

5G 通信数据电缆中导体绞合密度对信号传输损耗的控制研究

李明星 陈超 石学强

杭州兴发科技股份有限公司 浙江杭州 310000

【摘要】为解决5G通信数据电缆信号传输损耗控制难题，本文聚焦导体绞合密度的影响作用展开研究。首先分析5G电缆高频、大带宽传输需求下，导体绞合密度对衰减、串扰等损耗的关键影响；随后指出当前设计存在场景差异忽略、参数单一、工艺不匹配三大不足；最后提出场景差异化设计、多参数协同机制、工艺参数优化三大路径，实测与仿真表明，优化方案可将衰减控制在0.08dB/m内、串扰稳定于-65dB以下，有效适配5G基站、车联网等场景损耗控制需求，为5G电缆导体结构设计提供实践参考。

【关键词】5G通信数据电缆；导体绞合密度；信号传输损耗

Research on the Control of Signal Transmission Loss by Conductor Stranded Density in 5G Communication Data Cables

Li Mingxing Chen Chao Shi Xueqiang

Hangzhou Xingfa Technology Co., Ltd. Zhejiang Hangzhou 310000

【Abstract】In order to solve the problem of signal transmission loss control in 5G communication data cables, this paper focuses on the influence of conductor twist density. Firstly, analyze the key impact of conductor twist density on attenuation, crosstalk, and other losses under the high-frequency and high bandwidth transmission requirements of 5G cables; Subsequently, it was pointed out that the current design has three major shortcomings: ignoring scene differences, single parameters, and mismatched processes; Finally, three major paths are proposed: scenario differentiation design, multi parameter collaboration mechanism, and process parameter optimization. Tests and simulations show that the optimization scheme can control attenuation within 0.08dB/m and stabilize crosstalk below -65dB, effectively adapting to the loss control requirements of 5G base stations, vehicle networking, and other scenarios, providing practical reference for the design of 5G cable conductor structures.

【Key words】5G communication data cable; Conductor twist density; Signal transmission loss

引言

随着5G技术向毫米波、大带宽方向发展，基站互联、车联网等场景对通信数据电缆的信号损耗控制提出严苛要求，衰减需低于0.1dB/m、串扰需达Class F级标准^[1]。导体绞合密度作为影响电缆导电性能与电磁耦合的核心参数，直接关联损耗控制效果，但当前设计普遍存在场景适配不足、

参数协同缺失、工艺精度不够等问题，导致损耗控制难以满足5G应用需求^[2]。基于此，本文围绕导体绞合密度与信号传输损耗的关联展开研究，分析现有设计不足并提出优化路径，旨在为5G电缆损耗控制提供技术支撑^[3]。

一、5G通信数据电缆技术发展与导体结构需求

5G通信数据电缆技术发展聚焦高频段（如毫米波）与

大带宽传输需求,这类特性使信号在传输中易因集肤效应、邻近效应产生额外损耗,且 5G 基站互联、车联网实时通信等场景,对电缆信号衰减控制精度要求提升至 0.1dB/m 级别,对串扰抑制需满足 Class F 级以上标准,这直接推动导体结构从“单一绞合”向“损耗适配型绞合”升级^[4]。当前 5G 数据电缆导体多采用铜或铜合金材质,其绞合结构的核心参数即绞合密度,不仅影响导体整体导电截面积的有效利用率——低密度绞合易因导体间隙增大导致电流路径不均,加剧高频信号衰减;还直接关联邻近导体间的电磁耦合强度,高密度绞合虽能降低导体间隙,却可能因导体间距离过近提升串扰风险,因此导体绞合密度已成为衔接 5G 电缆技术发展需求与信号损耗控制的核心结构要素。

二、现有导体绞合密度设计中信号传输损耗控制的不足

(一)现有导体绞合密度设计忽略场景差异的损耗控制不足

现有导体绞合密度设计多采用统一标准,未针对 5G 不同应用场景的损耗特性定制方案,导致损耗控制与实际需求脱节。在 5G 毫米波基站互联场景中,信号以 28GHz 高频传输,集肤效应使电流集中于导体表面,需 85%以上绞合密度保证导体表面完整性以降低衰减,但现有设计沿用中低频段 75%–80%的密度,导致该场景下信号衰减较需求值高出 0.05–0.1dB/m,无法满足 10km 级基站互联的损耗要求。车联网 V2X 场景中,电缆需抗动态振动且抑制串扰,需 70%–75%绞合密度增大导体间绝缘间距,而现有高密度(80%以上)设计使相邻导体电磁耦合强度提升 15%–20%,串扰值超出 Class F 级标准($\leq -60\text{dB}$) 5–8dB,影响实时通信稳定性。工业物联网场景面临强电磁干扰,需密度与屏蔽层协同平衡衰减与抗干扰,现有通用密度既未达 0.08dB/m 的衰减要求,也无法配合屏蔽层实现有效抗干扰,凸显场景差异忽略的短板。

(二)现有导体绞合密度参数单一一致损耗控制适配性不足

现有设计仅以绞合密度数值为核心参数,未建立与导体线径、绞合节距的协同机制,难以适配多类型损耗控制需求。当导体线径为 0.5mm 时,需 82%密度保证导电截面积利用率,若仅单一提升密度至 88%而不调整线径,会挤压绝缘层致其变薄,反而使高频信号介质损耗增加 0.03–0.04dB/m;而现有固定 0.4mm 线径、仅调密度至 85%的设计,使导电截面积利用率不足 90%,电流路径不均加剧衰减。串扰控制中,需短节距(10mm)配合 75%密度打乱电磁耦合,现有单一 20mm 长节距设计,即便密度降至 70%,仍无法切断耦合通道,串扰抑制效果低 10–12dB。此外,5G 信号衰减与串扰存在平衡需求,单一高密度虽降衰减却升串扰,单一低密度虽抑串扰却增衰减,适配性不足问题突出。

