

工业5.0背景下的控制架构演进

——从DCS到UCS的范式转变

成继涛

中控技术股份有限公司 浙江 杭州 310000

摘要：针对工业5.0对控制系统提出的新需求，分析了传统分布式控制系统（DCS）在架构封闭、人机交互局限及可持续性不足等问题，提出通用控制系统（UCS）的架构革新路径。通过对比DCS与UCS在通信、计算与安全方面的技术差异，结合石化、电力等案例验证，表明UCS采用软件定义控制、全光网络与AI原生设计，实现控制逻辑与硬件解耦，支持微秒级实时与AI协同调度。UCS架构节省90%机柜与80%线缆成本，AR运维与语音交互提升操作效率40%以上，AI-PID优化降耗3.2%，碳足迹追踪助力碳排放强度下降12.7%，系统可用性达99.9997%。研究亦指出实时性保障、技能转型与标准重构等挑战，并展望认知控制与细胞化工厂等未来方向。

关键词：工业5.0；通用控制系统；软件定义控制；人机协同；韧性生产

引言

工业5.0作为制造业发展的新范式，正推动生产方式向人本化、可持续化和韧性化转型^[1]。与工业4.0强调的自动化与数字化不同，其核心在于重构人机协同关系、深化绿色制造实践、增强系统抗扰动能力。这一转变对底层控制系统提出颠覆性需求：需同时满足微秒级实时控制精度、开放技术集成生态、自然人机交互支持及动态重构能力——传统分布式控制系统（DCS）因架构封闭性（专用硬件绑定）、交互局限性（固定HMI面板）和可持续性缺陷（高能耗复杂布线）面临根本性挑战^[2]。

当前研究主要集中在三方面：人机协同技术；绿色制造集成；韧性生产支撑^[3]。尽管云原生、软件定义网络等新兴技术被尝试引入工业领域，但关键矛盾仍未解决：确定性与弹性的冲突（如资源动态调度引发的时序抖动）、IT/OT融合的技能断层、安全认证体系滞后于架构革新。针对上述问题，本研究聚焦中控技术提出的通用控制系统（UCS）架构范式，通过系统性解构其技术演进路径，实证分析其在工业5.0场景的价值实现机制。核心研究内容包括：揭示DCS与UCS在通信网络（现场总线→全光TSN）、计算架构（嵌入式固定→云原生弹性）、安全模型（边界防护→零信任内生）的范式差异；基于石化、电力等行业案例，量化验证UCS在人机协同（AR运维效率↑40%）、绿色制造（能耗↓3.2%）、韧性生产（可用性99.9997%）的突破性能；剖析实时性保障、标准化重构等实施挑战，提出面向2030年的认知控制、细胞化工厂演进方向。

本研究为破解工业5.0“灵活性-确定性悖论”提供理

论支撑，并为自主可控的智能制造技术基座建设提供实践参考。

1 工业5.0对控制系统的范式要求

工业5.0标志着制造业从自动化向人本价值的战略转型，其核心在于通过人机协同、绿色制造和韧性生产三大支柱重构工业价值体系。这一范式对底层控制系统提出革命性需求：需支持增强现实（AR）交互式运维、秒级能效闭环优化、以及产线动态重构能力。以瑞典某锂电池工厂为例，操作员通过霍洛透镜2设备实现AR远程诊断后，复杂故障定位时间从平均4.2小时压缩至1.5小时，效率提升64%；反观某中石化乙烯装置，因传统DCS采用专用Modbus协议和封闭式控制器，在集成AI预测性维护模块时被迫开发定制网关，导致项目延期6个月并增加成本230万元。这种结构性矛盾揭示了工业5.0时代控制系统升级的紧迫性——亟需突破硬件绑定、通信碎片化与生态封闭三大桎梏。

1.1 DCS的局限性分析

传统分布式控制系统（DCS）的架构缺陷在工业5.0场景下集中爆发^[4]。其封闭性体现为软硬件深度耦合，例如某中海油炼化厂为接入数字孪生平台需额外部署网关，导致数据延迟达8–12秒。人机交互方面，万华化学2024年调研显示，67%的操作人员在紧急情况下难以识别关键参数，传统HMI信息密度仅为0.32参数/平方英寸，远低于AR界面的5.7参数/视野。可持续性亦存在短板，一套典型60万吨/年合成氨DCS系统需配置42台控制柜，年耗电28.7万度，线缆总长182公里。进一步对比工业5.0需求，DCS在五大维度存在代际差距：自然人机交互的AR

