

化工装置中仪表系统的动态响应特性分析

王维栋 李云坤 吕行

山东天弘化学有限公司

摘要: 本文针对化工装置仪表系统的动态响应特性展开了研究, 分析了影响系统动态响应的因素, 并提出了相关的改进措施与优化方案。通过建立动态响应分析模型, 详细探讨了仪表系统的基本原理以及动态响应分析方法。分析了动态响应对控制系统精度的影响, 阐述了系统性能优化的需求。针对系统硬件与控制算法提出了优化措施, 并采用试验验证和典型案例分析方法对提出的优化方案进行了验证。试验结果表明, 通过硬件改进与控制算法优化, 能够显著提高仪表系统的动态响应性能, 从而提升化工装置的整体控制精度与生产效率。

关键词: 化工装置; 仪表系统; 动态响应; 系统优化

随着化工产业的不断发展, 自动化控制系统在提升生产效率和保障产品质量方面发挥了重要作用。化工装置中仪表系统作为自动化控制的核心, 直接影响着生产过程的稳定性与安全性。仪表系统的动态响应特性是评价其控制性能的重要指标之一。系统的动态响应能力直接决定了其在面对快速变化的工艺参数时, 能够做出多迅速和精确的调整, 优化仪表系统的动态响应性能成为提升生产效率和保障安全生产的关键。

1 化工装置仪表系统的基本原理

1.1 仪表系统概述

化工装置中的仪表系统是用于监测、控制和调节工艺参数的重要工具, 通常由传感器、变送器、调节器以及执行器等组成。传感器用于测量各种物理量(如温度、压力、流量和液位等), 并将其转换为可供分析和处理的电信号; 变送器则负责将传感器的信号转换为标准信号输出; 调节器根据设定的控

制目标对信号进行分析处理, 并向执行器发出控制指令, 进而调整现场设备(如阀门、泵等)以维持系统的稳定性^[1]。仪表系统是化工装置自动化控制的核心, 通过实时数据采集与反馈调节, 确保工艺过程的稳定运行与安全生产。

仪表系统的可靠性与响应速度直接影响到生产过程的控制精度与安全性。现代化工装置的仪表系统要求具有高精度、快速响应和良好的抗干扰能力。系统的动态响应特性决定了它能否快速、准确地对过程参数的变化作出反应, 进而影响到整个控制系统的效率和稳定性。

1.2 动态响应分析模型

动态响应分析模型用于描述仪表系统对外界输入信号变化的反应过程。在化工装置中, 仪表系统的动态响应通常表现为从输入信号到输出信号的时间延迟、幅值变化和稳定性等特性。该分析模型有助于评估仪表系统的响应速度、精度以及对系统性能的影响。

常见的动态响应分析模型包括一阶滞后模型、二阶滞后模型及更复杂的高阶模型。一阶滞后模型主要用于描述传感器和变送器在对快速变化信号的响应能力, 适用于简单的线性系统; 二阶滞后模型则适用于需要考虑振荡和超调的系统, 更能模拟复杂的过程动态特性。

在分析仪表系统的动态响应时, 通常会用到拉普拉斯变换与传递函数等数学工具, 借助这些工具可以求解出系统的时域响应、频域响应及稳态误差等重要指标。动态响应模型还需考虑到系统的非线性因素、外部扰动和内部反馈等影响因素, 以便进行更精确地优化设计。通过对动态响应模型的深入分析, 可以有效提升仪表系统的控制精度与反应速度, 确保化工装置的稳定运行。

2 动态响应特性分析

2.1 动态响应特性分析方法

动态响应特性分析方法主要用于

评估化工装置仪表系统对输入信号变化的反应行为。在进行动态响应分析时,首先需要了解系统的组成与结构,包括传感器、变送器、执行器等各个环节的工作原理与相互作用。仪表系统的设计及其硬件配置直接影响到系统的响应速度和控制精度,因此对其结构的理解至关重要。

