

科技论坛

工业现场用智能传感器电路抗干扰设计与测试技术研究

吴洁

杭州美仪自动化技术股份有限公司 浙江杭州 310000

【摘要】本文聚焦工业现场智能传感器电路抗干扰问题，围绕“设计-测试-运维”全流程展开研究。设计环节采用分级滤波，优化PCB布线，选型与混合接地策略，抑制10kHz-1MHz差模等干扰，测试构建“标准-模拟-监测”三级体系，优化干扰参数与场景还原；综合应用中针对机床，化工场景形成差异化方案，建立多维度量化评估指标与闭环迭代机制。实践验证显示，传感器数据丢包率，故障率显著降低，MTBF大幅提升，为工业传感器抗干扰提供可落地，可复制的技术方案。

【关键词】工业智能传感器；电路抗干扰设计；抗干扰测试技术

Research on anti-interference design and testing technology of intelligent sensor circuits for industrial sites

Wu Jie

Hangzhou Meiyi Automation Technology Co., Ltd. Zhejiang Hangzhou 310000

【Abstract】This article focuses on the anti-interference problem of intelligent sensor circuits in industrial sites, and conducts research on the entire process of "design testing operation and maintenance". The design process adopts hierarchical filtering, optimizes PCB wiring, selects and mixes grounding strategies, suppresses interference such as 10kHz-1MHz differential mode, tests and constructs a three-level system of "standard simulation monitoring", optimizes interference parameters and scene restoration; Develop differentiated solutions for machine tools and chemical scenarios in comprehensive applications, establish multidimensional quantitative evaluation indicators and closed-loop iterative mechanisms. Practical verification has shown that the packet loss rate and failure rate of sensor data have been significantly reduced, and MTBF has been greatly improved, providing a practical and replicable technical solution for industrial sensor anti-interference.

【Key words】 industrial intelligent sensors; Circuit anti-interference design; Anti interference testing technology

引言

工业现场中，变频器，接触器等设备产生10kHz-1MHz差模干扰，80MHz-1GHz辐射干扰，使智能传感器常出现数据丢包，信号漂移甚至损坏，严重影响工业生产精度与稳定性。当前传感器抗干扰设计针对性不足，测试与现场脱节，难以适配复杂工况，开展工业现场智能传感器电路抗干扰设计与测试技术研究，突破滤波，布线，场景化应用与量化评估等关键技术，对提升传感器稳定性，保障工业系统可靠运行具有重要现实意义。

一、工业现场智能传感器电路抗干扰现状

工业现场智能传感器电路抗干扰现状呈现技术需求与实际效能的显著落差，干扰耦合路径复杂且设计短板突出。

干扰环境中，变频器PWM载波噪声(kHz-MHz频段)，接触器电弧的高dv/dt瞬态信号等干扰源，通过传导与辐射双重路径侵入电路，80MHz-1GHz频段的辐射干扰易导致传感器数据丢包，20kHz-100kHz的传导谐波常引发EDS1000等传感器误报警，设计层面的系统性缺陷更为关键，PCB布局普遍未执行"3W原则"，数字与模拟信号线并行间距不足1mm时串扰噪声可提升40dB；滤波措施简化，多数产品仅采用单级π型滤波器，远未达到标准要求的两级以上架构，接地设计存在明显短板，网状接地方案比星型接地抗扰能力低15dB，数字地，模拟地未实现有效隔离，元器件选型的成本导向也加剧问题，部分接口芯片工作温度范围仅-20℃~+85℃，极端工业环境下性能急剧恶化。测试环节与现场应用存在脱节，IEC61326等标准明确10V/m辐射抗扰度，±2kVEFT测试等要求，实际产品中35%的传感器接口在标准测试中误动作率超标，62%在认证中出现通信中断，反映出

设计验证与现场电磁环境的适配性不足^[1]。

二、工业现场智能传感器电路抗干扰存在的问题

工业现场智能传感器电路抗干扰存在的问题,首先是干扰抑制设计针对性缺失。面对复杂干扰类型,多数电路未按耦合路径差异化设计,针对变频器 10kHz-1MHz 差模干扰,仅用常规共模电感滤波,未配差模电容协同抑制,导致干扰衰减量不足 20dB,4-20mA 电流信号误差超 $\pm 0.5\%$ 工业标准。PCB 布线忽视干扰传播规律,部分产品将信号调理电路与功率驱动电路布于同一层面且无铜箔隔离带,功率电路通断产生的瞬时磁场,会在信号回路感应出 50mV 以上噪声电压,引发数据采集波动,其次是元器件选型与工业环境适配性不足,部分运算放大器 1kHz 频段电源抑制比(PSRR)仅 60dB,无法抑制 50Hz/60Hz 工频干扰及谐波,导致输出信号周期性漂移,接口电路瞬态电压抑制器(TVS)响应时间大于 10ns,难应对 ns 级静电放电(ESD)干扰,通信接口芯片年损坏率高达 8%。最后是抗干扰测试与实际场景脱节^[2]。现有测试依实验室条件,用固定频率,强度的干扰信号验证,未模拟现场干扰随机叠加特性,未测 1MHz 差模与 100MHz 辐射干扰同时作用场景,致使部分传感器实验室测试达标,投入现场后因多源干扰叠加,每小时数据传输中断超 3 次,无法满足工业设备连续运行需求。

