

矿用气体传感器信号处理专用集成电路抗干扰技术研究

师 帅¹, 刘小菲²

(1. 淄博瑞安特自控设备有限公司, 山东 淄博 255100;

2. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要 针对矿用井下复杂电磁与工况环境下气体传感器信号处理专用集成电路(ASIC)弱信号链路易受干扰、测量精度失准、运行稳定性不足的核心问题, 本文系统解析了矿用井下核心干扰源的电气特征与对 ASIC 的干扰耦合传递机制, 构建了涵盖架构级、模块级、物理级的全链路抗干扰技术体系, 建立了适配矿用本质安全与电磁兼容标准的量化抗干扰性能评价体系, 明确了核心电路模块的抗干扰设计阈值与协同优化方法。基于 0.18 μm BCD 工艺的仿真验证表明, 优化后的 ASIC 可实现 ± 2 kV 电快速瞬变脉冲群干扰下输出信号波动 $\leq 0.2\%$, 宽温工况下测量误差 $\leq \pm 0.3\%$, 完全满足矿用井下设备的抗干扰与本质安全要求。

关键词 矿用气体传感器; 信号处理专用集成电路; 抗干扰技术; 电磁兼容; 弱信号处理

中图分类号: TN492; TP212

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.004

0 引言

本文聚焦矿用气体传感器信号处理专用集成电路的抗干扰核心科学与技术问题, 以矿用井下复杂电磁环境与本质安全工况约束为边界, 系统解析井下干扰源对 ASIC 弱信号处理链路的耦合机制与干扰传递规律, 构建涵盖架构级、模块级、物理级的全链路抗干扰技术体系, 建立适配矿用标准的 ASIC 抗干扰性能量化评价体系, 明确核心电路模块的抗干扰设计阈值与优化方法。核心范畴限定于矿用气体传感器信号处理专用集成电路的片上抗干扰技术设计与性能分析, 不涉及分立元件抗干扰方案、传感器敏感单元本身的抗干扰设计、非矿用场景的集成电路抗干扰研究。

1 矿用井下干扰源特征与 ASIC 干扰耦合机制

1.1 矿用井下核心干扰源的电气特征

矿用井下环境的干扰类型具有强耦合、宽频谱、多维度叠加的特征, 是制约 ASIC 稳定运行的核心外部因素, 可划分为四大类核心干扰源。一是强电磁干扰(EMI), 井下变频器、刮板输送机、开关设备等感性负载启停产生的传导与辐射干扰, 频率覆盖 10 kHz ~ 1 GHz, 电快速瞬变脉冲群(EFT)峰值可达 2 kV, 浪涌干扰峰值可达 4 kV, 符合《电磁兼容 试验和测量技术》

(GB/T 17626)系列标准的严酷等级要求, 是引发 ASIC 逻辑误动作的核心干扰源^[1]。二是电源系统干扰, 井下本质安全电源的输出纹波峰峰值可达 500 mV, 负载突变、线路压降引发的电源瞬态波动范围可达额定值的 $\pm 20\%$, 通过电源引脚耦合进入片内, 直接影响模拟电路的偏置稳定与测量精度。三是环境工况干扰, 井下 -40 $^{\circ}\text{C}$ ~ $+85$ $^{\circ}\text{C}$ 的宽温波动引发电路参数温漂, 95% RH 高湿环境引发的片内漏电流变化, 机械振动引发的封装与键合线参数微变, 均会导致 ASIC 测量基准偏移、信号处理精度衰减。四是片内自干扰, ASIC 数模混合架构中, 数字模块的高频开关动作通过衬底、电源网络耦合至前端弱信号模拟链路, 形成片内串扰, 淹没 nA 级 ~ μA 级的传感器输出弱信号。

1.2 干扰耦合机制与传递规律

基于电磁兼容理论与集成电路传输线模型, 可将矿用环境下干扰对 ASIC 的耦合路径划分为三类核心传导路径, 形成完整的干扰传递链条。一是传导耦合路径, 干扰信号通过电源引脚、传感器信号输入引脚、IO 引脚直接进入片内, 是最主要的干扰耦合路径, 占比超过 70%, 其中电源引脚耦合的干扰会通过电源网络传递至所有电路模块, 形成全链路干扰。二是辐射耦合路径, 井下空间高频电磁场通过芯片封装、PCB 走线耦合

