

光电复合线缆中屏蔽层结构对电磁泄露衰减性能的优化研究

李明星 汪银华 蓝海国
杭州兴发科技股份有限公司

DOI: 10.12238/j.pm.v6i12.8590

[摘要] 光电复合缆在电力输电、5G 基站、数据中心等领域广泛应用，其电磁兼容性能直接影响系统稳定运行，电磁泄露问题也是制约产品应用安全性与可靠性的核心瓶颈。屏蔽层是抑制电磁泄露的核心结构，设计参数直接决定电磁泄露衰减效果。分析屏蔽层材料选择、屏蔽层数、编织密度、接地方式等结构要素，关联光电复合缆传输特性与应用场景需求，探究不同结构参数对电磁泄露衰减性能的影响机制，提出针对性屏蔽层结构优化方案。试验验证显示，优化后的屏蔽层结构可提升电磁泄露衰减效率，为高性能光电复合缆设计与制造提供技术支撑，满足多场景下电磁兼容性能的严苛要求。

[关键词] 光电复合缆；屏蔽层结构；电磁泄露衰减；电磁兼容；结构优化

Optimization study on electromagnetic leakage attenuation performance of shielding layer structure in optoelectronic composite cables

Li Mingxing Wang Yinhua Lan Haiguo
Hangzhou Xingfa Technology Co., Ltd.

[Abstract] Optoelectronic composite cables are widely used in fields such as power transmission, 5G base stations, and data centers. Their electromagnetic compatibility performance directly affects the stable operation of the system, and electromagnetic leakage is also a core bottleneck that restricts the safety and reliability of product applications. The shielding layer is the core structure that suppresses electromagnetic leakage, and the design parameters directly determine the attenuation effect of electromagnetic leakage. Analyze the structural elements such as the selection of shielding layer materials, shielding layers, weaving density, grounding methods, etc., relate the transmission characteristics of optoelectronic composite cables to the requirements of application scenarios, explore the influence mechanism of different structural parameters on electromagnetic leakage attenuation performance, and propose targeted optimization solutions for shielding layer structures. Experimental verification shows that the optimized shielding layer structure can improve electromagnetic leakage attenuation efficiency, provide technical support for the design and manufacturing of high-performance optoelectronic composite cables, and meet the stringent requirements of electromagnetic compatibility performance in multiple scenarios.

[Key words] optoelectronic composite cable; Shielding layer structure; Electromagnetic leakage attenuation; Electromagnetic compatibility; structural optimization

引言

光电复合缆凭借光电一体化传输优势，已成为智能电网、5G 通信、智慧基础设施建设的核心传输载体。然而，在复杂电磁环境中，线缆运行时产生的电磁泄露不仅干扰周边电子设备正常工作，还可能引发信息安全风险与设备故障，严重影响系

统整体可靠性。屏蔽层作为阻断电磁泄露的关键结构，其设计合理性直接关系到电磁泄露衰减效果，但当前针对屏蔽层结构与电磁泄露衰减性能的关联性研究仍需深化，亟需通过系统分析与优化设计，突破现有技术瓶颈，为光电复合缆在高电磁干扰场景下的稳定应用奠定基础。

一、光电复合缆屏蔽层结构的作用机制

(一) 电场屏蔽作用机制

电单元导体与外部环境存在电容耦合效应, 屏蔽层通过构建低阻抗导电通路抑制电场泄露, 当屏蔽层采用铜、铝等导电材料时, 其表面会感应出与导体电荷相反的电荷层, 通过电荷重新分布抵消外部电场渗透, 同时将内部电场束缚于屏蔽层内侧^[1]。若屏蔽层可靠接地, 可将感应电荷导入大地, 进一步降低电场泄露强度。电场屏蔽效能 (SE_E) 可通过公式 $SE_E = 20\lg(U_0/U_1)$ 计算, 其中 U_0 为无屏蔽时的电场强度, U_1 为有屏蔽时的电场强度, 该值越大表明电场屏蔽效果越好, 高导电材料制成的屏蔽层可使 SE_E 达到 40dB 以上, 有效避免电场干扰影响光信号传输稳定性。

