

# Research on interference suppression strategies for field instrument signal transmission in process control systems

Ruiyang Mao Yude Zhu

Henan Yongmei Carbon Fiber Co., Ltd., Shangqiu, Henan, 476000, China

## Abstract

The process control system, as an important component of industrial automation, relies heavily on the accurate transmission of field instrument signals for its operational stability. However, under complex electromagnetic environments and multiple sources of interference, field signals are easily affected by various forms of interference such as conduction and radiation, leading to data distortion, control anomalies, and even system failures. To enhance the anti-interference capability of signal transmission, this paper systematically analyzes the types and propagation mechanisms of interference in the transmission of field instrument signals. It explores effective mitigation measures from aspects such as identification of electromagnetic interference sources, hardware shielding and isolation design, system redundancy layout, optimized grounding strategies, and maintenance management, aiming to provide feasible paths and technical support for improving the signal stability and anti-interference level of process control systems.

## Keywords

process control; field instruments; signal transmission; electromagnetic interference; suppression strategies

# 过程控制系统中现场仪表信号传输的干扰抑制策略研究

毛瑞阳 朱宇德

河南永煤碳纤维有限公司, 中国·河南 商丘 476000

## 摘要

过程控制系统作为工业自动化的重要组成部分,其运行稳定性在很大程度上依赖于现场仪表信号的准确传输。然而,在复杂电磁环境和多源干扰背景下,现场信号极易受到传导、辐射等多种形式干扰的影响,造成数据失真、控制异常,甚至系统故障。为提高信号传输的抗干扰能力,本文围绕现场仪表信号传输中的干扰类型与传播机制进行系统分析,从电磁干扰源识别、硬件屏蔽隔离设计、系统冗余布置、接地策略优化及运维管理等方面探讨有效的抑制措施,旨在为提升过程控制系统的信号稳定性和抗干扰水平提供可行路径与技术支持。

## 关键词

过程控制; 现场仪表; 信号传输; 电磁干扰; 抑制策略

## 1 引言

随着自动化水平的不断提高,过程控制系统在能源、化工、冶金等行业的应用愈发广泛,而系统中大量依赖现场仪表获取实时数据作为反馈依据,确保控制策略的闭环执行。仪表信号的可靠传输直接决定着控制系统对生产过程的感知和响应能力。然而,工业现场通常存在大量高频电气设备、大功率负载、频繁开关操作等干扰源,导致模拟量、电流环及数字信号在线传输过程中易受干扰,影响测量准确性与控制精度。传统干扰抑制手段多为局部响应式措施,难以系统解决根本问题。因此,有必要从信号源、传输链、系统结构和管理机制等多维度出发,探索更为系统、主动、高效的干扰抑制策略,以实现现场仪表信号传输全过程的有效保障。

【作者简介】毛瑞阳(1995-),男,中国河南商丘人,本科,助理工程师,从事电气、仪表及自动化控制研究。

## 2 过程控制系统中现场仪表信号传输特性分析

### 2.1 信号类型与传输模式概述

过程控制系统中现场仪表输出的信号类型主要包括模拟信号、数字信号和脉冲信号,传输模式涵盖电压信号、电流环信号、RS485等串行通信协议形式。模拟信号多为4~20mA电流形式,具有较强抗干扰能力,适用于远距离传输。数字信号则依赖于通信协议在控制器与传感器之间交换数据,常见协议包括Modbus、Profibus及CAN等,具有较高的数据传输速率和容错性能。脉冲信号用于频率量测或计数控制场景,对传输稳定性要求较高。

### 2.2 传输链路结构及其抗干扰薄弱环节

仪表信号从采集端传至控制端经历传感器输出、接线端子连接、传输电缆传递、隔离转换、电源供电等多个环节。每个环节对信号完整性和抗干扰能力的影响均不可忽视。接线端子接触电阻波动可能导致信号衰减或失真,尤其在湿

