

DOI: 10.16305/j.1007-1334.2025.z20240929002

中药智能制造的变革: 动态矩阵控制在中药制药过程控制中的应用策略与案例分析

程宇康^{1,2,3}, 于洋^{1,2,3*}, 张发星^{1,2,3}, 苗坤宏^{1,2,3}, 薛启隆^{1,2,3}, 潘勤⁴, 李正^{1,2,3}

1. 天津中医药大学中药制药工程学院(天津 301617); 2. 省部共建组分中药国家重点实验室(天津 301617);
3. 天津市中药绿色制药与智能制药重点实验室(天津 301617); 4. 津药达仁堂集团股份有限公司(天津 300193)

【摘要】 随着大数据和人工智能的迅速发展, 智能化已成为中药制药行业的重要发展趋势。受中药制药过程复杂性的制约, 其建模、实时检测和控制等方面仍处于“灰箱状态”。模型预测控制能够预测计算、实时优化, 可以有效应对中药提取过程中的非线性和时变特性。提出一种基于模型预测的前馈控制方法, 并以中药提取工艺为例, 搭建基于动态矩阵控制算法的提取预测控制系统。研究表明, 较传统的比例-积分-微分控制模型, 基于动态矩阵控制算法的模型在温度设定点上的系统热冲击更小, 系统更为稳健, 温度控制更加准确。

【关键词】 人工智能; 中药; 提取工艺; 智能制造; 动态矩阵控制; 数字孪生

Transformation of intelligent manufacturing in traditional Chinese medicine: application strategies and case analysis of dynamic matrix control in pharmaceutical process of traditional Chinese medicine

CHENG Yukang^{1,2,3}, YU Yang^{1,2,3*}, ZHANG Faxing^{1,2,3}, MIAO Kunhong^{1,2,3}, XUE Qilong^{1,2,3}, PAN Qin⁴, LI Zheng^{1,2,3}

1. College of Pharmaceutical Engineering of Traditional Chinese Medicine, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China; 2. State Key Laboratory of Component Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Green Pharmaceutical and Intelligent Pharmaceutical for Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China; 4. Tianjin Pharmaceutical Da Ren Tang Group Corporation Limited, Tianjin 300193, China

Abstract: Intelligence has become a significant development trend in the traditional Chinese medicine (TCM) pharmaceutical industry with the rapid development of big data and artificial intelligence. Due to the complexity of the TCM pharmaceutical process, the modeling, real-time monitoring, and control are still in a "grey box state". Model predictive control can predict calculations and optimize in real time, effectively handle the nonlinear and time-varying characteristics of TCM extraction. This paper proposes a model predictive feedforward control approach, using the TCM extraction establish an extraction predictive control system based on the dynamic matrix control (DMC) algorithm. Research findings indicate that compared to traditional proportional-integral-derivative control models, the model based on the DMC algorithm exhibits smaller system thermal fluctuations at the temperature setpoint, more robust system, and provides more accurate temperature control.

Keywords: artificial intelligence; traditional Chinese medicine; extraction process; intelligent manufacturing; dynamic matrix control; digital twin

[基金项目] 国家自然科学基金项目(82074276); 国家中医药管理局创新团队和人才培养计划项目(ZYYCXTD-D-202002); 天津市科技计划项目(22ZYJDS00100)

[作者简介] 程宇康, 男, 硕士研究生, 主要从事中药提取智能化研究工作; *于洋为共同第一作者

[通信作者] 李正, 研究员, 博士研究生导师; E-mail: lizheng@tjutc.edu.cn. 潘勤, 正高级工程师, 硕士研究生导师; E-mail: qinpan022@sina.com

随着市场需求的显著增长、政策支持力度的加大以及科技进步的推动, 中药制药行业正处于快速发展的阶段^[1-2]。然而, 在这一进程中, 实时检测难、控制不准等问题也逐渐显现^[3]。此类问题会导致中药制药生产工艺经济性和过程可控性的多目标调控存在挑战, 如提取过程中由于蒸汽进汽量大、热交换剧烈、沸腾状态难以确定而无法保证关键参数的稳定性, 这将直接

影响药品质量,导致有效成分不一致、杂质超标,从而降低产品药效和安全性^[4]。为了突破中药制药行业在监测和控制方面的技术障碍,我们可以通过建立标准化生产流程、引入先进控制算法技术、实施实时监控系统以及利用信息化管理手段[如机器视觉技术和机器听觉技术等实时监控系统、制造执行系统(manufacturing execution system, MESS)和供应链管理系统(supply chain management system, SCMS)等信息化管理系统]来提升监测的准确性和实时性^[5-6]。以药材处理为例,我们可以通过相机拍摄药材表层图像和高光谱图像,结合液相数据,对药材成分进行提前预估,对药材质量进行检测,这些措施有助于确保生产过程的稳定性,提高药品的质量和安全性,并结合 MESS,通过实时监控生产过程中的数据,提供生产计划、生产调度、质量管理和设备维护等功能,制定出符合中药制药特色的药品质量优化管理策略。

