

电气自动化在精细化工中的应用： DCS 系统控制技术的创新实践

吴师威

广州白云科技股份有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025040003

摘 要：介绍了 DCS 系统架构、功能等，阐述其在精细化工的应用及挑战，如反应釜控制、分离装置联锁等。探讨了 MPC、神经网络前馈补偿等创新技术，还涉及企业案例中的异构设备接入等。强调了技术经济性及跨领域推广，展望了未来发展。

关 键 词：DCS 系统；精细化工；自动化控制

The Application of Electrical Automation in Fine Chemicals: Innovative Practice of DCS System Control Technology

Wu Shiwei

Guangzhou Baiyun Technology Co., LTD, Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： The architecture and functions of the DCS system are introduced, and its application and challenges in fine chemicals are expounded, such as reactor control and interlocking of separation devices. Innovative technologies such as MPC and neural network feedforward compensation were discussed, and the access of heterogeneous devices in enterprise cases was also involved. The technical economy and cross-field promotion were emphasized, and the future development was prospected.

Keywords： DCS system; fine chemical industry; automatic control

引言

精细化工生产具有间歇式生产、多变量耦合等特点，对自动化系统要求极高。近年来，随着我国《中国制造 2025》（2015 年颁布）等政策的推动，制造业向智能化、自动化方向发展。在此背景下，电气自动化在精细化工中的应用备受关注。DCS 系统作为一种先进控制系统，在精细化工生产中应用广泛，其体系架构、硬件组成及核心功能模块都对精细化工生产过程的控制起到关键作用。同时，面对精细化工复杂生产情况带来的挑战，DCS 系统不断创新，如采用多变量模型预测控制、神经网络前馈补偿机制等技术，推动精细化工行业朝着更高效、更智能的方向发展。

一、DCS 系统控制技术概述

（一）DCS 系统概念与关键技术

分散控制系统（DCS）是一种综合了计算机技术、控制技术、通信技术和显示技术的先进控制系统。其体系架构通常采用分层分布式结构，包括现场控制层、过程控制层和操作管理层。硬件组成涵盖控制器、输入输出模块、操作站、工程师站等。核心功能模块有控制算法模块、数据采集与处理模块等。

冗余容错技术是 DCS 系统的重要特性之一，通过硬件冗余和软件算法，确保系统在部分组件故障时仍能正常运行^[1]。实时数据库技术能够快速存储和检索大量实时数据，满足系统对数据处理

的及时性要求。通信网络技术则保障了系统各组件之间的高效、稳定通信，确保数据的准确传输。

（二）精细化工生产特点与自动化需求

精细化工生产具有间歇式生产、多变量耦合等特点。间歇式生产要求自动化系统能灵活适应不同生产阶段的参数变化，实现精准控制^[2]。多变量耦合意味着多个工艺变量相互影响，如温度、压力、流量等，需要自动化系统能够综合考虑这些变量的关系进行协调控制。在精密温控方面，某些精细化工产品的生产对温度的精度要求极高，自动化系统需具备高精度的温度控制能力。对于批量追踪，由于精细化工产品往往具有批次性，需要自动化系统能够准确记录和追溯每一批次产品的生产过程信息，包括原料

来源、生产时间、工艺参数等，以确保产品质量和安全性。

二、DCS 在精细化工应用现状分析

（一）典型应用场景及技术路线

在精细化工中，DCS 系统在反应釜控制方面有重要应用。通过对反应釜温度、压力、物料流量等关键参数的实时监测与精确控制，确保反应过程的稳定性和安全性^[3]。例如，采用先进的传感器技术获取准确数据，结合 DCS 的强大运算能力实现精准调控。在分离装置联锁应用中，DCS 系统能够根据不同的分离工艺要求，对相关设备进行联锁控制。如在精馏过程中，严格控制温度、压力和液位等参数，确保产品质量。同时，综合运用传统 PID 控制的稳定性和先进控制策略的高效性，形成组合方案。PID 控制用于基础的稳定调节，先进控制策略则针对复杂工况进行优化，提高整个系统的控制性能。

