合企业各个方面的业务流程。**ERP系统**的基本思想是以销定产，协同管控企业的产、供、销、人、财、物等资源，优化业务流程，实时数据共享和分析，提升管理效率和决策能力。

MES系统负责承接ERP系统下达的生产计划，根据车间需要生产产品的制造工艺，以及生产设备的状况进行科学排产，并支持生产追溯、质量信息管理、生产报工、设备数据采集等闭环功能。如可以实时采集铸造产线数据（如高温合金熔体温度、浇注速度等），通过统计过程控制（**SPC**）算法优化工艺参数，提升涡轮叶片、机匣等核心铸件的合格率。

2、其他常用信息化管理系统

根据企业生产规模和管理需求，大飞机零部件精密铸造企业在应用ERP与MES系统基础上，还可以集成**CAPP**（计算机辅助工艺规划）系统、**PLM**（产品生命周期管理）系统、**APS**（高级计划排程系统）、**EMS**（设备管理系统）、**QMS**（质量管理系统）、**EnMS**（能源管理系统）、**WMS**（仓库管理系统）等

信息化管理系统。

CAPP 系统是以计算机为辅助手段，将产品设计数据（CAD）转换为面向制造的工艺指令（CAM），是连接设计与制造的关键桥梁。其核心功能包括工艺规划：基于零件几何信息、加工条件及企业资源，生成工艺路线、工序内容等；知识管理：通过知识库（如产生式规则、框架模型）存储工艺经验，支持推荐优化工艺方案；数据集成：与 PLM、ERP 等系统对接，实现 BOM 管理、资源调度等协同作业。

PLM 系统是通过信息技术对产品从概念设计、生产制造到报废处置的全生命周期进行集成化管理的系统，旨在实现产品数据、流程及资源的协同优化，本质是构建数字化主线，打通企业内外部数据孤岛，形成从研发到服务的闭环管理体系。其核心功能包括数据管理：统一管理产品结构（BOM）、设计图纸、工艺文件等数据，支持版本控制与全局检索，并集成 EDM（图纸文档管理）、PDM 模块实现多源异构数据标准化；流程协同：通过 workflow 引擎实现跨部门协作，例如生产变更审批、项目任务分发等，并支持与 ERP、MES 系统联动，优化资源配置与生产计划；生命周期管理：覆盖产品从开发测试到退市管理各阶段，并提供数据分析工具，辅助决策产品迭代与成本优化。为进一步提升 PLM 系统的效能，建议在建设过程中注重构建统一的协同平台，实现各环节的信息联通；同时，引入实时数据分析和可视化工具，加强对研发流程和项目进展的监

控，实现自动化流程管理和风险预警。

APS系统是通过数学算法与智能化技术，在有限资源约束下优化生产计划与排程的系统，旨在提升制造效率与资源利用率。其核心功能包括动态排程优化：基于产品制造的制造BOM、工艺规划、实际工时和设备的实际产能等约束条件，实时生成可执行的生产计划和资源调度，支持紧急插单与异常响应；供需平衡管理：基于需求预测与产能分析，实现订单交期承诺与库存周转率优化；多系统协同：集成ERP、MES、PLM等系统数据，打通从订单到车间执行的数字化链路。建议在实施前确保基础数据准确，并引入先进优化算法和实时约束管理机制。

EMS系统是通过数字化技术对设备的全生命周期进行综合管理的系统，覆盖设备采购、安装、运行、维护到报废的全过程，旨在提升设备利用率、降低运维成本并保障生产稳定性，核心价值在于通过数据驱动决策，实现设备管理的标准化、智能化与可视化。其核心功能包括全生命周期管理：支持设备台账管理，记录设备基本信息（型号、规格、供应商等）及使用状态（运行、停机、维修等），并管理设备采购、安装调试、维护计划及报废处置流程，延长设备使用寿命；智能化监控与预警：通过物联网（IoT）技术实时采集设备运行参数（温度、压力、能耗等），结合传感器实现动态监控，并基于数据分析预测设备故障风险，自动生成维护工单并分配任务，减少非计划停机；数据驱动决策：提供多维度数据分析工具（如故障率

统计、能耗趋势分析），生成可视化报表辅助管理优化，并通过历史数据回溯与模拟仿真，优化维护周期与备件库存配置；
协同与集成：与ERP、MES等系统联动，实现设备状态与生产计划、资源调度的动态匹配，并支持跨部门协作（如维修工单流转、采购申请审批），提升响应效率。建议构建设备状态实时监控和预警机制，整合台账与维护记录，并加强与MES、ERP系统的数据联动，通过数据分析优化维护策略，提升设备安全性和使用效率。

WMS系统是通过数字化技术对仓库内货物、流程及资源进行全流程管理的软件系统，旨在实现仓储作业的自动化、精准化与可视化，核心价值在于通过优化库位分配、拣货路径规划及库存周转，提升仓储效率并降低运营成本。其核心功能包括入库管理：支持采购入库、退货入库等多种场景，通过扫描设备（如RFID）自动核对货物信息与订单一致性，减少人工录入误差，并结合质检流程，对异常货物自动触发拒收或换货流程；出库管理：基于订单优先级与库存分布生成拣货任务，规划最优拣货路径，缩短作业时间，并支持波次策略（如按订单类型或时效性合并拣货），提升批量处理效率；库存优化：动态管理库位分配，利用算法推荐货物存放位置以提升空间利用率，并自动跟踪批次效期，预警临期商品并优先执行先进先出（FIFO）策略；系统集成与协同：与ERP、MES等系统联动，实现订单、物流与库存数据的实时同步，并支持多仓库协同管

理，统一调配资源以应对跨仓调拨需求。

QMS系统是通过标准化流程与数字化工具，对产品全生命周期质量活动进行系统化管理的体系，其核心目标是实现质量控制的预防性、可追溯性与持续改进。QMS以ISO 9001、GJB9001C等标准为基础，覆盖从设计研发、供应商管理到生产制造、售后服务的全链条质量管控。其核心功能包括来料检验：基于供应商绩效数据自动触发检验规则，拦截不合格原材料，降低生产风险；过程质量控制：通过统计过程控制实时监控生产参数，结合AI算法预测异常并触发预警；售后质量管理：集成客户投诉数据，实现问题批次快速溯源与改进闭环；标准化与合规性：内置ISO等标准文档模板，支持质量手册、程序文件等电子化审批与版本控制，并自动生成审核报告，满足国内外法规的合规性要求；数据驱动决策：整合ERP/MES系统数据，构建质量看板（如缺陷率趋势、成本损耗分析），并支持PDCA（计划-执行-检查-改进）循环，通过根因分析推动流程优化。如基于三坐标检测、蓝光扫描检测、金相分析、X射线检测、荧光检测等数据构建质量知识库，自动生成质量报告并触发工艺改进闭环（如铸造缺陷根因分析）。

EnMS系统是通过数字化技术对能源消耗进行实时监测、分析与优化的综合管理系统，覆盖电力、燃气、水等各类能源的全生命周期管理，旨在提升能源利用效率、降低运营成本并减少碳排放，核心价值在于通过数据驱动决策实现能源使用的

透明化、智能化和可持续化。其核心功能包括实时监控与数据采集：通过物联网（IoT）技术集成传感器、智能电表等设备，实时采集水、电、气等能源消耗数据，支持远程监控与异常预警，同时分项计量功能可细化统计照明、空调、动力设备等不同场景的能耗占比，为节能审计提供依据；能耗分析与优化：基于大数据分析生成能耗趋势报告（如峰谷用电记录），识别高耗能环节并提出优化建议（如调整设备运行时段），并能通过AI算法模拟节能方案效果，动态调整能源分配策略（如平衡生产与能耗成本）；智能控制与调度：支持能源供需平衡管理，实现多能源系统（如光伏+储能）的协同调度与优化运行，并集成设备控制功能，自动调节空调、照明等系统运行参数以降低无效能耗；合规与碳排管理：内置碳排放计算模型，追踪企业碳足迹并生成环保合规报告，并满足国际标准及行业规范，规避监管风险。

（四）信息安全能力建设

大飞机零部件精密铸造行业在实施智改数转网联中，应根据网络安全、数据安全等要求，针对企业网络与数据安全风险高、防护能力弱等问题，实施工业互联网安全和数据分类分级管理，部署工业控制系统网络安全防护设备，建设数据安全风险监测和应急处置能力，应用安全态势感知、多层次纵深防御等技术，实现全方位全流程安全漏洞监测、风险防控、快速处置，提升信息安全防护水平。安全功能架构可参考图5。



图 5 安全功能架构

信息安全能力主要从设备安全、控制安全、网络安全、平台安全、应用安全和数据安全方面进行建设，以及贯穿于整个层级的安全管理、安全评测（漏洞扫描、漏洞挖掘、渗透测试、上线检测）和安全态势感知与风险监测（安全配置、资产管理、安全检测与审计、态势感知、风险预警）。

设备安全： 主要关注边缘智能设备安全，设备涉及无人行车、工业机器人、智能仪表以及其他类型智能设备。硬件方面采用经过安全增强的设备固件，从操作系统内核、协议栈等方面进行安全增强，软件方面应关注工控设备的安全漏洞及补丁发布。

控制安全： 主要关注过程控制安全，包含终端工控机、工控系统及组态软件等，可采用控制协议分析、软件安全加固、控制指令安全审计等安全管理策略。

网络安全：主要关注生产现场网络安全、制造资源接入安全、跨生产基地网络安全、跨企业通信安全等，可采用边界控制、通信和传输保护、接入认证授权保障等策略。

平台安全：主要关注平台设备与系统安全接入、工业云平台基础设施安全、平台数据安全等。此外，应同步做好涉及全要素的安全管理、安全评测和安全态势感知与风险监测等工作。

应用安全：主要关注平台边缘接入安全和运行安全，确保企业经营管理、产业链供应链协同等各类业务的应用安全，可采用用户授权管理、代码审计、虚拟化安全等策略。

数据安全：主要关注边缘智能仪表数据采集与传输安全、企业客户数据、员工数据、财务数据等敏感数据的安全，可采用数据防泄漏、数据加密、数据备份恢复等策略。

四、环节与场景

（一）工厂建设（工厂数字化设计、工业技术软件化应用、数字基础设施集成、数据治理与流通）

在大飞机零部件精密铸造企业的工厂建设过程中，涉及到工厂数字化设计、工业技术软件化应用、数字基础设施集成以及数据治理与流通等场景。每个场景都承载着提升生产效率、降低成本、保证产品质量的核心任务。要提升生产流程效率，确保大飞机铸件的高精度、高质量的生产，工厂的数字化和智能化改造至关重要。

1、存在的问题

在工厂数字化设计场景，工厂设计时基于传统经验或较为简单的工具，未引入应用高度灵活的数字化设计工具进行工厂数字化设计，效率低下，无法实时跟踪生产需求变化或对生产线的优化不足，导致资源浪费和生产调度不合理。

在工业技术软件化应用场景，部分工厂软件系统存在信息不互通和集成性差情况，生产数据与管理系统之间缺乏有效对接，导致工厂管理信息化水平低，无法通过数据分析实时监控生产进程和质量。

在数字基础设施集成场景，数字基础设施建设滞后和分散，现有的设备与新技术的集成度不高，数据流通不畅，导致不同系统之间的数据不能互联互通，难以形成跨部门协作。

在数据治理与流通场景，工厂内外部的数据治理不完善，治理机制不健全，数据流通和访问权限设置不合理，难以保障数据安全和准确性，数据存在重复、错误或丢失的现象。

2、改造场景

在工厂数字化设计场景，通过计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助制造（CAM）技术，结合虚拟现实（VR）与增强现实（AR），实现虚拟工厂布局的实时设计与优化。设计师可以使用数字化仿真工具（如 Siemens Tecnomatix、Dassault Systèmes Delmia）对铸造生产系统和生产过程进行模拟和优化。通过虚拟仿真系统测试不同生产流程和生产资源配置对铸

件质量、生产周期的影响，以精确预测并优化生产工艺和生产空间，降低设计风险，提升工厂资源利用率。

在工业技术软件化应用场景，通过引入智能化ERP与MES等系统，实现从物料管理到生产调度、质量控制、人员管理等一体化的信息管理，提高系统间的数据流通和协同作业效率。使用云计算和大数据技术，将工厂生产数据、供应链数据及质量检测数据集中到云平台，利用数据挖掘技术提供决策支持，进行实时分析与反馈，减少生产中不必要的中断和浪费。

在数字基础设施集成场景，建设高速稳定的工业网络基础设施，将物联网设备（如传感器、RFID、智能仪表）与企业的核心系统集成。通过工业以太网或5G通信网络实现设备、生产线与云平台的高效连接。结合边缘计算设备，在生产现场实时处理数据，减少数据传输延迟。

在数据治理与流通场景，通过建立统一的数据标准化管理平台，实现不同系统、设备和生产环节数据的标准化，确保数据的一致性和准确性。通过数据中台技术整合生产、质量、库存等数据资源，提升数据的流通效率。采用加密技术（如SSL/TLS加密、数据加密存储等）保障工厂内外部数据的安全性，同时实施严格的身份认证、访问控制等措施，确保数据的隐私性和合规性。

3、解决方案建议

对于小批量生产企业，引入先进的ERP和MES系统，实现

信息共享与生产调度优化。通过数据集成平台，加强各生产环节的协作，确保工艺设计、生产、质量、物流和设备信息的高效流通。

对于中批量生产企业，完善数字基础设施建设，构建高速网络基础设施，集成IoT设备和云计算平台，确保数据的实时采集和传输。通过边缘计算技术减少延迟，提升生产效率。

加强数据治理与安全，建立统一的数据治理框架，实施数据标准化，确保生产数据的准确性和可追溯性。通过强化数据安全和隐私保护措施，防止信息泄漏与滥用。

对于大批量生产企业，加强数字化设计能力，通过引入先进的CAD/CAM、虚拟仿真平台和工艺仿真工具，提升工厂的设计灵活性和优化效率。通过数字化设计，避免传统设计中的过度依赖经验和手工调整，提升生产线配置和资源调度的科学性。

工厂数字化设计与交付

某公司通过建立工厂三维数字化模型、产线生产仿真、物流系统仿真，实现工厂数字化设计与交付。

建立工厂三维数字化模型。集成厂房BIM建筑、制模、制壳、熔炼浇注、后处理车间厂房模型、智能产线模型以及自动化压蜡机、制壳单元、数控真空铸造炉等设备模型，实现工厂规划直观呈现，避免传统二维方式导致的设备布局干涉、作业空间交叉等问题，确保规划布局的合理性。

开展产线生产仿真。根据产品工艺流程和生产模式，建立产线生产模型，对产线工序节拍、瓶颈工序、线平衡率、生产设备负荷率等进行仿真分析，并进行迭代优化设计。

开展物流系统仿真。建立蜡模组树线、制壳单元等的物流系统仿真模型，对物流运行效率、AGV车辆负荷率、物流路线拥堵状态等进行仿真分析和优化改进，解决拥堵等待问题，减少AGV配置。

实现工厂数字化模型交付。开发工厂全生命周期数据管理的数字交付平台，实现工厂规划设计数据、建设管理数据和运维使用数据同源。平台交付的厂房、产线、设备等模型直接用于后期产品工艺仿真、数字孪生工厂和运维管理。

航空发动机铸件熔模铸造工厂信息化管理系统

某航空发动机铸件制造公司按二级保密单位管理，设立了信息化管理部门，建立了内部局域网，局域网与外部物理隔离，远程总部与当地生产基地设专线网络。车间内的MES系统、WMS系统、AGV系统、LES系统通过数据集成平台MDI与车间外ERP系统、OA系统的集成互联，实现销售、数字化设计、采购、仓储与生产的互联互通，实现车间内外联动协同、一体化管控。

业务信息系统建设与应用如图6，由智能决策层、数据中心层、业务系统层、物联网层、智能设备层组成。

智能决策层，建立了智能工厂虚拟呈现与漫游，实现了部分功能的应用和虚拟工厂的可视化。企业级决策分析平台PCT，根据企业级制造数据集成平台MDI和办公自动化系统的数据开展决策分析，暂未实现大

数据应用分析。移动终端实现了实时状态、实时绩效、实时异常的可视化。

数据中心层由企业级制造数据集成平台MDI和自动化办公系统OA组成。数据来源于业务系统层。制造大数据应用分析系统暂未实施。

业务系统层为企业资源计划系统ERP与智能制造运营管理平台IMOM集成。其中智能制造运营管理平台IMOM由设备管理系统EMS/工模具管理系统/能源管理系统EnMS/物流协同系统LES/质量管理系统QMS/高级排程系统APS等集成。APS与AGV自动配送,以及WMS、WCS自动仓储系统集成。工艺设计在总部研究院。

物联网层建立了数据采集与监视控制系统,包括OPC通讯协议、PLC可编程逻辑控制器、RFID射频识别(扫码枪)、可视化监控看板。

智能装备层实现了压蜡机、凝壳炉、炉前型壳预热炉的数据联网自动采集。实现了模具、产品的射频识别和数据自动采集。实现了模具、产品的AGV小车自动配送。建立了模具、产品的自动化立体仓库。

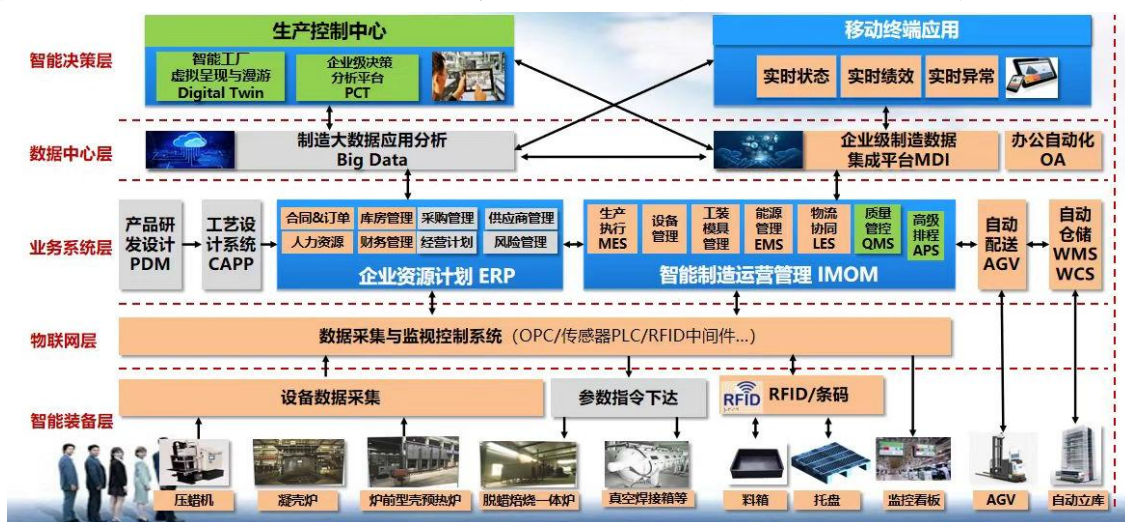


图6 信息化管理系统架构

(二) 工艺设计 (工艺数字化设计)

大飞机零部件精密铸造行业接到客户的订单、图纸和技术要求后，开展铸造工艺设计。大飞机航空发动机作为大飞机的心脏，是其机动性、航程、可靠性、经济性及环境影响的决定因素之一，其铸件具有薄壁、结构复杂等特点，要求高精度、高强度、高耐热、高耐腐蚀性、高可靠性。因此，工艺设计是铸件生产的关键核心环节之一。

1、存在的问题

在工艺数字化设计场景存在如下问题：

设计效率低，试验成本高。熔模铸造工艺设计环节多，主要包括铸件设计、蜡模工艺设计、压型设计、浇冒口系统设计、浇注工艺设计、检测工艺设计、数字化缺陷表征等。熔模精密铸造过程流程长，需要经历蜡模模具设计及制作、蜡模成型、蜡模组装、浇冒口系统组装、沾浆、淋砂、焙烧、浇注、浇冒口去除、热处理、质量检测等三十多道工序，中间经过三类材料成型，三次尺寸传递，工艺周期长，试验成本高，对于复杂几何形状与特殊质量要求的项目，依赖经验和试错的设计方法，要做大量人工计算和现场试制等重复性工作，生产过程中的缺陷难以提前发现和解决，增加了项目开发的风险。

协同工作难，数据管理差。企业在铸造工艺设计过程中，虽然部分环节已经开始应用CAD和CAE软件，但整体设计过程的数字化水平仍较低，设计、生产和质量检测的不同阶段之间

缺乏高效的信息共享和流转，容易导致数据丢失和设计变更的滞后，缺乏对数据的有效处理和优化手段。另外，从零件设计的初始阶段，协助主机厂的产品设计师了解铸造工艺性，进而设计出更适合铸造工艺的零件，在铸造厂参与主机厂的并行设计方面，还缺乏行之有效的沟通渠道。

知识管理难，可制造性差。难以利用大数据和知识库，不能充分考虑实际生产时可能遇到的诸如蜡模模具制造、蜡模压制、铸件浇注情况、铸件缺陷判断及质量评估、后处理、铸件基准加工，以及能耗控制、污染排放控制中的困难，设计方案现场精准落实难。

2、改造场景

在工艺数字化设计场景，有如下改造工作：

铸件图设计。大飞机零部件精密铸造企业收到主机厂的零件图，需要根据技术要求和经验设计铸件图。使用铸造过程模拟分析软件（ProCAST、MagmaSoft、Flow-3Dcast、AnyCasting、SolidCast、华铸CAE等软件）对零件开展凝固模拟，找出零件内部热节点分布等信息，结合机加工等工艺数据库，添加合适的加工余量，设计铸件图，帮助设计人员提前识别出影响铸件生产以及后续机械加工的潜在问题，如模具复杂度、铸造工艺性、加工难度等。首先，通过加工余量、工艺补贴等设置，设计出铸造工艺性较好，又容易加工，零件整体制备相对成本最优的铸件。另外，为主机厂零件设计师提供量化的改进建议，

优化产品设计，提高铸造生产的可行性，避免在后期制造过程中因设计缺陷造成的高昂成本。

铸件、蜡模、压型及浇冒口三维建模。铸造厂在获取零件3D数模后，使用CAD软件（例如UG NX、CATIA、SolidWorks等）进行铸件、蜡模、压型、有时还需要陶瓷芯的三维建模。工艺设计人员能够在数字环境中精确绘制出铸件、蜡模、蜡模模具、蜡模拼接工装、浇冒口的三维形状、尺寸和结构，确保设计精度。

虚拟铸造与仿真。影响铸件质量的因素众多，需要通过数值模拟软件（ProCAST、MagmaSoft、SolidCast、华铸CAE等），虚拟展示铸造的全过程，分析金属液在铸型中的流动过程、铸件及铸型的温度变化、铸件凝固过程及其不均匀冷却导致的应力应变等，提前发现潜在的铸造冶金缺陷及尺寸变形，优化铸造工艺参数，提高设计精度，减少实体试制和后期返工，降低时间和资金成本。

蜡模压制的数字化仿真可采用Moldflow等模拟软件，研究蜡料流变性、粘弹性及PVT特性；揭示蜡模完整充型、尺寸超差和变形的机理，帮助构建整套蜡模压制工艺方案。

模壳制备过程中，可采用沾淋路径的数字规划，精确控制蜡模/型壳浸入浆液的角度、旋转速度、旋转方向、出浆角度及旋转控浆速度，实现全自动均匀涂挂，确保型壳的高质量及其稳定性。

开展铸造系统全过程误差流建模，建立铸造全过程误差流状态空间模型，定量分析误差传递，通过误差流状态空间模型仿真计算，确定各级关键尺寸误差变化规律，实现铸造全过程误差传递的定量分析。

壳型设计、工艺参数匹配及缺陷控制优化。采用计算机辅助工艺设计CAPP系统对壳型设计、工艺参数匹配及缺陷控制进行优化。优化模组焊接角度（防止熔模碰撞）和型壳局部加固方案。根据铸件特征（如最小壁厚）自动匹配制壳干燥时间梯度（每层4-24小时），并生成设备调度逻辑。集成ProCAST模拟浇注过程，预测缩松风险区域（如叶根部位），触发浇口位置调整建议。

基于铸件三维模型自动生成壳型结构，结合蜡料收缩率和合金收缩率计算型腔补偿量。采用拓扑优化算法优化浇注系统，实现浇道截面积与铸件体积的自动匹配。根据铸件结构复杂度自动规划制壳工艺，如前2层使用硅溶胶+80目锆英砂（干燥时间6小时/层），后5层采用铝矾土涂料+粗砂（干燥时间24小时/层）。系统生成设备调度指令，协调压蜡机、制壳机器人、焙烧炉的作业时序。

数字化协同设计平台

基于信息化平台和协同工具（如PLM、PDM系统），将工艺设计、生产制造和质量检测等环节的数据整合到一个平台上，打破信息孤岛，确保设计师、工程师，以及工艺设计、生

产制造和质量检测部门之间的信息流通和实时更新，实现设计团队的协同工作，避免重复设计和信息滞后，提升跨部门协作的效率。

3、解决方案建议

对于数字化设计能力弱的小批量生产企业，建议借助高等院校、科研院所或专业公司的资源开展铸造工艺三维建模和虚拟试验与仿真，同时注重培训和引进设计人才，增强工艺设计数字化与智能化能力。建立工艺知识库，沉淀经验参数，减少人为失误。

对于中批量生产企业，建议完善设计团队建设，引入先进设计软件，提高铸造工艺三维建模和虚拟试验与仿真水平，并通过OA系统加强设计数据的管理。部署设备物联模块，实现关键设备数据采集与工艺参数校准。部署铸造全流程运营管控平台，实现工艺设计、排产、质检全链路闭环。嵌入有限产能排产规则，动态调整工艺参数以匹配设备状态和订单优先级。

对于大批量生产企业，建议建立集成化的数字化设计平台，集成CAX软件、PLM系统或PDM系统。利用工业物联网（5G边缘计算）保障工艺数据实时传输。通过MES系统对接实现工艺指令自动下发至生产线。构建工艺知识图谱，关联设计BOM、制造BOM与维护BOM，实现数据一致性。

全流程数字化工艺设计技术及应用

某公司是面向航空航天的大型高温合金铸件精密成型企业，利用高等院校资源，在熔模铸造蜡模制造工艺工装设计、壳型工艺工装设计中开展了全流程多尺度仿真模拟。测量了蜡料物性参数，采用Moldflow软件对蜡模制造的注蜡过程进行数值模拟，通过模拟蜡料的充型和冷却细节，预测了蜡模表面缩痕及收缩变形等规律，优化蜡模制造工艺设计参数和压型结构设计。采用ProCAST、MagmaSoft、Flow-3Dcast等软件对金属液充型过程进行数值模拟，通过模拟充型过程中的温度场、速度场和流场分布，提前识别气孔、冷隔、浇不足等铸造缺陷的形成区域，从而优化浇注系统、冒口位置等工艺参数。在商业软件的基础上，针对可能出现的显微疏松，自主开发了新的适合特殊合金的疏松缺陷判据，提升模拟结果的准确性，优化熔炼、浇注和冷却工艺参数。

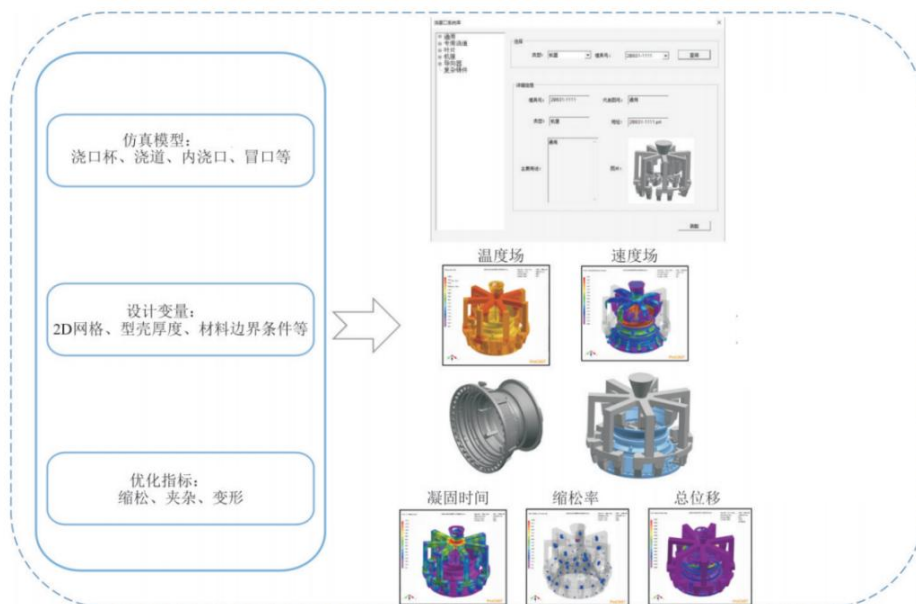


图7 铸造工艺仿真平台功能

(三) 质量管控 (智能在线检测、质量精准追溯、产品质量优化)

质量管控在大飞机铸件的生产过程中至关重要，直接影响到最终产品的质量、安全性和可靠性。质量管理环节主要是基于ISO9001、AS9100等有关质量管理标准体系落实管理活动。铸件的质量管控包括从原材料入厂到成品出厂的全程监控，涵盖了在线检测、质量追溯，以及后续的质量优化等内容。

1、存在的问题

在智能在线检测场景，依赖人工的质量检测方式效率低，难以全面、实时监控所有产品的质量，特别是在大批量生产中，部分铸件的缺陷不能被及时发现，导致潜在的质量问题。另外，在线检测设备智能化程度较低，数据分析和判断存在一定的滞后性，无法全面实现自动、精准和高效检测，缺乏自动判断和智能预警功能。

在质量精准追溯场景，缺乏有效的质量追溯体系，由于生产过程中涉及大量的材料、工艺、设备、人员等信息，一旦出现质量问题，难以追溯到具体的环节和产生的原因，造成质量问题的解决过程繁琐。

在产品质量优化场景，由于传统工艺和质量检测主要依赖人工经验，缺乏有效的数据支持，产品质量优化的过程缓慢且有局限性。设计和生产过程中难以形成闭环数据流，导致质量提升难以实现持续改进。

2、改造场景

在智能在线检测场景，利用自动化、智能化检测技术与设备，如高精度传感器、机器视觉、三坐标检测仪、蓝光扫描、电子量具等，同时可以结合机器学习和深度学习算法，对蜡模、铸件的尺寸、外观、表面质量、结构等进行实时监测，实时捕捉铸件表面的缺陷，并自动判定是否合格，减少人工干预，提升检测精度和效率；利用X射线、超声波、荧光等无损检测技术，实时检测铸件内部的缺陷，如气孔、夹杂物、裂纹等；通过传感器实时采集铸造过程中温度、压力等关键数据，并与工艺标准进行比对，及时发现异常并进行调整。

在质量精准追溯场景，构建质量管理体系，应用条码、二维码、RFID、5G、标识解析等技术，在生产过程中建立从原材料采购到最终产品交付的全过程追溯系统。通过物联网技术、二维码和RFID标签，在生产线上对每个铸件进行全程追踪。结合管理平台与数据分析，对质量数据进行实时汇总与管理，保证质量信息的透明化、规范化和数字化管理，迅速查找并定位问题来源。每个生产批次都有详细的日志记录，涵盖了设备状态、操作工信息、检测结果等，一旦出现质量问题，可以快速追溯到特定的环节和数据，查明原因并采取措施，减少潜在损失，确保质量问题能及时被追踪和解决。

在产品质量优化场景，使用数据分析平台（如MES系

统、QMS系统、数据仓库等），通过对生产过程中采集的大量质量数据进行分析，找出质量波动的根本原因，并为生产工艺优化提供决策支持。通过数据反馈，调整生产参数、工艺流程或原材料，以确保每批次产品的质量稳定，实现质量的持续优化。结合机器学习算法预测潜在质量风险，如工艺偏差、材料波动等，并反馈给相关部门或通过自动化的调整来优化生产过程和质量控制。

3、解决方案建议

企业可建立数据加密与访问权限控制机制，确保质量数据安全，并定期评估系统效能（如通过《中小企业数字化水平评测指标》），动态调整技术路线。

对于小批量生产企业，建议优先部署低代码/无代码工具，实现质量检验数据自动采集（如扫码录入设备），替代纸质记录实现基础流程自动化。通过低成本传感器和IoT模块实现生产设备运行状态实时监控，实现关键设备集成，异常数据自动报警。引入并集成ERP、OA系统，覆盖基础检验流程、不合格品处理及追溯功能。支持移动端快速录入数据，降低一线人员操作复杂度。