如图1所示,化工装置的仪表系统通常由安全仪表系统(SIS)和基本过程控制系统(BPCS)共同组成。SIS用于监测和控制危险参数,确保装置的安全性,而BPCS负责常规的过程控制,通过实时数据采集与反馈调节,保持系统的稳定运行^[2]。在此系统中各类传感器(如压力传感器PT、温度传感器TT)通过与控制模块的连接,对实时数据进行监控与传输。图中的配置展示了如何通过硬件组件、控制单元和输入输出模块的协同工作,实现系统的动态响应。

通过图1,我们可以清晰地看到SIS和BPCS如何通过相互配合工作,保证化工装置在面对环境变化或工艺波动时能够作出快速反应和精准调节。进一步分析这些系统的动态响应特性,有助于优化控制策略,提高系统性能,减少因响应迟缓或不精确带来的工艺问题。

2.2 典型化工装置的动态响应特性分析

在典型的化工装置中,仪表系统

的动态响应特性受到多种因素的影响,包括过程变化的速率、控制策略的设置及设备的特性。以反应釜温度控制系统为例,温度传感器在测量过程中可能受到温度变化速率、热惯性等因素的影响,从而导致响应的时滞和超调。在这一系统中传感器和变送器的动态响应能力直接影响控制系统的稳定性与精度。以某化工厂的蒸馏塔为例,该装置主要用于分离化学物质。在系统运行过程中,液位传感器和流量计是关键的测量仪表。若系统对液位或流量的变化响应过慢,可能导致反应过程中溶剂或原料过量或不足,影响分离效果。通过动态响应特性分析,可以揭示出控制系统存在的滞后、过调或不稳定等问题,为后续的改进提供数据支持。不同类型的化工装置(如换热器、泵浦控制系统等)在动态响应上也表现出不同的特性^[3]。通过对这些典型装置的动态响应分析,能够为系统优化提供针对性的建议,进而提升控制精度、缩短响应时间,确保工艺过程的稳定与安全。

3 动态响应对控制系统的影响

3.1 动态响应对控制精度的影响

动态响应特性直接影响化工装置控制系统的精度。控制精度是指系统在控制目标和实际输出之间的差异度,通常包括稳态误差和瞬态误差。若仪表

系统的动态响应较慢或存在较大的滞后效应,系统会在输入信号发生变化时反应迟钝,导致控制误差增大,进而影响产品质量和生产效率。尤其在需要高精度控制的工艺过程中,如温度、压力、流量的精确控制,较差的动态响应会导致超调、稳态偏差等问题,影响过程稳定性。具体来说,动态响应的滞后和时间常数过长,会导致控制器难以及时调整系统,无法迅速纠正偏差,最终使系统无法达到设定的控制目标,甚至可能出现系统失稳的风险。在加热炉温度控制中,若温度传感器的响应速度较慢,会导致温度超调或不足,影响加热过程的稳定性。通过提高仪表系统的响应速度和精度,能够有效减小控制误差,提升控制精度和稳定性,从而提高化工装置的生产效率和安全性。

3.2 系统性能优化需求分析

在优化化工装置仪表系统的动态响应性能时,需要综合考虑系统的稳定性、可靠性以及故障发生的概率。马尔可夫过程作为一种描述状态转移的有效工具,可以帮助我们分析系统在不同状态下的动态行为,从而为性能优化提供支持。图2展示了一个典型的马尔可夫模型示例,该模型描述了系统在正常状态、失效状态和中间状态之间的转移过程。系统的状态变化受转移概率影响,转移概率反映了故障发生的可能性^[4]。在优化系统性能时,理解这些状态转换的概率分布有助于识别潜在的风险点,并在设计中进行针对性优化。

通过图2中的马尔可夫模型,可以更清晰地看出系统在不同状态下的表现及其转移概率。根据该模型,我们可以分析出故障发生的频率和系统从正常状态到失效状态的可能路径,从而为仪表系统的优化提供重要数据,确保系统在发生故障时仍能保持较高的可靠性和稳定性。

