

化工过程测量信号失真的系统性成因分类与抗干扰逻辑框架

张婷婷 赵国平 蒋培丰
伊泰伊犁能源有限公司 新疆 伊犁 835300

摘要：本文通过对化工过程测量信号失真的成因进行深度解构与系统性分类，创新性地提出一个三层级、全链条的“源-径-宿”（Source-Pathway-Sink, SPS）抗干扰逻辑框架。文章首先从物理本质出发，将失真成因划分为源于被测介质本身的“本体性失真”、源于测量装置自身的“结构性失真”以及源于外部环境的“侵入性失真”三大类别，并对每一类别下的具体机理进行了详尽阐述。在此基础上，构建了SPS抗干扰逻辑框架，该框架强调从干扰源的抑制、传播路径的阻断到接收端（信号宿）的防护与校正，形成一个闭环、协同、纵深的防御体系。最后，文章论述了支撑该框架落地的三大核心支柱：基于失效模式与影响分析（FMEA）的前瞻性风险评估、贯穿仪表全生命周期的标准化工程实践，以及融合先进信号处理算法的智能诊断与校正技术。本研究为提升化工过程测量系统的鲁棒性与可靠性提供了坚实的理论基础和清晰的实践路径。

关键词：化工过程；测量信号失真；系统性成因；抗干扰；SPS框架

引言

化工生产依赖对温度、压力、流量等工艺参数的精确感知，测量信号的真实性和完整性直接决定装置安全与效率。然而，化工现场存在大型电机、变频器、电焊机及复杂接地系统引发的强电磁干扰，以及静电等噪声源，使微弱信号易被淹没或扭曲。传统抗干扰措施（屏蔽、滤波、隔离）虽有效，但缺乏系统性协同，难以应对复合型干扰。更复杂的是，信号失真不仅源于外部“入侵”，还可能来自介质特性变化或测量装置在设计、选型、安装、维护中的固有缺陷。这些“内生性”失真与“外源性”干扰交织，使故障追溯异常困难。因此，亟需一种系统性思维，对信号失真的所有潜在成因进行全景式扫描与科学分类，并构建覆盖全面、可操作性强的抗干扰整体解决方案。本文旨在为工程技术人员提供这一认知工具与方法论。

1 测量信号失真的系统性成因分类

为了从根本上解决信号失真问题，必须首先对其成因进行全面、系统的梳理。本文摒弃了传统上简单区分“内部”与“外部”干扰的二分法，而是从信号产生、传输到接收的全链条视角，将失真成因划分为三大相互关联又各有侧重的类别：本体性失真、结构性失真和侵入性失真。

1.1 本体性失真：源于被测介质的本质属性

本体性失真是指由于被测介质自身的物理状态、化学组成或流动特性发生变化，导致其与测量原理之间预

设的物理关系发生偏离，从而在信号源头就产生了失真。这类失真并非由仪表故障或外部干扰引起，而是反映了被测对象的真实复杂性。（1）物性参数漂移：许多测量原理都建立在介质物性参数（如密度、粘度、介电常数、声速、热导率等）恒定的假设之上。例如，科里奥利质量流量计的测量精度高度依赖于流体的密度；雷达液位计的回波强度受介质介电常数的直接影响。当介质组分发生变化（如原油含水率波动、混合气体比例调整）或温度、压力剧烈变化时，这些物性参数会随之改变，若仪表未能及时补偿，必然导致测量结果偏离真实值^[1]。（2）相态与界面异常：在涉及多相流（气-液、液-固、气-固）的测量中，相态分布的不均匀性是导致失真的主要根源。例如，在测量含有大量气泡的液体流量时，涡街流量计可能因漩涡脱落不稳定而读数偏低；在界位测量中，乳化层的存在会使电容式或射频导纳式液位计无法准确识别清晰的分界面，造成信号模糊或跳变。（3）过程动态效应：快速变化的工艺过程本身也会对测量造成挑战。强烈的脉动流会使压力变送器的膜片产生共振，导致输出信号出现高频振荡；在快速启停或负荷大幅调整的工况下，热电偶因热惯性而产生的响应滞后，会使其读数严重偏离实际温度。