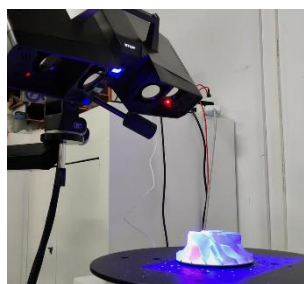
对于中批量生产企业，建议通过API接口打通QMS与ERP/MES系统，实现质量数据与生产计划、物料库存的自动关联，实现跨系统集成。引入机器视觉检测设备替代人工目检，提升缺陷识别精度。

对于大批量生产企业，建议完善信息化管理系统，部署可扩展的质量管理系统，支持SPC统计分析、FMEA风险库管理等进阶功能，并与PLM系统集成实现设计质量联动建立模块化QMS平台。建立统一质量数据中心，整合供应商来料、生产过程、客户投诉等多源数据，生成可视化质量看板。基于历史数据构建机器学习模型，实现工艺参数自动优化与质量风险预警，实现全链路智能化。

蜡模和铸件的智能在线检测

尺寸精度、性能、缺陷控制是大飞机航空发动机精密铸件开发的难点之一。某公司对大飞机航空发动机精密铸造蜡模和铸件进行在线全检，采用蓝光扫描仪、三坐标检测仪、工业相机对铸件和蜡模的尺寸精度、位置公差、形状公差、表面轮廓进行检验，蓝光自动扫描设备结合了ATOS三维扫描技术和ScanBox机器人系统，提供了高效、精确的工件数字化和尺寸检测能力，将蓝光扫描技术与摄影测量技术相结合，配合工业机器人实现工件表面高密度点云自动扫描，利用多种特种测量方法分析物体整体形貌，实现三维尺寸高精度测量采用光谱仪、光学显微镜、拉伸试验机、疲劳试验机等对铸件和试样进行理化检测；通过X射线检测、荧光渗透检测和同步辐射CT检测，表征显微疏松等缺陷的形貌，X射线实时成像检测系统实现工件的多方位、无死角检测。MOM平台质量管理系统与实时成像检测设备、三坐标、蓝光自动扫描等仪器仪表的高度集成，数

据集成自动回馈，信息透明。将检测数据进行校验、清洗并存储到本地数据库（SQL）。对相关数据进行统计分析，通过描述性统计分析，反映数据的集中趋势、离散程度、分布形态、频率分布；通过推断性统计分析，进行生产组间差异比较、相关系数计算、回归建模、过程能力指数计算；运用可视化方法，形成直方图、箱线图、散点图矩阵、帕累托图等。数字化检测与统计为缺陷-性能关系的分析提供基础。



蓝光自动扫描仪



三坐标检测仪



X-Ray检测仪



中小件荧光检测自动线



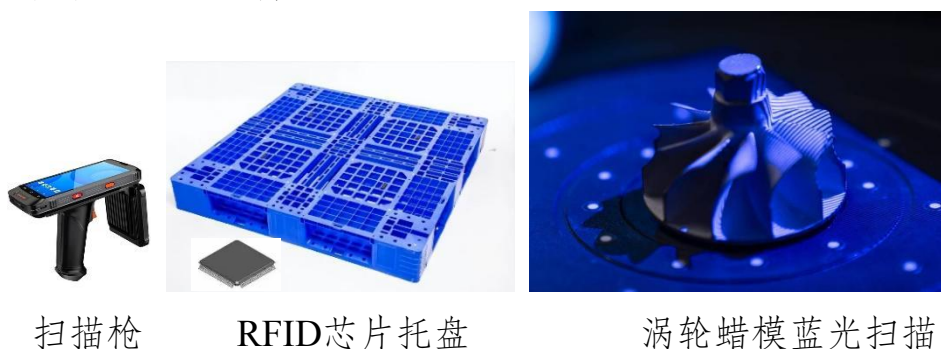
大件荧光检测自动线

图 8 部分数字化检测设备

产品质量全程追溯体系

某公司在大飞机航空发动机钛合金零部件精密铸件质量管理中，建立了基于生产过程、品质、物流等信息的全程追溯体系。每批次/件产品上线时均带有产品ID，产品经过每一道工序，所有物料信息、工艺信息均会反馈至MES系统。蜡模转运托盘采用RFID芯片

识别，可追溯该产品的所有生产过程信息。通过触控一体机、手持扫描仪、视频监控终端实现产品及组部件生产制造过程的信息采集与录入。通过扫描可以清楚显示该产品的物料号、产品批次、序列号等信息。通过MES系统能够实现产品的生产时间、工位信息、产品批次、原材料批次等的追溯查询。采用荧光检测自动线设备，通过荧光渗透检测，满足大、中、小尺寸铸件的表面曲线检测。在特检工段，采用蓝光自动扫描系统与摄影测量技术相结合，实现三维尺寸高精度测量。当检测结果数据超出检测项目的阈值时，MES系统会及时给出预警，供管理人员决策处置，产品将自动转入缓存工位，等待质量工程师处理。



扫描枪

RFID芯片托盘

涡轮蜡模蓝光扫描

图9 质量数据采集

熔模铸造全流程质量在线监控与闭环优化

某公司大飞机航空发动机高温合金铸件生产过程中质量波动难控制，如人工抽检覆盖率不足5%，因浆料浓度偏差导致批量报废损失；缺陷追溯效率低，如质量问题需3天才能定位原因；改进措施落地难，有30%的改进方案未能有效执行；人工检测误差大，目视检查漏检率达12%。为解决上述问题，通过部署在线检测设备与

质量数据平台，实现了生产全过程质量实时监控。

在线检测网络部署了38个检测节点，覆盖制壳、干燥、浇注全流程。质量数据平台集成设备数据、人工检验记录、客户投诉信息，建立了12类缺陷分析模型（如气孔、裂纹、尺寸偏差）。智能报警系统建立三级预警机制，黄色预警（参数超限但可自动修正），橙色预警（需人工干预），红色预警（立即停机）。移动端管理开发了质量APP，支持现场扫码查询工艺记录，报警信息自动推送至责任人，超2小时未处理升级通知主管。建立了“发现问题→分析原因→制定措施→验证效果→标准化”的闭环优化流程，实现质量问题处理流程数字化，系统强制要求记录缺陷改进结果，否则无法关闭工单。

在制壳环节，机械手完成沾浆动作后，自动触发浆料浓度检测仪（精度 $\pm 0.5\%$ ）、红外温度传感器（误差 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ）对浆料状态进行测量，数据实时上传至质量看板。在干燥室安装温湿度监测探头，每15分钟采集一次环境数据，若连续3次检测到湿度超过设定阈值（如65%），系统自动启动除湿装置并推送报警信息至值班人员手机。

在铸件生产过程中，每个产品批次绑定唯一的二维码。通过扫码可追溯该批次所有工艺参数，如制壳层数（实际值/标准值对比）、干燥时间（精确到分钟）、浇注温度曲线（记录峰值与波动范围）等。当发现某批次铸件出现气孔缺陷时，系统自动关联该批次的生产数据，经过分析发现浇注温度波动超限（设定 $730 \pm 10^{\circ}\text{C}$ ，实际波动达 $\pm 25^{\circ}\text{C}$ ），锁定原因为加热炉功率不稳定。改进后，系统持

续跟踪后续10个批次的数据，确认缺陷率从3.2%降至0.8%。

改造完成后，提高质量检测效率5%以上，工艺参数超限事件减少89%，客户投诉处理周期从7天压缩至8小时，漏检率由12%降至0.5%以下。



图10 产品生产过程追溯

(四) 计划调度 (生产计划优化、车间智能排产、资源动态配置)

计划调度是确保生产高效与顺畅的核心环节。计划调度的智改数转网联，不仅能提高生产的精确性，减少资源浪费，也能响应市场变化，提升生产灵活性，使大飞机铸件企业在面临多样化订单、设备故障、资源紧张等突发情况时，依然保持生产效率和交货时效。

1、存在的问题

在生产计划优化场景，实时性差，动态调整能力弱。

在大飞机零部件精密铸造生产过程中，涉及的工艺环节复杂，时间跨度长，且生产计划往往需要快速调整，常用的生产计划优化方法难以应对频繁的订单变动。依赖人工经验制定生产计划，缺乏实时性和动态调整能力，容易造成生产资源的不均衡和生产进度延误。

在车间智能排产场景，大飞机零部件精密铸造车间生产任务常常由于设备故障、人员短缺、物料不足等因素产生突发变化，而依赖人工调度，排产过程缺乏实时性和自动调整能力，面对突发事件时，容易造成生产停滞或资源浪费，导致生产排产任务无法按计划顺利执行。

在资源动态配置场景，缺乏实时反馈和灵活调整能力，容易导致资源（如设备、人员、物料）的过度集中或短缺，从而影响生产效率，导致生产延误或资源浪费。

2、改造场景

在生产计划优化场景，构建生产计划系统，打通生产和仓储物流等管控系统，根据生产任务、设备空闲时间、人员配置等条件，应用多目标多约束求解、产能动态规划等技术，生成最优生产计划，增强生产计划的灵活性，减少人为错误，提高生产效率，并实时调整以应对突发的生产变化。

在智能排产场景，构建智能排产调度系统，应用多约束排产建模、多目标排产寻优等技术，实现多目标、多扰动情况下排产优化与资源动态调度，缩短产品生产周期，提升资源利用效率。如通过物联网技术，将车间的设备、人员、

物料等信息实时传输至集成的车间管理系统（如MES），使系统可根据实时数据进行智能排产，自动调整生产任务，确保每个环节的设备 and 人员得到最合理配置，避免设备闲置或过度负荷；利用自动化设备与智能调度系统（如机器人、自动化物流）协调生产排产，使系统能够根据生产任务自动分配资源，优化生产流程，并根据设备状态与工艺要求调整生产顺序。

在资源动态配置场景，通过资源管理平台（如ERP系统）和制造执行系统（MES），结合大数据分析对生产资源进行统一监控，该平台能够根据实时数据优化生产资源的分配与调度，确保各类资源按需配置，避免过度消耗或浪费。通过AI与优化算法，系统能够实时监控生产过程中各类资源（设备、人员、物料）的使用情况，并自动调整资源的配置。

3、解决方案建议

对于小批量生产企业，建议采用低代码平台（如轻量级MES），支持订单优先级设置与简单排产规则配置，降低实施门槛。集成移动端适配功能，通过手机APP实时查看生产进度与设备异常报警。部署低成本传感器与边缘计算盒子，实现关键设备运行数据采集。结合Excel模板的导入导出功能，兼顾传统手工排产习惯。

对于中批量生产企业，建议部署APS系统，建立集成化智能调度平台，支持多目标优化算法（如遗传算法），

平衡交货期、设备负载与库存成本。

对于大批量生产企业，建议集成AI质检模块，实时分析设备故障日志与工艺参数，建立企业级多级调度体系，通过移动端工单推送机制，实现异常事件快速响应闭环。部署工业大模型，通过历史数据训练生成排产优化策略，减少人工干预。结合实时市场预测数据，动态调整生产计划以应对需求波动。

航空发动机叶片铸造数字化生产计划

某公司在大飞机航空发动机叶片铸造生产中，通过ERP系统下达主生产任务，车间生产计划员根据合同订单，在MES系统中进行工单分拆，MES系统协同WMS系统自动检索在库量，依据生产计划、工艺、资源状态、相关约束条件等统筹自动生成车间作业计划，细分到工序及设备，车间生产计划员可根据具体情况进行微调。MES系统依据确定的生产计划排程，与WMS、ERP、运输设备调度系统等进行协同，组织物料自动配送与流转，各设备/产线根据具体计划完成相应的生产任务。

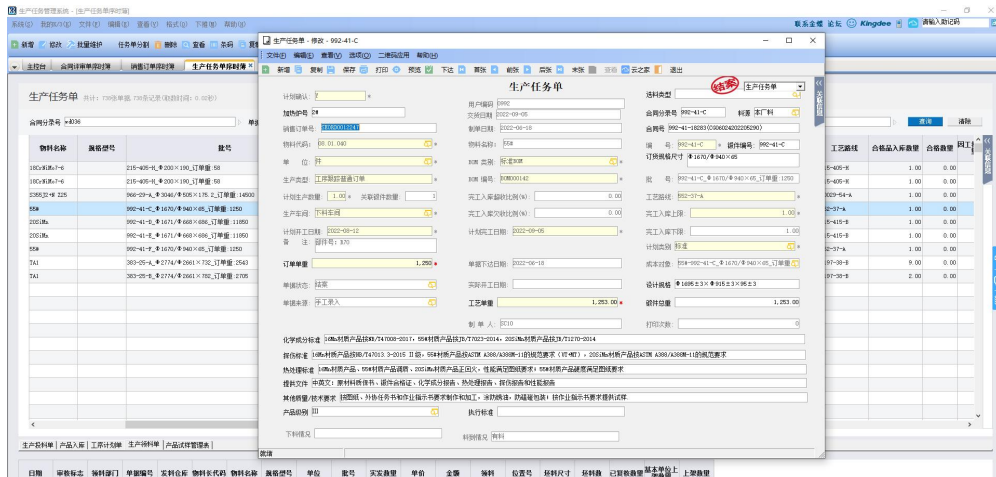


图11 生产任务单

基于ERP和MES集成系统的车间智能排产

某公司在多品种单件小批量生产模式下，产品生产周期长、人工排产及生产计划查询难加单、紧密插单现象多；订单交付及时率无法保障销售、生产、采购、仓储无法实现信息共享，部门间协作水平低。为解决上述问题，通过应用MES系统并与ERP系统集成互联，实现了从销售订单、主生产计划、生产任务单、工单等全流程排产。

ERP系统将客户订单同步到MES系统，MES自动导入生产工艺路线及工艺参数，生成主计划，基于物料库存状况和物料可用性，决定排产顺序和数量，自动生成生产任务单，再分拆为工单（对应每个铸件编号），下达到各工位开始生产，并基于MES系统生成的领料单做好ERP数据领料操作。

信息化系统建设提升了部门之间协作效率，车间工艺、排产、生产、检测岗位减少4人。从销售订单到物料采购、排产、生产及检测、出货等全流程效率提高，合同订单交期达成率 $\geq 85\%$ 。

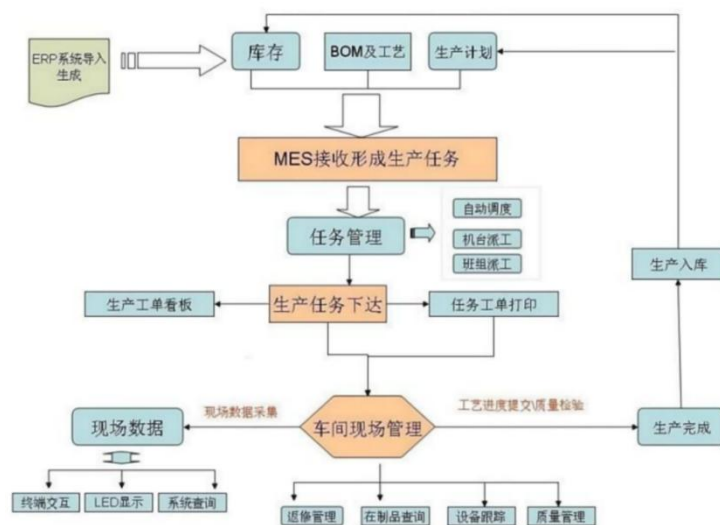


图12 基于ERP和MES集成系统的车间生产计划及排产流程



图13 生产工时明细表

基于MRP的资源动态配置优化

某公司过去排产效率低，依赖Excel人工排产，制定全月计划需耗时5天，且难以应对订单变动；订单交期延误频繁，因物料到货与生产节奏不匹配，订单准时交付率仅78%；设备利用率不均，部分设备超负荷运行（月均280小时），部分负荷不足（月均60小时）；库存积压严重，半成品库存最高达1200万元，占用车间30%空间；计划透明度不足，车间常因计划变更通知滞后导致误工。为解决上述问题，通过用友ERP（U8）系统的MRP（物料需求计划）模块的应用，结合实时订单数据、库存状态和生产能力限制，动态生成主生产计划。

采用的技术方案：MRP智能运算引擎，设置12项运算参数，包括经济批量、最小包装量、替代物料规则等；支持多版本计划模拟，

可对比“保交期”、“降成本”、“均衡生产”三种模式的结果；动态调度模块，实时接入MES设备状态数据，自动调整故障设备的排产，任务紧急订单插入时，采用“挤压-平移”算法重新分配资源；可视化排产看板，车间部署10台55寸交互屏，分色显示订单紧急程度（红/黄/绿），支持触控调整工序顺序，修改结果实时回传系统；异常预警机制，包括关键节点预警，如物料到货超48小时延迟自动预警；风险订单标记，如交期达成率低于70%的订单高亮显示；数据集成接口，与ERP系统打通库存、BOM数据，与供应商系统对接物料到货信息。

系统首先收集销售订单、预测需求、现有库存量（包括原材料、半成品和成品）等基础数据，通过预设的运算规则（如最小订单量、安全库存、生产周期等）生成初始计划。针对复杂订单（如紧急插单或交期变更），系统支持人工调整优先级。例如，当某订单要求提前5天交货时，计划员在系统中标记为“加急”，系统自动重新计算排产顺序，并联动更新相关工序的物料需求。每次计划生成后，系统输出《生产订单列表》，详细列明产品型号、数量、开工/完工时间、所需物料清单及到料节点。系统设置关键约束条件，包括：设备负载均衡，如单台设备每日最大工时为14小时；物料齐套检查，如缺料超3天的订单自动延后；产能缓冲预留，如每日保留10%产能应对突发需求。通过每日自动比对计划与实际进度，动态调整后续排产。例如，某日因设备故障导致A产品延迟，系统自动将后续订单的B产品提前生产，确保周计划整体完成率达标。

改造实施后，计划制定效率提升8倍（从120人时/月降至15人

时/月) 订单响应速度从24小时缩短至4小时; 减少计划员2人, 年节约人力成本18万元; 存周转率从4.2次/年提升至6.5次/年, 释放资金540万元; 订单准时交付率从78%提升至93%, 设备故障导致的计划中断减少67%。

(五) 生产作业 (产线柔性配置、工艺动态优化、先进过程控制)

大飞机零部件精密铸造企业生产作业中的核心环节是产线柔性配置、工艺动态优化、先进过程控制。生产作业环节的智改数转网联, 对提升制造精度与质量稳定性, 强化生产效率与敏捷性, 降低综合成本与资源消耗, 驱动技术创新与产业协同, 增强安全合规与可持续发展具有重要意义。

1、存在的问题

在产线柔性配置场景, 由于大飞机零部件 (如涡轮叶片、机匣等) 对材料性能 (如高温合金)、精度 (微米级) 和一致性要求极高, 不同产品的工艺参数差异大, 产线切换时调整时间长, 影响效率。传统铸造设备多为刚性设计, 难以快速适应多品种、小批量生产形式。熔模精密铸造涉及模具、熔炼、脱蜡、后处理等多个环节, 设备专用性强, 缺乏标准化接口, 难以实现模块化组合。设备信息化水平低, 或进口设备数据接口不开放, 难以接入柔性制造系统 (FMS)。

在工艺动态优化场景，工艺、设备参数动态调优难。铸造工艺仿真结果与实际生产偏差较大，影响工艺参数迭代效率。熔炼过程温度场控制依赖经验调整，产品废品率波动范围较大。

在先进过程控制场景，生产过程未实现统一管理，透明度低。如熔模铸造工艺复杂，生产过程工艺参数波动大、控制效果差；铸件无损检测自动化率低，X光片人工判读误差率较大；热等静压等设备能耗预测模型精度低，难以实现动态节能调控。

2、改造场景

在产线柔性配置场景，部署智能制造装备与系统，应用产线模块化重构、柔性物流运输等技术，根据订单、工况、库存等变化，实现产线快速调整和按需配置。通过智能化设备和自动化生产单元（如AGV、机器人制壳单元），自动调节生产单元的工作模式，提升产线的灵活性和效率。引入基于人工智能和大数据的智能生产线调度系统，实时分析订单需求、设备状态、人员配置等信息，自动生成灵活的生产排程和生产线调整建议，以提高产线的柔性和适应性。

在工艺动态优化场景，建设智能产线和工艺在线优化系统，应用设备机理与数据混合建模、多设备联合寻优等技术，实现工艺过程和设备参数在线优化，提高产品质量一致性。

一方面，通过试验获取并充实工艺设计软件材料物性参数库。另一方面，利用传感器和实时数据流，结合机器学习技术，实时监控和优化工艺参数。例如，通过传感器实时获取浇注温度、浇注速度等关键数据，自动调整生产工艺，确保生产过程稳定并达到预期效果。

在先进过程控制场景，基于先进过程控制、实时优化等系统，应用模型预测控制、多目标寻优等技术，将传感器、自动化设备和大数据分析结合，实时优化生产过程中的工艺参数，实现精准、实时和闭环的工艺流程控制优化，保证产品质量并减少生产过程中的波动。

3、解决方案建议

对于小批量生产企业，可以采用轻量化 ERP 系统，集成基础生产计划、库存管理和订单跟踪功能，实现核心业务流程标准化。同时部署低成本物联网设备（如传感器、扫码枪）采集设备运行数据和工艺参数，通过云端平台实现数据可视化。还可以搭建简易版 MES 系统，支持工单派发、工序报工和异常报警功能，提升车间执行效率。

对于中批量生产企业，可以部署模块化 ERP 系统，覆盖供应链协同、质量追溯和成本核算，支持多部门数据联动。同时实施集成化 MES+APS 系统，实现动态排产、工艺参数实时调整及异常预警。还可以应用机器学习算法分析历史废品数据，优化铸造工艺参数（如熔炼温度、浇注

速度)。集成自动化物流 AGV 系统与机械臂设备，实现熔炼、浇注环节的局部无人化作业。

对于大批量生产企业，可以建立企业级数据中台，打通研发（PLM）、生产（MES）数据流，构建全流程数字孪生平台，覆盖从材料熔炼到后处理的完整工艺链，实现实时仿真与预测性维护。同时集成 AIoT 设备、质量数据库和供应商数据，支持全生命周期追溯。还可以应用深度学习技术优化复杂铸件工艺设计，结合拓扑生成算法降低材料损耗。

熔模铸造壳型自动化产线柔性配置

某公司原有熔模铸造壳型产线柔性不足，如生产不同规格的产品需手动更换工装夹具，单次换型耗时45分钟；质量波动大，如人工沾浆厚度差异导致模壳强度不均，废品率长期在8%左右；设备孤岛效应，如各工序设备独立运行，生产节拍不匹配导致在制品大量堆积；故障响应滞后，如依赖人工巡检发现设备异常，平均修复时间长达4小时；数据分散难利用，如生产数据记录在纸质表单，分析优化周期长达2周。为解决上述问题，公司通过整合自动化设备与信息化系统，构建了模壳制造的柔性生产线。

采用的技术方案：设备网络化改造在原有设备上加装物联网模块，对200余个传感器进行数据采集（如温度、压力、转速）。柔性控制技术为PLC系统预设15种标准产品工艺包，新订单输入产品编码后自动匹配参数，并支持非标产品自定义参数存储；MES系统

根据订单优先级、设备状态、物料齐套情况，采用智能调度算法动态分配生产任务，当多订单冲突时，自动采用“交期优先+成本最优”混合策略排产。可视化管理系统为车间部署10块电子看板，分区域显示：实时生产进度（完成数/目标数）、设备运行状态（正常/预警/停机）、质量关键指标（浆料粘度、砂粒覆盖率）。

产线核心设备包括粘淋机械手、三桶电动沾浆机、双滚筒淋砂机等，全部接入PLC控制系统。机械手负责蜡模抓取和定位，可自动识别不同尺寸的工件并调整夹爪开合度，抓取精度达 $\pm 0.1\text{mm}$ 。沾浆机配置三个独立浆桶，通过变频控制实现不同浆料（如硅溶胶、锆英砂浆）的自动切换。

产线通过十字悬挂链串联各工位，行走装置根据生产节奏自动调节输送速度。当MES系统下发新订单时，PLC自动调用对应工艺参数，例如某航空铸件需要5层制壳，系统会匹配沾浆次数、干燥时间等设定值。设备运行数据实时上传至MES看板，包括浆料温度波动、淋砂均匀度等关键指标。若某台淋砂机出现砂粒分布不均（偏差超5%），系统立即触发报警并暂停流程，避免批量质量问题。通过ERP与MES的数据互通，产线可动态调整生产批次。例如，当紧急订单插入时，系统自动将当前批次剩余工件暂存至缓冲工位，优先处理急单后再恢复原任务。设备维护模块记录每台机器的运行时长，提前预警关键部件更换周期（如机械手轴承每2000小时需润滑保养）。

改造实施后，自动化设备将浆料厚度波动控制在 $\pm 0.2\text{mm}$ ，废品率降至1.5%。悬挂链与智能调度系统实现工序间精准衔接，在

制品库存减少65%。实时监控系统将故障发现时间缩短至10分钟内，平均修复时间降至1小时。MES系统自动生成日报，关键指标分析实时可视，工艺优化周期缩短至1天。

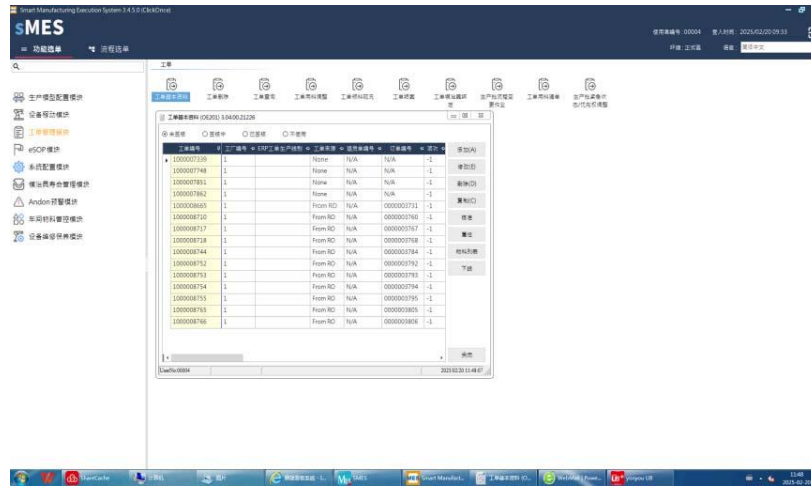


图14 壳型制备粘淋系统运行数据MES界面

基于 SCADA 系统的工艺动态优化

某公司为解决生产过程中工艺数据无法实时监控报警的问题，从设备底层逻辑进行设备控制，实现生产过程工艺参数、设备状态控制与优化。

采用的技术方案：部署各类传感器，通过数据采集与监视控制系统（SCADA）实时监测工艺参数，进行数据采集、处理、存储、展示、报警等。传感器数据通过模拟信号或数字信号传输至数据采集模块。通过直观、易用的图形化界面，展示实时工艺数据、设备状态、报警信息，支持操作员远程监控和干预。同时，集成比例-积分-微分（PID）控制器，实现对关键工艺参数闭环自动控制，确保工艺条件稳定在设定范围内。

以SCADA系统为媒介，链接设备PLC，采集关键数据（工艺数

据、设备运行参数等)，并将相关数据上传MES系统，实现数据利用及相关参数预警处置，指导生产过程中参数调节控制。部署温度、压力、pH值、溶氧、流速、液位、重量等多种传感器，实时监测工艺参数，并通过工业总线或无线通信技术传输至SCADA中心。操作人员通过人机界面查看实时工艺数据、设备状态、报警信息，实现对整个生产过程的可视化监控，确保符合GMP规范。在系统中设定阈值规则，当工艺参数超出预设范围时，系统立即触发警报通知，通过声光提示、短信、邮件等方式通知相关人员，确保及时干预避免工艺偏差。针对关键工艺变量（温度、湿度），SCADA系统结合PID控制器进行闭环控制，自动调整设定值以维持工艺参数稳定在目标范围内。

建设完成后，生产工艺数据采集更加精准及时，能够快速支持现场管理调度，工艺参数精准把控，提高产品质量稳定性，实现总体质量良品率提高5%以上。

壳型制造全过程控制

某公司为解决生产过程管理“各管一段”，不统一、不透明等问题，通过大数据建模、实时优化和预测控制等技术，实现精准、实时和闭环的过程控制。

生产管理系统通过工艺设定将链式悬挂输送装置、机械手、十字悬挂链、行走装置、模壳旋转装置等车间设备有机互联，协同作业。生产设备的设备参数、工艺参数、设备能耗数据、产线温湿度等数据由PLC实时采集，将采集到的数据传输到MES系统，MES系

统对设备的状态进行全程监控。在生产作业过程中，MES系统自动关联所设定的工艺流程和自动化生产设备，从生产计划、人员、设备、配方管理、工艺管理、生产进度、质量管理等过程，全程管控生产过程。关键数据与BI分析报表通过车间可视化看板进行显示，便于管理人员、作业人员实时掌握车间生产情况。通过MES系统与ERP系统集成，车间内生产计划执行的进度、工艺实现情况、物料及半成品、产品质量及设备利用率等现场受到全面实时管控。

实现制壳全过程管控后，节约了人力成本，提高了运营效率，车间在制品积压资金降低了 21.6%。

(六) 仓储物流 (智能仓储、精准配送、物料信息管理)

在大飞机铸件生产过程中，仓储物流环节扮演着至关重要的角色，主要包括智能仓储管理、精准配送、物料信息管理等场景。优化仓储物流可以有效地提高物料管理效率、减少库存积压、加速物料配送，并确保物料在生产过程中按时到位。

1、存在的问题

在智能仓储场景，采用人工或半自动化管理，易发生物料错放、遗漏或过期的问题，尤其在面对大飞机零部件精密铸造生产时，涉及的物料种类多，规格各异，多批次小批量，物料调配、存取效率较低，难以实现精准的库存管理。

在精准配送场景，配送过程常常依赖人工判断，缺乏实时监控和优化，容易出现配送路线不合理、配送时间延迟等问题，进而影响生产流程的流畅性，影响生产进度。

在物料信息管理场景，缺乏统一平台，存在数据孤岛现象，物料的信息无法实时共享，导致生产环节中的物料调度不精确，影响生产的连续性和效率。

2、改造场景

在智能仓储场景，引入自动化设备和先进的信息技术，建设立体仓库和智能仓储管理系统，应用条码、二维码、射频识别、仓储策略优化、多形态混存拣选等技术，实现物料的自动存取、分类和存储条件监控，以及物料出入库、存储、拣选的智能化管理，提高库存周转率和厂房利用率。

智能仓储管理的技术实现主要依赖于自动化设备和物联网技术的协同工作。一方面，通过自动化设备结合智能仓储管理系统（WMS），系统能够实时监控库存情况，自动识别并调配物料，从而提高仓储操作的准确性和效率。另一方面，物联网传感器被广泛应用于监控物料存储状态，包括温度、湿度和位置等关键参数。

在精准配送场景，部署智能物流设备和管理系统，应用高精度定位导航、物流路径动态规划、物流设备集群控制等技术，实现厂内物料配送快速响应和动态调度，提升物流配送效率和精准度。

通过引入智能化技术和自动化设备，如自动堆垛机和自动导引车（AGV），根据生产需求实时调整配送计划，优化配送路径，并确保物料按时、按需送达指定地点。

在物料信息管理场景，引入智能化的物料追踪系统，企业可以实时监控物料从采购、入库、生产加工到成品出库的全流程，确保物料信息的透明化和可追溯性。

物料追踪与信息管理的技术实现主要依赖于 RFID 技术和区块链技术的结合。RFID 技术通过在物料或料筐上安装标签，实现非接触式信息采集和实时追踪，能够快速读取物料的位置、状态和批次信息，减少人工操作和错误。同时，结合区块链技术，企业可以构建不可篡改的物料信息记录系统，确保物料采购、存储、配送和使用的全流程数据真实可信。

3、解决方案建议

对于小批量生产企业，建议使用简单的TMS（运输管理系统）或物流APP，支持基本的配送任务调度和路径规划；采用ERP仓储管理模块，提供库存管理、订单拣货和发货等核心功能；利用条码技术实现物料的快速识别和管理，减少人工操作错误。通过移动终端（如PDA或手机APP）实现配送任务的实时跟踪，支持库存盘点和出入库操作。

