

分类号:

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220320105

题 目 轻型柔性电磁防波套的设计与研究

英文并列

题 目 Design and Research of Lightweight Flexible
Electromagnetic Wave Absorbing Sheath

学 生 姓 名 : 刘浩

校 内 导 师 : 陈其工（教授）

校 外 导 师 : 陈任峰

专 业 学 位 类 别 : 电子信息（085400）

研究方向(领域): 电缆电磁屏蔽防护

论 文 答 辩 日 期 : 2025 年 05 月 11 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

刘浩

日期：2025 年 6 月 1 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

刘浩

指导教师签名：

陈

日期： 2025 年 06 月 01 日

日期： 2025 年 06 月 01 日

轻型柔性电磁防波套的设计与研究

摘要

随着现代电子工业技术的快速发展,电缆保护需求日益复杂,传统防波套刚度强、重量大,限制了其在航空航天、机器人等领域的应用,因此,防波套的轻量化设计显得尤为重要。

本文首先分析了屏蔽电缆的屏蔽效能与转移阻抗的关系,在总结编织屏蔽电缆转移阻抗的计算理论和数学模型的基础上,探讨了编织材料和编织参数对转移阻抗的具体影响。为了将理论应用于实际工程,并验证理论分析的准确性,采用了电磁场仿真技术对编织屏蔽电缆的转移阻抗进行了仿真分析,给出了编织角度、编织锭数、每锭编织导线根数、编织导线直径以及编织密度与转移阻抗之间的变化规律,提出了通过细化编织导线直径的方式来提高屏蔽线缆的柔韧性并减轻其重量,研究表明在编织密度不变的条件下,同时细化编织导线和增加每锭导线根数会降低防波套在低频段的屏蔽效果,但在高频段屏蔽性能有所提高。为了验证了仿真结果的可靠性,利用吸收钳测试方法对编织屏蔽电缆进行了实物测试,为编织屏蔽防波套设计提供了一定的科学依据和实践指导。

屏蔽电缆的使用过程中可能会面临一些极端的电磁环境,因此本文接着又从时域的角度分析了强电磁脉冲垂直照射下,不同类型屏蔽层及不同编织参数对线缆耦合电压和耦合电流的影响,从而为屏蔽层在极端电磁环境下的应用提供了参考。研究发现,编织密度不变的情

况下,同时增加编织锭数和减少每锭编织导线根数可以有效地提升编织屏蔽电缆的时域电磁防护性能,还能令其编织导线分布更加均匀,结构更加稳定。而同时增加编织锭数和细化导线直径可以提高屏蔽层的轻柔特性,但对其时域屏蔽效能有一定影响,可以根据实际情况进行取舍。最后,对编织防波套的编织参数进行了优化,对比了优化前后编织防波套的时域屏蔽效能、编织材料用量、编织密度等参数,结果表明,经过编织参数优化后的编织防波套具备较高屏蔽效能,并且相比优化前,其结构更加稳定,轻柔性能得到了很大的提升。

综上所述,本文分别从时域和频域的角度分析了编织材料和编织结构参数对编织防波套屏蔽性能的影响,为编织防波套的轻柔化设计提供了参考,通过优化编织结构参数可以有效地改善编织防波套的屏蔽性能以及提升其轻柔的特性。

关键词: 屏蔽效能; 转移阻抗; 编织参数; 电磁脉冲; 耦合电流

Design and Research of Lightweight Flexible Electromagnetic Wave Absorbing Sheath

ABSTRACT

With the rapid development of modern electronic industrial technology, the demand for cable protection is becoming increasingly complex. Traditional waveguide sleeves are characterized by high rigidity and large weight, which limits their applications in fields such as aerospace and robotics. Therefore, the lightweight design of waveguide sleeves has become particularly important.

This paper first analyzes the relationship between the shielding effectiveness of shielded cables and transfer impedance. Based on summarizing the calculation theory and mathematical model of transfer impedance for braided shielded cables, the specific effects of braiding materials and braiding parameters on transfer impedance are explored. To apply the theory to practical engineering and verify the accuracy of theoretical analysis, electromagnetic field simulation technology is employed to simulate the transfer impedance of braided shielded cables. The variation laws between braiding angle, number of braiding carriers, number of wires per carrier, diameter of braiding wires, and braiding area with transfer impedance are presented. The study proposes that refining the diameter of braiding wires can enhance the flexibility of shielded cables

and reduce their weight. It is found that under the condition of constant braiding area, simultaneously refining the braiding wires and increasing the number of wires per carrier will degrade the shielding performance of the braid in the low-frequency band, but improve it in the high-frequency band. To verify the reliability of the simulation results, the braided shielded cables are tested using the absorbing clamp method. This research provides a scientific basis and practical guidance for the design of braided shielded braid.

During the use of shielded cables, they may be exposed to extreme electromagnetic environments. Therefore, this paper further analyzes the influence of different types of shielding layers and different braiding parameters on the coupled voltage and coupled current of cables under vertical irradiation of intense electromagnetic pulses from a time-domain perspective. This provides a reference for the application of shielding layers in extreme electromagnetic environments. The study finds that, with constant braiding density, simultaneously increasing the number of braiding carriers and reducing the number of wires per carrier can effectively enhance the time-domain electromagnetic protection performance of braided shielded cables. It also results in a more uniform distribution of braiding wires and a more stable structure. Meanwhile, increasing the number of braiding carriers and refining the wire diameter can improve the flexibility and lightness of the shielding layer, but it may

have some impact on its time-domain shielding effectiveness. Trade-offs can be made according to specific application scenarios. Finally, the weaving parameters of the braided waveguide sleeve were optimized, and the time - domain shielding effectiveness, the amount of weaving material used, and the weaving density of the braided waveguide sleeve before and after optimization were compared. The results show that the braided waveguide sleeve with optimized weaving parameters has higher shielding effectiveness. Compared with the one before optimization, its structure is more stable and its flexibility is significantly improved.

In summary, this paper analyzes the influence of braiding materials and structural parameters on the shielding performance of braided braid from both time-domain and frequency-domain perspectives. It provides references for the lightweight and flexible design of braided braid. By optimizing the braiding structural parameters, the shielding performance of the braided braid can be effectively improved, and its flexibility and lightness can be enhanced.

KEY WORDS: Shielding effectiveness; Transfer impedance; Braiding parameters; Electromagnetic pulse; Coupled current

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
第1章 引言.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 屏蔽电缆转移阻抗仿真与实测方法的研究进展.....	3
1.2.2 柔性电磁屏蔽材料研究进展.....	7
1.3 本文主要内容和章节安排.....	9
第2章 编织屏蔽电缆屏蔽效能理论研究.....	10
2.1 线缆屏蔽效能理论研究基础.....	10
2.1.1 电磁屏蔽的基本原理.....	10
2.1.2 电缆屏蔽效能的定义.....	11
2.1.2 电缆屏蔽效能与转移阻抗的关系.....	12
2.2 转移阻抗解析计算方法分析.....	14
2.2.1 散射阻抗.....	16
2.2.2 小孔电感.....	16
2.2.3 编织电感.....	17
2.2.4 附加电感.....	17
2.3 解析法转移阻抗曲线构成分析.....	18
2.4 本章小结.....	19
第3章 编织屏蔽电缆转移阻抗仿真与参数优化设计.....	20
3.1 编织屏蔽材料选择.....	20
3.2 转移阻抗仿真模型的搭建与仿真验证.....	21
3.2.1 三同轴方法的原理.....	21
3.2.2 屏蔽线缆转移阻抗仿真模型建立.....	23
3.3.3 仿真验证.....	24
3.3 编织参数与转移阻抗的关系.....	25
3.4 仿真验证与实测结果对比.....	32
3.5 本章小结.....	34
第4章 屏蔽电缆时域屏蔽特性分析.....	35
4.1 高空核爆电磁脉冲下屏蔽电缆特性研究.....	35
4.2 传输线辐照理论与仿真分析.....	37
4.2.1 不同类型屏蔽层对耦合电流和电压的影响.....	39

4.2.2 编织参数对耦合电流与耦合电压的影响.....	42
4.3 编织防波套轻柔化设计	48
4.4 本章小结.....	50
第 5 章 总结与展望.....	51
5.1 本文总结	51
5.2 本文展望	52
参考文献.....	53
致谢.....	57

第1章 引言

1.1 研究背景和意义

随着集成电路和数字通信设施的不断进步，电气和电子系统对电磁干扰的敏感性显著增加，尤其是高电压雷电波冲击或操作断路器引起的电磁场瞬时变化，可能通过电缆内导体芯线耦合形成干扰。这种干扰不仅会导致信号传输误差、通信失效和误码率增加，还可能损坏设备元件，甚至引发电力事故。此外，电缆本身作为电磁波的高效辐射和接收天线，其辐射特性与接收特性相互关联，容易对周围设备造成干扰，也可能因外界电磁场的干扰而影响内部信号传输，如果使用辐射超标的互连电缆，很大可能会对整个系统的性能和稳定性产生严重影响，甚至导致系统彻底瘫痪。

电缆屏蔽层是电磁屏蔽的核心部件，其重要性显而易见。屏蔽层的核心功能包括显著降低外部电磁场的辐射干扰强度、有效降低电缆芯线对外部电磁干扰的敏感性以及减少外部电磁场与电缆内部芯线之间的直接耦合。屏蔽的原理基于金属隔离，通过将外界电磁波的感应和辐射传播路径从电缆内部转向外部非敏感区域，使原本直接耦合到电缆芯线的电流改由屏蔽层传导，从而有效抑制外界电磁干扰对电缆内部芯线的影响。与未屏蔽电缆相比，采用屏蔽层的电缆在电磁兼容性方面具有显著优势。一方面，屏蔽层能够有效防止外部电磁场对电缆内部传输线路的干扰，避免信号传输误差、通信失效、误码率增加以及噪声干扰等问题；另一方面，屏蔽层还可以减少电缆内导体芯线上的高频信号对外部环境的电磁辐射，有效减轻电缆对周边电磁环境的干扰。从更深层次来看，屏蔽层还可以防止信息泄漏，保障通信安全，防止机密信息外泄。

基于屏蔽层结构的不同，屏蔽电缆主要可分为螺旋缠绕式、编织型以及管状式三种类型^[1]。螺旋缠绕箔带的屏蔽电缆在静电场屏蔽方面表现出色，但面对时变电磁场，无论低频还是高频，其表现都不太理想，频率超过 1MHz，屏蔽效能显著下滑；相比之下，编织屏蔽电缆的屏蔽效果更加优异，当频率超过 10MHz 时，其屏蔽性能才逐渐减弱；使用实心铜屏蔽层的管状式屏蔽电缆比编织屏蔽电缆的屏蔽效果好，并且不会因为信号频率的上升而导致屏蔽效果变差，反而还会增加^[2]。从上述分析可以看出，在三种常见的屏蔽电缆类型中，管状式屏蔽层因

其结构特点，通常能够提供最为优异的屏蔽性能，尤其在应对复杂电磁环境时表现出色。编织型屏蔽层的屏蔽效果虽稍逊于管状式，但在实际应用中也具有较高的可靠性，其灵活性和成本效益使其在许多场景中得到广泛应用。而螺旋缠绕式屏蔽层虽然在某些特定条件下（如静电场屏蔽）具有一定优势，但在面对时变电磁干扰时，其屏蔽效果不佳，尤其是在高频段。这种差异主要源于各屏蔽层结构在电磁场中的耦合机制和材料特性，决定了它们在不同频率和应用场景下的适用性。尽管管状式屏蔽层具备极佳的屏蔽效果，但缺点也很多，存在重量大、刚度强、不易弯曲等诸多弊端，相比而言，编织型结构的屏蔽层在这方面的缺陷显得不是那么明显。

传统的金属纱线材料虽然在导电性和屏蔽效能方面表现出色，然而也存在一些显著的缺陷。其密度相对较高，这在轻量化需求日益增长的现代应用中成为一大劣势。此外，金属纱线容易受到腐蚀，这不仅会降低其使用寿命，还可能影响其屏蔽性能的稳定性。同时，金属纱线的高刚度使其在需要柔韧性的场合中应用受限，而且其加工难度较大，这增加了生产成本和制造过程的复杂性。这些缺陷不仅限制了屏蔽材料在复杂环境中的应用，还增加了系统的重量和维护成本。因此，在尽量不降低甚至提升电缆屏蔽性能的前提下，对屏蔽材料进行减重以及提高屏蔽层整体的柔韧性就显得十分的重要了。一方面，屏蔽电缆屏蔽层的轻量化设计可以有效减轻设备的总体重量，方便运输以及减少资源的消耗。以飞机电气线路互联系统（EWIS）为例，随着航空电子系统复杂性的持续增加，机载设备之间的信号交联关系变得越来越复杂，这直接导致了 EWIS 整体重量的上升^[3]，而线束和敷设安装组件是 EWIS 的主要组成部分，防波套作为屏蔽线束的重要构成，其轻量化设计对于减轻 EWIS 的整体重量意义重大。另一方面，柔性化屏蔽材料能够显著提升电缆的弯曲性能和抗疲劳性能，使其在复杂的空间布局和动态环境中保持稳定的屏蔽效能。这对于航空航天、汽车电子、机器人等领域中需要频繁弯曲和振动的电缆尤为重要，能够有效延长电缆的使用寿命并降低维护成本。此外，柔性化屏蔽材料的加工性和可定制性更强，能够满足不同应用场景对电缆形状、尺寸和性能的多样化需求。例如，在可穿戴设备、柔性电子器件等领域，轻薄、柔韧的屏蔽电缆是实现设备小型化、轻量化和高性能化的关键因素。

综上所述,屏蔽电缆编织屏蔽层的轻柔化设计不仅可以满足航空领域对轻量化需求,还能适应现代电子设备对电磁屏蔽材料在性能、加工性和环境适应性方面的更高要求。因此,深入研究编织结构和材料的柔性化特性,对于推动电磁屏蔽技术的发展、提升电缆的综合性能以及满足未来电子设备的多样化需求具有极为重要的意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 屏蔽电缆转移阻抗仿真与实测方法的研究进展

1.2.1.1 解析计算方法

转移阻抗作为衡量屏蔽电缆性能的关键指标,和屏蔽层的结构关系密切,直接反映了屏蔽层结构对电磁干扰的抑制能力。俄罗斯著名的电磁理论专家谢昆诺夫(K.S. Shchelkunov)在1993年发表的《The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shields》一文中,首次提出了屏蔽电缆转移阻抗的计算公式^[4],但该公式仅适用于计算实体屏蔽层。对于编织屏蔽层转移阻抗的计算,国外做了许多的研究,1975年,著名学者是Edward F.Vance在《Coupling to Shielded Cables》一文中给出了编织屏蔽线缆转移阻抗具体函数表达式。该文将编织屏蔽电缆的转移阻抗分成了散射阻抗于小孔电感两个部分,其中散射阻抗的计算公式得到了广泛的使用,体现了线缆编织层在低频辐射下的特性。随后,多位学者对Vance的理论进行了改进。Tyni改进了小孔电感的表达式,并引入编织电感,使计算精度显著提升^[6]。Kley则进一步考虑了编织层间的磁耦合效应。Demoulin在前人研究的基础上,提出了考虑额外波动效应的解析模型,该效应描述了高频下编织网内外层磁场引起的电涡流,导致转移阻抗在高频范围内减小^[7]。

国内在解析法方面也做了许多的研究,1993年,马晖等在参考国外研究成果的基础上,根据电磁场理论推导出了编织屏蔽层转移阻抗的具体表达式,和实测结果对比,验证了公式的准确性^[8]。2005年,华北电力大学的杨佩铭对多种转移阻抗的解析模型进行了深入的对比分析,并在此基础上成功构建了一个综合精度更高的计算模型^[9]。2011年,王添文及其团队在相关研究中,以转移阻抗的数学模型为依托,深入探究了不同编织参数对转移阻抗所产生的影响^[11]。2015年,

王添文等又根据传输线理论以及转移阻抗的定义,推导出了屏蔽电缆转移阻抗与屏蔽效能的具体计算公式,并通过仿真研究了各个因素(高度、线缆长度、编织锭数等)对屏蔽效能的影响^[12]。2020 年,重庆理工大学的赵鹤鸣等人在研究国外转移阻抗计算模型的基础上,成功提出了一种专门针对双层屏蔽电缆的转移阻抗解析计算模型,并通过实测验证了模型的准确性^[1]。

1.2.1.2 数值分析法

编织屏蔽电缆屏蔽层编织结构复杂,其电磁场分布和传输特性会也十分复杂,解析计算公式可能无法准确描述这些现象,可以利用电磁场仿真软件进行分析。常用的数值分析方法有时域有限差分法(FDTD)、矩量法(MOM)和有限元法(FEM)^[13]。

时域有限差分法(FDTD)^[16]由 K.S.Yee 于 1966 年提出,是一种强大的数值分析工具,广泛应用于电磁学领域,用于求解麦克斯韦方程组。该方法通过在时间和空间上对麦克斯韦方程进行离散化处理,将复杂的电磁场问题转化为一系列离散的差分方程。通过迭代求解这些差分方程,FDTD 能够精确地模拟电磁场在不同介质中的传播、反射、折射以及相互作用的动态过程,被广泛应用于电磁散射和电磁兼容领域,但对细长且包含细小几何结构的线缆,计算和存储需求较大。文献^[18]以有限埋地电缆为研究对象,采用时域有限差分法(FDTD)建立了物理分析模型,利用多区域 FDTD 方法分析了埋地电缆的电磁脉冲耦合问题,并通过实验验证了方法的有效性。文献^[19]研究泄漏同轴电缆的辐射场特性,采用时域有限差分法(FDTD)进行求解和仿真。通过结合 Z 变换,解决了复杂色散媒质中电磁波传播的计算问题,并改进了完全匹配层(PML)的实现方法,提高了吸收边界的效果。文献^[20]采用时域有限差分法(FDTD)研究了屏蔽线对直埋电缆直击雷的防护作用。通过建立包含土壤电离效应的三维 FDTD 模型,分析了雷击点附近电缆上的电压、电流以及土壤电阻率、屏蔽线电阻率等因素对防护效果的影响。

矩量法(MOM)^[21]由 R.F.Harrington 于 1968 年引入电磁学领域,是一种求解线性代数方程的数学方法。虽然矩量法适用于多种电磁问题,但对于复杂结构的编织型线缆,其计算复杂度较高,对计算机资源要求大。文献^[23]提出了一种基

于矩量法的数值计算方法，用于计算有限长同轴电缆的电容矩阵。通过将同轴电缆沿轴向分割成多个圆筒形单元，并在每个单元上建立平均电位方程和电场方程，形成方程组，进而计算电缆的电容矩阵。文献^[24]提出基于矩量法与传输线法的混合算法，用于研究轨旁金属线槽内电缆的串扰耦合问题。通过建立模型分析了线槽结构、电缆布置、屏蔽层接地等因素对串扰的影响，

