

智能制造背景下机电一体化技术发展趋势与应用

李伟

1 金达科技股份有限公司，河北省沧州市，061001；

2 河北省塑料包装材料工程技术创新中心，河北省沧州市，061001；

摘要：智能制造作为制造业朝向转型升级的核心指向，伴随全球工业 4.0 浪潮的深度延展以及“中国制造 2025”战略的全面践行而愈发凸显其重要性。机电一体化技术，作为一种融合机械技术、微电子技术与信息技术等多学科的综合性技艺，构成智能制造体系的基石与关键赋能技术。本文着重探究在智能制造这一背景下，机电一体化技术所展现出的深度集成化、高度智能化、数字孪生化以及绿色低碳化等发展趋向，并详尽剖析其于工业机器人、智能生产线、智能检测与维护等领域的创新性应用，最后对未来发展进行展望，以期对相关领域的技术创新与产业升级提供参考。

关键词：智能制造；机电一体化；数字孪生；人工智能；工业机器人；发展趋势

DOI：10.69979/3041-0673.26.02.025

1 智能制造为机电一体化技术注入新内涵

智能制造，系借助信息物理系统（CPS）、物联网、大数据等新一代信息技术达成制造全流程智能化之新型模式。它对机电一体化技术提出了全新要求。首先，技术集成自传统“机械 + 电气”转至“信息物理融合”，机械本体、传感器、执行器及上层管理系统（如 MES、ERP）需深度集成，构建实时交互的信息物理系统。其次，功能实现由“程序化自动化”升至“自主化智能化”，系统应具基于数据与算法的学习、推理及自适应能力，以应对复杂多变的制造环境。最后，系统架构从“单机作战”变为“系统协同”，强调设备间互联互通与协同作业，支撑整个制造系统优化运行^[1]。

2 智能制造背景下机电一体化技术的发展趋势

2.1 深度集成化与模块化

在智能制造这一背景下，机电一体化技术所展现出的发展走向，是朝着深度集成化以及模块化方向而迅速推进。从技术维度而言，呈现出“机”“电”“液”“光”“信”等多个领域技术的深度交融态势。这种交融状态，已然超脱了单纯物理组合的范畴，进而演变为功能与性能方面的有机统一。以高端数控机床为例，其不仅仅集成了诸如精密机械结构以及高频电主轴等传统类型的部件，更为关键的是，融合了多轴运动控制器、视觉对刀系统、温度与振动传感系统以及工业网络接口等智能单元部分，最终形成了一个具备高度协同性的智能系统，系统架构见图 1。系统层面则普遍采用模块化设计理念，将复杂的机电系统解构为动力模块、控制模块、传感模

块和执行模块等标准化功能单元。这种模块化架构不仅大幅提升了系统的可重构性和可维护性，更为实现智能制造所要求的大规模个性化定制提供了技术基础。通过标准接口的模块化设计，企业可以根据生产需求快速调整产线配置，像“搭积木”一样灵活组合各功能模块，显著增强了生产系统的柔性和适应性。

2.2 高度智能化与认知化

在智能制造的情境下，机电一体化技术呈现出向高度智能化与认知化方向加速演进的态势。人工智能技术的深度赋能，赋予机电系统以类人般的感知-决策-执行闭环能力。就智能感知而言，借助多模态传感技术的融合，涵盖高精度视觉传感器、力/力矩传感器以及 3D 激光雷达等，现代机电系统如今已然能够实时获取毫米级别的空间定位精度、牛顿级别的力度分辨率以及微秒级别的时间响应特性，其感知维度与精度远超人类生理极限^[2]。在智能决策方面，凭借嵌入式 AI 芯片与边缘计算节点，机电设备得以运行深度学习、强化学习等先进算法，达成诸如基于振动频谱的设备故障预测、基于视觉识别的产品质量在线分拣，以及基于工艺大数据的参数自主优化等高级功能；在执行环节，智能机电系统展现出显著的自适应能力，以精密装配机器人为例，其能通过力觉反馈实时调整装配姿态和力度，将传统“盲装”的成功率从 60%提升至 98%以上。这种“感知-思考-行动”的完整智能链条，正在推动机电系统从程序化自动化向认知化自主化的质变。

2.3 数字孪生技术的全面应用

在智能制造背景下，数字孪生技术渐趋成为机电一体化系统迈向发展的关键赋能技术。凭借在虚拟空间中构建与物理实体全然等同的数字化模型，该技术达成了虚实融合的新型运维模式。以智能产线而言，其数字孪生体除涵盖几何尺寸、运动学参数等静态特性之外，更可实时反映设备运行时的温度、压力、振动、能耗等数以百计的动态参数，进而形成毫秒级同步的“数字镜像”。此深度仿真的技术特质催生革命性的应用价值。在研

