

DCS控制系统的稳定性分析与优化策略

卢润霖

上海吴泾第二发电有限责任公司 上海 200241

摘要: DCS控制系统的稳定程度直接关乎工业生产的连续性与安全性,合理的稳定性分析手段与优化策略是保障系统平稳运行的核心依靠。本文围绕DCS控制系统稳定性的实际分析与优化展开,通过找出稳定性的影响因素、构建量化分析手段、提出具有针对性的优化策略,科学量化分析加上针对性优化可显著降低系统故障出现频率,增长系统稳定运行的周期。

关键词: DCS控制系统;稳定性分析;优化策略

引言:因为工业自动化水平的不断提高,DCS控制系统在电力、化工、冶金等领域的应用越来越普遍,系统运行的稳定性与生产效率、产品质量及生产安全直接相关,实际运行的过程里,DCS控制系统易受多种因素影响,产生波动、震荡甚至停机等不稳定现象,对工业生产的有序开展形成严重阻碍,开展DCS控制系统稳定性分析与优化策略的研究极具实用价值,通过精准识别影响稳定性的关键环节、设立科学的量化分析流程、制定可实施的优化办法,能切实提高系统运行的稳定性和可靠性。

1 DCS控制系统稳定性影响因素分析

1.1 控制回路参数设置合理性影响

控制回路作为DCS控制系统的核心组成部分,其参数设置的合理性直接影响系统的动态响应与稳定性,参数设置偏差会导致系统出现超调、震荡、稳态误差过大等不稳定问题。控制回路参数主要包括比例系数、积分时间、微分时间等,各类参数的取值范围与匹配程度需结合系统运行的实际工况确定,不能盲目套用固定标准。比例系数取值过大易导致系统响应速度过快但震荡加剧,取值过小则会使系统响应迟缓、稳态误差难以消除,积分时间过长会导致系统稳态误差无法及时修正,过短则会引发系统震荡,微分时间设置不合理会影响系统对偏差的调节精度,导致系统抗干扰能力下降。参数设置的不合理性会打破系统的动态平衡,使系统无法快速适应工况变化,进而引发稳定性问题,影响工业生产的连续运行。

1.2 系统外部干扰与内部扰动影响

DCS控制系统运行环境复杂,外部干扰与内部扰动均会对系统稳定性产生显著影响,这类干扰与扰动的随机性较强,难以提前预判,易导致系统信号失真、控制指令执行偏差。外部干扰主要来源于工业现场的电磁辐

射、温度波动、湿度变化及电源波动,电磁辐射会干扰系统信号的传输过程,导致信号衰减、失真,影响控制指令的精准传递,温度与湿度的异常波动会损坏系统硬件组件,降低组件运行可靠性,间接影响系统稳定性,电源波动会导致系统供电不稳定,引发控制器、I/O模块等核心组件的运行异常^[1]。内部扰动主要包括系统组件老化、数据传输偏差、软件运行故障,组件老化会导致其性能下降,无法正常发挥控制作用,数据传输偏差会导致控制指令与反馈信号不匹配,引发系统调节紊乱,软件运行故障会导致系统逻辑混乱,无法正常执行控制流程,进而破坏系统稳定性。

1.3 硬件设备与通信链路可靠性影响

硬件设备与通信链路是DCS控制系统正常运行的基础,其可靠性不足会直接导致系统稳定性下降,引发各类运行故障。硬件设备主要包括控制器、I/O模块、传感器、执行器,控制器作为系统的“大脑”,其运算能力、容错能力不足会导致控制指令无法及时、准确下发,I/O模块负责信号的输入与输出,其接触不良、性能衰减会导致信号传输中断或失真,传感器负责采集现场工况数据,其精度下降、故障会导致反馈数据不准确,影响系统的调节决策,执行器负责执行控制指令,其响应迟缓、故障会导致控制动作无法及时落地^[2]。通信链路作为系统各组件之间数据传输的通道,其传输速率、稳定性直接影响系统的协同运行,通信链路出现拥堵、中断、干扰等问题,会导致数据传输延迟、丢失,使系统各组件无法同步工作,进而引发系统不稳定现象,严重时会导致系统停机。

2 DCS控制系统稳定性量化分析方法

2.1 基于偏差反馈的稳定性量化指标计算

偏差反馈是DCS控制系统实现闭环控制的核心,通过量化系统输出值与设定值之间的偏差,可直观反映系

统的稳定性状态，偏差值的变化趋势能够为稳定性分析提供精准依据。在实际量化分析中，采用偏差瞬时值与偏差累积值作为核心量化指标，通过简单公式计算实现对系统稳定性的初步判断，公式如下：