有限元法（FEM）最早由库伦特于 1943 年提出，最初用于飞机设计，近年来在屏蔽线缆电磁场耦合问题中受到关注。有限元法具有物理概念清晰、计算量小、稳定性好等优点，尤其适合复杂结构体的分析。1997 年，Ioan Ernest Lager 提出了一种基于电场和磁场强度的有限元方法，精确建模了不同介质界面和边界条件，验证了其有效性^[25]。文献^[26]讨论了三维电磁场问题的有限元公式，采用磁矢量势作为场变量，并研究了 Lagrange（节点）和 Nedelec（边缘）有限元的离散化方式。文献^[27]提出一种基于边单元和双曲型麦克斯韦方程的有限元方法，采用高阶节点元素和正则化方程，文献^[28]在此基础上进一步利用有限元法计算屏蔽线缆的转移阻抗，通过将转移阻抗表示为电场的函数，仅需输入屏蔽的几何形状和材料属性即可完成计算。文献^[29]通过电磁场仿真 HFSS 建立了编织电缆的简化和近似数值结构模型，采用有限元法对其转移阻抗进行了仿真，验证了仿真模型的有效性。

这些研究展示了数值分析方法在复杂编织型线缆分析中的应用前景，为精确计算转移阻抗提供了多种技术手段。

1.2.1.3 屏蔽线缆屏蔽性能实测方法

随着电子设备复杂性的增加，电缆作为信号和能量传输的关键媒介，其屏蔽性能的测试方法也日益多样化。在过去几十年中，转移阻抗作为评估屏蔽电缆电磁兼容性的重要参数，一直是电磁屏蔽领域的研究热点。由于测试法能真实反应复杂电磁环境下高压屏蔽线缆的电磁透射现象，因此目前看来，测试法是获取转移阻抗最可靠的方法。目前，主要的测试方法包括三同轴法、线注入法、电流探头法、功率吸收钳法等^[30]。这些方法各有优势，适用于不同的测试场景和需求。

其中，三同轴法因其测试结果稳定、测试精度高、对环境要求低而得到了广泛应用。三同轴法测试装置原理图如图 1-1 所示，整个装置分为内外两个回路，

内回路由线缆内导体与其屏蔽层构成，外回路由线缆屏蔽层和外部金属管构成，按照内外回路终端匹配状态的不同可分为三同轴方法 A、B、C。然而，该方法结构复杂，对阻抗匹配要求高，且需要对被测电缆进行特殊处理，难以保证其原始结构不受影响。此外，三同轴法无法拓展到微波频率范围。

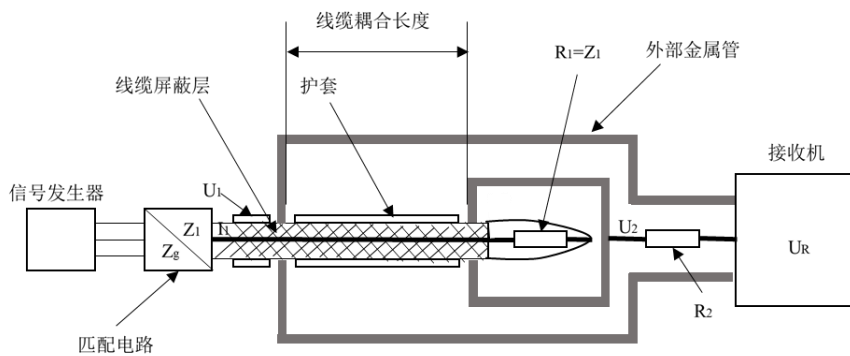


图 1-1 三同轴法测试装置原理

线注入法可以看作是对三同轴方法测试步骤的简化。线注入法测试原理图如图 1-2 所示，该测试方法将三同轴方法的外部金属管换成了注入线，通过向注入线注入规定的电压和电流信号，再测量被测线缆内导体的感应电压即可得到线缆屏蔽层的转移阻抗。线注入法则是另一种被国际 IEC 标准和我国测量标准采用的方法，其实验原理简单，测量频带可达到 1GHz 以上。

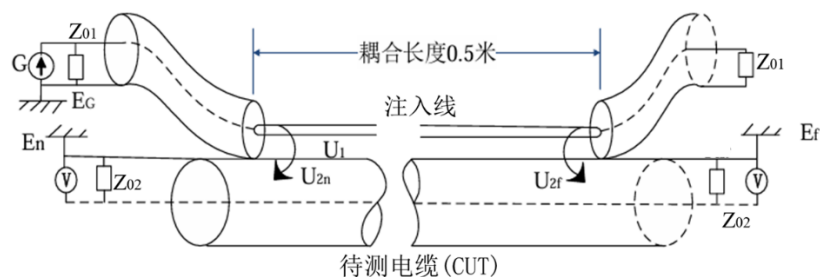


图 1-2 线注入法测试装置原理

功率吸收钳法的测量装置相对于三同轴法要简单许多，重复性较好，该方法装置原理图如图 1-3 所示，该装置内回路由线缆内导体与其屏蔽层构成，外回路

由线缆屏蔽层与周围环境构成。测试时，通过矢量分析仪向被测线缆内导体施加干扰电压和电流信号，再使用功率吸收钳（也称为吸收钳）来测量电缆屏蔽层上的感应信号，通过将输入的干扰信号与检测的感应信号作比较，就可以评估电缆的屏蔽效能，但是该方法对于测试环境要求很高，在外部干扰比较严重时测量误差会很大。

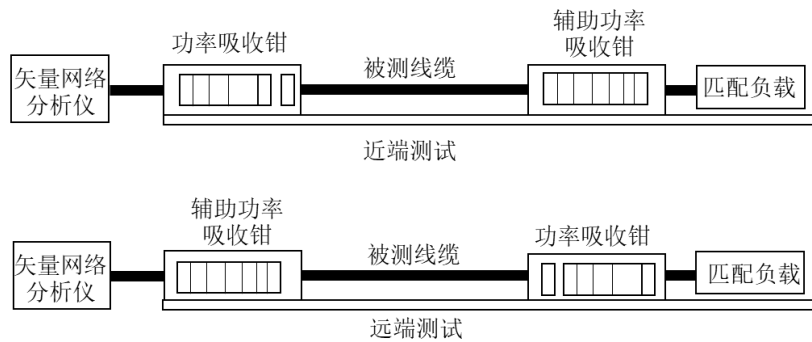


图 1-3 功率吸收钳法测试装置

1.2.2 柔性电磁屏蔽材料研究进展

1.2.2.1 高分子基材料

高分子材料诸如聚酰亚胺、聚乳酸、聚氨酯、聚丙烯等兼，具轻柔性、疏水性、易加工的优势，常被用作柔性基底制备电磁屏蔽材料，然而这些高分子材料本身是绝缘的，因此不具备电磁屏蔽的作用^[33]，一般需要通过加入导电填料以增强其抵御电磁辐射的能力。比较常用的导电填料主要有金属基填料（如铜、镍、铁等）、金属氧化物基填料和碳基填料^[34]。

金属基填料在电磁反射和衰减方面表现出色，但传统形式的金属基填料，如块状片材、粉末和纤维，在聚合物基质中容易沉降^[35]，这不仅影响材料的均匀性，还难以满足轻量化的需求。此外，在一些极端环境下，如潮湿、酸性、碱性条件下，容易被氧化和腐蚀，从而降低其电磁防护的能力；碳基材料具备优异的导电性^[36]，还具备抗腐蚀、抗氧化、重量轻、易加工等优点，因而，近几年在电磁屏蔽领域受到强烈关注^[37]。

本征导电高分子具备较高的导电率、介电常数和磁导率，其电导率在 1-10⁵ S/cm 的范围内^[39]，同时还拥有传统高分子材料轻柔、易加工的优点^[41]，是电磁

屏蔽领域中备受瞩目的柔性材料。目前，本征导电高分子材料有聚苯胺、聚吡咯等。

总的来说，高分子基材料具备相当多的优势，诸如抗腐蚀、抗氧化，柔性大、密度低、易于加工等，但其导电性能较低，远不及常见的金属材料，用来制成编织电缆编织屏蔽层，并不能提供较佳的屏蔽效果。

1.2.2.2 纺织基材料

织物由纤维或纱线通过机织、针织、非织造或特种编织等技术工艺制备而成，是二维或三维的纺织品，具有良好的力学柔韧性。在电磁屏蔽领域，国内外对纺织基底纱线原料的研究主要集中在两个方面：一是开发具有本征导电性的纱线原料；二是通过导电或导磁材料对原本绝缘的纱线原料进行改性处理^[42]。

本征导电纱线作为纺织电磁屏蔽材料的关键原料，涵盖了金属纤维、碳纤维及导电高分子纤维等类型。金属纤维具有卓越的导电性（电阻率低至 $10^{-4} \sim 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ）和高强度，是理想的电磁屏蔽基体材料。此外，普通的天然纤维和化学纤维由于自身导电能力不足，通常需要借助导电或磁性材料进行改性，以大幅增强其电磁屏蔽效能，常用的方法有混纺纱线、多股复合纱线、化学涂层和物理涂层等。利用现有的混纺技术（环锭纺、气流纺等）可以制得多相复合纱线。然而，混纺纱线的应用存在局限性，因为要实现有效的屏蔽效果，所需的导电或导磁填料比例较高，这不仅会降低纱线的力学性能，还会导致成本上升。

多股复合技术通过把金属纱线与天然或合成纱线结合，为纱线赋予电磁屏蔽的能力，然而，金属纱线密度大、抗弯刚度大且脆性大，导致织物结构厚重、手感硬挺，且在加工过程中易变形或断裂。此外，一些金属纱线存在抗氧化性和耐气候性不足的问题，其表面容易出现磨损或腐蚀现象，且外部作用力还可能使屏蔽组分发生位置偏移，进而影响屏蔽效能。

化学涂层以及物理涂层方法通常被用于在常规纱线表面沉积导电或者导磁材料，形成皮芯结构的复合纱线。然而，涂层厚度的精确控制和均匀分布仍是技术难点。二十世纪 80 年代，研究人员已经通过化学镀或电镀在纱线表面沉积金属层，开发出了具有良好屏蔽性能的金属化纱线。就比如，意大利 Intitnto Donegalli 公司^[43]开发的镀铜和镍的腈纶复合纤维，不仅具备柔软性，还拥有良

好的加工性能。但金属镀层与基底结合力弱，易脱落且分布不均匀，限制了其在实际应用中的性能稳定性。

1.3 本文主要内容和章节安排

编织屏蔽电缆的轻柔特性和屏蔽特性与其编织材料和编织结构密切相关，因此，本文从编织材料与编织结构出发，研究二者对于编织屏蔽电缆对其轻柔特性以及屏蔽性能的影响，为编织屏蔽层的设计提供相应的参考。具体内容如下：

第一章：引言，介绍了与课题相关的研究背景和意义，对国内外在该领域的研究现状进行了全面梳理，深入探讨了线缆屏蔽的重要性，以及屏蔽层轻柔化设计的必要性，揭示了其在现代技术应用中的关键作用。此外，本文还系统总结了屏蔽线缆转移阻抗的解析计算方法、电磁仿真技术以及屏蔽性能测试方法的相关研究成果，为后续研究提供了理论基础。

第二章：介绍了编织屏蔽线缆的基础结构，阐述了屏蔽线缆屏蔽效能与转移阻抗的基本概念并推导了二者之间的函数关系式。最后，对编织屏蔽电缆转移阻抗的解析计算方法进行了细致且全面的分析与总结。

第三章：依据三同轴方法的基本原理，在电磁仿真软件 CST 中，采用三同轴方法 B 建立仿真模型，对编织屏蔽电缆的转移阻抗进行仿真，并和解析计算模型的结果进行对比，验证了仿真的有效性。接着通过该仿真模型研究了编织材料、各个编织参数与转移阻抗之间的关系和变化规律，最后采用功率吸收钳法对线缆的实际屏蔽效能进行了测量并与 CST 三同轴方法 B 仿真模型结果与解析方法计算结果进行了比较，验证了仿真模型的可靠性。

第四章：分析了高空核爆电磁脉冲波形的特点，研究了在强电磁脉冲辐照下，不同种类屏蔽层、不同编织结构的屏蔽电缆的耦合特性，为屏蔽层编织参数设计提供了参考。

第五章：总结与展望，对全文的研究内容进行了系统的梳理和归纳，并指出了其中存在的较为明显的不足之处。

第2章 编织屏蔽电缆屏蔽效能理论研究

2.1 线缆屏蔽效能理论研究基础

2.1.1 电磁屏蔽的基本原理

电磁兼容指的是不同电子设备或系统在同一时间、同一空间共同工作时，既不会产生强烈的电磁辐射对周围设备的正常运行产生影响，也不会因为受到其它电子设备的电磁辐射而无法正常运行^[44]。电磁屏蔽作为实现电磁兼容的关键且高效的方法之一，其原理是利用导电或导磁材料构建屏蔽体，对电磁波进行阻挡或衰减，从而限制电磁能量在特定区域内的传播，以达到减少电磁干扰和电磁辐射的目的。如图 2-1 所示，对于没有孔缝的屏蔽体，其电磁屏蔽机理主要基于反射损耗（ R_{dB} ）、吸收损耗（ A_{dB} ）和多重反射损耗（ M_{dB} ）的协同作用。

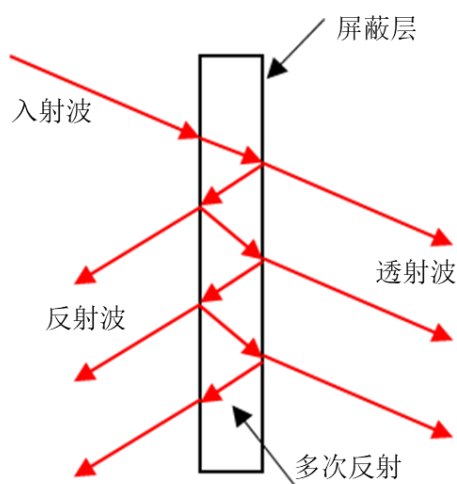


图 2-1 电磁屏蔽原理图

当电磁波遇到屏蔽体时，会在屏蔽层入射面形成感应电流和感应电荷，形成新的辐射源并向入射面两侧反射电磁波，反射回原来介质的电磁波成为反射波，其大小与该表面的反射系数密切相关，穿透入射面的电磁波称为透射波，透射波在屏蔽层内部继续传播一部分能量会因涡流损耗和磁滞损耗而被吸收，继而转化为热能或其他形式的能量，这一过程就叫做吸收损耗，其影响因素包括材料的电导率、磁导率、屏蔽体厚度以及电磁场的频率。此外，电磁波在屏蔽体内部的多次反射也会进一步衰减能量，形成多重反射损耗。综上所述，屏蔽效能（SE）的计算式为：

$$SE=R_{dB}+A_{dB}+M_{dB} \quad (2-1)$$

在实际应用中，屏蔽体的材料特性、厚度设计以及电磁波的频率特性共同决定了屏蔽效果，高频电磁屏蔽主要依赖于屏蔽体的反射和吸收损耗，而对低频磁场屏蔽则更多取决于材料的高磁导率特性。

2.1.2 电缆屏蔽效能的定义

屏蔽效能（Shielding Effectiveness, SE）是衡量屏蔽体对电磁波衰减能力的重要指标，用于评估材料或结构对电磁辐射的阻挡或减弱效果。一般而言，屏蔽效能可以分为时域屏蔽效能和频域屏蔽效能，通常所说的屏蔽效能一般指的是屏蔽体的频域屏蔽效能。

对于电缆而言，增加外部屏蔽层是实现电磁屏蔽重要且有效的手段，屏蔽电缆的屏蔽层起着屏蔽电磁信号的作用。在电磁兼容领域里，屏蔽层的频域屏蔽效能定义为有无屏蔽层时空间某点处的场强比值^[45]。

$$SE_f=20\lg \frac{E_1(f)}{E_2(f)} \quad (2-2)$$

式中： SE_f 为编织屏蔽电缆的屏蔽效能； $E_1(f)$ 为无屏蔽层时的场强； $E_2(f)$ 为有屏蔽层时的场强。

时域电磁场的峰值场强、瞬态电场的变化率以及能量密度是评估电子设备中敏感器件受干扰或损伤的关键参数。在设计和防护措施中，需要综合考虑这些参数的影响，以确保敏感器件在复杂电磁环境中的安全性和可靠性。其中时域电磁场的峰值场强是最为容易获得的，因此屏蔽电缆的时域屏蔽效能可以表示为：

$$SE=20\lg \frac{\max[E_1(t)]}{\max[E_2(t)]} \quad (2-3)$$

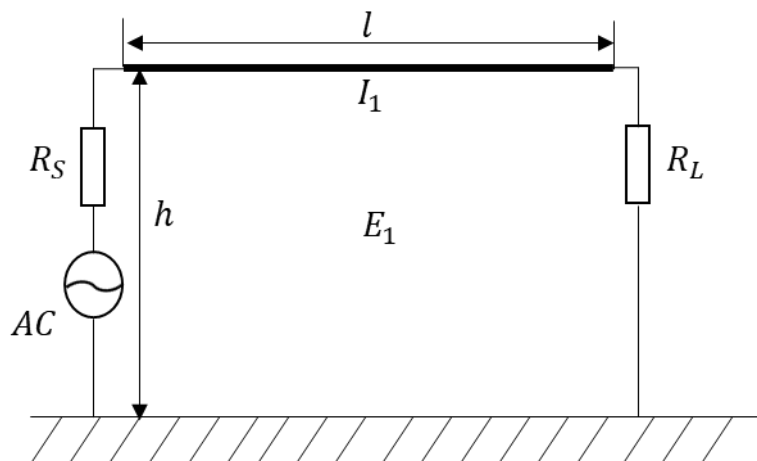
式中： $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 分别表示为电缆有无屏蔽层时同一位置的电场的时域波形。

综上所述，时域屏蔽效能（TDSE）和频域屏蔽效能（FDSE）是评估屏蔽体性能的两种重要方法，各有其优缺点。时域屏蔽效能能够直接反映屏蔽体对瞬态信号（如电磁脉冲）的防护能力，尤其适用于快速上升沿和高幅值脉冲信号的防护评估。频域屏蔽效能则通过测量屏蔽体对不同频率连续波信号的衰减能力来评估，测试设备相对成熟、成本较低，能够全面反映屏蔽体在宽频带内的屏蔽性能，但对瞬态信号的防护能力评估不够直接。因此，在选择屏蔽效能评估方法时，需根据具体的测试目的、应用场景和信号特性来决定。

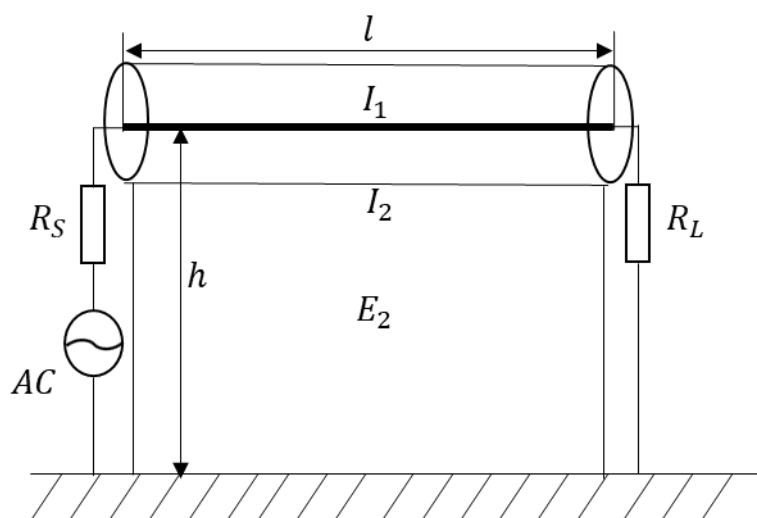
2.1.2 电缆屏蔽效能与转移阻抗的关系

转移阻抗作为电缆屏蔽层的固有参数，可以有效地衡量电缆的屏蔽性能并且计算起来也比较容易，然而在评估和设计电缆时，通常需要使用屏蔽效能来衡量电缆屏蔽性能，因此，很有必要对屏蔽效能与转移阻抗的关系进行探讨，从而利用转移阻抗得到屏蔽效能的值。