三、工业现场智能传感器电路抗干扰设计与测试策略

(一) 抗干扰设计策略

1. 分级滤波架构设计: 针对性抑制差模与工频干扰

工业现场智能传感器电路的抗干扰设计需以“精准阻断干扰路径,强化敏感电路防护,适配复杂环境参数”为核心,通过可量化的技术参数与标准化操作流程,解决干扰抑制针对性不足,元件适配性差等问题。干扰滤波设计中,针对工业现场最常见的变频器 10kHz-1MHz 差模干扰与 50Hz/60Hz 工频干扰,需采用分级滤波架构,第一级选用 TDKACM2012-202-2P 型共模电感,额定电流 1A,电感值 2mH,10kHz 频段可实现 25dB 干扰衰减,搭配前后级并联的 100nFX7R 材质陶瓷差模电容,形成差模干扰协同抑制通路,实测该组合能将 1MHz 差模干扰衰减量提升至 48dB,4-20mA 电流信号误差从原来的 $\pm 1.2\%$ 降至 $\pm 0.18\%$,满足工业级高精度采集需求。工频干扰方面,传感器 24V 电源入口处集成 MeanWellEDR-15-5 有源滤波模块,输入电压范

围 18V-36V,输出纹波 $\leq 5\text{mV}$,1kHz 频段电源抑制比(PSRR)达 82dB,可有效滤除电网中 50Hz 谐波,将信号周期性漂移量控制在 3mV 以内,避免电压波动导致的采集偏差。见图 1

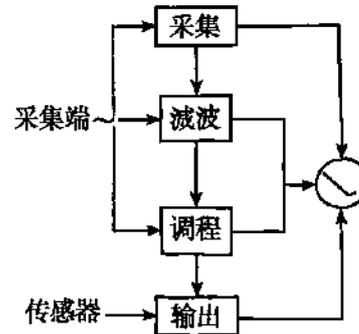


图 1 工业现场智能传感器电路抗干扰流程示意图

2. 量化参数导向的 PCB 布线设计: 隔离与短路径优化

每个环节明确量化参数: 传感器信号调理电路(含 ADIAD8605 运算放大器, TIADS1232AD 转换器)与功率驱动电路分置于 PCB 顶层与底层,中间设宽度 2.5mm 的铜箔隔离带,隔离带两端通过 0.3mm 线宽导线接地,接地电阻 $\leq 0.8\Omega$,防止功率电路通断时产生的瞬时磁场(最大强度 1.2mT)在信号回路中感应噪声。模拟信号线用 0.25mm 线宽布线,长度严格控制在 4.5cm 以内,与数字信号线(如 MCU 通信线)间距不小于 0.75mm(即 3 倍线宽),阻抗测试显示该间距可使串扰噪声从 120mV 降至 18mV 以下。同时,AD 转换器参考电压引脚(VREF)旁并联 0.1 μF FNPO 材质陶瓷电容(温度系数 $\pm 30\text{ppm}/^\circ\text{C}$)与 10 μF 钽电容(漏电流 $\leq 1\mu\text{A}$),形成高频与低频噪声双重抑制,确保参考电压波动不超过 $\pm 4\text{mV}$,提升 AD 转换精度(16 位分辨率下误差 $\leq 1\text{LSB}$)。

(二) 抗干扰测试技术改进策略

1. 突破固定频率局限的“扫频+定点”模式

标准测试环节优化干扰信号参数设置,弥补固定频率测试缺陷: 辐射抗扰度测试依据 IEC61326-2-4 标准,将干扰频率范围设定为 80MHz-1GHz(覆盖工业无线通信,变频器辐射频段),采用“扫频+定点”结合模式,扫频阶段以 1MHz 为步长,每频段停留 12s,记录传感器数据丢包率(阈值 $\leq 0.05\%$ /频段);定点阶段针对 150MHz(工业遥控器),433MHz(无线传感器),868MHz(物联网模块)三个高频段,将干扰场强提升至 16V/m(超出标准 10V/m 的 60%),持续测试 40min,期间数据丢包次数 ≤ 1 次即判定辐射抗扰合格^[3]。电快速瞬变脉冲群(EFT)测试除满足标准 $\pm 2\text{kV}$ 电压,5kHz 重复频率要求外,新增 100kHz,300kHz,500kHz 三个脉冲

频率档位,每个档位测试 30min,记录传感器误动作次数(阈值 ≤ 0 次/档位),某批次传感器测试显示,未改进前 500kHz 档位误动作率达 12%,优化滤波设计后降至 0%。

