

多级电压互感器的电磁兼容性能优化与抗干扰设计

林岸彬¹ 林茂财² 林茂源³ 刘强志³ 王园凯⁴

1.慧泽电气有限公司 浙江 温州 325000

2.浙江纽泰克互感器有限公司 浙江 温州 325000

3.浙江齐特电气有限公司 浙江 温州 325000

4.浙江海江电器有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：在电力系统智能化、数字化转型的关键阶段，多级电压互感器作为电力测量、保护与控制的核心枢纽，其运行稳定性直接决定电力系统的安全可靠水平。电磁兼容性能是衡量该设备运行质量的核心指标，而复杂电磁环境易引发干扰问题，导致测量精度下降、保护装置误动等风险，威胁电网安全。本文以多级电压互感器电磁兼容性能优化为发展目标，系统阐述电磁兼容基础理论与设备工作特性，深入剖析内外部干扰类型及传导、感应、辐射耦合等传播机制，重点从绕组结构优化、屏蔽系统强化、接地系统完善及滤波技术应用四个维度，提出针对性的抗干扰设计策略与性能优化方法。研究成果为提升多级电压互感器在复杂电磁环境下的运行稳定性提供理论支撑，对保障电力系统安全高效运行具有重要工程价值。

【关键词】：多级电压互感器；电磁兼容；抗干扰设计；性能优化；电磁环境

DOI:10.12417/2705-0998.25.21.039

1 引言

在现代电力系统中，多级电压互感器承担电压变换、信号隔离与传输的核心职能，是实现电力参数精准测量、继电保护可靠动作及系统自动化控制的基础设备。随着电网规模持续扩张，输电电压等级不断提升，系统内电气设备数量激增，致使电磁环境日趋复杂。各类设备运行中产生的电磁辐射与传导信号相互叠加耦合，形成复杂电磁干扰，对互感器正常运行构成严重威胁。一旦受干扰，互感器输出信号将失真，不仅降低测量精度，还可能引发继电保护误动或拒动，破坏电网稳定，造成重大经济损失与安全事故。因此，提升多级电压互感器电磁兼容性能、强化抗干扰能力，已成为电力设备领域的核心研究课题。深入探究其电磁兼容特性，明晰干扰根源与传播路径，提出科学优化方案，对保障电网安全稳定高效运行具有重要现实意义与工程价值。

2 多级电压互感器与电磁兼容相关理论

2.1 多级电压互感器工作特性

多级电压互感器是基于电磁感应定律工作的特殊变压器，核心功能是将高电压按比例转换为低电压，为后续设备提供标准信号。与普通互感器相比，其具备多个二次绕组或变换等级，可同时满足不同精度、不同功能的二次设备需求。当一次绕组接入被测电压时，铁芯中产生交变磁通，二次绕组感应出相应电压，其与一次电压的比值近似等于绕组匝数比。这一工作特性决定了其内部电磁耦合关系的复杂性，而绕组耦合效率、铁芯磁性能等直接影响信号传输质量与抗干扰基础能力。

多级电压互感器的运行参数直接关联其电磁兼容性能。铁芯的磁化特性决定磁场转换效率，磁滞与涡流损耗会导致铁芯发热、磁导率变化，既影响电压变换精度，又削弱对外部干扰

的抑制能力；绕组的直流电阻、漏抗及绝缘介电性能，会改变电磁能量传输效率，漏抗增大将降低绕组耦合系数，使干扰信号更易通过寄生电容传输。

2.2 电磁兼容基本理论

电磁兼容是设备或系统在电磁环境中正常工作，且不对其他设备产生超标干扰的能力，核心包含电磁敏感性（抗干扰性）与电磁干扰发射两个维度。前者指设备抵抗干扰、维持正常运行的能力，后者指设备向环境发射电磁能量的强度。只有同时满足干扰发射限值与敏感性要求，设备才具备良好电磁兼容性能。这一特性对多级电压互感器尤为重要，因其既需抵御电网复杂干扰，又需避免自身干扰影响二次设备，是保障电网信号传输链稳定的关键。

