

# 高速线缆及其单元结构设计与研究探讨

耿有帅

浙江兆龙互连科技股份有限公司

DOI: 10.12238/ems.v6i6.8075

**[摘要]** 高速信息传输是当今社会发展的关键所在。随着互联网、5G 等技术的蓬勃兴起,大量数据需要在不同设备和系统之间快速流转。高速线缆凭借其出色的传输性能,成为连接这些设备和系统的关键物理层通道。它不仅保证了信息传输的速度和质量,也为各类智能设备和应用的广泛应用提供了坚实的物理基础。然而,高速线缆的传输性能很大程度上取决于其单元结构的优化设计。线缆的各个部件,如导体、绝缘层、屏蔽层等,必须经过精心设计,才能最大限度地降低信号失真、辐射等问题,确保高速信号的稳定传输。因此,本文针对高速线缆及其单元结构设计与研究进行深入探讨。

**[关键词]** 高速线缆; 单元结构; 结构设计

## Design and research exploration of high-speed cables and their unit structures

Geng Youshuai

Zhejiang Zhaolong Interconnection Technology Co., Ltd

**[Abstract]** High speed information transmission is the key to the development of today's society. With the vigorous rise of Internet, 5G and other technologies, a large amount of data needs to be quickly transferred between different devices and systems. High speed cables, with their excellent transmission performance, have become key physical layer channels connecting these devices and systems. It not only ensures the speed and quality of information transmission, but also provides a solid physical foundation for the widespread application of various intelligent devices and applications. However, the transmission performance of high-speed cables largely depends on the optimized design of their unit structure. The various components of cables, such as conductors, insulation layers, shielding layers, etc., must be carefully designed to minimize signal distortion, radiation, and other issues, ensuring stable transmission of high-speed signals. Therefore, this article delves into the design and research of high-speed cables and their unit structures.

**[Keywords]** high-speed cables; Unit structure; Structural design

### 前言

随着数据网络的不断发展,信息沟通越来越频繁,信息交换容量也越来越大。数据传输电缆是实现数据信号传输与交换的重要载体。电缆产品的研发将面临着新的技术变革与创新,一方面要提高传输速率,满足大容量信息的传输与交换,另一方面要提高传输稳定性,提高信息传输的质量。双轴平行铜缆具有高速,低时延,尺寸小以及成本低等优点而

被广泛应用于通信传输、数据中心、信息服务等领域,满足大容量的音频、视频、图像等数据信号的高速传输与交换。数字通信用平行双轴电缆是由多组横向排列的对单元组合而成,对单元通常包含两根平行的绝缘单线和包覆屏蔽以及排流线。屏蔽结构不仅可以屏蔽外界的电磁信号,也同时阻断了线缆本身的电磁泄漏,对保持传输网络的稳定性具有重要作用,然而布置的排流线与屏蔽层直接接触,后续缠绕护套

时较易导致接触部分的屏蔽层产生皱,影响屏蔽效果,进而影响传输效率。

### 1. 背景技术与发展现状

高速信息传输是当今社会发展的关键所在。随着互联网、5G 等技术的快速发展,大量数据需要在不同设备和系统之间高速流转。作为关键的物理层通道,高速线缆肩负着确保这些高速信号稳定传输的重要使命。高速线缆之所以能够胜任这一重任,关键在于其出色的传输性能。高速线缆采用优质导体材料,如铜、铝等,可有效降低导体电阻,减少信号损耗。线缆的绝缘层和屏蔽层也经过精心设计,不仅可以良好地隔离信号,还能有效抑制电磁干扰,提高信号的完整性和可靠性。此外,线缆的结构布局,如芯线数量、扭曲搭配等,也对传输特性产生重要影响。可以说,高速线缆的传输性能在很大程度上取决于其单元结构的优化设计。只有各个部件协调一致,才能发挥出线缆应有的功能,满足日益严苛的信息传输需求。因此,如何设计出兼具高带宽、低时延、抗干扰等特性的高性能线缆,一直是业界研究的热点。

随着信息技术的不断进步,高速线缆已经广泛应用于数据中心、5G 基站、高速铁路等领域。其中,超高速数据中心网络对线缆性能提出了更高要求,带动了高速线缆设计与制造工艺的不断创新。在单元结构优化方面,业界已经开发出诸多先进技术。例如,采用多层金属屏蔽结构可以大幅提高线缆的抗干扰能力;使用低介电常数材料制造绝缘层,能够降低电容耦合,从而减少信号失真;采用辐照交联工艺可以提高绝缘层的耐热性能等。此外,针对不同应用场景,线缆的结构也在不断优化,如开发可弯曲、轻质等特种线缆。在制造工艺创新方面,先进的自动化生产技术也在不断推动高速线缆性能的提升。例如,采用连续挤出等自动化工艺可大幅提高生产效率;利用激光剥线、超声波焊接等技术可改善线缆结构的一致性;运用真空镀膜工艺可制造高性能屏蔽层等。这些制造技术的创新,不仅提高了线缆的一致性和可靠性,还能有效降低生产成本,促进高速线缆应用的广泛普及。

