基于化工设备自动化控制的制药工艺优化策略研究

王志霞　吴彤珊

河南医药健康技师学院

摘要：本文深入探讨了自动化控制技术在现代制药工艺中的应用与优化策略。通过对化工设备自动化控制技术的系统性梳理，揭示了它在提升生产效率、保证产品质量和降低能耗等方面的关键作用。在此基础上，构建了制药工艺优化的框架，并结合工艺特点，提出了以数据驱动的智能控制、设备状态预测维护和工艺参数优化为核心的综合优化策略。通过实例分析，验证了这些策略在实际生产中的有效性和可行性，为制药行业实现智能化、绿色化发展提供了坚实的理论支撑和实践指导。

关键词：化工设备；自动化控制；制药工艺；优化策略；数据驱动；模型预测控制

在当今全球化竞争激烈的市场环境中，制药行业对人类健康发挥着至关重要的作用。然而，制药企业面临着严格的法规要求、不断提高的生产标准以及日益增长的药品需求等多重挑战。尽管我国化工制药行业起步较晚，但在科技进步和政策扶持的推动下，已实现了快速成长。然而，与国际先进水平相比，我国在制药工艺的自动化和智能化方面仍有待提高。随着市场对药品质量和安全性要求的日益提高，以及环保压力的不断加剧，行业亟需进行技术革新。在此背景下，自动化控制技术的应用成为推动制药工艺优化的重要手段[1]。

自动化技术的进步，如在线显微镜、小波分析图像处理、三维过程成像、超声在线检测等，为制药工艺提供了精确的实时监控和分析能力，使得生产过程中的参数调整更加精准，有效减少了人为误差，提高了产品质量的稳定性。同时，自动化生产线的引入，如自动输送带、机器人分装系统和自动化洁净室控制系统等，显著提高了生产效率，降低了运行成本，使企业能够快速响应市场变化和满足个性化需求。

工艺优化与自动化技术的协同作用日益显著。通过优化生产流程，简化不必要的步骤，例如采用连续生产替代批处理，并引入机器人和计算机控制系统，可以提高生产效率，降低生产成本。此外，原材料的优化选择，即选用性能更优、成本更低的成分，并确保它在存储和使用过程中的质量，也有助于提高药品的生物利用度和稳定性，从而增强企业的竞争力。

1　化工设备自动化控制技术

1.1　化工设备自动化控制技术发展概述

随着科技的不断进步，化工设备自动化控制技术在制药领域的应用经历了从无到有、从简单到复杂、从局部到全局的演变过程。早期的自动化控制主要依赖于传感器、继电器和控制器的简单组合，以实现对生产过程的基本监控和手动调节。然而，这种模式无法满足现代制药工艺对精准和实时控制的高要求[2]。

进入 21 世纪，随着计算机技术、通信技术以及人工智能技术的快速发展，化工设备自动化控制技术也迈入了新的发展阶段。PLC（可编程逻辑控制器）和 DCS（分布式控制系统）等计算机控制系统的应用，实现了生产过程的数字化管理，能够处理更复杂的控制逻辑，提高了生产效率。同时，现场总线技术如 Profibus、Modbus 和 EtherCAT 的引入，使得设备之间的数据交换更加高效，为制药生产的集成化和网络化奠定了基础。

随着网络技术的不断进步，SCADA（监控与数据采集）系统在制药行业得到了广泛应用。该系统整合了数据采集、监控和报警功能，使生产管理人员能够实时了解生产流程的状态，从而做出及时有效的决策。此外，工业以太网如 Ethernet/IP 和 PROFINET 的发展，推动了工厂自动化网络的构建，实现了设备间的无缝连接，进一步提升了生产系统的整体性能。

近年来，物联网（IoT）、云计算和大数据技术的兴起，为化工设备自动化控制技术注入了新的活力。智能传感器

和执行器的应用，如无线传感器网络，不仅简化了数据采集过程，降低了布线成本，还提高了系统的可扩展性。云平台的引入，使得数据的存储、分析和共享变得更加便捷，通过实时分析大量生产数据，可以实现故障预测、性能优化和决策支持等功能。

同时，机器学习和人工智能技术在化工设备自动化控制中的应用也日益广泛。例如，通过深度学习算法可以对生产过程中的复杂行为进行模型拟合，预测可能的故障，实现设备状态的智能预测维护。数据驱动的智能控制策略，如模型预测控制（MPC）和模糊逻辑控制，能够依据实时数据动态调整生产参数，从而提高生产效率和产品质量的稳定性。