对于中批量生产企业，建议部署功能更完善的WMS系统，支持多仓库、多区域管理，实现库存的精细化管控；

引入自动化设备和智能仓储控制系统（WCS），结合ERP系统，实现数据实时共享，优化库存周转率。

对于大批量生产企业，建议构建集成化的智能仓储系统，包括WMS、MES、AGV、立体库等，支持全流程的精细化、自动化和智能化管理。利用AI算法和大数据分析，实现动态调度和实时监控。采用AI监控、智能门禁等技术提升仓储安全性和管理效率。

基于WMS/WCS与MES、ERP系统集成的智能仓储

某公司将WMS与MES系统集成，WMS系统根据MES系统发送的生产计划信息，执行相关出库和库内作业，如准备和配送物料，接受成品入库等，MES系统在生产任务完成后，向WMS系统反馈成品信息，WMS系统执行成品入库。

将WMS系统与ERP系统集成，WMS系统根据ERP系统发送的物料信息、仓库信息、供应商信息，执行相关出库、入库和库内作业，并向ERP系统反馈作业任务和库存数据。集成后实现了库存水平、物料主数据、订单信息等数据同步；采购入库、生产领料、销售出库等业务流程对接，以及库存价值、成本核算等财务对接。

WCS系统专注于物流设备的调度、协同与实时监控，通过任务引擎优化指令路径，调度设备执行，实现了任务下发与执行监控、设备状态实时反馈、异常处理与报警、性能数据收集与分析等功能，实现了物料精准配送。

同时通过ERP系统与MES系统的集成，实现物料信息、采购

信息、任务数据，以及生产进度和异常生产数据的同步。

实施后，存储货物容量比传统仓库增加 60%，库位货物准确率 100%，货物周转效率也提升到传统仓库约 3 倍，可实现 7 天 24 小时全时出入库操作。货品上架和下架，全智能按先进先出自动分配上下架库位，避免人为错误；库管人员实时掌控库存情况，合理保持和控制企业库存。

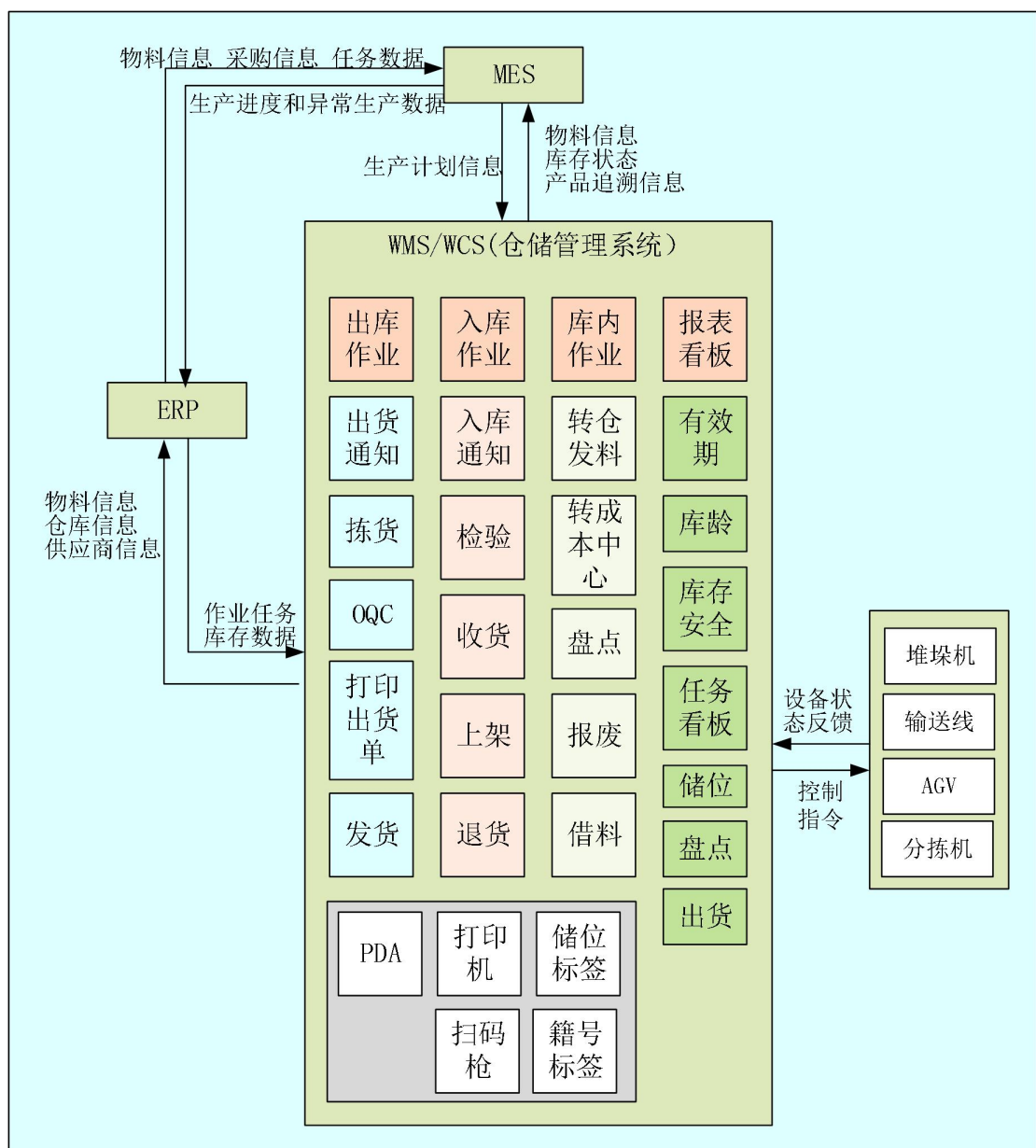


图 15 WMS/WCS 与 MES、ERP 及物流设备集成系统架构

物料精准配送

某公司生产大飞机航空发动机钛合金铸件，集成应用WMS仓储管理与AGV自动配送技术，包含WMS系统、AGV RCS调度系统、AGV小车、充电站、无线网络、物料器具等部分，根据配送物料尺寸、重量、结构形式选配AGV，综合应用激光SLAM+二维码导航、自动控制、条码识别等技术，实现AGV自主运行与精确定位；开发协同控制系统，基于WMS系统开发LES功能，实现物料呼叫与过点拉动；AGV RCS调度系统接收WMS下发的任务，调度AGV小车执行任务，RCS调度系统根据出库库位与配送点位位置关系，自动规划最优配送线路，同时RCS还具备、交通管制、AGV状态时时监控、充电管理等功能；AGV采用激光SLAM+二维码+双目相机导航方式，结合工控机程序按照RCS调度系统规划路径自动执行搬运任务；物料容器设计预留底部空间，配合AGV进入容器下方搬运。

通过以上信息系统、设备、器具综合应用，实现生产区域物料自动出入库与精准配送，减少物流配送人员、提高物流配送效率与及时性。



基于JIT方法的智能物料信息管理

某公司为解决物料错配率高、库存积压严重、生产中断频繁、信息传递滞后、追溯困难等问题，建立了基于准时供货

(Just-In-Time, JIT) 的智能物料信息管理系统。

采用的技术方案：MES系统对接ERP订单数据，自动分解工序级物料需求设定安全库存阈值（如锆英砂最低保有量2吨），触发自动补货。车间部署12块LED看板，分区域显示：红色表示紧急缺料工位，黄色表示即将开工需求，绿色表示物料已齐套。安装50个RFID读写器，覆盖车间所有关键节点，在制品定位精度达 ± 0.5 米，数据刷新频率每秒1次。开发23类物料校验规则库（如浆料温度需 $\geq 20^{\circ}\text{C}$ ），扫码枪与设备控制器直连，校验不通过时设备自动锁定。

公司通过MES系统与物联网设备协同，实现生产物料的精准拉动和实时管控。排产计划生成后，系统自动拆分各工序的物料需求，并通过车间电子看板推送至仓库。例如，某批次产品需在上午9点开工，系统提前2小时向仓库发送备料指令，明确硅溶胶、锆英砂等原料的规格和数量。

备料看板显示当日所有订单的物料需求清单，仓库按亮灯顺序拣料。调拨看板在开工前30分钟，产线终端触发配送请求，AGV小车自动运送物料至指定工位。退料看板在生产结束后，剩余原料扫码退回仓库，数据实时更新在物料使用环节，系统通过扫码枪和RFID标签实现双重信息识别。

上料校验：操作工扫描物料标签，系统自动比对工艺要求（如浆料型号、砂粒目数），匹配错误时设备禁止启动。在制品定位：每件半成品悬挂电子标识卡，MES实时追踪其位置和工序状态。若某件产品滞留超时（如干燥工序超4小时未流转），系统预警并

推送处理建议。

智能物料信息管理系统实施后,物料配送准时率从76%提升至98%,车间物流通道占用减少40%,原料库存资金占用降低65%,物料报废率从3.2%降至0.7%,因物料问题导致的质量事故减少92%。

物料名称	数量	单位	物料名称	ERP订单量	ERP已出库量	当前库存量	年序	异动人员	异动日期	ERP人员	ERP日期	物料编号	物料序号	来源单号
2342146454	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00	2023-09-05 12:59:13	2342146454	1	2342146454				
2342146454	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00	2023-09-05 12:59:13	2342146454	2	2342146454				
2342146454	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	2023-09-05 12:59:13	2342146454	3	2342146454				
334454545	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00	2023-09-05 13:12:23	334454545	1	334454545				
334454545	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00	2023-09-05 13:12:23	334454545	2	334454545				
3242143434	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00	2023-09-05 13:23:04	3242143434	1	3242143434				
3242143434	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00	2023-09-05 13:23:04	3242143434	2	3242143434				
3242143434	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	2023-09-05 13:23:04	3242143434	3	3242143434				
3245678910	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	2023-09-05 13:39:04	3245678910	1	3245678910				
3245678910	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	2023-09-05 13:39:04	3245678910	2	3245678910				
3245678910	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	2023-09-05 13:39:04	3245678910	3	3245678910				
3245678910	200.00	0.00	200.00	0.00	200.00	0.00	2023-09-05 13:39:04	3245678910	4	3245678910				
3245678910	200.00	0.00	200.00	0.00	200.00	0.00	2023-09-05 13:39:04	3245678910	5	3245678910				
3245678910	200.00	0.00	200.00	0.00	200.00	0.00	2023-09-05 13:39:04	3245678910	6	3245678910				
3245678910	400.00	0.00	400.00	0.00	400.00	0.00	2023-09-05 13:39:04	3245678910	7	3245678910				
22222222	120.00	0.00	120.00	0.00	120.00	0.00	2023-09-05 14:26:23	22222222	1	22222222				
22222222	310.00	0.00	310.00	0.00	310.00	0.00	2023-09-05 14:24:07	22222222	1	22222222				
655760007007-0	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	2023-09-05 14:19:00	655760007007-0	1	655760007007-0				
655760007007-1	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	2023-09-05 14:19:00	655760007007-1	2	655760007007-1				
655760007007-2	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	2023-09-05 14:19:00	655760007007-2	3	655760007007-2				
510000000000	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	2023-09-05 15:20:20	510000000000	1	510000000000				
510000000000	2.00	0.00	2.00	0.00	2.00	0.00	2023-09-05 15:20:20	510000000000	2	510000000000				
345678910	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	2023-09-05 15:20:20	345678910	1	345678910				

图18 智能仓库的物料信息

(七) 设备管理 (在线运行监测、设备故障诊断与预测)

在大飞机铸件生产过程中,设备管理是确保生产线稳定、顺畅运行的关键环节。设备的在线运行监测、故障诊断与预测能够提升生产效率、延长设备寿命,减少停机时间和维护成本。

1、存在的问题

在线运行监测场景,大飞机零部件精密铸造生产所涉及的设备种类复杂,且部分设备的运行条件特殊,一些设备的监测系统仍然处于传统的手动记录或局部监控状态,缺乏整体性的实时数据采集和反馈系统。现有监控方式无

法实时收集到精准的设备运行数据，缺乏对设备健康状态的全面评估，对设备性能的评估滞后，容易忽视潜在的故障风险。

在设备故障诊断与预测场景，大飞机零部件精密铸造生产设备，如真空熔炼浇注炉，发生故障时，症状和原因复杂，往往表现为多种参数的异常，难以从单一维度进行诊断。当前设备的故障诊断方法较为依赖人工经验，诊断准确性不高，导致计划外的停机。

2、改造场景

在线运行监测场景，集成智能传感、5G、多模态数据融合等技术，部署设备运行监控系统，通过在设备上安装传感器，利用物联网技术实时收集设备运行数据，通过大数据分析和可视化技术，提供设备的运行状态、健康度和性能评估，帮助操作人员实时了解设备状况并做出相应调整。

在设备故障诊断与预测场景，部署智能传感与控制设备，应用设备故障知识图谱、故障机理分析、预测性维护等技术，建立设备运维管理平台，收集设备多维度的运行数据（如温度、压力、负载等），并利用数据分析算法对设备的运行状态进行实时诊断，分析出潜在的故障风险，并提供维护建议，避免意外停机。

3、解决方案建议

对于小批量生产企业，在关键工序（如制模、制壳、

熔炼浇注)采用机器人或自动化设备,引入基础的数据采集系统(如SCADA),对关键设备的运行参数(如温度、压力、转速等)进行实时采集和监控,通过可视化界面展示设备状态。建立基础的设备管理系统,记录设备的维护计划、维修记录和备件库存,提高设备管理效率。通过企业内部网络,实现设备数据、生产数据和质量数据的共享,便于各部门之间的协同工作。利用设备运行数据,结合简单的数据分析模型,实现设备故障的早期预警和预测性维护。

对于中批量生产企业,可以升级数据采集系统,实现对生产设备的全面数字化监控,包括设备运行状态、工艺参数和能耗数据。引入设备健康管理(PHM)系统,对设备的健康状态进行实时监测和评估,优化设备维护策略。

对于大批量生产企业,搭建工业互联网平台,实现设备、生产、质量、物流等数据的全面集成和共享。利用人工智能和机器学习技术,实现生产过程的设备故障诊断。打造智能工厂,实现生产设备的自动化、智能化和柔性化生产。

实时在线检测管理系统

某公司大飞机零部件精密铸造车间基于物联网通信,针对制模、制壳、熔炼等关键工序,应用数采系统采集设备状态数据(设备开机/关机/空闲/报警/调试、自动/手动操作模式)、产量数据(总件数)、

故障数据（故障代码、故障发生/结束时间）、参数数据（压力、速度、温度、湿度）等。

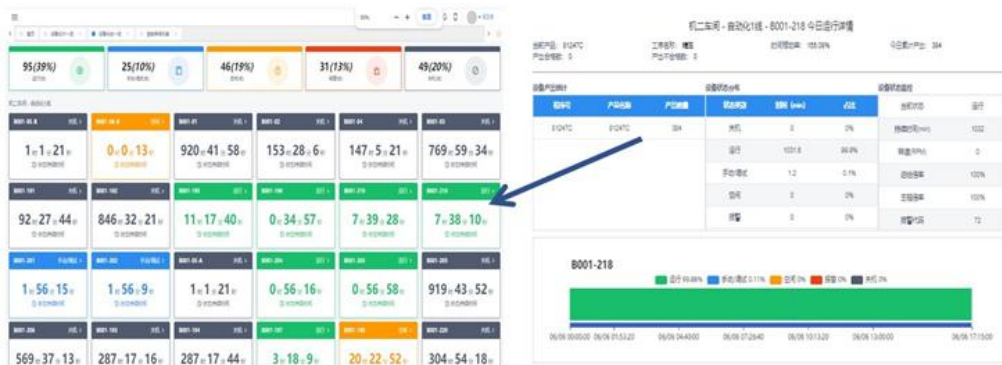


图 19 设备运行数据采集

通过对设备通电时间、运行时间、产品总数、产品合格数、设备安灯响应次数及时间等多项信号的采集和分析，企业制定了相应指标体系，综合统计得出OEE（设备综合效率）、MTBF（设备平均故障间隔时间）、MTTR（设备平均维修时间），同时按照班次汇总，提供按天、周、月三个维度查询。

及时开展设备运维响应，同时建立设备参数优化模型，优化基于实时生产环境数据、排产信息、历史运行数据的参数智能配置，提升设备有效利用率（OEE）和健康管理水平。

通过实时监测和故障诊断，减少了故障排查的时间和精力，降低维修成本。利用EAM系统进行设备全生命周期管理可以提前发现设备故障的迹象并进行预测，提高设备的可靠性和稳定性以及利用率。

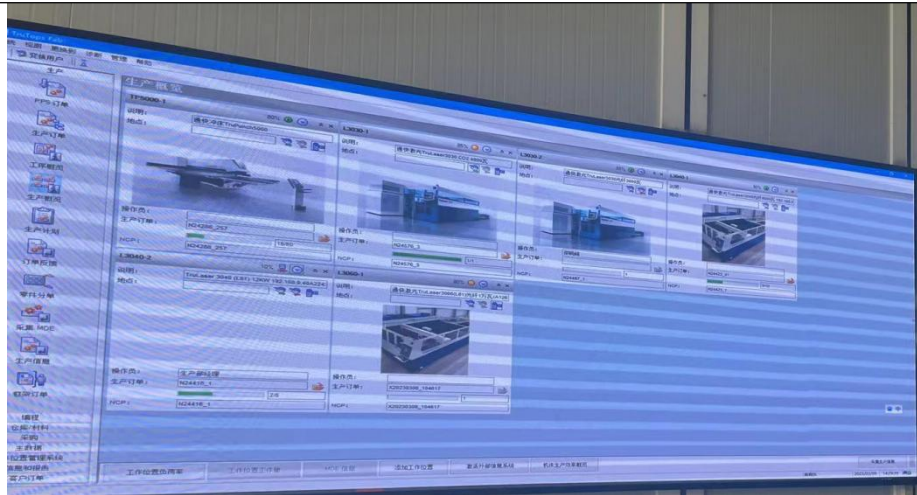


图20 设备电子监控看板



图 21 设备总览看板

数据驱动设备故障预测

某企业针对智能制造装备，应用5G、传感器、大数据分析等技术采集设备状态（电流、电压、载荷、速度等）数据至EAM系统，进行设备状态运行切片、设备异常参数等分析。建立压蜡机、熔化浇注炉等相关设备的故障树模型，分析设备故障的因果联系，明确铸造设备所有故障间的关系，理清各设备故障的故障位置、发生频率等，有利于建立设备基础监测诊断模型方法库、典型设备的状态预警和常见故障诊断模型。

在建立设备维修履历及故障规则库的基础上，确定设备剩余运行寿命或者稳定运行时长，制定基于运行实绩的预防性计划，整体75%的故障错误是可预测的，平均降低5%以上的意外停机成本，保证了生产设备的连续性安全生产，提高了生产效率，节省超15%的设备能源成本。

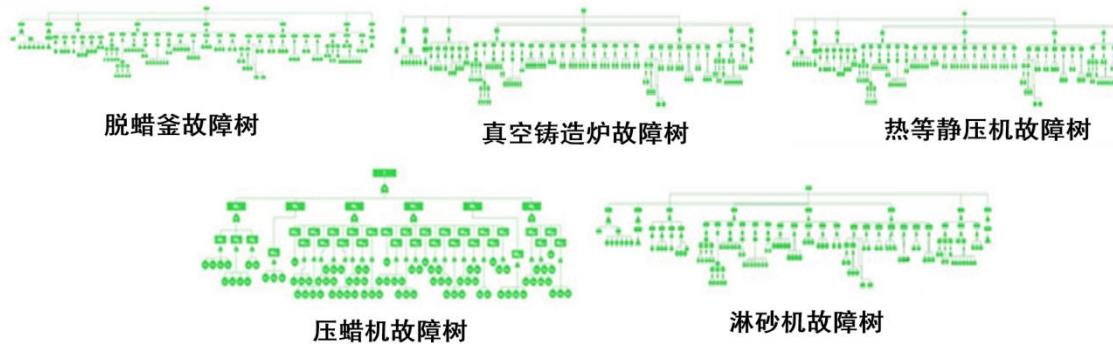


图 22 设备故障树

（八）安全管控（安全风险实时监测与应急处置、危险作业自动化）

安全管控包括对生产过程中的安全风险进行实时监控、应急处置方案的制定以及对危险作业进行自动化管理，是保障生产顺利进行、避免安全事故的关键。

1、存在的问题

在安全风险实时监测与应急处置场景，大飞机零部件精密铸造生产中涉及高温和高压，容易引发危险事故，现有的安全监测系统的多数实时性差，缺乏针对突发性危险的预警和自动响应，应急系统难以快速、准确地判断风险并制定相应的应急处置措施。

在危险作业自动化场景，在压蜡、蜡模组树、脱蜡、壳型烧结、熔炼浇注、焊接、热处理等环节，存在较高的人员安全风险，特别是在半自动化或人工操作时，对潜在危险认识不足，存在安全隐患。

2、改造场景

在安全风险实时监测与应急处置场景，集成自动化监测与应急处置系统，通过收集生产现场的各类数据，利用大数据平台进行实时分析，对可能发生的安全风险进行预测，并提前发出警报。结合历史数据、设备状态等因素，实时评估安全风险，并指导应急响应。引入智能应急响应系统，在发生风险时自动启动应急预案，并通过自动应急装置进行初步处置。

在危险作业自动化场景，在高温壳型运输、装卸等危险作业环节，使用机器人或其他自动化设备代替人工操作；通过远程监控，限制人员进入高危作业区，当发现安全隐患或不规范操作时，系统自动发出警告和安全操作提示。

3、解决方案建议

对于小批量生产企业，建议采用自动化生产、运输和检测设备，建立和完善安全管理体系，对生产工艺进行风险评估，制定相应的安全措施，在危险区域设置视频监控设备实施实时监控。

对于中批量生产企业，通过视频监控集成和 AI 分析，

实现对车间的实时监控，自动识别未戴安全帽、违规操作等不安全行为，在数字化管理平台上设置安全阈值，一旦监测到异常情况，立即触发报警。为员工配备智能安全帽或定位胸卡、定位手表等设备，实时掌握人员位置和健康状态。利用工业监测终端对设备运行状态进行实时监控，提前预警设备故障。

对于大批量生产企业，建议构建基于物联网、大数据和人工智能的智能化安全管控平台，集成视频监控、门禁系统、人员定位等功能。对设备的不安全状态和人员的不安全行为进行量化分析，生成安全意识值，结合企业安全信息数据库，实现风险分级管控和隐患排查治理的双重预防机制。

安全风险实时监测与应急处置

某公司是大飞机航空发动机部件精密铸造企业，通过安全风险实时监测技术，动态监控生产过程中可能出现的安全风险，确保对潜在危险作出快速反应，并及时进行处置。

公司通过在厂区内关键部位（如高温高压设备区域、设备运转、有害烟尘发生点等）安装传感器和摄像监控系统，实时监控获知车间作业工序的物料信息、人员信息及工作状态等，以及温度、压力、气体泄漏、火灾等各类安全风险。数据通过物联网技术上传至MES系统进行集中管理，系统能够实时显示生产环境的安全状态。

公司还利用大数据分析和机器学习算法，对设备、生产环境及作业人员的安全风险进行评估，提前预测安全隐患并发出预警。系统根据不同危险等级的预警信息，向相关人员和管理人员发送紧急通知。

一旦发生突发安全事故或安全风险，企业能够依靠智能化应急响应系统，迅速启动应急处置流程，遇有异常或故障情况时，相应管理人员可及时作出应急处置，根据事故类型自动调度资源，如启动灭火系统、紧急疏散方案等，将事故损失降到最低。

危险作业自动化

某大飞机航空发动机部件精密铸造企业采取以下措施实现危险作业自动化：引入了自动化设备和工业机器人替代人工执行，包括智能AGV智能立库堆垛车替代原叉车、无人AGV物流运输车、行车转运；自动化压蜡机、自动化制壳机器人、自动化焊接机器人、自动化酸洗线、自动化清洗线、自动化荧光检测线、自动化静电喷涂线等自动化设备，减少了员工直接参与危险作业，不仅提高了作业安全性，还提升了生产效率和精度。在真空熔化浇注炉、X射线检测等需要高精度和高危险的操作中，利用智能控制系统对设备进行自动化控制，实现危险作业的自动化执行。

（九）能源管理（能耗数据监测）

能源消耗直接关系到生产成本和碳排放目标的实现，尤其在铸造生产过程中，能源管理是提高生产效率、降低生产成本、优化资源利用的关键环节。

1、存在的问题

在**能耗数据监测场景**，大飞机零部件精密铸造生产中，涉及复杂的工艺流程和多种设备，能源消耗分布不均，现有的能耗监测系统数据收集方式较为单一，难以实时、全面、准确地监控生产过程中各环节的能耗情况，导致部分环节的能源浪费未能及时发现和优化。

2、改造场景

在**能耗数据监测场景**，通过在生产设备和关键环节安装传感器，实时采集能源消耗数据（电、气、蒸汽、水等）。将数据传输至管理平台，进行数据分析，实时监控能耗状况，及时发现能源浪费点，确保能源利用的透明化和可追溯性。结合数据可视化技术，通过图表和仪表盘实时展示能耗情况，支持不同层级的用户查看不同的能效数据，进行能源消费趋势预测和异常告警，帮助管理者及时调整生产策略。

3、解决方案建议

对于**小批量生产企业**，建议安装智能电表、水表和气表，对主要设备和车间的能耗进行实时监测。利用物联网技术将采集到的数据上传至本地服务器，实现数据的可视化展示。

对于**中批量生产企业**，建议建立能源数据自动采集系统，将计量表升级为智能远传计量表，实现能耗数据的实时采集和传输，对能耗数据进行分析，识别高耗能环节。

对于大批量生产企业，建议构建能源数据自动采集与监控平台，实现对设备、车间、工厂的全方位能耗监测。利用物联网和工业互联网技术，将能耗数据与生产数据、设备状态数据进行集成。

能源消耗智能管控

某公司熔模铸造工厂能耗监测平台采用自动化、信息化技术和集中管理模式，对企业的生产、输配和消耗环节实行动态监控和数据化管理，监测企业电、水等各类能源的消耗情况，通过数据分析、挖掘，帮助企业针对各种能源需求及实际用能情况、产品能源单耗、工序能耗、重点设备用能等进行能耗统计、同环比分析、能源成本分析、用能预测、碳排分析，为企业加强能源管理，提高能源利用效率、挖掘节能潜力、为节能评估、能源审计提供基础数据。

工厂目前已经完成了91台智能电表、6台智能水表的数据采集，参数包括：用电量、用水量、电压、电流。针对立式真空退火炉、真空凝壳炉、数字化电弧真空凝壳铸造炉等能耗相对较高设备实施能源管理监测，能源管理系统能实时对设备的动态平衡进行直接控制、分析，当设备能耗异常时，系统会自动给出设备能耗趋势评估、越限预警提示。逐步形成生产部门、机台的单耗管理，让能源管理落到实处。

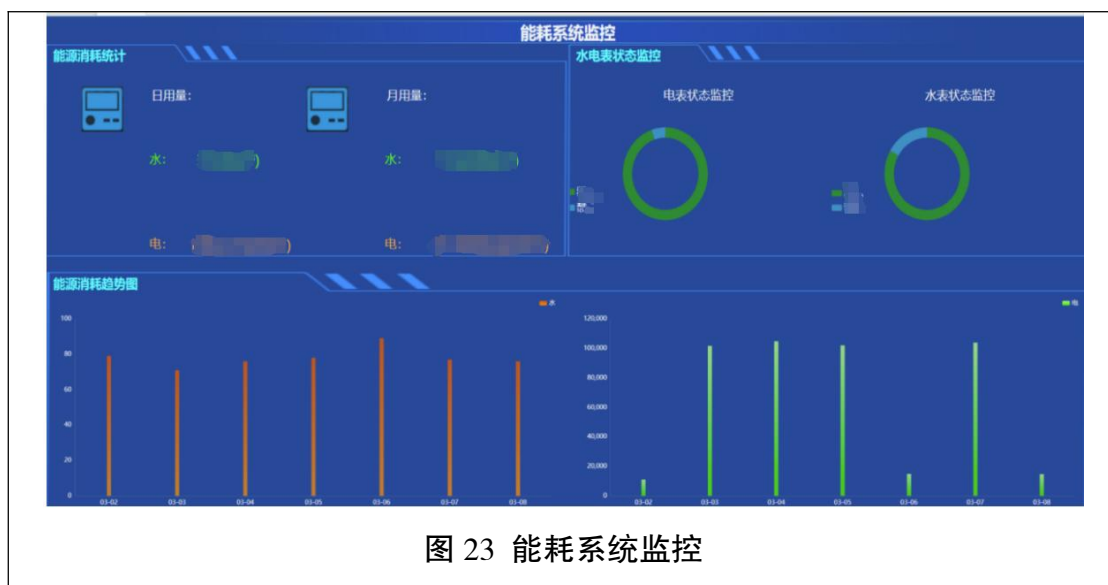


图 23 能耗系统监控

（十）环保管控（污染监测与管控、废弃物管理）

大飞机零部件精密铸造生产过程中产污点多，产生的废气、废水、固废和噪声对环境有一定影响。环保管控包括污染源监控、废弃物处理等场景。随着环保政策的日益严格和社会对绿色生产的日益关注，提升环保管控水平成为企业增强竞争力和可持续发展的必要条件。

1、存在的问题

在污染监测与管控场景，大飞机零部件精密铸造生产中，部分企业在污染监测和管控方面仍停留在定期检测、人工记录和手动管理阶段，缺乏全面的污染监测系统，或监测设备的精准度较低，不能实时掌握污染物排放情况，导致污染治理措施无法及时跟进。污染源数据的收集和分析不充分，环境监控系统智能化水平低，缺少对突发污染事件的预警和应急反应能力。

在废弃物管理场景，大飞机零部件精密铸造生产中产生的废弃物主要是固体废弃物和液体废弃物，固体废弃物包括

熔炼废渣、废壳型陶瓷芯、废耐火材料、废蜡料、废打磨清理材料，以及蜡料回收处理及除尘设施收集的粉尘和灰尘、除尘过滤用废活性炭等。液体废弃物包括废脱芯液、废油、废检测液、废切削液、废清洗液等。当前废弃物管理多处于人工分类、记录和处理阶段，缺乏系统化的管理和数字化支持。生产过程中，废弃物的生成和处理缺乏动态跟踪，难以有效量化每种废弃物的产生量和收集量，并据此进行及时处理及对生产工艺进行优化，同时减少资源的浪费。

2、改造场景

在污染监测与管控场景，应用污染监测与控制、污染源追溯等技术，部署污染排放物在线采集设备和管控平台，在生产现场安装污染监测传感器，对废气、废水、粉尘、噪声等污染物进行实时监测，并触发报警系统，将监测数据传输至管理平台。利用物联网（IoT）技术，实现生产过程中污染物的实时采集与远程监控，快速反馈污染数据并形成可视化报告，帮助管理人员实时了解污染状况。通过对历史污染数据和生产数据进行建模分析，预测可能的污染高峰，并自动触发预警，提示生产部门提前采取措施，避免污染物超标排放。

在废弃物管理场景，通过MES系统集成传感器、RFID等物联网设备对废弃物进行标识、追踪与管理，实时监控工厂废弃物的产生量、种类和存放位置等信息。通过智能废弃物分类系统，自动识别和分类废弃物，建立固体废弃物仓库

和危险废弃物仓库进行存放，并及时送往有资质单位进行处理或再生利用，并统计回收和再利用率。

3、解决方案

对于小批量生产企业，配备高效废气处理设备，定期维护和更换废气处理设备的耗材。建立污水处理系统，对生产过程中产生的废水进行分类收集和处理。建立规范的固体废弃物分类收集、储存和转运体系，设置专门的固体废弃物暂存区域和仓库，对废弃物进行分类、标识和安全存放，委托有资质的单位对可回收利用的废弃物进行资源化处理，对危险废弃物进行无害化处理。在环境监测与管理方面，定期开展环境监测，包括废气、废水和噪声监测，建立环境管理台账，记录污染物排放情况和处理设施运行情况。制定环境应急预案，定期开展应急演练。

对于中批量生产企业，部署传感器和可视化检测网络，实时监测废气、废水、噪声等环境指标和排放情况，数据传输至中央管理系统，利用数据分析技术。设置阈值报警功能，一旦环境指标超标，系统自动发出警报。将环境监测数据与生产管理系统（MES）集成，实现环境数据的可视化和追溯。