热、高粉尘环境中更易发生连接不牢问题。传输电缆长度超过 50 米时，感应噪声和线间串扰显著增加，屏蔽不良或接地方式错误将加剧干扰影响。电源干净程度直接影响信号基准稳定性，当同一电源供电多个仪表时，电源纹波噪声将通过信号地线传入控制系统，形成内部干扰环路，进而降低整体系统的抗干扰性能。

### 2.3 复杂工业现场环境下的干扰来源

工业现场环境复杂多变，常见干扰源包括电动机启停、电焊设备、变频器、电力变压器、雷击感应等强电设备及自然因素引发的电磁波辐射。电动机瞬间启动可引起电网压降与浪涌电流，幅值可达 100A 以上，对低压信号线路造成强烈干扰。变频器工作频率在 2kHz 至 16kHz 区间，产生的高频脉冲通过空间辐射或电缆耦合方式传入信号线路，引发数据抖动或误触发。电焊设备在开弧瞬间产生大量电磁脉冲，其频谱宽至上百 MHz，极易干扰模拟量信号传输。雷击感应形成的浪涌电压可在未直接击中设备的情况下，通过地线传导进入控制系统，造成信号异常甚至设备损坏。潮湿、高温、高粉尘等环境亦会使接插件、端子老化，进而诱发接触不良型干扰事件，影响信号的连续性与准确性。

## 3 电磁干扰类型及其传播路径解析

### 3.1 传导干扰与辐射干扰的生成机制

传导干扰由高频电流通过导体传播至信号链路，主要形式包括差模干扰与共模干扰。在频率范围 5kHz 至 30MHz 之间，工业现场设备产生的大量开关波动信号通过电源线及控制线传导至仪表系统。差模干扰沿两根导线之间传播，频率高达 10MHz 时易诱发传感器信号失真，共模干扰则沿导线与地之间传播，可产生超过 20V 的干扰电压。辐射干扰则由快速电流变化产生的电磁场向外辐射，作用半径在 2 米至 10 米范围内较为显著。当电缆未屏蔽或布线过长时，辐射信号在频率超过 100MHz 时易引发串扰和误码。高频干扰源多为变频器、开关电源及无线通信装置，其频谱密集，且与仪表信号频段存在重合，形成复杂干扰场，给信号传输带来极大挑战。

### 3.2 信号线与电源线干扰耦合途径

信号线与电源线之间存在电容耦合、电感耦合及阻抗耦合等路径，形成多种干扰耦合通道。在电缆间距小于 5cm、平行布线长度超过 10 米的情况下，电容耦合可导致高频电压串入低压信号线，诱发误触发与信号偏移。电感耦合主要由电流变化产生的磁场引发，特别是在开关电源瞬间启动过程中，5A 以上的电流变化将引起超过 1V 的瞬态干扰电压。阻抗耦合常见于地线共享或接地不良场景，在系统地电位差超过 2V 时，共模干扰通过回路注入信号系统，造成数据偏移与通信中断。不同路径上的耦合效应往往叠加产生复合干扰，必须在布线布局、屏蔽连接与地线设计上同时发力，才能实现有效抑制。

### 3.3 地环流与空间电场的交叉干扰问题

地环流问题主要源于多点接地结构中地电位差异所引发的回流电流，当控制柜与现场设备分别接地且电位差大于 1V 时，将产生 1A 以上的低频环流电流，通过信号屏蔽层反馈至仪表系统，引起共模电压变化，致使测量数据出现周期性跳变。空间电场干扰则源自电力设备或无线通信设备所产生的高频场能，频率可达 900MHz 以上，信号线若布设在 10 米以上裸露空间段，电场强度超过 3V/m 时即可能触发信号扰动。地环流与空间干扰作用往往叠加，形成低频与高频共存的复合干扰形态，对模拟信号尤其敏感，造成电压漂移、信号丢失与传输中断，若无良好的单点接地、屏蔽接地分离及电缆屏蔽层完整性控制，则极易引发信号系统的稳定性问题。

