

# 电磁干扰治理研究与实践

张嵩彪 季杰 张凤林

中船集团第703研究所无锡分部，江苏无锡，214151；

**摘要：**本文针对某电力系统联调试验中出现的电磁干扰问题，通过系统分析干扰源，提出了接地、屏蔽和滤波三方面的综合治理方案。实验结果表明，优化接地系统、加强屏蔽措施以及安装电源滤波器能有效降低电磁干扰，显著提高数据采集系统的稳定性和准确性。本研究为类似工业环境中的电磁兼容设计提供了实践参考。

**关键词：**电磁干扰；抗干扰接地；屏蔽；滤波

**DOI：**10.69979/3041-0673.26.03.093

## 引言

在高压直流电力系统联调试验中，电磁干扰（EMI）是导致数据采集系统失真的重要因素。某次电力系统联调试验过程中，数采系统因电磁干扰出现高幅值毛刺，严重影响测试结果的可靠性。为解决这一问题，本研究从干扰源分析入手，通过接地整改、屏蔽优化和滤波措施三方面进行综合治理。本文旨在通过综合治理措施，抑制干扰源，提升系统性能，并为未来项目提供参考。研究基于试验平台设备布置和实测数据，采用系统化整改方法。

## 1 研究背景

随着新能源装备与高压直流电力系统的快速发展，工业试验环境面临的电磁兼容（EMC）挑战日益严峻。据《2024全球工业电磁干扰白皮书》统计，电力电子设备密集场景下电磁干扰问题导致的测试故障率高达32%<sup>[1]</sup>，其中高压直流系统联调试验因高功率开关器件（如IGBT）瞬态响应和变频器高频谐波辐射，成为电磁干扰重灾区。电压/电流传感器等精密采集设备抗干扰能力弱，易受传导干扰和辐射干扰影响，导致信号基线漂移或非线性失真。

本文研究对象作为高压直流电力系统联调试验的核心试验平台，在近期两个型号的联调试验中，数采系统频繁遭遇电磁干扰，表现为动态波形出现高幅值毛刺，严重影响了测试数据的准确性与设备可靠性。

## 2 问题分析与干扰源识别

分析联调试验中数据波形，数采系统采集的电压/电流波形出现高幅值毛刺，毛刺幅值最高达正常信号幅值的300%，导致有效信号被淹没。传感器输出信号存在

±5%的基线偏移，表现为非线性失真。

为识别出干扰源和为后续治理提供数据支撑，进行了电磁兼容测试，分别对试验平台内采集柜、传感器柜等设备进行了EMC相关的传导测试和辐射测试。辐射测试：使用RE102标准（10kHz-1GHz），测量柜内设备（如数采柜、传感器柜）的辐射发射信号，识别变频器、开关电源等产生的谐波。传导测试：针对电源线传导干扰，通过对比滤波器输入输出端噪声，评估电网杂波对敏感设备（如传感器）的影响。测试设备包括频谱分析仪和电场探头，所有数据源自现场实测。

### 2.1 辐射测试详细分析

辐射测试旨在量化设备通过空间辐射的电磁干扰，核心干扰源为变频器、开关电源等高频设备。测试方法遵循RE102标准，天线位置为设备正前方1m处，垂直极化测量。

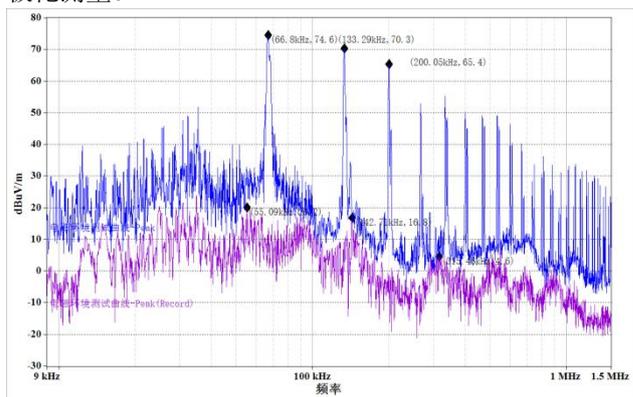


图1 采集柜处辐射测试曲线图（曲线1：辐射曲线。曲线2：环境底噪）

图1显示采集柜在9kHz-1.5MHz频段的辐射信号，频谱呈现65kHz间隔的尖峰群（基频65kHz），峰值电场强度达85dB $\mu$ V/m。一般此类信号是基频频率65kHz信号的高次谐波导致的干扰信号，可能由变频器的高频

