

基于 DCS 系统的化工储罐液位控制技术研究

石传滨（江苏省连云港市连云港石化有限公司，江苏 连云港 222000）

摘要：随着化工生产对精度和自动化要求的提高，基于分布式控制系统（DCS）的储罐液位控制技术得到广泛应用。DCS 系统集成液位传感器、控制算法和执行机构，确保储罐液位控制的高效性与可靠性。本文分析了液位传感器信号采集、控制算法实现及液位调节阀协同作用，探讨了多变量液位控制的应用，提出了优化策略，以提升系统的稳定性和响应速度。

关键词：DCS 系统；化工储罐；液位控制；控制算法；信号采集；多变量控制

1 DCS 系统概述

分布式控制系统（DCS）是现代工业自动化控制的核心组成部分，广泛应用于石油、化工等多个行业。DCS 通过将现场的分布式控制器与集中控制台连接，构建了一个灵活且可扩展的控制网络。在化学工业中，液位控制对设备安全和生产效率至关重要。DCS 系统整合了液位传感器、控制器、执行器和用户接口，能够实现数据采集、信号处理和执行控制。由于其高度的配置灵活性，DCS 系统能够适应多种生产流程，特别是在处理复杂液位控制任务时，展现出显著的优势。

2 基于 DCS 系统的化工储罐液位控制技术关键环节

2.1 DCS 系统的储罐液位传感器与信号采集

液位传感器是 DCS 系统中监测液位变化的核心组件，其性能直接影响液位控制的精度和响应速度。常见的液位传感器包括浮子式、雷达式、静压式和电容式等，每种传感器适用于不同的工作场景，具有独特的性能优势（见表 1）。浮子式传感器结构简单，适用于常规工业用水储罐，利用浮子随液位变化驱动传动机构进行测量。雷达式传感器通过发射和接收电磁波的时间差来测量液位，可在高温（最高 250℃）和高压（约 15MPa）环境下工作，广泛应用于石油化工储罐。静压式传感器则利用液体静压与液位之间的比例关系，具有较高的稳定性，适用于大型化工储罐。

由于 DCS 系统无法直接识别和处理来自传感器

的模拟信号，因此必须借助 A/D 转换器将模拟信号转换为数字信号。为了确保系统在各种复杂环境中的稳定性与精确性，信号采集部分必须具备出色的性能。例如，采用 16 位 A/D 转换器时，其分辨率可达 1/65536，能够精确捕捉液位的微小波动。在硬件设计过程中，需要合理布局元器件，以减小信号干扰。而在软件方面，则采用中值滤波和加权平均滤波等抗干扰技术，对采集的信号进行初步处理，消除噪声干扰，从而保证信号的精度与稳定性，确保液位变动的准确跟踪。

2.2 控制算法在 DCS 系统中的实现

在 DCS 系统中，控制算法是实现精确液位控制的关键，其性能直接影响液位控制的准确性与稳定性。PID 控制算法通过调整比例（P）、积分（I）和微分（D）参数来实现控制，结构简单、易于调节，因此在许多线性液位控制系统中得到广泛应用。在小型化工储罐环境中，若液位变化稳定且工作状态较为平稳，可以通过经验方法或 Ziegler-Nichols 法等手段来调整 PID 参数，从而有效地将液位稳定在预设值附近。例如，在一次小型酸碱储罐控制实验中，经过多次调整，设置 P 参数为 2，I 参数为 0.5，D 参数为 0.1 时，液位控制效果非常理想。为了提高控制效果，首先需要确定液位偏差、偏差变化率等输入变量以及控制量等输出变量，然后根据偏差变量进行控制调整。例如，当液位偏差较大且偏差变化率为正时，需要增加控制量

表 1 液位传感器性能对比

传感器类型	精度	工作环境	响应时间	应用范围
浮子式	±5mm	常规环境	1 秒	工业用水储罐
雷达式	±2mm	高温高压	0.5 秒	石油化工储罐
静压式	±3mm	稳定环境	1 秒	大型化工储罐
电容式	±1mm	室温环境	0.5 秒	食品、药品储罐

表 2 不同控制算法对比

控制算法	优点	缺点	适用场景
PID 控制	简单易实现、计算量小	对非线性系统效果差	小型、稳定的系统
模糊控制	适应性强、鲁棒性好	计算复杂、调试困难	非线性复杂系统
神经网络控制	高度自适应、精度高	需要大量历史数据、训练时间长	复杂、多变量系统