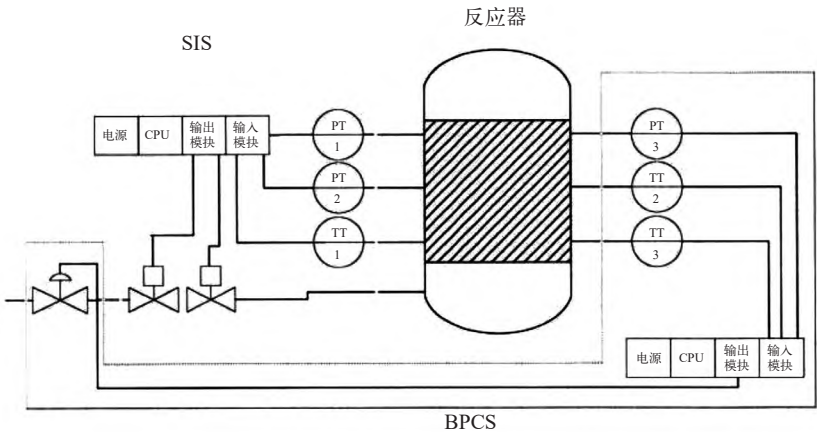


图1 SIS和BPCS

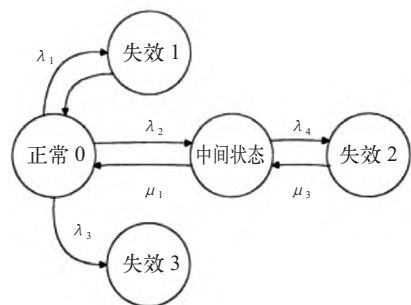


图2 马尔可夫模型示意图

4 改进措施与优化方案

4.1 仪表系统硬件改进

为了提高化工装置仪表系统的动态响应性能，硬件改进是基础且关键的措施之一。优化传感器的性能是提升系统响应速度的首要任务。选用高响应速度、低滞后的传感器可以减少信号的时间延迟，确保工艺变化能及时被监测并反馈给控制系统。采用先进的光纤传感器或热电偶传感器，可以在温度和压力等关键参数变化时提供更迅速的反馈。改进变送器的性能也至关重要。现代变送器支持数字信号处理和高精度传输，相较传统模拟变送器，能够提供更高的信号准确性与稳定性。在硬件方面，通过提升变送器的传输频率和减少信号传输的时延，能够进一步提升系统的响应能力。执行器和调节阀的性能改进同样不可忽视。采用伺服驱动和智能化执行器，可以提高控制系统的精度和灵敏度。伺服电动机驱动的调节阀响应速度较快，能够迅速响应控制信号，保持系统稳定。通过定期检查与维护仪表硬件，确保其良好的工作状态，有助于提高整个系统的长期可靠性与动态响应能力。这些硬件改进能够有效地提高化工装置仪表系统的动态响应能力，为系统的整体性能优化奠定基础。