（二）复杂反应控制的技术瓶颈

在精细化工中，多元物料混合以及非线性动态响应等复杂情况给 DCS 系统带来诸多挑战。现有系统在自适应调节方面存在明显局限，难以根据物料混合比例的实时变化以及反应过程中的非线性动态特征迅速做出精准调整^[4]。在参数优化上，由于精细化工反应的复杂性，系统无法全面考虑各种因素对反应的影响，导致参数设置往往不能达到最佳状态。例如，在某些涉及多种催化剂和反应物的反应中，DCS 系统可能无法准确识别不同物料之间的相互作用对反应速率和产物质量的影响，从而无法对相关参数进行有效优化。这不仅影响生产效率，还可能导致产品质量不稳定。

三、DCS 控制技术创新路径

（一）过程控制算法优化

1. 多变量模型预测控制（MPC）

多变量模型预测控制（MPC）在 DCS 控制技术创新路径中具有重要地位。它基于构建的精细化工反应动力学模型，通过设计滚动时域优化算法来实现多目标协同控制。MPC 能够考虑多个变量之间的相互关系以及系统的动态特性，对未来的过程行为进行预测，并根据预测结果进行优化控制决策。这种控制策略可以有效应对精细化工过程中的复杂动态变化和多元目标优化需求，提高生产过程的稳定性和产品质量。通过不断优化算法和模型参数，MPC 能够更好地适应不同的工况和生产要求，为精细化工的自动化生产提供更高效、精确的控制手段^[5]。

2. 动态补偿解耦策略

开发基于神经网络的前馈补偿机制，以应对精细化工工艺流程中的强耦合干扰问题。神经网络具有强大的非线性映射能力，能够学习和逼近复杂的系统动态特性。通过构建合适的神经网络结构，将工艺过程中的相关变量作为输入，经过神经网络的训练和学习，输出相应的前馈补偿信号。这种前馈补偿机制可以在干扰发生之前就对系统进行调整，有效地减少耦合干扰对系统控制

性能的影响。例如，在某些精细化工反应过程中，温度、压力和流量等变量之间存在着复杂的耦合关系，采用基于神经网络的前馈补偿机制，可以实时监测这些变量的变化，并及时提供补偿信号，提高系统的稳定性和控制精度^[6]。

（二）智能系统集成创新

1. 数字孪生技术融合

搭建虚实映射的数字化产线模型是数字孪生技术融合的关键。通过精确的建模技术，将精细化工生产中的物理设备、工艺流程等在虚拟环境中进行重现，构建出与实际产线高度吻合的数字化模型。在此基础上，实现控制系统与物理设备的实时交互验证。利用虚拟模型对 DCS 控制系统的策略、算法进行测试和优化，提前发现潜在问题并进行调整。同时，物理设备的运行数据实时反馈至虚拟模型，使其不断更新和完善，形成一个闭环的优化系统，从而提高精细化工生产过程的控制精度和效率，提升整体生产质量和安全性^[7]。

2. 边缘计算部署方案

设计分布式边缘控制器架构，将计算和数据存储推向网络边缘，靠近数据源和用户。这种架构能够显著减少数据传输延迟，提高系统的实时性和响应速度。通过本地化数据处理，避免了大量数据传输至云端或中心服务器进行处理所带来的网络拥塞和延迟问题。例如，在精细化工生产过程中，现场传感器产生的大量实时数据可在边缘控制器进行即时处理和分析，快速反馈控制指令，确保生产过程的稳定性和安全性。同时，分布式边缘控制器架构还增强了系统的可靠性和容错能力，即使部分节点出现故障，其他节点仍能继续工作，维持系统的正常运行^[8]。

四、创新应用实践验证

（一）某精细化学品企业案例研究

1. 工艺装置改造方案

在该精细化学品企业案例中，异构设备接入是关键技术之一。其涉及到不同品牌、不同型号设备的兼容性问题。通过特定接口和适配模块，实现设备的有效连接，确保数据的稳定传输^[9]。同时，OPC UA 协议转换也至关重要。该企业采用先进的转换技术，将不同协议的设备数据统一转换为 OPC UA 协议，实现了数据的标准化和规范化。这不仅提高了系统的集成度，还方便了数据的管理和分析。在系统集成过程中，严格把控关键技术参数，确保设备接入的准确性和协议转换的高效性，从而提升了整个工艺装置的自动化水平和生产效率。