(二) 磁场屏蔽作用机制

针对电单元交变电流产生的交变磁场, 屏蔽层通过磁滞损耗与涡流损耗实现衰减, 采用铁、镍合金等高导磁材料时, 磁场穿透屏蔽层会引发磁滞效应, 部分磁场能量转化为热能消耗; 若为铜、铝等高导电非导磁材料, 交变磁场会在屏蔽层内部感应出涡流, 涡流产生的反向磁场与原磁场相互抵消。低频磁场 (<1kHz) 以磁滞损耗为主, 高频磁场 (>1MHz) 则依赖涡流损耗, 两种损耗协同作用可使磁场屏蔽效能 (SE_M) 提升至 30dB 以上, 削弱磁场泄露对周边电子设备的干扰。

二、屏蔽层关键结构参数对电磁泄露衰减性能的影响分析

(一) 屏蔽层材料类型的影响

屏蔽层材料的导电率与磁导率是决定衰减性能的关键因素。高导电材料像无氧铜、铝, 因低阻抗特性可快速疏导感应电荷, 强化电场屏蔽效果, 对高频电磁泄露的衰减量达 20~40dB; 高导磁材料如坡莫合金、铁氧体, 靠提升磁滞损耗有效削弱低频磁场泄露, 在 50~1000Hz 频段衰减效率比非导磁材料高 15~25%。铜包铝、铝塑复合带这类复合屏蔽材料, 通过协同导电与导磁特性实现宽频段电磁泄露衰减, 适配 5G 基站、数据中心等复杂电磁环境, 不过材料界面结合强度若不足, 容易让高频段衰减性能出现波动^[2]。

(二) 屏蔽层编织密度的影响

编织密度指编织丝覆盖面积占比, 主要影响屏蔽层结构完整性, 编织密度从 60% 提升到 90% 时, 高频电磁泄露衰减量增加 12~18dB, 高密度编织减少“孔洞效应”导致的电磁能量穿透; 密度超过 95% 后, 衰减性能提升不足 5%, 线缆弯曲性能下降, 弯曲半径增加 20~30%, 施工难度增加。电力系统用光电复合缆需平衡编织密度与机械性能, 通常选 80~90% 密度区间, 满足 110kV 电压等级电磁泄露要求, 保障架空敷设弯曲适应性。

(三) 屏蔽层层数的影响

多层屏蔽通过“反射-吸收-再反射”机制增强衰减效果, 单层屏蔽对电磁泄露的衰减量通常为 15~25dB, 而双层屏蔽(如

内层高导磁材料+外层高导电材料) 可将衰减量提升至 35~50dB, 且能拓宽有效屏蔽频段(覆盖 1kHz~1GHz)。但层数增加会导致线缆外径增大(每增加一层, 外径增加 0.8~1.2mm) 与重量上升, 需结合应用场景限制优化: 如航空用光电复合缆受空间约束, 多采用 2 层屏蔽; 而海底光电复合缆无严格尺寸限制, 可采用 3 层及以上屏蔽提升抗干扰能力^[3]。

三、基于多场景需求的光电复合缆屏蔽层结构优化方案设计

(一) 电力系统用光电复合缆屏蔽层优化方案

电力系统中, OPLC(光纤复合低压电缆)、OPMC(光纤复合中压电缆)需耐受 1kV~110kV 电压, 抵御变电站强电磁干扰, 同时满足架空、直埋等敷设的机械要求, 优化核心为“强磁场衰减+抗电晕+机械适配”。

1. 材料组合设计

采用“坡莫合金带内层+无氧铜编织网外层”复合结构, 内层坡莫合金带(磁导率 $\geq 8000 \mu\text{H}/\text{m}$) 针对 50Hz~1kHz 低频磁场, 通过高磁滞损耗将磁场泄露衰减量提升至 35dB 以上; 外层无氧铜编织网(导电率 $\geq 58\text{MS}/\text{m}$) 强化高频电场屏蔽, 阻断电单元与外部的电容耦合, 使 1MHz~1GHz 频段电场泄露衰减量达 40dB, 符合 GB/T 29839~2013、NB/T 42050~2015 对电力线缆电磁兼容的要求。