4.2 动态响应性能优化技术

在优化化工装置仪表系统的动态响应性能时，必须考虑系统的安全性，尤其是在控制过程中风险降低与安全完整性之间的关系。如图3所示，风

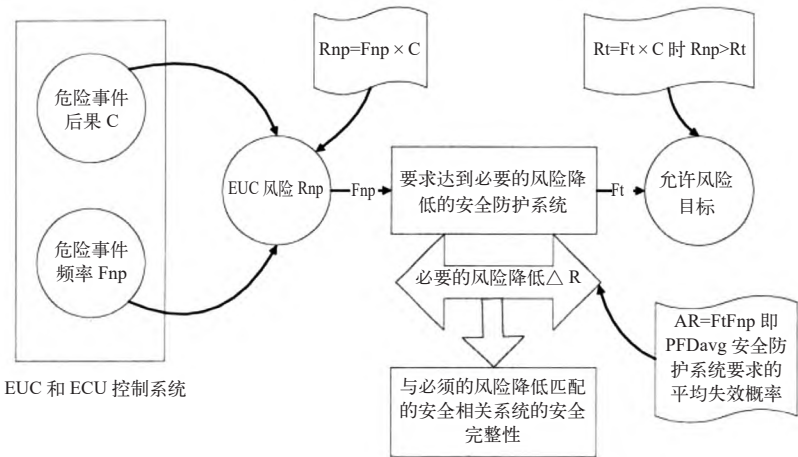


图3 风险降低与安全完整性水平的关系

险降低与安全完整性水平（SIL）密切相关，这一关系在安全仪表系统中起着至关重要的作用^[5]。图3展示了EUC（危险事件发生频率）与EUC控制系统之间的关系，通过控制系统和安全控制措施的协同工作，可以实现所需的风险降低和安全完整性水平。通过优化控制系统的响应性能，可以有效降低事故发生风险，进而提升整个系统的安全性。

如图所示，EUC系统通过风险频率（Fnp）和事故后果（C）相结合，最终决定了风险降低的效果。优化仪表系统的动态响应，可以通过减少事故的发生概率（Fnp）和降低后果（C）来提高安全系统的完整性水平，从而达到提高生产安全的目标。

4.3 应用举例

如图4所示，该图呈现了一个化工装置中仪表系统的动态响应趋势。图中显示的是某一时间段内，仪表系

统的响应变化情况，横坐标表示时间，纵坐标则表示某一测量参数（如压力、流量或温度等）的数值。整体来看，曲线呈现出波动性变化，尤其在9:00时出现了较大的下跌，随后逐渐回升。这表明，仪表系统在该时段内存在较强的动态响应，可能受到外部扰动、操作调整或设备性能变化的影响。通过分析这类动态响应波动，可以深入理解仪表系统的灵敏度和稳定性。波动幅度较大的情况通常说明系统在某些时刻的响应过于剧烈，可能导致控制系统的精度降低或设备的过度调整。为了提高系统的控制精度和稳定性，需要从硬件和控制算法两方面进行优化。针对图中波动的情况，可能的优化措施包括调整仪表硬件的灵敏度，采用更加精细的控制策略，并通过更高效的算法减少波动的影响，以提高系统在不同工况下的适应能力和稳定性。

图5所示，该图展示了化工装置

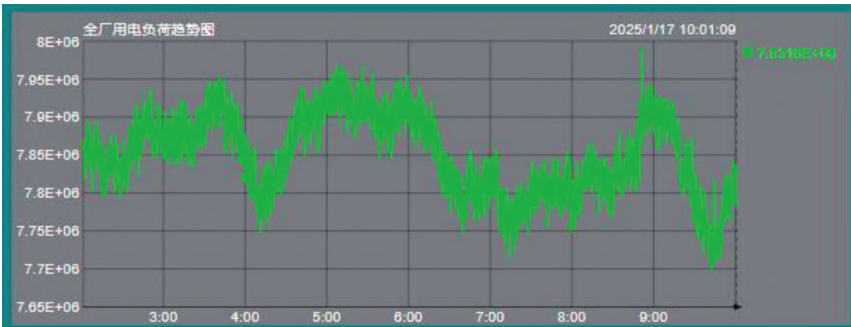


图4 化工装置中仪表系统的动态响应趋势



图 5 化工装置中仪表系统的状态监测情况

中仪表系统的状态监测情况。每一行代表一个仪表的状态信息，左侧和右侧的表格分别列出了不同仪表的编号、位置以及当前的测量或控制参数。绿色圆点表示正常工作状态，蓝色字体则可能代表设备或系统的具体参数值，如温度、压力等。从图中可以看到，每个仪表都有一个对应的编号和控制点，且大部分仪表的状态都是绿色的，意味着这些仪表在当前时刻运行正常。表格中的数据对于监控系统的运行状况至关重要，反映了各个仪表的实时表现。通过这种状态监控，操作人员可以迅速了解系统的运行状态，发现潜在的异常问题，并及时采取相应的处理措施。结合仪表系统的动态响应特性分析，图中的数据为进一步优化系统动态响应提供了基础。对每个仪表的状态进行精确监控和调整，能够确保系统在应对变化时，响应更为精准和稳定，进而提升化工装置的整体控制效果和生产效率。