近年来,大模型、深度学习、先进控制算法等智能化手段在现代工业和科技领域展现出显著的优势,尤其在复杂系统的优化与管理中发挥着关键作用^[7-8]。先进控制算法,如模型预测控制(model predictive control, MPC)中广义预测控制(generalized predictive control, GPC)算法和动态矩阵控制(dynamic matrix control, DMC)算法等^[9-11],能够在动态和不确定环境中实现高效的系统控制,确保生产过程的稳定性和安全性。一方面,先进控制算法通过实时数据分析和反馈调节,能够快速适应环境和需求的变化。这种自适应能力使得系统在面对突发状况时,能够迅速调整控制策略,避免潜在的损失^[12]。例如,在制造业中,生产过程中可能会出现原材料波动、设备故障等问题,采用先进控制算法可以实时监控这些变化并做出相应调整,保证生产效率和产品质量^[13]。另一方面,先进控制算法可以对控制方法进行改进,最大限度地提高资源利用效率。通过对系统模型的深入分析和预测,算法能够识别出最优的操作条件,从而达到降本增效的目的^[14]。在许多工业应用中,这不仅降低了成本,还有助于实现可持续发展的目标^[15]。

目前,在中药制药生产实践中,普遍采用比例-积分-微分(PID)模型控制算法逻辑对生产进行控制^[16-17]。PID控制器由于其结构简单,被认为是最受现场工程师和工厂操作员欢迎的控制回路。工厂中大约三分之一的控制回路使用传统的PID控制器,而其他回路需要通过先进的控制技术来增强^[18]。例如,基于粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)对中药提取设备中的模糊PID控制进行优化,温度曲线超调量、稳态误差、响应时间和调节时间均有所下降^[19];基于改进粒子群优化算法对模糊PID控制器的比例因子和量化因子

进行优化,能够缩短温度、压力调节时间^[20]。但中药制药过程通常具有高度非线性特征,而PID算法在处理非线性系统时表现不佳,可能导致控制不稳定^[21]。其次,PID控制依赖于精确的参数设置,这些参数在不同操作条件下需要频繁调整,增加了调试的复杂性^[22]。尽管在生产过程中对PID参数的整定已经有了丰富的经验和比较成熟的方法,但目前还是主要依靠工人的经验,难以实现工艺的标准化、科学化,同时影响了与其他工艺单元的协同优化,进一步影响生产工艺的综合优化^[23]。尤其是在提取过程中,由于PID控制的滞后性,容易出现热冲现象,造成大量热源损失,同时也影响设备寿命和产品质量。

DMC算法是一种基于模型预测控制的算法。通过建立系统动态模型,DMC可以预测未来一段时间内的系统输出,并基于这些预测来选择最优控制动作,同时通过滚动优化策略,能够在每个控制周期内重新计算优化控制序列,提前调整控制策略,减少系统响应延迟,提升系统稳定性。例如,唐明明等^[24]在仿真平台上分别运用前馈解耦PID控制算法、传统DMC算法和改进DMC算法对精馏塔温度进行控制仿真,仿真实验结果表明,DMC算法在响应速度与稳定性方面优于PID控制算法。DMC算法使用的是线性或近似线性的动态模型,这些模型能够在一定范围内有效表示系统的非线性特性。通过在线性模型中引入非线性项或使用在线校正,DMC能够处理非线性系统。以提取为例,在实际生产中,提取过程处于动态变化的环境中,存在热分解、活性成分氧化等非稳态现象,导致提取各阶段出现众多影响因素(药材含量、提取温度、浓度等)^[25-26]。

综上所述,考虑更改为先进的控制算法,DMC可能更为适合中药制药的需求。与PID相比,DMC不仅能够有效处理非线性系统,适应复杂的工艺变化,其还具备预测能力,能够提前调整控制策略,减少系统响应延迟,优化控制效果。本文将探讨DMC的优势以及在不同领域中的应用现状和优势,及其在中药制药过程控制中应用的潜在可能,并以DMC在中药提取过程中的应用为例,示范DMC模型的建立及优化,以期为今后中药制药过程的智能控制研究提供参考。

1 DMC算法

DMC是一种基于MPC原理的控制策略,旨在通过实时数据和系统模型来优化控制决策^[27]。其利用过程模型预测未来的系统行为,从而在给定的时间范围内调整控制输入,使得系统输出反应迅速的同时输出值更接近设定值。DMC特别适用于多输入多输出(MIMO)系统,能够在处理复杂的工业过程时实现有效的协调控制^[28]。

DMC 算法具有多项显著优势,在工业领域应用广泛^[29-30]。首先,DMC 能够同时处理多个输入和输出变量,适应复杂的动态系统,有效管理系统间的相互影响,确保整体控制效果。其次,通过实时监测和模型调整,DMC 具有很强的自适应性,能够有效维持系统的稳定和性能。DMC 不仅能够通过线性化或使用非线性模型来应对非线性系统,从而扩展其应用范围,使其适用于更复杂的控制问题,还能够将操作约束(如输入和输出的最大/最小限制)有效整合到控制策略中,更好地满足实际操作的需求,避免潜在的安全风险。最重要的是 DMC 能够与其他控制策略结合使用,适应控制需求和操作条件的变化,提供更高的灵活性和可扩展性,使其在各种动态环境中都能发挥作用。