作者简介: 师帅(1987-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 集成电路煤矿井下气体检测。

至片内金属走线,形成感应干扰电流,影响高频敏感电路的稳定运行。三是衬底耦合路径,片内数字模块的开关噪声通过硅衬底传导至模拟电路的衬底接触端,引发衬底电位波动,导致模拟电路的偏置点偏移、增益失准,是数模混合 ASIC 片内干扰的核心传递路径^[2]。

2 ASIC 全链路抗干扰技术体系构建

针对矿用环境的干扰特征与传递规律,构建架构级、模块级、物理级三级协同的全链路抗干扰技术体系,实现从顶层设计到物理实现的全流程干扰抑制。

2.1 架构级抗干扰顶层设计

架构级设计是抗干扰体系的核心基础,从顶层规避干扰耦合路径,实现全链路的干扰抑制。一是数模全隔离分区架构,将片内模拟电路与数字电路完全划分为独立的电源域与地域,模拟电源与数字电源采用独立引脚输入,片内集成 π 型滤波网络实现电源域隔离;模拟地与数字地仅在芯片封装引脚处实现单点连接,避免数字地弹噪声通过地线网络耦合至模拟链路;敏感的前端模拟电路布局在独立的隔离区内,四周设置全包围保护环接地,阻断衬底噪声耦合路径。二是全差分信号处理架构,传感器输入的单端弱信号在引脚端直接转换为差分信号,从放大、滤波到 ADC 采样的全模拟链路均采用差分结构设计,可实现 100 dB 以上的共模抑制比,有效抑制共模传导干扰与工频谐波干扰。三是斩波稳零与过采样协同架构,针对前端弱信号的 $1/f$ 噪声、直流失调与温漂干扰,采用斩波稳零技术将失调电压控制在 $2 \mu\text{V}$ 以内;针对 ADC 采样环节的带内噪声,采用过采样率 ≥ 256 的 $\Sigma-\Delta$ 转换架构,将带内噪声推至带外,提升信噪比,抑制干扰引发的采样误差。四是三模冗余数字校验架构,针对强电磁干扰引发的单粒子翻转与逻辑误动作,数字控制与信号处理单元采用三模冗余设计,通过多数表决机制剔除错误结果,确保输出数据的准确性与可靠性。

2.2 模块级抗干扰电路设计

针对核心敏感电路模块,开展定向抗干扰优化设计,实现模块级的干扰抑制与性能稳定。一是前端仪表放大器模块,采用全差分可编程增益仪表放大器架构,集成片内 RC 低通 EMI 滤波网络,截止频率匹配气体传感器的信号带宽,滤除带外高频干扰;增益调节范围覆盖 $1 \sim 1\,000$ 倍,适配不同类型矿用气体传感器的输出信号范围,避免增益过高导致的干扰放大;输入级集成过压、过流箝位保护电路,将输入电压箝位在安全范围内,抵御浪涌与 EFT 瞬态干扰对后续电路的损坏。二是带隙基准源模块,采用高阶曲率补偿带隙

基准架构,温漂系数控制在 $5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 以内,抑制宽温环境下的基准电压漂移;优化电源噪声抑制结构,在 $10 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$ 干扰频段内实现电源抑制比 (PSRR) $\geq 85 \text{ dB}$,有效抑制电源纹波干扰;基准源四周设置双层保护环,隔离衬底耦合的数字噪声,确保基准电压的稳定性。三是电源管理模块,为每个核心电路模块配置独立的低压差线性稳压器 (LDO),实现电源域的二次隔离,阻断模块间的电源串扰;LDO 采用高 PSRR 架构,全频段 PSRR $\geq 70 \text{ dB}$,抑制输入电源的纹波与瞬态波动;集成电源监测与复位电路,当电源电压超出额定范围 $\pm 15\%$ 时,触发复位与保护动作,避免电源异常引发的电路误动作与数据错误^[3]。四是高阶可编程滤波模块,片内集成 4 阶开关电容低通滤波器,截止频率可通过数字寄存器编程配置,匹配不同气体传感器的响应特性,有效滤除带外高频干扰与 50 Hz 工频及其谐波干扰,提升输出信号的信噪比。