如图 6 所示，该图展示了一个化

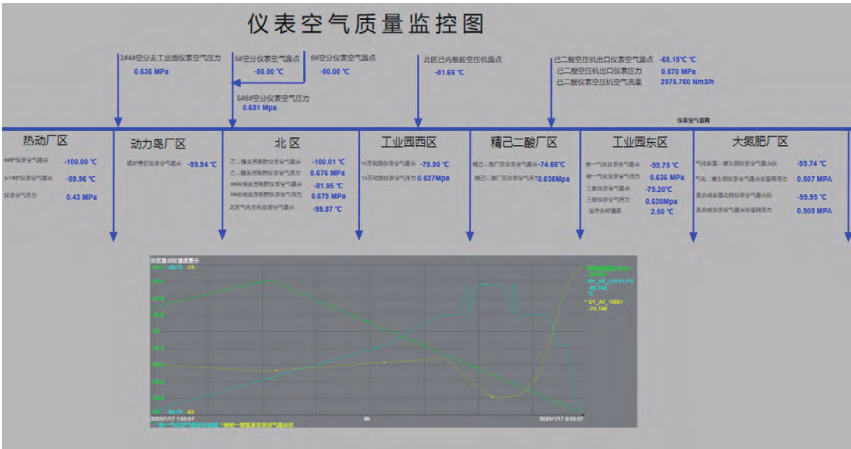


图 6 化工装置中仪表系统的空气质量监控情况

工装置中仪表系统的空气质量监控情况。图的上部列出了不同区域（如热动厂、动力岛厂区、北区等）的空气质量指标，包括温度、压力、湿度等参数，这些指标对于监控和调节空气质量至关重要。每个区域都显示了相应的数值，例如温度（如 42.5℃）、湿度（如 14%）等，反映了不同区域内的环境状态。下方的图表则显示了仪表系统的动态响应，尤其是在某些时刻发生的剧烈波动。横坐标表示时间，

纵坐标则显示相关空气质量参数的变化。曲线的波动显示了各个区域内空气质量的变化趋势，以及系统如何响应这些变化。例如，在某些时刻，温度、压力等参数的急剧变化可能指示设备运行的不稳定或外部环境的异常。图中的数据表明，在空气质量监控系统中，仪表的动态响应特性可能会受到多种因素的影响，如设备性能、外部环境的变化或操作调整。这些波动需要通过优化硬件、调整控制算法等