综合来看,DMC 作为一种高效的控制策略,凭借其多变量控制能力、良好的鲁棒性和灵活性,在多个高需求的工业环境中表现出色,如化工、能源管理和食品加工等领域。通过实时优化控制决策,DMC 不仅提高了生产效率,降低了运营成本,还确保了产品的质量和系统的整体稳定性。因此,DMC 已成为现代工业控制领域中的重要工具,帮助企业应对日益复杂的生产挑战。

2 DMC 在复杂控制领域的应用

DMC 是一种基于模型的控制方法。DMC 使用过程的数学模型来预测系统的未来行为,能够同时处理多个输入和输出,适用于复杂的动态系统。通过模型预测,DMC 算法可以在多种工作条件下优化控制策略,通常能够提供更快的动态响应和更好的稳态性能,根据实时反馈调整控制策略,适应系统参数的变化,从而更有效地调整控制策略,达到较好的控制效果。综上,DMC 算法在电力行业中可用于协调发电机组,维护系统稳定;在矿业领域,DMC 算法被用于磨矿分级并对设备进行实时监测提高处理效率;在化工领域,DMC 算法主要用于对生产过程中的温度进行控制,以实现更小的温度超调量,从而使系统更加稳定。

2.1 DMC 在电力行业的应用 智能发电这一全新概念为电力行业的发展提供了新思路,行业的智能化发展离不开控制效果更好、鲁棒性更强的控制策略,传统的 PID 控制由于其滞后性已经不能满足新需求,将先进控制算法运用于电力行业是一种较好的策略。李艳萍等^[31]将 DMC 应用于火电厂的单元机组协调控制系统,通过对比仿真发现,DMC 相比于传统的 PID 控制,其控制系统压力、功率所需时间更短,超调量也更小,更能满足生产要求。王麒崑等^[32]将 DMC 应用于单元机组协调控制系统中,提升了系统的响应速度,降低了系统响应时的超调量。孟令政^[33]提出一种结合 DMC 和改进粒子群算法(SCPSO)的优化控制策略,结果发

现与传统 PID 控制算法和动态矩阵预测 PID 控制算法相比,该方法在响应速度、抗干扰能力和鲁棒性方面表现更优。

综上,DMC 通过利用预测模型和实时优化,缩短了单元机组控制系统达到稳定状态的时间,具有更快的响应速度,减少了系统波动的幅度,可提高频率稳定性,确保电网稳定。我们也可以根据 DMC 的原理和优点,在中药制药过程中探索其应用。中药生产往往涉及对温度、湿度、化学反应等多变量的复杂控制,将 DMC 应用于此过程可能带来的优势包括精确控制生产参数、确保产品质量的均一性、优化控制减少循环时间和资源消耗等。

2.2 DMC 在矿业行业的应用 DMC 在矿业行业的应用主要体现在磨矿、选矿过程和设备运行优化等方面。DMC 可以应对磨矿分级过程中遇到的由于原料的粒径大小不一、硬度不同等扰动导致的系统效能降低的问题^[34];不仅如此,DMC 算法还能够实时监测和调整设备进料速率和设备运行参数,从而提高矿石处理效率和资源回收率。目前,越来越多的矿业企业开始采用 DMC 技术,以实现更高的生产效率和经济效益。郭琴^[34]应用 DMC 算法对磨矿分级过程中的多输入输出并行复杂过程进行建模,并采用模糊方法改进 DMC 算法中的反馈校正步骤来应对磨矿分级过程中出现的模型失配问题。谭尾琴^[35]将 DMC 算法运用于协调旋流器基体的控制,协调了旋流器的入流浓度、入流流量和砂泵池液位间的关系,对设备运行进行了优化。

综上,DMC 通过优化协调旋流器基体和磨矿机输入端,如入流浓度、入流流量和原料粒径等参数,减少不必要的时间浪费和效率损失,提升系统整体生产效率。中药制药过程涉及多个复杂环节,如提取、浓缩、纯化等,每个环节都需要精细控制以确保产品质量和效率。例如,在中药提取过程中,通过传感器记录的溶剂温度、压力和时间等参数,DMC 可以设定相应控制目标,如最大化的提取效率和最小化的提取时间,同时保持提取物的纯度在预定范围内,这种方法能够显著提升中药制药过程的自动化和智能化水平。

2.3 DMC 在化工行业的应用 目前,随着工业智能的发展和数据驱动技术的进步,DMC 的应用逐渐普及于大型化工设施中,虽然面临模型准确性和实时数据处理的挑战,但其在提升生产效率和智能化转型方面的潜力仍然受到广泛关注。在化工领域,温度控制在生产过程中尤为重要,已经有很多学者将 DMC 算法应用于精馏塔与反应釜等设备的温度控制,并对算法进行了相应改进。刘盼辉等^[36]以精馏塔精馏段温度控制为例,提出了一种基于 DMC 算法的预测-PID 双层控制方案,比较了 PID-PID 和预测-PID 两种双层控制系统,