2. 控制逻辑重构设计

在某精细化学品企业案例中，DCS 系统控制技术的创新应用涉及到图解顺序控制 SFC 与连续控制 CFC 的复合编程架构及联调测试流程。首先构建复合编程架构，将 SFC 的顺序逻辑与 CFC 的连续控制功能有机结合，以满足精细化工生产过程中复杂的控制需求。例如，在反应釜的温度和压力控制中，利用 SFC 确保加料、反应、出料等操作按顺序进行，同时通过 CFC 精确调节温度和压力值。在联调测试流程方面，需对整个复合控制逻辑进行全

面测试，包括模拟各种工况条件，检查控制逻辑的准确性和稳定性，确保系统在实际生产中能够可靠运行^[10]。

（二）系统运行效能分析

1. 关键指标对比实验

针对电气自动化在精细化工中应用的 DCS 系统控制技术，开展核心指标的三维度对照实验。在批次稳定性维度，设置不同的控制参数组，对比各批次产品质量的波动情况，观察 DCS 系统对生产过程稳定性的影响。对于能耗节约率维度，记录不同工况下的能耗数据，分析 DCS 系统在优化能源利用方面的表现。通过这些关键指标的对比实验，全面评估 DCS 系统的运行效能。实验结果将为进一步优化系统提供数据支撑，也为电气自动化在精细化工领域的应用提供更具说服力的实践依据。

2. 可靠性验证方法

采用故障树分析法（FTA）评估系统 MTBF 值，以确定系统的平均无故障时间。通过对系统可能出现的故障模式进行分析，构建故障树模型，从而计算出系统的可靠性指标。同时，展示冗余切换成功率等关键数据，以验证系统在部分组件故障时的切换能力。冗余切换成功率的高低直接影响系统的连续运行能力，高成功率意味着系统在面临故障时能够迅速切换到备用组件，保证生产过程的连续性。这些可靠性验证方法为系统的稳定运行提供了有力支持，确保电气自动化在精细化工中的应用能够满足生产需求，提高生产效率和质量。

（三）行业推广价值探讨

1. 技术经济性评估模型

建立全生命周期成本分析框架，对于评估电气自动化在精细化工中应用的技术经济性至关重要。需考虑从设备采购、安装调试、运行维护到最终报废的各个阶段成本。通过准确量化投资回收期与边际效益关系，可直观了解应用该技术的经济可行性。投

资回收期越短，边际效益越高，则应用价值越大。同时，要结合精细化工行业特点，考虑生产规模、产品质量提升、能源消耗降低等因素对成本和效益的影响。这样才能全面、准确地评估 DCS 系统控制技术在精细化工中的技术经济性，为行业推广提供有力依据。

2. 跨领域应用延伸路径

电气自动化中 DCS 系统控制技术在精细化工的创新应用，为其跨领域推广提供了基础。在制药行业，其对生产环境和流程控制的严格要求与精细化工有相似之处。DCS 系统的高精度控制策略可确保药品生产过程中温度、压力、流量等关键参数的精准调控，保障药品质量的稳定性。对于特种材料行业，同样需要精确的生产条件控制。DCS 系统能够根据不同材料的生产工艺要求，灵活调整控制参数，实现对生产过程的优化。通过对这些相似行业生产特点和需求的分析，结合 DCS 系统已有的技术优势，可以制定出切实可行的控制策略移植方案，从而实现电气自动化技术在更多领域的应用和推广。

五、总结

电气自动化在精细化工中的应用是一个不断发展的领域。DCS 系统控制技术的创新实践在精细化工生产中具有核心贡献。通过对该技术的应用，生产过程的控制更加精准和高效，提升了生产效能。智能控制算法与系统集成的协同优化是关键，这种协同不仅提高了系统的稳定性和可靠性，还优化了生产流程，降低了生产成本。在 5G+ 工业互联网的背景下，控制系统将朝着更智能、更高效、更集成的方向演进。未来，有望实现设备之间的无缝连接和实时数据交互，进一步提高精细化工生产的自动化水平和质量控制能力，为精细化工行业的发展提供更强大的技术支持。