对于大批量生产企业，构建覆盖全厂的环境数据采集网络，结合大数据和人工智能技术，实现对废气、废水、噪声、固体废弃物等的全面监控。建设多座污水处理设施采用先进的污水处理工艺，如膜处理技术、深度氧化技术

等对废水进行分类处理。通过大数据分析技术，将环境数据实时展示在监控平台上，便于管理人员快速决策。通过数据分析和预测模型，为管理层提供环境管控的智能决策支持。

企业自动化废水处理与管控

某航空发动机叶片铸造生产中的废水处理部署了水质传感器（COD、BOD、pH等）、流量计、能耗监测仪，实现废水处理全流程参数实时采集。通过5G技术将数据上传至本地服务器，支持边缘计算节点预处理关键数据。集成远程监控、设备管理、能耗分析、水质化验等模块，形成统一的可视化驾驶舱。

废水首先进入综合调节池收集储存，均化调节水量水质。收集池内废水经提升进入物化反应池，通过投加PAC、PAM药剂，反应后进入斜板沉淀池，固液分离，去除SS。沉淀池出水自流至水解酸化池，作为生化单元的预处理，降解有机物，提高污水可生化性，后续进入缺氧池、好氧池，去除有机物、营养盐。为去除难降解有机物，保障膜系统进水水质，进入芬顿系统做深度处理。二沉池出水进入调酸池，投加 H_2SO_4 ，pH调节至2-4，出水自流至芬顿混合池，投加催化剂 $FeSO_4$ ，自流进氧化反应池再投加氧化剂（ H_2O_2 ）进行氧化反应，去除难降解有机物，出水进入气浮装置进行固液分离，借助气浮原理亦作脱气池使用。采用组合式气浮，在气浮反应池1投加液碱回调pH，同步投加PAC，反应池2投加PAM，浮渣在絮凝剂的作用下聚集，在气泡浮力作用

下形成浮渣，刮渣系统分离浮渣。浮渣收集后经气动隔膜泵提升至污泥池。气浮出水进入缓冲罐，检测出水ORP值，同步投加还原剂，去除过量的过氧化氢，确保反渗透膜不被损伤。缓冲水池出水提升后经过石英砂过滤器、活性炭过滤器，浊度降低至3NTU以下，产水进入中间水池，提升后进入一级反渗透系统，采用海德能的PROC10产品，设计回收率75%，提升泵出口采用管道混合器，投加阻垢剂、还原剂、非氧杀菌剂。一级反渗透产水回到回用水池用于生产回用，浓水收集至浓水罐，由于水量过小，浓水反渗透不便于设计，浓水罐按浓水12小时停留时间设计容量，为8m³，浓水反渗透考虑两班倒，每班运行一次，一次运行2小时左右，进水水量按4m³/h设计。浓水反渗透采用海德能的PROC10产品，设计回收率75%，产水回到回用水池用于生产回用，浓水收集至蒸发原液罐。低温蒸发器做减量处理，预计回收率85%左右。每天运行两次，每次蒸发2吨废液，蒸发冷凝液回到回用水池用于生产回用，浓缩废液委外处理。

气浮机浮渣、沉淀池污泥、生化剩余污泥、芬顿排泥提升至污泥池混合储存，再泵至厢式压滤机压滤脱水，压滤机污泥外运处置，压滤液返回综合调节池。

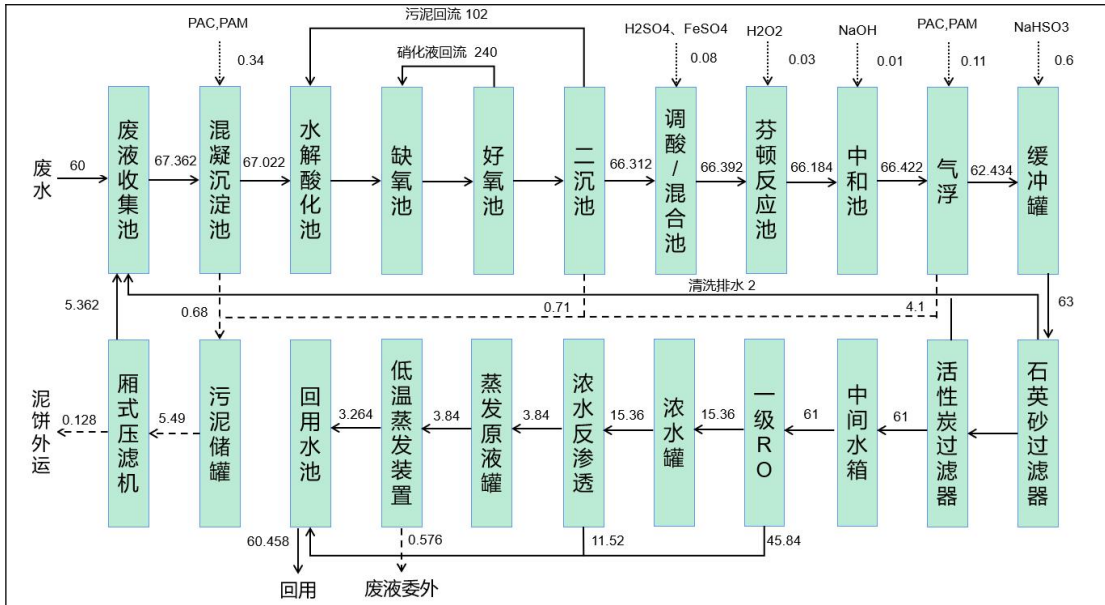


图 24 废水处理流程



图 25 废水处理设备控制系统

危险废物转移过程数字化管理

某航空发动机叶片铸造生产中的危险废物主要包括检漏废液、废碱液、荧光检测废液、废定影液、废显影液、废胶片、晶

粒度检测废液、含油金属屑、油泥、废切削液、实验室废物、实验废液、废机油、废油桶、废活性炭、废过滤材料、污泥、蒸发残渣、废过滤介质等。在这些危险废物转移过程全面落实危险废物转移电子联单制度，实行省内全域扫描“二维码”转移。加强与危险货物道路运输电子运单数据共享，实现运输轨迹可溯可查。依法核实经营单位主体资格和技术能力，签订委托合同，并向经营单位提供相关危险废物生产工艺、具体成分，以及是否易燃易爆等信息。经营单位按合同及包装物扫码签收危险废物，签收人、车辆信息等须拍照上传至系统。危险废物环境重点监管单位在出入口、设施内部、危险废物运输车辆通道等关键位置设置视频监控并与中控室联网，通过设立公开栏、标志牌等方式，主动公开危险废物产生和利用处置等有关信息。

五 路径与方法

（一） 实施路径

1、实施原则

整体规划、分步实施。从大飞机零部件产品的生产全流程出发，制定企业智能制造整体战略。根据基础条件和需求急迫程度，制定分阶段实施方案，分步骤推进规划落地。

夯实基础、标准先行。面向智能制造技术需求，加快夯实信息化自动化等方面的基础，引进和培养相关人才。构建统一的标准体系，统一的数据库平台、产品研发的工具软件、仿真软件平台、管理软件平台、工业自动化系统平台等，避免多种平台“混搭”，确保建设后各系统和各环节标准互认、

数据互通。企业可对照《智能制造能力成熟度模型》（GB/T 39116-2020）和《智能制造能力成熟度评估方法》（GB/T 39117-2020）两项国家标准评估现状，据此确定智能制造能力等级提升目标，依据目标等级描述关键点进行系统规划与改进。需要关注的是，大飞机零部件精密铸造行业特别关注NADCAP等特殊认证对数据留存的要求，智改数转网联方案设计阶段需嵌入合规性模块。

资源保障、制度保证。依据发展规划，应结合企业管理现状、经营现状，提供切合实际的资金、人才。建立完善的实施组织架构、推进制度和权责体系，保证智改数转网联取得实效。

安全可控、不断优化。将安全作为融合应用的前提，提升设备安全、控制安全、平台安全、应用安全、网络安全、数据安全、应用安全的保障能力。充分考虑信息系统的柔性化、平台化、可配置化和可扩展，根据企业的动态发展变化及时维护升级，根据企业需求的变化不断调整建设计划，优化提升智能制造整体水平。

2、实施流程

大飞机零部件精密铸造行业智改数转网联的实施可按现状评估、战略规划、方案设计、实施建设、迭代优化等步骤进行，如图26所示。应在自身能力基础上，联合相关科研院所、解决方案供应商等主体，对信息化管理系统进行二次开发与集成，共同推进“智改数转网联”建设实施。

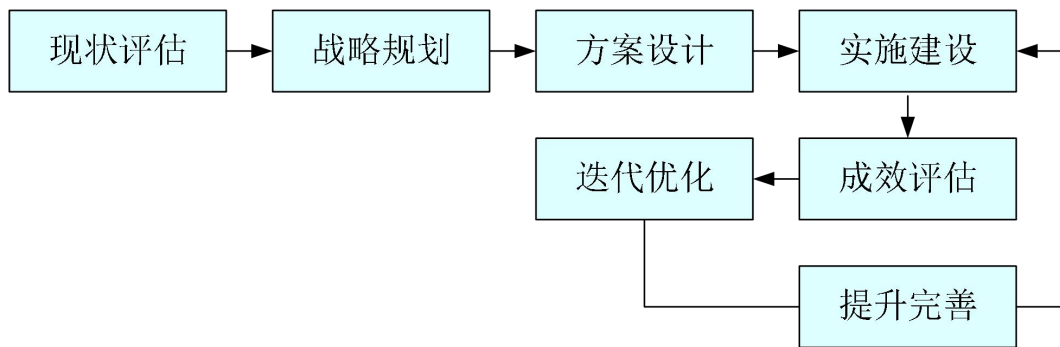


图26 “智改数转网联”实施流程

（1）现状评估

现状评估工作包括关键绩效评估、业务差距识别、能力短板诊断。通过评估明确企业关键业务问题，精准识别能力建设方向，并针对评估结果对标优秀企业、标杆企业，对业务流程进行梳理，识别企业对“智改数转网联”实施的具体需求，进而指导建设实施和落地应用，持续提升数字化水平。

依托关键绩效评估模型和行业绩效基准值，进行关键绩效数据采集、分析以及与行业基准值对比，通过多级指标分析，精准识别企业存在的业务短板，分析提升该业务短板需求的能力。

结合能力评价指标，评判人员、数据、集成、信息安全、装备、网络、设计、生产、物流、销售、服务等全业务链条的智能制造能力成熟度水平，识别关键数字化能力建设情况和能力短板，进而支撑能力规划。

基于数字化能力工具箱，针对能力短板找准需要提升的方向，明确在支撑“智改数转网联”时所应具备的网络、数据采集、信息系统、和信息安全能力，规划相应的能力建设方案。

（2）战略规划

结合企业发展愿景、目标和市场定位，基于企业现有核心竞争能力、业务特点和痛点，明确“智改数转网联”方向，系统规划总体架构和实施路径。具体步骤包括**战略研判**：基于企业现状分析，明确企业需求和愿景。**目标设定**：根据企业不同场景的需求，以及生产指标、管理指标等情况，设定项目建设目标。**蓝图规划**：基于需求、愿景、目标等，设计总体架构，明确实施计划。**责任明确**：结合条件设置智改数转网联负责人，组建专门的人才团队，明确责任部门和关键岗位责任人，并明确各岗位职责，持续加大数字化投入，加强组织和条件保障。

（3）方案设计

基于现状评估与需求分析，结合战略规划，面向全业务流程，提出“智改数转网联”推进的短期、中期和长期目标，联合规划设计院等外部专业机构，从中立、第三方的角度出发，结合经验与行业最佳实践，开展“智改数转网联”整体架构、核心应用以及支撑体系进行全面、系统的总体设计，制定建设蓝图，构建完整的业务、技术、数据、应用、网络、标准以及管理等架构体系，明确建设重点，并根据需求迫切程度、技术基础和资金情况等，明确项目建设先后顺序、各阶段建设目标和建设内容。

根据规划与方案设计要求，联合系统解决方案服务商，设计详细具体的建设方案，每个方案包括所需的技术、装备、

软件等详细内容、投资详细概算、人员安排、进度安排、保障措施等，指导具体实施建设。

（4）实施建设

根据规划与方案设计要求，按需遴选外部服务商，强化软件开发商、自动化集成商、平台服务商的深度整合，形成系统实施推进合力。高标准推进项目实施，深度介入外包开发过程，强化过程监督、质量管控和知识产权保护，推动项目与企业业务更好适配融合，充分运用新一代信息技术提高精益管理能力、提升运营效率，不断对业务活动进行流程化管理改善，优化实施效果。

引导全员强化数字化理念，持续提升互联网思维、大数据思维，推动基于数据的产品创新，优化产品数据服务。

（5）成效评估

以经营目标改善和业务流程优化为导向，开展转型绩效评价，从精益运营、价值增长、可持续发展和综合能力提升等4个方面，聚焦全员劳动生产率、资源综合利用率、产品研发周期、人均销售额、单位产值综合能耗、关键设备数控化率与联网率等指标，持续开展成效评价监测。

通过梳理总结转型目标达成情况以及存在的问题，提出优化改进方向与改进措施，展现“智改数转网联”的成效和价值。成效评估可采用自评估或第三方评价等方式，企业参与评估人员应涵盖企业管理者、各业务部门负责人以及一线技术工人。

（6）迭代优化

根据成效评估结果，针对实施中的短板和不足，迭代解决方案版本，强化安全防护，优化实施效果。立足自身战略定位和业务发展方向，进一步制定下阶段目标和任务，统筹推进场景数字化改造和业务数字化升级，持续强化全流程精益管理水平，不断提升智能制造水平，实现智改数转网联的螺旋式提升。

3、不同阶段差异化实时建议

大飞机零部件精密铸造企业产品质量要求高，目前智能化、数字化、网络化建设主要受制于产品批量，智能化、数字化、网络化建设应随着大飞机行业的发展以及产品市场需求的增长而逐步建设完善，使企业智能制造能力成熟度水平不断提高。

小批量生产阶段。当生产批量较小时，建议重点关注提升数字化工艺设计能力，以及配置自动化数控设备，通过配置工业机器人和机械手实现局部自动化和数据驱动优化，如制壳生产线的自动化和数字化。企业信息化管理以ERP/OA或ERP/MES集成系统作为起始架构，实现订单和库存管理、铸造工艺参数记录分析、二维码系统关联铸件批次与熔炼炉号等功能。

中批量生产阶段。当生产达到中等批量时，建议重点关注关键环节智能化改造，提升精益管理能力。在核心设备（真空铸造炉、压蜡机等）加装IoT传感器监测设备运行参数和

工艺参数。信息化管理部署ERP/MES系统，并集成产品全生命周期（PLM）系统、质量管理体系（QMS）等，实现工艺卡片电子化下发，自动生成统计过程控制图等。

大批量生产阶段。当生产达到大批量规模时，建议打造全流程智能工厂，完善信息化管理系统，搭建企业级工业大数据平台。部署全自动化和数字化的铸造生产线和检测线，应用AI视觉检测系统实现铸件缺陷实时判定。

（二）相关评估

1、两化融合自评估与两化融合管理体系贯标

依据标准： GB/T 23000 系列标准，包括《工业企业信息化与工业化融合评估规范》（GB/T23020-2013）、《信息化和工业化融合管理体系基础和术语》（GB/T23000-2017）、《信息化和工业化融合管理体系要求》（GB/T23001-2017）、《数字化转型参考架构》（GB/T 45341-2025）、《数字化转型价值效益参考模型》（TAITRE10002-2020）、《数字化转型新型能力体系建设指南》（TAITRE20001-2020）、《信息化和工业化融合管理体系 新型能力分级要求》（GB/T 23006-2022）标准涵盖基础术语、实施指南、评估规范及审核要求等内容。其核心要素包括数据、技术、业务流程与组织架构，强调通过管理域（职责、保障、实施、评测）实现全局优化。两化融合管理体系标准旨在为企业数字化转型提供全生命周期的服务，包括从问题识别到解决方案实施的全过程。该体系的应用不仅限于工艺优化，还涉及云计算、物

联网（IoT）、大数据、人工智能等关键技术的集成应用。通过这些先进技术的协同作用，企业能够在数字化环境中实现从智能生产到智能决策的全方位转型。

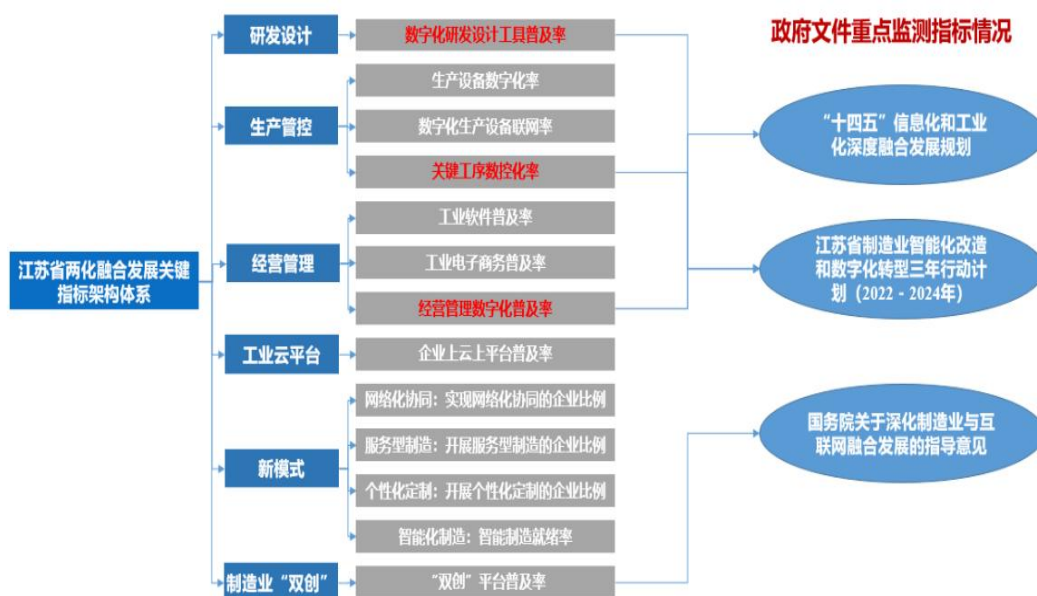


图 27 两化融合自评指标体系

适用范围：两化融合，即工业化与信息化的深度融合，是提升企业创新能力、推动智能制造和实现可持续竞争力的核心战略。两化融合自评与两化融合管理体系贯标适用于所有希望通过信息化与工业化融合实现转型升级各领域、各行业、各规模及所有制的企业，不强制要求覆盖企业整体，可根据业务板块或职能部门划分应用范围。

贯标方法三种模式的实用范围如下：

自行贯标。适用于具备较强工业化和信息化基础的大型企业，尤其是已经在数字化双胞胎、工业物联网等技术领域进行初步探索的企业。

委托第三方服务机构。适用于缺乏专业人才和技术基础

的中小企业。通过外部服务商的专业支持，帮助其在技术与管理方面实现系统性的数字化改造。

课题研究式贯标。适用于大型集团企业，尤其是多个子公司需要不同级别的两化融合标准建设，企业可以联合外部研究机构进行基于实践的课题研究，最终形成可推广的标准成果。

实施路径：自评估与诊断阶段，基于《工业企业信息化和工业化融合评估规范》（GB/T 23020-2023），通过国家两化融合公共服务平台江苏省分平台（<https://jspg.cspiii.com>）开展自评估，明确能力基线。根据 GB/T 23006-2022《信息化和工业化融合管理体系 新型能力分级要求》，将评估结果与 A 级（规范级）、AA 级（场景级）等能力等级对标，确定目标贯标等级及改进优先级，制定管理职责分配与流程优化方案。

贯标启动与规划阶段，搭建组织架构，成立跨部门贯标小组（IT、生产、管理层等），由 CEO 牵头建立“数字化委员会”，破除部门壁垒。制定 3-5 年数字化转型路线图，明确战略目标（如缩短订单交付周期、优化供应链协同）。基于 GB/T 23000 系列标准，编制两化融合管理手册、程序文件及操作指南，涵盖数据管理、业务流程优化等核心要素。通过“业务流程再造→数字化工具匹配→组织架构调整”三步策略，确保体系文件可落地。

体系实施与优化阶段，开展技术部署与试运行，部署ERP、MES、PLM等信息化系统，实现生产数据实时采集与分析，并通过内部培训确保员工适应新流程。实行动态改进，建立“数据驱动决策”机制，定期开展内部审核与管理评审，通过PDCA循环优化体系运行。利用政策支持（如数字化转型基金、税收优惠）对接工业互联网服务商，加速技术改造。

审核认证与持续提升阶段，开展外部审核认证，准备迎审材料（体系文件、运行记录、改进报告），接受第三方机构现场审核，重点验证新型能力（如生产管控、供应链协同）的实际成效。持续迭代升级，通过年度自评估监测能力成熟度，向更高等级（如AAA级流程级）跃迁，整合数据资产实现融资增值。两化融合贯标流程如图28。

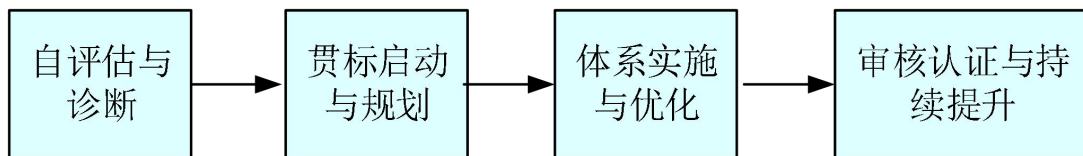


图 28 两化融合贯标流程

国家工业信息安全发展研究中心会通过对各省市的两化融合发展水平进行数据分析和评估，输出详尽的报告，帮助企业了解自己在全国范围内的技术发展位置。企业可登录<https://jspg.cspiii.com>平台申报补贴，优先覆盖研发设计、质量追溯等核心模块。

2、数字化转型成熟度评估

《数字化转型成熟度模型》（T/AITRE10004—2023）给出了数字化转型成熟度模型构成、不同成熟度等级与水平

档次的要求。明确了数字化转型规范级、场景级、流程级、平台级、生态级5个不同成熟度等级及其10个细化水平档次，从发展战略、新型能力、系统性解决方案、治理体系、业务创新转型5个评价域给出不同成熟度等级的具体要求。

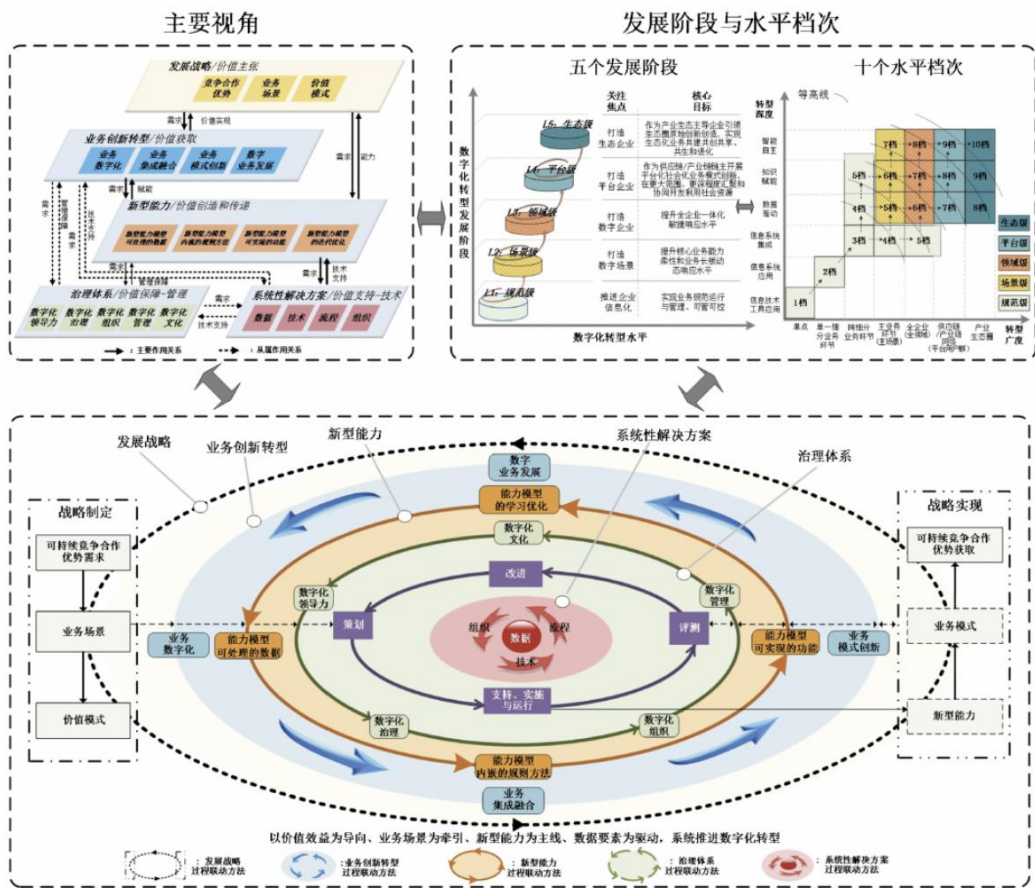


图 29 数字化转型成熟度模型

企业可以通过线上线下结合方式展开诊断对标，线上（网址<https://www.dltx.com/zhenduan>）自诊断报告包括数字化转型总体得分、所处阶段、全国对标及行业对标情况在发展战略、新型能力、系统性解决方案、治理体系、业务创新转型等方面的短板和发展建议数字化转型总体发展建议。线下深度诊断将邀请评审专家将评估发现和行业进行对标评估

过程提供咨询建议，最终给出线下深度诊断报告——包含企业发展现状和问题清单。

3、中小企业数字化转型评测

为进一步助力中小企业数字化转型，《中小企业数字化水平评测指标（2024年版）》从数字化基础、经营、管理、成效四个维度综合评估中小企业数字化发展水平，其中，数字化基础、管理和成效三个维度采用评分的方式确定等级，数字化经营部分用场景等级判定的方式确定等级。判断标准如下：

等级	数字化基础、管理及成效	数字化经营应用场景
一级 (初始级)	≥20分	不少于6个应用场景（其中不少于3个约束性场景）等级需达到一级
二级 (规范级)	≥40分	不少于6个应用场景（其中不少于3个约束性场景）等级需达到二级
三级 (集成级)	≥60分	不少于8个应用场景（其中不少于5个约束性场景）等级需达到三级
四级 (协同级)	≥80分	不少于10个应用场景（其中不少于6个约束性场景）等级需达到四级

中小企业可根据自身实际情况通过此平台完成线上自测（网址：<http://caii-sme.indusforce.com/>），也可发起线下诊断需求，评估师将通过人员访谈、问卷调查、系统演示、现场勘查等方式，为中小企业提供数字化水平评估诊断，助力中小企业明确实施路径，加快转型进程。

（三）供需对接

1、江苏省智改数转网联咨询诊断公共服务平台

江苏省智改数转网联咨询诊断公共服务平台（<https://www.eqiyun.cn/>），是集聚制造业智能化改造和数字化转型服务商的平台，促进企业与服务商之间的供需对接。



图 30 智能化改造数字化转型服务资源池

服务资源汇聚七大类服务商：智能装备服务商、网络服务商、标识服务商、工业互联网融合应用服务商、系统解决方案服务商、工业信息安全服务商、生产性服务业供应商、智能装备服务商、网络建设服务商、系统集成（软件）服务商。服务商在资源池开设店铺展示产品，制造企业可以高效获取服务商信息和服务能力。



图 31 服务商查询

资源池同时汇聚智能化改造数字化转型解决方案，面向企业减存、增效、降本、提质，提供丰富的解决方案供企业参考和对接服务商。

2、世界智能制造大会

世界智能制造大会以“让制造更聪明”为使命，以“全球视野、中国战略、江苏示范”为指引，按照“高端化、国际化、专业化、体系化”的办会思路，秉持“全球视野、中国战略、江苏探索”的办会理念，致力于打造成为世界智能制造领域代表性盛会。

经国务院批准，自2016年起，世界智能制造大会已在江苏南京连续成功举办八届，共有20余个国家和地区的近3000名重要嘉宾参会，观展人数近45万人次，吸引中央电视台等百余家主流媒体及专业媒体报道，发布了《“十四五”智能制造发展规划》、《世界智能制造十大科技进展》、《全球智能制造发展态势》、《中国智能制造发展八大趋势》等权威文件，推动了众多重大项目签约，促进了一批世界先进技术应用推广。

2024世界智能制造大会以党的二十大精神为引领，深入贯彻落实习近平总书记关于新型工业化重要论述以及在参加十四届全国人大二次会议江苏代表团审议时的重要讲话精神，将智能制造作为培育新质生产力的发力点之一，以打造智能制造“升级版”为主要方向，强化行业交流和高水平

对外开放，举办主题大会和系列专题活动，打造智能制造领域国际化、高端化、专业化交流平台。

3、国际软件产品和信息服务交易博览会

2024中国（南京）软件产业博览会于11月20日至22日在南京国际博览中心举行。南京软博会根植于南京市软件产业良好的发展基础，其前身中国（南京）国际软件产品和信息服务交易博览会是国内领先的综合性软件行业盛会。自2005年起，经过连续19年成功举办，已成为全国软件产业品牌展会和对外窗口。本届展会以全面市场化运作模式，打造“1+2+4+X+N+云上”的展会框架体系，重点展示国际国内软件产业发展最新进展，围绕软件产业前沿创新成果，共同探讨产业战略布局。

4、长三角数字化转型大会

2024年长三角数字化转型大会在南京举行。本次大会由省工信厅指导，数字长三角共建联盟主办，江苏省企业信息化协会承办。大会以“向新求质数写智造”为主题，设有1场开幕主论坛、4场主题分论坛。围绕数字转型赋能升级、融合发展、创新驱动、标杆引领等方面分享实践经验，展示长三角地区在智能制造、工业互联网和数字化转型建设方面取得的最新成果，探讨当下制造业数字化转型发展态势，共同推进长三角区域数字经济的高质量发展。会上，长三角AI+场景优秀案例评选启动，江苏省智改数转网联党建联建共建启动，江苏联通大模型工厂能力平台发布。

5、江苏省智能制造解决方案大会

2024年9月10日，第三届江苏省智能制造系统解决方案大会暨数智化转型发展大会在苏州召开。本届大会以“数智江苏新质发展”为主题，由智能制造系统解决方案供应商联盟指导，江苏分盟、中国电子技术标准化研究院华东分院、西交利物浦大学联合主办。主论坛上举办了“江苏省区块链测评中心”揭牌仪式，江苏省第三批智能制造领航服务机构授牌仪式，苏州工业园区“AI+制造”“5G+工业互联网”典型应用场景企业授证仪式。发布了《江苏省智能制造发展指数报告（2023版）》《2024全球数字经济高地图谱》《江苏省智能装备标准化及标准体系报告》等成果。

（四）赋能政策

1、工信部智能工厂梯度培育

为贯彻落实国务院办公厅印发的《制造业数字化转型行动方案》，按照《“十四五”智能制造发展规划》任务部署，构建智能工厂、解决方案、标准体系“三位一体”工作体系，打造智能制造“升级版”，工业和信息化部，国家发展改革委、财政部、国务院国资委、市场监管总局、国家数据局联合开展2024年度智能工厂梯度培育行动。

智能工厂梯度培育行动按照《智能工厂梯度培育行动实施方案》和《智能工厂梯度培育要素条件》的要求，分基础级、先进级、卓越级和领航级四个层级开展智能工厂的梯度培育工作。鼓励制造业企业参考智能制造能力成熟度评估结