1.2 自动化控制在制药工艺中的应用

自动化控制技术在制药工艺中的应用已经深入到各个环节，显著提升了制药生产的效率和质量。在原料处理阶段，自动化输送带、精确的称重和高效的混合设备确保了原料的精准称量和均匀混合，有效减少了批次间的差异，进而优化了药物的生物利用度。同时，通过计算机控制的环境监测系统，可以实现对温度、湿度和洁净度的精准调控，保证原料在适宜的条件下进行处理，以原料药的生产工艺为例，具体可参照图 1。

在制剂生产环节，自动化机器人分装系统替代了传统的人工操作，有效规避了人为因素引起的污染风险，显著提高了生产的一致性和准确性。此外，自动化的灌装、封口和包装设备不仅大大提升了包装速度，还通过视觉检测系统实现了药品外观的自动检查，确保了产品质量。

在生产过程的监控和控制方面，工业物联网技术的应用使得设备状态和生产数据可以实时上传至云端平台。通过大数据分析，系统能够及时发现生产异常，进行故障预警，并预测设备维护需求，实现了设备状态的智能预测性维护[3]。同时，数据驱动的智能控制策略，如模型预测控制，能够基于实时生产数据动态调整温度、压力、搅拌速度等关键工艺参数，保证工艺的稳定性，避免了人工调整可能产生的误差。

在质量控制环节，自动化视觉检测和在线分析仪器的应用，如高精度的色谱仪和光谱仪，能够实时监测药品的成分和纯度，确保产品符合质量标准。此外，通过与生产数据的集成，系统可以追踪每一批次产品的质量参数，实现全程质量追溯，进一步提高了质量管理水平。

在能源和资源管理方面，自动化控制系统能够优化生产计划、调度设备运行，减少能源浪费。例如，通过预测模型调整生产负荷，合理分配能源资源，降低了运行成本。同时，自动化的物料管理和废弃物处理系统也有助于减少原材料损耗和环境污染，推动绿色生产。

随着工业 4.0 和 Industry 5.0 理念的深入发展，未来的自动化控制将更加注重自主学习和智能决策。通过深度学习技术，设备可以学习并适应生产环境的细微变化，自动调整控制策略，使制药工艺更加精细、智能，进一步降低生产成本，提高产品质量。

自动化控制技术在制药工艺中的应用广泛而深入，从原料处理到制剂生产，再到质量控制和资源管理，每一环节的自动化都为提升制药行业的竞争力做出了重要贡献。随着技术的不断进步，自动化控制将在制药工艺的优化中发挥越来越关键的作用，推动行业向更高层次的智能化和绿色化发展迈进。

