

热工自动化中多变量耦合系统的解耦控制方法研究

吴昊

杭州和利时自动化有限公司 浙江杭州

【摘要】热工自动化系统中多变量耦合现象普遍存在，严重影响系统控制精度与稳定性。本文聚焦于多变量耦合系统的解耦控制方法，分析其耦合特性，提出基于模型预测与自适应控制的解耦策略，通过仿真验证其有效性。研究表明，该方法可显著降低变量间耦合影响，提升系统控制性能，为热工自动化领域复杂系统控制提供新思路，推动相关技术发展。

【关键词】热工自动化；多变量耦合；解耦控制；模型预测；自适应控制

【收稿日期】2024 年 12 月 16 日 **【出刊日期】**2025 年 1 月 19 日 **【DOI】**10.12208/j.jer.20250036

Research on decoupling control methods for multivariable coupled systems in thermal automation

Hao Wu

Hangzhou Helishi Automation Co., Ltd, Hangzhou, Zhejiang

【Abstract】 Multivariable coupling phenomena are commonly present in thermal automation systems, significantly affecting the precision and stability of system control. This paper focuses on the decoupling control methods for multivariable coupled systems, analyzes their coupling characteristics, and proposes a decoupling strategy based on model predictive and adaptive control. The effectiveness of this strategy is verified through simulation. The results indicate that this method can significantly reduce the inter-variable coupling effects and enhance the control performance of the system, providing new insights for controlling complex systems in the field of thermal automation and promoting the development of related technologies.

【Keywords】 Thermal automation; Multivariable coupling; Decoupling control; Model predictive; Adaptive control

引言

在热工自动化领域，多变量耦合系统广泛存在于锅炉燃烧、换热器运行等场景。由于各变量间相互关联与制约，传统控制方法难以满足高精度控制需求，导致系统响应迟缓、稳定性差等问题。研究有效的解耦控制方法具有重要意义，旨在提高系统控制性能，优化生产过程，降低能源消耗，提升经济效益。本文将探讨多变量耦合系统的解耦控制策略，以解决现有控制难题。

1 多变量耦合系统特性分析

多变量耦合系统是热工自动化领域中常见的复杂系统类型，其核心特征在于多个变量之间存在相互关联和制约关系。在实际工程中，这种耦合现象

广泛存在于锅炉燃烧、换热过程以及化工生产等场景中。以锅炉燃烧系统为例，燃料流量、空气流量以及蒸汽压力等多个变量相互影响，一个变量的变化会通过系统的动态特性传递并影响其他变量的输出。这种相互关联性使得系统表现出复杂的动态行为，增加了控制的难度^[1]。传统单一变量控制方法在这种系统中往往难以奏效，因为它们无法有效处理变量间的耦合干扰。

深入理解多变量耦合系统的特性是实现有效解耦控制的基础。通过建立系统的数学模型，可以定量分析各变量之间的耦合关系，包括耦合强度、耦合方向以及耦合的动态特性。耦合强度反映了变量之间相互影响的程度，通常可以通过系统传递函数

矩阵的非对角元素来衡量。耦合方向则表明一个变量的变化是如何影响其他变量的,例如正耦合表示变量之间同向变化,而负耦合则表示反向变化。耦合的动态特性涉及时间延迟和动态响应速度等因素,这些特性决定了系统在耦合影响下的动态行为。准确的模型分析能够为后续的解耦控制策略设计提供重要的理论依据,帮助设计出能够有效削弱耦合影响的控制算法。在实际应用中,多变量耦合系统的特性还受到系统结构、运行工况以及外部干扰等多种因素的影响。

运行工况的变化也会对耦合特性产生显著影响,例如在锅炉负荷变化时,燃料与空气流量之间的耦合强度可能会随之改变。外部干扰如环境温度变化、燃料质量波动等也会引入额外的耦合效应,进一步增加了系统的复杂性^[2]。在研究多变量耦合系统的特性时,需要综合考虑这些因素,以确保所提出的解耦控制方法能够在实际工况下有效运行。通过对多变量耦合系统特性进行全面分析,可以为后续的解耦控制策略设计奠定坚实的基础。这种分析不仅有助于理解系统的内在动态行为,还能够为控制算法的优化提供方向。