结果表明预测-PID 系统在跟踪性能、超调量、调节时间以及抗干扰能力方面具有显著优势。苗荣霞等^[37]为优化腐殖酸液肥生产中的反应釜温度控制,采用了 DMC-PID 串级控制算法,结果显示,相比传统 PID 控制,DMC-PID 串级控制算法超调量更低,调节时间更短,展现了更优的控制效果。雷江等^[38]针对反应釜温度控制的难题,提出了一种基于帐篷映射(Tent 映射)的混沌粒子群优化(CPSO)算法,以优化 DMC 和 PID 的温度预测控制策略;实验结果表明,与传统 PID 和 DMC-PID 控制相比,基于 Tent 映射的 CPSO-DMC-PID 串级控制在温度控制精度和响应速度方面表现优异,显著缩小了超调量。

综上,由于 DMC 具有多变量协调能力、预测与优化结合的特性以及对模型失配和外部干扰的鲁棒性,所以其能够有效应对化工生产中涵盖的复杂化学和物理变化。例如在中药浓缩环节中温度、真空度是两个关键控制参数,通过建立温度与浓缩效率、产品质量之间的数学模型,利用 DMC 算法进行预测,根据预测结果和优化目标(如最大化浓缩效率、保证产品质量),动态调整加热系统的输出温度、真空泵的输出功率或阀门开度等,DMC 能够更好地跟随设定值变化,确保温度和真空度精确控制,提高系统稳定性,减少能耗和生产周期。

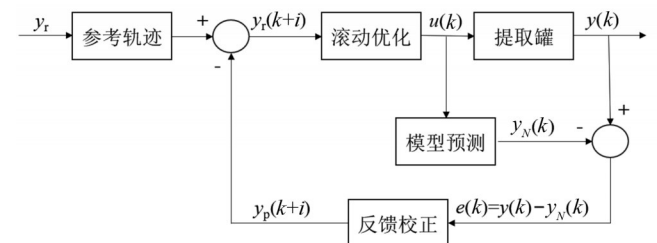
2.4 DMC 在其他行业的应用 DMC 因其高效性和灵活性,在其他多个领域有着广泛应用,包括建筑节能、核能、水系统、食品、电子商务和废热回收等。其能够改进生产流程、提升产品品质,并降低能耗和维护成本,成为许多复杂系统控制的重要工具,推动各行业的智能化发展。董家祥等^[39]提出了一种基于阶跃响应的模型预测控制策略(MPC),旨在精确控制供热二次网的回水温度;结果表明,较传统 PID 控制,该控制策略在控制换热站二次网回水温度方面表现更佳,具有较小的超调量和更短的调节时间。王岱鹏^[40]运用多变量 DMC 分散控制算法和多变量 DMC 集中控制算法对核动力系统分别进行控制;仿真控制结果表明,多变量 DMC 集中控制算法对压力定值扰动、功率定值扰动的跟踪性相对较好。张智旺^[41]将 DMC 与 PID 控制相结合,结果显示在 DMC-PID 控制器的作用下,水轮机在 5 s 之内就达到了稳定状态,并且其较传统 PID 控制具有调节时间短、快速性好、超调量小、准确性高等优势。闫翩翩^[42]将 DMC 算法应用于电子商务环境下的闭环供应链管理中,为供应链系统提供优化的生产和库存方案,以增强系统的稳定性,并提升链中企业的竞争力。Shi 等^[43]提出了一种基于奇异值分解(SVD)和 DMC 的双模快速 DMC(FDMC)算法,该算法的特点是

在保证跟踪性能的前提下,提高计算速度以降低热源波动性的影响。

综上,DMC 在各个复杂领域中具有较大的应用潜力,其能够同时处理多个控制变量,实现 MIMO 系统的有效协调,这对于需要同时调控多个参数的复杂过程至关重要。中药制药过程中伴随着质量的转移,涵盖复杂的化学和物理变化,其生产过程仍处于“灰箱状态”,而 DMC 能够应对中药制药过程中的复杂性和不确定性,提高生产效率、产品质量和能源利用效率。

3 中药提取 DMC 预测控制模型

3.1 预测模型的建立 DMC 的控制框架如图 1 所示。在 DMC 预测控制中,需要建立 1 个模型用于表征被控对象的过程变化,该模型可通过测定值预测未来某一时刻的系统状态。DMC 算法基于被控对象的阶跃响应信号进行控制。在阶跃输入的情况下,得到一系列单位阶跃响应在温度值采样时刻的输出值,表达为 $a_i = a(iT)$,其中 $i=1, 2, \dots, N$; T 表示采样周期。当时间 t_N 达到 NT 后,温度将趋于稳定,此时对象的动态信息可以表示为 1 个有限的集合 $a^T = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ 。向量 $a = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T$, 被称为模型向量,而 N 则表示建模的时间范围。