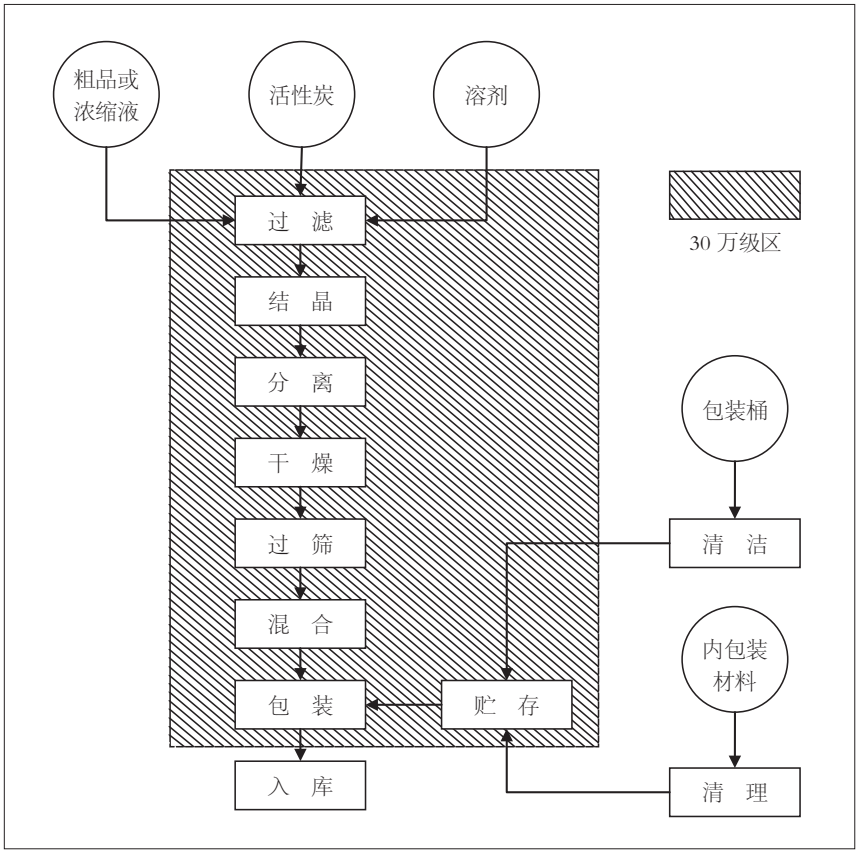


图 1　原料药工艺流程图

2　制药工艺优化策略

2.1　基于数据驱动的工艺优化

制药工艺的持续优化和改进是提升药品质量和生产效率的关键。在这一

过程中，数据驱动的策略发挥着至关重要的作用。数据驱动的优化方法依托先进的信息技术和统计分析手段，深入挖掘海量生产数据中的潜在模式和趋势，为决策过程提供强有力的数据支撑，进而实现工艺参数的精准优化和生产过程的精细化管理。

实时在线数据采集是数据驱动优化的基础。通过在生产线关键部位安装智能传感器，可以实时监控诸如温度、压力、湿度、搅拌速度等核心参数，确保整个生产过程严格控制在预设的工艺范围内。这些数据驱动的工艺优化方式，为后续分析提供了丰富的信息源，显著增强了生产过程的透明度和可控性。有关数据驱动的过程优化，可以参见图 2。

大数据分析技术在优化工艺参数方面发挥了重要作用。通过应用机器学习算法，企业能够深入学习和分析历史和实时数据，构建出精准的模型，预测在特定条件下工艺参数的最佳组合。例如，模型预测控制（MPC）技术能够基于当前的生产状态以及对未来趋势的预测，动态地调整生产参数，从而实现对生产过程的实时优化，提高产品质量的一致性和稳定性。

数据驱动的工艺优化还体现在设备状态的预测维护上。通过持续监测设备运行数据，并结合设备的历史信息和故障模式识别技术，企业可以预测设备的健康状态，并及时进行预防性维护，有效降低因设备故障导致的停机损失，确保生产线持续高效运行。这种方法既节省了维护成本，又避免了因设备故障导致的生产中断，对提高生产效率至关重要。

此外，数据驱动优化在原材料使用和能源管理上也开辟了新的优化路径。通过对原材料消耗和能源使用数据的分析，企业可以识别出潜在的浪费点，进而优化采购策略，选用性价比更高、质量更优的原材料 [4]。同时，通过对能源消耗模式的研究，企业可以优化生产计划，降低不必要的能源消耗，实现绿色制造的目标。

举例来说，通过分析制药过程中不同批次产品的生产数据，企业能够发现对产品质量影响显著的操作步骤，并通过调整这些步骤的参数，显著提升产品的纯度和生物利用度。另外，通过分析设备运行数据，企业还能发现在特定时间段内能耗较高的设备，通过调整其运行时间或优化生产调度，有效降低整体能源消耗。

