

化工 DCS 系统通信干扰的频谱分析与抗干扰优化

马权帅

新疆广汇新能源有限公司 新疆哈密

【摘要】化工过程控制中，分布式控制系统（DCS）的通信链路常受到复杂电磁环境影响，干扰信号频繁出现，导致控制精度与运行安全性下降。本文以 DCS 系统通信信道为研究对象，运用频谱分析方法识别干扰源特征，揭示不同干扰在频域的分布规律。基于此，提出多维抗干扰优化策略，包括滤波算法改进、通信参数自适应调整及硬件隔离优化。实验结果表明，该方法可有效降低干扰强度，提高信号完整性与系统稳定性，为化工生产安全与可靠运行提供技术支撑。

【关键词】化工 DCS 系统；通信干扰；频谱分析；抗干扰优化

【收稿日期】2025 年 8 月 17 日 **【出刊日期】**2025 年 9 月 20 日 **【DOI】**10.12208/j.jccr.20250073

Spectrum analysis and anti-interference optimization of communication interference in chemical DCS system

Quanshuai Ma

Xinjiang Guanghui new energy Co., Ltd., Hami, Xinjiang

【Abstract】 In chemical process control systems, communication links of Distributed Control Systems (DCS) are frequently impacted by complex electromagnetic environments, where interference signals often emerge, leading to reduced control accuracy and operational safety. This study focuses on DCS system communication channels, employing spectral analysis methods to identify interference source characteristics and reveal frequency-domain distribution patterns of various disturbances. Based on these findings, we propose a multi-dimensional anti-interference optimization strategy comprising filter algorithm improvements, adaptive adjustment of communication parameters, and hardware isolation optimization. Experimental results demonstrate that this approach effectively reduces interference intensity while enhancing signal integrity and system stability, providing technical support for ensuring safe and reliable chemical production operations.

【Keywords】Chemical DCS systems; Communication interference; Spectral analysis; Anti-interference optimization

引言

在化工生产过程中，分布式控制系统承担着实时监测与过程调节的核心任务。随着工业现场设备数量增加与电磁环境日益复杂，通信干扰问题逐渐凸显，频繁干扰不仅削弱了信号的准确传输，还可能引发控制回路波动甚至系统异常。通过频谱视角对干扰特征进行深入剖析，可为干扰机理的揭示提供精确依据。进一步的优化措施若能有效结合频谱分析结果，便可在源头上降低干扰影响，从而实现通信链路的稳定与控制系统的可靠运行。

1 化工 DCS 系统通信干扰现状与影响分析

化工生产过程中的分布式控制系统在保障连续性和安全性方面扮演着核心角色，其通信链路承担着数

据采集、信号传输与控制指令下达等关键任务。然而在复杂的工业环境中，大量电气设备、高压线路以及变频器的运行会形成强烈的电磁干扰，这些干扰信号通过耦合、辐射等途径进入通信通道，使得 DCS 系统中的数据帧出现畸变、丢失或延迟，导致控制回路产生不稳定波动^[1]。在高危的化工装置运行中，通信可靠性的下降不仅会影响生产效率，还可能诱发过程参数超限，引起连锁反应，造成严重的安全隐患。

在频谱层面观察干扰现象，可以发现干扰信号多呈现宽带分布或窄带突发的特征，表现为背景噪声能量密度的提升或特定频率点的异常增强。当这些频谱异常与 DCS 系统的通信频带发生重叠时，信号的信噪比显著下降，导致误码率升高。频谱分析揭示出电磁干

扰的多样性与随机性，例如工频谐波干扰往往集中在基波及倍频附近，射频辐射干扰则表现为连续宽带能量分布，而突发脉冲干扰则在时域和频域上均呈现不规则特征^[2]。这些不同来源的干扰以叠加方式作用于通信链路，使 DCS 系统在不同工况下均存在稳定性受损的可能性。频谱视角不仅能够直观刻画干扰信号的分布规律，还能为进一步的抗干扰策略设计提供精确依据。

在化工行业的实际应用中，通信干扰造成的影响已经在多个方面得到体现。控制室与现场仪表之间的数据传输延时加大，使得回路调节响应迟缓，出现超调与振荡，降低了过程控制的精度。部分工艺单元在受到干扰时，信号失真会导致执行机构接收到错误的指令，可能引发阀门误动作或泵浦异常启停。对于依赖实时监控的安全仪表系统而言，干扰造成的数据缺失甚至可能导致报警信号延迟，削弱事故防护的及时性。随着化工装置规模扩展与自动化水平提高，通信网络的复杂性持续增加，干扰问题的危害性也在不断加剧。因此，对化工 DCS 系统通信干扰进行系统性研究，并在频谱分析基础上寻求有效的抗干扰优化途径，已成为提升工业控制系统安全性与可靠性的必然需求。