## 4 系统层面抗干扰能力的构建路径

### 4.1 PLC 输入通道的抗干扰冗余设计

PLC 作为过程控制系统的核心控制单元，其输入通道若未具备足够抗干扰能力，将直接影响数据采集的稳定性。通过配置滤波模块可在输入端实现 10Hz 至 1kHz 范围内的低通滤波，有效抑制高频干扰信号。在 DI 和 AI 模块设计中引入共模抑制比超过 80dB 的差分输入电路，能显著降低外部共模电压带来的信号偏移。在干扰较强的电磁环境中，采用双通道冗余输入策略，PLC 对同一信号并行采集，并设置数据一致性校验阈值，误差控制在 0.1% 以内，当某一通道信号出现扰动时，系统可自动切换至冗余通道，保持控制逻辑稳定。输入模块间采用光电隔离技术，隔离耐压达到 2500V 以上，可在电源波动频率达到 60Hz、幅度波动超过 15V 的场景下依然保持信号可靠。冗余设计不仅增强系统抗干扰强度，也为后期信号异常诊断提供技术支持。

### 4.2 通信协议容错机制与数据纠错算法

过程控制系统中数字通信占据主导地位，其稳定性直接依赖协议容错能力与数据处理机制。Modbus 协议中增加 CRC16 校验算法后可检测出 99.998% 的随机位错误，在数据包长度为 8 字节的场景下，每秒通信速率为 9600bps 时，误码率低于  $10^{-6}$ 。Profibus 协议在帧结构中引入重复确认机制，通信中出现单次丢帧后系统能在 2ms 内重新发送数据，确保周期性数据采集不中断。对于误码影响大的远距离通信，采用 Hamming (15,11) 纠错算法可在 11 位有效数据基础上纠正 1 位错误、检测 2 位错误，保证通信准确率高于 99.99%。部分系统结合时钟同步机制，实时比对时间戳，若延迟超过 15ms 即触发异常判别逻辑，实现对干扰触发型误传的预警与剔除，有效提升抗干扰能力。

### 4.3 模块化布线与分布式 I/O 策略的干扰规避作用

过程控制系统布线结构对抗干扰能力有直接影响，模块化布线方式通过将信号传输路径细分为控制柜内段、接线盒段与现场设备段，使单段电缆长度控制在 30 米以内，

降低线缆对电磁场的接受面积,从而减少感应电压。在模块间接口处引入 EMI 滤波器,其截止频率设定在 150kHz 至 10MHz 范围内,可抑制 90% 以上高频干扰信号。分布式 I/O 架构则将信号采集模块部署至现场,数据通过工业以太网或总线方式传回主控单元,相比集中式结构减少信号电缆长度 80% 以上。在实际部署中,现场 I/O 模块至 PLC 主站通信延迟控制在 5ms 以内,数据丢包率低于  $10^{-4}$ 。分布式架构允许在不同区域配置独立电源和接地系统,有效隔离地电位差引起的共模干扰,使系统在复杂现场条件下仍能保持数据传输的高稳定性和抗干扰性能。

## 5 现场维护与运行阶段的干扰管理对策

### 5.1 定期检测与记录干扰信号异常事件

过程控制系统在运行过程中常因电磁环境变化或设备老化而引发干扰问题,建立有效的干扰检测与记录机制是保障系统长期稳定运行的基础。通过配置在线信号质量监测模块,可实时采集模拟信号波形及数字信号稳定性参数,将波动超过  $\pm 0.5V$  或频繁发生误码的现象识别为异常事件,并自动记录事件发生时段、持续时间、信号变化特征等数据。在仪表接入端增设带有自诊断功能的信号隔离模块,可对传入干扰幅度超过 3V 的瞬态信号进行分级标记,辅助判断干扰强度变化趋势。将所有异常记录统一上传至后台数据库,结合事件频率与影响范围评估干扰等级,制定定期分析与评估报告,明确高风险干扰点。通过定期检测与数据积累,可为系统维护提供决策依据,提前发现隐性干扰风险,避免问题扩散至控制逻辑层面。