发阶段，工程师能够在虚拟环境内针对机电系统展开运动学仿真、应力剖析以及工艺优化，将传统情形下需数月之久的物理调试周期缩减至数天。在生产阶段，借助孪生体预测数据与实际运行数据的比对，能够实现亚毫米级的精度补偿以及微秒级的时序优化。至于运维阶段，基于历史数据的深度学习算法可提前 72 小时对设备潜在故障予以预测，从而降低维护成本^[3]。该技术的应用流程具体见图 1 所示。

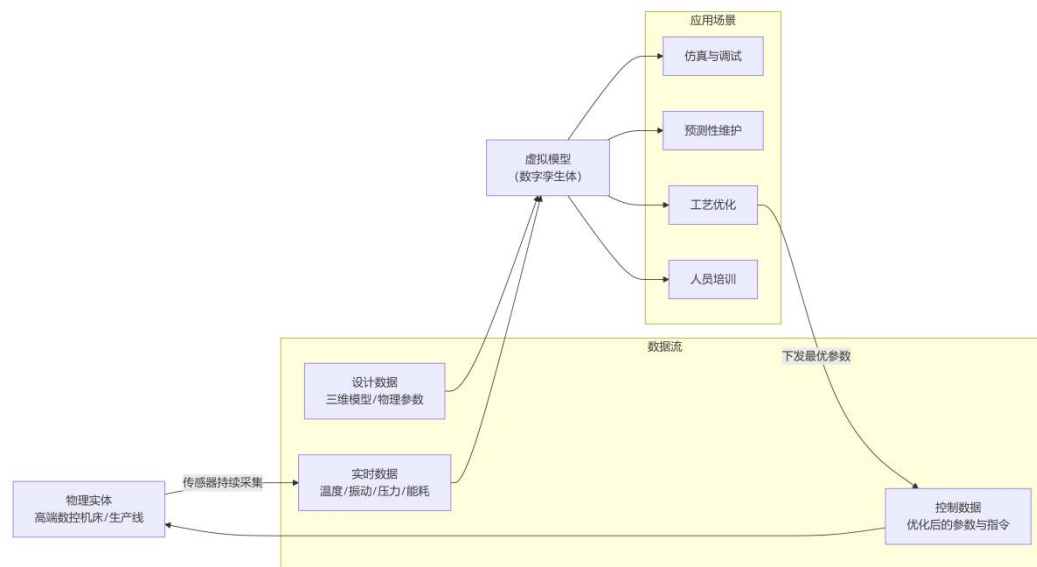


图 1 数字孪生技术在机电系统中的应用流程图

2.4 云边端协同的计算架构

在智能制造背景下，机电一体化系统渐趋采用名为“云 - 边 - 端”协同的新型计算架构模式。借由此架构，计算资源达成优化配置以及高效利用。此架构对计算任务予以合理分配，涉及三个层级。设备端方面，嵌入式控制器与传感器网络司职毫秒级别的数据采集以及实时控制工作，旨在确保关键运动控制具备精准性与可靠性。例如，工业机器人关节伺服控制响应时间能够被控制在 1ms 以内。边缘层处，在产线旁所部署的边缘计算节点实施数据清洗、特征提取以及轻量级 AI 推理作业。此过程不仅能够达成 10ms 级别的实时优化决策，而且可过滤掉 90% 以上的冗余数据，进而极大程度降低网络传输负荷。云端部分，凭借强大的云计算平台完成 TB 级历史数据的存储分析、深度神经网络的训练优化以及跨产线的资源调度工作。例如，借由分析百万级工艺参数样本从而优化得出最佳生产方案。这种分层协同的架构既克服了传统集中式处理实时性不足的缺陷，又解决了单纯边缘计算算力有限的困境，使智能机电系统同时具备了本地快速响应和全局优化决策的

双重优势。

2.5 绿色低碳与可持续发展

机电一体化技术，在“双碳”战略目标所施予的导向情境下，正历经一场深入且具变革性的绿色转变历程。该历程促使制造业朝着可持续发展的方向实现转型。此变革展现于三个维度：系统设计的生态化层面，借由结构创新与材料择选方式的改变，达成设备的轻量化以及紧凑化状态。这一过程，不仅削减了原材料的耗费率，同时也降低了运行时的能量消耗。动力系统清洁化方面，高效率的电动伺服系统渐次替代传统的液压驱动形式。此替代行为，消除了油液泄漏引发污染的风险，并且显著提升了能量转换的效率。能源管理智能化领域，先进的能量回收技术以及自适应节能控制策略得以引入。通过这些手段，设备于运行期间达成了能量的循环利用。