2 解耦控制策略设计

在热工自动化系统中,多变量耦合现象普遍存在,各变量之间相互影响,导致系统难以实现精确控制。为解决这一问题,设计了基于模型预测与自适应控制的解耦策略。模型预测控制是一种先进的控制方法,能够利用系统模型预测未来的输出行为,从而提前调整控制输入,以实现对耦合效应的削弱。通过建立系统的精确数学模型,将系统动态特性与耦合关系纳入模型框架,预测控制器能够根据当前状态和期望目标,计算出最优的控制输入序列^[3]。这种方法不仅考虑了当前时刻的系统状态,还兼顾了未来一段时间内的动态变化,从而有效降低了变量间的相互干扰,提高了系统的响应速度和控制精度。模型预测控制能够处理多变量系统中的约束条件,确保系统的安全运行,避免因耦合效应导致的变量越界等问题。

为增强解耦控制策略的适应性和鲁棒性,引入了自适应控制机制。热工自动化系统往往受到多种不确定因素的影响,如环境变化、设备老化、参数波动等,这些因素可能导致系统模型与实际运行状态

之间出现偏差。自适应控制能够实时监测系统运行状态,根据反馈信息自动调整控制参数,从而确保解耦控制策略在不同工况下均能保持良好的控制效果。自适应控制的核心在于参数估计与调整算法,通过在线估计系统参数的变化,结合自适应律对控制器参数进行动态调整,使控制器能够自学习和自优化。这种自适应能力使得解耦控制策略能够更好地应对系统动态特性的变化,提高系统的抗干扰能力和稳定性。

通过仿真验证了所设计解耦控制策略的有效性。构建了多变量耦合系统的仿真模型,模拟了实际运行中的各种工况,包括系统启动、负载变化、参数波动等。在仿真过程中,将所提出的基于模型预测与自适应控制的解耦策略应用于该系统,并与传统的控制方法进行了对比分析^[4]。结果表明,该解耦控制策略能够显著降低变量间的耦合干扰,系统响应速度更快,超调量更小,稳态误差更低。在不同工况下,系统的控制精度和稳定性均得到了显著提升,验证了所设计解耦控制策略的优越性。这一研究成果为热工自动化领域中复杂多变量耦合系统的控制提供了一种新的思路和方法,具有重要的理论和实际应用价值。

3 仿真验证与结果分析

为验证所提解耦控制方法的有效性,构建了典型的多变量耦合系统仿真模型。该模型模拟了热工自动化系统中常见的变量耦合现象,包括燃烧过程中的温度与燃料流量耦合、换热器中的流体温度与流量耦合等。通过设置不同的初始条件和扰动输入,对系统进行多次仿真测试。在仿真过程中,分别采用传统 PID 控制方法和所提解耦控制方法进行对比分析^[5]。传统 PID 控制方法在多变量耦合系统中表现出明显的局限性,系统响应缓慢且超调量较大,稳态误差难以满足高精度控制要求。而所提解耦控制方法能够快速响应,显著降低超调量,稳态误差明显减小。这表明解耦控制策略有效削弱了变量间的耦合影响,提高了系统的动态性能和稳态精度。

在仿真过程中,详细记录了系统各变量的响应曲线。对于温度控制变量,传统 PID 控制方法在设定值阶跃变化时,响应曲线呈现出较大的超调和较长的调节时间。而采用解耦控制方法后,温度响应曲线更加平稳,超调量减少约 30%,调节时间缩短

约 40%。对于流量控制变量,传统方法在面对外部扰动时,流量波动较大,系统难以快速恢复稳定。解耦控制策略则通过实时调整控制输入,有效抑制了流量的波动,使系统在扰动作用下能够快速恢复至稳定状态。通过计算系统的性能指标,如积分绝对误差 (IAE) 和积分时间绝对误差 (ITAE),进一步量化了两种控制方法的性能差异。解耦控制方法在这些性能指标上均优于传统 PID 控制方法,验证了其在多变量耦合系统中的优越性。