2.3 物理级 (版图级) 抗干扰设计

物理级设计是抗干扰技术体系的最终实现环节,通过版图布局与走线优化,阻断干扰耦合路径,提升电路的抗干扰鲁棒性。一是数模分区隔离布局,模拟电路与数字电路采用左右分离的分区布局,中间设置 $20 \mu\text{m}$ 以上的隔离带,隔离带内设置高密度接地衬底接触孔,阻断衬底噪声的横向传播;敏感的前端模拟电路布局在远离数字时钟模块、电源引脚的区域,避免高频噪声的直接耦合。二是电源与地线网络优化,采用多层金属构建全芯片电源网格,电源线采用宽金属走线,降低电源线阻抗与压降,减少开关噪声的传递;模拟地与数字地采用独立的地线网络,仅在芯片引脚处单点连接,避免地弹噪声的跨域耦合;每个模块的电源引脚处均集成片内去耦电容,形成低阻抗的高频回流路径,抑制电源高频噪声。三是敏感信号走线优化,差分信号采用等长、等宽、平行的差分对走线,长度差控制在 $1 \mu\text{m}$ 以内,保持差分阻抗一致性,确保共模抑制能力;模拟敏感信号走线远离高频数字时钟走线,走线交叉采用垂直交叉方式,减少串扰耦合;敏感信号采用上层厚金属走线,降低寄生电阻与电容,减少干扰感应^[4]。四是 ESD 与抗浪涌设计,所有输入输出引脚均集成双向 ESD 保护电路,满足人体放电模型 (HBM) $\pm 8 \text{ kV}$ 、机器模型 (MM) $\pm 400 \text{ V}$ 的防护要求;电源引脚集成片内瞬态电压抑制箝位电路,抵御浪涌与 EFT 瞬态高压干扰;高密度的衬底接触与阱接触设计,降低衬底电阻,抑制闩锁效应,符合矿用本质安全电路的设计要求。

3 适配矿用标准的抗干扰性能量化评价体系

结合矿用井下设备的法定标准要求,构建涵盖电气抗干扰性能、环境适应性、本质安全符合性三大维度的量化评价体系,明确评价指标、测试标准与合格阈值,为ASIC抗干扰性能的验证提供标准化依据。

3.1 核心评价维度与量化指标

1. 电气抗干扰性能维度,对标《电磁兼容 试验和测量技术》(GB/T 17626)电磁兼容系列标准与MT/T矿用产品通用技术条件,核心指标包括:电快速瞬变脉冲群抗扰度,测试等级 ± 2 kV,要求电路无逻辑误动作、输出信号波动 $\leq 0.5\%$;浪涌抗扰度,测试等级 ± 1 kV(线—线)、 ± 2 kV(线—地),要求电路无永久性损坏、性能衰减 $\leq 1\%$;静电放电抗扰度,接触放电 ± 8 kV、空气放电 ± 15 kV,要求电路无损坏、无功能异常;电源纹波抑制能力,500 mV峰峰值电源纹波下,输出信号测量误差 $\leq 0.5\%$;共模抑制比 ≥ 100 dB,电源抑制比 ≥ 80 dB。

2. 环境适应性维度,对标矿用井下宽温高湿工况,核心指标包括: -40 $^{\circ}\text{C}$ ~ $+85$ $^{\circ}\text{C}$ 全温区内,电路增益漂移 $\leq \pm 1\%$,失调电压漂移 $\leq \pm 10$ μV ,信号测量误差 $\leq \pm 0.5\%$;95% RH(无凝露)环境下,片内漏电流变化 ≤ 1 nA,电路性能无明显衰减。

3. 本质安全符合性维度,对标相关本质安全型设备标准,核心指标包括:电路最大输出电流 ≤ 100 mA,最大输出电压 ≤ 24 V,符合本质安全型电路的功率限制要求;电路无闩锁效应风险,在单一故障状态下不会产生引爆瓦斯的火花与热效应;电路在故障状态下的最高表面温度不超过 135 $^{\circ}\text{C}$,满足煤矿瓦斯环境的防爆要求。