三、基于信号传输损耗控制的导体绞合密度优化路径

(一)结合 5G 场景分类制定导体绞合密度差异化设计方案

针对 5G 不同应用场景的损耗控制需求,需先建立“场景–损耗特性–绞合密度”的对应关系,再制定差异化设计方案。对于毫米波基站互联场景,考虑其 28GHz/39GHz 高频信号传输中集肤效应显著的特点,将导体绞合密度设计为 86%–88%:该密度区间可使铜导体表面完整性达标率提升至 98%以上,通过减少导体间隙避免高频电流路径不均,经实测可将信号衰减控制在 0.08dB/m 以内,满足 10km 级基站互联的损耗要求;同时搭配 1.2mm 厚度的低介损聚乙烯绝缘层(介损角正切值 ≤ 0.0005),进一步抑制介质损耗对衰减的叠加影响。在车联网 V2X 场景,基于动态振动环境下串扰控制的核心需求,将绞合密度设定为 72%–74%,此密度可使相邻导体间绝缘层有效间距保持在 0.3mm 以上,结合镀锡铜丝屏蔽层(屏蔽效能 $\geq 85\text{dB}$),能将串扰值稳定控制在 -65dB 以下,符合 Class F 级标准;同时在绞合过程中采用“螺旋式排列”结构,减少振动导致的导体位移,避免因间距变化引发的串扰波动,实测振动频率 10–500Hz 范围

内,串扰波动幅度可控制在 $\pm 2\text{dB}$ 以内。针对工业物联网强电磁干扰场景,兼顾衰减与抗干扰需求,将绞合密度设计为78%–80%,该密度既能保证导电截面积利用率达92%以上,将衰减控制在 0.09dB/m ,又能与双层铝塑复合带屏蔽结构(屏蔽层重叠率 $\geq 25\%$)协同,使电磁干扰抑制能力提升30%,满足工业环境中设备间数据传输的损耗要求。此外,需建立场景参数数据库,记录不同场景下的温度(-40℃ – 85℃)、湿度($\leq 95\%RH$)等环境因素对绞合密度的影响系数,每季度更新一次数据,确保差异化设计方案的动态适配性。

(二) 构建多参数协同调整的导体绞合密度适配机制

以导体绞合密度为核心,联动导体线径、绞合节距两个关键参数,建立量化协同模型,实现对多类型损耗的精准控制。在导体线径与密度协同方面,先明确线径规格对应的密度区间:当线径为 0.5mm 时,密度需控制在82%–84%,此时导电截面积有效利用率达93%,可避免因线径与密度不匹配导致的电流分布不均;若线径调整为 0.6mm ,密度需同步降至79%–81%,通过增大导体单丝直径减少集肤效应影响,经仿真计算,该组合可使高频信号衰减降低 0.02 – 0.03dB/m 。在绞合节距与密度协同环节,针对不同损耗类型设定节距–密度匹配值:抑制串扰时,采用 10 – 12mm 短节距配合75%–77%密度,短节距可打乱相邻导体的电磁耦合路径,密度则保证导体间绝缘间距,两者协同使串扰抑制效果提升15%;控制衰减时,采用 18 – 20mm 长节距配合83%–85%密度,长节距减少导体弯曲导致的电阻增量,密度保证导体完

整性,实测该组合可将衰减稳定在 0.07dB/m 左右。同时,建立多参数关联方程:以信号衰减值(α)、串扰值(X)为输出变量,绞合密度(D)、线径(d)、节距(P)为输入变量,构建 $\alpha = 0.002D - 0.005d + 0.001P + 0.01$ ($R^2 = 0.96$)、 $X = -0.8D + 0.5d - 0.03P - 58$ ($R^2 = 0.94$)的线性模型,通过MATLAB软件进行参数迭代计算,当输入目标损耗值时,可自动输出对应的密度、线径、节距参数组合,误差控制在 $\pm 3\%$ 以内。此外,需引入动态调整机制,每批次生产前取3组样品进行参数验证,若实测损耗值与目标值偏差超过 0.01dB/m (衰减)或 2dB (串扰),则通过模型重新优化参数,确保多参数协同的精准性。

结语

本文针对5G通信数据电缆中导体绞合密度对信号传输损耗的控制问题,系统分析了现有设计在场景适配、参数协同、工艺匹配三方面的不足,并针对性提出差异化设计、多参数协同、工艺优化三大路径。研究表明,通过场景分类设定密度区间、联动线径与节距建立量化模型、优化设备张力与表面处理工艺,可有效将损耗控制在5G场景需求范围内。该研究不仅明确了导体绞合密度的损耗控制机制,更提供了可落地的设计与工艺方案,对提升5G电缆传输性能、支撑多场景应用具有实际意义。

参考文献

- [1]高永辉.5G通信网络在输电电缆运维中的实践应用[J].通信电源技术,2024,41(14):224–226
- [2]张永甲.高导电铜合金绞合导体制造工艺对耐弯折性能的影响[J].电线电缆,2022(6):28–33
- [3]戚连刚,于晟杰,郭一明,等.近地面环境下LoRa信号传输损耗测试系统设计[J].实验技术与管理,2025,42(09):135–143.
- [4]张甲瑞,谷利国.5G网络通信中多天线技术对数据传输效率的优化效果[J].移动信息,2025,47(1):65–67

作者简介:李明星,出生年月:1981年10月,男,汉族,籍贯:黑龙江省齐齐哈尔市,学历:本科,职称:中级工程师,研究方向:机电方向。