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

式中 $e(t)$ 是 t 时刻系统偏差的瞬时值，其单位为相应控制量的单位； $r(t)$ 是 t 时刻系统的设定值，其单位对应控制量的单位； $y(t)$ 代表的是 t 时刻系统的实际输出数值，它的单位是对应的控制量单位，此公式通过算出设定值与实际输出结果值的差值，可直观体现 t 时刻系统的偏差情形，偏差瞬时值的绝对值越小，暗示系统当前的控制精度越高、稳定状态越好；倘若偏差瞬时值的绝对值不断增大或大幅波动，则暗示系统存在不稳定的潜在问题。

为进一步对系统长期运行稳定性做量化，引入偏差累积公式，以精准把握系统偏差的变化走势，公式如下：

$$E = \int_0^T |e(t)| dt$$

式中， E 反映系统在时间区间 $[0, T]$ 内偏差累积的数值，单位是对应控制量单位跟时间相乘； T 为量化分析所涉及的时间长度， $e(t)$ 为 t 时刻系统的偏差瞬间值，单位是对应的控制量单位，这个公式利用积分算出一段时期内偏差瞬时值的绝对值累积量，偏差的累积值越小，体现系统在这段时间内的稳定性越好，偏差累积值不断升高，说明系统的稳定性不断变差，得及时对影响因素进行排查。

2.2 系统动态响应特性的量化分析

DCS控制系统的动态响应特性是体现系统稳定性的重要标志，采用量化系统针对工况变化的响应速度及调节精度的方法，能够精准判定系统的稳定水平，防止系统出现振荡、超调这类不稳定的现象，动态响应特性的量化分析主要针对衰减系数与调节时间这两个核心指标展开，采用简易公式实现量化运算，为稳定性分析给予数据支撑，下面为衰减系数的计算公式：

$$\zeta = -\frac{\ln(\sigma)}{\sqrt{\pi^2 + (\ln \sigma)^2}}$$

式中， ζ 为这个系统的衰减系数， σ 即为系统的超调量，无计量单位，取值范围 $0 \sim 1$ ，此公式借助超调量算出系统的衰减系数，衰减系数 ζ 的取值范围直接掌控着系统的动态响应稳定性，若 ζ 处于 $0.4 \sim 0.8$ 的区间当中，系统的动态响应呈现平稳态势，不存在明显超调及震荡，稳定性达到最佳水平，当衰减系数 ζ 小于 0.4 时，系统超调的幅度太大，较易出现剧烈震荡，稳定性处于较差水平，要

是 ζ 大于 0.8 的情形，系统响应慢得明显，调节的精度欠佳，干扰系统的稳定性。

调节时间是体现系统动态响应速度的关键指标，通过量化系统从工况出现变化到达到稳定状态的时长，可判别系统对扰动的适应能力，以下在 $\pm 2\%$ 误差带条件下呈现调节时间的计算公式：

$$t_s = \frac{4}{\zeta \omega_n}$$

式中， t_s 代表系统的调节时间， ζ 就是系统的衰减系数， ω_n 作为系统的固有频率，单位为 rad 每秒，此公式凭借衰减系数与固有频率计算系统的调节时间，调节时间愈加短，说明系统针对工况变化的响应速度更快，抗干扰的本领越强，稳定性更棒，调节占用的时间过长，说明系统没办法快速适应工况变动，易出现稳定性相关的状况。

2.3 稳定性裕度的量化评估方法

稳定性裕度是衡量DCS控制系统稳定程度的核心参数，以量化系统距离不稳定状态的临界数值，可以预先判断系统的稳定性隐患，为后续优化策略的制定给予参考，稳定性裕度的量化评估主要围绕增益裕度以及相角裕度开展，结合前文公式算出的结果，通过简易换算达成量化评估，无需开展复杂的理论推导，合乎实际应用需求。增益裕度为系统达到临界稳定状态时增益的放大倍数，其量化评估以系统偏差和衰减系数的计算结果为基础，通过判断增益裕度是否在合理范围（正常为 $1.5 \sim 2.5$ ）里面，测度系统的稳定性水平^[3]，相角裕度就是系统达到临界稳定状态时相角的偏移量，其量化评估与系统动态响应特性的计算结果整合在一起，当相角裕度处在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间的时候，系统稳定性达到最佳水平，可有效抵御不同种类的干扰与扰动，通过对稳定性裕度进行量化评估，可精确识别系统稳定性存在的短板，指明后续优化的重点方向。