2 化工 DCS 系统通信干扰的频谱特征识别与分类

在化工 DCS 系统通信过程中，电磁干扰的存在往往具有复杂性与隐蔽性，不同来源的干扰信号在频谱分布上呈现出差异化特征。通过对通信通道进行频谱检测与分析，可以直观揭示干扰信号的能量分布和频域规律^[3]。由大型电机和变频装置引起的工频谐波干扰，其频谱主要集中在基波及各次谐波点上，形成周期性增强的窄带能量峰值；而射频设备及无线信号泄露产生的干扰，则在频谱中表现为连续分布的宽带能量增强，覆盖范围较大且难以通过传统滤波方式彻底抑制。通过频谱识别，可以准确捕捉这些干扰特征，并建立与通信故障之间的对应关系，从而为后续分类与优化提供科学依据。

在分类研究中，干扰类型可按照频谱形态、能量分布以及频特性进行划分。窄带干扰常以稳定的频率点为中心，其表现形式为频谱图中若干条明显的尖锐谱线，这类干扰往往与现场开关电源、电机谐波或射频耦合有关。宽带干扰则表现为大范围频带的噪声能量提升，其在频谱上呈现连续的带状分布，常见于无线电辐射或高频开关器件的工作环境。脉冲干扰作为另一种典型形态，在频域上表现为瞬时高幅度的广泛频率扩展，常由雷电、电弧或大功率设备启停产生。这些干

扰类型在频谱特征上具有显著差异，只有通过系统的识别与分类，才能为抗干扰措施的针对性提供有力支撑。

在工程应用中，频谱特征识别不仅有助于干扰分类，还能辅助构建干扰数据库与诊断模型，为化工 DCS 系统的在线监测和故障预警提供基础。通过长时间的频谱监测，可以发现干扰信号在不同工况下的变化趋势，并将其与生产负荷、设备运行状态相结合，进一步确定干扰的来源与传播路径^[4]。在某些高压区域，脉冲干扰的频率分布与设备启停存在明显关联，而在无线通信较密集的场所，宽带干扰信号的强度则随环境变化而波动。通过这种规律性的分析，不仅能够实现干扰信号的快速识别，还能够为抗干扰优化策略提供动态参考，使得 DCS 通信系统能够在复杂环境下保持更高的稳定性与可靠性。

3 基于频谱分析的 DCS 系统抗干扰优化策略研究

在化工 DCS 系统中，通信干扰的频谱特征揭示了干扰信号的能量分布与耦合方式，这为抗干扰优化策略的制定提供了理论依据。频谱分析结果表明，不同干扰类型在频率域内具有特定规律，因而可根据这些规律设计针对性的优化措施。通过在通信链路中引入改进型滤波算法，可以对窄带干扰实现有效抑制^[5]。例如，自适应滤波器能够实时跟踪干扰频率的变化，并对特定频率成分进行削弱，从而提升信噪比。对于宽带干扰，利用带通滤波器结合数字信号处理技术，可在保留有效通信频段的同时压制噪声能量，增强系统在高干扰环境下的稳定性。频谱分析所提供的频域信息使得这些措施更具针对性，而不是依赖传统的经验性方法。

除了滤波技术，通信参数的动态调整同样是基于频谱分析的重要优化途径。DCS 系统通信协议中的调制方式、信道编码以及传输速率均与抗干扰性能密切相关。当频谱分析识别出干扰频段与信号频带发生重叠时，可以通过改变载波频率或调整调制方式来规避干扰。在部分场景中，引入扩频通信技术或正交频分复用方法，能够利用频谱扩展和多载波分离的优势降低干扰耦合程度。此外，信道编码的冗余设计在提高误码检测与纠正能力方面也具有重要意义。通过频谱指导下的参数自适应调整，DCS 系统能够在动态环境中保持通信链路的可靠性，从而保证控制指令的实时性与准确性。