电磁干扰主要通过传导与辐射两种路径传播，在多级电压互感器中常相互转化。传导干扰通过导线、电缆等导电介质传输，如外部干扰经一次侧电缆传入互感器；辐射干扰以电磁波形式通过空间传播，被互感器绕组、外壳接收后产生干扰。实际场景中，外部传导干扰可经绕组耦合转化为内部辐射干扰，影响其他绕组输出；内部辐射干扰也可通过接线电缆转化为传导干扰，波及外部二次设备。这种转化特性使干扰传播路径更复杂，需从多维度构建抗干扰体系。

电磁兼容标准是性能衡量的核心依据，我国针对电压互感器的标准融合国际经验与电网实际，明确了不同电磁环境下的运行要求。标准既规定了互感器的干扰发射限值，避免其干扰周边设备；又明确了敏感性指标，确保其在复杂干扰下正常工作。这些标准为多级电压互感器的电磁兼容设计提供了规范框架，是优化方案落地与性能验证的重要依据，保障了设备设计、生产与运行的标准化。

3 多级电压互感器面临的主要干扰类型及传播机制

3.1 主要干扰类型

结合工作环境与结构特点，多级电压互感器面临的干扰按来源可分为外部与内部两大类。外部干扰源于电力系统其他设备、外部电气环境及自然现象；内部干扰则由设备自身结构与组件运行产生。这种分类清晰界定了干扰源头，为针对性制定抗干扰策略提供了基础——外部干扰需通过隔离、屏蔽等手段阻断传播路径，内部干扰则需从结构优化、组件选型等方面降低产生概率。

外部干扰中，高压输电线路的强电场、磁场通过静电与电磁感应干扰互感器；开关设备操作产生的过电压、过电流形成电磁脉冲，经传导与辐射双重作用冲击设备；雷电活动产生的巨大过电压、过电流，通过线路传导或空间辐射侵入，可能损坏绝缘或内部组件。这些外部干扰具有强度大、突发性强的特点，是威胁互感器安全运行的主要风险源，需重点构建外层抗干扰防线。

内部干扰源于铁芯、绕组及绝缘材料等核心组件。铁芯在交变磁场中产生的磁滞与涡流损耗，不仅导致发热，还引发磁场畸变，形成内部干扰；绕组的分布电容与漏感造成波形失真，绕组间寄生耦合进一步加剧干扰；绝缘材料老化导致介电性能下降，易引发局部放电，产生电磁辐射与脉冲信号。内部干扰虽强度不及外部，但具有持续性、隐蔽性特点，会逐步恶化设备性能，需从设计源头进行抑制。

3.2 干扰传播机制

干扰信号主要通过传导、感应、辐射三种耦合方式传播。传导耦合是干扰经一次侧、二次侧接线电缆及接地导体传入内部，如高压线路干扰经一次绕组耦合至二次绕组；感应耦合分为静电与电磁两种，前者通过寄生电容感应干扰电压，后者通过互感感应干扰电压，互感器内部绕组间、绕组与外部干扰源间的耦合均属此类；辐射耦合则是高频干扰以电磁波形式被绕组、外壳接收，转化为传导干扰影响设备运行。三种方式常叠加作用，使干扰在设备内部传播放大。

静电感应耦合由干扰源与被干扰对象间的寄生电容引发，高压线路与一次绕组、互感器内部不同绕组间的寄生电容，均会使干扰电场感应出干扰电压；电磁感应耦合则由干扰源磁场通过互感产生，干扰电流越大、变化率越高，感应电压越强，绕组与外部干扰源、内部绕组间的互感是主要耦合路径。这两种感应耦合是内部干扰传递的核心方式，尤其在多级绕组结构中，耦合关系复杂，易导致干扰在不同变换等级间扩散，需通过结构优化阻断耦合路径。