注: y_r 为在 k 时刻的预测输出值, k 为采样时刻, $y_r(k+i)$ 为 $k+i$ 时刻的预测输出值, $u(k)$ 为控制增量, $y(k)$ 为 k 时刻的实际输出值, $y_N(k)$ 为 k 时刻的模型预测值, $e(k)$ 为 k 时刻实际输出值和模型预测值之间的差值, $y_p(k+i)$ 为模型输出预测值。

图 1 预测结构模型

假设在 $t=kT$ (k 为采样时刻) 时刻系统得到控制作用,且在未来的 N 个时刻被控对象没有受到其他控制反馈,则当前时刻对未来 N 个时刻的温度初始预测值表示为 $\tilde{y}_0(k+1|k)$ 。在当前时刻系统得到 1 个温度增量 $\Delta u(k)$ 时, \tilde{y}_1 在未来 N 个时刻的输出预测值变为:

$$\tilde{y}_1(k) = \tilde{y}_0(k) + a\Delta u(k) \quad (1)$$

其中, a 是由阶跃响应系数组成的矩阵,被称为动态矩阵。若当前时刻存在连续 N 个增量 $\{\Delta u(k), \dots, \Delta u(k+M-1)\}$ 共同作用于系统时,则系统在未来 P 个时刻的输出表示为:

$$\tilde{y}_{PM}(k) = \tilde{y}_{P0}(k) + A\Delta u_M(k) \quad (2)$$

其中, $\tilde{y}_{p0}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_0(k+1|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_0(k+N|k) \end{bmatrix}$ 表示在 $t=kT$ 时刻, 系统未

受到控制增量影响的未来 P 个时刻的预测系统输出。

$\tilde{y}_{pM}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_M(k+1|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_M(k+P|k) \end{bmatrix}$ 表示在 $t=kT$ 时刻, 系统受到 M

个控制增量 $\{\Delta u(k), \dots, \Delta u(k+M-1)\}$ 影响时未来 P

个时刻的系统输出。 $\Delta u_M(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+M-1) \end{bmatrix}$ 为从现

在起 M 个时刻的控制增量。 $A = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & \dots & 0 \\ a_2 & a_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_p & a_{p-1} & \dots & a_{p-M+1} \end{bmatrix}$ 为

p 个 a 向量相加的动态矩阵。根据系统设定值以及模型在阶跃输入情况下可得矩阵 A 中元素。

3.2 模型的滚动优化 由上述模型的建立可知, 系统增量影响着模型预测值的准确性, 系统增量不能随意给出, 需要在每一数据采集时刻通过求解优化问题得到系统增量, 从而使未来输出值无限趋近于期望输出值。则 $t=kT$ 时刻的性能指标进行如下优化:

$$\min J(k) = \sum_{i=1}^P q_i [\omega(k+i) - \tilde{y}_M(k+i|k)]^2 + \sum_{j=1}^M r_j \Delta u^2(k+j-1) \quad (3)$$

其中, ω 为期望输出值, q_i, r_j 为权系数, M 和 P 分别称为控制时域长度和优化时域长度。

为了保证系统被控对象的变化值尽可能地小, 则需要对系统增量的大小进行约束, 将式(3)写成向量形式:

$$\min J(k) = \|\omega_p(k) - \tilde{y}_{pM}(k)\|_Q^2 + \|\Delta u_M(k)\|_R^2 \quad (4)$$

其中, $\omega_p(k)$ 为 $t=kT$ 时刻的期望值。 R 和 Q 分别称为控制权矩阵和误差权矩阵。在不考虑输入输出约束的情况下, 在 $t=kT$ 时刻, $\omega_p(k), y_{p0}(k)$ 均为已知, 通过极值必

要条件 $\frac{dJ(k)}{d\Delta u_M(k)} = 0$ 可使得 $J(k)$ 取最小的 $\Delta u_M(k)$:

$$\Delta u_M(k) = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q [\omega_p(k) - \tilde{y}_{p0}(k)] \quad (5)$$

这就是 $t=kT$ 时刻解得的最优控制增量序列。

在 $t=(k+1)T$ 时刻, 将解出的第 1 个分量作用于系统后得到 $k+1$ 时刻的输出值 $y_1(k+1)$, 将其作为系统初始状态重新预测系统未来输出并进行增量的求解优化, 如此反复。

3.3 模型的反馈校正 通过将 $t=kT$ 时刻求解的最佳控制增量作用于 $t=(k+1)T$ 时刻, 滚动优化后得到系统

的预测输出值。但在实际应用中, 由于噪声、延迟等系统扰动的存在, 预测输出值和实际值存在误差, 后续预测值都建立在一定的误差之上。误差可用式(6)表示:

$$e(k+1) = y(k+1) - \tilde{y}_1(k+1|k) \quad (6)$$

由于误差存在随机性, 可采用加权的方式进行修正:

$$\tilde{y}_{cor}(k+1) = \tilde{y}_{N1}(k) + h e(k+1) \quad (7)$$

式中, $\tilde{y}_{cor}(k+1) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_{cor}(k+1|k+1) \\ \vdots \\ \tilde{y}_{cor}(k+N|k+1) \end{bmatrix}$; $h = [h_1 \dots h_N]^T$ 为