开关或开关电源的开关频率产生的。结合场地设备布置，并结合各设备提供的单体 RE102 测试数据，显示工作状态下变频器装置的辐射发射曲线与图 1 吻合，证实变频器是主要辐射干扰源。干扰信号通过电缆辐射至空间，干扰高灵敏度采集设备。

## 2.2 传导测试详细分析

传导测试针对通过电源线传导的干扰，测量动力柜至分设备（传感器柜、数采柜）的噪声传递。测试方法为电源线噪声扫描，频段覆盖 25Hz-30MHz。

动力柜电源线传导干扰：图 2 为试验平台供电力柜内数采柜供电支路 L 线的传导发射试验曲线图。

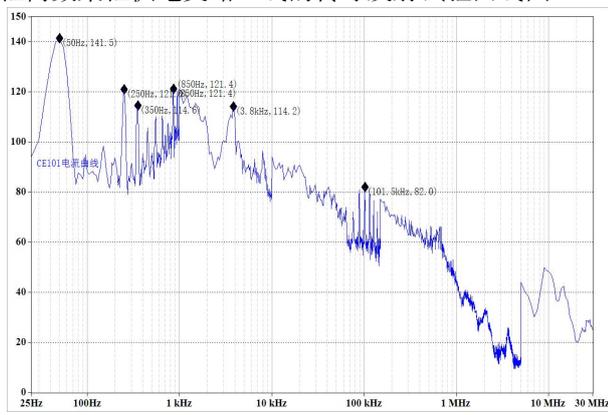


图 2 电源 L 线传导发射试验曲线图

曲线在低频段（20Hz~1kHz）：存在显著高电平尖峰，随频率升高迅速衰减，在 50kHz 频点噪声幅值达 141.5dB μV。中高频段（1kHz~30MHz）：整体呈下降趋势，但局部频点（如 3.8kHz、101.5kHz）有突变波动。整体显示电网存在显著传导杂波，通过电源线耦合至数采柜。

低频段（20Hz~1kHz）干扰为明显的 50Hz 工频耦合，信号可能通过电源线或接地回路引入，或者设备内部（数采柜）大电流器件（如电源模块等）的纹波放大。需排查电源滤波器选型是否不足、接地阻抗是否过高、电缆屏蔽层是否未正确接地。

中频段（1kHz~100kHz）波动干扰可能为开关电源（SMPS）谐波（如 100kHz 开关频率的 1 次/2 次谐波）、DC-DC 转换器的纹波，或数字电路的时钟辐射耦合到电缆。需排查：开关器件（MOSFET、二极管）的 dv/dt 噪声、PCB 布局中敏感信号是否靠近电源线。

高频段（>100kHz）衰减趋势符合传导发射的自然衰减特性（随频率升高，线缆阻抗匹配变化，且高频信号易被寄生参数衰减），但末端（10MHz~30MHz）的波

动可能来自外部电磁环境噪声（如射频信号串扰）。

干扰信号分析结果为低频段（尤其是 50Hz）的超高电平是核心问题，需优先排查电源纹波和接地缺陷；中高频段的局部尖峰可能与开关电路谐波相关。结合 EMC 测试标准，通过滤波、接地、布局优化等措施，可有效降低传导发射干扰。