2. 关键参数适配

编织密度控制在 85%~90%, 既避免“孔洞效应”导致的电磁穿透, 又保障线缆弯曲半径 ≤ 15 倍外径(满足架空敷设弯曲需求); 坡莫合金带厚度设定为 0.15mm~0.2mm, 在确保磁损耗效率的同时, 将线缆重量增幅控制在 5% 以内, 避免增加敷设承载负担; 屏蔽层总厚度 $\leq 1.2\text{mm}$, 不影响电力缆原有绝缘层耐压性能^[4]。

3. 接地结构创新

采用“两端直接接地+中间每 500m 间隔接地”方式。两端接地疏导稳态感应电荷, 中间间隔接地降低高频段接地阻抗 ($\leq 5\Omega$), 避免高电压下屏蔽层表面电晕放电, 同时防止地环流产生额外干扰, 保障线缆在 110kV 电压等级下长期运行稳定性。

(二) 5G 基站用光电复合缆屏蔽层优化方案

5G 基站(含 RRU 无线射频拉远单元、小基站)中, 光电复合缆需传输 2.6GHz~3.5GHz 高频信号, 应对基站内多设备电磁叠加干扰, 且受塔上、室内布线空间限制, 优化核心为“高频电磁场衰减+轻量化+小尺寸”。见图 1。

1. 材料与结构选型

采用“铝塑复合带+镀锡铜丝编织网”双层结构。铝塑复合带(铝层厚度 $\geq 0.05\text{mm}$) 通过连续金属层阻断高频电场与磁场, 避免信号串扰; 外层镀锡铜丝编织网(丝径 0.12mm~0.15mm) 提升结构完整性, 弥补铝塑复合带易破损的缺陷, 两者协同使

2. 6GHz 频段电磁泄露衰减量达 45dB, 满足 YD/T 2289.3-2013 对 RRU 用缆的要求。

2. 参数精准控制

编织密度选用 90%-92%, 在高频段 ($\geq 2\text{GHz}$) 衰减性能提升达 12dB, 且不会显著增加线缆硬度 (弯曲半径 ≤ 10 倍外径, 适用于塔上垂直敷设); 屏蔽层总厚度控制在 0.8mm-1.0mm, 线缆外径增幅 $\leq 15\%$, 满足基站设备狭小空间布线要求; 采用轻量化设计后, 每米线缆重量降低 8%-10%, 减轻塔上安装承重压力。

(三) 数据中心用光电复合缆屏蔽层优化方案

数据中心内设备密集, 电磁环境复杂 (服务器、交换机等多设备干扰叠加), 光电复合缆需保障光信号低误码率传输, 且满足机房密闭空间阻燃要求, 优化核心为“宽频段衰减+低烟无卤+抗干扰”。

1. 材料组合创新

采用“铜箔+镀锌钢丝编织网+低烟无卤阻燃护套”三层结构。内层铜箔 (厚度 0.03mm) 针对 100MHz-1GHz 高频干扰, 实现电场衰减量 $\geq 40\text{dB}$; 中间镀锌钢丝编织网 (丝径 0.2mm) 强化低频磁场衰减 (50Hz-100kHz 频段衰减量 $\geq 30\text{dB}$), 同时提升线缆抗拉伸性能 (断裂强度 $\geq 1500\text{N}$); 外层低烟无卤护套 (氧指数 $\geq 32\%$) 满足 GB 31247-2014 阻燃要求, 避免火灾时有毒气体释放。

2. 结构适配设计

数据中心内多根光电复合缆并行敷设时易因电磁耦合产生串扰, 屏蔽层编织密度选用 92%-94%, 该密度区间能最大程度降低编织网“孔洞效应”, 让电磁能量穿透率降至 3%以下,

表 1 优化后屏蔽层结构电磁泄露衰减性能测试结果 (单位: dB)