### 5.2 运维人员抗干扰意识与处理规范建设

现场运维人员在抗干扰管理中承担着识别、响应与修复的关键职责,加强其抗干扰意识和操作规范是提升系统运行可靠性的根本保障。在培训体系中应加入关于电磁干扰类型、传播途径及典型故障表现的模块,要求人员掌握信号异常与干扰源关联的判断逻辑,并能够对不同干扰情形采取针对性措施。在规程层面制定干扰处理操作手册,涵盖测量设备使用方法、屏蔽接地检查流程、电缆布局规范及应急处理方案,细化至每个环节的电气安全距离、电阻值参考范围和接线要求。现场管理制度中明确每季度开展一次抗干扰巡检,内容包括接地电阻测试、电源噪声测量及接插件完整性检查,巡检结果须存档备案。通过规范培训与制度化操作,确保运维人员在面对复杂干扰时具备足够的辨识能力和处

置能力,降低人为操作造成的干扰放大风险。

### 5.3 干扰源快速定位与故障排查技术支持体系完善

在复杂工业现场,干扰源往往具有隐蔽性与突发性,构建高效的定位与排查技术体系对于干扰抑制具有重要意义。通过配置便携式频谱分析仪与电磁干扰定位探头,现场可快速对疑似干扰区域进行频段扫描与强度比对,当信号峰值超过 50dB $\mu$ V 时自动触发报警标志。系统中嵌入的实时数据监控平台可对各通道波动幅值进行动态曲线记录,并设置  $\pm 10%$  为异常判定阈值,形成图谱与干扰源特征比对库,辅助定位。结合接地环路分析仪与红外热像仪,分别检测地电流分布与设备发热异常,在排查中形成电磁与热电特征的多维交叉验证,提高定位精度。建立多部门协同响应机制,自动将干扰事件推送至运维、技术与安全部门,按照预设工单流程完成处理闭环。系统性构建干扰排查技术支持平台,有助于压缩故障定位周期,提升对突发性干扰的响应速度和修复效率。

## 6 结语

现场仪表信号传输的稳定性直接关系到过程控制系统的运行安全与调节精度。在电磁环境复杂、干扰源密集的工业场景中,仅依赖单点防护手段难以实现长期可靠的信号传输保障。本文从信号链路特性、电磁干扰机制、系统设计优化及运维策略等多个层面提出系统性的干扰抑制路径,强调构建多层次、可预判、具备反馈闭环的抗干扰体系。通过软硬件协同与现场管理机制联动,不仅能够增强系统抵御复杂干扰的能力,还可为工程实践提供可复制、可扩展的技术支撑。未来,应持续推进干扰治理机制的数字化、集成化发展,以全面提升自动化控制系统的稳定性与安全性。

### 参考文献

- [1] 罗经纬.智能化仪器仪表中传感器信号无线传输技术研究[J].仪器仪表用户,2025,32(07):23-24+27.
- [2] 杨波,严刚刚.LoRa无线网关在仪表阀门信号传输的应用研究[A].首届全国石油和化工仪控设计与应用论文大赛论文集[C].中国机电一体化技术应用协会、湖北省安全生产技术协会、湖北省化学品安全协会、湖北省应急救援协会:2025:51-60.
- [3] 蔡浩晖.质量流量计信号传输方式对计量结果的影响[J].石油工业技术监督,2025,41(04):34-37+68.
- [4] 段红松,谢礼飞,肖路,杨金权.工业现场仪表温度跳变现象的分析[J].电子工艺技术,2022,43(04):234-237.