图 2-2 为有无屏蔽层时，电缆的辐射模型。



(a) 无屏蔽层电缆辐射模型



(b) 有屏蔽层电缆辐射模型

图 2-2 有无屏蔽层时电缆的辐射模型

假设流过电缆芯线内部的电流为 I_1 ，流过屏蔽层中的电流为 I_2 。若电缆未配备屏蔽层，电缆芯线与地面之间将产生共模辐射：

$$E_1 = K_1 I_1 \quad (2-4)$$

在上述公式中, K_I 代表对地共模辐射因子, 它是电缆长度 (l)、频率 (f)、电缆与地面之间的高度 (h) 以及回路到观测点的距离 (d) 的函数。

当有屏蔽层时, 电流流经屏蔽电缆内部芯线和外屏蔽层, 形成差模辐射回路, 屏蔽层与地之间形成共模回路, 因此总的电磁辐射可以表示为^[11]:

$$E_2 = K_I I_2 + K_2 I_1 \quad (2-5)$$

式中: K_2 表示差模辐射因子, 为 l 、 f 、 h 、 d 的函数。

当电缆距离地面较高, 由于差模辐射回路的面积相比共模辐射回路很小以及差模电流方向相反, 导致 K_2 很小, 因此屏蔽效能的计算公式可简化为^[11]:

$$SE = 20 \lg \frac{E_1}{E_2} = 20 \lg \frac{K_I I_1}{K_I I_2 + K_2 I_1} \approx 20 \lg \frac{I_1}{I_2} \quad (2-6)$$

图 2-3 展示了屏蔽电缆内外传输线回路的等效电路模型。在该图中, Z_T 代表电缆屏蔽层的转移阻抗, l 为电缆的长度。内导体与屏蔽层内表面构成了内传输线回路, 而地面与屏蔽层外表面则构成了外传输线回路。

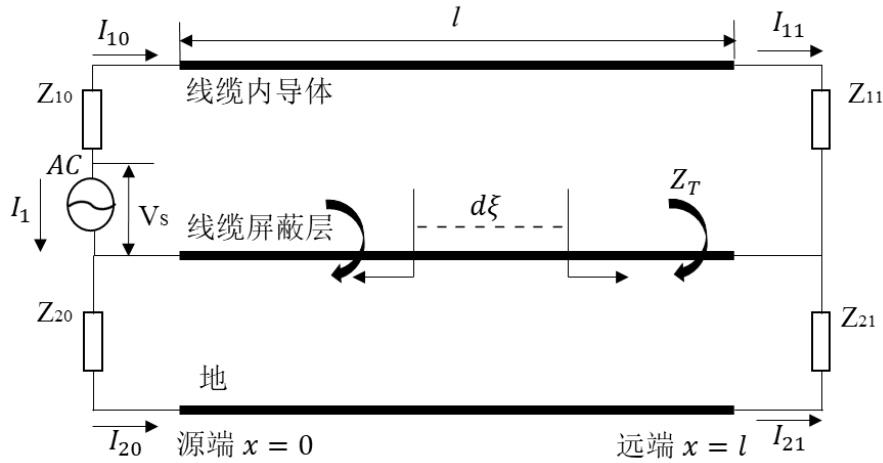


图 2-3 屏蔽电缆等效电路模型

根据 TL 传输线理论可以得到内导体任意一点上的传输电流:

$$I_1(x) = I_{10} \cosh(\gamma_l x) - I_{10} \frac{Z_{10}}{Z_{cl}} \sinh(\gamma_l x) \quad (2-7)$$

上式中, I_{10} 为激励源源端电流; γ_l 为构成内回路传输常数; Z_{10} 为激励源源端阻抗; Z_{cl} 为传输线内回路特性阻抗。

电缆内导体上的电流 $I_1(x)$ 在屏蔽层上产生的纵向电压为:

$$d\xi = I_1(x) Z_T dx \quad (2-8)$$

每点纵向电压在屏蔽层上面产生的电流为：

$$dI(x) = \frac{d\xi}{Z_L + Z_R} \quad (2-9)$$

式中， $Z_L = Z_{c2} \tanh(\gamma_2 x)$ ， $Z_R = Z_{c2} \tanh(\gamma_2 (l-x))$ ，其中 Z_{c2} 为传输线外回路的特性阻抗， γ_2 为外回路的传输常数。

由此，根据传输线理论可以得到沿屏蔽层上各点的电流为：

$$dI_2(x) = dI(x) \cosh(\gamma_1 x) - \frac{dI(x) Z_L}{Z_{c2}} \sinh(\gamma_2 x) \quad (2-10)$$

对上式进行积分并将式（2-8）和式（2-9）代入到公式（2-10）即可得到流经屏蔽层的总电流的表达式：

$$I_2(x) = \int_0^l \frac{I_1(x) Z_T \cosh(\gamma_2 (l-x))}{Z_{c1} \sinh(\gamma_2 l)} \left(\cosh(\gamma_1 x) - \frac{Z_{l0}}{Z_{c1}} \sinh(\gamma_2 x) \right) dx \quad (2-11)$$

当线缆长度远小于电气长度时，上式可以进一步简化为：

$$I_2(x) = \frac{I_{l0} Z_T}{Z_{c1} \gamma_2} = \frac{I_{l0} Z_T}{\sqrt{\frac{R_S + j\omega L_2}{j\omega C_2}} \sqrt{(R_S + j\omega L_2) j\omega C_2}} = \frac{I_{l0} Z_T}{R_S + j\omega L_2} \quad (2-12)$$

式中， R_S 为电缆屏蔽层单位长度上的电阻， L_2 为屏蔽层单位长度的对地电感。

最后将式（2-12）代入到式（2-6）即可得到屏蔽电缆屏蔽效能与转移阻抗的关系表达式：

$$SE = 20 \lg \frac{R_S + j\omega L_2}{Z_T} \quad (2-13)$$

从上述分析可以明确，电缆的转移阻抗与其屏蔽效能之间存在着直接且紧密的联系，即转移阻抗越小，屏蔽效能越高^[12]。因此，转移阻抗不仅是一个关键的量化指标，而且能够在相当程度上反映和表征屏蔽电缆的屏蔽效能。在实际应用中，通过精确测量和计算转移阻抗，可以有效地评估和优化电缆的电磁屏蔽性能，确保其在复杂的电磁环境中稳定可靠地运行。

2.2 转移阻抗解析计算方法分析

编织屏蔽电缆由外部防护层、编织屏蔽层、内绝缘层以及内导体芯线这四部份构成，其结构如图所示，其中编织屏蔽层由金属纱线构成，起着屏蔽电磁干扰的作用；防护层由塑料制得，起到了绝缘的作用，同时可以防止金属屏蔽层被外部环境所腐蚀。

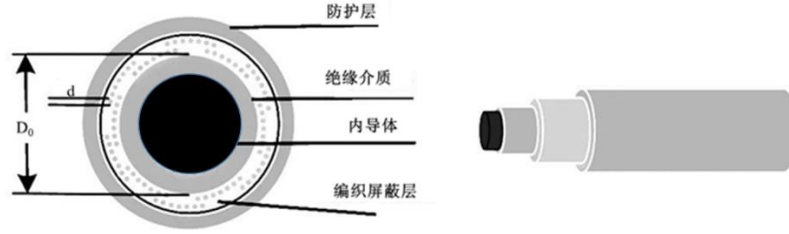


图 2-4 编织屏蔽线缆示意图

编织屏蔽层的转移阻抗是衡量电磁场与屏蔽电缆耦合程度的关键指标。具体而言，转移阻抗是指当屏蔽层上有单位电流流过时，在电缆芯线与屏蔽层之间产生的开路电压。

$$Z_T = \frac{1}{I_0} \frac{dV}{dz} \Big|_{I=0} \quad (2-14)$$

式中： Z_T 为表征编织屏蔽层的转移阻抗； I_0 是屏蔽层中流动的总电流； I 表示内导体的电流； dV/dz 是由该电流沿屏蔽层及其所包围导体构成的传输线所产生的开路电压变率； z 为线缆轴向方向。

前文已经介绍了转移阻抗的基本概念和计算公式，然而，对于计算编织电缆的转移阻抗理论计算通常不采取上述公式，而是推导出一些更加直观、有效的且与编织层参数相关联的计算公式。编织屏蔽电缆的转移阻抗精确计算公式是基于对时变电磁场作用于电缆屏蔽层上的电磁耦合机制进行深入分析，并结合电磁场理论推导得出。在实际情况下，当外部时变电磁场辐射到屏蔽层上，由于编织结构可能存在的间隙和不连续性，电磁波会在屏蔽层表面及内部发生散射、透射以及绕射等复杂的相互作用。根据这些物理现象和电磁场传播规律，一般的用于计算编织屏蔽电缆转移阻抗的公式为：

$$Z_T = Z_d + j\omega(M_h + M_b) + M_e \quad (2-15)$$

式中： Z_d 为屏蔽层上由感应电流散射产生的散射阻抗，描述了瞬态电磁场在辐射至屏蔽层时的低频响应特性； M_h 为屏蔽层上小孔耦合效应所产生的孔电感，与电磁波通过孔洞结构时的耦合强度有关； M_b 是由编织带中电流引起的交叉处磁场相互作用以及磁通量切割所产生的电感效应，表示了编织结构对电磁场传播的影响； M_e 为涡电流效应所产生的附加电感，其大小与切向电场作用于编织屏蔽层时诱发的涡电流路径阻抗相关。

编织屏蔽转移阻抗可以使用以下五个编织参数计算：编织锭数 C ；每锭根数 N ；编织丝的直径 d ；编织节距 p ；编织前的电缆直径 D_0 。编织屏蔽的平面展开如图 2-5 所示。有了这些参数就可以得到编织同轴电缆的转移阻抗。

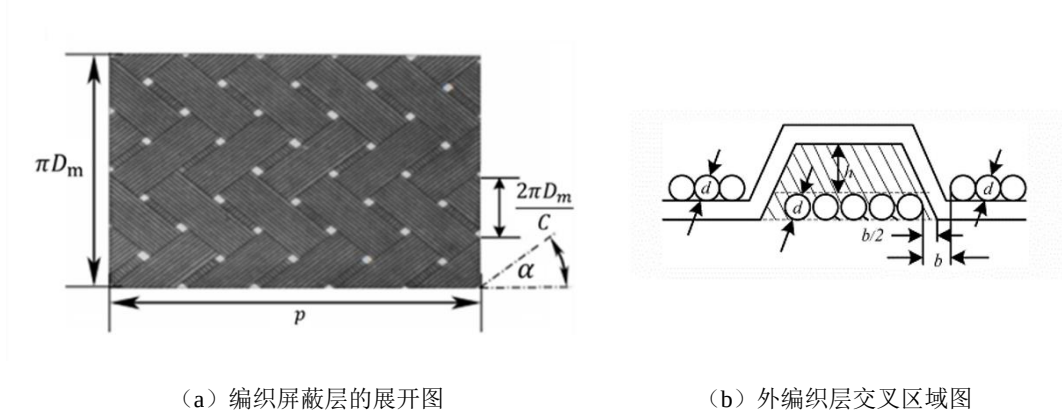


图 2-5 编织屏蔽套的平面展开图

2.2.1 散射阻抗

VANCE E F.等^[5]耦合理论提出的散射阻抗计算公式，精确地描述了瞬态电磁场辐射至编织屏蔽层上的频域特性。该理论目前在业界应用广泛，并且其计算精度相对较高，是公认的较为准确的计算方法之一。因此，散射阻抗计算式使用 Vance 模型的计算公式：

$$Z_d \approx \frac{4}{\pi d^2 N C \sigma \cos \alpha} \frac{(1+j)d/\delta}{\sinh((1+j)d/\delta)} \quad (2-16)$$

趋肤深度 δ 表示为

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2-17)$$

式中： σ 为编织材料电导率； μ 为编织材料的磁导率， f 为频率。

编织角度 α 计算式为

$$\alpha = \arctan \frac{\pi D_m}{p} \quad (2-18)$$

式中： D_m 为编织后的电缆直径， $D_m = D_0 + 2d + h$ ，其中 h 表示 2 个相交叉编织束之间的距离。

2.2.2 小孔电感

Tyni 在 Vance 原始模型的基础之上，对描述由外部电磁场导致的编织层内部孔洞电感 M_h 的表达式进行了精细化改进^[6]，以更准确地模拟这种电磁场穿透

效应。然而，在高频范围时，该理论计算出的孔洞电感值通常高于实测值，并且两者之间的差异有时会明显增大。这是由于当作用于编织层上的瞬态电磁场频率增加至某一阈值时，透入编织结构内部的高频率电磁波在遇到具有曲率变化的编织网时所遭遇的衰减效应变得不容忽视。针对这一现象，文献^[6]在 Tyni 优化后的孔电感模型上进行了进一步分析和修正，引入了一个 0.875 的校正因子来改善高频段的预测准确性。经过修正后的孔电感 M_h 的计算式为

$$M_h = 0.875 \frac{2\mu_0 C}{\pi \cos \alpha} \left(\frac{b}{\pi D_m} \right)^2 e^{(-\frac{\pi d}{b} - 2\alpha)} \quad (2-19)$$

式中： μ_0 为真空磁导率； b 为相邻编织束间的距离。

相邻编织束间距离 b 的计算式为

$$b = \frac{2\pi D_m \cos \alpha}{C} - Nd \quad (2-20)$$

2.2.3 编织电感

Tyni 的理论工作精确定义了编织结构电感 M_b 的数学表达式，它详细描述了由于内外编织层在交叉区域间磁通耦合所引起的电缆内部与外部电磁场之间的相互作用。因此，在处理高或低编织密度的电缆时，相较于 Vance 模型，Tyni 的数学模型显示出更高的精确度。但是在计算编织密度较优的编织层电感时，Tyni 的理论模型不是十分精确。不过，在文献^[47]中提出的编织电感计算公式表现出了对各种编织电缆情况下的准确性。编织电感 M_b 的表达式为：

当 $\alpha < \pi/4$ 时

$$M_b = \frac{-\mu_0 (Nd h + \left(b - \frac{bh}{d}\right) \frac{h+d}{2} + B) A}{2\pi C D_m \cos \alpha} \quad (2-21)$$

式中：取负号是因为编织带上电流产生的磁场与原磁场方向相反。

当 $\alpha > \pi/4$ 时

$$M_b = \frac{\mu_0 (Nd h + \left(b - \frac{bh}{d}\right) \frac{h+d}{2} + B) A}{2\pi C D_m \cos \alpha} \quad (2-22)$$

式中： $B = N(d^2 - \frac{\pi d^2}{4})$ ； $A = (\sqrt{v} + 1)^2 \cos(2\alpha)$ ；编织束间距离 $h = \frac{2d}{1+b/d}$ ；编织屏蔽套单位长度上的小孔数 $v = \frac{2\pi D_m \sin \alpha \cos \alpha}{N^2 d^2} F^2$ ；单向编织面积 $F = \frac{CNd}{2\pi D_m \cos \alpha}$ ；编织密度 $K = 2F - F^2$ 。

2.2.4 附加电感

在高频瞬态电磁场作用下，编织网结构内部对外部场响应的复杂性增加，尤其是内外层编织束之间因磁场相互作用而产生的涡电流效应导致了额外的衰减，

这一衰减在频率较高的条件下变得不可忽视。因此，在计算转移阻抗时，必须考虑由涡电流引起的额外衰减效应。这种效应相当于在编织网上，切向电场作用下产生的涡电流，其电场强度与屏蔽层中传导的电流以及涡电流路径上的电阻成正比，而该电阻又与内层编织束材料的表面电导率直接相关。因此，在转移阻抗计算模型中，引入了附加电感项^[46]，以更准确地反映高频条件下涡电流对编织屏蔽电缆转移阻抗的影响。附加电感 M_e 的计算式为

$$M_e = -\frac{1.16}{CNd} \arctan \frac{N}{3} \sin\left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha\right) \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} e^{\frac{\pi}{4}} \quad (2-23)$$

2.3 解析法转移阻抗曲线构成分析

编织屏蔽电缆的转移阻抗 Z_T 由散射阻抗 Z_d 、电感项 ($j\omega(M_h + M_e)$) 以及附加电感 (M_e) 组成，各个组成部分随着频率变化的曲线如图 2-6 所示，其中所选屏蔽电缆的编织参数为： $C=16$ 、 $N=4$ 、 $d=0.15 \text{ mm}$ 、 $D_0=2 \text{ mm}$ 和 $\alpha=30^\circ$ 。从图中可以明显的看到转移阻抗的电感项和编织电感项随着频率的升高而逐渐增大，散射阻抗由于集肤效应，随频率上升不断地减小，以至于当频率高于 1 MHz 后，相较于转移阻抗的电感项和附加电感的值几乎可以忽略不记。

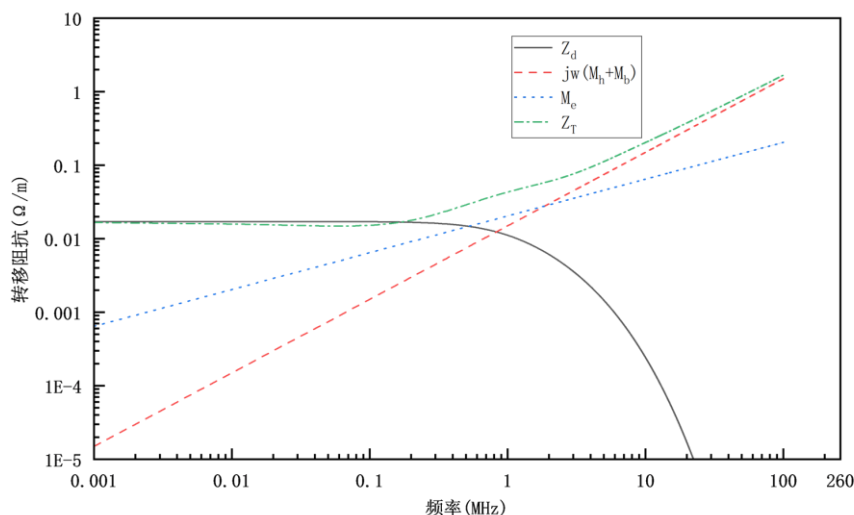


图 2-6 转移阻抗各个组成部分关于频率的变化曲线

仔细观察可以发现当频率在 200 KHz 以内时，转移阻抗的曲线和散射阻抗的曲线具备很强的相关性，二者几乎相差无几，由此可以得出在此频率范围内编织电缆转移阻抗的大小主要由散射阻抗决定；而当频率在 $200 \text{ KHz} \sim 3 \text{ MHz}$ 的范围时，

转移阻抗各个组成部分的值都无法忽视，转移阻抗的大小由它们共同决定；但当频率超过 3MHz 后，散射阻抗的值相较于电感项以及附加电感项就显得微不足道了，此时，转移阻抗的值往往取决于电感项和附加电感，如果频率继续增加，超过 10MHz，由于转移阻抗的电感项随频率增加的速度高于附加电感，因而渐渐的转移阻抗电感项占据绝对的主导地位，转移阻抗的值基本上取决于电感项，即小孔电感和编织电感之和。