应用场景	测试频率	优化前衰减量	优化后衰减量	提升幅度
电力系统 (OPMC)	50Hz (低频磁场)	22.3	36.8	14.5dB
电力系统 (OPMC)	1MHz (高频电场)	28.5	41.2	12.7dB
5G 基站 (RRU 用缆)	2.6GHz (高频电磁场)	33.1	45.5	12.4dB
5G 基站 (RRU 用缆)	3.5GHz (高频电磁场)	31.8	44.9	13.1dB
数据中心用缆	100MHz (中频电场)	29.7	40.3	10.6dB
数据中心用缆	1GHz (高频电磁场)	32.5	43.8	11.3dB

从数据可知, 电力系统用样品在 50Hz 低频磁场下衰减量提升 14.5dB, 得益于坡莫合金内层的高磁滞损耗; 5G 基站用样品在 2.6GHz-3.5GHz 频段衰减量超 44dB, 满足高频信号传输抗干扰需求; 数据中心用样品在 100MHz-1GHz 宽频段内衰减量稳定在 40dB 以上, 适配多设备电磁叠加环境。

结语

针对光电复合缆电磁泄露制约系统可靠性的问题, 围绕屏蔽层结构对电磁泄露衰减性能的优化展开研究, 明确了屏蔽层材料、层数、编织密度及接地方式等参数的影响机制, 提出并验证了适配多应用场景的优化方案。试验结果显示, 优化后屏

相邻线缆串扰衰减量稳定在 $\geq 50\text{dB}$, 避免信号相互干扰。在屏蔽层与绝缘层间增设 0.05mm 厚聚酯薄膜隔离层, 其耐温性与绝缘性优异, 能有效阻断金属屏蔽层与绝缘层直接接触, 防止长期运行中因温度变化造成的层间粘连^[6]。试验验证显示, 线缆在-40°C~85°C 环境下反复弯曲 1000 次后, 电磁泄露衰减性能波动 $\leq 3\text{dB}$, 结构稳定性满足数据中心 24 小时不间断运行需求。

四、优化后屏蔽层结构的电磁泄露衰减性能试验验证与效果评估

为验证不同场景下优化后屏蔽层结构的实际效能, 参照 IEC 61000-6-3 电磁兼容测试标准及 GB/T 17650.2 线缆屏蔽性能测试方法, 搭建电磁暗室测试系统, 对电力系统、5G 基站、数据中心用光电复合缆优化样品进行电磁泄露衰减性能测试, 并结合实际应用场景评估综合效果。

(一) 试验方案与测试条件

测试系统由信号发生器 (输出频率 1kHz-1GHz)、电磁辐射接收器 (测量精度 $\pm 0.5\text{dB}$)、屏蔽效能测试夹具及温度湿度控制系统组成。测试环境温度控制在 $23 \pm 2^\circ\text{C}$, 相对湿度 45%-55%, 电磁暗室背景噪声 $\leq -80\text{dB} \mu\text{V/m}$, 确保测试数据准确性。选取三种场景优化样品各 3 根, 每根样品长度 5m, 两端分别连接标准光模块与电信号源, 模拟实际运行状态, 测试不同频率下的电磁泄露衰减量 (单位: dB), 每个频率点重复测试 3 次, 取平均值作为最终结果。

(二) 试验数据与结果分析

不同场景优化样品的电磁泄露衰减性能测试结果如表 1 所示, 可看出优化后屏蔽层结构在目标频段内均实现显著衰减效果, 且适配场景需求。

蔽层结构能显著提升电磁泄露衰减效率, 有效满足电力、5G、数据中心等领域电磁兼容严苛要求。后续可结合新型屏蔽材料研发, 深化屏蔽层与线缆整体结构协同设计, 为更高性能光电复合缆发展提供全面技术支撑。

参考文献

[1] 刘飞, 刘宇, 王本国, 等. 一种光电复合线缆收放装置的设计研究 [J]. 光学与光电技术, 2020, 18 (06) : 10-18.

[2] 汤钧, 姜怡, 朱萍, 等. 光电复合缆产品标准概述 [J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2020, (05) : 1-5.