果，制定智能工厂建设提升计划，并对照各级要素条件开展自建自评。

智能工厂项目申报、评审、管理、评估等工作基于智能制造数据资源公共服务平台（<https://www.miit-imps.com/>）开展。

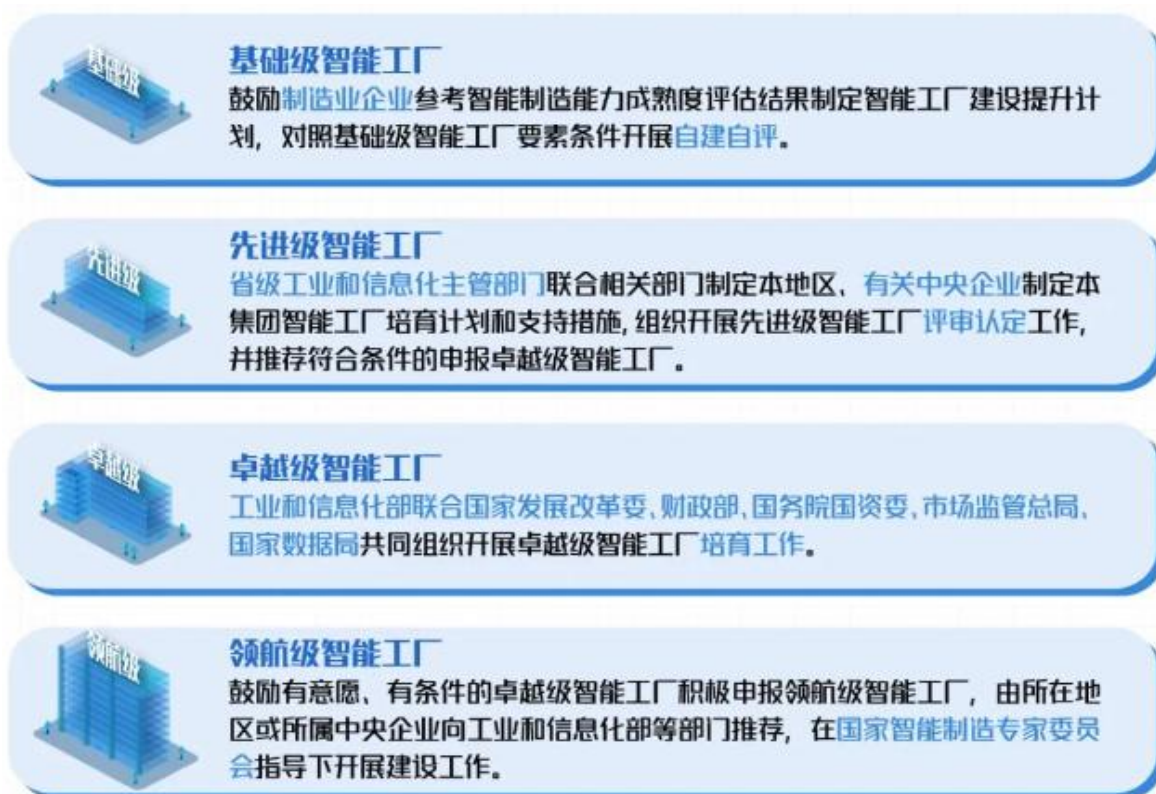


图 32 工信部智能工厂梯度培育

2、工信部5G工厂名录项目遴选

为深入推进“5G+工业互联网”创新发展，持续实施5G工厂“百千万”行动，加快高水平5G工厂建设，推动数字经济和实体经济深度融合，推进各行业领域企业“智改数转网联”，开展5G工厂名录项目遴选工作。企业通过“5G+工业

互联网发展管理平台”（<http://5gii.ait-alliance.org/pro/login>）或“5G+工业互联网发展管理平台——5G工厂库”软件（<http://www.ait-alliance.org/index/c222/n5142.html>）填报项目。主要针对以下内容开展遴选：

基础设施建设。开展5G网络建设，强化生产现场网络能力，创新网络建设服务模式；推动工业网络互通，运用新型网络技术，加快IT-OT网络融合；部署边缘计算，促进云网边端协同；建设业务系统，包括数据存储、标识解析平台，支撑生产运营智能化。

厂区现场升级。推动现场装备网络化改造，加快工业控制系统融合，提升企业数据采集能力；统筹IT-OT应用融合化部署，形成集中管控、现场按需应用的融合方案；推动生产服务智能化升级，优化设备健康管理、工艺参数调优、能耗排放管理、产品售后服务。

关键环节应用。支持5G、人工智能、数字孪生等技术在研发设计、生产运行、检测监测、仓储物流、运营管理方面的应用，提升生产效率和产品质量。

网络安全防护。升级安全防护能力，构建多层次网络安全防护体系，提升网络安全监测水平；提升安全管理水平，提高设备、控制、网络、平台和数据等安全防护能力。

3、江苏省先进级智能工厂

为深入贯彻国务院关于推动制造业数字化转型的决策部署，认真落实省政府办公厅《江苏省深化制造业智能化改

造数字化转型网络化联接三年行动计划（2025-2027年）》（苏政办发〔2024〕39号），根据工业和信息化部等部委开展智能工厂梯度培育、中小企业数字化赋能等工作部署，分层分级推进智能工厂建设，促进实体经济和数字经济深度融合。

构建智能工厂梯度培育体系，按照工业和信息化部等部委《智能工厂梯度培育行动实施方案》等文件，鼓励制造业企业参考《智能制造典型场景参考指引（2024年版）》、《江苏省智能工厂梯度建设要素条件（2025年版）》，在车间智能化改造基础上，加强智能制造装备、工业软件与操作系统和工业网络设备等集成应用，开展基础、先进、卓越和领航级智能工厂梯度建设。

各设区市工业和信息化主管部门结合免费诊断工作基础，制定本地区智能工厂梯度培育计划和支持政策，鼓励和引导企业在利用《江苏省企业数字化转型通用评估指标体系（2025年版）》评价基础上，对照《江苏省智能工厂梯度建设典型场景企业自评价参考（2025年版）》，开展智能工厂建设水平自评价，并推荐符合条件的企业申报省先进级智能工厂。

申报主体已完成智能工厂建设，通过江苏政务服务网江苏省工业和信息化厅旗舰店智能工厂等级水平自评测达到先进级智能工厂等级水平，且申报主体智能制造能力成熟度

自评价水平达《智能制造能力成熟度模型》（GB/T39116-2020）二级及以上。

具体要求可参见江苏省工信厅网站(<https://gxt.jiangsu.gov.cn/>)《关于组织开展2025年江苏省先进级智能工厂申报工作的通知》。

4、江苏省制造强省建设专项资金项目

江苏省工业和信息化厅为贯彻落实省委、省政府《加快建设制造强省行动方案》，推进新型工业化，加快构建现代化产业体系制定发布2025年度江苏省制造强省建设专项资金项目指南，项目支持重点如下：

重点产业技术创新。重点支持企业创新载体建设、“1650”产业体系协同攻关、创新产品首购首用、产业人才培育等。

智改数转网联。重点支持工业软件推广应用、智改数转网联项目建设、优秀服务商培育等。

产业转型升级。重点支持淘汰落后改造、绿色制造、服务型制造升级示范等。

服务体系建设。重点支持中小企业公共服务平台建设、“1650”产业服务体系建设和国家、省委、省政府部署的重大任务和活动。

项目申报采取网上申报的方式进行，进入省工信厅网上政务服务旗舰店（网址：<https://www.jszfw.gov.cn/col/col140127/index.html>）点击“江

“江苏省制造强省建设专项资金项目管理系统”（原省级工业和信息产业转型升级专项资金项目立项审核）进入申报页面。在线填写《2025年度江苏省制造强省建设专项资金项目申报表》，并上传其他申报材料。

具体要求可参见江苏省工信厅网站(<https://gxt.jiangsu.gov.cn>)《关于组织2025年度江苏省制造强省建设专项资金项目申报的通知》（苏工信综合〔2025〕61号）。

5、江苏省星级上云企业创建工作

为贯彻落实加快推进企业“上云上平台”，围绕“1650”产业体系建设，助力制造业“智改数转网联”，支撑数实融合强省建设，根据《江苏省星级上云企业遴选工作指南（2024年版）》，江苏省工信厅开展江苏省星级上云企业创建工作。

企业可通过公有云、私有云或混合云等形式上云。企业可在三星级、四星级、五星级中任选一类进行申报。其中，星级上云企业须逐级申报，不得重复申报已获评星级。

各设区市工信局自行开展三星级、四星级上云企业遴选工作。各地工信局将经企业申报、项目遴选、现场核查、信用审查、公示公布等严格工作程序形成的三星级、四星级上云企业项目信息材料，线上报送省工信厅。五星级上云企业由各设区市工信局组织初审和推荐。各地工信局将推荐的五星级上云企业项目信息材料，线上报送省工信厅由省工信厅组织开展五星级上云企业遴选工作。目标是全面完成规上工

业企业星级上云覆盖率超过40%，大力推进制造业智能化改造数字化转型网络化联接，服务制造业高质量发展。

六、 愿景与展望

（一）未来发展趋势

大飞机零部件精密铸造行业作为大飞机制造产业的重要组成部分，智改数转网联已成为行业发展的必然趋势。在国家“双碳”战略和数字经济快速发展的背景下，未来，行业将向高效、绿色、智能的方向持续迈进，推动整体产业链的升级和可持续发展。智能化将逐步覆盖行业全生命周期，包括设计、制造、物流和售后服务等环节，通过人工智能、工业机器人和智能控制系统的广泛应用，实现设备与工艺的全面智能化。数字化转型将以数据为核心驱动力，通过工业互联网平台、云化工业软件和大数据分析等手段，打通从市场到生产、从设计到服务的全链条数据流，提升整体运营效率和资源配置能力。同时，网络化联接将通过5G、工业物联网等技术实现设备、系统和企业之间的高度互联互通，推动供应链上下游的深度协同和高效运行。绿色低碳发展也将成为行业主旋律，智能能源管理系统和碳足迹监测平台的应用将帮助企业优化能源利用，实现可持续发展。

（二）新技术应用展望

尽管行业在智能化、数字化领域已有显著进展，但部分环节仍未实现全面改造。例如，核心零部件的研发与制造仍主要依赖经验积累和传统技术，导致研发效率较低、产品性

能优化不足。此外，工艺流程的全链条数字化尚未完全贯通，尤其是在复杂多工序加工场景中，实时监控和优化能力亟待提升。供应链协同能力也存在不足，上下游企业间的数据共享和协作效率低下，影响整体供应链的弹性和响应速度。对于中小企业而言，资金、技术和人才资源的限制使得智能化技术的应用推广进展缓慢，形成行业数字化发展的明显短板。

在未来发展中，新型信息技术的应用将为行业提供强大的技术支撑。5G与工业物联网将通过高速率和低延迟的数据传输，满足复杂生产环境中设备互联和实时监控的需求。边缘计算将提升数据处理效率，支持生产现场的实时决策。人工智能技术将在设计优化、智能质检和设备预测性维护中发挥重要作用，例如通过创成式设计技术，突破大型复杂高性能合金铸件的高精度无缺陷铸造技术难题，实现大飞机关键零部件的一体化经济成型，或通过机器学习算法提高质量监控精度和效率。数字孪生技术将成为行业发展的重要工具，通过物理设备与虚拟模型的实时联动，实现全生命周期的监控与优化。此外，工业区块链技术将提升供应链数据的透明度和可信度，在质量追溯和供应链协同中具有广泛应用前景。绿色技术的推广将推动行业在节能减排、能效提升和低碳生产方面取得突破，支持行业实现全生命周期的可持续发展目标。

大飞机零部件精密铸造行业将在新一轮科技革命的推动下，迈向智能化、数字化和网络化的新阶段。通过全面推广新型信息基础设施、人工智能和绿色技术，行业将在效率、质量、成本和可持续性方面取得突破。这不仅将巩固江苏省作为工程机械产业强省的地位，还将为行业在全球范围内赢得更高的竞争力，为未来高质量发展注入强大动力。

- 附件：1、人工智能典型应用场景
2、投入改造清单及图谱
3、典型案例
4、服务商目录
5、技术缩略语
6、江苏省大飞机部件精密铸造行业“智改数转
网联”典型场景参考指引

附件1 人工智能典型应用场景

1、工艺规划与优化

(1) 应用多模态特征提取、强化学习、工业参数数值化嵌入编码等先进技术，实现对铸件制造特征的智能识别和理解，并自动生成工艺规程。

数据收集与预处理：通过从企业现有的生产记录、工艺文件、质量检测报告等中提取历史工艺数据，利用工业物联网设备收集生产过程中的实时数据，例如蜡模压制过程中射蜡温度、射蜡压力、射蜡速度、射蜡时间、合模压力、保压时间、蜡模模具温度，制壳车间温度、湿度、模壳表面风速、干燥时间、模壳层数，脱蜡温度、压力、时间，焙烧温度、时间、模壳转运时间，浇注温度、浇注速度、真空度、环境温度等数据，利用机器视觉设备、OCR识别技术采集零件的外观、尺寸、缺陷等信息，从工艺说明书、操作手册、技术文档等中提取文本信息，将图像、文本等数据进行标注，并对数据进行预处理，如去除噪声数据和异常值，将不同来源的数据进行结构化并转换为统一的格式，以便用于模型训练。

多模态特征提取：使用卷积神经网络（CNN）提取零件外观、尺寸、缺陷等图像特征，结合生成对抗网络（GAN）生成高质量的图像数据，增强模型的泛化能力；使用自然语言处理（NLP）技术，提取工艺说明书、操作手册等文本数据的语义特征；对传感器数据进行数值化处理，提取关键参数的特征；使用多模态融合技术，如注意力机制（Attention

Mechanism) 或Transformer架构, 将图像、文本、数值等多模态特征进行融合, 形成综合特征表示。

工业参数数值化嵌入编码: 将工艺参数进行数值化嵌入, 将其转换为模型可处理的向量形式。使用嵌入编码技术对工艺参数进行编码, 保留参数之间的语义和数值关系。结合强化学习技术, 动态调整参数嵌入的编码方式, 以适应不同的工艺需求。

强化学习: 构建工艺规划与优化的强化学习环境, 定义状态空间(如铸件特征、工艺参数)、动作空间(如工艺调整、参数优化)和奖励函数(如生产效率、质量指标)。设计强化学习智能体, 如深度Q网络(DQN)、策略梯度(Policy Gradient)或深度强化学习算法(如PPO、TD3等), 使其能够在环境中学习最优的工艺规划策略。使用强化学习算法训练智能体, 通过与环境的交互不断优化工艺参数和规划策略。结合多模态特征和参数嵌入编码, 增强智能体的感知和决策能力。

工艺规程自动生成: 利用多模态特征提取和强化学习技术, 实现对铸件特征的智能识别和理解。通过模型预测铸件的潜在质量问题。结合工艺知识库和智能体的决策结果, 自动生成工艺规程。使用自然语言生成(NLG)技术将工艺规程以文本形式输出, 便于操作人员理解和执行。根据生产过程中的实时反馈, 动态调整工艺规程, 确保生产过程的高效和稳定。

(2) 应用机器学习和人工智能算法，实现工艺参数的自主学习与调整，以提高铸件的质量稳定性，降低生产成本，以及缩短工艺调整周期。

机器学习模型：机器学习模型分为监督学习、无监督学习和强化学习三类。

监督学习有回归模型和分类模型，回归模型用于预测连续的工艺参数，如温度、压力等。常见的回归模型包括线性回归、支持向量回归（SVR）、随机森林回归等。分类模型用于预测离散的工艺状态，如设备故障、产品质量等级等，常见的分类模型包括逻辑回归、支持向量机（SVM）、决策树、随机森林等。

无监督学习有聚类分析和异常检测，聚类分析用于发现数据中的自然分组，如将相似的生产批次聚类，以便分析其共同特征，常见的聚类算法包括 K-Means、DBSCAN 等。异常检测用于识别生产过程中的异常情况，如设备故障、制壳车间温湿度异常、铸件质量缺陷等，常见的异常检测算法包括 Isolation Forest、One-Class SVM 等。

强化学习用于动态调整和奖励函数设计，通过强化学习算法（如 DQN、PPO 等），让模型在与环境的交互中学习最优的工艺参数调整策略。定义奖励函数，如提高生产效率、降低能耗、提高产品质量等，引导模型学习最优策略。

模型训练与验证：将数据分为训练集、验证集和测试集，确保模型的泛化能力。使用训练集对模型进行训练，调整超

参数以优化模型性能。使用验证集对模型进行验证，评估模型的准确性和鲁棒性。使用测试集对模型进行最终测试，确保模型在实际生产中的有效性。

工艺参数的自主学习与调整：通过工业物联网设备实时监控生产过程中的工艺参数和设备状态。将实时数据输入到训练好的机器学习模型中，进行实时分析和预测。根据模型的预测结果，自动调整工艺参数，以优化生产过程。

2、质量分析与控制

(1) 利用图像识别技术检测铸件冶金缺陷，并基于人工神经网络的深度学习算法，对铸件缺陷进行分类和统计分析，优化质量控制流程。

图像采集与预处理：使用高分辨率的工业相机、铸件CR射线照射系统或蓝光自动扫描、三坐标测量设备等，对铸件的表面和内部结构进行图像采集，确保图像清晰，能够反映铸件的细节特征，如缩孔、缩松、气孔、夹杂等。将彩色图像转换为灰度图像，减少数据量，同时保留缺陷特征。使用滤波算法（如高斯滤波、中值滤波）去除图像中的噪声，提高图像质量。通过边缘检测算法（如Sobel、Canny）增强图像中的边缘信息，便于后续的缺陷识别及检测。将图像数据归一化到[0,1]区间，便于神经网络的输入。

深度学习模型设计：卷积神经网络（CNN）是处理图像数据的常用深度学习模型，能够自动提取图像中的特征。构建CNN模型，包括卷积层、池化层、激活函数（如ReLU）、

全连接层等。使用预训练模型（如ResNet、VGG、Inception）进行迁移学习，以提高模型的性能和训练效率。通过旋转、翻转、裁剪、缩放等操作对图像数据进行增强，增加数据多样性，防止过拟合。使用标注好的缺陷图像数据对CNN模型进行训练。定义损失函数（如交叉熵损失函数）和优化器（如Adam、SGD），通过反向传播算法优化模型参数。使用验证集对模型进行验证，调整超参数以优化模型性能。

冶金缺陷检测与识别分类：使用训练好的CNN模型对铸件图像进行检测，识别出图像中的缺陷区域、缺陷类别。设置阈值，将检测到的缺陷区域与背景分离。将检测到的缺陷区域输入到分类模型中，对缺陷类型（如缩孔、缩松、多肉、气孔、夹杂等）进行分类。使用Softmax函数将分类结果转换为概率分布，选择概率最高的类别作为最终分类结果。

统计分析质量控制优化：对检测到的冶金缺陷进行统计分析，包括缺陷的数量、类型、分布位置等。使用数据可视化工具（如Matplotlib、Seaborn）生成缺陷分布图、缺陷类型统计图等。根据缺陷统计分析结果，优化铸造工艺方案及参数，减少缺陷的产生。将优化后的工艺参数反馈到生产过程中，形成闭环的质量控制流程。

（2）基于大数据和机器学习模型，预测可能出现的缺陷。

数据收集与预处理：收集来自传感器、生产记录、质量检测报告等的铸造过程中多维度的数据，包括熔炼、浇注、

冷却等环节的工艺参数。对数据进行清洗、标准化和降维处理，以提高模型的训练效率和准确性。

机器学习模型构建：采用卷积神经网络（CNN）用于处理图像数据，能够自动提取图像中的特征。采用随机森林（RF）处理高维数据，有效处理类别不平衡问题。采用XGBoost梯度提升算法，处理大规模数据集。通过特征重分布和代价敏感学习优化模型，提高对缺陷的预测能力。

缺陷预测与分析：利用训练好的机器学习模型（如FR-CS-CNN模型）对铸造缺陷进行预测。基于模型预测结果优化工艺参数，以减少缺陷的发生。

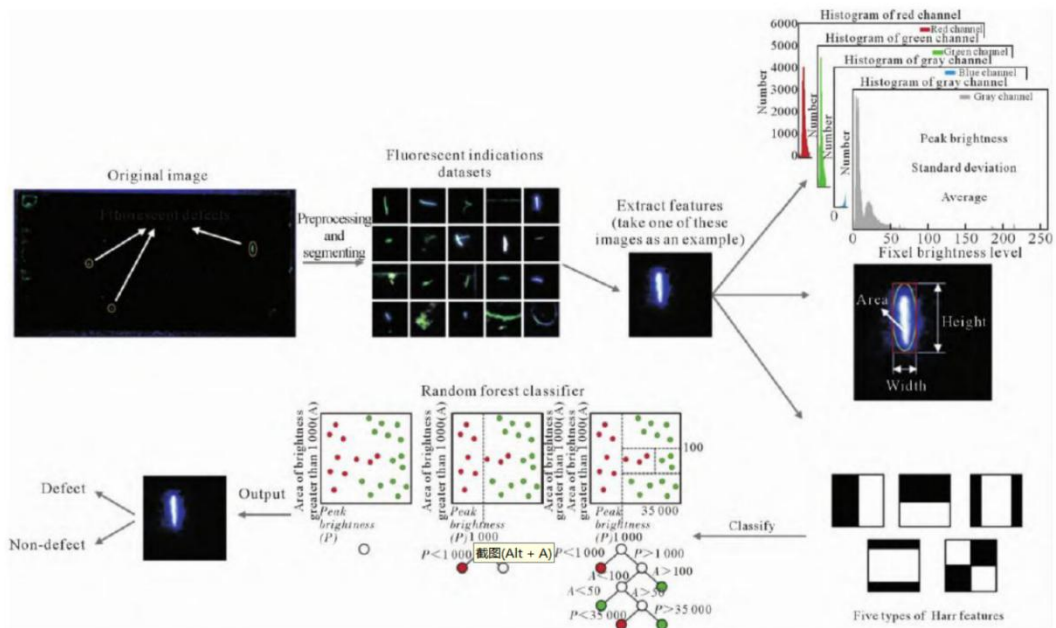


图- 基于随机森林模型的荧光缺陷自动检测系统

3、生产流程优化

(1) 基于人工智能求解器的多工序多约束智能排程，实现生产计划优化和动态调整。

通过人工智能求解器，结合多工序多约束条件，通过均衡各种生产资源，实现生产计划的优化和动态调整。智能排程系统支持复杂条件下的多目标评价与优化，如在资源利用率、交付周期、设备负荷等多个目标之间进行权衡，以实现整体生产效率的最大化。

通过实时监控生产过程中的关键指标，如设备状态、生产进度、物料库存等，及时响应生产中的扰动，如设备故障、紧急插单等，并动态调整生产计划

（2）利用实时数据分析和遗传算法等技术，实现生产进度的实时监控和制造资源的动态配置。

实时数据采集与监控：通过部署在生产设备及现场的各类传感器、智能仪表、条码扫描器等设备，实时采集生产过程中的各种数据，如生产进度、设备状态、质量数据、人员信息等。将采集到的数据通过有线或无线传输技术（如工业以太网、Wi-Fi、蓝牙等）实时传输到业务系统中，确保数据的快速、稳定和安全传输。对接收到的数据进行清洗、转换和存储，通过可视化界面（如数据大屏）实时展示生产线的运转状态、生产进度、设备效率等关键指标。实时分析生产数据，检测生产过程中的异常情况（如设备故障、生产延误、质量问题等），并自动触发预警提示。

遗传算法优化资源配置：基于实时采集的生产数据，利用遗传算法对生产计划进行优化。遗传算法通过模拟生物进化过程，进行选择、交叉和变异操作，从海量排产方案中筛

选出最优解。在优化过程中，考虑多个目标，如总生产成本、总延迟时间、设备利用率等，权衡不同约束条件，生成最优排产方案。当出现设备故障、紧急订单等突发情况时，基于实时数据利用分布式调度算法实时调整排产计划，确保生产流程的连续性和灵活性。

系统集成与协同管理：将实时监控系统与生产调度系统、ERP系统等其他信息系统进行集成，实现数据共享和信息互通。与生产现场的设备、工具和人员进行实时通信和协同管理，通过在线跟踪生产任务和共享生产进度信息，提高生产的协同性和响应速度。

4、设备管理

通过生产设备数据采集和分析，利用人工智能算法优化设备运行参数，并预测设备故障，提前安排维护，减少停机时间。

设备数据采集：在关键设备上及制壳车间安装各种传感器，如温度传感器、压力传感器、振动传感器、电流传感器、制壳车间温湿度传感器等，用于实时监测设备的运行状态及制壳车间环境状况。传感器的选择和部署应根据设备的类型和运行特点进行优化，确保能够全面覆盖设备的关键运行参数。构建一个高效的数据采集系统，将传感器采集到的数据实时传输到数据处理中心。数据采集系统应具备高可靠性、低延迟和高吞吐量的特点，以满足工业环境的需求。对采集到的原始数据进行清洗、滤波和归一化处理，确保数据的质

量。提取关键特征，如设备运行时间、负载变化、异常振动频率等，为后续的分析 and 建模提供支持。

设备运行参数优化：使用监督学习算法（如线性回归、支持向量机、随机森林等）建立设备运行参数与性能指标之间的关系模型。利用卷积神经网络（CNN）或循环神经网络（RNN）处理复杂的时间序列数据，提取设备运行状态的深层次特征。通过强化学习（如 Q-learning、PPO 等）动态调整设备运行参数，以实现最优的运行效率和能耗控制。

模型训练与优化：使用历史数据对模型进行训练，调整模型的超参数以提高预测精度。通过交叉验证和模型评估，确保模型的泛化能力和稳定性。根据模型的预测结果，动态调整设备的运行参数，以优化设备的运行效率和能耗。实时监控设备的运行状态，根据反馈数据不断优化模型和参数调整策略。

设备故障预测：分析设备故障的历史数据，提取与故障相关的特征，如真空铸造炉冷却水流量、温度异常、真空度不足、浆桶温度异常、焙烧炉温度异常、热处理炉真空度、温度波动等。使用特征工程技术（如主成分分析 PCA、自编码器等）提取关键特征，减少数据维度，提高模型的训练效率。使用分类算法（如逻辑回归、支持向量机、随机森林等）建立故障预测模型，预测设备的故障状态。利用长短期记忆网络（LSTM）或门控循环单元（GRU）处理设备运行的时间序列数据，预测设备的剩余使用寿命（RUL）。使用历史故

障数据对模型进行训练，通过交叉验证评估模型的性能。调整模型的超参数，优化模型的预测精度和召回率。

故障预警与维护计划：根据模型的预测结果，提前发出故障预警，提醒维护人员进行预防性维护。制定维护计划，合理安排维护时间和资源，减少设备停机时间。

5、仓储与物流管理

(1) 在智能化仓储管理系统中，利用立体库、AGV等设备，应用利用人工智能算法和数据分析，建立需求预测模型，实现物料和成品的出入库、存储、拣选的智能化管理。

系统架构与设备集成：构建自动化立体仓库，利用高层货架和堆垛机实现货物的垂直存储和快速存取。部署自动导引车（AGV），用于货物的水平搬运和自动化运输。将立体库、AGV、输送系统、机器人等自动化设备进行集成，形成一个完整的自动化仓储系统。将仓储管理系统（WMS）、企业资源计划（ERP）系统、制造执行系统（MES）等信息系统进行集成，实现数据共享和业务协同。

需求预测模型：收集历史销售数据、生产计划数据、库存数据、订单数据等。对数据进行清洗、归一化和特征提取，提取与需求预测相关的特征，如时间序列特征、季节性特征、促销活动特征等。使用时间序列分析（如ARIMA）、回归模型（如线性回归、岭回归）、集成学习模型（如随机森林、XGBoost）等构建需求预测模型。利用长短期记忆网络（LSTM）、卷积神经网络（CNN）等处理时间序列数据，提取深层次特

征，提高预测精度。使用历史数据对模型进行训练，通过交叉验证评估模型的性能。调整模型的超参数，优化模型的预测精度和召回率。

实时预测与调整：将训练好的模型部署到生产环境中，实时接收最新的销售和库存数据，进行动态需求预测。根据预测结果，实时调整库存水平和补货计划。

智能化入出库管理：入库时，利用条码扫描或RFID技术，自动识别货物信息，记录入库时间、数量、位置等信息。根据货物的属性（如重量、体积等）和库存策略，自动分配存储位置。通过AGV和堆垛机将货物自动搬运到指定位置，实现自动化入库。

当接收出库指令后，系统自动查询货物的位置信息，生成最优的拣选路径。通过AGV和堆垛机将货物自动搬运到出库口，实现自动化出库。利用条码扫描或RFID技术，自动记录出库时间、数量等信息，更新库存数据。

智能存储与优化：根据货物的周转率、保质期、体积等属性，动态调整存储策略，优化货物的存储位置。使用人工智能算法（如遗传算法、模拟退火算法）优化货物的存储布局，提高空间利用率。实时监控库存水平，根据需求预测结果，自动调整补货计划，确保库存水平的合理性。利用数据分析技术，对库存进行分类管理，如ABC分类法，优化库存控制策略。

智能拣选与分拣：利用人工智能算法（如路径规划算法）生成最优的拣选路径，减少拣选时间和劳动强度。通过 AGV 和机器人实现自动化拣选，提高拣选效率和准确性。

利用机器视觉技术识别货物的外观特征，实现自动化分拣。根据订单信息和货物属性，自动将货物分拣到不同的出库口或包装区域。

数据分析与优化：通过数据可视化工具（如 BI 工具），实时监控仓储系统的运行状态，包括库存水平、设备利用率、订单处理时间等。分析数据，发现潜在问题和瓶颈，为优化提供依据。根据数据分析结果，持续优化仓储系统的运行策略，如存储策略、补货策略、拣选策略等。定期对需求预测模型进行重新训练和验证，确保模型的准确性和时效性。应用智能调度算法，实现厂内物料配送的快速响应和动态调度。

附件2：投入改造清单及图谱

1、行业系统化场景图谱示意图

场景	主场景	细分场景			
工厂建设	<p>场景名称: 工厂建设</p> <p>工具软件: CAD 工具、CAM 工具、数字化仿真工具、ERP 系统、MES 系统、PLM 系统、QMS 系统、WMS 系统、APS 系统、EMS 系统</p> <p>数据要素: 规划数据、生产工艺设计数据、建筑设计数据、设备与系统数据、经济与运营数据</p> <p>知识模型: 规划与设计模型、工程技术模型、项目管理模型、生产系统模型、数字化工厂模型</p> <p>人才技能: 具备工厂数字化设计与仿真能力, 具备项目管理知识, 了解熔模铸造生产系统和工艺流程</p> <p>痛点问题: 基于传统经验或简单工具, 无法实时跟踪生产需求变化, 生产线优化不足, 导致资源浪费和生产调度不合理; 生产数据与管理系统对接不足, 无法通过数据分析实时监控生产进程和质量; 工厂内外部数据治理不完善, 治理机制不健全, 数据流通和访问权限设置不合理, 数据存在重复、错误或丢失现象</p>	<p>场景名称: 工厂数字化设计</p> <p>工具软件: CAD 工具、CAM 工具、数字化仿真工具</p> <p>数据要素: 规划数据、生产工艺设计数据、建筑设计数据、设备与系统数据、经济与运营数据</p> <p>知识模型: 规划与设计模型、工程技术模型、项目管理模型、生产系统模型、数字化工厂模型</p> <p>人才技能: 熟练使用 CAD/CAM 软件, 掌握 VR/AR 技术应用, 具备数字化设计仿真操作能力, 拥有工厂设计与工艺优化知识</p> <p>痛点问题: 设计依赖传统经验或简单工具, 缺乏灵活数字化设计工具, 难以实时跟踪生产需求变化, 生产线优化不足, 易造成资源浪费与生产调度不合理</p>	<p>场景名称: 工业技术软件化应用</p> <p>工具软件: ERP 系统、MES 系统、PLM 系统、QMS 系统、WMS 系统、APS 系统、EMS 系统</p> <p>数据要素: 企业资源数据、管理数据、生产调度数据、质量控制数据、供应链数据</p> <p>知识模型: 数字化工厂模型、信息化管理系统模型、数据集中分析与决策支持模型</p> <p>人才技能: 掌握企业管理标准和相关知识, 具备信息化管理系统再开发技能和集成技术, 具备数据分析与处理能力, 了解生产管理流程</p> <p>痛点问题: 软件系统间信息不互通、集成性差, 生产数据与管理系统无法有效对接</p>	<p>场景名称: 数字基础设施集成</p> <p>工具软件: 工业以太网、5G 通信网络、物联网设备、边缘计算设备</p> <p>数据要素: 设备运行数据、生产线实时数据、传感器采集数据、传输数据</p> <p>知识模型: 工业网络基础设施建设模型、设备与系统集成模型</p> <p>人才技能: 掌握工业网络搭建与维护技术, 熟悉物联网设备集成</p> <p>痛点问题: 数字基础设施建设滞后且分散, 现有设备与新技术集成度低, 数据流通不畅, 不同系统间数据难以互联互通, 跨部门协作困难。</p>	<p>场景名称: 数据治理与流通</p> <p>工具软件: 信息化管理系统、加密技术 (SSL/TLS 加密、数据加密存储)、身份认证与访问控制软件</p> <p>数据要素: 生产数据、质量数据、库存数据、设备数据、安全数据、环保数据</p> <p>知识模型: 数据整合与流通模型、数据安全保障模型</p> <p>人才技能: 具备数据治理理论知识, 掌握数据加密与安全防护技术</p> <p>痛点问题: 工厂内外部数据治理不完善, 治理机制不健全, 数据流通和访问权限设置不合理, 数据安全与准确性难以保障</p>