2.4 本章小结

本章介绍了电磁屏蔽的基础理论，分析了电缆屏蔽效能及转移阻抗的关键概念，并推导了屏蔽电缆屏蔽效能与转移阻抗之间的函数关系式，对转移阻抗解析计算方法进行了详细的阐述，对转移阻抗曲线的构成进行了分析，发现在低频段，转移阻抗的大小主要取决于散射阻抗，高频段编织电感和小孔电感占主导地位。

第3章 编织屏蔽电缆转移阻抗仿真与参数优化设计

3.1 编织屏蔽材料选择

不同材料的电导率和磁导率都不尽相同，因此它们屏蔽电磁波干扰的能力也有很大的差别。金属材料因其卓越的电磁屏蔽性能，被认为是赋予纺织品高效电磁屏蔽能力的理想选择。然而金属材料一般密度都比较大，不易弯曲，因此需要寻找到一种重量轻，又兼具一定柔韧性的材料。碳纤维材料不仅密度低、易弯曲，而且还具有抗腐蚀的特性，但其电磁屏蔽性能较差，电导率通常在 10^2S/m 到 10^5S/m 之间。

碳纤维纱线这类材料的屏蔽效能不及金属材料的主要原因是其电导率太低，因此需要通过一些方法提高其电导率，常见的方法通常是将天然或人造纤维与金属复合，形成含金属成分的纱线。含金属成分的纱线多种多样，主要包括金属纱线、金属混纺纱线、多股复合纱线、涂覆金属纱线以及金属镀层纱线。然而这些类别的纱线均存在一些缺点：金属纱线刚度强、密度大；金属混纺纱线中金属纤维分布不均匀，这将极大地影响材料的结构和电磁屏蔽性能的稳定，造成一部分区域屏蔽效能好，一部分区域屏蔽效果差的情况；多股复合纱线金属纱线含量过高将导致材料总体密度上升，很难实现轻量化；而多层复合纱线中的金属涂层或镀层与基底纱线的附着力不强，容易脱落，使得整体结构的稳定性较差，并且此类纱线的加工工艺比较复杂而且成本也高。因此，仍需以金属纱线为原料，从优化编织结构参数优化入手，在尽可能不降低屏蔽性能的前提下，提升屏蔽层的轻柔性。

编织材料导电与 导磁特性直接关系到电缆的屏蔽效果，目前常用的编织屏蔽层的纱线材料主要有高纯度无氧铜、镀锡铜线、铜包铝线、镀银铜线、铜包钢丝、铝箔和铜箔等。表 3-1 给出了这几种材料的特点、导电特性以及用途^[1]。

表 3-1 屏蔽线缆金属材料对比

材料	用途	电导率	特点
高纯度无氧铜	内外导体	好	应用广泛
镀锡铜线	内外导体	低频良好	低频用作内导体，高频用作外导体，抗氧化
铜包铝线	内导体	高频好、低频良好	应用广泛
镀银铜线	内外导体	高频好、低频较好	成本高、应用较少，适合对屏蔽要求高的线缆
铜包钢丝	内外导体	高频好	韧性好，拉伸强度高
铝箔和铜箔	外导体	高频好	常用于发泡聚乙烯线缆

3.2 转移阻抗仿真模型的搭建与仿真验证

除了编织材料，编织电缆的编织结构参数（编织锭数、编织角度、每锭编织导线数、编织导线直径、编织层内径、编织密度）对屏蔽电缆的屏蔽效能以及轻柔特性的影响也十分的重要。为了更加方便探究不同结构参数对屏蔽电缆屏蔽性能的影响需要对屏蔽电缆转移阻抗的模型进行建模。常见的测量转移阻抗方法有三同轴法、线注入法、功率吸收钳法等，其中三同轴测试方法测试精度高、测试结果稳定，因此本文根据三同轴方法 B 的测试原理在 CST 电磁仿真软件中搭建屏蔽电缆的转移阻抗的仿真模型。

3.2.1 三同轴方法的原理

三同轴法是电磁兼容性测试中一种重要的电缆屏蔽效能评估方法，通过构建一个独特的三同轴系统，将被测电缆的中心导体、屏蔽层以及外部测试装置组合在一起，形成一个三同轴结构。通过这种方法，可以精确地测量电缆屏蔽层的转移阻抗和屏蔽衰减性能。这种测试方法因其高精度和可靠性，被广泛应用于高压电缆、屏蔽线束的电磁屏蔽性能评估中。

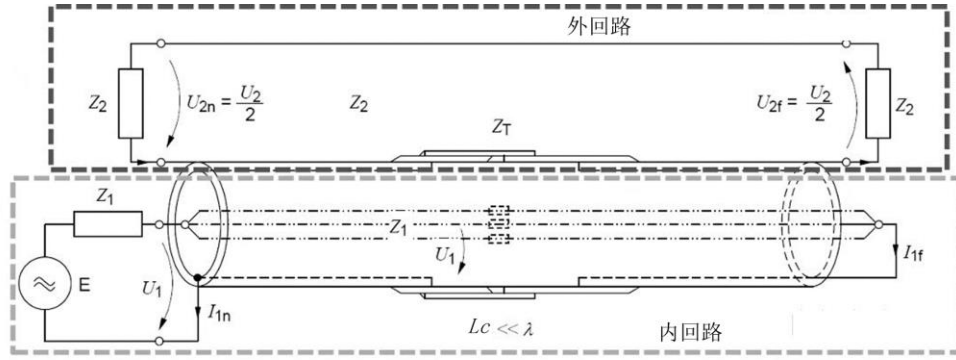


图 3-1 三同轴测试装置原理图

三同轴测试方法原理图如图 3-1 所示，该测试装置由内部回路和外部回路两部分，其中内回路由被测屏蔽线缆内部芯线以及屏蔽层构成，外部回路则由线缆外屏蔽层和外部同轴管组成。图 3-1 中展示的方法是通过向被测线缆的内导体芯线输入规定的电流信号，再去测量屏蔽层和同轴管之间的耦合电压，最终得到其转移阻抗的大小。此外，也可以通过向被测线缆屏蔽层输送规定的电流，然后测量被测线缆内部芯线与其屏蔽层之间的开路电压的方式测量其转移阻抗。所测得的耦合电压的大小与输入的电流信号大小之比即为转移阻抗的值，转移阻抗的计算表达式为：

$$Z_T = \frac{U_2}{I_1 L_c} \quad (3-1)$$

其中， L_c 表示为被测屏蔽线缆的耦合长度； U_2 代表外部回路的耦合电压； U_1 为内回路电压； I_1 为注入的电流信号； Z_1 和 Z_2 表示内外回路特性阻抗； λ 为自由空间的波长。

本文采用三同轴方法 B：内回路连接终端阻抗，外回路不接衰减阻抗。该方法测试装置如图 3-2 所示。

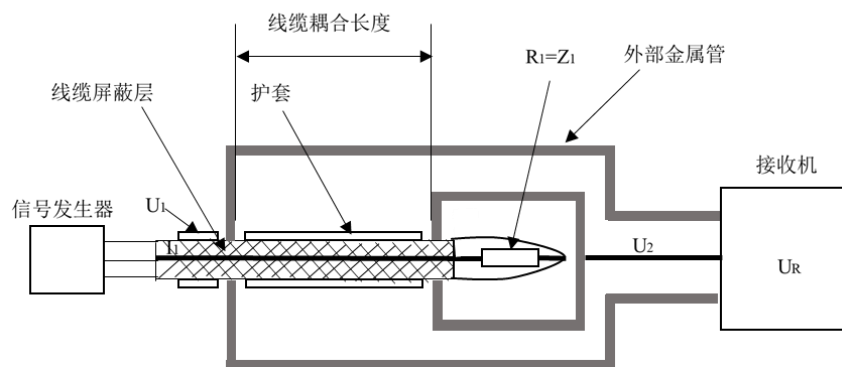


图 3-2 三同轴方法 B 测试装置

3.2.2 屏蔽线缆转移阻抗仿真模型建立

转移阻抗计算公式的推导往往需要对复杂的编织结构进行简化,这可能导致计算结果与实际情况存在一定的偏差,而利用电磁场仿真软件进行仿真能够精确模拟这些复杂结构。为了验证屏蔽电缆转移阻抗计算模型的有效性和精确度,以及评估屏蔽层对于电磁能量传输抑制的效果^[48],采用国际电工委员会标准 IEC 62153-4 方法 B 中描述的二同轴测试方案,利用 CST 仿真软件对屏蔽线缆的转移阻抗进行仿真。根据二同轴 B 方法的测试原理搭建仿真模型,建模总体思路图 3-3 所示

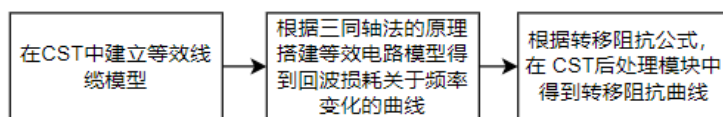


图 3-3 总体仿真思路

该测试配置的具体模型和等效电路模型如图 3-4 和图 3-5 所示。其中屏蔽线缆选用 RG58 同轴线,线缆长度为 1m。

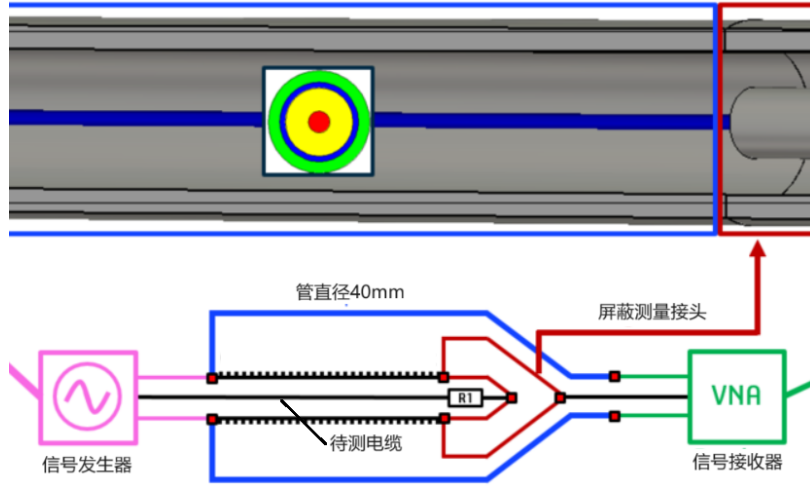


图 3-4 IEC 62153-4 方法 B 测试标准

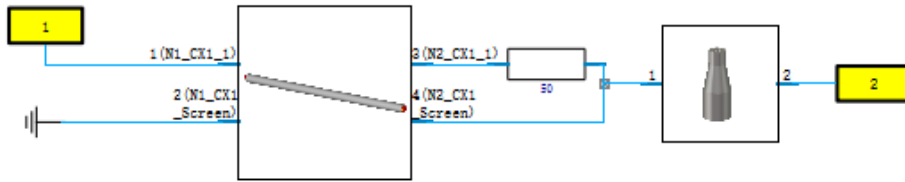


图 3-5 等效电路模型

三同轴 B 方法转移阻抗计算公式为

$$Z_T = \frac{R_1 + Z_0}{2L_c} 10^{-(a_{meas} - a_{cal})} \quad (3-2)$$

式中： $a_{meas} = 20 \log_{10}(S_{21})$ 为测量过程中的衰减； S_{21} 为回波损耗； a_{cal} 是校准时测量的复合损耗，仿真情况下该项为 0； Z_0 为信号发生器和接收机的阻抗，通常为 50Ω ； L_c 是被测线缆耦合长度； R_1 为终端阻抗。

仿真结束后在 CST 数据后处理模块，根据公式（3-2）转移阻抗与各个参数的关系即可得到仿真结果。

3.3.3 仿真验证

为了验证仿真结果的准确性，需要对其仿真结果进行验证。图 3-6 展示了随着频率变化，电磁仿真计算与数学模型预测的转移阻抗对比曲线，其中所采用的编织结构参数为： $C=16$ 、 $N=4$ 、 $d=0.15 \text{ mm}$ 、 $D_0=2 \text{ mm}$ 和 $\alpha=26^\circ$ 。从图形数据可以看出，在频率在 10 MHz 以下，通过电磁仿真方法得到的转移阻抗与基于数学

模型计算的结果基本一致，两者吻合度较高。当频率超过 10 MHz 后，数学模型计算出的转移阻抗数值相较于电磁仿真的结果偏大，这可能反映了在高频条件下数学模型简化带来的偏差或电磁场复杂性未被完全考虑的特点。

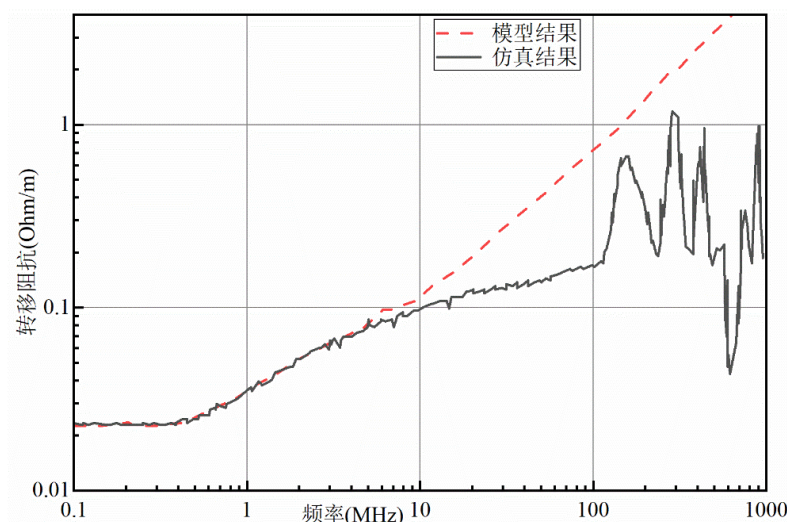


图 3-6 计算模型与仿真结果对比图

3.3 编织参数与转移阻抗的关系

(1) 编织材料对转移阻抗的影响

为了探究编织材料对编织防波套屏蔽性能的影响，在相同编织参数的情况下，分别对以金属铜以及碳纤维为屏蔽材料的屏蔽电缆的转移阻抗进行了仿真，仿真结果如图 3-7 所示，编织屏蔽层各参数为： $C=16$ 、 $N=6$ 、 $d=0.12\text{ mm}$ 、 $\alpha=45.2^\circ$ 和 $D_0=2.95\text{ mm}$ ，线缆长度均为 1m。从结果可以看出以碳纤维材料作为屏蔽层材料的屏蔽电缆的转移阻抗要远远高于以金属铜作为屏蔽层材料的屏蔽电缆，因此虽然碳纤维材料相比金属材料具备优异的机械性能，但其电导率远不及一般的金属材料，屏蔽效果不佳，无法满足实际需要，因此后续仿真选择铜作为编织材料。

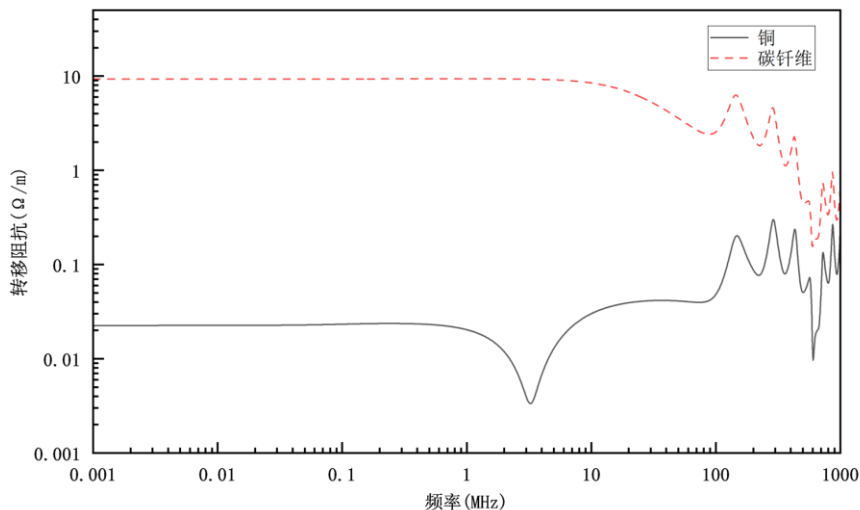
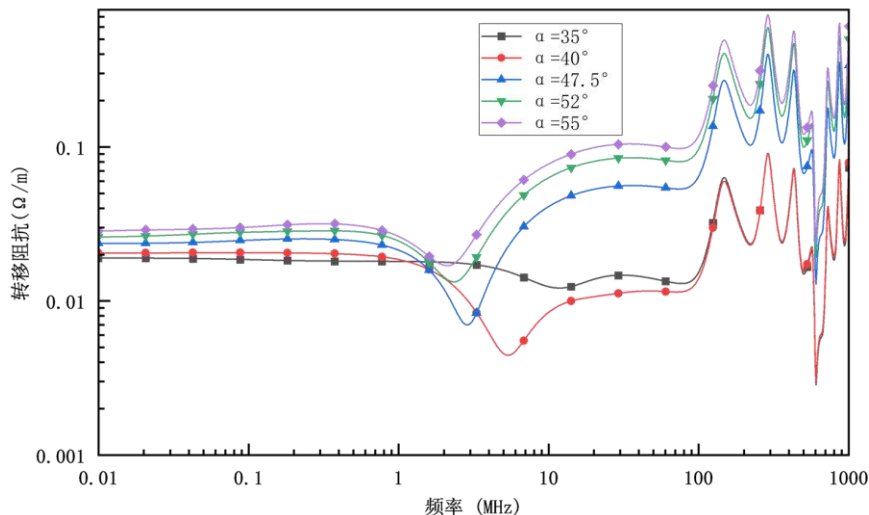


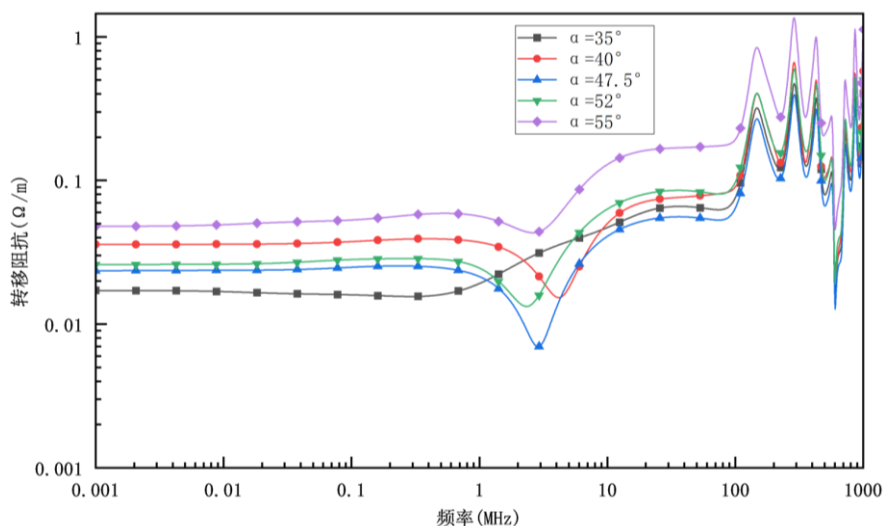
图 3-7 不同材料对转移阻抗的影响

(2) 编织角度对转移阻抗的影响

为了探究编织参数与转移阻抗之间的内在关系，通过调整编织参数设置，获取了不同编织条件下的转移阻抗数据。图 3-8 表示随着频率变化，不同编织角度下转移阻抗的变化趋势，包含两个算例，其中算例 1 中屏蔽层编织结构参数为： $C=16$ 、 $N=6$ 、 $d=0.12\text{ mm}$ 和 $D_0=2.95\text{ mm}$ ，算例 2 编织参数为： $C=24$ 、 $N=4$ 、 $d=0.12\text{ mm}$ 和 $D_0=2.95\text{ mm}$ 。从仿真结果可以看到，在低频段，转移阻抗随着编织角度的增加而增加是由散射阻抗的增加导致的，而在高频段，当编织角度小于 45° 时，编织电感和小孔电感符号相反，二者相互抵消一部分，所以转移阻抗较小，当编织角度大于 45° 后，编织电感和小孔电感符号相同，因此转移阻抗随编织角度增加的趋势变得显著。这一现象说明了为什么在工程实践中，通常将编织防波套的编织角度控制在 45° 以下。