辐射耦合以电磁波为传播载体，高频干扰源的辐射能量被互感器金属部件、绕组接收后转化为传导干扰。例如，电力系统高频干扰辐射至外壳，感应出的干扰电流经接地系统传入内

部，影响核心组件。高频环境下，辐射耦合干扰尤为突出，而互感器的绕组相当于接收天线，外壳若存在缝隙则会降低屏蔽效果，使干扰更易侵入。因此，辐射耦合的抑制需结合屏蔽设计与接地优化，构建完整的电磁防护屏障。

实际运行中，三种耦合方式往往同时存在、相互叠加。外部干扰可能经传导耦合传入，再通过感应耦合在内部绕组间扩散，最终以辐射耦合形式影响外部二次设备；内部干扰也可能经辐射耦合传出，通过传导耦合污染电网。这种多路径、多形式的干扰传播，会导致互感器输出信号失真，降低测量精度与运行稳定性。因此，抗干扰设计需统筹考虑各类耦合方式，构建全方位、多层次的防护体系，才能有效提升电磁兼容性能。

4 多级电压互感器电磁兼容性能优化策略

4.1 绕组结构优化设计

绕组是电压变换的核心，其结构设计直接决定电磁耦合特性与抗干扰能力。通过优化绕组结构参数，可减少寄生耦合、降低干扰传输效率，从源头提升电磁兼容性能。绕组结构优化需结合多级变换需求，针对高压与低压绕组的不同特性制定方案，同时兼顾耦合效率与干扰抑制，实现信号传输质量与抗干扰能力的平衡。

绕制方式优化是核心手段：高压绕组采用分段绕制，减少分布电容与漏感，段间设置接地屏蔽层，抑制静电感应耦合；低压绕组采用紧密绕制，提高耦合系数，增强有用信号传输能力，减少外部干扰侵入；高低压绕组采用交错绕制，使磁场分布均匀，降低漏磁与电磁感应耦合干扰。这种差异化绕制策略，可针对性解决不同绕组的干扰问题，同时保障电压变换精度，为后续抗干扰设计奠定基础。

绕组间屏蔽层是关键防护措施：采用铜箔、铝箔等导电性能好的材料，高压与低压绕组间采用全包裹式屏蔽，确保屏蔽完整性；同一电压等级绕组间采用分段式屏蔽，灵活适配干扰场景。屏蔽层必须可靠接地，通过将感应的干扰电流导入大地，阻隔静电与电磁感应耦合，从空间上切断干扰在绕组间的传播路径，显著提升抗干扰效果。

4.2 屏蔽系统强化设计

屏蔽是抑制电磁干扰的核心手段，多级电压互感器的屏蔽系统涵盖外壳、绕组与接线电缆三大核心部分，通过全方位屏蔽设计，阻隔干扰传播路径。外壳屏蔽需兼顾结构完整性与材料性能，绕组屏蔽聚焦内部耦合抑制，电缆屏蔽则阻断传导干扰路径，三者协同形成完整的电磁防护体系，是提升电磁兼容性能的关键保障。

外壳屏蔽采用冷轧钢板、铝合金等导电与磁导性能优异的材料，通过吸收与反射电磁波，阻挡外部辐射干扰侵入，同时防止内部干扰外泄。结构设计需确保完整性与密封性，避免缝隙、孔洞导致电磁泄漏；接线孔、观察窗等开孔处采用屏蔽网、

屏蔽盖板密封，保障屏蔽连续性。外壳必须可靠接地，将感应的干扰电流快速导入大地，避免电流积聚产生二次干扰，构建外层电磁防护屏障。

绕组屏蔽需在绕组间屏蔽层基础上进一步强化：绕组两端设置与屏蔽层连接并接地的端屏，抑制端部电场畸变，减少局部放电与内部干扰；高压绕组首末端采用加强绝缘与屏蔽措施，抵御外部过电压冲击。这种精细化屏蔽设计，既阻断内部绕组间的干扰耦合，又增强绕组自身的抗冲击能力，针对内部干扰与外部冲击形成双重防护。