在硬件层面，频谱分析为抗干扰设计的优化方向提供了参考。对频谱中能量集中区域的识别可用于指导屏蔽和接地措施的改进，减少电磁辐射的耦合路径。

通过优化布线结构、采用双绞屏蔽电缆和光纤通信方式，可以有效降低传输链路对外部干扰的敏感性^[6]。在 DCS 控制器与现场仪表之间增加隔离模块与差分放大器，也能在硬件层面抑制干扰信号的侵入。频谱数据还可用于制定电磁兼容性测试标准，使得抗干扰设计更具工程可操作性。将频谱分析与滤波优化、参数调整及硬件隔离相结合，形成一套多维度的综合抗干扰策略，不仅能够显著降低干扰强度，还能提升系统整体的稳定性与安全性。

4 通信抗干扰优化方法的效果验证与应用价值

在化工 DCS 系统的通信过程中，抗干扰优化方法的有效性需要通过实验与工程应用加以验证。基于频谱分析提出的滤波算法、参数自适应调整与硬件隔离措施，在实验环境中对比测试后表现出显著的性能提升^[7]。通过设置不同类型的干扰源，观测通信信号的频谱变化与误码率水平，可以发现优化方法能够有效降低窄带干扰峰值并抑制宽带噪声能量。信号的信噪比在多种工况下均有明显提高，系统的误码率显著下降，这说明频谱指导下的抗干扰策略具备较强的实际性与针对性。在复杂干扰环境中，通信数据的稳定传输得到了可靠保障，为化工生产的实时控制与安全防护提供了重要支持。

在工程现场的应用验证中，优化后的 DCS 系统在高压电气设备、变频驱动器与无线通信装置共存的环境中运行表现更加稳定。通过长期监测通信链路的频谱数据，可以看到干扰信号的强度在应用优化措施后明显减弱，控制室与现场仪表之间的数据传输延时缩短，信号完整性显著提升。实际运行结果表明，系统在遭遇脉冲干扰和电磁辐射叠加时，依然能够保持较高的抗干扰能力，使得控制指令传输更加准确，执行机构响应更加可靠。这种效果的验证不仅在实验室条件下成立，在工业复杂环境中同样具备可操作性与稳定性，体现出抗干扰优化方法的工程适应性。

从应用价值的角度来看，通信抗干扰优化方法的推广能够提升化工生产的自动化水平与安全保障能力。通过降低通信误码率和延迟，过程控制的精度得以增强，生产装置的稳定性也随之提高。优化措施的应用还可以减少因通信故障导致的设备误动作和能耗浪费，降低运行成本^[8]。对于涉及危险化学品的生产线而言，更强的抗干扰能力意味着更高的事故防护水平，能够

在源头上减少潜在风险。频谱分析支撑下的抗干扰优化方法不仅是一种技术手段，更是一种保障生产安全、提高管理效率和推动智能化发展的重要途径，其应用价值已经在化工行业展现出广阔前景。

5 结语

化工 DCS 系统的通信稳定性直接关系到过程控制的安全与可靠，而电磁干扰已成为制约其性能提升的关键因素。围绕通信干扰的频谱特征展开分析，能够精准识别干扰类型与规律，为优化策略提供科学依据。在滤波算法改进、通信参数自适应调整以及硬件隔离优化的多维措施下，系统的抗干扰能力得到显著提升。实验与工程应用均验证了其有效性，展现了在提升控制精度、保障生产安全与降低运行风险方面的重要价值。

参考文献

- [1] 刘伟,钟威,柳金. 重要会议场所的无线通信干扰技术[J]. 中国科技信息,2025,(17):44-46.
- [2] 岳忠义. 基于联合估计的无线通信网络干扰抑制算法分析[J]. 中国宽带,2025,21(10):115-117.
- [3] 娄艺,晁松杰,尤喜. 波动状态下光纤通信网络的入侵干扰信号定位[J]. 激光杂志,2025,46(08):157-162.
- [4] 赵太飞,王武鑫,庞健,等. 湍流环境中机载紫外光空地通信干扰链路性能分析[J/OL]. 激光与光电子学进展,1-19[2025-09-13].
- [5] 李亚鹏,马骏宇,李强,等. 可重构智能表面辅助的通信抗干扰性能优化[J]. 电信科学,2025,41(07):15-29.
- [6] 李中捷,郭海榕,邱凡. 不可靠通信下的联邦抗干扰模型优化方案[J]. 中南民族大学学报(自然科学版),2025,44(06): 826-832.
- [7] 罗朝珠. 磷化工生产中 DCS 系统信号干扰预防措施的探讨[J]. 硫磷设计与粉体工程,2025,(01):20-22+57.
- [8] 刘成,叶长波. 化工安全生产中 DCS 控制系统的升级改造研究[J]. 石化技术,2024,31(09):53-55.

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/>



OPEN ACCESS