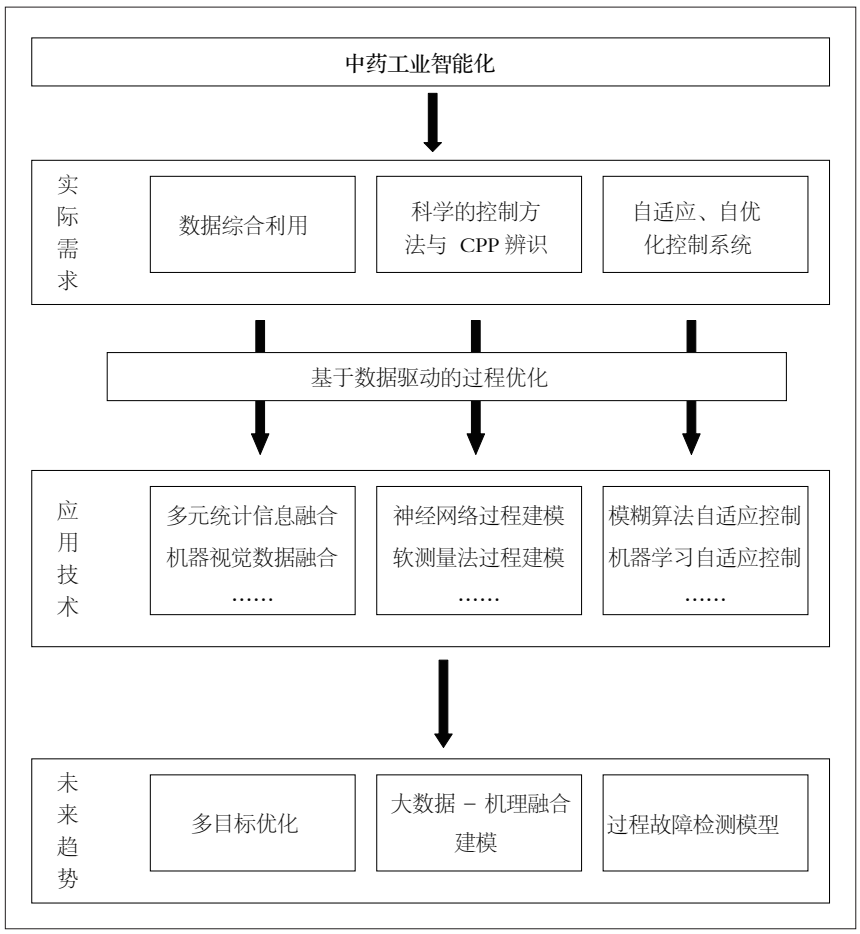


图 2　基于数据驱动的过程优化

2.2　基于模型预测控制的工艺优化

在制药工艺优化过程中，模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）作为一种先进的控制策略，逐渐成为提升生产效率和产品质量的有力工具。这是因为 MPC 能够综合考虑系统的动态特性、约束条件以及未来的预测信息，如图 3 所示。MPC 基于对系统数学模型的拟合，通过预测未来的工艺状态来优化控制策略，进而实现对当前及未来的控制，确保在多变的环境中，工艺过程始终处于最优状态。

模型预测控制（MPC）的核心在于构建一个精确的工艺过程模型。对于制药工艺而言，这通常涉及对复杂的化学反应、物理传输及混合过程进行细致的数学描述。通过实验数据和理论分析，研究人员能够建立起包括多个变量（如反应速率、物料浓度、温度和压力等）的动态模型 [5]。这些模型能够捕捉到生产过程中各参数之间复杂的相互作用关系，为后续的预测和控制提供有力的依据。

在 MPC 框架下，控制器会持续对未来一段时间内的工艺状态进行预测，并基于这些预测结果来优化控制策略。这一过程通常包括三步：首先，根据当

记录双碳背景下工业企业的变革之路

碳索 Carbon Neutrality

用视频讲好工业故事

清洁能源转型 •低碳工艺与负排放 •节能增效技术 •碳排放管理 •风光氢储一体化发展 •生态保护与循环经济

制药业立体交互传播平台

PharmaTEC 制药业

杂志 网站 微信 抖音 小程序 视频号 B 站 E-newsletter

强盛中国制药业

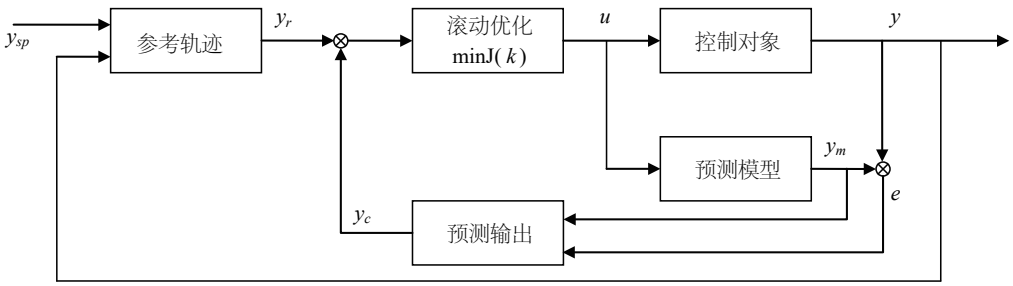
PharmaTEC 制药业以满足制药行业全产业链的需求为出发点，分享全球制药行业最新政策法规、工程、开发、制造、供应链和质量管理等方面的创新理念、技术趋势、先进案例，赋能中国制药人，推进本土制药行业整体水平提升以及跨国际交流。 PharmaTEC 制药业通过丰富的纸质及数字媒体、会议与活动、客户定制化服务等为特定目标群体提供有效的信息交流平台，并为供应商与用户提供多渠道的交互平台。