场景	主场景	细分场景			
工艺设计	<p>场景名称：铸造工艺数字化设计</p> <p>工具软件：CAD 软件、铸造过程模拟软件、CAPP 系统、PLM/PDM 系统、MES 系统</p> <p>数据要素：铸件数据、材料物性参数数据、工艺参数数据、铸造过程模拟分析数据</p> <p>知识模型：铸造工艺设计优化模型、三维建模传递模型、蜡模制造仿真模型、误差流模型</p> <p>人才技能：熟练使用 CAD 软件、铸造模拟分析软件、CAPP 系统等，具备铸件、蜡模、压型、壳型、浇冒口系统等工艺设计能力，能进行三维建模，了解大飞机零部件精密铸造工艺、材料特性及质量要求。</p> <p>痛点问题：信息共享与传递低效，缺乏有效数据处理手段，设计效率低，试验成本高，人工计算与现场试制工作多，工艺设计周期长，复杂产品缺陷难提前发现，设计方案落实难</p>	<p>场景名称：铸件图设计场景</p> <p>工具软件： ProCAST、MagmaSoft、Flow-3D cast、AnyCasting、SolidCast、华铸 CAE</p> <p>数据要素：材料物性参数数据、铸造工艺参数数据、零件内部热节点分布数据、加工余量数据</p> <p>知识模型：基于铸造模拟与工艺数据库的铸件设计优化模型</p> <p>人才技能：熟练操作铸造工艺设计和模拟分析软件，具备铸造工艺与机加工工艺知识，能够解读技术要求并应用于铸件图设计</p> <p>痛点问题：缺乏高效的铸造模拟与工艺数据结合手段，难以准确识别影响铸件生产及后续加工的潜在问题，无法为产品设计提供有效改进建议</p>	<p>场景名称：三维建模场景</p> <p>工具软件： UG NX、CATIA、SolidWorks</p> <p>数据要素：蜡料物性参数数据、壳型物性参数数据、合金物性参数数据、机加工余量数据</p> <p>知识模型：考虑材料收缩率的三维模型精准传递模型</p> <p>人才技能：精通 CAD 软件操作，熟悉铸造工艺中材料收缩特性，具备复杂结构三维建模能力</p> <p>痛点问题：三维建模过程中对材料收缩率计算和传递不准确，导致模型尺寸偏差，影响后续生产环节</p>	<p>场景名称：虚拟铸造与仿真</p> <p>工具软件： ProCAST、MagmaSoft、SolidCast、华铸 CAE、Moldflow 等</p> <p>数据要素：料物性参数数据、壳型物性参数数据、合金物性参数数据、工艺参数数据</p> <p>知识模型：基于数值模拟的铸造过程仿真模型、蜡模压制仿真模型</p> <p>人才技能：掌握铸造和高分子材料成型理论，能够分析模拟结果并优化工艺</p> <p>痛点问题：模拟软件与实际生产场景重合度不足，工艺参数设置不合理，导致模拟结果与实际生产差异大</p>	<p>场景名称：模壳制备与工艺参数优化场景</p> <p>工具软件：计算机辅助工艺设计 CAPP、ProCAST</p> <p>数据要素：蜡料物性参数数据、壳型物性参数数据、合金物性参数数据、设备调度指令数据、型壳加固方案数据、缩松风险区域数据</p> <p>知识模型：壳型设计与工艺参数自动匹配优化模型</p> <p>人才技能：熟悉 CAPP 系统操作，掌握模壳制备工艺和铸造缺陷控制知识</p> <p>痛点问题：CAPP 系统功能不完善，无法精准匹配复杂铸件的工艺需求，对缺陷预测和控制能力不足</p>

场景	主场景	细分场景		
质量管控	<p>场景名称：质量管控</p> <p>工具软件：ERP 系统、MES 系统、PLM 系统、QMS 系统</p> <p>数据要素：原材料质量数据；工艺参数数据、设备状态数据、质量检测数据</p> <p>知识模型：基于质量管理标准的全流程质量管控模型；产品全生命周期质量追溯模型；质量数据实时分析与决策支持模型；质量波动原因分析与工艺优化模型</p> <p>人才技能：熟悉 ISO9001、AS9100 等质量管理标准；掌握 MES、QMS 系统操作与数据分析；能够操作高精度检测设备和无损检测设备；具备质量追溯体系构建能力；拥有质量问题分析与工艺优化的专业知识</p> <p>痛点问题：质量管控环节数字化、智能化程度低；缺乏全面、实时的质量监控手段；质量追溯体系不完善，问题原因难以快速定位；质量优化依赖人工经验，缺乏数据支持和持续改进机制</p>	<p>场景名称：智能在线检测</p> <p>工具软件：高精度传感器、机器视觉设备、三坐标检测仪、蓝光扫描设备、电子量具；X 射线、超声波、荧光等无损检测设备；机器学习和深度学习算法平台；数据分析软件（用于实时比对工艺标准）</p> <p>数据要素：蜡模、铸件的尺寸数据；外观和表面质量数据；内部缺陷检测数据；铸造过程中的温度、压力等关键工艺数据；工艺标准数据；检测结果判定数据；异常情况报警数据</p> <p>知识模型：基于自动化检测设备的实时质量监测模型；结合机器学习的缺陷自动判定与预警模型；工艺参数与质量数据的关联分析模型</p> <p>人才技能：熟练操作高精度检测设备和无损检测设备；掌握机器学习和深度学习算法应用；能够分析质量数据并与工艺标准比对；具备异常情况处理能力</p> <p>痛点问题：依赖人工抽检，无法全面实时监控；在线检测设备智能化程度低，缺乏自动判断和智能预警功能；数据分析滞后，不能及时发现和处理质量问题</p>	<p>场景名称：质量精准追溯</p> <p>工具软件：条码、二维码生成与识别工具；RFID 读写设备；标识解析系统；5G 通信技术设备；质量管理体系；物联网管理平台；数据分析软件（用于质量数据汇总与分析）</p> <p>数据要素：原材料信息数据；工艺设计数据；生产过程数据（设备状态、操作工信息等）；质量检验数据；产品批次数据；追溯日志数据；质量问题关联数据</p> <p>知识模型：基于条码、二维码和 RFID 技术的全流程追溯模型；质量数据集成分析与问题定位模型；产品全生命周期质量信息管理模型</p> <p>人才技能：掌握条码、二维码和 RFID 技术应用；熟悉质量管理体系操作；具备质量数据集成分析能力；能够构建和维护全流程追溯系统</p> <p>痛点问题：缺乏有效的质量追溯体系；生产过程信息繁多，质量问题难以追溯到具体环节或原因；质量信息管理不规范，追溯过程繁琐耗时</p>	<p>场景名称：产品质量优化</p> <p>工具软件：MES 系统、QMS 系统、数据仓库；数据分析平台；机器学习算法工具；自动化生产参数调整设备</p> <p>数据要素：生产过程质量数据；质量波动历史数据；工艺参数数据；原材料性能数据；质量优化调整记录数据；潜在质量问题预测数据</p> <p>知识模型：基于大数据分析的质量波动原因挖掘模型；结合机器学习的潜在质量问题预测模型；质量优化决策支持与工艺调整模型</p> <p>人才技能：熟练使用数据分析平台和机器学习算法工具；具备质量数据深度分析能力；掌握生产工艺优化知识；能够根据数据反馈调整生产参数和工艺流程</p> <p>痛点问题：传统工艺和质量检测依赖人工经验，缺乏数据支持；设计和生产过程未形成闭环数据流，质量提升难以持续改进</p>

场景	主场景	细分场景		
计划调度	<p>场景名称：计划调度</p> <p>工具软件：ERP系统、MES系统、APS系统、WMS系统</p> <p>知识模型：基于多目标多约束的生产计划优化模型；智能排产与资源动态调度模型；生产资源统一监控与按需配置模型</p> <p>人才技能：掌握生产运营管理知识；熟悉ERP、MES系统、APS系统、WMS系统操作，掌握多目标优化、产能规划等技术；了解大飞机零部件精密铸造生产工艺与流程</p> <p>痛点问题：计划调度依赖人工经验，实时性与动态调整能力弱；面对订单变动、设备故障等突发情况，难以快速响应；生产资源配置不合理，易出现不均衡、过度集中或缺乏，导致生产效率低下和资源浪费</p>	<p>场景名称：生产计划优化</p> <p>工具软件：ERP系统、MES系统</p> <p>数据要素：订单数据、资源数据、设备能力数据、人员配置数据、过程能力数据</p> <p>知识模型：基于多目标多约束求解与产能动态规划的生产计划生成模型</p> <p>人才技能：掌握生产运营管理知识；掌握多目标多约束求解方法与产能动态规划技术；熟练生产计划系统操作</p> <p>痛点问题：生产计划依赖人工制定，实时性差；动态调整能力不足，难以应对频繁的订单变动；难以有效平衡生产资源，易造成生产进度延误</p>	<p>场景名称：车间智能排产</p> <p>工具软件：MES系统、APS系统、WMS系统</p> <p>数据要素：生产任务数据、库存数据、设备能力数据、人员配置数据、过程能力数据</p> <p>知识模型：基于多约束与多目标的智能排产优化模型；结合物联网数据的动态资源调度模型</p> <p>人才技能：掌握生产运营管理知识；熟练操作智能排产调度系统与MES系统；掌握多约束排产建模和多目标排产寻优技术</p> <p>痛点问题：依赖人工调度，排产缺乏实时性和自动调整能力；面对设备故障、人员短缺等突发事件，无法及时调整排产计划，易导致生产停滞或资源浪费</p>	<p>场景名称：资源动态配置</p> <p>工具软件：ERP系统、MES系统、APS系统、WMS系统</p> <p>知识模型：基于大数据分析 with AI 算法的资源监控与动态配置模型</p> <p>人才技能：掌握生产运营管理知识；熟悉ERP、MES系统、APS系统、WMS系统操作；了解大飞机零部件精密铸造生产资源需求特点</p> <p>痛点问题：资源配置缺乏实时反馈与灵活调整能力；易出现资源过度集中或缺乏，影响生产效率；无法根据生产过程变化及时优化资源分配，造成资源浪费</p>

场景	主场景	细分场景		
生产作业	<p>场景名称：生产作业</p> <p>工具软件：ERP 系统、MES 系统、PLM 系统、QMS 系统、WMS 系统、APS 系统、EMS 系统、CAPP 系统</p> <p>数据要素：生产任务数据、生产进度数据、库存数据、设备状态数据、人员配置数据、工艺参数数据、产品质量数据</p> <p>知识模型：基于模块化重构的产线柔性配置模型；设备机理与数据混合驱动的工艺动态优化模型；模型预测控制与多目标寻优的先进过程控制模型</p> <p>人才技能：掌握生产运营管理知识；熟练应用信息化管理软件；掌握产线模块化重构和柔性物流技术；了解大飞机零部件精密铸造工艺与材料特性</p> <p>痛点问题：产线柔性不足，难以快速适应多品种、小批量生产；工艺参数动态调优困难，仿真模型与实际偏差大；生产过程工艺参数波动大，控制效果差，无损检测自动化率低，能耗调控不精准</p>	<p>场景名称：产线柔性配置</p> <p>工具软件：MES 系统、PLM 系统、QMS 系统、WMS 系统、APS 系统、</p> <p>数据要素：生产任务数据、生产进度数据、库存数据、设备状态数据、人员配置数据</p> <p>知识模型：基于订单-工况-库存动态响应的产线模块化重构模型；智能调度驱动的生产线柔性配置模型</p> <p>人才技能：掌握生产运营管理知识；熟练应用信息化管理软件；掌握产线模块化重构和柔性物流技术；了解大飞机零部件精密铸造工艺与材料特性</p> <p>痛点问题：产线切换调整时间长，效率低；传统设备刚性设计，难以适应多品种小批量生产；设备专用性强，缺乏标准化接口，信息化水平低，无法接入柔性制造系统</p>	<p>场景名称：工艺动态优化</p> <p>工具软件：CAPP 系统、MES 系统、PLM 系统、QMS 系统、WMS 系统、APS 系统</p> <p>数据要素：设备状态数据、人员配置数据、产品质量数据、工艺参数数据</p> <p>知识模型：基于设备机理与数据混合的工艺参数动态优化模型；机器学习驱动的工艺过程实时监控与调整模型</p> <p>人才技能：掌握生产运营管理知识；熟练应用信息化管理软件；掌握设备机理与数据混合建模方法；掌握产线模块化重构和柔性物流技术；了解大飞机零部件精密铸造工艺与材料特性</p> <p>痛点问题：铸造仿真模型与实际生产偏差大，工艺参数迭代效率低；熔炼过程温度场控制依赖经验，产品废品率波动大</p>	<p>场景名称：先进过程控制</p> <p>工具软件：MES 系统、PLM 系统、QMS 系统、WMS 系统、EMS 系统</p> <p>数据要素：生产任务数据、生产进度数据、库存数据、设备状态数据、人员配置数据</p> <p>知识模型：基于模型预测控制的工艺参数实时优化模型；多目标寻优驱动的闭环工艺流程控制模型</p> <p>人才技能：掌握生产运营管理知识；熟练应用信息化管理软件；掌握先进过程控制和实时优化系统技术；熟悉模型预测控制和多目标寻优技术；具备大数据分析 with 工艺参数调控能力</p> <p>痛点问题：熔模铸造工艺复杂，工艺参数波动大，控制效果差；铸件无损检测自动化率低，人工判读误差大；设备能耗预测模型精度低，动态节能调控困难</p>

场景	主场景	细分场景	
仓储物流	<p>场景名称：仓储物流</p> <p>工具软件：WMS 系统、MES 系统、APS 系统</p> <p>数据要素：物料出入库数据、库存数据、生产计划数据、物料存储状态数据、配送数据</p> <p>知识模型：基于自动化设备与物联网的智能仓储管理模型；结合高精度定位与动态规划的精准配送模型；RFID 与区块链驱动物料全流程追踪与信息模型</p> <p>人才技能：掌握供应链与物流管理知识；掌握智能仓储管理系统操作与维护；熟悉条码、射频识别等信息技术；熟练操作和维护智能物流设备；了解高精度定位导航、物流路径规划技术；掌握 RFID 与区块链技术在物料管理中的应用</p> <p>痛点问题：仓储管理人工或半自动化，存取效率低，库存管理不精准；配送依赖人工判断，缺乏实时监控与优化，路线和时间不合理；物料信息缺乏统一平台，数据孤岛严重，调度不精确</p>	<p>场景名称：智能仓储</p> <p>工具软件：WMS 系统、MES 系统、APS 系统</p> <p>数据要素：物料出入库数据、库存数据、生产计划数据、物料存储状态数据、配送数据</p> <p>知识模型：自动化设备协同的智能物料存取与存储管理模型；基于物联网数据的库存动态调配模型</p> <p>人才技能：掌握供应链与物流管理知识；掌握智能仓储管理系统操作与维护；熟悉条码、射频识别等信息技术；熟练操作和维护智能物流设备；了解高精度定位导航、物流路径规划技术；掌握 RFID 与区块链技术在物料管理中的应用；具备物联网传感器数据监控与分析能力</p> <p>痛点问题：人工或半自动化仓储管理导致存取效率低，物料易错放、遗漏或过期；物料种类多、规格各异，调配和存取效率低；库存管理不精准，仓储管理系统响应慢、操作不灵活</p>	<p>场景名称：物料精准配送</p> <p>工具软件：WMS 系统、MES 系统、APS 系统</p> <p>数据要素：物料出入库数据、库存数据、生产计划数据、物料存储状态数据、配送数据</p> <p>知识模型：基于生产需求的物流配送动态调度模型；结合高精度定位的最优路径规划模型</p> <p>人才技能：掌握供应链与物流管理知识；熟练操作智能物流设备和管理系统；掌握高精度定位导航和物流路径动态规划技术；能够进行物流设备集群控制；具备根据生产需求调整配送计划的能力</p> <p>痛点问题：配送依赖人工判断，缺乏实时监控和优化；配送路线不合理，配送时间延迟；难以适应生产周期长、物料批次变化多的需求，配送不及时或错误影响生产进度</p>

场景	主场景	细分场景	
设备管理	<p>场景名称：设备管理</p> <p>工具软件：EMS 系统、MES 系统</p> <p>数据要素：设备运行数据、设备健康状态数据、设备性能评估数据、设备故障历史数据、异常报警数据、设备维护数据</p> <p>知识模型：基于智能传感与多模态数据融合的设备实时监测模型；设备故障知识图谱驱动的智能诊断模型；结合机器学习与深度学习的故障预测与维护模型</p> <p>人才技能：掌握设备专业基础知识、维护与维修知识、设备管理知识、设备信息技术化知识；熟练应用设备运行监控系统和运维管理平台</p> <p>痛点问题：设备监测系统传统落后，缺乏实时数据采集和反馈；无法精准收集设备运行数据，难以全面评估设备健康状态；故障诊断依赖人工经验，准确性低；难以提前预测故障，导致计划外停机和高额维修费用</p>	<p>场景名称：设备在线运行监测</p> <p>工具软件：EMS 系统、MES 系统</p> <p>数据要素：设备运行数据、设备健康状态数据</p> <p>知识模型：基于智能传感与物联网的设备数据实时采集模型；多模态数据融合驱动的设备状态分析与异常预警模型</p> <p>人才技能：掌握设备运行管理知识、设备原理与构造知识、设备选型与配置知识；具备设备数据分析能力，能够运用大数据分析和可视化技术评估设备运行状态；熟悉 5G 通信技术和多模态数据融合技术</p> <p>痛点问题：部分设备监测系统处于手动记录或局部监控状态；缺乏整体性实时数据采集和反馈系统；无法实时获取精准设备运行数据，设备健康状态评估不全，性能评估滞后</p>	<p>场景名称：设备故障诊断与预测</p> <p>工具软件：EMS 系统、MES 系统</p> <p>数据要素：设备健康状态数据、设备性能评估数据、设备故障历史数据、异常报警数据、设备维护数据</p> <p>知识模型：基于设备故障知识图谱的智能诊断模型；机器学习算法驱动的故障模式识别与预警模型；深度学习技术支持的设备故障预测模型</p> <p>人才技能：掌握设备原理与构造知识、设备选型与配置知识、设备运维管理知识、设备安全知识、故障诊断与维修知识、预防性维护知识；能够构建和分析设备故障知识图谱；精通故障机理分析和预测性维护技术；熟练运用机器学习和深度学习算法进行故障诊断与预测</p> <p>痛点问题：设备故障症状和原因复杂，单一维度难以诊断；依赖人工经验诊断，准确性低；难以提前预测故障，导致计划外停机和高额维修费用</p>

场景	主场景	细分场景	
安全管控	<p>场景名称：安全管控</p> <p>工具软件：MES 系统、EMS 系统</p> <p>数据要素：温度数据、气压数据、气体浓度数据、机械运转状态数据、历史安全事故数据、设备状态数据、安全风险预测数据、预警数据、应急预案数据、员工操作数据、危险物料数据</p> <p>知识模型：基于大数据分析的安全风险预测模型；智能应急响应与自动化处置模型；机器人及自动化设备替代危险作业模型</p> <p>人才技能：掌握安全管理原则与制度、安全技术与设备管理知识、消防安全管理知识、危险品管理知识、应急管理知识；熟练应用安全管理系统和设备管理系统；具备安全防护和应急处理技术</p> <p>痛点问题：安全监测系统实时性差，无法及时发现潜在危险；缺乏针对突发性危险的预警和自动响应机制；应急系统难以快速准确制定处置措施；危险作业人工操作占比高，人员安全培训不足，人为错误风险大</p>	<p>场景名称：安全风险实时监测与应急处置</p> <p>工具软件：MES 系统、EMS 系统</p> <p>数据要素：温度数据、气压数据、气体浓度数据、机械运转状态数据、历史安全事故数据、设备状态数据、安全风险预测数据、预警数据、应急预案数据、员工操作数据、危险物料数据</p> <p>知识模型：掌握安全管理原则与制度、安全技术与设备管理知识、消防安全管理知识、危险品管理知识、应急管理知识；熟练应用安全管理系统和设备管理系统</p> <p>痛点问题：安全监测系统实时性差，无法及时发现潜在危险；缺乏针对突发性危险的预警和自动响应机制；应急系统难以快速、准确判断风险并制定有效处置措施</p>	<p>场景名称：危险作业自动化</p> <p>工具软件：MES 系统、EMS 系统</p> <p>数据要素：温度数据、气压数据、气体浓度数据、机械运转状态数据、历史安全事故数据、设备状态数据、安全风险预测数据、预警数据、应急预案数据、员工操作数据、危险物料数据</p> <p>知识模型：机器人及自动化设备替代危险作业操作模型；基于远程控制的危险作业管理模型；员工操作安全监控与预警模型</p> <p>人才技能：消防安全管理知识、危险品管理知识、应急管理知识；熟练应用安全管理系统和设备管理系统；具备安全防护和应急处理技术</p> <p>痛点问题：危险作业环节人工操作比例高，安全风险大；操作人员安全培训缺乏针对性，对潜在危险认识不足；存在人为错误导致安全隐患的风险</p>

场景	主场景	细分场景
能源管理	<p>场景名称：能源管理（能耗数据监测）</p> <p>工具软件：MnES 系统、EMS 系统</p> <p>数据要素：生产设备及关键环节的能耗数据；水耗数据；能源消耗趋势数据；异常能耗数据；能源消费历史数据</p> <p>知识模型：基于传感器数据采集的能耗实时监测模型；数据分析驱动的能源浪费点识别模型；数据可视化展示与能源消费趋势预测模型</p> <p>人才技能：掌握能源专业知识；具备数据分析能力、项目管理能力、能源系统设计与模拟能力、能源计量与统计分析能力、经济分析能力</p> <p>痛点问题：能耗监测系统数据收集方式单一；难以实时、全面、准确监控生产各环节能耗情况；无法及时获取精确能源使用信息，能源浪费问题不能及时发现和优化</p>	<p>场景名称：能耗数据检测</p> <p>工具软件：MnES 系统、EMS 系统</p> <p>数据要素：生产设备及关键环节的能耗数据；水耗数据；能源消耗趋势数据；异常能耗数据；能源消费历史数据</p> <p>知识模型：基于传感器数据采集的能耗实时监测模型；数据分析驱动的能源浪费点识别模型；数据可视化展示与能源消费趋势预测模型</p> <p>人才技能：掌握能源专业知识；具备数据分析能力、项目管理能力、能源系统设计与模拟能力、能源计量与统计分析能力、经济分析能力</p> <p>痛点问题：能耗监测系统数据收集方式单一；难以实时、全面、准确监控生产各环节能耗情况；无法及时获取精确能源使用信息，能源浪费问题不能及时发现和优化</p>

场景	主场景	细分场景	
环 保 管 控	<p>场景名称：环保管控</p> <p>工具软件：污染排放物在线采集设备和管控平台；污染监测与控制、污染源追溯技术工具；污染监测传感器；物联网（IoT）技术设备；MES系统；传感器、RFID等物联网设备；智能废弃物分类系统</p> <p>数据要素：废气、废水、粉尘、噪声等污染物监测数据；污染源数据；历史污染数据和生产数据；废弃物产生量、种类、存放位置数据；废弃物回收和再利用率数据</p> <p>知识模型：基于物联网的污染全过程动态监测与风险预警模型；污染源追溯与排放策略优化模型；废弃物智能化标识、追踪与管理模型</p> <p>人才技能：掌握污染排放物在线采集设备和管控平台操作；熟悉污染监测与控制、污染源追溯技术；能够安装和维护污染监测传感器；熟练使用MES系统及物联网设备；精通智能废弃物分类系统操作；具备数据分析与环保策略制定能力</p> <p>痛点问题：污染监测和管控停留在人工阶段，缺乏全面精准的监测系统；污染源数据收集分析不足，环境监控智能化水平低，突发污染应对能力弱；废弃物管理依赖人工，缺乏系统化和数字化支持，难以动态跟踪和优化处理</p>	<p>场景名称：污染监测与管控</p> <p>工具软件：污染排放物在线采集设备和管控平台；污染监测与控制、污染源追溯技术工具；污染监测传感器（废气、废水、粉尘、噪声监测传感器）；物联网（IoT）技术设备；报警系统</p> <p>数据要素：废气、废水、粉尘、噪声等污染物实时监测数据；污染源数据；历史污染数据和生产数据；污染预警数据</p> <p>知识模型：基于传感器与物联网的污染实时监测与远程监控模型；污染历史数据与生产数据驱动污染风险预测模型；污染源追溯与排放策略优化模型</p> <p>人才技能：熟练安装和操作污染监测传感器；掌握污染排放物在线采集设备和管控平台使用；熟悉污染监测与控制、污染源追溯技术；具备物联网技术应用能力；能够分析污染数据并制定预警和处理策略</p> <p>痛点问题：污染监测停留在定期检测、人工记录阶段，缺乏全面实时监测系统；监测设备精准度低，无法及时掌握污染物排放情况；环境监控系统智能化不足，缺少突发污染预警和应急能力</p>	<p>场景名称：废弃物管理</p> <p>工具软件：MES系统；传感器、RFID等物联网设备；智能废弃物分类系统</p> <p>数据要素：废弃物产生量数据；废弃物种类数据；废弃物存放位置数据；废弃物回收和再利用率数据</p> <p>知识模型：基于物联网的废弃物实时追踪与管理模型；智能废弃物分类与处理优化模型</p> <p>人才技能：熟练使用MES系统进行废弃物管理；能够安装和维护传感器、RFID等物联网设备；精通智能废弃物分类系统操作；具备废弃物处理策略制定能力</p> <p>痛点问题：废弃物管理处于人工分类、记录和处理阶段，缺乏系统化和数字化支持；难以动态跟踪废弃物生成和处理情况，无法有效优化生产工艺和减少资源浪费</p>

2、行业智能化改造装备清单

适用场景	装备名称	主要功能	国产/进口
生产作业	自动化真空熔化浇注炉（真空铸造炉、凝壳炉）	高精度温控，从装料、抽真空、加热熔化、晶体生长到冷却全过程自动化控制	国产、进口
	自动化压蜡机	蜡模制备	国产
	蜡模3D打印机	蜡模制备	国产、进口
	数控脱蜡釜	壳型制备	国产
	数控焙烧炉	壳型预烧	国产
	机器人自动沾淋单元、制壳自动输送线	制壳工序全自动生产	国产、进口
	热等静压机	高温高压、提升铸件综合性能	国产、进口
质量管控	三坐标测量仪、蓝光三维扫描仪	几何尺寸检测	国产、进口
	X射线检测仪、荧光检测自动线、工业CT	表面缺陷识别、内部结构检测、物质识别、尺寸测量、动态测量	国产、进口
	金相显微镜、超声探伤仪等	热处理质量检测	国产、进口
	光谱仪等	材料成分分析	国产、进口
仓储物流	智能化立体仓库	物料、成品存放	国产
	AGV智能小车	物料流转、配送	国产
	码垛机器人	码垛	国产
精益管理	LED显示屏	信息展示	国产
	工作站互动终端	人机交互	国产
设备运行监控	振动、温度等状态监测传感器	设备状态监控	国产

能源智能管控	电压、电流等能量计量仪表	能耗监测与管理	国产
环保管控	温湿度、粉尘监控设备	生产环境智能传感与控制	国产
安全管控	安防系统	人员作业安全保障	国产

3、数字化转型数据要素清单

序号	场景	数据要素类型	描述
1	工厂数字设计	设计元数据、空间布局参数	基于BIM技术，实现工厂从设计到交付的全生命周期数字化管理。
2	工艺数字化设计	流程仿真数据	集成三维建模与性能分析，通过仿真优化工艺流程。
3	生产计划优化	需求预测数据、资源配置数据	基于大数据分析，动态优化生产计划，提升资源利用率。
4	智能排产调度	生产序列数据、设备状态数据	利用AI算法，实现生产调度的智能化与高效化。
5	产线柔性配置	设备属性数据、生产适应性数据	支持产线快速调整，提升生产灵活性与响应速度。
6	工艺动态调优	实时工艺数据、传感器监测数据	实时调整工艺参数，确保生产过程的适应性与高效性。
7	先进过程控制	质量控制数据、传感器反馈数据	采用精密控制算法，确保产品质量稳定与一致。
8	智能在线检测	多源传感数据、图像识别数据	实时检测产品缺陷，提升检测效率与准确性。
9	质量追溯与改进分析	全链路质量数据、生产追溯数据	实现产品全生命周期的质量追溯，为持续改进提供数据支持。
10	设备在线运行监测	设备运行数据、健康状态数据	实时监测设备状态，确保设备健康运行。
11	设备故障诊断与预测	设备故障预测数据、维护策略数据	利用AI预测设备故障，实现智能运维，降低维护成本。
12	智能仓储管理	仓库布局数据、物流调度数据	实现仓储物流的自动化与智能化管理，提升仓储效率。
13	物料精准配送	实时交通数据、订单优化数据	基于实时数据优化配送路径，提升物流配送效率与准确性。
14	危险作业自动化控制	安全监控数据、设备控制数据	实现高风险作业的自动化控制，确保作业安全。

15	安全风险实时监测与应急处置	安全风险数据、实时响应数据	通过一体化平台实时监测与响应安全风险，确保生产安全。
16	能耗数据检测	能源消耗数据、设备效率数据	基于实时数据优化能源使用，降低能耗，提升生产效率。
17	污染在线监控与管理	污染物排放数据、环境影响数据	通过在线监测及时调整环保措施，减少环境影响。

4、知识模型资源清单

序号	环节/场景	知识模型	描述
1	工艺设计	工艺知识库	集成工艺流程、参数、资源等关键要素，支持工艺优化。
2	计划与调度	生产计划决策支持模型	基于历史数据提供生产计划决策支持，优化资源分配。
3	计划与调度	智能排产调度模型	利用AI算法实现生产排程的动态优化。
4	计划与调度	异常处理决策模型	自动处理生产异常，优化调度方案。
5	生产作业	作业数据分析模型	实时记录并分析作业数据，提供预警与改进建议。
6	质量管控	质量数据分析模型	分析产品质量数据，支持质量管理与控制。
7	设备管理	设备运行健康模型	监测设备运行状态，预测并预防设备故障。
8	仓储物流	智能仓储优化模型	优化仓储布局与物流调度，提升仓储效率。
9	仓储物流	物流配送优化模型	基于实时数据优化配送路径，提升配送效率。
10	环保管理	环保监测预警模型	实时监测污染物排放，预警环境污染风险。

5、工具软件清单

序号	工具软件	描述	国产/进口
1	办公自动化OA	实现办公管理的规范化与信息化。	国产

2	铸造工艺CAE系统	包含铸造的熔炼、充型凝固和热处理三个环节仿真分析，实现工艺参数的优化设计、缺陷预测。	国产、进口
3	铸造工艺CAD系统	结合铸造工艺设计和铸造模拟结果反馈，由系统不断地自行设计、改进和优化工艺，直到铸造模拟结果可以被接受。	国产、进口
4	铸件缺陷智能评价及分析系统	能完成单检/批检/分检/混检/流检“五检一体”；包含图像增强、缺陷检测、缺陷评级、离线评片、在线评片、报告生成等功能。	国产
5	企业资源计划系统ERP	整合企业资源，实现产、供、销、人、财、物的协同管理。	国产
6	数字孪生系统	提供工厂或产线的模拟仿真环境，支持运营优化。	国产
7	产品数据管理系统PDM	组织生产工艺文档，实现车间无纸化生产。	进口
8	MDM主数据管理系统	管理与维护企业核心业务数据。	国产
9	数字化工艺设计与管理系统MPM	辅助工艺设计与优化。	国产
10	供应商关系管理系统SRM	优化与供应商的信息流、物流与资金流管理。	国产
11	制造执行系统MES	管理车间生产执行，实现透明化生产。	国产
12	制造运营管理系统MOM	协调企业资源，将原材料转化为产品。	国产
13	高级计划排程系统APS	优化生产排程与调度，提升生产效率。	国产
14	数据采集与监视控制系统SCADA	实时监控设备运行状态，收集工艺参数数据。	国产
15	制造数据采集与状态管理系统MDC	监视与控制车间智能设备运行数据，为MES、ERP提供数据支持。	国产
16	SPC统计过程控制	通过统计方法监控和控制制造过程。	国产
17	PIMS工厂信息管理系统	管理生产过程，提升生产效率。	国产

