

智能制造技术在工业自动化中的应用研究

杨 毅

北京外企人力资源服务有限公司, 北京 100020

[摘要]智能制造正在对工业自动化的技术架构和应用范式进行全方位的改变。文章对智能制造在工业自动化中典型的应用模式和关键技术进行了系统的分析。经过研究发现,工业物联网同边缘计算、数字孪生和虚拟调试、工业机器视觉和深度学习、预测性维护和设备全生命周期管理这四个核心技术已经从概念验证走向了规模化落地,但是标准化体系滞后、数据安全风险、异构系统互操作壁垒、复合型人才短缺这些结构性的障碍仍然限制着深度应用。

[关键词]智能制造; 工业自动化; 数字孪生; 预测性维护; 边缘计算

DOI: 10.33142/ect.v4i5.19763

中图分类号: TH16

文献标识码: A

Research on the Application of Intelligent Manufacturing Technology in Industrial Automation

YANG Yi

Beijing Foreign Enterprise Human Resources Service Co., Ltd., Beijing, 100020, China

Abstract: Intelligent manufacturing is undergoing comprehensive changes in the technological architecture and application paradigms of industrial automation. The article systematically analyzes the typical application modes and key technologies of intelligent manufacturing in industrial automation. Through research, it is found that the four core technologies of industrial Internet of Things and edge computing, digital twins and virtual debugging, industrial machine vision and deep learning, predictive maintenance and equipment life cycle management have moved from concept verification to large-scale implementation, but structural barriers such as lagging standardization system, data security risks, barriers to interoperability of heterogeneous systems, and shortage of complex talents still limit in-depth application.

Keywords: intelligent manufacturing; industrial automation; digital twin; predictive maintenance; edge computing

引言

目前,人工智能、工业物联网、大数据等新一代信息技术快速地与制造业深度融合,促使传统工业自动化向着智能制造的方向发生深刻的变革。2025 年我国工业自动化市场的总值是 3000 亿元左右,工业机器人年产量达到 40 万台以上,已经连续十二年位居世界第一位。2025 年 12 月工业和信息化部等八部门联合印发的《“人工智能+制造”专项行动实施意见》,又将制造业智能化转型提升到国家战略的高度。从技术演进的角度来说,工业自动化是由继电器控制到 PLC 集中控制,由现场总线到工业以太网的发展过程,智能制造是数据驱动和智能决策的新维度。二者的融合不是简单的技术叠加,而是控制逻辑、数据架构和业务模式的系统性重塑。2025 年首批 15 家领航级智能工厂亮相,这是这一进程取得阶段性成果的标志,生产系统平均效率提高 29%,产品不良率降低 47%,有 70%以上的业务场景被人工智能所影响。但是,由“标杆

示范”向“规模推广”还存在许多障碍。

1 智能制造与工业自动化的融合发展基础

智能制造和工业自动化融合发展是根据技术、产业、政策三个方面所处的现实状况来实现的。从技术上讲,传统的工业自动化主要的几个要素,即 PLC 控制器、伺服驱动系统、SCADA 监控系统、MES 执行系统等已经非常成熟,给智能化的引入打下了良好的基础。2025 年以后,主流工业自动化厂商把软件定义自动化、开放自动化当作战略重点,本质上就是把封闭的硬件控制系统拆解成开放的软件平台,让 AI 算法可以直接参与到控制决策当中。工业互联网平台把设备层和管理层的数据通道打通之后,到 2025 年为止,全国一共培育出了有影响力的工业互联网平台 340 家,重点平台所连接的工业设备数量超过了亿台套,给智能制造赋予了稳固的数据根基^[1]。从产业角度来说,智能工厂梯度培育体系已经形成了“基础级-先进级-卓越级-领航级”的四级结构,全国共建成 3.5 万多家

基础级、8200 多家先进级、500 多家卓越级和 15 家领航级智能工厂，形成了梯次推进的产业格局。从政策层面来说，《人工智能+制造专项行动实施意见》提出推动通用大模型在制造业的深度应用，创建 1000 个高水平工业智能体，创建起数据、模型、场景应用的良性循环。三个维度的协同推进，给两者深度融合打下了良好的基础。