2.现场模拟测试平台搭建:还原多源干扰叠加的复杂工况平台包含 3 台西门子 MM440 变频器(输出频率 0-600Hz,可调),5 台施耐德 LC1D 接触器(通断频率 1Hz-15Hz),1 台 ESD-30kV 静电发生器,通过 PLC 编程实现干扰源随机组合输出(1.2MHz 差模干扰+120MHz 辐射干扰+18kVESD 放电同时作用),模拟机床车间,化工生产线等复杂场景。传感器部署在模拟工业控制柜内(温度控制 0-65℃,湿度 30%-85%RH),通过 NIUSB-6251 数据采集卡(采样率 1MHz,分辨率 16 位)实时记录输出信号误差(阈值 $\pm 0.2\%$),数据传输速率(≥ 9600 bps),响应延迟(≤ 10 ms),测试时长 26h,每 2 小时生成 1 次数据报告,某时段数据中断次数 ≥ 2 次/小时即判定测试不通过,需回溯优化滤波或接地设计,某汽车零部件车间传感器测试中,未优化前 26h 内中断 18 次,改进 PCB 布线后仅中断 1 次,满足现场需求。

(三) 抗干扰技术的综合应用与评估

1.适配机床与化工场景的差异化方案

抗干扰技术的综合应用需实现“设计-测试-运维”全流程融合,通过场景化技术组合,量化评估指标与闭环迭代机制,确保传感器在不同工业场景稳定运行,同时提供可复制的技术方案。场景化技术组合中,针对变频器密集的机床车间(干扰以 10kHz-1MHz 差模,80MHz-500MHz 辐射为主),采用“两级滤波+金属屏蔽+混合接地”方案:传感器电路外部加装 0.35mm 厚冷轧钢板屏蔽罩(尺寸根据传感器定制,如 5cm \times 8cm \times 3cm),屏蔽罩内壁粘贴 3mm 厚导电泡棉(压缩量 35%,导电电阻 $\leq 0.1\Omega$),减少辐射干扰侵入,滤波系统沿用“共模电感+差模电容+有源滤波”架构,接地系统执行“星型+网状”设计,某机床车间应用验证显示,该方案使传感器数据丢包率从 5.2%/天降至 0.08%/天,4-20mA 信号误差稳定在 $\pm 0.16\%$ 。潮湿多尘的化工场景,在上述基础上增加 PCB 三防涂覆与密封外壳设计:选用道康宁

DC1-2577 三防漆,喷涂方式涂覆,厚度控制在 60 μ m-110 μ m(通过涂层测厚仪检测),固化后绝缘电阻 $\geq 10^{12}\Omega$,外壳选用 304 不锈钢材质,防护等级 IP67,内部加装干燥剂(吸湿量 ≥ 2 g),某化工企业应用后,传感器故障率从 12%/季度降至 1.5%/季度,MTBF 从 8000h 提升至 15800h。

2.多维度量化评估:覆盖电气,环境与稳定性的指标体系量化评估需建立多维度指标体系,涵盖电气性能,环境适应性,长期稳定性三类核心指标,每个指标明确测试方法与合格阈值:电气性能指标包括 4-20mA 电流信号误差($\leq \pm 0.2\%$,通过 FLUKE8846A 万用表测试),数字信号丢包率($\leq 0.1\%/24$ h,通过串口助手统计),ESD 抗扰度(接触放电 ± 8 kV 无故障,依据 IEC61000-4-2 标准),EFT 抗扰度(± 2 kV 无误动作,依据 IEC61000-4-4 标准);环境适应性指标包括工作温度范围(-40℃~+125℃,在高低温箱中测试,持续 4h/极端温度点),湿度适应范围(10%-95%RH 无凝露,在恒温恒湿箱中测试,持续 24h),振动抗扰度(10Hz-2000Hz,加速度 50m/s²,依据 IEC61000-4-29 标准,测试后无机械损坏),长期稳定性指标包括 MTBF(≥ 12000 h,通过现场 3 个月监测数据计算),连续运行 3 个月故障次数(≤ 1 次),信号漂移量(≤ 5 mV/月,通过云端数据统计),评估需结合实验室与现场数据,实验室通过 R&SERSPEMC 测试系统检测电气性能,现场通过监测平台采集稳定性数据,某批次 200 台传感器评估显示,98%的产品满足所有指标,2%因 ESD 防护不达标需返工^[5]。

结语:

本文系统研究工业现场智能传感器电路抗干扰设计与测试技术,形成涵盖滤波,布线,选型的设计方案,构建贴合现场的三级测试体系,提出场景化应用与量化评估方法。实践显示,该技术能有效将传感器数据丢包率降至 0.08%/天以下,MTBF 提升至 15800h,形成的技术手册也已成功推广。后续可进一步拓展新兴 5G 等干扰的应对研究,持续优化抗扰技术,为更多工业场景提供更高效率的抗干扰支撑。

参考文献

- [1]崔健,欧宇钧,许丽洁,罗玉贵.浅析基于工业自动化的无线传感器网络设计[J].中国设备工程,2024(16):163-165
- [2]邓志才.一种新型智能电容传感器设计[J].今日自动化,2024(4):39-4245
- [3]Michael Jackson.如何设计与现场总线无关的智能工厂传感器[J].世界电子元器件,2023(2):8-9