以实现快速调节。不同控制算法对比见表 2。

2.3 DCS 系统与液位调节阀的协同作用

在 DCS 系统的液位控制闭环中，液位调节阀在执行控制命令、调整液位方面起到了核心作用。DCS 系统根据液位传感器反馈的信息，通过控制算法处理后，向液位调节阀发送开度调整信号。通过改变阀门开度，调节流量，从而确保储罐内液体的稳定液位。然而，调节阀具有非线性的特性，阀门开度与流量之间的关系并非完全线性，并且响应时间存在一定延迟，通常在 0.1 至 0.5 秒之间。这些特性可能会导致液位不稳定，产生超调或振动现象。

为了确保调节阀与控制系统的良好配合，需要对阀门参数进行精确配置。在设定死区时，根据实际工况和控制要求，确保死区范围在 0.5 至 2mm 之间，以避免因微小信号波动引起阀门频繁动作。在计算流量系数时，需要根据储罐的最大流量需求、液体特性和管道参数等因素，运用相关数学公式进行精确计算。对于不可压缩流体，流量系数与流量和压差等参数密切相关。通过这些计算，能够选择合适的流量系数调节阀，确保在各种工况下都能精确调节流量。

在实际操作过程中，调节阀需要定期进行维护和检查，以确保其正常运行。例如，每隔六个月需要对调节阀进行全面检查，评估阀门的密封性和阀芯的磨损状况等。根据实际操作情况，实时调整调节阀的各项参数。如果储罐的制造工艺发生变化，液位控制需求有所不同，必须及时重新计算和调整阀门的死区、流量系数等关键参数，确保系统响应时间满足生产需求，减少液位调节过程中的不稳定因素。

2.4 DCS 系统在多变量液位控制中的应用

在化工生产中，如多槽罐反应器等复杂工艺流程中，液位控制通常涉及多个变量的协调调整。多个液位传感器实时监测各个槽罐的液位，而多个调节阀则根据控制指令调整流量，以确保每个槽罐的液位处于理想范围内。以化工精馏塔组为例，精确控制不同塔板的液位对于精馏过程的效率和最终产品的质量至关重要。若塔板上的液体高度过高或过低，都会影响精

馏效率和最终产品的纯度。

DCS 系统通过多回路控制技术和优化算法，能够同时处理多个液位变量及温度、压力、流量等工艺参数。首先，构建各变量间的数学关系模型，如基于物料平衡和能量平衡的液位、流量和温度等参数的相互关系。然后，采用模型预测控制（MPC）等优化技术，基于实时工作状态和设定目标，预测各个变量的未来变化趋势，并提前调整控制参数。在涉及多个储罐的液位控制系统中，DCS 系统能够实时收集各储罐的液位反馈信号。若某个储罐液位发生变化，系统会根据数学模型和优化算法，在 0.5 秒内迅速调整相关调节阀的开度，并协调其他储罐的液位控制。

在实际应用中，需要持续优化数学模型和控制策略，以满足不同生产环境的需求。例如，在生产原料成分变化时，应及时调整模型参数，确保其准确性。DCS 系统还会定期对多变量液位控制系统进行全面性能评估，通常每周进行一次系统性能测试。根据评估结果，优化算法并调整控制参数，以确保各槽罐液位控制精度达到 $\pm 3\text{mm}$ ，从而提高整个系统的稳定性、生产效率和产品质量。

3 化工液位控制中的常见问题与对策

3.1 控制精度与响应时间的矛盾

在储罐液位控制系统中，控制精度与响应时效性之间的冲突尤为突出。为了确保液位控制的准确性，需要将液位维持在预设值附近，偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内；同时，系统也需要快速响应液位变化。在传统 PID 控制中，尽管积分参数有助于提高稳态精度，但当其过大时，积分效应可能会导致响应速度减缓，甚至出现超调，造成液位偏离预设范围。例如，当积分时间常数设置为 30 秒时，液位在稳定后的精度较高，但调节过程反应较慢，超调幅度可达到 10mm。

为了解决这一问题，自适应控制策略应运而生。该策略通过实时跟踪液位变化和流量等关键参数，动态调整 PID 参数。在液位变化较快时，系统自动降低积分时间常数，提高响应速度；当液位逐步稳定时，增加积分参数以增强精度。通过这种动态调节，能够