2 智能制造在工业自动化中的应用模式

2.1 智能产线与柔性制造

智能产线的主要特点就是依靠传感网络、智能控制和数据分析三者相结合，使产线具有多品种、变批量的自适应生产能力。传统的刚性生产线对于订单的变动需要数小时到数天才能完成换线工作，但是智能产线依靠机器人程序自动切换、工装快速更换以及视觉引导定位等技术手段，可以将换线时间缩短到几分钟之内。

领航级工厂海康威视依靠自研 AI 技术达成柔性化大规模定制，产线换线时间削减 50%；上汽通用五菱在单一产线上达成 24 款车型全柔性混流生产，设备综合利用率达到 98.8%。成效背后是制造执行系统和设备控制层的深度协同，生产计划调整触发 MES 工单变更，工单传给 PLC 新的工艺参数，机器人自动加载对应的程序，几分钟内完成闭环。

2.2 智能物流与供应链协同

智能物流把自动化仓储、AGV 自主导航、RFID 自动识别和智能调度算法结合起来，从而完成从原材料入库到成品出库的全过程无人化运转。在宗申动力 5G 工厂里，AGV 小车依靠 5G 网络同中央调度系统保持实时联络，借助 MEC 边缘计算来达成路径的动态规划以及避障，生产线物流配送全部实现自动化。

供应链协同由原来的工厂内部向外扩展到上下游。宁波移动同公牛集团创建起的全链条信息互通智能工厂，依靠 5G-A 无源物联技术达成模具、周转箱的自动化盘点和位置追踪，打通了从供应商到生产车间再到分销中心的全部数据链，模具查找时间由原来的小时级缩短到秒级。2025 年我国智能物流装备市场规模达到 1261 亿元，同比增长 21.1%，说明有很强的产业支撑能力。

3 工业自动化中智能制造的关键技术

3.1 工业物联网与边缘计算

工业物联网是智能制造的数据感知层，边缘计算给实时决策赋予近场算力，二者一起形成“云-边-端”的三层架构。重庆电信在宗申发动机 5G 工厂建设中，采用 AAU 完成厂区信号无死角覆盖、UPF 完成数据本地分流、MEC

承担实时分析任务的立体网络架构，使生产数据处理延迟由原来的 100 毫秒降低到现在的 10 毫秒以内，较好地解决了传统 Wi-Fi 信号不稳定、数据丢包等问题。以边缘计算平台为依托，宗申动力创建了 13 种类似的零部件的 AI 检测模型，检测数据传输速度提高 8 倍，产线一次装配合格率由原来的 98% 提高到现在的 99.5%。边缘计算起协议转换、数据治理中间层的作用。PLC、机器人、传感器等设备由不同的供应商提供，通信协议不统一。边缘计算网关依靠内置的协议转换模块，把 Modbus、PROFINET、EtherCAT 等不同的工业协议统一汇聚成标准的数据流，给上层应用赋予一致的数据视图。

3.2 数字孪生与虚拟调试

数字孪生就是建立物理实体高保真的数字映射，工程师可以在虚拟环境里完成设计验证、工艺仿真和系统调试，虚拟调试场景下它的价值更加明显。

传统的工业自动化项目开发是串行的，机械设计完成后硬件装配，装配完成后才能开始电气调试和软件开发，任何一个环节的延误都会影响到后面的工序。虚拟调试冲破了这种线性逻辑。以舍弗勒集团为例，在引入虚拟调试平台之后，控制系统还没有完成硬件集成的时候就可以使用虚拟模型进行软件开发和功能测试，德国和中国团队通过平台协同创建虚拟模型，实现了跨国同步开发。据统计可知，软件工程团队在虚拟环境里可以完成大约 95% 的调试工作，剩下的 5% 才需要到现场终调^[2]。国内的研究团队依托数字孪生平台创建起机器人虚拟调试体系，借助虚实协同检测手段之后，和传统实物调试比较起来耗时削减了大约 35%。