误差校正向量, 其中 $h_1=1$ 。

此外, 在 $k+1$ 时刻, 由于时间点发生改变, 系统预测的时间点也会随之移为 $k+2, k+3, \dots, N$; 同时, $\tilde{y}_{cor}(k+1)$ 中的元素需进行移位才能实现对 $k+1$ 时刻的预测, 即:

$$\tilde{y}_0(k+1+i|k+1) = \tilde{y}_{cor}(k+1+i|k+1) \quad (8)$$

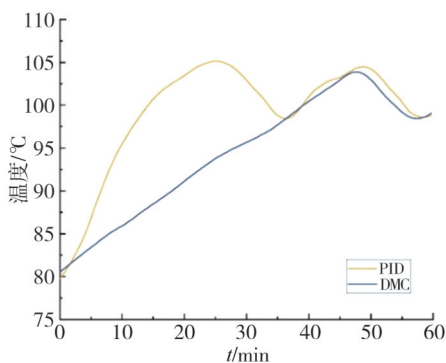
式中, $i=1, \dots, N-1$ 。

由于模型在 $t=(k+1)T$ 截断, 则在 k 时刻的预测中采用 $\tilde{y}_0(k+1|k+1)$ 近似代替 $\tilde{y}_0(k+1+N|k+1)$, 将 $k+1$ 时刻的预测值设置为向量形式: $\tilde{y}_{N0}(k+1) = S \cdot \tilde{y}_{cor}(k+1)$ 。其中, S 为移位矩阵:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

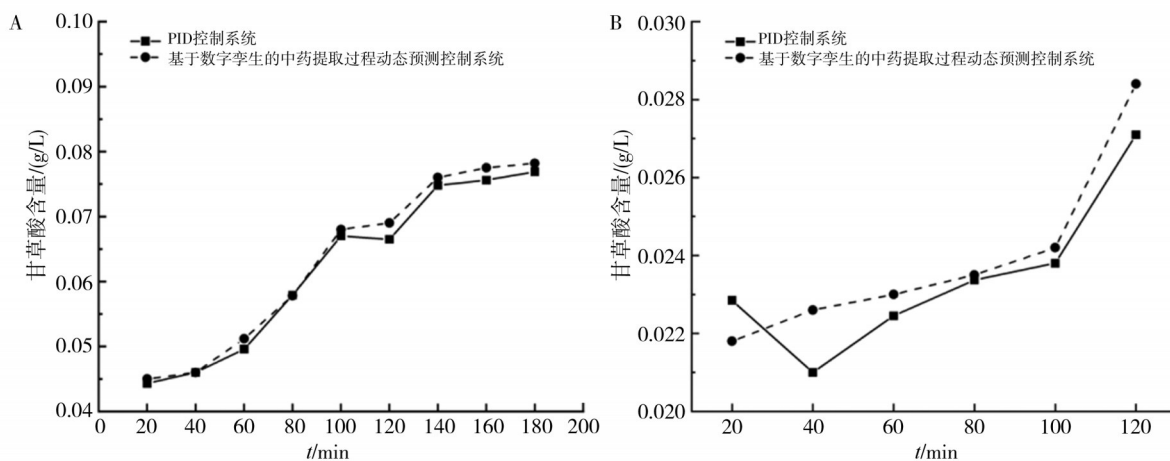
3.4 预测控制实验结果 本研究使用改造过的加热器, 利用 PID 控制和 DMC 预测控制分别对 3 L 水进行加热, 研究的导热介质温度设定为 100 °C, 并在实验过程中实时采集导热介质的温度值。为保证冷却效果相同, 两组实验同时进行, 低温冷却液循环泵的循环回路设计为并联。程序参数设定: PID 控制参数设定, 比例系数为 5.00, 积分时间为 0.00 min, 微分为 0.14 min; DMC 参数设定, 采样时间为 5 s, 预测步长、控制步长和截断步长分别设置为 10 步、1 步和 10 步。图 2 显示了在温度设定值为 100 °C 时, PID 控制和 DMC 预测控制条件下导热介质的温度变化。DMC 程序的系统振幅为 6.15 °C, 系统超调量为 4.28%; PID 控制程序的系统振幅为 7.39 °C, 系统超调量为 5.06%。DMC 模型在提取系统中的振幅和超调量较 PID 控制模型更低, 表明 DMC 模型在温度设定点上的系统热冲击更小, 对温度的调节更及时, 且系统鲁棒性更高, 控制过程相对稳健, 温度控制更准确。