### 2. 导体材料创新

导体材料是高速线缆核心部件之一,其性能直接决定了整个线缆的传输效率和可靠性。随着信息技术的快速发展,人们对高速信号传输的需求日益增加,这对线缆导体材料提出了更高的要求。

目前,铜导体仍然是高速线缆中最常见的选择。相比其他金属,铜具有较高的电导率、机械强度和加工性能,制造成本也相对较低。但随着应用环境的日益苛刻,铜导体也暴露出一些不足。例如,在潮湿、腐蚀性环境下,铜容易发生氧化腐蚀,影响导电性能;在高频高速传输场景中,皮肤效

应导致铜导体的有效导电截面积降低,从而增大电阻损耗。因此,亟需开发出更优异的导体材料来替代传统的铜导体。近年来,业界掀起了一股导体材料创新的热潮。其中,银导体无疑是最具代表性的替代方案。银作为一种贵金属,具有极高的电导率,甚至超过铜达 30%。同时,银还拥有出色的抗腐蚀性能,能够大幅提高线缆在恶劣环境下的使用寿命。但银价格高昂,限制了其在大规模应用中的推广。另一种被广泛研究的是金属复合导体,如银包铜、银包铝等。这类导体兼具了贵金属的优异导电性和普通金属的低廉成本,在兼顾性能和成本的前提下,为高速线缆的应用提供了新的选择。

除了金属导体,业界还在探索一些新兴的导体材料,如碳纳米管和石墨烯。这些纳米碳材料具有极高的电导率和机械强度,理论上完全可以取代传统金属导体。例如,碳纳米管导体不仅能大幅降低高频电阻损耗,而且重量更轻、抗拉强度更高。但由于制造工艺复杂,目前这类新型导体材料还难以实现规模化生产和应用。与此同时,一些复合材料导体也越来越受到关注。例如,采用金属基体掺杂碳纳米管或石墨烯的复合导体,可以充分发挥各种材料的优势,实现性能和成本的平衡。此外,还有研究利用超导材料制造导体,虽然需要极低温环境,但其理论上的导电性能可以远远超过普通金属。

### 3. 单元结构设计

如图 1、2、3 所示,高速线缆单元结构,包括缆芯、包覆在该缆芯外的屏蔽层和包覆在该屏蔽层外的第一外包覆层,缆芯包括两根内导体及于内导体外挤出的绝缘层,缆芯通过高速绕包设备绕包一层低介电材料层,低介电材料层采用比如发泡 PE 或其它聚烯烃或氟类材料等材料中的任意一种。屏蔽层包括第一屏蔽层与第二屏蔽层,第一屏蔽层平行纵包于缆芯之外,第二屏蔽层绕包于第一屏蔽层之外。第一屏蔽层采用纵包方式比绕包方式包覆能支持到更大的带宽,第二屏蔽层采用绕包方式包覆屏蔽层使结构更加紧凑,增加了铝基厚度提高了屏蔽效果。

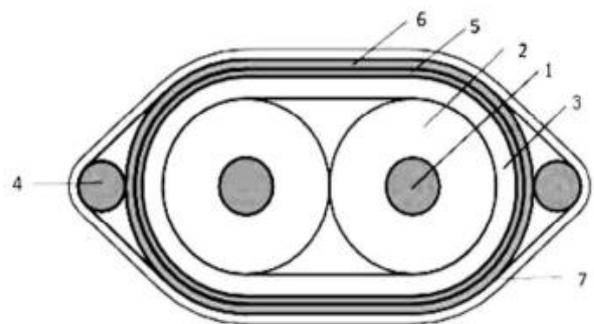


图 1

第二屏蔽层与外第一外包覆层之间设置有两根排流线,

排流线的截面为圆形,排流线位于第二屏蔽层的左右两侧,第一屏蔽层与第二屏蔽层紧密贴合,第二屏蔽层与排流线的接触面光滑平整,绕包外护套时,接触面不易产生褶皱,屏蔽效果不受影响。排流线主要起到接地和抗拉的作用,在良好正确的接地条件下,屏蔽层起到对线缆本身电磁泄漏的阻断以及对外来电磁信号的屏蔽,本方案采用的内纵包外绕包的双层屏蔽结构,可以起到对线缆内外信号全方位的屏蔽效果。