3 智能制造背景下机电一体化技术的典型应用

3.1 工业机器人与智能柔性产线

在智能制造的情境下，工业机器人已然冲破传统单一作业的模式，进而演变为智能柔性制造系统的核心所

在。以汽车行业为例，数字化产线由六轴多关节机器人、人机协作机器人以及智能 AGV 共同构成。借由集成 3D 视觉定位系统与力控传感器，实现了多车型混线生产方面的革命性突破：机器人能够实时辨别不同型号车身的特征，自主对焊接路径与装配参数加以调整，完成自白车身焊接、涂装直至总装的全流程柔性化作业^[4]。在消费电子领域，模块化机器人工作站凭借标准化接口设计，搭配快换式末端执行器与云端工艺数据库，能够在分钟之内完成不同产品生产程序的转换，达成智能手机、平板电脑等多样化产品的共线生产。更为先进之处在于，这些智能产线经由与 MES 系统的深度融合，能够依据订单需求自动调节生产节拍与工艺流程，实现了从大规模标准化生产朝着“一件流”个性化定制的转型升级。

3.2 智能数控机床与增材制造装备

新一代智能数控机床所集成了诸多先进功能，如多物理量感知、自主决策以及自适应控制等。借助内置的振动传感器与力觉反馈系统，机床能实时监测切削状态，自动优化进给参数。五轴联动加工中心结合在机测量系统，达成了“加工-检测-补偿”的闭环控制。金属 3D 打印设备则凭借精准的温度场控制与层间质量监测，对复杂异形零件的成形精度予以确保。传统制造工艺正被这些智能装备重塑，进而为航空航天、医疗器械等领域提供全新的解决方案。

3.3 智能检测与预测性维护系统

在智能制造体系内，智能检测与预测性维护系统，以机电一体化技术为依托，正逐步演变为保障产品质量以及设备健康状态的关键支撑要素。此系统对多源传感技术、边缘计算以及人工智能算法进行深度融合，达成从“事后维修”至“预测性维护”的转变。就检测层面而言，该系统集成高分辨率工业相机、激光扫描仪与多光谱成像单元，能够针对产品开展微米级精度的外观、尺寸及装配完整性检测工作。以半导体芯片封装检测为例，视觉系统可按每分钟数百片的速率，识别微细焊线缺陷以及封装偏移状况，其检测准确率超越 99.9%，相较人工检测效率具有显著优势。而在预测性维护范畴，机电一体化系统借助部署振动传感器、声学传感器、温度传感器以及电流传感器，对设备运行状态数据予以实时采集。这些数据经边缘计算节点实施特征提取与异常检测操作，随后通过云端大数据平台构建设备退化模型与故障预测算法^[5]。在实际应用场景中，如数控机床主轴系统，可凭借分析振动信号的频率特征变化，提前数十小时对轴承磨损故障发出预警，并自动生成维护工单

以及建议更换周期。

3.4 智能物流与仓储系统

机电一体化技术在智能制造范畴内，智能物流与仓储系统是重要的应用表征。借助自动化装备、物联网技术以及智能调度算法的集成，物流流程达成无人化、柔性化与智能化。自动化立体仓库（AS/RS）、自主移动机器人（AMR）、智能分拣机器人以及物流输送系统构成系统核心，这些设备凭借统一网络化控制平台协同运作。仓储阶段，堆垛机凭借精密伺服控制以及位置检测系统，能够实现货箱毫米级精准定位与存取，并与 WMS（仓库管理系统）协同实时优化库存布局。物流搬运方面，AMR 机器人依托激光 SLAM 导航与多传感器融合技术，可自主规划路径、避障绕行，且与生产线实时交互，按需配送物料。以汽车零部件供应链为例，AMR 集群借助 5G 网络接收 MES 系统指令，实现上百种物料准时化配送，有力支撑混线生产模式。分拣环节充分彰显机电一体化技术集成优势：智能分拣机器人融合视觉识别系统与柔性末端执行器，能高速识别包裹信息并完成精准抓取与分拣，每小时处理量可达数千件。同时，数字孪生技术在此领域深度应用，借由构建物流系统虚拟映射，达成流程仿真优化以及实时监控预警。

4 结语

综上，智能制造背景下，机电一体化技术正向智能化、集成化、绿色化深度演进，成为推动制造业变革的关键力量。通过融合人工智能、数字孪生、云边协同等新技术，机电系统实现了感知、决策与执行能力的全面提升，支撑柔性生产、资源优化与可持续发展。未来，应进一步加强跨学科创新，突破传感器、智能控制与算法等核心技术，构建完善的产业生态，助力我国制造业迈向全球价值链高端。

参考文献

- [1] 白书瑶. 智能制造背景下机电一体化技术发展趋势与应用[J]. 安家, 2024(12): 0220-0222.
- [2] 凌洪青. 智能制造背景下机电一体化技术的发展探索[J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(1): 66-68.
- [3] 朱建国. 智能制造背景下机电一体化技术研究[J]. 冶金管理, 2021(011): 000.
- [4] 张朴. 机电一体化技术在智能制造中的发展与应用[J]. 家用电脑世界(电子版), 2021(002): 000.
- [5] 纪宗军. 智能制造背景下机电一体化技术的发展路径探索[J]. 产业创新研究, 2024(12): 13-15.