在确保快速响应的同时,将控制精度保持在 $\pm 3\text{mm}$ 范围内,满足化工生产对液位控制的要求。

3.2 物料性质变化对储罐液位控制的影响

在化工生产中,物料属性的变化,如密度、黏度和温度波动,对液位控制带来了挑战。以温度变化为例,液体温度每升高 10°C ,其密度可能变化 $0.05\text{g}/\text{cm}^3$,这会导致静压式液位传感器的误差增大,误差可达 $\pm 8\text{mm}$ 。同时,黏度变化可能导致流体流动特性改变,影响调节阀流量的控制效果,并延迟响应时间至 $0.3\text{--}0.5$ 秒。

为应对这些挑战,DCS 系统采用物料特性补偿模型。系统通过温度和密度传感器实时捕捉物料状态,并基于数学模型对液位测量数据和控制信号进行补偿。例如,当温度升高导致密度降低时,系统自动调整传感器数据,并相应调节阀开度,从而保持液位控制精度。

3.3 DCS 系统集成中的问题

DCS 系统的集成涉及多个技术领域,尤其是硬件兼容性和软件整合问题。不同制造商的传感器和控制器使用不同的通信协议,如西门子的控制器采用 Profibus-DP 协议,而某些国产传感器使用自定义协议。这些差异可能导致数据传输延迟,甚至丢失,延迟范围可能为 $0.2\text{--}0.5$ 秒。在软件整合过程中,由于数据格式和接口规范的不同,系统集成的复杂性增加。此外,控制算法的采样周期若与调节阀的响应时间不匹配,可能导致控制效果不佳。

为解决这些问题,在集成前需进行全面的兼容性检测,优先选择支持标准接口(如 RS-485、以太网接口)和通用协议(如 HART、Modbus)的设备。软件整合时,需统一数据格式和接口标准,确保各模块无缝连接。同时,调整控制算法参数,优化采样周期,以保证系统稳定运行和准确控制。

3.4 环境因素对液位控制的影响

储罐液位控制系统容易受到外部环境因素的干扰,如温度、湿度和振动等,这些因素可能影响液位传感器和控制器的稳定性。在高温环境下,液位传感器的电子元件可能会发生性能变化,每升高 20°C ,其零点漂移可能达到 $\pm 3\text{mm}$;高湿度条件下,传感器的绝缘性能可能受损,导致信号传输不稳定。剧烈的振动还可能使传感器的机械结构不稳定,从而影响测量精度。

为减小环境因素对系统的影响,通常会在现场安

装机柜,并配备中央空调系统,以保持机柜内的温度在 $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ 之间,湿度保持在 $40\%\text{--}60\%$ 范围内,为控制器及相关设备提供一个稳定的工作环境。同时,建议选用防护等级达到 IP65 或更高的液位传感器,能够有效防止灰尘和水流的侵入,确保传感器在恶劣环境下的稳定运行,从而提高液位控制系统的可靠性。

3.5 控制系统故障与误差分析

在 DCS 控制系统的运行中,任何故障或误差都可能对储罐液位控制的稳定性构成威胁。控制器故障可能由硬件损坏或软件错误引起,导致控制信号偏差或丢失,进而导致液位失控。传感器故障(如探头损坏或信号传输中断)也可能导致液位信号失真,影响控制决策。数据显示,约 30% 的液位异常控制源于传感器故障。

为了确保系统稳定运行,现代 DCS 系统配备了高效的故障检测模块,实时监控各组件的工作状态,并采用冗余设计保证关键设备的稳定性。例如,双冗余控制器配置可确保主控制器故障时,备用控制器能在 0.1 秒内无缝切换。此外,系统还配备了传感器自检功能,并定期通过校验算法检查传感器数据。一旦发现异常,系统会立即发出警报并切换到备用传感器,确保液位信号的准确性。定期误差分析和补偿也有助于通过对历史数据的研究,及时调整系统参数,减少设备老化和环境变化带来的误差,确保液位控制的精准性。

4 结语

基于 DCS 系统的化工储罐液位控制技术已经在化工生产中得到了广泛应用。通过对液位传感器、控制算法、调节阀协同作用以及多变量控制等关键环节的深入研究,可以显著提高储罐液位控制的精度和响应速度。通过不断优化控制策略和技术手段,DCS 系统在化工储罐液位控制中的应用前景依然广阔。

参考文献:

- [1] 白刚. 基于 DCS 废气焚烧炉优化控制的研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2014.
- [2] 裴佳林. 面向化工行业甲醇精馏装置的 DCS 系统应用研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.
- [3] 梁晓明, 任丽静, 等. 集散控制系统在化工过程控制中的应用研究 [J]. 煤炭与化工, 2011, 34(01): 66-68.

作者简介:

石传滨 (1982.04—), 男, 汉族, 山东青岛人, 本科, 中级职称, 研究方向: 仪表化工自动化。