1.2 结构性失真：源于测量系统的内在缺陷

结构性失真是指由于测量装置（包括一次元件、引压管路、电缆、接线端子等）在设计、制造、选型、安装或维护等环节存在的固有缺陷或不当操作，所引入的

系统性误差。这类失真与外部环境无关，纯粹是系统自身的问题。（1）仪表选型与匹配不当：这是最常见的结构性失真来源。例如，在高粘度、易结晶的介质中选用普通压力变送器，引压管极易堵塞，导致信号迟滞甚至完全失效；在存在强振动的场合使用玻璃转子流量计，其浮子位置会因振动而抖动，造成读数不稳定。仪表的量程、精度等级、材质、防爆等级等若与实际工况不匹配，都会埋下失真的隐患。（2）安装与施工缺陷：“三分仪表，七分安装”道出了安装质量的重要性。孔板流量计上下游直管段长度不足，会破坏流速分布，严重影响测量精度；热电阻（RTD）保护套管插入深度不够，无法真实反映介质温度；信号电缆与动力电缆未按规定分层敷设，甚至同槽敷设，为后续的电磁干扰埋下了伏笔。这些看似微小的施工瑕疵，往往是信号失真的罪魁祸首。（3）维护与校准缺失：任何测量仪表都有其生命周期，随着时间推移，其性能会逐渐劣化。膜片老化、电子元器件漂移、密封件失效等问题会悄无声息地引入误差。若缺乏定期的维护保养和严格的周期性校准，这些微小的偏差会不断累积，最终导致信号严重失真。此外，不正确的零点迁移、量程设置等操作失误，也会直接导致输出信号错误。

1.3 侵入性失真：源于外部环境的耦合干扰

侵入性失真是指外部环境中的各种能量（主要是电磁能）通过不同的物理路径耦合进入测量回路，叠加在有用信号之上，从而造成信号污染。这是传统抗干扰研究的重点，也是化工现场最普遍、最复杂的失真类型。

（1）传导性干扰：干扰能量通过电源线或信号线直接传导进入仪表。这通常由电网中的谐波、电压骤降/骤升、雷击浪涌等引起。劣质的电源或共用同一电源回路的大功率设备启停，都会通过电源线将噪声注入到敏感的测量电路中。（2）电感性（磁场）耦合干扰：当信号电缆与大电流动力电缆平行敷设时，动力电缆周围交变的磁场会在信号回路中感应出电动势（根据法拉第电磁感应定律），形成所谓的“串模干扰”或“横向干扰”^[2]。这种干扰的强度与平行敷设的长度、电流大小及两者间距成正比。（3）电容性（电场）耦合干扰：高压动力电缆与信号电缆之间会形成分布电容，高压电缆上的高电位会通过这个电容向信号线耦合电荷，形成干扰电压。这种干扰在高阻抗信号回路（如热电偶）中尤为显著。（4）地环路干扰：当系统中存在多个接地点，且各接地点之间存在电位差时，就会形成地环路。这个电位差会驱动电流在信号电缆的屏蔽层或信号回路中流动，产生一个叠加在有用信号上的共模干扰电压。在大型联合装

置中，由于接地网庞大复杂，地电位差问题尤为突出。

（5）辐射性干扰：强大的电磁辐射源（如大功率无线电发射塔、高频焊接设备、变频器的IGBT开关）会以电磁波的形式向空间辐射能量，信号电缆如同天线一样接收这些能量，并将其转化为电路中的干扰信号。

2 “源-径-宿”（SPS）抗干扰逻辑框架的构建

面对上述错综复杂的失真成因，零敲碎打的抗干扰措施已显得力不从心。为此，本文提出一个系统性的“源-径-宿”（Source-Pathway-Sink, SPS）抗干扰逻辑框架。该框架将整个测量系统视为一个信息流通道，从干扰的产生（源）、传播（径）到最终作用（宿）的全过程入手，构建一个纵深防御体系。

2.1 源头抑制：消除或减弱干扰的产生

这是最根本、最有效的抗干扰策略，即在干扰尚未产生或刚刚产生时就加以控制。（1）针对本体性失真：源头抑制意味着深入理解工艺过程，选择对物性参数变化不敏感或具备自补偿能力的先进测量技术。例如，选用不受密度影响的科里奥利质量流量计替代依赖密度补偿的体积流量计；对于多相流测量，采用基于多传感器数据融合的软测量技术来克服单一传感器的局限性。（2）针对结构性失真：源头抑制体现在严谨的工程设计与采购环节。通过详细的工况分析和仪表规格书（Instrument Specification）审查，确保所选仪表在原理、材质、性能上与应用环境完美匹配。推行基于标准的设计规范，从源头上杜绝选型错误^[3]。（3）针对侵入性失真：源头抑制要求对工厂内的主要干扰源进行识别和管理。例如，为大功率变频器加装输入/输出滤波器，抑制其产生的谐波和 dv/dt 噪声；优化电气系统设计，减少不必要的大功率设备启停冲击；对高频设备采取局部屏蔽措施，限制其电磁辐射范围。