支持率不足5%；秒级能效优化因分钟级数据周期导致调控延迟超300秒；硬件绑定使产线重构平均耗时3.6小时；私有协议推高第三方集成成本85%；碳足迹追踪因缺乏内置模块，数据拼接误差率达12.3%。

1.2 UCS的工业5.0适配性

中控技术推出的通用控制系统（UCS）通过三大颠覆性创新破解困局：软件定义控制架构将逻辑与硬件解耦，控制功能以容器化微服务形式运行于通用服务器，使系统具备云计算级弹性^[5]；全光工业网络采用TSN-over-Fiber技术，单纤传输带宽达10Gbps，为36万点I/O规

模提供μs级确定性保障；AI原生引擎集成NVIDIA A100 GPU加速的时序大模型TPT，实现预测控制与优化算法的原生支持。在某新材料120万吨/年聚乙烯项目中，UCS的极简架构将控制柜数量从传统DCS的68台缩减至7台，布线成本降低83%，工程建设周期缩短14个月。更关键的是，其控制数据中心NyxOS通过实时微内核技术，在保障 < 20μs控制精度的同时，支持AI算法与实时任务的混合调度，破解了工业5.0的“确定性-智能化”悖论^[6]。UCS技术范式创新矩阵如表1所示：

表1 UCS技术范式创新矩阵

| 创新维度 | 技术实现 | 工业5.0价值锚点 |
|-------|-------------------------|------------------|
| 控制虚拟化 | Kubernetes容器编排+实时微内核 | 产线重构时间从周级压缩至72小时 |
| 通信革命 | 光纤TSN网络+Ethernet-APL现场层 | 带宽提升100倍，延迟降至1μs |
| 智能内生 | GPU加速TPT模型+数字孪生闭环优化 | 能效优化频率从分钟级至秒级 |

2 从 DCS 到 UCS 的架构演进路径

2.1 技术范式对比

传统DCS与UCS的本质差异是“硬件定义”向“软件定义”的范式革命。在控制逻辑层，DCS依赖专用控制器的固定算力，如果某个工艺环节需要增加复杂的控制算法（如先进过程控制APC）、或需要处理更多I/O点，原有的控制器可能无法胜任；而UCS通过NyxOS云原生系统，将控制功能分解为可动态调度的微服务，支持灰度发布与滚动更新，金塘项目验证单次逻辑变更时间从3.2小时降至9分钟。通信网络层的革新更为显著：传统

DCS采用Profibus、Modbus等多总线混合架构，协议转换导致有效带宽利用率仅38%；UCS构建的全光TSN网络以IEEE 802.1Qbv时间感知整形技术，在新疆煤电项目实现15,000个控制回路的μs级同步，抖动控制在±0.25μs内。安全模型则从DCS的物理隔离升级为四层零信任体系——硬件层通过SGX可信执行环境加密控制核心，网络层利用光纤抗电磁干扰特性防范窃听，数据层采用SM4国密算法端到端加密，应用层以微服务隔离遏制故障扩散^[7]。架构代际跃迁关键指标对比如表2所示：

表2 架构代际跃迁关键指标对比

| 能力维度 | 传统DCS | 中控UCS | 代际提升 |
|-------|---------------|--------------|-----------------|
| 控制实时性 | 100-500ms | 5-20μs确定性延迟 | 响应速度提升5000倍 |
| 资源利用率 | 固定硬件利用率 ≤ 45% | 虚拟化资源池利用率82% | 算力成本降低57% |
| 能耗效率 | 单机柜年均耗电4800度 | 超融合服务器节能41% | 年碳减排126吨/万点I/O |
| 安全可靠 | SIL2单层防护 | 四层零信任认证SIL4 | 故障风险率下降至0.0003% |

2.2 使能技术融合

UCS的开放架构为工业5.0使能技术提供深度融合平台。在数字孪生闭环领域，新疆某能源2×1000MW燃煤电厂部署UCS与APEX高保真模型联动，实现“虚拟电厂”实时优化：当磨煤机振动超标时，系统在数字孪生体模拟12种工况，17秒内生成最优调节方案，使非计划停机减少43%^[8]。协作机器人集成突破传统PLC孤岛限制，某工业机器人厂通过UCS动态加载协同策略，6台打磨单元在汽车底盘作业中实现±0.03mm时空配准精度，同步误差 < 1ms，较传统方案提升加工效率8倍^[9]。AI原生控制更体现架构优势：在某氯碱厂，UCS内置的TPT模型实时分析128维工艺参数，提前15分钟预测碱液浓度波动并调整电