3 DCS 控制系统稳定性优化策略

3.1 控制回路参数整定优化

针对由控制回路参数设置不合理引起的系统不稳定问题，采用科学的参数调整方法，结合系统实际的运行工况，优化像比例系数、积分时间、微分时间这样的核心参数，达成对系统动态平衡的精准把握，参数整定优化应凭借前文偏差量化及动态响应特性的分析结果，杜绝盲目乱改，采用经验公式搭配实际调试的做法，找出最佳参数组合，PID控制器参数整定的关键公式如下：

$$K_p = \frac{K_c}{1 + \tau / T_i}$$

式中, K_p 为优化后的比例系数, 无单位; K_c 为系统临界比例系数, 无单位; τ 为系统纯滞后时间, 单位为秒; T_i 为优化后的积分时间, 单位为秒。该公式通过系统临界比例系数、纯滞后时间与积分时间, 计算优化后的比例系数, 确保比例系数与积分时间、微分时间的匹配性, 避免单一参数调整导致的系统震荡。参数整定优化过程中, 需先通过偏差累积值判断系统的稳态误差, 再结合衰减系数与调节时间, 逐步调整各参数, 确保系统偏差瞬时值控制在合理范围, 衰减系数维持在0.4~0.8之间, 调节时间最短, 同时建立参数定期校验机制, 根据工况变化及时调整参数, 避免参数漂移导致的系统不稳定问题^[4]。

3.2 抗干扰能力提升优化

针对外部干扰与内部扰动对系统稳定性的影响, 从硬件防护、信号处理、软件优化三个维度, 制定针对性的抗干扰优化措施, 降低干扰与扰动对系统运行的影响, 提升系统的抗干扰能力。硬件防护优化方面, 对工业现场的核心组件进行密封防护, 采用抗电磁辐射、耐高温、防潮的防护外壳, 合理布置硬件设备, 将控制器与大功率电气设备分开安装, 优化电源配置, 采用稳压电源与不间断电源相结合的方式, 确保硬件设备稳定运行。信号处理优化方面, 采用屏蔽电缆传输信号, 在信号输入与输出端加装滤波装置, 优化信号采样频率, 结合系统运行工况确定合理的采样间隔, 避免采样频率过高导致的数据冗余或过低导致的信号失真。软件优化方面, 开发干扰抑制程序对采集到的信号进行滤波、校正处理, 建立软件故障自检机制及时发现并修复故障, 优化软件运行流程, 减少系统资源占用, 提升软件运行效率, 确保控制指令及时执行。

3.3 硬件与通信链路冗余优化

针对硬件设备与通信链路可靠性不足导致的系统稳定性问题, 采用冗余设计优化策略, 通过增加冗余组件与冗余链路, 提升系统的容错能力, 避免单一组件或

链路故障导致的系统不稳定甚至停机。硬件冗余优化方面, 对控制器、I/O模块、电源等核心硬件设备采用双冗余配置, 主用设备与备用设备同步运行, 主用设备出现故障时备用设备可快速切换, 对传感器、执行器等现场设备采用冗余配置, 避免单一设备故障导致的反馈数据不准确或控制动作无法执行。通信链路冗余优化方面, 采用双链路或多链路传输模式, 构建环形或星型通信拓扑结构, 优化通信协议, 采用高速、稳定的工业通信协议, 定期对通信链路进行检测与维护, 及时排查故障、清理拥堵^[5]。

结语

DCS控制系统的稳定性是保障工业生产连续、安全、高效运行的核心前提, 其稳定性受到控制回路参数、干扰与扰动、硬件与通信链路等多方面因素的影响。本文通过聚焦实际分析与优化操作, 构建了科学的稳定性量化分析方法, 提出了针对性的优化策略。研究表明, 通过控制回路参数整定、抗干扰能力提升、硬件与通信链路冗余优化, 可显著提升DCS控制系统的稳定性, 降低系统故障发生率。研究可为工业现场DCS控制系统的稳定运行提供实用技术支撑, 后续可结合工业生产实际需求, 进一步优化分析方法与策略, 提升其适用性。

参考文献

- [1]周森.智能化背景下DCS控制系统安装调试的创新与实践[J].互联网周刊,2026(2):34-36.
- [2]王云芳.化工DCS控制系统在复杂工况下的稳定性提升策略[J].工程研究与实用,2025,6(21).
- [3]卢永慧.DCS控制系统升级策略与实施[J].石化技术,2025,32(11):437-438.
- [4]吴磊,吉广黎,张永兴,等.焦化工序DCS控制系统自主改造[J].自动化应用,2025,66(21):63-65.
- [5]吴尔夫.浅析火电厂热工自动化DCS控制系统的运用[J].中国设备工程,2024(10):117-119.