3.3 工业机器视觉与深度学习

工业机器视觉属于深度学习在制造业里应用最为成熟，验证度也较高的范畴。传统的机器视觉依靠人工制定的特征提取准则，对于光照改变、产品一致性差别都比较敏感，不具备很好的泛化性能。深度学习把从“规则驱动”变成“数据驱动”当作范式改变，卷积神经网络可以自动从大量的样本当中学到缺陷的特征，不再需要人工去设定判定规则。

单阶段检测器速度和精度较好，适合于实时工业缺陷检测。京东方建立的人工智能缺陷管理系统综合良率高于 98.7%，说明深度学习可以被用到高端电子制造中。但是工业深度学习也有它特有的难题，异常工况的数据很少并且标注成本很高，分场景训练出的模型很难直接应用到新的场景中去，每一次部署都需要重新采集数据并调整参数。

3.4 预测性维护与设备全生命周期管理

设备维护管理由原来的“事后维修”向现在的“预防性维护”、“预测性维护”发展。事后维修是由故障而发生的，其可靠性低、成本高、损失大等缺点明显；预防性维护把维护提前到前面，但是由于固定的周期维保计划容易造成过度维护和维持不足的双重困境。

预测性维护依靠密集传感器网络来采集振动、温度、电流等运行参数，边缘计算先做初步处理然后上传到云端，利用机器学习算法构建设备退化模型，准确地预测出剩余使用寿命。其深层次的逻辑就是把维护决策依据由经验判断变为数据预测。全球最大的风机制造企业把预测性维护技术应用到实际生产中以后，其关键部件的突然停机故障率降低了 70%以上，并且备件库存的成本也大大降低。

从宏观角度来说，预测性维护就是设备整个生命周期的驱动力。设计阶段用数字孪生模型预测可能发生的故障模式，运行阶段用实时健康评价发出精确的维修请求，退役阶段把整个生命周期的成本算出来作为更新的参照。四大技术应用场景和效益对比如表 1 所示。

4 应用挑战与推进建议

4.1 标准体系与互联互通

智能制造包含设备层、控制层、执行层、管理层等诸多层次的系统，各个层次的数据交换依靠共同的标准体系。然而，标准制定周期与技术迭代节奏存在明显错位。部分存量设备没有标准的通信接口，联网改造要增加投入；不同的厂商之间协议层面上存在生态壁垒，同一个产线上的不同品牌设备需要专用网关来实现数据互通。部分研究表明，由于设备异构性较明显，所以自动化生产线协同性的主要问题就是设备异构性。一些国际厂商以协议授权和认证体系为手段形成封闭生态，提高互联互通的成本。

加快基础共性标准的制定和推广，在基础层面推行

OPC UA 等开放架构作为通用接口，创建行业数据字典统一的核心参数定义，在应用层面由行业协会牵头制定 MES 数据规范、数字孪生模型创建准则等团体标准，缩小标准创建及更新周期的差别。

4.2 数据安全与隐私保护

工业数据安全有其特殊性，它牵涉到商业机密泄露的风险，也会影响到物理生产过程的安全。设备运行参数、工艺配方、质量检测数据等一旦被篡改或者泄露，就会造成产线停摆甚至安全事故。2026 年工信部印发的工业领域数据安全能力提升实施方案中提出完善数据安全标准、加强风险防控、推进技术手段建设三项重点任务。模数共振行动同步创建起数据不出域的联合训练空间，在保证安全的基础上破解数据孤岛难题。

企业层面实行数据分类分级管理，把核心工艺及产品质量的关键数据当作加密传输的对象，并且加上访问控制。行业层面创建可信数据共享平台，用联邦学习、安全多方计算等技术达成“数据可用不可见”。