18	工业物联网平台IOT	实现设备联网与数据采集。	国产
19	质量管理体系QMS	建立有效运行的质量保证体系。	国产
20	设备管理系统	管理设备全生命周期，确保设备高效运行。	国产
21	仓储管理系统WMS	管理仓储物流信息，提升仓储效率。	国产
22	仓库控制系统WCS	协调与调度物流设备，优化仓库作业流程。	国产
23	能耗管理系统EnMS	监测、分析与预测能耗状态，优化能源使用。	国产
24	在线检测软件	控制在线检测设备，提升检测效率。	国产
25	智能AGV调度系统	管理AGV系统，提升物流效率。	国产
26	条码系统	实现条码识别与管理，提升物流准确性。	国产

6、网络化联接设备清单

适用场景	设备名称	主要功能	国产/进口
通用	工业交换机	实现设备与系统间的高效数据通信，支持多设备连接。	国产、进口
通用	工业网关	采集、转换与上传多协议设备数据，支持数据统一管理。	国产、进口
通用	工业VPN设备	通过虚拟专用网络(VPN)技术，为工业网络提供安全的远程访问通道。	国产、进口
通用	无线接入点(AP)	提供无线网络覆盖，支持多设备无线连接。	国产、进口
通用	PoE交换机	为以太网设备提供数据传输及电力供给。	国产、进口
通用	SDN控制器	实现工业网络的集中式管理与动态优化。	国产、进口
通用	5G网关	基于5G技术，支持高带宽、低延迟的设备互联。	国产、进口
通用	现场总线设备	实现设备层与控制层间的高效数据传输。	国产、进口
通用	工业以太网适配器	实现传统设备与工业以太网的连接。	国产、进口

通用	时间敏感网络 (TSN) 交换机	提供时间同步与实时通信,保障数据传输质量。	国产、进口
通用	工业防火墙	部署在工业网络边界,用于保护工业网络免受外部网络的攻击和非法访问。	国产、进口

7、行业数字化转型人才技能清单

序号	人才技能类型	描述
1	数字化管理统筹能力	推动数字化转型,协调各部门需求,制定并执行转型规划。
2	项目管理能力	规划、执行与控制智能化改造项目。
3	工艺数字化设计与仿真能力	三维建模、铸造工艺知识、仿真软件操作
4	精益管理技能	应用精益生产理念,优化工艺流程,提升生产效率与质量。
5	工业物联网与设备互联技能	实现生产设备实时监控与互联互通,包括传感器部署、数据采集与边缘计算。
6	智能制造信息系统实施能力	部署MES、APS等工业软件,实现系统集成与数据共享。
7	系统开发能力	开发信息系统数据接口与功能性模块。
8	工业网络安全与数据治理技能	保障OT/IT系统安全,制定数据分级存储策略,防范网络攻击与数据泄露。
9	工业大数据与AI分析能力	利用AI与大数据技术处理生产数据,优化工艺参数或预测设备故障。
10	自动化与机器人集成技能	编程与控制工业机器人,实现柔性生产线与自动化单元部署。

附件3：典型案例

典型案例1：航空发动机铸件智能制造工厂

一、企业简介

某公司建立了以铸造为源头，涵盖焊接热处理、热等静压、机械加工和表面处理等完整的高端零部件生产体系，是国际知名高端装备关键零部件制造企业。2014年进入航空产业链，是我国航空发动机、燃气轮机、民用核电等高端装备制造产业链重要成员。主要生产航空发动机和燃气轮机用单晶、定向、等轴高温合金涡轮叶片及热端部件，如单晶空心涡轮叶片、导向叶片，航空发动机机匣、燃烧室前置扩散器、轴承座，整铸细晶导向器、喷嘴环等结构件和其他特殊合金高精密零件，产品单件重量从几克到150公斤。

二、主要做法

1、引进国际先进自动化生产线

引进国际先进自动化生产线通过国内外航空体系认证和NADCAP特殊工序认证。真空单晶炉规格300-1000千克，满足目前最先进重型燃机定向单晶叶片、大型机匣和环形件制造。新建智能制造熔模精铸产线，蜡模和制壳工序恒温恒湿，机器人自动制壳生产线是一种高度集成化的智能制造系统，其核心是通过机器人技术、自动化设备和智能控制系统，实现无人化或少人化作业。由六轴机器人、抓手、浆桶、浮砂机、自动上砂机、悬挂线、激光测距系统、

中控系统、温度控制器、湿度控制器、防护网组成。机器人程序可以个性化编制，不同产品在制壳前，只需通过HMI人机界面设置工艺参数，系统可以自动完成模壳从沾浆淋砂到封浆整个制壳流程。

2、高端精密铸造的数字化工艺设计

公司优化了大尺寸动叶的铸造流程，采用主冒口与成型补缩冒口结合的蜡模结构，结合弧形浇道和蜡钉组设计，解决了叶冠部位热节的补缩难题，提升了冶金质量和工艺出品率，同时通过数字化建模控制金属液充型过程，减少铸件变形。此外，引入国际领先的热等静压机等设备，结合数字孪生技术，实现铸造过程的全流程仿真与优化，显著提升了叶片等核心零部件的精度和良品率。

3、设备互联与预测性维护

通过工业物联网（IIoT）技术实现设备互联，实时采集熔炼炉等设备的运行数据（如温度、能耗、振动等），并通过中央控制系统进行状态监控和故障预测，利用传感器监测设备运行状态，提前预警潜在故障，避免停机损失，降低运维成本。

4、智能化生产流程

自动化物流系统：采用AGV无人搬运车和智能仓储管理系统（WMS），实现物料的精准配送，物料通过RFID技术跟踪，由AGV根据生产需求自动配送到指定工位，减少人工干预和错配率。柔性化生产线；通过动态排程系统，根

据订单需求和设备状态自动调整生产计划，在紧急订单场景下，系统拆分任务并分配到不同生产线，缩短交付周期。

5、质量检测与追溯

构建在线智能检测系统，应用物性成分分析、机器视觉检测等技术，实现产品缺陷在线识别和质量自动判定，提升质量检测效率和准确性。同时，构建质量管理体系，应用条码、二维码、RFID、5G、标识解析、区块链等技术，集成分析原料、设计、生产、使用等质量相关数据，实现产品全生命周期的质量精准追溯和优化改进。



制壳沾淋系统



真空铸造炉

三、实施成效

企业在智改数转方面加大投入力度，建成全行业第一条全工序智能化生产线，叶片机匣生产线关键设备数字化

率超过90%，数智化为企业生产效率提升30%；产品交付周期缩短 40%，疲劳寿命标准差从 $\pm 15\%$ 收窄至 $\pm 3\%$ 。单位铸件能耗降低 40%。建成的世界范围内第一条9台机器人联动自动制壳系统，制壳工序减少了180人，人工成本占比大幅降低，同时保障了生产过程工艺稳定性和质量一致性。

典型案例2：省级示范智能车间信息化管理系统解决方案

一、企业简介

某公司是为航空航天、汽车及医疗设备等行业配套的专业铸造厂。经过多年的稳健发展，公司在同行业中率先通过能源体系认证、两化融化体系贯标认证，拥有专利近100项，荣获国家绿色工厂、省级产教融合试点企业、省级专精特新中小型企业等荣誉。

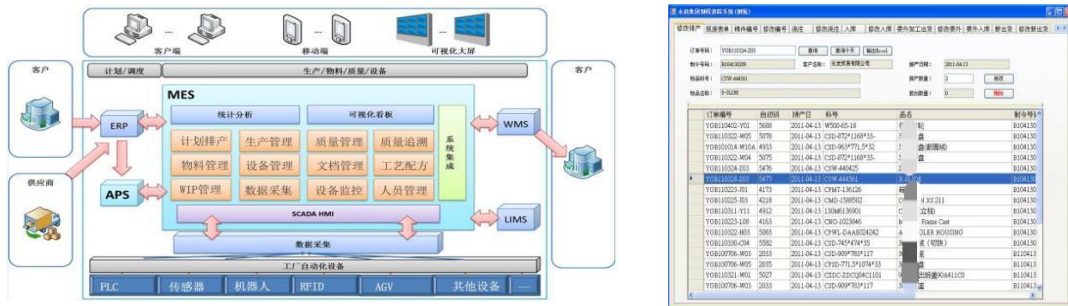
二、主要做法

公司自成立以来注重智能制造系统在设计、制造环节的应用，通过自主开发和外部合作相结合的方式，先后建立了外部网站、内部局域网、ERP系统、安全智能“一卡通”系统、互联云邮箱系统、RFID管理系统、MES系统、DSM能源管理等平台的建设，建设了CISCO VPN网络接入系统，打造出适合自身需求的数字化制造解决方案。ERP系统管理规模和范围涉及全面，实现了公司各厂区的运营级别业务流程在统一平台进行管理。精益生产系统除保证车间生产

过程管理外，还将生产设备做到了多种客户端可视化展示。建立基于物联网技术的制造现场“智能感知”系统，升级改造原有智能化系统，建立全制造过程可视化集成控制中心，实现少人化协同化生产。

1、生产过程实时调度情况

生产计划由MES系统编制，基于生产交货期、制造周期等，系统倒推制定生产计划，并由生产主计划衍生出各个生产工段的细节生产计划。通过工业以太网，将设备控制系统、条码扫描器、车间PC、大屏幕显示终端、条码打印机和网络打印机等设备连接，实现数据通信，同时通过路由器接入工厂骨干网，通过信息实时采集、整理归纳、传递反馈，形成工作任务要求处理，实现品质控制、生产运行监控、产品追踪、生产调度、设备管理、人员调配与考核等功能，从而达到生产全过程、全方位管控，使企业的生产处于有序的可控状态，将企业生产数据和ERP、供应链、库存等企业内部的信息孤岛集成为闭环的信息体，促进企业提高自动化水平。生产过程物料采用二维码、移动扫描终端等自动识别技术对物料进行自动化识别管控。





2、网络系统安全可控情况

车间网络采用高端网络设备，无线网络通过控制器集中管理。车间无线全覆盖，服务器每天备份数据，每月刻盘保存，网络安全由服务器防火墙、个人电脑趋势网络版防毒墙，所有软件全部正版。网络安全等级非常高，且具有标准完善的应急响应制度。采用无线控制器NAC和AP的方式进行部署，AP统一由无线控制器NAC管理，自动发现并统一管理AP，可实时查看AP运行状态，方便网络管理和运维。采用无纸化读图终端，可在线查看所需图纸，系统屏蔽U盘，且不连接外部网络，充分保障图纸安全。系统按照员工个人工号输入并在对应班次的工作时间内容开启服务，落实了网络管理安全。



3、能源消耗智能管控情况

生产环境温度湿度管控：智能数字生产车间环境要求恒温恒湿，在环境智能管控方面实现了自动跟踪控制恒温恒湿的要求。在车间各区域设置了多个温湿度感应点，同时设置温湿度大屏对车间实际温湿度进行反馈。自动控温 BMS 系统设定车间所需温度，系统根据现场温度感应探头反馈的温度指令调节冷热水阀开度，对新风空调出风温度进行控制。

公司的 DSM 能源管理平台系统能够监测整个办公大楼及各个生产车间的能耗分项数据，并能够对能耗数据进行分析统计，获得准确真实的能耗数据，便于进一步强化监督管理，确保全面执行节能标准，建立和完善能效测评、用能标准、能耗统计、能源审计、能效公示、用能定额、节能服务等各项制度，有效降低生产成本，提高用电效率。



三、实施成效

采用基于工艺知识库的三维智能工艺规划，提高研制效率，通过高级计划排程和实时生产响应技术，减少设备空转时间，生产效率提升30%以上。以每日两班生产基准计算，节省人力约40%以上，单位能耗降低25%。

典型案例3：熔模铸造省级示范智能车间

一、企业简介

某公司主要从事航空发动机和燃气涡轮叶轮、等轴晶、定向、单晶叶片、汽车发动机进气增压器涡轮叶片的制造和加工。公司年产值1.1亿元，其中航空发动机高温合金铸件产值占比约25%。

公司为国家高新技术企业，员工人数240人，研发人员人数20人。公司通过了AS9100D航空航天质量管理体系、ISO9001质量管理体系、ISO4001环境管理体系、IATF16949质量管理体系、ISO13485质量管理体系、ISO45001职业健康安全管理体系、ISO50001能源管理体系、知识产权管理体系等认证。公司累计或授权专利30项，其中获授权发明专利13项。

二、主要做法

公司采用硅溶胶熔模铸造工艺生产航空发动机涡轮叶片，包括等轴晶、定向凝固和单晶叶片。拥有数字化控制生产设备包括压蜡机10台；天然气脱蜡釜1台；机械手操作制壳

自动线3条；壳型焙烧炉4台；真空铸造炉4台，其中等轴晶2台，定向凝固炉1台，单晶炉1台。检测设备主要有三坐标测量仪、蓝光扫描测量仪、荧光检测线、X射线检测仪、超声检测仪等共计10台套。

公司拥有省级示范智能车间，具备先进设计技术应用和产品数据管理系统（PDM），主要建设情况包括：PDM系统功能覆盖技术部门产品数据管理的各个方面，包括图文档管理、产品结构管理、CAD集成、 workflow、红线批注、电子签名、汇总报表、项目管理、BOM管理、配置管理、变更管理、编码管理、ERP集成等。公司车间现场采用工业以太网控制系统，工业电脑和 workstation 采用密码加强策略、确保工业系统不被未经授权的访问和修改和使用。相关授权人员通过工程师 workstation 可以远程（工业以太网）或者现场人机界面获取设备相关信息，使用ERP服务器实现系统、装备、零部件以及人员之间信息互联互通。

制造执行系统（MES）集成，以设备的联网通讯和数据采集为基础，以PLM技术为支撑，以数字化工单管控为核心的制造执行系统，能够快速实现车间各类数控装备的联网和通讯和设备状态数据采集，实现图纸、工艺、3D模型等技术文件的数字化下发。通过MES系统和设备控制技术，实时采集如工序产量、过程良率、工单在制品移转状况、测试参数等详细生产过程数据，并提供汇总分析报表工具，以及生产进度、质量等信息的适时反馈，能够将车间单元设备柔性制

造能力快速提升为网络化柔性制造能力，提高企业精益生产和智能制造能力。

三、实施成效

车间智能化改造实施后，有效提高了高温叶片精密铸造技术水平和自动化程度，降低了生产成本，提高了生产效率，缩短了产品制造周期。消除由于信息不对称而造成的各种生产过程延误。使制造执行过程透明化，为企业不同层面管理者的生产管理决策提供了有效依据。有效提高产品质量，降低了产品维修和重工数量。对生产线上的问题进行有效预防提供。

典型案例4：熔模铸造工厂信息化管理系统建设

一、企业简介

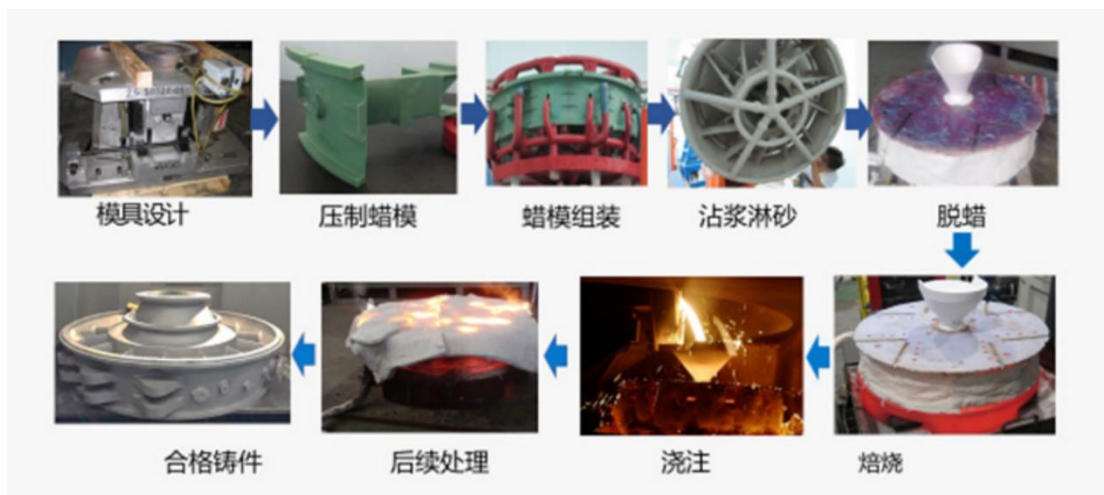
某公司主要生产航空航天钛合金母材和铸件生产、技术推广、技术转让、技术咨询、技术服务。公司产品覆盖了我国目前军用航空发动机的绝大部分型号，并成为空客、赛峰、罗罗、GE 航空、霍尼韦尔等世界知名航空器、航发制造商的主要供应商或战略合作伙伴。公司为国家高新技术企业，江苏省级智能制造工。

公司通过了国军标质量管理体系、AS9100D 航空航天质量管理体系、ISO9001 质量管理体系、ISO4001 环境管理体系、ISO45001 职业健康安全管理体系、AA 级两化融合管理体系、知识产权管理体系等认证。

二、主要做法

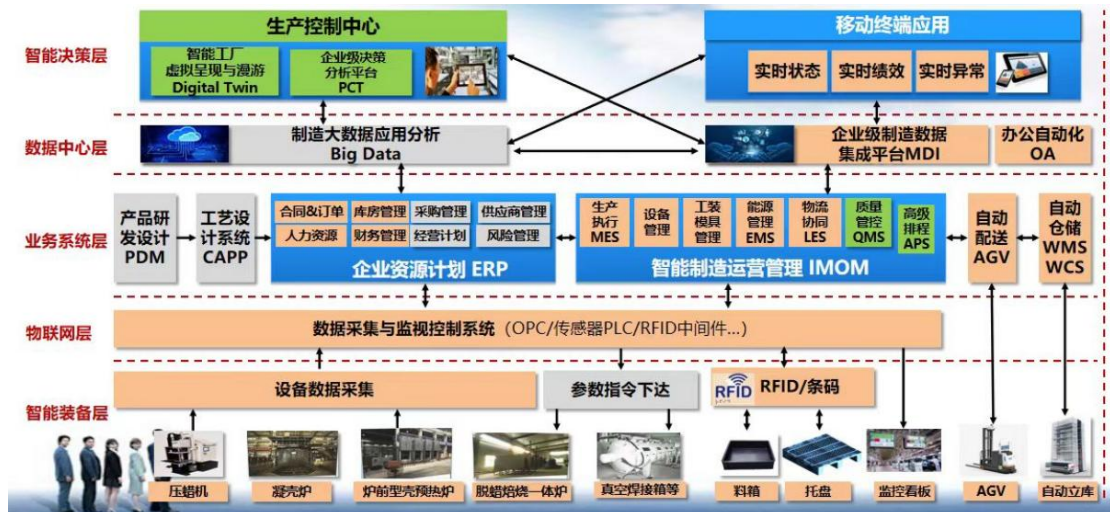
公司主要产品是钛合金母材，铸件涉及 20 余种军机和民航飞机，其中有为 C919、C929 大飞机配套的 CJ1000、CJ2000 系列涡轮发动机中介机匣等发动机中后端钛合金结构铸件。产能为年产 10 万套，其中中介机匣 1000 件，最大尺寸 $\Phi 1800 \times 800$ ，最大重量 2000kg。航空发动机铸件约 20-30 种及不同型号。

采用硅溶胶熔模铸造工艺，金属原材料包括焊丝均采用自制母合金，主要采用真空自耗电极电弧炉熔炼和浇注，陶瓷芯和熔模铸造工艺，其中陶瓷芯外购。



大飞机精密铸件熔模铸造工艺流程

企业按二级保密单位管理，设立了信息化专职管理部门，建立了内部局域网，局域网与外部物理隔离，与外省总部设有专线网络。联网应用范围覆盖企业管理部门；开发、设计、产、供、销等各部门和单位。公司已通过两化融合贯标体系认证 2A，四星级上云企业。



信息化管理系统结构

1、决策层。智能工厂虚拟呈现与漫游（数据孪生）：部分应用，实现了虚拟工厂的可视化。企业级决策分析平台 PCT：根据企业级制造数据集成平台 MDI 和办公自动化系统的数据开展决策分析。暂未实现大数据应用分析。移动终端应用：部分应用，实现了实时状态、实时绩效、实时异常的可视化。

2、数据中心层。由企业级制造数据集成平台 MDI 和自动化办公系统 OA 组成。数据来源于业务系统层。制造大数据应用分析系统暂未实施。

3、业务系统层。企业资源计划系统 ERP 与智能制造运营管理平台 IMOM 集成。其中：智能制造运营管理平台 IMOM 由（设备管理系统 EMS/（工模具管理系统 EMS/能源管理系统 EnMS /物流协同系统 LES/质量管理系统 QMS/高级排程系统 APS 等集成。APS 与 AGV（自动配送），以及 WMS、WCS（自动仓储）系统集成。PDM（产品研发设计）：下游客户；工艺设计在北京研究院完成：CAD/Procast/ MagmaSoft

4、物联网层。数据采集与监视控制系统，包括 OPC 通讯协议、PLC 可编程逻辑控制器、RFID 射频识别（扫码枪）、可视化监控看板。

5、智能装备层。实现了压蜡机、凝壳炉、炉前型壳预热炉的数据联网自动采集。实现了模具、产品的射频识别和数据自动采集。实现了模具、产品的 AGV 小车自动配送。建立了模具、产品的自动化立体仓库。脱蜡焙烧一体炉、真空焊接箱等参数指令下达暂未实现。

三、实施成效

系统建成后，生产效率提升 30%，订单平均交付周期缩短至 4 天，模壳厚度一致性从 82%提升至 98%，设备故障维修费用减少 50%，在制品库存占用资金减少 20%，紧急订单响应速度提升 3 倍。

典型案例5：大飞机航空发动机铸件生产与信息化管理

一、企业简介

某精密铸造有限公司是一家国有参股企业的精密铸造服务商，公司产品涵盖了航空、汽车、船舶、医疗等领域，主要产品为航空发动机转动叶片、复杂薄壁结构件、汽车涡轮增压器等。公司年产值 2 亿元，其中航空发动机高温合金铸件产值约占 40%，包括 CJ-1000 和 CJ-2000 涡扇发动机铸件。

公司为国家高新技术企业，员工人数430人，研发人员人数45人。公司通过了AS9100D航空航天质量管理体系、ISO9001质量管理体系、ISO4001环境管理体系、IATF16949质量管理体系、ISO13485质量管理体系、ISO45001职业健康安全管理体系、ISO50001能源管理体系、知识产权管理体系等认证。公司累计或授权专利40项，其中获授权发明专利14项。

二、主要做法

1、公司产品

公司主要产品是为 C919、C929大飞机配套的CJ-1000、CJ-2000系列涡轮发动机叶片及其他高温合金结构件，为中国商飞提供18级导向叶片中的7级导向叶片产品，产量占中国商商用飞机有限责任公司需求量的50%左右。产能为年产10万件套，其中中介机匣1000件，最大尺寸 $\Phi 1800 \times 800$ ，最大重量2000kg。

2、生产工艺

公司生产工艺为熔模铸造，采用真空感应电炉熔炼和浇注，陶瓷芯和硅溶胶壳型造型，其中陶瓷芯外购，废蜡料委外处理。后处理工序包括水力清砂，化学溶解法脱芯、切割机或氩弧气爆去浇冒口，喷砂表面清理。

3、数字化设备与仪器

公司主要数字化控制生产设备包括压蜡机12台；天然气脱蜡釜1台；制壳沾淋系统9套，其中2套为机械手自动操

作；壳型焙烧炉4台；真空铸造炉4台，其中定向凝固炉2台，等轴晶炉2台。检测设备主要有三坐标测量仪、蓝光扫描测量仪、荧光检测线、X射线检测仪、超声检测仪等。

4、信息化管理

公司网络覆盖企业开发、设计、产、供、销等各部门和单位。信息化管理建立了ERP/OA集成系统，并在ERP系统中扩展了产品生产过程管理模块，产品动态管理系统已实现通过扫描二维码跟踪工单、物料消耗、完工入库记录，以及工序成本管理和工艺参数管理。工艺设计中采用Procast、MagmaSoft等软件，实现了制模和铸造过程全流程仿真模拟。

三、实施成效

公司通过智能化、数字化、网络化建设，产品工艺开发周期缩短85%，生产效率提高15%，产品合格率提高7%，单位制造成本减少10%。

典型案例6：工艺设计软件与PLM、MES、ERP系统的集成

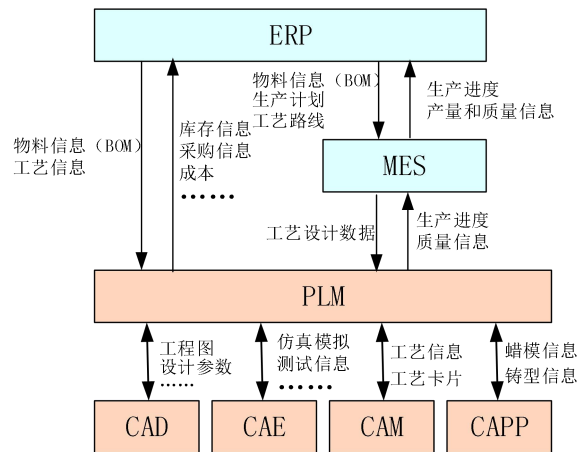
一、企业简介

某公司是航空航天铸件及其母合金专业生产企业，主要从事钛合金精密成型制件的生产、技术推广、技术转让、技术咨询、技术服务。在公司建设和发展过程中与研究院所紧密合作，重点进行了大飞机航空发动机大型薄壁复杂铸件铸造工艺的研发。公司通过了国军标质量管理体系、AS9100D航空航天质量管理体系、ISO9001质量管理体系、ISO4001

环境管理体系、ISO45001职业健康安全管理体系、AA级两化融合管理体系、知识产权管理体系等认证。公司为国家高新技术企业，省级智能制造工厂，拥有专利近120项。

二、主要做法

某公司将CAD、CAE、CAM、CAPP工艺设计软件与PLM、MES、ERP系统集成，CAD模型、CAE仿真结果及CAM、CAPP文件存入PLM系统，形成可追溯的设计版本。CAPP输出的工艺卡推送至MES指导生产，并同步ERP计算成本。MES反馈实际工时与CAPP预估的偏差，优化工艺库。CAM生成的G代码通过PLM验证后下发至MES，关联具体设备执行。设计BOM（PLM）转换为制造BOM（ERP），自动匹配物料编码。PLM发起设计变更时，触发ERP评估库存影响。



CAD/CAE/CAM/CAPP与PLM、MES、ERP系统的集成

三、实施成效

数字化工艺设计快速生成复杂的几何模型，减少了传统设计中反复修改和验证的时间，通过参数化设计和优化算法，设计效率提高10倍，缩短了研发周期和生产周期，降低了时间和

人力成本。数字化设计结合模拟仿真技术，能够优化铸件的凝固过程，减少缩松、缩孔等缺陷。通过数据驱动的工艺参数优化，铸件的尺寸精度和表面质量得到显著提升。优化浇注系统和冒口设计，减少了材料浪费，材料成本节约 20%。采用数据驱动的冒口设计方法，铸件工艺出品率可提高 5%。

典型案例7：基于MES系统的智能排产调度

一、企业简介

某公司为升级高新技术企业，主要产品为航空发动机、汽车发动机涡轮增压器、工业燃气轮机镍基高温合金铸件，生产工艺为硅溶胶熔模铸造，建立了自动化生产线，配置了先进的生产和检测设备。

二、主要做法

为解决生产目标分解细化问题以及物料分配问题，对整个生产过程进行管控，以及对生产数据进行采集和分析，公司建立了基于 MES 系统的智能排产调度管理系统。

MES 系统根据制定的主生产计划细化分解，以生产物料和设备为对象，根据工艺、资源状态、约束条件等自动生成车间作业计划，具体细化到产品的每天生产量，制定出每天生产到人到工位工单，车间工人使用各工序现场平板电脑登录 MES 系统进行接工、报工操作，实现精准派工。排产排程模块具有生产任务查询、发布、审核审批、异常报警等功能。当出现生产设备故障等异常事件时，故障信息可通过手机端 报警，现场

围绕生产物料和生产设备，通过 MES 系统、SCADA 系统快速进行优化调度。如：车间生产工艺环境要求高，对工艺参数把握需要做到精准调控，生产现场通过工艺环节控制系统进行管控，一旦出现故障，人员可通过手机端对工艺环境进行远程调控处置，实现异常事件的快速响应，保障生产计划的稳定执行。

MES 系统中进行工艺、资源状态、约束条件定义，适配 BOM 数据，进行合理化计划排定，并进行物料需求的计算，提高物料供应效率。同时，MES 通过连接 ERP 上层管理系统与底层自动化设备，实现对生产过程的实时监控与精细化管理。对于任务细化分解与精准派工这一核心功能，可以根据产品结构和工艺流程，建立详细的物料清单、工艺流程图和工艺路线卡，明确各工序间的先后关系、加工参数、所需资源（人力、设备）以及质量控制点。当新的生产订单、变更请求或异常情况发生时，MES 系统通过接口或数据集成实时接收信息，触发任务分解算法。算法依据预设规则将总体任务细分为具体的工序任务，并考虑订单交期、产能平衡、瓶颈资源等因素，确保任务分解的合理性与及时性。

公司编制了 MES 系统的操作手册，并进行培训，规范人员操作习惯，保障导入数据的准确性。同时，应用数据采集技术，对过程数据进行记录分析。

三、实施成效

系统建设完成实施后，实现了任务细化和物料的精细分配，生产计划完成及时率提高 8% 左右。

典型案例8：熔模铸造模壳产线智能化协同作业

一、企业简介

某公司是为航空航天、汽车及工业燃气轮机等行业配套的专业铸造企业，采用硅溶胶熔模铸造工艺组织生产。公司在通过了能源体系认证、两化融化体系贯标认证，拥有专利近42项，荣获省级专精特新中小型企业等荣誉。

二、主要做法

公司为解决手工制壳操作容易导致生产过程中的等待、停机、质量不稳定，以及危险作业环节人员暴露等问题，智能化熔模铸造模壳协同作业生产线。

公司采用 MES 和智仁生产管理系统、新型传感等技术建成设备协同作业系统，通过实时采集生产现场的设备运行轨迹、工序完成情况等相关数据并综合运用统计等方法，对设备间协同工作方式进行优化。根据优化结果对 MES 可编程逻辑控制器 PLC 等工业系统和设备下发调度策略等相关指令，实现浆料桶、淋砂机、传输链、机械手等多个设备的分工合作。



设备启动控制界面



定位查询界面

借助智能化沾浆生产线主体设备及传输、升降、翻转装置的 PLC 控制技术,操作工通过对产线上不同产品的参数进行选择并确认后按下一键启动按钮执行生产操作,实时查看现场环境变化并对异常情况进行处理;常规作业无需人工干预。

三、实施成效

该方案利用人工智能算法降低设备单机功能复杂度和成本,采用激光导航,有效实现多台设备协同控制,提高设备的智能化水平。项目建成后,产能利用率提升了36.9%。

典型案例9: MES系统二次开发及与其他系统集成实践

一、企业简介

某企业生产航空发动机及其他高温合金铸件,构建了信息化管理系统,为了实现内部数据的一致和及时联通共享,并进一步利用这些数据为管理人员及时准确地分析预测、掌握生产情况和做出决策,提高公司精细化管理水平,对MES系统进行了二次开发,使集成管理系统适用于熔模铸造车间生产管理。