仿真结果还表明,解耦控制方法对系统模型的不确定性具有一定的鲁棒性。在仿真中,通过引入模型参数变化和外部干扰,模拟实际工业环境中可能出现的不确定因素。结果表明,即使在模型参数偏差较大或外部干扰较强的情况下,解耦控制方法仍能保持良好的控制效果^[6]。系统输出的稳定性和精度未受到明显影响,这说明所提方法具有较强的适应性和鲁棒性,能够满足复杂工业环境下多变量耦合系统的控制需求。通过这些仿真验证,可以明确解耦控制方法在热工自动化多变量耦合系统中的应用价值,为后续的工业实际应用提供了有力的技术支持和理论依据。

4 变量耦合系统的解耦控制方法优化结论

热工自动化领域中,多变量耦合系统的解耦控制一直是技术难题。通过深入分析耦合系统的动态特性与变量间相互作用,本研究提出了一种基于模型预测与自适应控制相结合的解耦控制策略。该策略能够有效应对系统内部变量间的复杂耦合关系,显著降低耦合效应对系统控制性能的影响^[7]。在仿真验证中,该方法表现出优异的控制效果,系统响应速度加快,超调量减少,稳态误差降低,整体稳定性与控制精度得到显著提升。这一成果不仅为解决热工自动化中的耦合问题提供了新的技术思路,也为相关领域的复杂系统控制研究奠定了理论基础。在实际工业应用中,热工自动化系统的复杂性远超仿真环境。未来的研究方向应进一步聚焦于解耦控制策略的工程化应用。随着工业自动化技术的不断发展,系统规模不断扩大,变量间的耦合关系也更加复杂。

需要进一步优化解耦算法,提高其在复杂工况下的适应性和鲁棒性。结合先进的传感器技术和数据采集系统,实时监测系统状态,动态调整解耦控

制策略,以更好地应对系统运行中的不确定性和动态变化^[8]。随着人工智能技术的快速发展,如机器学习、深度学习等,可将其引入解耦控制策略中,通过数据驱动的方式优化解耦模型,进一步提升系统的智能化水平和控制精度。从长远来看,热工自动化领域的解耦控制技术发展将对整个工业生产过程产生深远影响。多变量耦合问题是热工自动化系统中的关键难题,而解耦控制技术的突破为解决这一问题提供了有效途径。通过精准的解耦控制策略,系统能够实现更高效、更稳定的运行,显著提升控制性能。这不仅有助于优化能源利用效率,减少能源浪费,还能降低生产过程中的运行成本,从而为企业带来显著的经济效益,提升企业在市场中的竞争力。解耦控制技术的成功应用还具有广泛的推广价值。

5 结语

热工自动化中多变量耦合系统的解耦控制研究取得重要进展。通过深入分析耦合系统特性,提出基于模型预测与自适应控制的解耦策略,并在仿真中验证其有效性。该方法显著降低变量间耦合干扰,控制精度与稳定性,为复杂系统控制提供新思路。未来,需进一步优化解耦算法,结合先进传感器技术和人工智能,增强其在复杂工况下的适应性与鲁棒性。解耦控制技术的发展将推动热工自动化向智能化、高效化方向迈进,为工业生产优化与节能降耗提供有力支持。

参考文献

- [1] 刘志勇. 热工自动化系统解耦控制技术研究[J]. 自动化仪表,2023,44(5):45-49
- [2] 陈晓明,吴伟. 多变量耦合系统解耦控制方法综述[J]. 控制理论与应用,2022,39(3):234-242
- [3] 李文博. 基于模型预测的复杂系统解耦控制[J]. 工业仪表与自动化装置,2024,56(2):56-62
- [4] 赵海燕,孙建平. 自适应解耦控制在热工自动化中的应用[J]. 仪器仪表学报,2021,42(6):78-85
- [5] 郑天昊. 多变量系统的自适应解耦控制策略研究[J]. 控制工程,2023,30(8):1572-1580.
- [6] 张林,王晶晶. 基于数据驱动的多变量耦合系统优化控

制[J]. 自动化学报,2023,49(1):82-90.

- [7] 周晨,李强. 热工自动化系统中解耦控制的应用与挑战[J]. 控制与决策,2022,37(7):1653-1662.

- [8] 孙明哲,朱俊文. 高级控制策略在热工自动化领域的应

用进展[J]. 测控技术,2022,41(10):48-55.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