2.2 路径阻断：切断或削弱干扰的传播通道

当无法完全消除干扰源时，阻断其传播路径成为关键防线。（1）物理隔离：严格遵守电缆敷设规范，将信号电缆与动力电缆分开敷设在不同的桥架或导管中，并保持足够的安全距离。利用金属隔板或独立的电缆沟进一步增强隔离效果。（2）电磁屏蔽：为信号电缆选用高质量的双层屏蔽（如铝箔+编织网）电缆，并确保屏蔽层在单端（通常在控制室侧）可靠接地，以有效泄放电容耦合的干扰电流。对于特别敏感的仪表或区域，可考虑使用金属穿线管或屏蔽室进行整体屏蔽。（3）接地优化：实施“一点接地”或“混合接地”策略，精心设计全厂的接地系统，尽量减小不同接地点之间的电位差，从根本上瓦解地环路的形成条件。确保所有仪表外壳、

电缆屏蔽层、机柜等都连接到统一、低阻抗的参考地。

2.3 宿端防护与校正：增强接收端的免疫力与纠错能力

作为最后一道防线，宿端防护旨在提高测量系统自身抵抗干扰的能力，并对已经侵入的干扰进行识别与校正。（1）硬件防护：在仪表输入端增加硬件滤波电路（如RC低通滤波器），滤除高频噪声；采用信号隔离器（Isolator），切断地环路并提供电气隔离；选用具有高共模抑制比（CMRR）和高电源抑制比（PSRR）的仪表，增强其对共模干扰和电源波动的免疫力^[4]。（2）软件与算法校正：利用数字信号处理（DSP）技术，在控制系统或上位机软件中实施更高级的滤波算法（如卡尔曼滤波、小波去噪），在保留信号有效成分的同时，精准剔除噪声。开发基于机理模型或数据驱动的智能诊断算法，能够实时识别信号是否失真，并根据失真类型（如漂移、突变、周期性噪声）自动进行补偿或给出报警提示。

3 支撑 SPS 框架落地的核心支柱

要将SPS抗干扰逻辑框架从理论转化为实践，需要三大核心支柱的强力支撑。

3.1 基于FMEA的前瞻性风险评估

在项目设计初期，就应组织跨专业团队（工艺、仪表、电气、安全）开展针对测量回路的失效模式与影响分析（FMEA）。系统地识别每个测量点可能面临的本体性、结构性和侵入性失真风险，评估其发生的可能性和后果的严重性，并据此制定优先级明确的预防与探测措施。这种前瞻性的风险管理，能将抗干扰工作从事后补救转变为事前预防。

3.2 贯穿全生命周期的标准化工程实践

抗干扰不是某个阶段的任务，而是贯穿于仪表选型、设计、采购、安装、调试、运维直至报废的全生命周期。必须建立并严格执行一套覆盖全流程的标准化作业程序（SOP）和质量控制点。例如，在安装阶段，设立专门的“仪表安装质量检查清单”，对直管段、伴热、接地、电缆敷设等关键项进行逐一确认；在运维阶段，

将抗干扰性能检查纳入预防性维护计划。

3.3 融合先进算法的智能诊断与校正技术

随着工业物联网（IIoT）和人工智能（AI）的发展，为宿端防护与校正提供了强大的新工具。通过在边缘设备或云端部署智能算法，可以实现对海量历史数据和实时数据的深度挖掘，建立正常工况下的信号“指纹”模型。一旦在线信号偏离该模型，系统即可自动判断失真类型，并启动相应的校正程序或发出精准的故障预警，极大地提升了测量系统的自主健康管理和容错能力。

4 结语

化工过程测量信号失真问题的复杂性，决定了其解决方案必须超越单一技术的局限，走向系统化、体系化的综合治理。本文提出的“本体性-结构性-侵入性”三元成因分类法，为全面、深刻地理解失真根源提供了清晰的认知地图。在此基础上构建的“源-径-宿”（SPS）抗干扰逻辑框架，则为工程实践指明了一条从被动防御到主动免疫、从局部修补到全局优化的战略路径。通过强化基于FMEA的风险评估、推行全生命周期的标准化工程实践，并拥抱智能化的诊断与校正技术，化工企业能够系统性地提升其测量系统的信号完整性与可靠性，为装置的安全、稳定、长周期、高效益运行构筑起一道坚不可摧的“感知防线”。这不仅是技术层面的进步，更是工程管理理念的一次深刻革新。

参考文献

- [1]仲正华.计算机自动测量和仿真模拟系统在化工过程的研究[J].塑料工业,2024,52(2):171.
- [2]张玉鑫.煤化工流量计测量误差的统计分析与校正方法[J].中国设备工程,2025,(21):128-130.
- [3]卢尚勇.差压测量在化工行业中的应用与分析[J].仪器仪表与分析监测,2024,(4):50-53.
- [4]孙哲衍.基于机器学习的化工软测量建模研究与应用[D].淮阴工学院,2024.DOI:10.27944/d.cnki.ghygy.2024.000027.