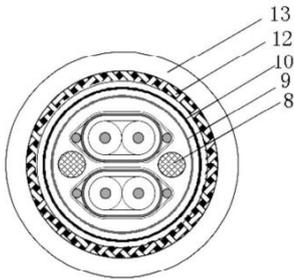


图2

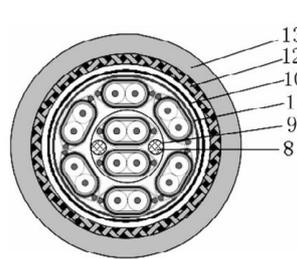


图3

线缆单元结构的内导体可以是镀层金属材料或者无镀层金属材料亦或是合金材料。内导体外挤出一层绝缘层,绝缘层采用氟塑料或者聚烯烃类材料,包括但不限于 FEP 材料、PE 材料、发泡 PE 材料等;屏蔽层为铝箔层或是铜箔层亦或是铜铝复合层,第一屏蔽层朝内的为铝面或是铜面,第二屏蔽层朝外的为铝面或是铜面;第一外包覆层为包括但不限于热融 PET 带层、PP 带层中的任意一种。

高速线缆包括至少一组的单元结构。如图 2、3 所示,线缆包括上下并列排布的两组单元结构,两组单元结构外依次包覆有第一包带层,第三屏蔽层,编织层以及第二外包覆层,位于第一包带层与单元结构的间隙处还设有填充物。线缆结构紧凑,外观圆整。如图所示,高速线缆中部上下并列排布有两组单元结构,两组单元结构外设有第一包带层,位于第一包带层与单元结构的间隙处设有填充物,六组单元结构环绕上述单元结构均匀分布于第一包带层外侧,并于其外依次设置有第二包带层,第三屏蔽层,编织层和第二外包覆层。线缆结构紧凑,外观圆整。

#### 4. 屏蔽层结构创新

屏蔽层是高速线缆的关键部件之一,其主要功能是阻隔外部电磁干扰,保护内部信号免受干扰影响,确保信号的完整性和可靠性传输。随着通信技术的不断发展,特别是 5G、物联网等新兴应用的兴起,对高速线缆的屏蔽性能提出了更高的要求。传统的金属屏蔽层,如铜箔或铝箔,虽然具有良好的屏蔽效果,但在某些场景下也存在一些问题。首先,金属屏蔽层重量较大,不利于线缆的灵活布线。其次,金属材料易被腐蚀,在恶劣环境下使用寿命较短;再者,金属屏蔽

层在高频条件下也会产生涡流效应,影响信号传输质量。因此,业界正在探索一些新型屏蔽材料和结构,以满足未来高速线缆的需求。

其中,一种备受关注的新型屏蔽材料就是碳纳米管和石墨烯。这些纳米碳材料不仅具有优异的导电性和机械性能,而且重量轻、抗腐蚀性强,非常适合应用于高速线缆的屏蔽层。碳纳米管屏蔽层可以有效阻隔高频电磁干扰,同时重量轻便,灵活性好。石墨烯屏蔽层则具有更出色的导热性能,能够有效散发线缆内部产生的热量,提高整体的可靠性。这些新型纳米碳材料屏蔽层,有望成为未来高速线缆的主流选择。

除了新材料,创新的屏蔽层结构也是一个重要方向。例如,采用多层屏蔽结构,通过不同材料的组合,可以实现更强大的屏蔽性能。内层可以使用金属箔或金属丝网,提供良好的电磁屏蔽效果;外层则可以采用碳纳米管或石墨烯材料,增强机械强度和耐腐蚀性;此外,还可以在屏蔽层内部设置吸波材料,进一步提高对高频干扰的抑制能力。这种多层复合结构的屏蔽层,能够充分发挥各种材料的优势,全方位提升线缆的整体性能。值得一提的是,随着 5G 等新一代通信技术的发展,屏蔽层的设计还需要考虑毫米波频段的特殊要求。在这个频段下,traditional 金属屏蔽的效果可能会大打折扣,因此需要探索新的屏蔽方案,如采用周期性结构的电磁波吸收材料等。

#### 结语

高速线缆及其单元结构的优化设计和制造工艺创新,对于满足信息时代的高速互联需求,推动相关产业的发展都具有重要意义。一方面,高速线缆凭借其出色的传输性能,成为连接各种设备和系统的关键物理层通道,在推动信息社会的发展中扮演着不可或缺的角色;另一方面,线缆单元结构的精心设计和制造工艺的不断创新,也是提高线缆性能、降低成本的关键所在。

#### [参考文献]

- [1] 基于链路参数的屏蔽双绞线串扰预测模型[J]. 石旭东;董小东;张和茂;李晓露;范玲. 计算机应用与软件, 2021 (09)
- [2] 电动汽车无线充电系统 EMC 测试标准综述[J]. 陈希琛;韩焱;蒋莉. 中国汽车, 2021 (08)
- [3] 高频(5G)信号对新能源汽车控制器的辐射研究[J]. 杨娜;徐雁波. 中国测试, 2021 (04)
- [4] 内燃动车组线缆 EMC 仿真与防护设计[J]. 徐艺峰;李常贤;路文连. 电子测量技术, 2021 (07)