3.5 中药提取实例 在前述条件下, 我们进一步完善 DMC 预测控制程序, 形成了基于数字孪生的中药



注:DMC为动态矩阵控制,PID为比例-积分-微分。

图2 升温阶段加热介质设定温度为100 °C时DMC和PID控制的温度变化



注:A为第1次提取结果,B为第2次提取结果。

图3 两次提取甘草酸含量曲线对比

4 总结与展望

本文总结了DMC在不同领域中的应用,其凭借强大的多变量处理能力、良好的鲁棒性和灵活的约束处理机制,在多个工业领域中表现出色。因此,本文设计并实现了一种基于DMC的提取过程控制,以增强在提取过程中对提取罐温度的控制效果,该系统在性能上优于传统的PID控制。本文还详细介绍了DMC在中药生产过程中的应用策略,包括预测模型的建立、模型的滚动优化、模型的反馈校正和预测控制实验结果,从而实现了对中药制药过程的精确控制。

随着工业4.0和智能制造的深入推进,DMC将与深度学习、强化学习等新兴技术进一步融合,以期提升模型的鲁棒性和预测精度^[45]。这种融合将推动DMC在实时监控和自优化控制方面的应用,尤其是在不确定性高和动态变化的环境中。此外,DMC在优化资源利用、减少能耗和降低排放方面的潜力也将逐渐显现。通过对过程的智能化分析,DMC能够为企业提供更具有可持续性的解决方案,助力绿色制造和资源循环利用。

总之,DMC作为一种强大的控制工具,未来将在多

个领域继续发挥重要作用,推动工业的智能化与可持续发展。随着技术的不断进步和应用场景的不断拓展,DMC的研究和应用将为现代工业控制带来创新与突破。

提取过程动态预测控制程序,并对比了PID控制程序和DMC预测控制程序下两次提取实验中甘草酸的溶出情况^[44]。由图3可知,甘草酸的溶出量随着时间的延长而逐渐增多,而在DMC程序控制条件下的甘草酸溶出量在第1次提取和第2次提取过程中较PID控制条件下的甘草酸溶出量更多。由于DMC算法持续滚动反馈、优化温度变化过程,使得系统鲁棒性更强,溶液沸腾更加温和,由甘草酸溶出量可知,DMC预测控制更符合中药制药过程“提质增量”的要求。

个领域继续发挥重要作用,推动工业的智能化与可持续发展。随着技术的不断进步和应用场景的不断拓展,DMC的研究和应用将为现代工业控制带来创新与突破。

参考文献:

- [1] ZHU W. Research on the evolution mechanism of intelligent manufacturing transformation of Chinese pharmaceutical manufacturing enterprises based on system dynamics [J]. Heliyon, 2024, 10(13): e33959.
- [2] XU M, LIU X, LI O. Can intelligent manufacturing drive green development in China's pharmaceutical industry? —Evidence from listed enterprises[J]. Energy, 2024, 308: 132953.
- [3] WU Q, LI Y, WU Y, et al. The spatial spillover effect of environmental regulation on the total factor productivity of pharmaceutical manufacturing industry in China [J]. Sci Rep, 2022, 12(1): 11642.
- [4] TENG K, FU H, WU G, et al. QbD-guided traditional Chinese medicine manufacturing process: Development and optimization of fluid-bed granulation and drying processes for Xiaochaihu Capsules [J]. AAPS PharmSciTech, 2023, 24(7): 210.
- [5] ZHANG W, ZHANG C, CAO L, et al. Application of digital-intelligence technology in the processing of Chinese materia medica [J]. Front Pharmacol, 2023, 14: 1208055.