4.3 接地系统完善设计

接地系统是干扰电流的泄放通道，合理的接地方式可快速将干扰电流导入大地，避免其在设备内部积聚。多级电压互感器需根据干扰频率特性，采用单点、多点或混合接地方案，确保接地可靠性与有效性。接地系统设计需兼顾低频与高频干扰的泄放需求，同时保障接地体、接地线的性能，为干扰抑制提供通路支撑。

单点接地适用于低频干扰环境，将外壳、屏蔽层、绕组中性点等所有接地部件通过一根接地线连接至同一接地体，避免不同接地体间电位差产生干扰电流。接地线需选用大截面积导线，缩短长度以降低阻抗，确保干扰电流顺利通过。低压绕组中性点通常采用此方式，保障二次侧电压稳定，减少低频干扰对测量精度的影响，为低频场景提供可靠接地方案。

多点接地适用于高频干扰环境，将不同接地部件分别通过接地线连接至接地体，缩短干扰电流流通路径、降低接地阻抗。高频下接地线的电感与电容效应会增大阻抗，单点接地效果下降，而多点接地通过多路径泄放干扰电流，提升抗干扰能力。外壳与绕组屏蔽层在高频干扰较强时采用此方式，确保屏蔽层上的高频干扰电流及时泄放，避免其在设备内部扩散。

混合接地结合单点与多点接地优势，根据部件对干扰频率的敏感度差异化设计：低频敏感部件采用单点接地，高频敏感部件采用多点接地，实现全频率范围的干扰抑制。接地体选用铜棒、镀锌钢管等导电好、耐腐蚀的材料，根据土壤电阻率确定埋深与数量，确保接地电阻达标；接地体与接地线采用压接或焊接连接，避免接触不良增大电阻。这种全方位的接地设计，为不同类型干扰提供高效泄放通道，保障接地系统的稳定性与有效性。

5 结论

多级电压互感器的电磁兼容性能直接决定电网测量精度、保护可靠性与运行稳定性。复杂电磁环境下，内外部干扰通过传导、感应、辐射耦合在设备内部传播，严重影响其运行性能，因此优化电磁兼容性能、强化抗干扰设计具有重要现实意义。本文通过阐述相关理论，明确设备工作特性与电磁兼容核心要求；通过分析干扰类型与传播机制，揭示干扰影响途径；最终提出的绕组优化、屏蔽强化、接地完善、滤波应用四大策略，可从源头抑制干扰、阻断传播路径、高效泄放干扰电流，协同提升设备电磁兼容性能。

本文通过对多级电压互感器与电磁兼容相关理论的阐述，明确了多级电压互感器的工作特性和电磁兼容的核心要求；通过对干扰类型及传播机制的分析，揭示了干扰信号对互感器的影响途径；从绕组结构优化、屏蔽系统强化、接地系统完善及滤波技术应用四个方面，提出了具体的电磁兼容性能优化策略与抗干扰设计方法。绕组结构的优化可以减少绕组间的寄生耦合，屏蔽系统的强化能够阻隔干扰信号的传播路径，接地系统的完善可以快速泄放干扰电流，滤波技术的应用则能有效滤除干扰信号，这些方法相互配合、协同作用，能够显著提升多级电压互感器的电磁兼容性能。

参考文献：

- [1] 宋晓林,刘浩,刘豪,等.500/√3kV 0.002 级多级励磁标准电压互感器设计与仿真分析[J].电工技术学报,2021,36(9):1967-1975.
- [2] 张春丽,刘红文,方鹏兴,等.电磁式电压互感器用熔断器频繁熔断原因分析及解决措施[J].电气传动,2025,55(7):87-96.
- [3] 王尧平,梁文韬,谭海波,等.基于异常值检测的电压互感器在线监测方法[J].湖南电力,2025,45(5):112-116.
- [4] 李军毅,刘金鹏.干式电磁式电压互感器中性点涌流治理技术[J].电力系统装备,2025(5):15-17.