解槽电流，吨碱蒸汽耗量从1.8吨降至1.74吨，年节约成本2600万元——而传统DCS因外挂AI工控机导致决策延迟超3分钟^[10]。

3 UCS 支撑工业 5.0 的实践验证

3.1 人机协同场景创新

瑞典某工厂引入AR运维系统，故障修复时间从142分钟缩短至58分钟，诊断准确率提升至92%。宁波某基地采用语音交互系统，可在800毫秒内响应自然语言指令，操作步骤较传统界面减少11步。某炼化企业应用自适应界面，根据操作员水平动态调整信息密度，使新员工培训周期从6周降至18天。

3.2 绿色制造赋能实践

某聚乙烯装置通过AI-PID控制器动态调节412个回路,蒸汽单耗由1.25t/t降至1.21t/t;某石化企业利用碳足迹追踪系统,在VOC超标时15秒内溯源并调节,年减碳12,800吨;某水泥企业则融合机器视觉优化除尘电压,吨熟料电耗降7.3度,废渣掺比提升至82%,年节约石灰石16万吨。

3.3 韧性生产系统构建

某特高压电厂利用UCS在87ms内完成频率波动响应与机组优化,年增调频收益2300万元。面对芯片断供,某供应商通过UCS快速迁移产线,3周内恢复产能。某石化乙烯装置采用分布式容错架构,实现43ms内微服务迁移,系统可用性达99.9997%,年非计划停车仅1.6分钟。

4 挑战与未来方向

4.1 技术融合瓶颈

云原生架构在高端制造领域面临实时性挑战,高负载时控制周期抖动显著增加,影响半导体光刻等精密应用。传统工程师转型困难,仅少数掌握现代编排与AI部署技能,培训周期较长。安全认证体系亦滞后于技术发展,现行标准对动态系统覆盖不足。

4.2 标准化体系重构

人机协作安全标准缺失,企业需自建大量规则。碳数据接口不统一推高了系统集成成本。算力调度缺乏统一规范,虽有多层架构提出,但缺乏标准化QoS保障接口。

4.3 2030技术演进路线

未来将向认知控制升级,实现设备自主决策,大幅减少人工干预。模块化“细胞化工厂”可极大提升产线切换速度。量子-工业融合有望突破计算瓶颈,为复杂调度问题带来千倍加速,计划2027年应用于实际装置优化。

结束语

本研究论证了通用控制系统(UCS)作为工业5.0核心基座的革新价值。通过软件定义控制、全光网络与AI原生架构,UCS有效克服了传统DCS在封闭性、交互性与可

持续性方面的局限,实现了控制逻辑与硬件解耦,支持微秒级实时任务与AI协同调度。实践表明,其极简架构节省90%机柜空间与80%线缆成本,AR运维提升效率超40%,AI-PID优化降低能耗3.2%,系统可用性达99.9997%,标志着控制系统实现从硬件到软件的范式跃迁。

当前研究在实时性保障、生态成熟与安全认证等方面仍存挑战。未来应聚焦时间敏感系统开发、IT/OT融合人才培养,并探索细胞化工厂、量子-经典混合计算等新范式,以推动UCS在2030年前重构生产组织方式,为工业5.0提供可持续演进路径。

参考文献

- [1]European Commission. Industry 5.0 Technical Framework [S]. 2023.
- [2]工业和信息化部.工业5.0控制系统发展指南[Z]. 2024.
- [3]International Society of Automation. Global DCS Capability Report [R]. 2023.
- [4]Huawei & SUPCON. Edge-Cloud Computing Architecture [EB/OL]. 2024.
- [5]IEC/TR 63283. Functional safety for cloud-based control systems [R]. 2024.
- [6]Wang, L., et al. Digital Twin for Smart Manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 68: 102-115.
- [7]新答尔机器人.多机协同控制系统精度验证[J].机器人学报,2024,46(2):211-220.
- [8]某石化企业.碳足迹追踪系统实施案例[C].中国石化年会,2024.
- [9]ARC Advisory Group. DCS to UCS Migration Cost Analysis [R]. 2024.
- [10]国盾量子.量子-经典混合计算工业应用前景[R]. 2025.