- [6] 田文秀,李文杰,薛爱乐,等.中药临方制剂智能制造的研究实践与发展方向[J].中国中药杂志,2024, 49(3): 571-579.
- [7] 刘必晶.基于深度强化学习的综合能源系统优化调度[J].现代电力,2024, 41(4): 710-717.
- [8] 董雷刚,崔晓微.智能数据挖掘算法的采摘机器人执行系统优化[J].农机化研究,2023, 45(7): 224-227, 237.
- [9] SHENG H, WANG X. Online measurement-based estimation of dynamic system state matrix in ambient conditions [J]. IEEE Trans Smart Grid, 2019, 11(1): 95-105.
- [10] WAN X, ZHANG C, WEI F, et al. Hybrid dynamic variables-dependent event-triggered fuzzy model predictive control [J]. IEEE CAA J Autom Sinica, 2024, 11(3): 723-733.
- [11] WANG Y, LI H, FENG H, et al. Simulation study on the PEMFC oxygen starvation based on the coupling algorithm of model predictive control and PID[J]. Energ Convers Manage, 2021, 249: 114851.
- [12] EL MEZDI K, EL MAGRI A, BAHATTI L. Advanced control and energy management algorithm for a multi-source microgrid incorporating renewable energy and electric vehicle integration [J]. Results Eng, 2024, 23: 102642.
- [13] 杜德伟,邹涛,李永民,等.一种面向输入输出故障的变结构模型预测控制方法[J].信息与控制,2016, 45(6): 653-659.
- [14] 杨宣,张保生.基于先进控制算法的CFBB床温控制系统研究[J].自动化与仪表,2018, 33(1): 84-88.
- [15] STOFFEL P, MAIER L, KÜMPEL A, et al. Evaluation of advanced control strategies for building energy systems [J]. Energy Build, 2023, 280: 112709.
- [16] 吕永进.无超调PID控制在中药煎药机中的应用[J].电子技术与软件工程,2016(11): 115.
- [17] 李作武,赵凯,汪炼. PID控制在中药制剂自动提取中的应用[J].兵工自动化,2010, 29(12): 84-86.
- [18] ABOELHASSAN A, ABDELGELIEL M, ZAKZOUK E E, et al. Design and Implementation of model predictive control based PID controller for industrial applications [J]. Energies, 2020, 13(24): 6594.
- [19] 孙艺方.基于模糊PID的多功能中药提取设备自动化控制研究[J].自动化与仪器仪表,2023(10): 232-236.
- [20] 张玉雪,周军,皇攀凌,等.改进粒子群优化的中药提取参数模糊PID解耦控制研究[J].控制工程,2023, 30(6): 1121-1128.
- [21] PAN B, FAREED U, QING W, et al. A novel fractional order PID navigation guidance law by finite time stability approach [J]. ISA Trans, 2019, 94: 80-92.
- [22] 王强.基于机组深调模式下的改进型PID控制方法分析[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2023, 28(1): 114-118.
- [23] 刘萍,李珂,王亚男,等.基于遗传算法的绝热去磁制冷机中PID参数整定[J].真空与低温,2024, 30(2): 143-147.
- [24] 唐明明,干树川.精馏塔温度控制系统的优化研究[J].自动化仪表,2024, 45(8): 37-41.
- [25] DONG R, LIU S, LIANG G, et al. Output control method of microgrid VSI control network based on dynamic matrix control algorithm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 158459-158480.
- [26] SHI Y, LIN R, WU X, et al. Dual-mode fast DMC algorithm for the control of ORC based waste heat recovery system [J]. Energy, 2022, 244: 122664.
- [27] 吴莹莹,丁肇红.基于DMC预测控制算法的智能四驱车控制器设计与仿真[J].计算机测量与控制,2019, 27(3): 83-90.
- [28] ZHENG F, WU G, LIN X, et al. Research on control strategy for improving stability of multi-inverter parallel system under weak grid condition[J]. Int J Electr Power Energy Syst, 2023, 153: 109121.
- [29] HAN B, JO S W, KIM N G, et al. Bridgeless hybrid-mode zeta-based inverter: Dynamic modeling and control [J]. IEEE Trans Power Electron, 2020, 36(6): 7233-7249.
- [30] JO Y P, BANGI M S F, SON S H, et al. Dynamic modeling and offset-free predictive control of LNG tank [J]. Fuel, 2021, 285: 119074.
- [31] 李艳萍,胡洋,刘佳君,等.基于Simulink的动态矩阵预测控制算法在电厂中的应用研究[J].电工技术,2022(16): 6-9, 15.
- [32] 王麒麟,李艳萍,王紫旭,等. DMC控制算法在单元机组协调控制系统中的应用[J].科技与创新,2024(10): 26-30.
- [33] 孟令政.基于改进 PSO-DMC-PID 的电缆线径预测控制[J].物联网技术,2021, 11(11): 81-84.
- [34] 郭琴.面向模型失配问题的磨矿分级过程预测控制方法研究[D].长沙:中南大学,2022.
- [35] 谭尾琴.选矿厂磨矿分级监控系统设计[D].赣州:江西理工大学,2012.
- [36] 刘盼辉,贺高红,李新华,等.基于DMC算法的精馏塔精馏段温度预测-PID双层控制系统应用分析[J].化工自动化及仪表,2024, 51(4): 587-591.
- [37] 苗荣霞,杨婧,马路遥.反应釜温度预测控制算法研究[J].国外电子测量技术,2021, 40(5): 78-82.
- [38] 雷江,唐晓伟,徐兵.基于混沌粒子群优化算法的反应釜温度预测控制研究[J].自动化仪表,2024, 45(4): 40-44, 50.
- [39] 董家祥,迟耀丹,赵阳,等.基于MPC集中供热二次网回水温度控制研究[J].建筑节能(中英文),2024, 52(7): 102-108.
- [40] 王岱鹏.动态矩阵控制在核动力系统堆机协调中的应用研究[D].北京:华北电力大学,2022.
- [41] 张智旺.水轮机调节系统的动态矩阵预测控制[D].咸阳:西北农林科技大学,2017.
- [42] 闫翩翩.电子商务环境下基于预测控制的闭环供应链的仿真研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2017.
- [43] SHI Y, LIN R, WU X, et al. Dual-mode fast DMC algorithm for the control of ORC based waste heat recovery system [J]. Energy, 2022, 244: 122664.
- [44] 苗坤宏.基于数字孪生的中药提取过程动态预测控制[D].天津:天津中医药大学,2023.
- [45] 陶益,陈林,江恩赐,等.人工智能和工业 4.0 视域下高光谱成像技术融合深度学习方法在中药领域中的应用与展望[J].中国中药杂志,2020, 45(22): 5438-5442.

编辑:杨轶舜

收稿日期:2024-09-29