4.3 异构系统集成与互操作

异构系统集成属于智能制造落地的主要工程难题。在典型的工业环境里，PLC、SCADA、MES、ERP 这些系统大多是由不同的时期、不同的供应商开发出来的，其数据格式、接口标准、语义定义等方面存在着诸多的差异。大型制造企业的信息化系统一般会分阶段来建设，系统的各个部分之间数据通道也会随着迭代而变得越来越繁杂。行业报告表明，系统集成时间比三个月要长得多，并且调试费占总投资比例达到 40%。

推广统一命名空间架构，用标准化的数据节点和语义模型来实现各个系统的通信，减少集成的复杂程度；新建项目优先选用支持开放自动化标准的产品；存量系统用边缘计算网关做为协议转换中间层，用最少的改造成本达成数据贯通。

表 1 智能制造关键技术在工业自动化中的核心应用

关键技术	典型应用场景	核心技术要素	已实现效益
工业物联网与边缘计算	设备联网、实时监控、协议转换	5G 专网、MEC、UPF 本地分流	数据处理延迟降至 10ms 内，设备联网率显著提升
数字孪生与虚拟调试	产线仿真、工艺优化、虚拟调试	高保真建模、并行工程、虚实协同	调试耗时降低 35%，约 95%调试任务可虚拟完成
工业机器视觉与深度学习	质量检测、缺陷识别、定位引导	YOLO 系列算法、多模态融合、小样本学习	不合格品检出率达 100%，综合良率超 98.7%
预测性维护与设备管理	故障预警、剩余寿命预测、维护决策	振动分析、退化建模、RUL 预测	突发故障率降低 70%以上，库存成本优化约 30%

4.4 复合型人才培育与组织变革

智能制造对于人才的需求具有很强的复合性,既要会 PLC 编程、伺服控制这些自动化技术,又要会数据分析、AI 算法建模这些 IT 能力。目前高等院校的专业设置是以传统学科划分为主,自动化、计算机、机械工程各自独立培养,缺少面向智能制造的跨学科课程体系^[3]。中小制造企业普遍存在人才吸引力不足的困境,想转不会转、想转转不起是普遍存在的现实。产教融合被视作破解困境的途径,吉利学院和极氪科技联合创建的“智氪匠新班”采取“标准体系引入+岗位实际操作”方式来培养人才,希望达成校园与职场的无缝对接。

要从企业角度建立内部人才培训体系,以项目实训、轮岗锻炼为途径加快现有人才技能更新,不能只依靠外部招聘来解决。院校层面冲破学科壁垒,创建起“自动化+AI+工业大数据”跨学科课程群,加强校企合作共建实训基地,促使人才培养同产业需求实现精准对接。

5 结束语

智能制造同工业自动化融合,促使制造业由“自动化执行”变成“智能化决策”。工业物联网和边缘计算搭建起数据底座,数字孪生重新塑造了工程开发范式,深度学习驱动的机器视觉达成质量检测质变,预测性维护把设备

管理由事后补救转变为事前预见。四项关键技术大规模应用取得了初步成果。但是标准碎片化、数据安全隐患、异构系统互操作壁垒和复合型人才匮乏是造成大规模推广困难的结构性障碍。破解这些难题不能只依靠技术的突破,还需要标准体系、数据治理、人才教育等各方面的共同推动。伴随着“模数共振”行动等国家战略的不断推进以及开放自动化、工业智能体等新范式的不断完善,智能制造将在未来五年内由标杆示范向产业全覆盖发展,为制造强国建设提供强有力的支撑。

[参考文献]

- [1]任磊,王海腾,董家宝,等.工业智能体:体系架构、关键技术与未来展望[J].中国科学:技术科学,2026,56(3):492-506.
- [2]李荣义,田帅旗,代铭秋,等.数字孪生驱动的柔性热控薄膜制造过程缺陷检测方法[J].哈尔滨理工大学学报,2025,30(1):119-128.
- [3]朱赞海,罗陆锋,卢清华,等.面向订单扰动的柔性作业车间动态调度方法[J].计算机集成制造系统,2025,31(3):984-997.

作者简介:杨毅(1986—),男,汉族,毕业于北京联合大学机电学院,本科,机械工程及其自动化专业,主要从事测控、电气设计方面的研究。