(a) 算例 1



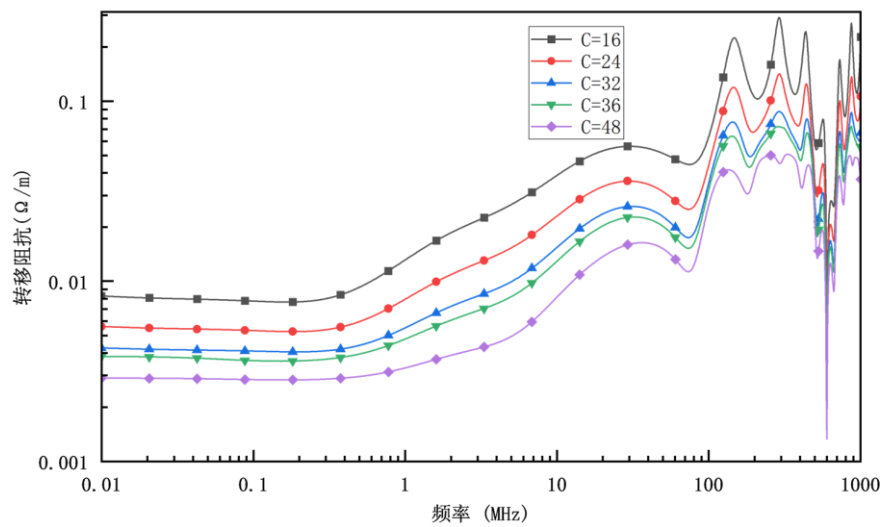
(b) 算例 2

图 3-8 转移阻抗与编织角度的关系

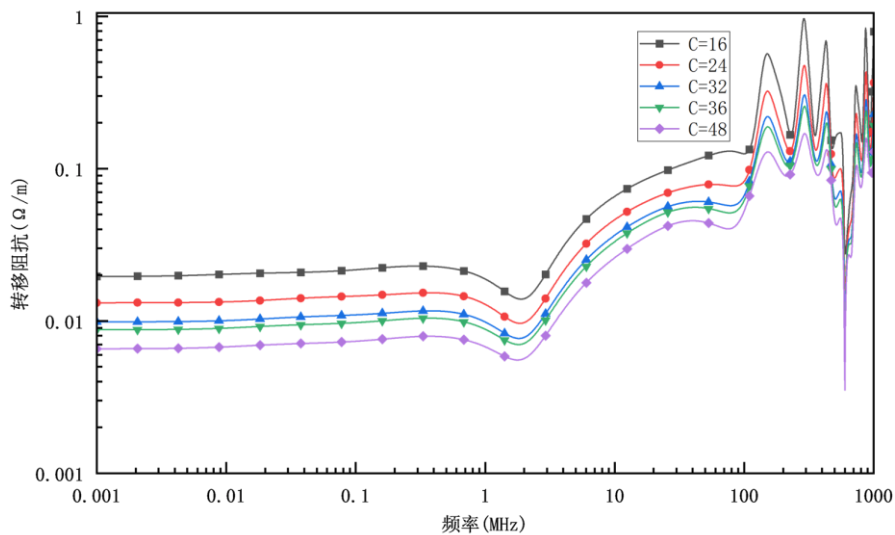
(3) 编织锭数对转移阻抗的影响

图 3-9 揭示了随着频率变化,不同编织锭数对转移阻抗的影响情况,其中算例 1 所采用的编织结构参数为: $N=8$ 、 $d=0.15\text{ mm}$ 、 $\alpha=30.7^\circ$ 和 $K=95\%$,算例 2 的编织参数为: $N=5$ 、 $d=0.13\text{ mm}$ 、 $\alpha=50^\circ$ 和 $K=95.5\%$ 。从图中可见,随着编织锭数的增多,屏蔽层转移阻抗呈现出明显的下降趋势,这是因为散射阻抗、编织电感、附加电感都在随之减小。在实际生产应用中,编织机所提供的编织锭数是有限定范围的,通常包括以下几种规格: 16、24、32、36、48、64 和 72 锭。选择适宜的编织锭数需结合编织对象,即编织套的直径及所需的屏蔽效能进行综合考量,

以确保编织出的屏蔽层既能满足结构强度要求，又能实现理想的电磁屏蔽效果。



(a) 算例 1



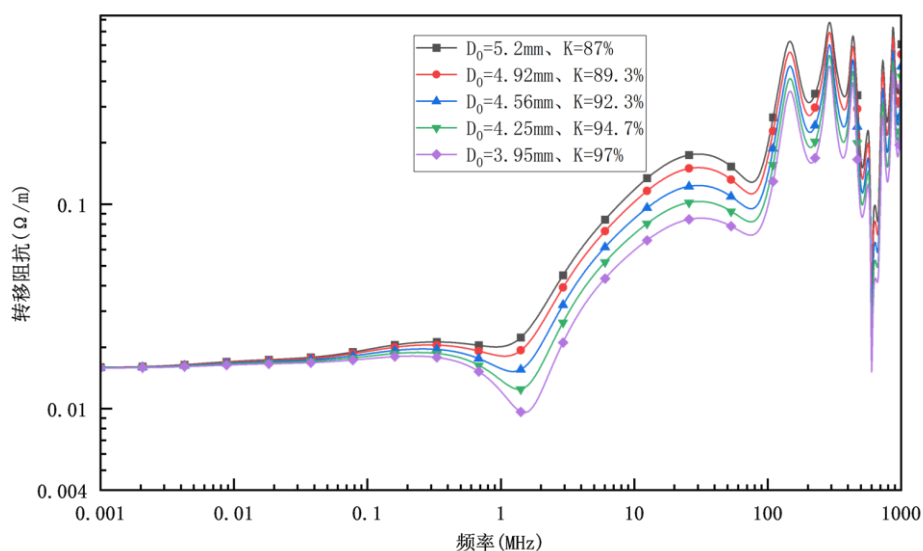
(b) 算例 2

图 3-9 转移阻抗与编织锭数的关系

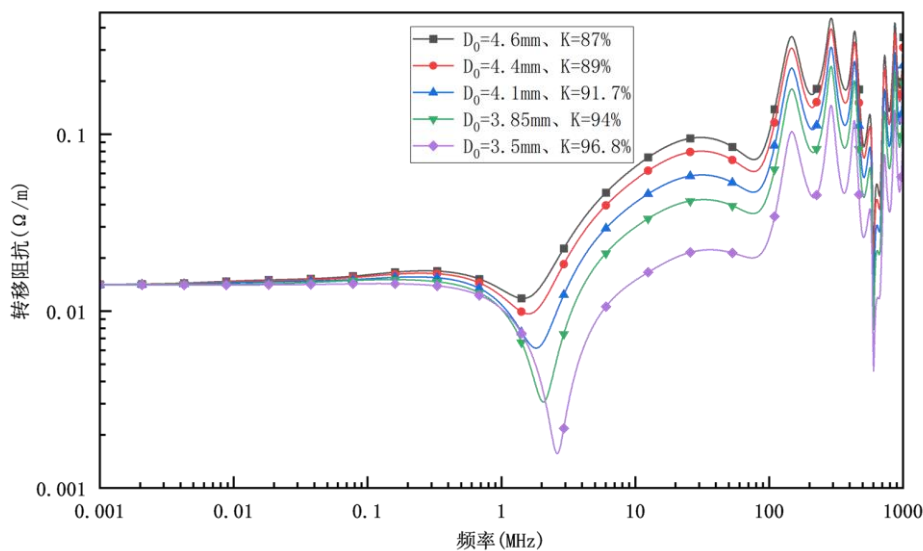
(4) 编织层内径对转移阻抗的影响

图 3-10 揭示了随着频率变化，不同编织内径对转移阻抗的影响情况，其中所算例 1 采用的编织结构参数为： $C=16$ 、 $N=6$ 、 $d=0.15\text{mm}$ 和 $\alpha=50^\circ$ ，算例 2 的编织参数为： $C=24$ 、 $N=4$ 、 $d=0.15\text{mm}$ 和 $\alpha=44^\circ$ 。从图中可以观察到，随着编织层内径的减小，编织密度也随之上升，由于小孔耦合的减小，编织防波套的转移阻

抗呈现显著下降的趋势，在实际工程应用中，通常规定屏蔽套的编织密度不得低于 85%，部分企业甚至设定了更为严格的标准。一般来说，提高编织密度有利于提高电缆的屏蔽性能，然而过高的编织密度还会导致屏蔽电缆柔韧性下降以及加工难度增加等问题，因此编织密度也不宜过高，以满足更高的工程需求。



(a) 算例 1



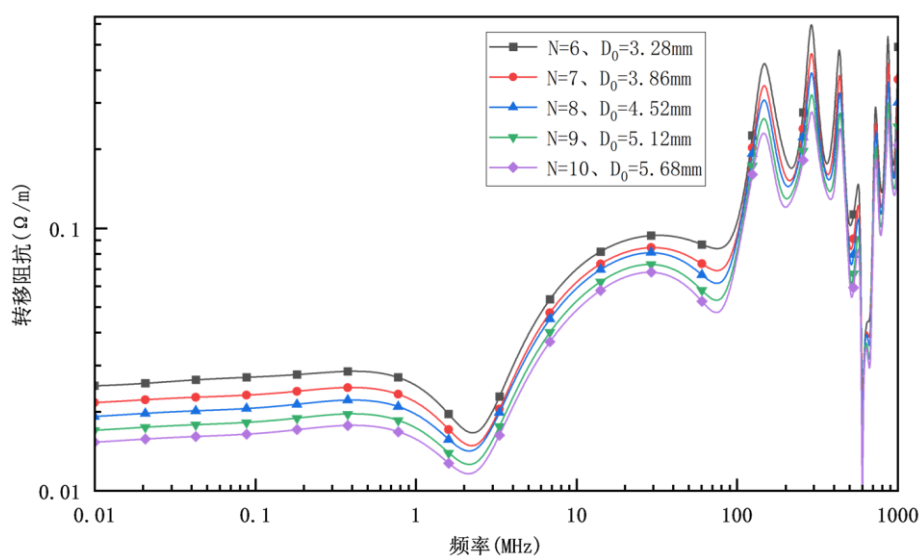
(b) 算例 2

图 3-10 转移阻抗与编织层内径的关系

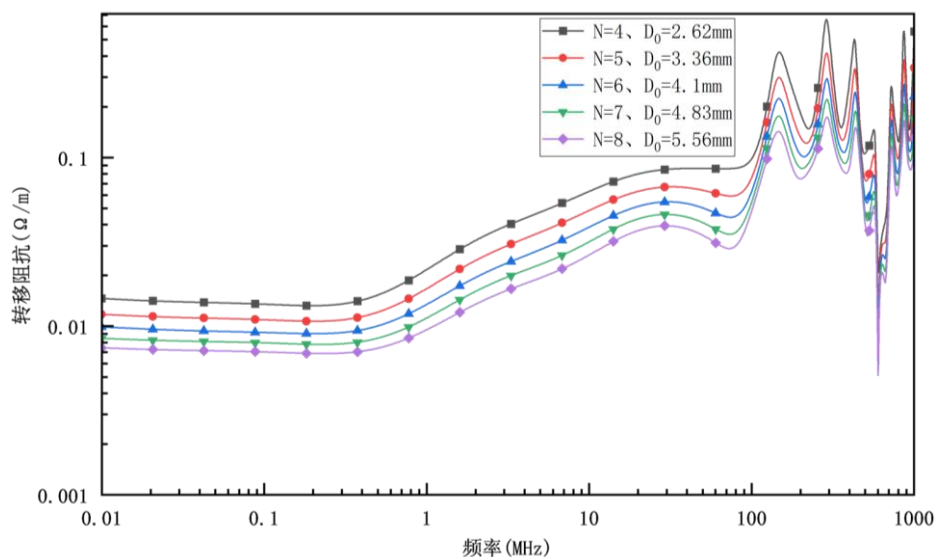
(5) 每锭编织导线根数和编织层内径对转移阻抗的影响

图 3-11 展示了随着频率变化，每锭编织导线根数对转移阻抗的影响趋势，其中算例 1 所采用的编织结构参数设定为： $C=16$ 、 $\alpha=50^\circ$ 、 $d=0.12\text{ mm}$ 和 $K=96\%$ ，

算例 2 的编织参数为: $C=16$ 、 $\alpha=30^\circ$ 、 $d=0.13\text{ mm}$ 和 $K=95\%$ 。从图中可以观察到, 编织屏蔽电缆的转移阻抗随着每锭编织导线根数增加和编织层内径的增大而不断地减小。转移阻抗的值在低频段以散射阻抗为主, 而随着频率的增加, 电感项逐渐占据主导地位。通过观察转移阻抗的计算公式, 可以很容易看出散射阻抗与每锭编织导线根数呈反比, 因此低频段转移阻抗随 N 的增加而减小; 在高频段, 虽然单独增加每锭导线根数会令编织电感增加, 但是由于编织屏蔽层内径的增加, 小孔电感和编织电感的值总体上是呈下降趋势的。因此从图 3-11 中可以观察到转移阻抗随着每锭导线数的增加以及编织层内径的增大而不断减小。



(a) 算例 1

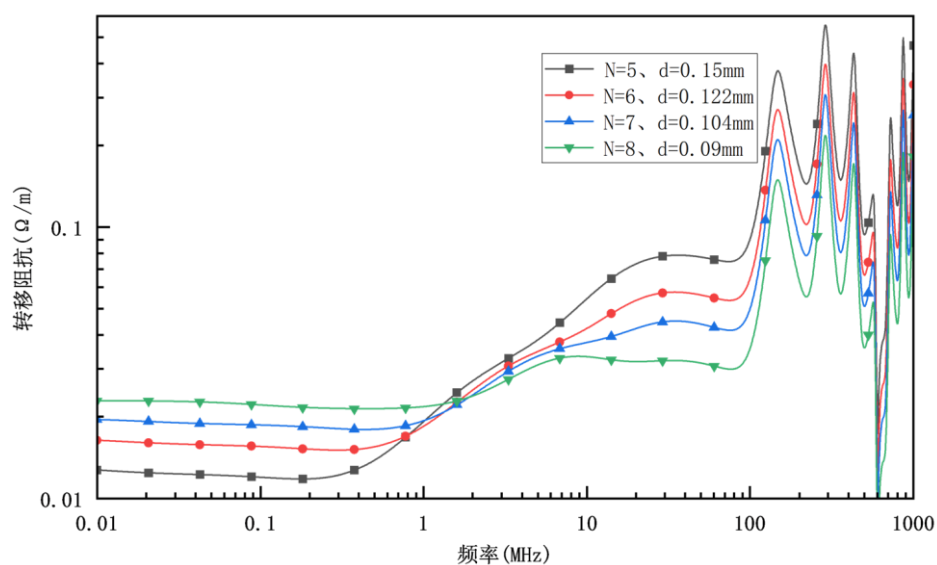


(b) 算例 2

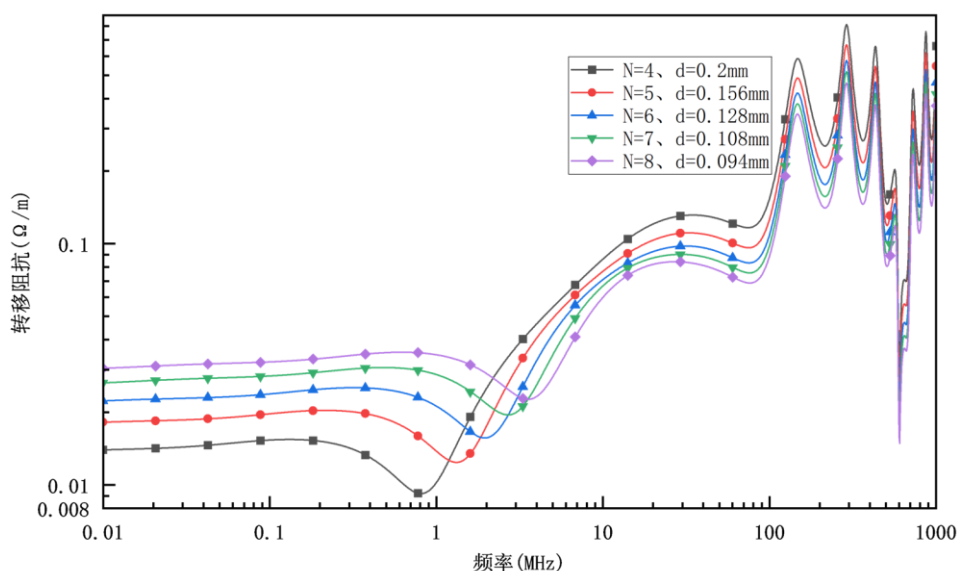
图 3-11 转移阻抗与每锭根数的关系

(6) 细化导线直径对转移阻抗的影响

电线电缆在使用和运输过程中不可避免的需要被弯曲,细化编织导线直径能够很好的实现编织屏蔽电缆编织结构均匀化、稳定化和轻量化的需求。为了探究细化编织丝直径对屏蔽电缆转移阻抗的影响,对不同编织导线直径情况下的电缆进行了仿真。仿真结果如图 3-12 所示,其中算例 1 所采用的编织结构参数设定为: $C=16$ 、 $\alpha=26^\circ$ 、 $D_0=2.95\text{mm}$ 、 $K=87\%$,算例 2 的编织参数为: $C=16$ 、 $\alpha=49.6^\circ$ 、 $D_0=3.56\text{mm}$ 、 $K=95\%$ 。



(a) 算例 1



(b) 算例 2

图 3-12 转移阻抗与编织线直径的关系

从图中可以观察到，随着编织丝直径的减小，屏蔽层在高频段的转移阻抗呈现显著下降的趋势，低频段则不断增大。低频段是因为散射阻抗的增加而导致的，而在高频段，转移阻抗的大小主要取决电感项，随 d 的减小及 N 的增加，小孔电感幅值增大，但编织电感幅值不断减小且编织电感占据主导，因此总的转移阻抗呈减小的趋势。