PharmaTEC 制药业

微信订阅号

微信视频号

广告



图中，ysp 代表系统的设定输出，yr 表示参考轨迹，u 为输入，y 为实际输出值，ym 为模型输出，yc 为预测输出。

图 3　经典 MPC 的控制流程

前的工艺数据和系统模型，对未来几个时间步的工艺状态进行预测；其次，基于预测结果和预设的优化目标（如最大化产量、最小化能耗或保证产品质量等），利用优化算法来寻找最优的控制变量序列；最后，控制器仅执行当前时间步的最优控制变量，并重复上述过程，以实现控制策略的滚动优化。

MPC 在制药工艺中的应用主要体现在以下几个方面：

• 动态调节参数：通过实时调整关键工艺参数，如反应温度、搅拌速度和进料速率，MPC 能够快速响应生产过程中的变化，避免过冲和振荡，从而提高产品质量的稳定性；

• 约束满足：在工艺过程中，往往存在操作限制，如设备能力、安全范围等。MPC 能够确保在满足这些约束条件下，实现最优控制，有效避免潜在的生产事故；

• 预测与预防：MPC 能对系统未来的行为进行预测，并提前调整控制策略，从而预防可能出现的异常情况（如设备故障或产品质量下降等），实现设备状态的智能预测与维护；

• 适应性：通过学习和适应工艺过程的变化，MPC 能够自适应地调整控制策略，确保在不断变化的生产环境中始终维持最优的控制效果；

• 在实际应用中，制药企业通过结合历史数据、实时传感器信息以及工艺模型，利用高性能计算平台来执行 MPC 算法。例如，通过 MPC 技术，制药厂可以确保在原料成分变化、生产设备老化或工艺参数调整等情况下，确保工艺过程依然稳定运行，从而提升整体生产效率。

通过实施模型预测控制（MPC），制药企业能够实现更为精准、灵活的工艺控制。与传统的定值控制或 PID 控制相比，MPC 在复杂系统中展现出了更强的适应性和优化能力，有助于推动制药工艺的持续改进和升级。随着自动化技术的不断发展和计算能力的提升，MPC 将在制药行业的生产优化中发挥更为关键的作用，引领行业向更高水平的智能化迈进。

3　结论

本文深入分析了化工设备自动化控制技术在现代制药工艺中的应用与优化路径，明确指出了这些技术在提升生产效率、保证产品质量以及降低能耗等方面的关键作用。针对制药工艺的特点，本文构建了一个优化框架，该框架以数据驱动的智能控制、设备状态的预测性维护和工艺参数的优化为主要策略。通过实例分析，企业充分验证了这些策略的有效性和可行性，为制药行业的智能化转型和绿色化发展提供了坚实的理论依据和实践指导。

展望未来，研究将聚焦于更深层次的自主学习与智能决策。随着人工智能技术的深入发展，尤其是深度强化学习和自适应控制算法的日益成熟，自动化设备将能更深入地理解并适应复杂的生产环境，实现更为精准和灵活的控制。同时，大数据分析和云计算技术的蓬勃发展，将为实时处理和分析海量的生产数据提供更强大的计算能力，从而进一步提升优化决策的精准度。此外，通过采用集成式和模块化的自动化系统设计，制药企业将能够更迅速地响应市场变化，满足个性化需求，实现生产过程的高度定制化和柔性化[6]。

参考文献：

[1] 孙吉水，金宗杰，吕健．自动化在化工工艺控制中的应用与优化 [J]. 化工管理，2024(16):156-158.

[2] 唐伯元．冶金机械中转炉机械的自动化控制系统优化研究 [J]. 中国金属通报，2024(10):110-112.

[3] 郑永杰，刘旭东，周桐，等．机器人与自动化技术在工艺智能化升级中的优化策略研究 [J]. 制造业自动化，2023，45(10):216-220.

[4] 卞学吉．化工设备管道振动成因及消减技术研究 [J]. 石化技术，2024，31(5):184-185，206.

[5] 朱和虎．基于数控等离子切割技术的自动化下料优化方法研究 [J/OL]. 中文科技期刊数据库（全文版）工程技术．

[6] 王媛媛．电气自动化技术在现代智能建筑中的应用研究 [J]. 工程与建设，2024，38(3):641-643.