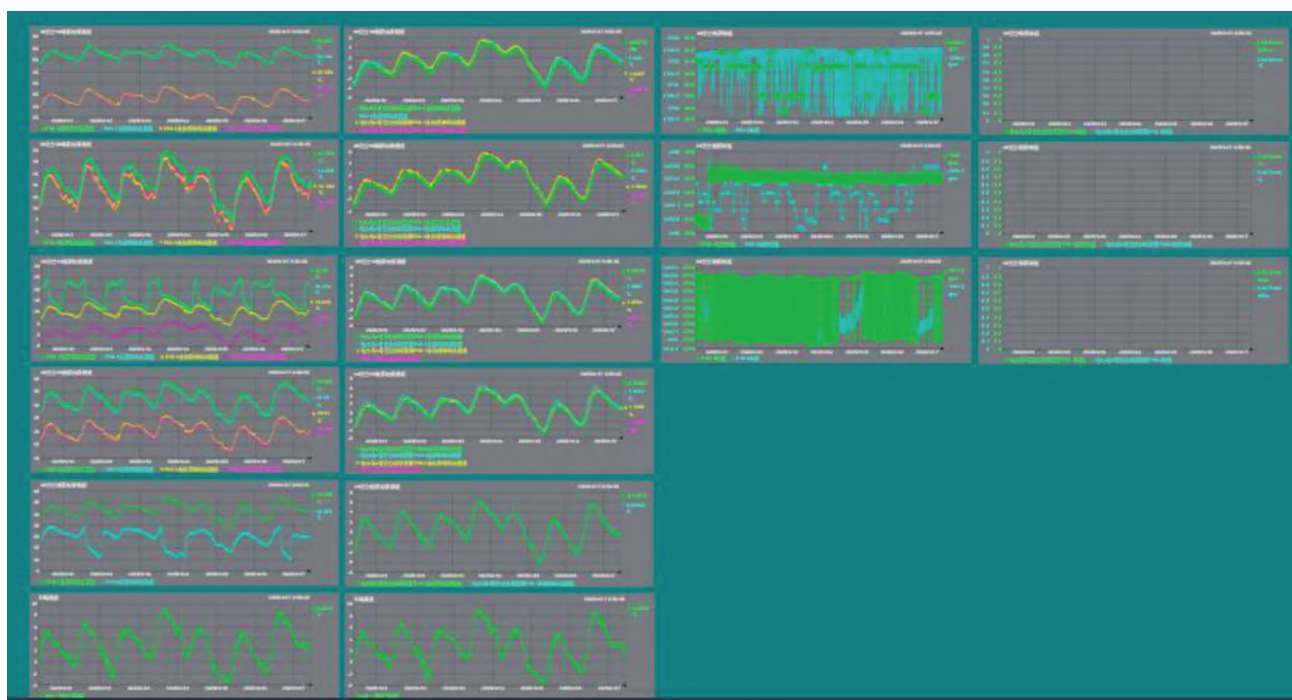


图7 化工装置中多个仪表系统的动态响应和状态监测情况

手段进行改善,从而确保监测系统的稳定性和准确性,提高空气质量控制的精度,确保化工装置的安全与高效运行。

如图7所示,该图展示了化工装置中多个仪表系统的动态响应和状态监测情况。图中包含了多个小图表,呈现了不同设备或系统参数(如压力、温度、流量等)的变化趋势。每个图表的横坐标表示时间,纵坐标则表示对应的监控数据。曲线的波动反映了设备运行的实时状态。从图中可以看到,多个参数的曲线呈现出不同的波动特征。某些图表中的曲线波动较大,显示出显著的动态响应变化,这可能表明在该时刻,设备或系统的运行状态发生了较大的变动或受到外部干扰。而其他图表中的曲线相对平稳,表明这些设备在该时间段内的运行状态较为稳定。这些数据可以帮助操作人员实时监控系统的动态响应性能,及时发现潜在的异常和问题。通过对这些数据的深入分析,可以识别出系统的薄弱环节,针对性地优化硬件配置、调整控制算法,以提高系统的响应速

度、稳定性和精确度,从而提升化工装置的整体控制精度和生产效率。这种动态响应监控对确保生产的连续性和安全性至关重要。

5 结语

本文通过对化工装置仪表系统的动态响应特性进行全面分析,提出了硬件改进和控制算法优化的综合优化方案。试验验证与典型案例分析表明,优化后的仪表系统具有更高的动态响应能力,显著提高了控制精度与生产效率。通过改进传感器、变送器、执行器等硬件设备,并结合先进的控制算法,如自适应PID控制与模型预测控制(MPC),可以有效提升系统的稳定性与响应速度。随着化工工业自动化水平的不断提升,仪表系统将面临更加复杂的工况与控制需求。进一步优化仪表系统的动态响应特性、提升其智能化水平将成为研究的重要方向。与此同时,集成智能化传感器与实时数据处理技术,将为系统的进一步优化提供更多可能性。通过持续的技术创新与优化,化工装置的仪表系统将

在保障安全、提高效率和降低成本方面发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 李建慈,闫研,袁汉福. 浅谈化工装置试车准备工作[J]. 流程工业, 2024(09):46-49.
- [2] 周鹏. 石油化工装置安全仪表系统应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(10):141-143+147.
- [3] 张琦. 安全仪表系统在化工装置设计中的应用[J]. 电子技术, 2024, 53(01):311-313.
- [4] 黄国星. 大型化工装置仪表自控系统的故障处理方法研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(14):25-27.
- [5] 彭晓阳. 大型化工装置仪表自控系统的故障应对措施[J]. 化工管理, 2022(36):139-141.