3.4 仿真验证与实测结果对比

在实际工程应用中，通常使用屏蔽效能来衡量电缆屏蔽性能。因此，在评估和设计电缆时，工程师通常会关注并优化其屏蔽效能指标而非转移阻抗值。图 3-13 展示了吸收钳法测试的原理性示意图，在吸收钳法测试过程中，信号从被测电缆注入，通过比较注入信号与功率吸收钳检测到的由屏蔽层泄漏的信号得受试电缆的屏蔽衰减。

为了有效地抑制不必要的共模噪声和吸收反射回来的屏蔽层表面电流，通常会配合使用铁氧体吸收器，该器件常见为铁氧体环状结构，能够吸收并衰减这些反射波。与此同时，测试中采用表面电流变换器（或称为功率探头），其功能是精确地检测并转换沿电缆表面传播的那部分能量，从而实现对表面波功率的量化测量，进而评估电缆的屏蔽效能^[32]。

通常功率吸收钳法的检测信号的获取方式有两种，一种是使用功率吸收钳在被测电缆上来回移动，最后选取最大值，另一种则是分别记录线缆近端以及远端的信号大小，然后选着较大的值。按照第二种方法，功率吸收钳法测得的屏蔽效能的计算公式可以表示为：

$$a_c = 10 \lg \frac{P_0}{P_m} - a_m - a_l \quad (3-3)$$

式中： a_c 表示电缆的电磁屏蔽衰减； P_0 表示网络分析仪输出的功率； P_m 为使用吸收钳在被测电缆上移动记录的最大值； a_m 为测试装置的插入损耗； a_l 为功率吸收钳的衰减。

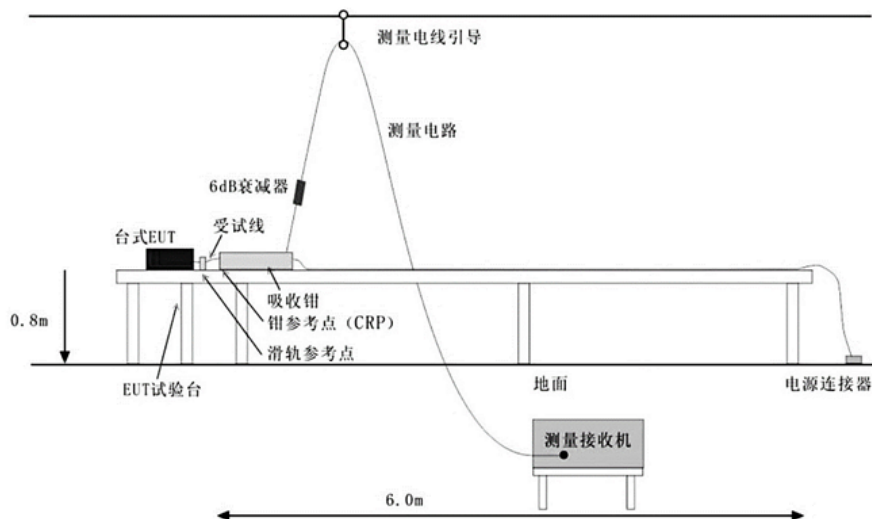


图 3-13 吸收钳法测试示意图

图 3-14 展示了在不同频率条件下，电缆屏蔽效能的解析计算模型、CST 仿真与实验测试数据的对比结果。其中，对于规格型号为 HTLPNQ 的 2~4 mm 织屏蔽套样品，采用的编织结构参数为： $C=16$ 、 $N=4$ 、 $d=0.15\text{ mm}$ 、 $D_0=2\text{ mm}$ 和 $\alpha=30^\circ$ 。从图中可以观察到，解析计算得到的电缆屏蔽效能低频段（100 MHz 以内）与实测值较为吻合，而在高频段，特别是频率超过 300 MHz 后，解析计算结果普遍低于实际测量值，这主要是由于转移阻抗数学模型的值在高频条件下高于实际值导致的。在高频段，屏蔽电缆的电磁场分布和传输特性会变得十分复杂，计算公式可能无法准确描述这些现象；采用 CST 软件仿真得到的电缆屏蔽效能数值在较低频率（小于 100 MHz）范围内高于实际测试结果，这可能反映了仿真模型在处理低频效应时的某些简化或近似所带来的差异。当频率超过 100 MHz 后，仿真结果与实测数据之间的差距显著减小，两者表现出较高的吻合度，表明在高频区域仿真模型能较好地模拟实际情况。

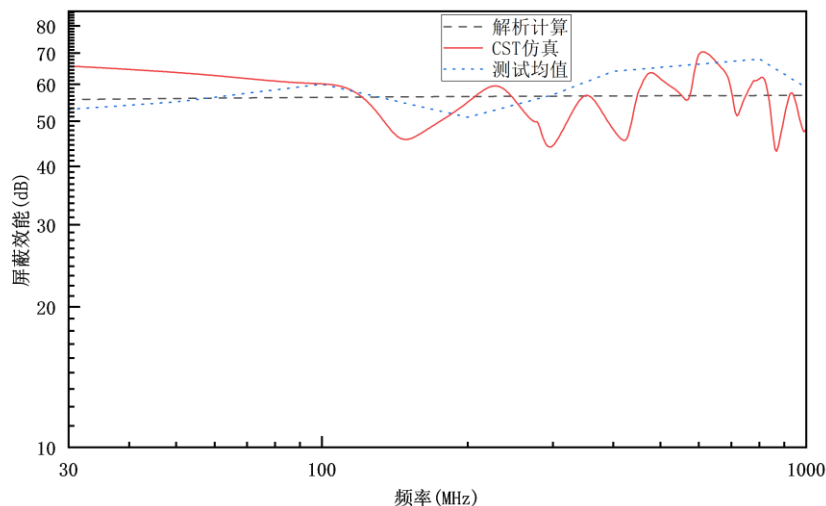


图 3-14 规格型号为HTLPNQ的同轴电缆屏蔽效能解析计算、仿真与实测结果对比

3.5 本章小结

本章首先根据三同轴方法的原理，利用 CST 电磁仿真软件对编织屏蔽电缆的转移阻抗进行仿真，并于解析计算模型结果进行对比，验证了仿真模型的有效性。利用仿真模型研究了编织材料以及各个编织参数与转移阻抗之间的变化规律，结合解析计算模型对仿真结果进行分析，最后利用功率吸收钳法对屏蔽电缆的屏蔽效能进行了实测，并与 CST 仿真模型、解析计算模型的结果进行了对比分析，说明了仿真模型的可靠性。

第4章 屏蔽电缆时域屏蔽特性分析

屏蔽线缆对于电磁场屏蔽性能的好坏通常用电磁屏蔽效能（Shielding Effectiveness, 简称 SE）来衡量，准确快速地获取屏蔽体（或屏蔽材料）的屏蔽效能在实际工程中对系统的设计、整改以及防护都具有重要的指导作用。前文对屏蔽电缆屏蔽效能的研究主要是基于频域，然而随着强电磁脉冲技术的快速发展，对于强电磁脉冲的防护显得十分的重要，强电磁脉冲信号存在脉冲能量极大，峰值电场值极高、持续时间极短等特点，仅用频域屏蔽性能来评估屏蔽电缆对强电磁脉冲信号的防护性能往往存在不足之处。因此本章通过测量电缆内导体芯线上的感应电压于感应电流，通过比较它们的大小以此来衡量电缆对于高空核爆电磁脉冲信号的屏蔽性能。

4.1 高空核爆电磁脉冲下屏蔽电缆特性研究

核电磁脉冲（HEMP）指的是核武器在高空爆炸产生的强电磁脉冲，具有电场强度高、作用时间短、频谱范围宽的特点。核电磁脉冲对电子设备和电力系统具有极强的破坏能力，能够通过辐射耦合或传导耦合进入设备内部，导致设备短路或永久损坏。HEMP 的时域波形如图 4-1 所示^[49]。

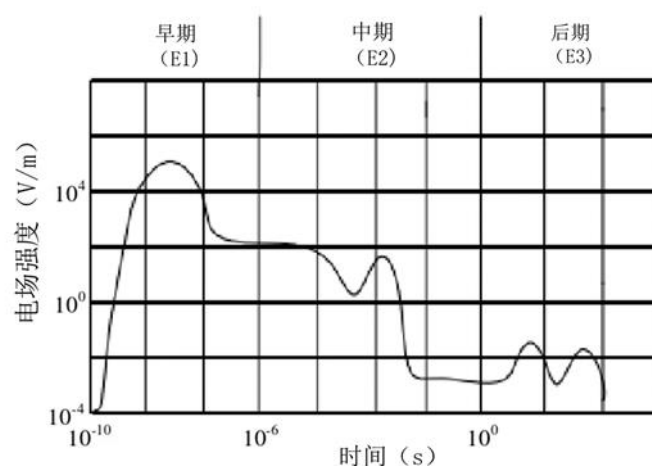


图 4-1 HEMP 时域波形图

由图 4-1 可知, HEMP 的在时间上可以分化为三个阶段: 核爆炸后的 0 到 1 μ s 的时间段内为早期 (E1)、1 μ s~1s 为中期 (E2)、1s 以后为晚期 (E3)。然而, 在实际工程中, HEMP 通常指的是核爆后的第一个时期, 也就是早期 (E1), 这一时期电场曲线最为陡峭, 峰值电压也最大, 相对于中期和后期, 其频谱分量最为丰富, 对电子设备及信号线缆的电磁干扰也最为严重。

高空核爆电磁脉冲 E1 时期的时域函数表达式可以表示为^[50]:

$$E(t)=kE_0(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}) \quad (4-1)$$

式中 E_0 表示为场强峰值, 一般取值为 50kV/m; k 为场强峰值的修正系数; α 和 β 分别表示波前和波后的衰减系数。

为了更直观的观察到高空核爆电磁脉冲 E1 时期各个频段的能量占比, 需要对公式 (4-1) 进行傅里叶变换, 得到其频域表达式:

$$E(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty} kE_0(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t})dt=kE_0\frac{\beta-\alpha}{(\alpha+j\omega)(\beta+j\omega)} \quad (4-2)$$

直到目前, 对于 HEMP 早期 (E1) 的双指函数里的各个参数的选择已经推出了许多的标准, 美国国防部、国际电工委员会、美国 Bell 实验室以及一些影响力较高的学术出版物都给出不同的高空核爆 E1 时期的函数标准。

根据国际电工委员会 IEC61000-2-9 标准, HEMP 函数的各个参数选择如下: $E_0=50KV/m$ 、 $k=1.3$ 、 $\alpha=4\times 10^7$ 、 $\beta=6\times 10^8$ 。将参数代入到公式 (4-1) 和 (4-2), 然后绘制 HEMP 早期(E1 时期)函数的时域和频域波形如图 4-2 和图 4-3 如所示。

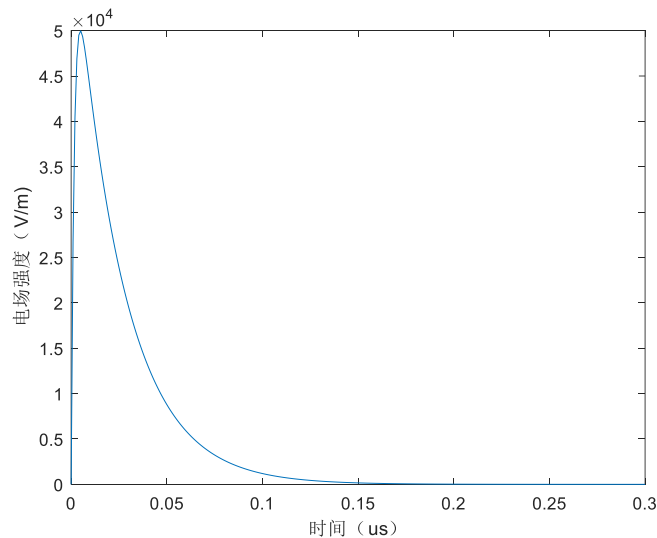


图 4-2 HEMP 时域波形

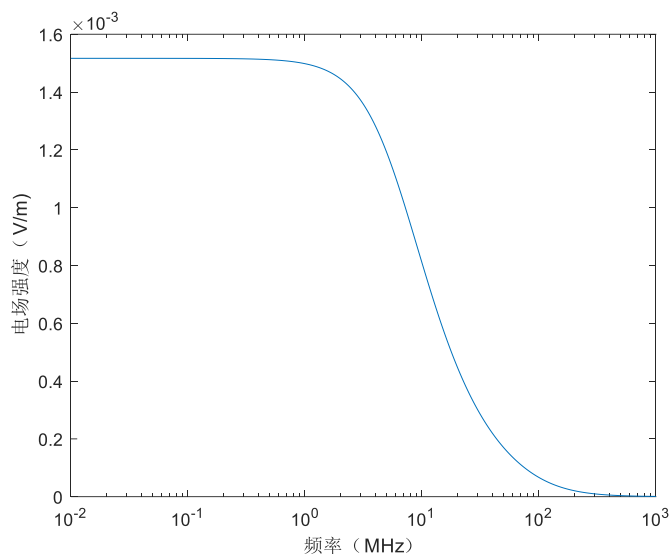


图 4-3 HEMP 频域波形

从时域波形可以看出，高空核爆 E1 时期的函数波形呈现出快速上升，随后缓慢下降的趋势，其上升时间极短（0~0.05 μ s），而下降时间则比较长，电场强度最大值约为 50kV。而从频域上看，可以发现，高空核爆 E1 时期电场的主要能量集中在 0~100MHz, 频谱分量十分丰富。

4.2 传输线辐照理论与仿真分析

在远场区，强电磁脉冲可以看作是平面波，它对电缆的耦合作用与其入射方向有关，在入射方向与传输线缆垂直时，耦合最为严重，这种情况下的辐照模型如图 4-4 所示。图中 $\vec{E}$ 和 $\vec{H}$ 分别表示入射电场和磁场的方向， $\vec{k}$ 表示平面波入射方向， Z_N 和 Z_L 分别为线缆两端的端接阻抗。

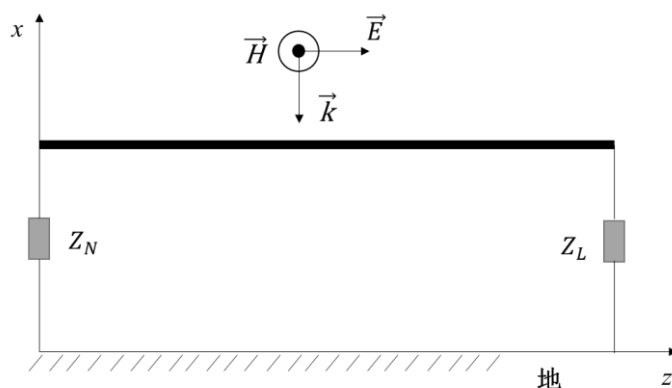


图 4-4 电磁脉冲入射示意图

目前，线缆辐照计算模型主要有 Agrawal、Taylor、Rachidi 模型^[51]，这些模型基于传输线理论，用于描述外部电磁场与传输线之间的耦合效应，尤其在电磁脉冲（EMP）或雷电电磁场激励下，线缆上的感应电压和电流的计算。其中 Agrawal 的计算模型的电报方程的计算较为简便，因此本节以该模型来分析传输线缆的耦合情况。Agrawal 的计算模型的等效电路模型如图 4-5 所示， E_z 表示无线缆时距地高度 h 的沿 z 方向的极化电场； Z 和 Y 分别为线缆的单位长度的阻抗和导纳。

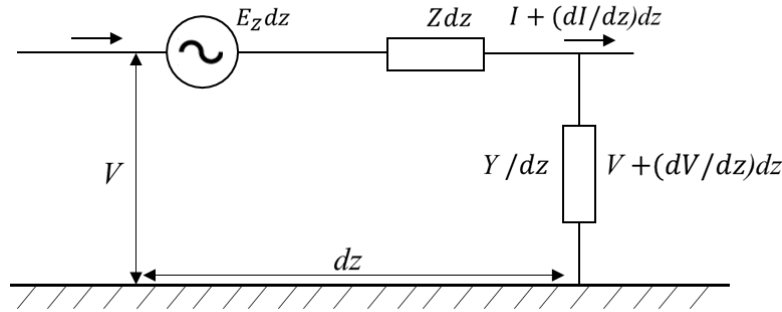


图 4-5 Agrawal 等效电路模型

根据基尔霍夫定律即可得到 Agrawal 模型的传输线方程为

$$\begin{cases} \frac{dV}{dz} + IZ = E_z \\ \frac{dI}{dz} + YZ = 0 \end{cases} \quad (4-3)$$

上式中 V 表示散射电压， I 为线电压。边界条件为：

$$\begin{cases} V(0) = -I(0)Z_N + \int_0^h E_x(x, 0, 0) dx \\ V(l) = I(l)Z_L + \int_0^h E_x(x, 0, l) dx \end{cases} \quad (4-4)$$

式中： E_x 表示沿 x 方向上的电场分量。

在 CST 仿真建立传输线线缆辐照耦合模型如图所示，以 HEMP 为辐射源，研究不同类型屏蔽层以及不同编织参数的屏蔽层对其耦合电压和耦合电流的影响。其中线缆长度设置为 1m，线缆距地高度为 0.05m，线缆的端接阻抗 Z_L 和 Z_N 均设为 50Ω ，对于带屏蔽层的线缆，采用两端接地的方式。

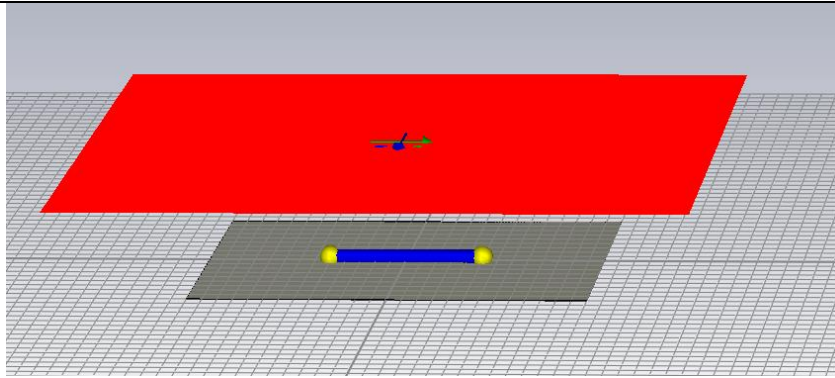
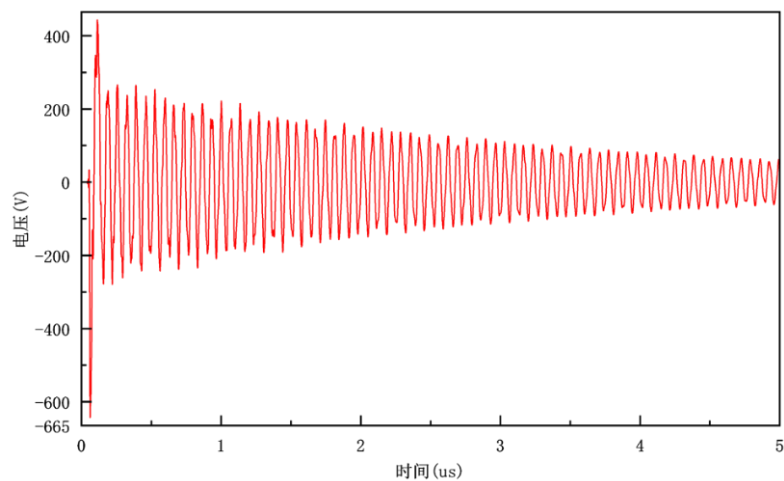