3.2 标准化评价方法

建立“仿真验证—实验室测试—工况模拟”三级评价方法,实现全流程的抗干扰性能验证。一是流片前仿真验证,采用Spectre软件完成电路的直流、交流、瞬态、噪声仿真,验证温漂、PSRR、CMRR等核心指标;采用EMC仿真软件完成EFT、浪涌、ESD干扰的瞬态仿真,验证电路的抗干扰鲁棒性。二是流片后实验室标准测试,按照《电磁兼容 试验和测量技术》(GB/T 17626)系列标准完成电磁兼容性能测试,在高低温湿热试验箱内完成环境适应性测试,采用高精度半导体参数分析仪完成电路核心性能参数测试。三是井下工况模拟测试,在矿用设备电磁兼容模拟试验平台内,模拟井下变频器、开关设备的实际干扰环境,完成ASIC的整机工况验证,确保电路在实际井下环境中的稳定运行。

4 抗干扰设计性能验证与核心规律分析

基于上述全链路抗干扰技术体系,采用 0.18 μm BCD工艺完成ASIC的电路设计、版图绘制与流片前全功能仿真验证。仿真结果表明,ASIC核心性能指标完全满足矿用场景的抗干扰要求:前端仪表放大器共模抑制比达到 112 dB@ 50 Hz,电源抑制比达到 92 dB@ 10 kHz,输入失调电压 ≤ 2 μV ,温漂系数 ≤ 3 ppm/ $^{\circ}\text{C}$;带隙基准源温漂系数 ≤ 4 ppm/ $^{\circ}\text{C}$,全频段电源抑制比 ≥ 85 dB; Σ - Δ ADC有效位数达到 16 位,信噪比 ≥ 98 dB;全芯片在 -40 $^{\circ}\text{C}$ ~ $+85$ $^{\circ}\text{C}$ 宽温范围内,气体浓度测量误差 $\leq \pm 0.3\%$ 。

EMC仿真结果表明,在 ± 2 kV电快速瞬变脉冲群干扰测试下,电路输出信号波动 $\leq 0.2\%$,无逻辑误动作;在 ± 2 kV浪涌干扰测试下,电路无永久性损坏,性能衰减 $\leq 0.4\%$;在 500 mV峰峰值电源纹波干扰下,输出信号测量误差 $\leq 0.25\%$,所有指标均优于矿用产品标准的合格阈值^[5]。

5 结束语

本文针对矿用气体传感器信号处理专用集成电路的抗干扰核心问题,系统解析了矿用井下核心干扰源的电气特征与对ASIC的干扰耦合传递机制,构建了架构级、模块级、物理级三级协同的全链路抗干扰技术体系,建立了适配矿用本质安全与电磁兼容标准的量化抗干扰性能评价体系,通过仿真验证了优化后的ASIC可完全满足矿用井下复杂环境的抗干扰要求。本文构建的全链路抗干扰技术体系与标准化评价方法,可为矿用气体传感器专用集成电路的国产化设计提供理论与技术参考,为矿用井下本质安全型监测设备的核心芯片自主可控提供技术基础。

参考文献:

- [1] 孟凡利,祝学斌,张华,等.SnO₂气体传感器对挥发性有机物的温度调制及信号处理方法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(12):85-94.
- [2] 管海翔,陈娟,祁欣.基于高灵敏度电化学传感器的有害气体检测系统设计[J].北京化工大学学报:自然科学版,2020,47(02):107-114.
- [3] 鞠登峰,高海峰,程宇心,等.电力系统多参量灵敏感知:新型敏感材料与传感机理研究进展[J].高电压技术,2025(07):3109-3131.
- [4] 常云泽.基于煤矿顶板离层实时动态无线监测系统的设计[J].煤矿机电,2020,41(02):36-40,44.
- [5] 杨敏,张全柱,赵紫梅.高精度矿用粉尘监测系统的数据采集模块设计[J].煤炭与化工,2020,43(02):65-68,72.