传感器柜电源线干扰验证：图 3 和图 4 分别展示电压传感器柜和电流传感器柜电源线试验曲线。

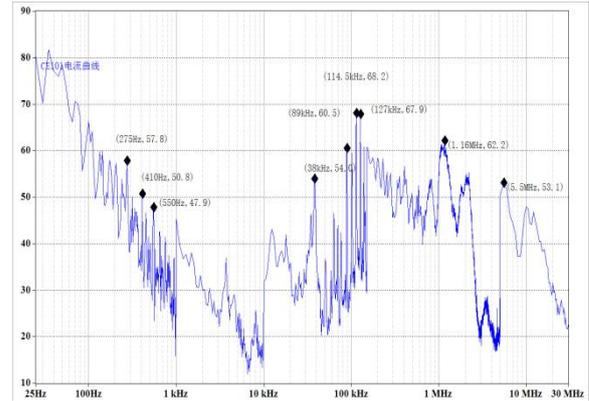


图 3 电压传感器柜电源线试验曲线图

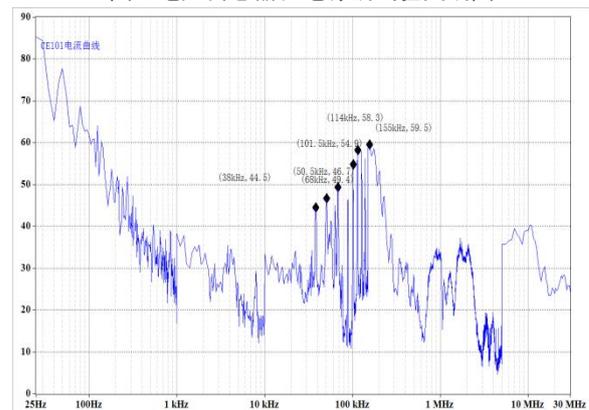


图 4 电流传感器柜电源线试验曲线图

两图在 50Hz 频点噪声幅值最大，与图 2 趋势一致，验证干扰源自动力柜电网传导。100kHz 高频段形成显著谐振峰，表明此处存在电路谐振（如电源滤波器的 LC 谐振、线缆分布参数引发的谐振），导致阻抗降低、信号增大。需优化滤波器设计，或在 PCB 布局中缩短线缆长度以降低分布电感，针对性优化 EMI 抑制元件（滤波器、磁珠、屏蔽）及接地策略。

## 2.3 干扰源分析

根据上述测试结果和分析，干扰源主要分为变频器干扰和电网传导干扰，两类干扰具有独特的频谱特征和产生机制。

### 2.3.1 变频器干扰

变频器是核心干扰源，在推进电机调速过程中产生高频谐波。分析表明，变频器开关器件（如IGBT）的快速切换（ $dI/dt$  高）导致宽带噪声，基频约为65kHz，并产生高次谐波。变频器在运行状态时，控制舱正前方1m处的垂直极化天线测量到显著尖峰，频率覆盖9kHz-1.5GHz。测试数据显示：电流传感器柜内辐射发射信号呈现65kHz间隔的尖峰，峰值电场强度达约80dB  $\mu V/m$ ，超出GB/T 17799.1限值20dB，验证了干扰耦合。

### 2.3.2 电网传导干扰

电网电源线传导杂波是另一主要干扰源，影响传感器电源稳定性。测试显示动力柜电源线在未滤波时，传导噪声幅值高达141.5dB  $\mu V$ ，尤其在50Hz频点。此干扰通过电源线传输到分设备，如电压传感器柜和电流传感器柜，曲线趋势与动力柜一致。电网中的杂波传导至传感器电源，导致模拟电路（如运放和ADC）的参考电压漂移 $\pm 5\%$ ，引起信号转换误差，影响数据稳定性。

### 2.3.3 干扰耦合途径

变频器谐波干扰（辐射）与电源传导噪声耦合，通过地环路、屏蔽漏洞、滤波缺失三重路径致数据失真。

## 3 治理措施和验证优化

根据电磁兼容测试及相关干扰源、干扰耦合路径分析，结合试验平台内试验设备的布置，指定整改措施，措施主要涉及接地、屏蔽和滤波三个方面。

### 3.1 接地整改

接地对于电子设备的正常运行起到重要的支撑作用，有效地消除静电、电磁辐射和共模干扰，提高系统的抗干扰能力<sup>[2]</sup>。接地是EMC设计的基础，其核心在于降低接地阻抗和消除地电位差。根据电磁兼容测试报告，接地问题主要表现为接地电阻过大和地环路干扰。整改措施包括：

1. 完善接地系统：重新检查并优化数采系统的接地进线线路，测试接地电阻小于1欧姆。对于关键设备，采用单点接地方式，避免多点接地形成地环路。单点接地通过集中接地路径，减少地环路电流，从而抑制电磁干扰。地环路形成时，变化的磁场会感应出噪声电压，单点接地可阻断环路，降低干扰。

2. 增加接地保护：在数采柜、传感器柜等的金属外壳上，增加接地保护线，确保设备在正常运行和故障情况下，都能有效接地，防止静电积累和电磁泄漏。

### 3.2 屏蔽整改

屏蔽基于电磁屏蔽理论，核心是法拉第笼原理：导电或导磁材料形成闭合路径，衰减电磁场。屏蔽效能取决于材料导磁率、厚度和缝隙处理。

1. 优化屏蔽结构：对数采柜的屏蔽外壳进行全面检查，在壳体门的位置首先清除表面的油漆，涂覆导电漆，在门内侧安装导电橡胶条、簧片或者金属丝网条，金属泡棉等对门建立完整的屏蔽闭环，对于通风处在空间允许的条件下选择安装通风波导板或者在内侧壁上安装金属网，以达到屏蔽效果为准，整个壳体内部采用高导磁率的屏蔽材料，提高屏蔽效果。导磁率高的材料能在极低频率下达到较高屏蔽效率，这些材料的导磁率会随着频率增加而降低<sup>[4]</sup>。在对电缆接口处，采用屏蔽接头和屏蔽线缆，确保信号传输过程中的屏蔽完整性。