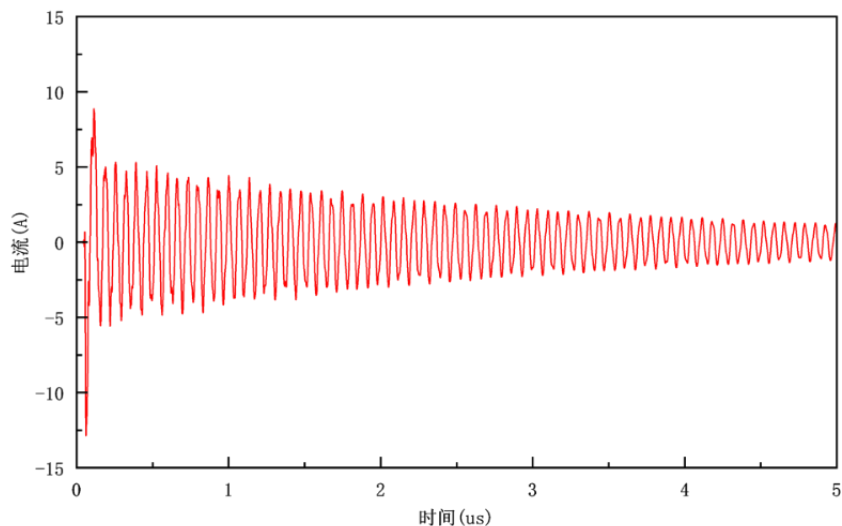
图 4-6 HEMP 辐照下的线缆耦合模型

4.2.1 不同类型屏蔽层对耦合电流和电压的影响

首先对无屏蔽层的型号为 8_AWG 的单线在 HEMP 垂直辐照下的耦合模型进行仿真，仿真结果如图 4-7 所示，可以看到线缆上的耦合电压和耦合电流的时域波形呈现快速上升，然后逐渐衰减的趋势，这与 HEMP 波形的特性相符，说明了仿真的有效性。



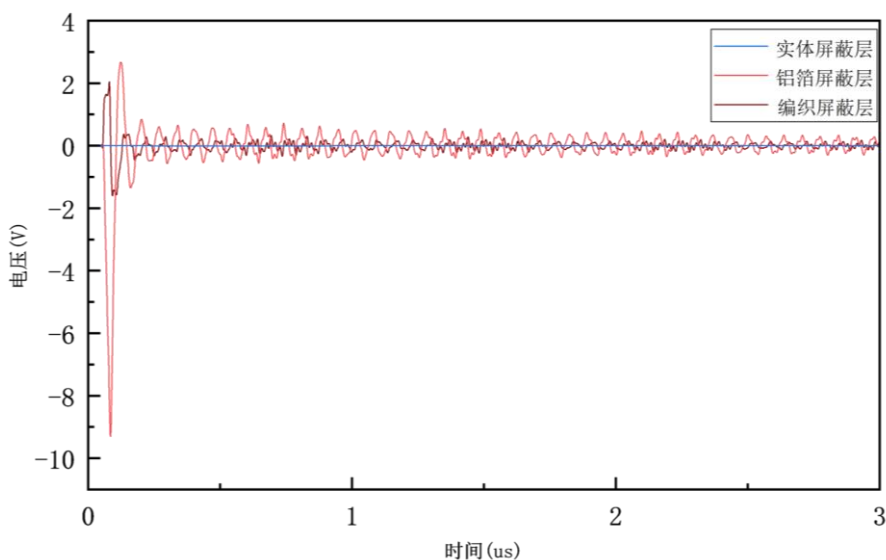
(a) 耦合电压



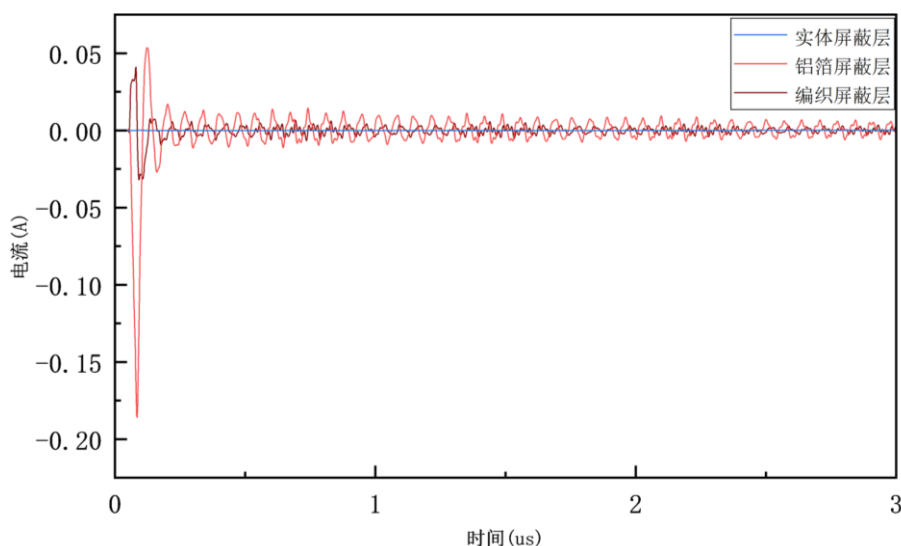
(b) 耦合电流

图 4-7 8_AWG 的单线终端耦合电压和电流时域波形

为了探究不同类型屏蔽层的屏蔽效果,接着在其他条件不变的情况下,分别对采用实体管状屏蔽层、编织屏蔽层以及铝箔屏蔽层的 RGB5 同轴电缆进行仿真,得到的屏蔽线缆终端的耦合电压和耦合电流波形如图 4-8 所示,其中管状和编织屏蔽层的厚度均为 0.244mm,铝箔厚度设为 0.01mm。仿真得到耦合电压和电流的波形如图 4-8 所示。



(a) 耦合电压



(b) 耦合电流

图 4-8 不同屏蔽层下传输线终端耦合电压和耦合电流时域波形

表 4-1 展示了无屏蔽层、管状实体屏蔽层、编织屏蔽层以及铝箔屏蔽层的电缆的耦合电压与耦合电流的最大幅值。

表 4-1 不同屏蔽下的线缆终端耦合电压与耦合电流最大幅值对比

屏蔽层类型	无屏蔽层	实体屏蔽层	编织屏蔽层	铝箔
耦合电压峰值/V	643	0.0078	2.05	9.29
耦合电流峰值/A	12.86	0.000156	0.041	0.186

结合表 4-1 和图 4-8 可以看出,实体管状屏蔽层的屏蔽效果最好,其最大峰值电压的幅值为 0.0078V,峰值电流的绝对值为 0.00156A;编织屏蔽层次之,其峰值电压和电流的幅值分别为 2.05V 和 0.041A,这主要是由于编织屏蔽层上有许多的菱形小孔,电磁脉冲信号会通过这些菱形小孔耦合到线缆的内导体;铝箔的屏蔽效果最差,最大耦合电压和耦合电流分别为 9.29V 和 0.186A,这主要是由于铝箔的厚度很薄,对电磁波的衰减很弱。

为了更加方便的描述屏蔽电缆对高空核爆电磁脉冲的屏蔽衰减,定义屏蔽电缆的时域屏蔽效能为:

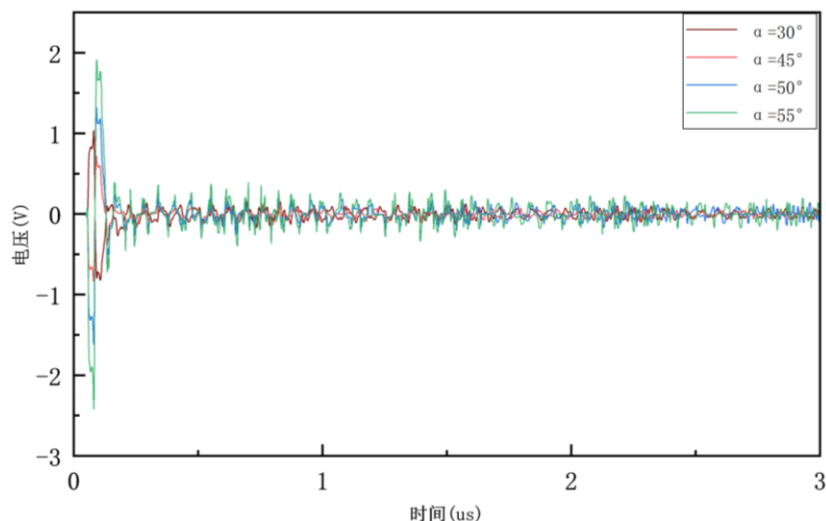
$$SE_t = 20 \lg \frac{\max[I_1(t)]}{\max[I_2(t)]} \quad (4-5)$$

式中 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 代表有无屏蔽层时电缆内部芯线耦合电流的时域波形。

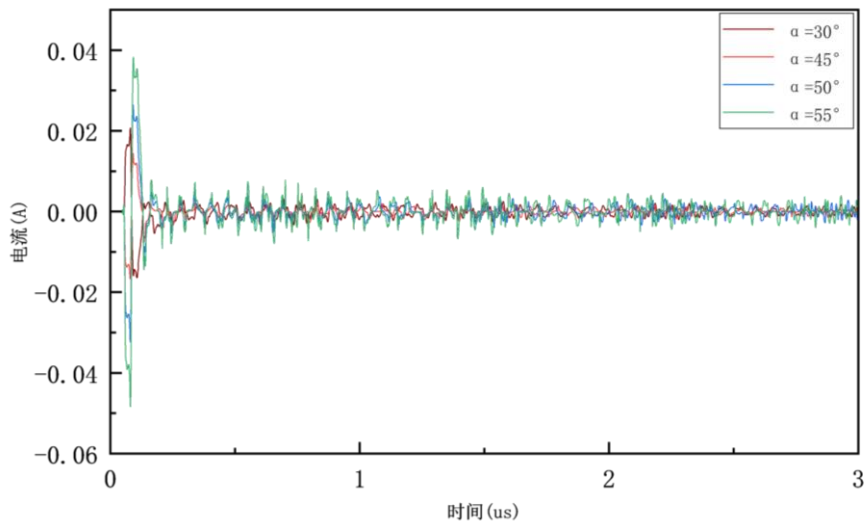
4.2.2 编织参数对耦合电流与耦合电压的影响

(1) 不同编织角度对耦合电压和电流的影响

将 RGB5 同轴电缆的屏蔽层类型设置为编织屏蔽层，编织屏蔽层参数设置如下： $C=16$ 、 $N=6$ 、 $d=0.122\text{ mm}$ 、 $D_0=2.95\text{ mm}$ 。分别将编织角度 α 设置为 30° 、 45° 、 50° 和 55° ，接着进行仿真得到耦合电压和电流波形如图 4-9 所示。



(a) 耦合电压



(b) 耦合电流

图 4-9 不同编织角度下传输线终端耦合电压和电流时域波形

表 4-2 给出了高空核爆电磁脉冲垂直照射下，不同编织角度 α 下线缆的终端耦合电压和耦合电流的最大幅值以及时域屏蔽效能的计算结果。

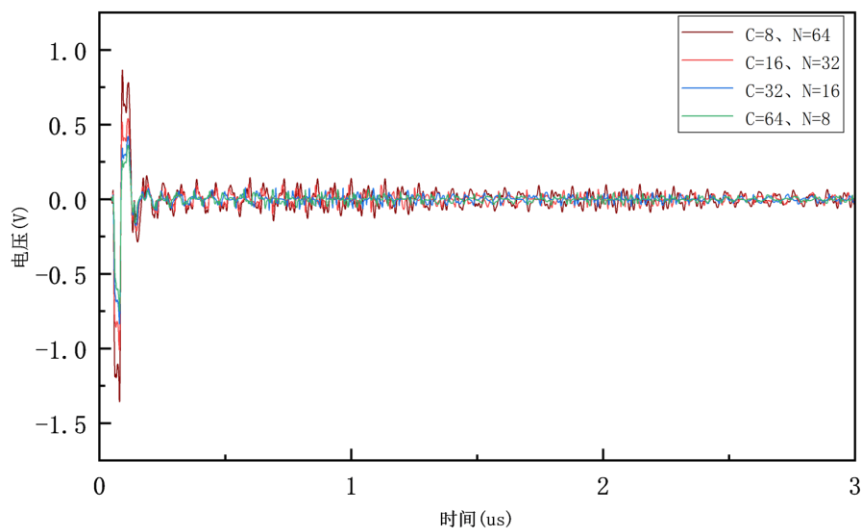
表 4-2 不同编织角度下线缆终端耦合电压与耦合电流最大幅值对比

α	30°	45°	50°	55°
耦合电压峰值/V	1.0365	0.8352	1.6175	2.4164
耦合电流峰值/A	0.0207	0.0167	0.0324	0.0483
SE/dB	55.87	57.73	51.97	48.51

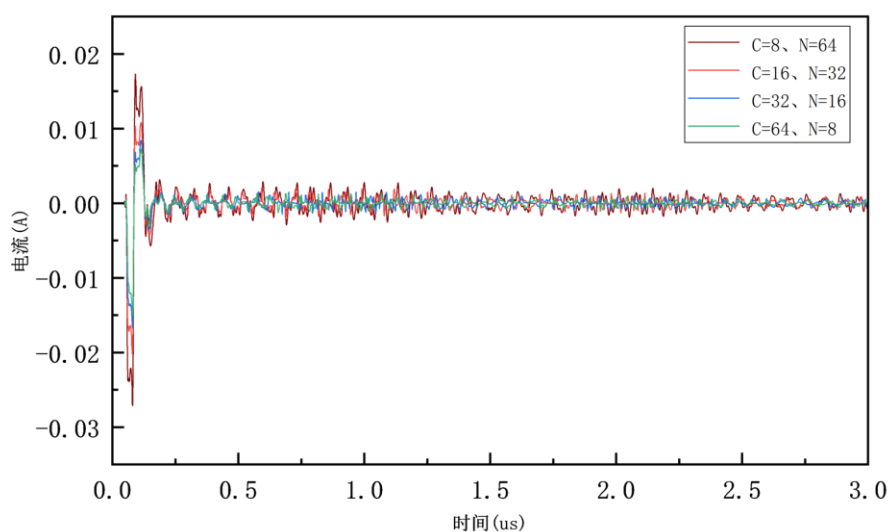
从图 4-9 和表 4-2 中可以发现, 编织角度为 30°和 45°时的耦合电压和耦合电流明显要小于编织角度在 50°和 55°的时候, 并且在 45°到 55°这一区间, 随着编织角度的增大, 耦合电压和电流也在不断增大。由于当编织角度 $\alpha > 45^\circ$ 时, 小孔电感与编织电感的值符号相同, 相互叠加, 并且由式 (2-19) 和式 (2-22) 可知, 编织电感和小孔电感的值都随着编织角度的增加而减小, 因此其屏蔽性能也随之下降的很快, 这与前文关于转移阻抗与编织角度的关系的研究基本一致, 进一步验证了仿真的有效性。

(2) 不同编织锭数和编织根数对耦合电压和电流的影响

接着同时改变编织层的编织锭数 C 与每锭编织根数 N , 探究此方法对于线缆耦合电压与电流的影响, 其余编织参数均设置为: $d=0.1\text{ mm}$ 、 $D_0=16.8\text{ mm}$ 、 $\alpha=50^\circ$ 和 $K=93.4\%$ 。通过仿真得到的线缆上的耦合电压和电流波形如图 4-10 所示。



(b) 耦合电压



(b) 耦合电流

图 4-10 不同编织锭数和每锭编织导线根数下传输线终端耦合电压和电流时域波形

表 4-3 给出了高空核爆电磁脉冲垂直照射下，不同编织锭数 C 和每锭编织导线根数 N 下线缆的终端耦合电压和耦合电流的最大幅值以及时域屏蔽效能的计算结果。

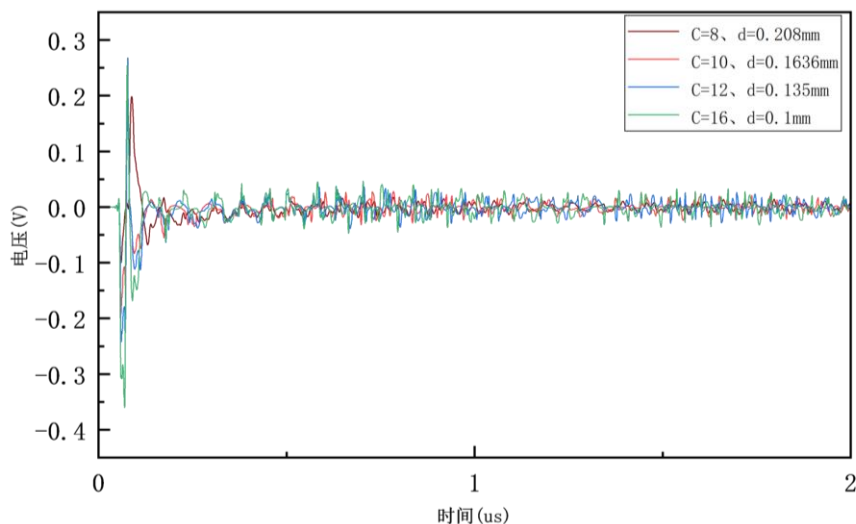
表 4-3 不同编织锭数和每锭编织导线根数下线缆终端耦合电压与耦合电流最大幅值对比

C, N	$C=8, N=64$	$C=16, N=32$	$C=32, N=16$	$C=64, N=8$
耦合电压峰值/V	1.357	1.01	0.836	0.749
耦合电流峰值/A	0.0272	0.0202	0.0167	0.0150
SE_t/dB	53.49	56.08	57.73	58.66

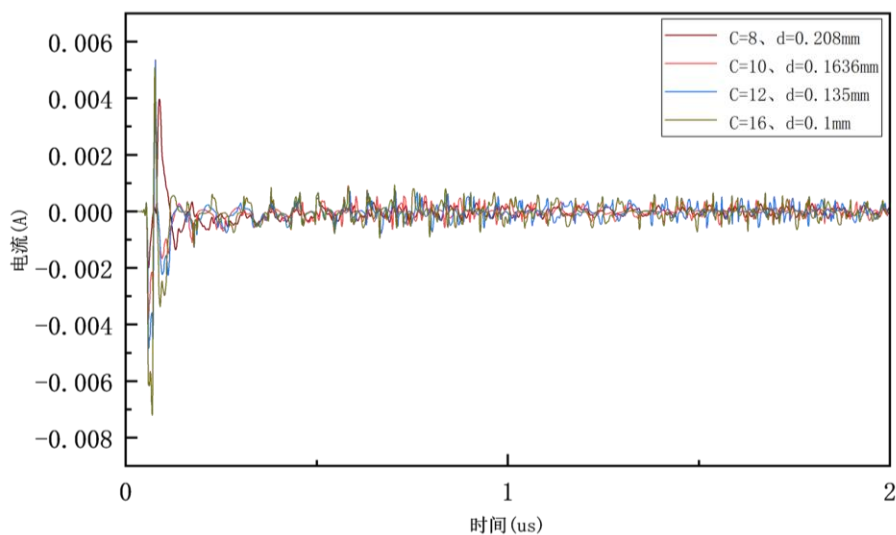
从转移阻抗的解析表达式可以看出，不论是增加编织锭数 C 或是减小每锭编织根数 N 可以减小编织防波套上孔缝的大小，减少透过小孔耦合到电缆内导体的电磁能量，因而从结果上看，随着编织锭数的增加以及每锭编织导线数的减小，编织防波套的时域屏蔽效能不断提高，屏蔽线缆上的耦合电压与电流也在不断地减小。采用这种方法不会增加编织材料的用量，在提升屏蔽性能的基础上，还能令编织防波套编织导线分布更加均匀，结构更加的稳定。