二、主要做法

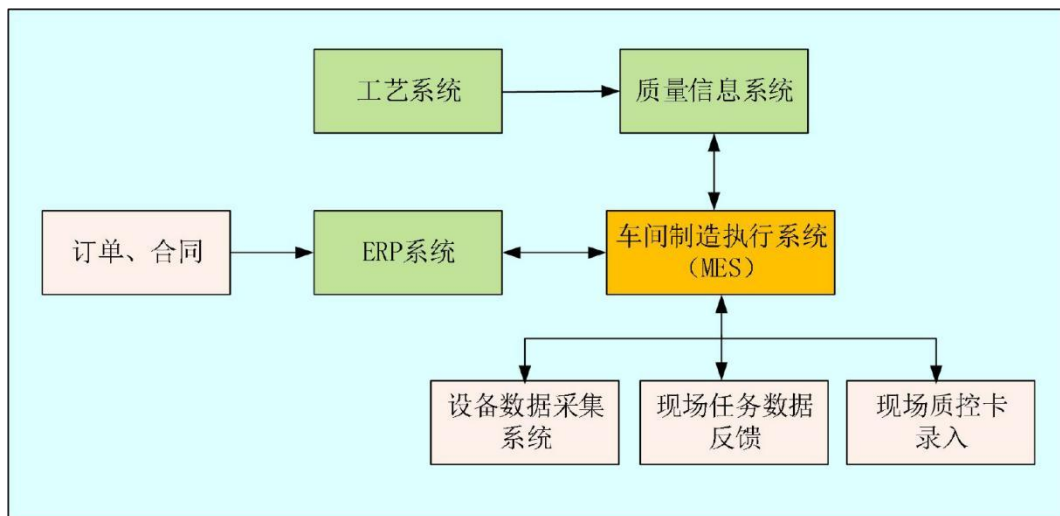
1、MES系统整体设计

公司重点针对车间生产管理、MES与其他信息系统集成接口、设备数据采集等内容进行建设,从而形成一整套完整的MES系统应用平台。公司选用MES系统,依据现有的车

间现场管理流程及标准体系，通过与公司级生产管理系统、工艺设计管理平台、产品物料管理系统、质量信息管理系统、制造资源管理系统的集成接口，实现现场生产、工艺、物流、设备、检验等数据的贯通，通过应用基于MES的工序计划详细调度，实现车间现场生产管理的柔性化、智能化、数字化。

2、MES与ERP系统集成

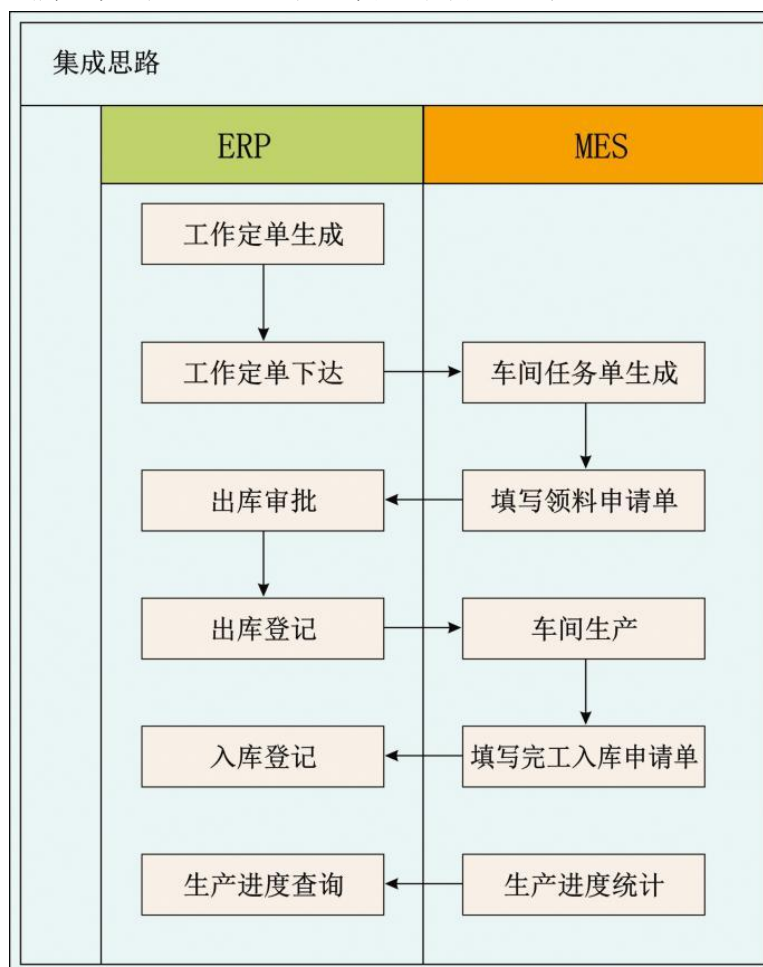
公司的ERP系统为MES的数据源头，通过与ERP系统的集成接口，完成接收公司级生产任务。通过现场数据采集设备，对生产过程、质量信息进行实时的获取，反馈给ERP系统和质量信息管理系统，从而形成生产过程信息管理的闭环。



基于MES系统的生产管理流程

MES与ERP、质量信息管理系统集成接口主要基于SQL数据库进行开发，通过配置脚本程序，在登录MES的同时实现系统数据库与各系统数据库之间任务、工艺、质量信息的更新传递，同时利用SQL数据库触发器将MES排产结果实时反馈给ERP系统和质量信息系统。

ERP建立在物料编码的基础上，虽然MES内部也定义了作为唯一标识的物料编码，但是其编码与ERP物料编码完全不一致，因此两个系统在数据定义性方面存在区别，必须实现数据统一性的要求。ERP下达工作定单后，MES提取已经下达的工作定单数据，根据零件图号、需求数量及交付时间编排车间任务，根据需要进行领料，填写领料申请单，送入ERP进行出库审批并登记。车间根据完工计划，由车间在MES中填写完工入库申请单提交给ERP进行入库登记。定单下达后，根据订单查询MES中的生产进度，从而对MES进行控制以及对预排产实现不了的任务进行及时调整。

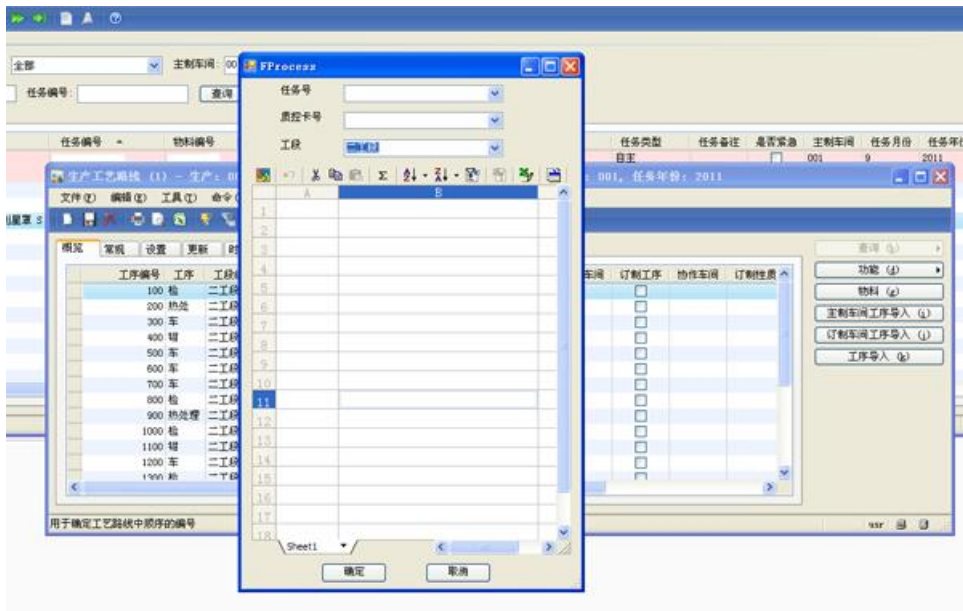


MES与ERP集成思路

3、MES与工艺设计系统集成

通过MES与工艺设计系统接口，主要实现车间调度人员查看产品工序信息，并根据工序信息进行工序详细计划调度。

集成系统的主要功能为：将工艺设计系统的工序信息导入到MES；工序计划自动设为激活状态；将MES排产结果信息反馈至车间生产计划管理系统；排产结果按照规定格式和内容进行打印输出。



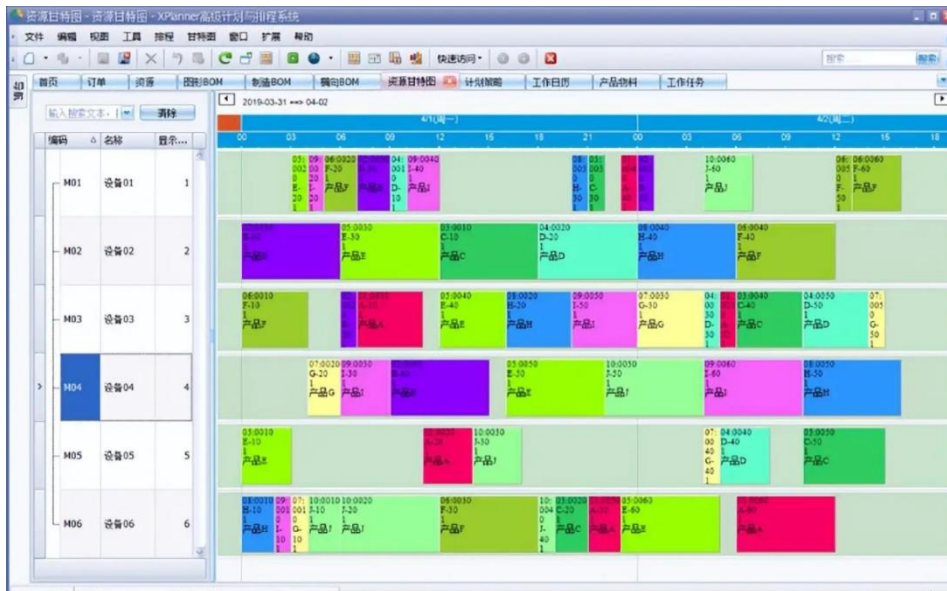
导入工序信息界面

4、生产计划智能排产技术

通过MES系统的智能排产技术，公司的生产调度根据特定人员、设备、时间、空间等资源对工件工序的加工序列进行排序，给出每道工序的起止时间、生产设备、班组人员等信息，优化目标，提高生产效率。

公司的生产计划智能排产技术主要基于MES智能排产

模块，所有产品、零件、工序全以形象直观的图形化表现，实现工序任务的手动拖拽，并以不同的颜色来区分，当产品或工序开始后，颜色条的长度将实时地减少，直到最终完成，可以立即查看一个项目或一个零件及其工序的所有相关信息。通过基于有限资源能力的作业排序和调度来优化车间生产计划，能够综合设备实际生产能力，并根据现场生产实际情况随时做出调整，按交付日期、精益排产、生产周期等多种排产方式，最大程度地满足各类复杂的排产要求。



MES智能排产界面

5、基于条码扫描的现场数据采集技术

现场数据实时采集，主要基于MES的自动数据采集（MDC）模块，开发了自动生成工序生产任务条形码的工序卡片输出接口，通过此接口，班组长在完成工序详细排产之后，即可打印输出具备条形码识别的工序卡片，现场操作人员进行生产任务的领取、交付时，只需通过扫描生产任务

条形码，即可获取相关生产任务信息，在终端触摸屏上完成生产任务数据反馈，从而将任务进度数据及时反馈与MES系统中。使用条码技术解决了现场数据输入的自动化，实现了数据的准确传输，确保数据反馈的及时、准确。

三、实施成效

公司建设的MES是面向执行层的实时信息系统，可以快速下达任务；针对每道工序进行精细化管理；帮助公司降低成本、缩短制造时间、提高产品质量。

在生产方面，系统可以达到车间管理层到设备控制层的管理，便于制造车间数字化技术的全面应用和实施，降低实施难度和应用风险。在生产执行过程中，对订单的全程跟踪、缩短流转周期、生产与质量作业过程协同有了更好的改进措施。通过计算机辅助排产，大大节省了生产准备时间，结合设备数据采集系统，充分挖掘现有设备的运行效率，现场生产率提升了21%。

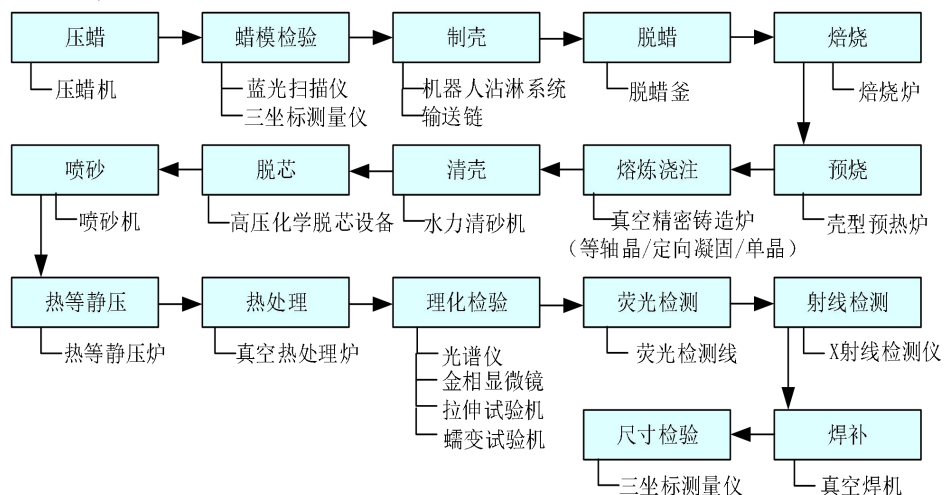
典型案例10：熔模铸造工厂数字化设备

一、企业简介

某公司是为航空航天、汽车及医疗设备等行业配套的专业铸造厂。经过多年的稳健发展，公司在同行业中率先通过能源体系认证、两化融化体系贯标认证，拥有专利近100项，荣获国家绿色工厂、省级产教融合试点企业、省级专精特新中小企业等荣誉。

二、主要做法

某公司铸造工厂围绕航空发动机钛合金机匣等铸件的生产，设置了蜡模工段、制壳工段、熔炼工段、铸造工段、清壳工段、精整工段、特检工段等，配备有高压无台式压蜡机、蜡料输送系统、面层涂料搅拌机、背层涂料搅拌机、自动制壳线、脱蜡焙烧一体炉、蒸汽脱蜡釜、数字化电弧真空凝壳铸造炉、真空凝壳炉、立式真空除气炉、真空自动补焊箱、气力循环式喷砂房及吹砂设备、自动化酸洗线、自动化清洗线、静电喷涂及荧光检测设备、铸件CR射线照射系统、X射线实时成像自动检测系统、三坐标测量仪、蓝光自动扫描系统等智能装备53套，占车间设备总数的100%，设备均自主可控，重要设备如脱蜡焙烧一体炉、蒸汽脱蜡釜等，可实现远程监控，能够满足车间智能生产制造需求。



三、实施成效

叶片、机匣生产线关键设备数字化率超过85%，数智化为企业生产效率提升32%；产品交付周期缩短38%；单位铸件能耗降低20%。

附件4：服务商目录

序号	服务商名称	主要服务场景	主营业务	所在地
1	中国电子技术标准化研究院 华东分院	设备数据采集、 工厂数字化设计	智能制造、区块链、 工业互联网、工业软件、 人工智能、网络安全等	苏州
2	江苏赛西科技发展有限公司	设备数据采集、 工厂数字化设计	智能制造、区块链、 工业互联网、工业软件、 人工智能、网络安全等	苏州
3	用友网络科技股份有限公司	财务人力管理、 企业经营决策	ERP等	北京
4	金蝶国际软件集团有限公司	财务人力管理、 企业经营决策	ERP等	深圳
5	浪潮集团有限公司	云基础设施、 工业互联网平台	ERP等	济南
6	北京兰光创新科技公司	生产计划与排产	MOM/MES	北京
7	华中科技大学华铸软件中心	工艺设计	铸造CAD、CAE等	武汉
8	迈格码（苏州）软件科技有限公司	工艺设计	CAD、CAE等	苏州
9	上海艾科赛工业智能科技有限公司	工厂数字化设计	铸造企业智能化 管控系统	上海
10	天津浩宇智造信息技术有限公司	计划调度、财务 人力管理	ERP、MES	天津
11	江苏铁泉智能制造科技有限公司	工厂数字化设计	数字化交付	镇江
12	鼎捷软件股份有限公司	计划调度	ERP、PLM、 WMS、MES、 APS	上海
13	江苏省朗通科技有限公司	计划调度	APS、MES	南京
14	树根互联股份有限公司	生产作业、设备 管理、工业互联网平台	工业互联网平台、 智能制造解决方案	北京

15	阿里云计算有限公司	生产作业、云基础设施	云计算、物联网（IoT）和边缘计算的解决方案	杭州
16	深圳华天谋企业管理顾问有限公司	精益生产管理	“CTPM”精益管理体系	深圳
17	上海理想信息产业（集团）有限公司	质量管控	应用软件开发	上海
18	武汉璞华大数据技术有限公司	设备管理	设备智能维保平台、物联网	武汉
19	武汉胜鹏智造科技有限公司	设备管理	工业核心软硬件	武汉
20	北京康明斯天远科技有限公司	设备管理	远程控制解决方案	北京
21	江苏高科物流科技股份有限公司	仓储物流	智能化物流仓库系统	南通
22	华晓精密工业（苏州）有限公司	仓储物流	物流无人化、生产装配柔性化解决方案	苏州
23	江苏新美星物流科技有限公司	仓储物流	智慧物流体系建设解决方案	苏州
24	上海聚龄信息技术有限公司	仓储物流	仓储、物流、自动化软硬件服务	上海
25	德马泰克国际贸易（上海）有限公司	仓储物流	智能仓储物流解决方案	上海
26	湖南蓝天智能装备科技有限公司	仓储物流	智能制造系统解决方案	长沙
27	唯智信息技术（上海）股份有限公司	仓储物流	物流混合云解决方案、TMS运输管理系统	上海
28	湖南华宽通科技股份有限公司	安全管控	智慧园区、社区、机关解决方案	长沙
29	苏文电能科技股份有限公司	能碳管理	电力设计咨询、电力设备供应	常州
30	江苏卓正环保科技有限公司	环保管理	智慧环保软件	南通
31	浙江全世科技有限公司	环保管理	工业过程分析系统、智能化软件系统	杭州

32	北京联想云科技有限公司	云基础设施	企业级云服务、智能制造与零碳工厂	北京
33	新华三集团有限公司	云基础设施、网络设备	数字基础设施建设、云计算与大数据	杭州
34	浙江浙大中控信息技术有限公司	工业互联自动化	自动化控制系统	杭州
35	北京东土科技股份有限公司	工业互联自动化	工业互联网核心硬件、底层软件	北京
36	飞马智科信息技术股份有限公司	工业互联自动化	工业软件开发与工程服务、工业机器人系统集成	马鞍山
37	北京金自天正智能控制股份有限公司	工业互联自动化	MES、工业计算机控制系统	北京
38	华为技术有限公司	网络设备、工业网络	云计算与数字能源	深圳
39	中兴通讯股份有限公司	网络设备	综合信息与通信技术(ICT)解决方案	深圳
40	思科(中国)有限公司	网络设备	信息传输、软件和信息技术服务业	杭州
41	中国信息通信科技集团有限公司	网络设备	网信安全和特种通信、智能化应用	武汉
42	无锡宇宁智能科技有限公司	网络设备	自动识别与数据采集专用设备	无锡
43	研华科技(中国)有限公司	网络设备	工业计算机与自动化控制、物联网与智能服务	苏州
44	深圳市研祥智能科技股份有限公司	网络设备	智能硬件及智能系统解决方案	深圳
45	中国移动通信集团有限公司	工业网络	移动通信服务、数字化转型服务	北京
46	中国联合网络通信集团有限公司	工业网络	物联网、智慧行业解决方案	北京
47	中国电信集团有限公司	工业网络	物联网、智慧行	北京

			业解决方案	
48	深信服科技股份有限公司	数据安全	企业级网络安全、云计算、IT基础设施和物联网的产品与服务提供商	深圳
49	亚信安全科技股份有限公司	数据安全	网络安全产品	南京
50	南京中新赛克科技有限责任公司	数据安全	网络空间数据提取与融合计算、工业互联网安全产品	南京
51	奥徠智能科技江苏有限公司	行业智能装备	全自动环保智能制壳生产线、精密铸造蜡件3D打印机	苏州
52	江苏联诚精密合金科技有限公司	行业智能装备	自动制壳自动摘挂机械手、自动制壳线	无锡
53	武汉中精科技有限公司	行业智能装备	精密铸造机器人柔性快速制壳系统、浇口自动打磨机	武汉
54	蔡司光学（中国）有限公司	智能检测装备	多功能三维扫描仪、三坐标测量机、X射线系列	广州
55	丹东奥龙射线仪器集团有限公司	智能检测装备	工业CT、X射线数字成像检测系统（DR）、X射线探伤机（X-Ray）	丹东
56	无锡日联科技股份有限公司	智能检测装备	工业CT、X射线数字成像检测系统（DR）、X射线探伤机（X-Ray）	无锡
57	艾普工华科技（武汉）有限公司	生产作业	MES、LES、EM、APS等	武汉

58	泛微网络科技有限公司	企业办公管理	OA办公管理软件	上海
59	广州力控元海信息科技有限公司	设备数采	SCADA	广州
60	杭州海康机器人股份有限公司	AGV小车	RCS	浙江
61	上海弗兰度智能科技有限公司	智能仓储	WMS/WCS	上海
62	广州市远景达科技开发有限公司	手持PDA	PDA	广州
63	上海格瑞特科技实业股份有限公司	能耗管理、智能电表、智能水表	EnMS	上海
64	上海灿钛智能科技有限公司	智能检测	SPC	上海
65	宁夏共享集团股份有限公司	3D打印、生产作业等	MES	宁夏
66	深圳市企企通科技有限公司	供应商管理	SRM	深圳
67	武汉天喻软件有限公司	工艺设计	PLM	武汉

附件5：技术缩略语

序号	缩略语	全 称	释 义
1	AI	artificial intelligence	人工智能
2	AGV	Automated Guided Vehicle	自动导航小车
3	AMR	Autonomous Mobile Robot	自主移动机器人
4	APS	Advanced Planning And Scheduling	高级生产计划与排程系统
5	CAD	Computer Aided Design	计算机辅助设计

6	CAE	Computer Aided Engineering	计算机辅助工程
7	CAM	Computer Aided Manufacturing	计算机辅助制造
8	CAPP	Computer Aided Process Planning	计算机辅助工艺规划
9	CAX	Computer Aided X	计算机辅助技术的综合称谓
10	DT	Digital Twin	数字孪生技术
11	DNC/ MDC	Distributed Numerical Control/Meta Data Controller	数控组网与数据采集管理系统
12	EAM	Enterprise Asset Management	企业资产管理系统
13	EHS	Environment Health Safety Department	环境、职业健康安全管理体系
14	EMS	Equipment Management System	设备管理系统
15	EnMS	Energy Management System	能源管理系统
16	ERP	Enterprise Resource Planning	企业资源计划系统
17	MES	Manufacturing Execution System	制造执行系统
18	MOM	Manufacturing Operations Management	制造运营管理系统
19	OA	office automation	办公自动化

20	PDM	Product Data Management	产品数据管理
21	PHM	Prognostics And Health Management	故障预测与健康管理系统
22	PLC	Programmable Logic Controller	可编程逻辑控制器
23	PLM	Product Lifecycle Management	产品生命周期管理
24	PTL	Pick To Light	电子标签
25	QMS	Quality Management System	质量管理体系
26	RFID	Radio Frequency Identification	射频识别技术
27	RGV	Rail Guided Vehicle	有轨导航小车
28	SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition	数据采集与监视控制系统
29	UPS	Uninterruptible Power Supply	不间断电源
30	VPN	Virtual Private Network	虚拟专用网络
31	WMS	Warehouse Management System	仓储管理系统

附件6：江苏省大飞机部件精密铸造行业“智改数转网联”典型场景参考指引

一、生产全过程

1、计划调度环节

（1）生产计划优化。 面向生产计划制定等业务活动，针对实时性差，动态调整能力弱等问题，构建生产计划系统，打通生产和仓储物流等管控系统，应用多目标多约束求解、产能动态规划等技术，生成最优生产计划。

（2）车间智能排产。 面向作业排程、资源调度、生产准备等业务活动，针对排产过程缺乏实时性和自动调整能力等问题，建设智能排产调度系统，应用多约束排产建模、多目标排产寻优等技术，实现排产优化与资源动态调度，提升生产效率和资源利用效率。

（3）资源动态配置。 面向人力、设备、物料等资源配臵业务，针对缺乏实时反馈和灵活调整能力等问题，通过资源管理平台（如ERP系统）和制造执行系统（MES），集成大数据、运筹优化、专家系统等技术，实现实时数据优化生产资源的分配与调度。

2、生产作业环节

（4）产线柔性配置。 面向产线建设、产线改造等业务活动，针对产线切换时调整时间长，铸造设备难以快速适应多品种、小批量生产等问题，部署智能制造装备与系统，应用产线模块化重构、柔性物流运输等技术，利用传感器和

实时数据流实时监控和优化工艺参数，根据订单、工况、库存等变化，实现产线快速调整和按需配置。

(5) 工艺动态优化。面向工艺控制、工艺参数调优等业务活动，针对铸造仿真模型与实际生产偏差较大、工艺及设备参数动态调优难等问题，建设智能产线和工艺在线优化系统，通过试验获取并充实设计软件材料物性参数库，应用设备机理与数据混合建模、多设备联合寻优等技术，实现工艺过程和设备参数在线优化，提高产品质量一致性。

(6) 先进过程控制。面向生产过程控制、工艺参数优化等业务活动，针对熔模铸造复杂工艺过程参数波动大、控制效果差等问题，基于先进过程控制、实时优化等系统，将传感器、自动化设备和大数据分析结合，应用模型预测控制、多目标寻优等技术，实时优化生产过程中的工艺参数，实现动态调整，保证产品质量并减少生产过程中的波动。

3、仓储物流环节

(7) 智能仓储。面向物料出入库、库存管理等业务活动，针对出入库效率低，易发生物料错放、遗漏或过期等问题，建设立体仓库和智能仓储管理系统，应用条码、二维码、射频识别、仓储策略优化、多形态混存拣选等技术，实现物料出入库、存储、拣选的智能化管理，提高库存周转率和土地利用率。

(8) 精准配送。面向厂内物流配送等业务活动，针对物料缺乏实时监控和优化、配送路线不合理、配送时间延

迟等问题，部署智能物流设备和管理系统，应用室内高精度定位导航、物流路径动态规划、物流设备集群控制等技术，实现厂内物料配送快速响应和动态调度，提升物流配送效率和精准度。

物料信息管理。面向物料编码与标准化管理、数据采集与集成、流程优化等业务，针对缺乏统一平台，数据孤岛现象严重等问题，建立智能化的物料追踪系统，实时监控物料从采购、入库、生产加工到成品出库的全流程，确保物料信息的透明化和可追溯性。

（9）物料信息管理。面向物料档案管理与供应商信息维护、物料信息分类与编码、物料信息维护与更新、物料数据分析与报表生成等业务，针对缺乏统一平台，存在数据孤岛，物料信息无法实时共享等问题，应用物料追踪与信息管理技术，部署智能化的物料追踪系统和管理平台，实现物料采购、存储、配送和使用的全流程数据统一管理，确保物料信息的真实性、实时性、透明性和可追溯性。

4、设备管理环节

（10）在线运行监测。面向设备运行数据采集、状态分析等业务活动，针对缺乏整体性的实时数据采集和反馈系统等问题，部署设备运行监控系统，集成智能传感、5G、多模态数据融合等技术，实现设备数据实时采集、状态分析和异常报警，提高设备运行效率。

（11）设备故障诊断与预测。面向设备故障分析、健康

管理等业务活动，针对诊断准确性不高，故障难以预测等问题，部署智能传感与控制设备，建立设备运维管理平台，应用设备故障知识图谱、故障机理分析、预测性维护等技术，预测故障失效模式，开展预测性维护，提高设备综合利用率。

5、质量管控环节

(12) 智能在线检测。面向质量数据采集、分析、判定等业务活动，针对铸件的缺陷不能及时精准发现、检测效率低等问题，部署自动化、智能化检测技术与设备，结合机器学习和深度学习算法，提升检测精度和效率。通过传感器实时采集关键数据，及时发现异常并进行调整。

(13) 质量精准追溯。面向质量数据管理、质量问题追溯、质量优化等业务活动，针对质量数据不完整、追溯难度大等问题，构建质量管理体系，应用条码、二维码、RFID、5G、标识解析等技术，集成分析原料、设计、生产等质量相关数据，实现产品全生命周期的质量精准追溯和优化改进。

(14) 产品质量优化。面向质量检测、质量改进、工艺优化等业务，针对质量数据有效性差、质量优化过程效率低及成效差等问题，建立质量管理体系和质量知识库，集成质量机理分析、质量数据分析等技术，进行产品质量影响因素识别、缺陷分析预测和质量优化决策。

6、安全管控环节

(15) 安全风险实时监测与应急处置。面向安全风险监测、安全应急响应等业务活动，针对安全监测系统与应急处

理的准确性、实时性差等问题，建立自动化监测与应急处置系统，确保从预警到处理的全过程反应迅速高效。

（16）危险作业自动化。面向危险作业操作、作业过程管理等业务活动，针对熔模铸造生产危险作业工序多、安全风险高等问题，建设智能作业单元和自动化产线，建立防护设施和管控系统，应用环境感知与识别、作业风险控制等技术，实现危险作业环节的少人化、无人化，提高生产作业安全水平。

7、能源管理环节

（17）能耗数据监测。面向能耗监测、能源调度等业务活动，针对能耗实时、全面、准确监控难等问题，部署能耗采集设备和管控系统，应用多能源介质感知、能耗综合建模仿真、能源平衡调度等技术，实现工厂能源在线监测、综合管控和能效优化，降低单位产值综合能耗。

8、环保管控环节

（18）污染监测与管控。面向污染排放监测、污染物收集处理等业务活动，针对污染排放检测不精准、污染物收集处理效率低等问题，部署污染排放在线采集设备和管控平台，应用污染监测与控制、污染源追溯等技术，实现污染全过程动态监测、精确追溯、风险预警和高效处理，降低污染排放水平。

（19）废弃物管理。通过MES系统集成传感器、RFID等物联网设备对废弃物进行标识、追踪与管理，实时监控工

厂废弃物的产生量、种类和存放位置等信息。建立固体废弃物仓库和危险废弃物仓库进行存放，并及时送往有资质单位进行处理或再生利用。

9、工厂建设环节

(20) 工厂数字化设计。面向工厂规划、工艺布局、产线设计、物流规划等业务活动，针对资源浪费和生产调度不合理等问题，通过计算机辅助设计和计算机辅助制造技术，结合虚拟现实与增强现实，应用建筑信息模型、物流和动线仿真、生产系统建模等技术，实现工厂布局的实时设计与优化，提升生产线配置和资源调度的科学性，实现数字化交付。

(21) 工业技术软件化应用。面向研发设计、制造执行、质量控制等业务，针对工厂软件系统存在信息不互通和集成性差等问题，引入ERP与MES等系统并进行二次开发和集成，实现从物料管理到生产调度、质量控制、人员管理等一体化的信息管理，提高系统间的数据流通和协同作业效率。

(22) 数字基础设施集成。面向工厂数字化、智能化和网络化需求，针对设备与新技术的集成度不高，数据流通不畅等问题，建设高速稳定的工业网络基础设施，将物联网设备与企业的核心系统集成，实现设备、生产线与管理平台的高效连接。

(23) 数据治理与流通。面向研发设计、制造执行、质量控制等业务，针对工厂内外部的数据治理不完善，数据存

在重复、错误或丢失、访问权限设置不合理等问题，通过建立统一的数据标准化管理平台，实现不同系统、设备和生产环节数据的标准化。采用加密技术保障工厂内外部数据的安全性。

二、产品全生命周期

10、工艺设计环节

(24) 工艺数字化设计。面向铸件图设计、铸造工艺三维建模、虚拟铸造与仿真、工艺参数匹配及缺陷控制优化等业务，针对协同工作难，数据和知识管理差，设计效率低，试验成本高，可制造性差等问题，集成CAD软件、CAE软件、CAM软件、CAPP系统、PLM系统等，建立集成化的数字化设计平台，实现工艺设计快速迭代优化，缩短工艺研发周期。