2. 加强内部屏蔽：在数采柜内部线路进行屏蔽保护措施，安装防波套，达到线路屏蔽的效果，对易受干扰的部件和电路，增加局部屏蔽措施。使用金属屏蔽罩将敏感电路封装起来，减少内部电磁干扰的相互影响。

3. 对电源线和数据传输线区别分开，进行必要的整理和理顺，加装防波套，避免串间干扰。

### 3.3 滤波整改

基于电磁兼容测试结果分析，滤波整改的核心在于抑制传导噪声，本次整理主要针对干扰最为明显的低频段的50Hz工频耦合设计安装电源滤波器。在数采柜和传感器柜的电源输入安装滤波器，滤波器额定频率为50/60Hz。电源滤波器对电网及设备双向传导的电磁干扰信号有很强的抑制作用，对电源功率几乎不产生衰减，能有效地防止干扰通过电网影响其他用电设备，维护电网安全<sup>[3]</sup>。图5为安装电源滤波器后电源输入输出传导试验曲线。

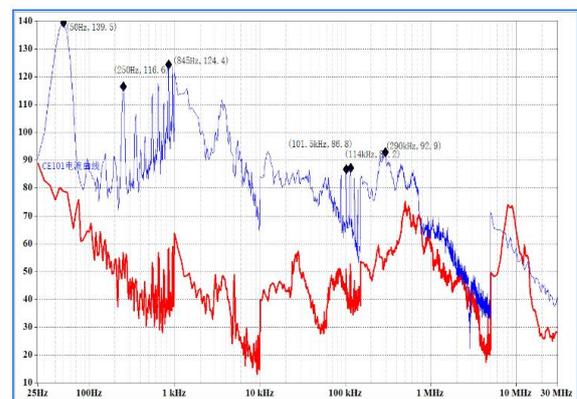


图5 动力柜电源线-滤波器输入输出端传导曲线

相比输入端，滤波器输出端干扰信号大幅度下降，最高可达到 60dB，系统在各个频率段的电磁干扰都得到了有效抑制，测量数据的稳定性和准确性有较大的提高。

### 3.4 整改后效果

图6为整改完成后数采一路数据输出波形的前后对比图。

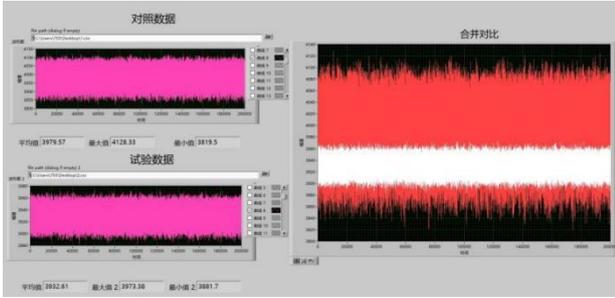


图6 数采柜整改后一路数据对比图

由图可知，通过优化接地、增强屏蔽及安装电源滤波器，干扰能量降低 90%，数据失真率控制在  $\pm 0.1\%$ 。

### 4 总结

通过接地、屏蔽和滤波综合治理，试验平台电磁干扰问题得到显著改善，干扰信号降幅最高达 60dB，数据

准确性提升。理论分析表明，单点接地减少地环路、屏蔽增强衰减电磁场、滤波抑制传导噪声，符合 EMC 设计原则。未来工作包括加强日常维护、定期 EMC 检测，并在新系统设计中集成 EMC 因素，从源头预防干扰。本次治理过程为后续项目提供了实践和理论支持。

### 参考文献

- [1] Global EMI Impact Report 2024, EMC Standards Association.
- [2] 杨聪聪. 电磁兼容系统中的接地技术应用[J]. 电子技术, 20204, 53(02): 316-317
- [3] Xiao P, Qiu Y F, Liu Z, et al. A Method of Analyzing the Impact of the Wiring Parameters on the Electromagnetic Coupling to PCB Inside Electronic Equipment[J]. 2019.
- [4] 李建利. 电磁干扰产生以及屏蔽技术[J]. 中国科技博览, 2014, 000(036): P. 361-361.

作者简介：张嵩彪，男，汉，1986.6.2，江苏无锡，高工，大学本科，电气工程及其自动化。