(3) 不同编织绞数和编织导线直径对耦合电压和耦合电流的影响

实际应用中可以通过增加编制绞数和减小编织丝直径的方式提升电缆的轻柔特性。然而，这势必会影响电缆的屏蔽性能，图 4-11 展示了在编织密度不变的情况下，同时增加编织绞数 C 和减小编织导线直径 d 对线缆耦合电压于耦合电流的影响。编织层参数设置为： $N=16$ 、 $D_0=6.85\text{mm}$ 、 $\alpha=30^\circ$ 和 $K=88.6\%$ 。



(a) 耦合电压



(b) 耦合电流

图 4-11 不同编织绞数和编织导线直径下传输线终端耦合电压和电流时域波形

表 4-4 给出了高空核爆电磁脉冲垂直照射下，不同编织锭数 C 和编织导线直径 d 下线缆的终端耦合电压与耦合电流的最大幅值以及时域屏蔽效能的计算结果。

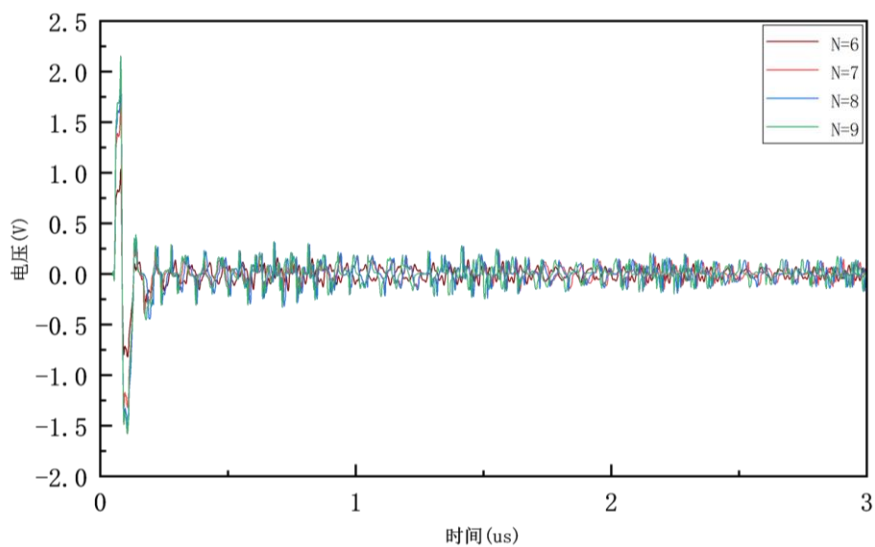
表 4-4 不同编织锭数和编织导线直径下线缆终端耦合电压与耦合电流最大幅值对比

C, d	$C=8, d=0.208\text{mm}$	$C=10, d=0.1636\text{mm}$	$C=12, d=0.135\text{mm}$	$C=16, d=0.1\text{mm}$
耦合电压峰值/V	0.1986	0.251	0.268	0.36
耦合电流峰值/A	0.00397	0.00501	0.00536	0.0072
SE_r/dB	70.21	68.19	67.6	65.04

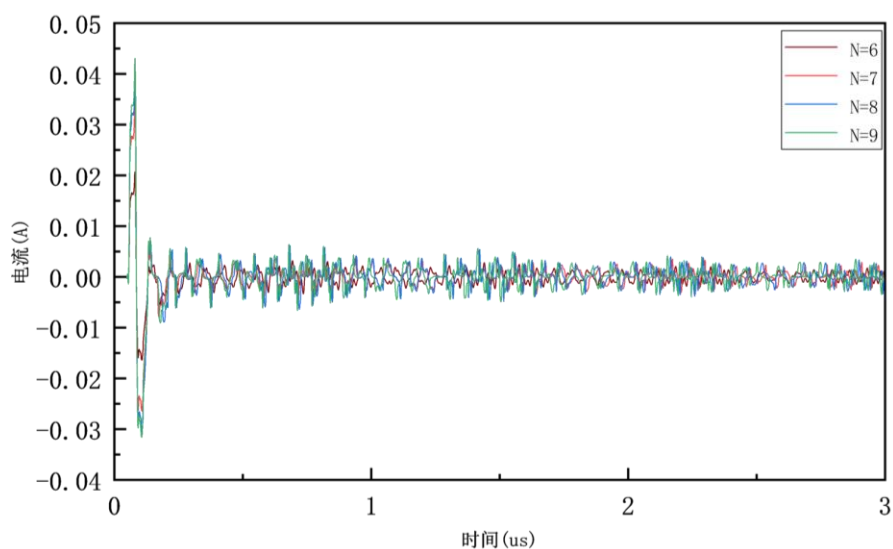
结果表明随着 C 的增加和 d 的减小，屏蔽电缆上的耦合电压在不断地上升。由转移阻抗的解析计算表达式可知，增加编织锭数 C 和减小编织导线直径 d 可以降低编织电感的值，但是这同时也增加了散射阻抗、小孔电感的值，并且也减小了涡流效应对电磁信号的衰减，因此电缆的屏蔽性能呈现下降的趋势，在对屏蔽性能要求不是很高的情况下，可以采用此方法。

(4) 每锭编织根数对耦合电压和耦合电流的影响

每锭编织导线根数 N 是编织屏蔽层的主要参数之一，单独增加 N 可以提高编织防波套的编织密度从而大大减小小孔耦合效应，然而当 N 增加到一定数量后，防波套的屏蔽性能不仅不会提高，反而会降低。图 4-12 展示了不同编织导线根数 N 对线缆耦合电压和电流的影响，编织参数均设置为： $C=16$ 、 $d=0.122\text{mm}$ 、 $D_0=2.95\text{mm}$ 和 $\alpha=30^\circ$ 。从图中可以看到，随着每锭编织导线根数的增加，屏蔽线缆芯线上的耦合电压和耦合电流也在不断地增大。



(a) 耦合电压



(b) 耦合电流

图 4-12 不同编织绞数和每绞编织导线根数下传输线终端耦合电压和电流时域波形

表 4-5 给出了高空核爆电磁脉冲垂直照射下，不同每绞编织导线根数 N 下线缆的终端耦合电压与耦合电流的最大幅值以及时域屏蔽效能的计算结果。从表中可看到，编织防波套的时域屏蔽效能随着每绞编织导线根数的增加而不断地降低。

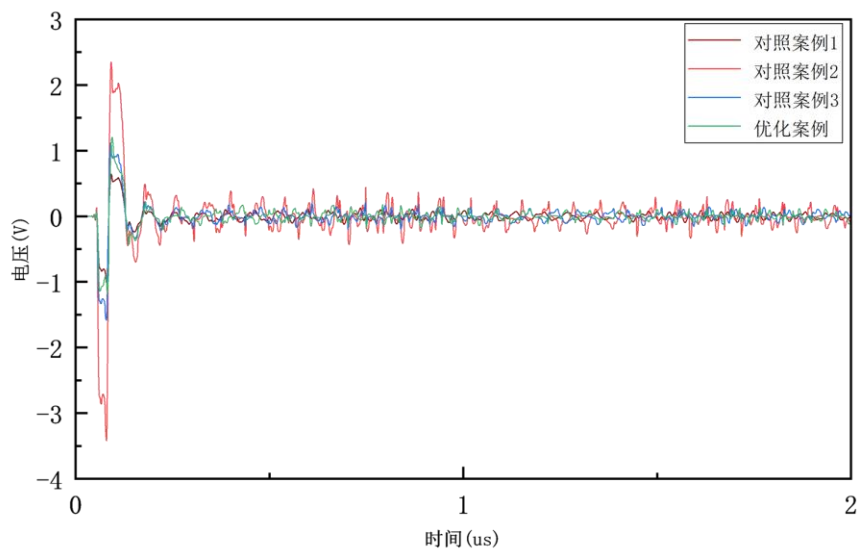
表 4-5 不同每锭编织导线根数下线缆终端耦合电压与耦合电流最大幅值对比

N	6	7	8	9
耦合电压峰值/V	1.036	1.737	2.042	2.155
耦合电流峰值/A	0.0207	0.0347	0.0408	0.0431
SE_r/dB	55.87	51.38	49.98	49.5

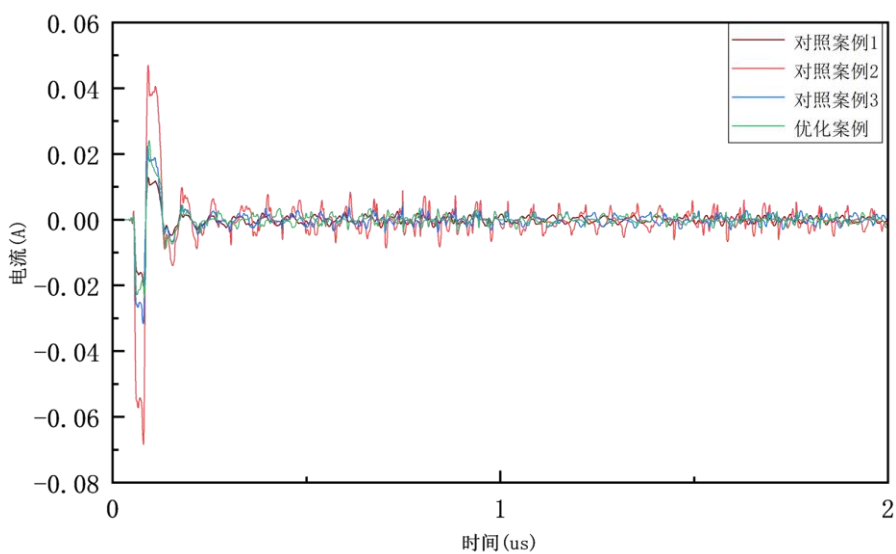
结合图 4-12 和表 4-5 可知,随着编织导线根数 N 的增加,虽然编织防波套的编织密度提高了,小孔耦合效应得到了减轻,但是编织电感的值上升的很快,导致屏蔽效能逐渐降低,因此每锭编织导线根数并不是越多越好,并且编织导线根数的增加会提高用料成本,提高线缆的总体重量,还会令电缆变得僵直,不易弯曲,不利于实际应用。

4.3 编织防波套轻柔化设计

通过前几章以及本章的理论仿真分析可以总结出编织防波套轻柔化设计的几方面的要点:第一,编织防波套编织角度应设置在 45° 以内,过高的编织角度会令防波套的屏蔽效能下降;第二,增加编制锭数可以令编织导线分布更加均匀,提升防波套的屏蔽效果和结构稳定性;第三,细化编织导线直径可以减少编织材料的用量,提升编织防波套的柔韧性;第四,编织防波套的编织密度不宜过高,过高的编织密度会增加编织材料的用量,令编织防波套变得僵直,不利于安装、存储、运输以及使用。根据这些要点对内径为 $D_0=6.1\text{mm}$ 的防波套编织参数进行优化最终的到的编织参数如下: $C=32$ 、 $N=7$ 、 $d=0.1\text{ mm}$ 、 $\alpha=30^\circ$ 和 $K=87\%$,并且设置了三组未经过参数优化的编织参数作为对照案例,其中案例 1 中编织防波套的编织参数为: $C=16$ 、 $N=10$ 、 $d=0.14\text{ mm}$ 、 $\alpha=50^\circ$ 和 $K=98\%$,案例 2 的编织参数为: $C=16$ 、 $N=7$ 、 $d=0.15\text{ mm}$ 、 $\alpha=55^\circ$ 和 $K=92\%$,案例 3 的编织参数为: $C=16$ 、 $N=8$ 、 $d=0.16\text{ mm}$ 、 $\alpha=48.6^\circ$ 和 $K=94.2\%$ 。为了验证参数优化后的编织防波套是否具备较为良好的屏蔽效能,对采用上述四种案例的编织参数的防波套的屏蔽线缆在 HEMP 垂直辐照下的耦合电耦合电流进行仿真,仿真结果如图 4-13 所示,从结果上看,案例 1 中屏蔽线缆芯线上的耦合电压和耦合电流最小,其次是优化后案例,然后是案例 3,案例 2 中屏蔽线缆芯线上的耦合电压与耦合电流是最大的。



(a) 耦合电压



(b) 耦合电流

图 4-13 不同编织参数下传输线终端耦合电压和电流时域波形

表 4-6 给出了高空核爆电磁脉冲垂直照射下，采用编织参数优化前和优化后的编织防波套的屏蔽线缆的终端耦合电压与耦合电流的最大幅值、时域屏蔽效能以及编织防波套切面面积的计算结果，其中编织防波套切面面积定义为所有编织导线一端端面面积之和。从表中可知案例 1 中的编织防波套的时域屏蔽

效能最好为 56.03dB,编织参数优化后的编织防波套次之,为 54.54 dB,二者相差 1.49dB,然后是案例 3,为 52.16dB,案例 2 的屏蔽效能最差,仅为 45.48 dB。

表 4-6 不同编织参数下线缆终端耦合电压与耦合电流最大幅值对比

案例	对照案例 1	对照案例 2	对照案例 3	优化案例
耦合电压峰值/V	1.015	3.418	1.583	1.204
耦合电流峰值/A	0.0203	0.0684	0.0317	0.0241
SE _r /dB	56.03	45.48	52.16	54.54
编织防波套切面面积/(mm ²)	2.463	1.979	2.574	1.789

从图 4-13 仿真结果和表 4-6 中的数据上看,经过参数优化后的编织防波套的编织锭数最大,编织导线直径与编织密度最小,在保证良好屏蔽效能的前提下,相对于其他三个案例的编织套,编织材料用量最少,结构更加稳定且更加的轻柔。虽然对照案例 1 中的编织防波套的屏蔽效果比编织参数优化后的防波套的屏蔽效果好,然而,其编织密度高达 98%,编织材料用量比优化后的高,防波套整体僵直,重量较大,并且二者的时域屏蔽效能仅相差 1.49dB,而优化后编织套的切面面积相比案例 1 减少了大约 27.4%,编织密度也更低,整体重量显著降低。

4.4 本章小结

本章介绍了高空核爆电磁脉冲 (HEMP) 波形的特性,并在 CST 中建立了 HEMP 辐照下的传输线的耦合模型,结合线缆屏蔽效能与转移阻抗的解析计算模型,分析了不同类型屏蔽层、不同编织参数编织屏蔽层下线缆的时域耦合特性。最后对编织防波套的参数进行了优化以提升其轻柔性,并与未经参数优化的编织防波套进行了对比,验证了参数优化的有效性。

第5章 总结与展望

5.1 本文总结

线缆在工作时很容易会向外辐射电磁波和受到电磁干扰，因此需要采取一些屏蔽方法来实现电磁屏蔽，使用屏蔽套是实现电磁屏蔽最为重要和直接的措施之一。提升编织防波套的轻柔性可以减少线缆的重量和体积，便于安装、使用、运输和储存。

本文以编织防波套为研究对象，结合屏蔽效能与转移阻抗的相关理论，在电磁仿真软件 CST 中建立模型，对编织防波套的屏蔽特性进行仿真分析，并与解析计算模型以及实测结果进行对比，验证了仿真模型的可靠性。在此基础上，根据仿真模型进一步研究了编织材料、不同编织结构参数对编织屏蔽电缆在 0~1GHz 频率范围内的转移阻抗的影响。最后，为了探究线缆的时域屏蔽特性，在 CST 软件内建立了 HEMP 辐照下的线缆耦合模型，仿真分析了不同类型屏蔽层、不同编织结构对线缆终端耦合电压和电流的影响。针对以上研究总结了屏蔽电缆屏蔽层编织参数设计的一些规律，为屏蔽线缆的轻柔性化设计提供了一定的参考：

- (1) 电缆的屏蔽性能与编织材料的选择直接相关，柔性电磁屏蔽材料，比如碳纤维，虽然具备密度低、易弯曲、抗腐蚀等优势，但其本身的电磁屏蔽衰减的能力远不及一般的金属材料，屏蔽作用十分有限。
- (2) 编织屏蔽层编织角度在 45° 以下，由于编织电感 M_b 和小孔电感 M_h 符号相反相互抵消，因此转移阻抗较小，因此在实际生产和应用中应尽可能将编织角度 α 控制在 45° 以内。
- (3) 增加编织锭数 C 可以令编织导体更加均匀的分布在屏蔽层中，并有效的降低转移阻抗的值；在编织密度 K 不变的情况下，同时增加每锭编织导线数 N 和编织层内径 D_0 也可以令其转移阻抗减小，但这种方法会增大屏蔽线缆的体积，应根据实际需要进行设置。
- (4) 在编织密度相同的情况下，同时增加编织导线根数和编织层内径可以在全频率范围降低线缆的转移阻抗。

- (5) 在编织密度 K 不变地条件下, 细化编织导线的直径 d 会降低其在低频段的屏蔽性能, 但是对高频段的屏蔽效果有较大的提升, 因此如果需要屏蔽的电磁干扰主要集中在高频段, 可以采取这种方法, 并且采用此方法还能在一定程度上提高电缆的柔韧性, 降低屏蔽层的重量。
- (6) 编织密度不变, 同时改变编织锭数和每锭编织根数进行仿真, 分析结果后发现同时增加编织锭数和减少每锭根数可以有效地减小线缆上的耦合电压和耦合电流, 提高屏蔽效能, 另外还可以令编织层导线分布更加均匀, 结构更加稳定。
- (7) 可以通过增加编织锭数和减小编织丝直径的方法提升屏蔽层的结构强度和轻柔特性, 但该方法会在一定程度影响电缆的屏蔽性能, 不宜过分的缩小编织丝的直径。
- (8) 仅仅增加每锭编织根数会提高编织屏蔽层的编织密度, 减少小孔耦合的电磁信号, 但同时会令编织电感上升很快, 因此从线缆上的耦合电压与耦合电流的结果上看, 随着每锭编织导线的增加, 线缆上的耦合电压和耦合呈现上升的趋势, 屏蔽性能在不断降低。

5.2 本文展望

本文虽然在编织参数优化方面做了许多的工作, 通过优化编织结构参数提升编织屏蔽层的轻柔特性和屏蔽性能, 但是对于柔性编织材料的电磁屏蔽特性研究不足, 也没有对编织屏蔽层的弯曲、拉伸性能进行实际的测试, 后续可以在这些方面进行补充。

参考文献

- [1] 赵鹤鸣.电动汽车高压屏蔽线缆与连接器的屏蔽效能研究[D].重庆理工大学,2020.DOI:10.27753/d.cnki.gcqgx.2020.000105.
- [2] 郭银景,吕文红,唐富华等.电磁兼容原理及应用教程[M].北京:清华大学出版社,2004:172-175
- [3] 王乐倪.飞机 EWIS 设计减重措施研究[J].中国军转民,2022,(02):63-65.
- [4] S.A.Schelkunoff. The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shields[J]. Bell Syst Tech,1934,10(13):532-579
- [5] VANCE E F. Shielding Effectiveness of Braided-Wire Shields[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1975, EMC-17(2): 71-77
- [6] M. Tyni, "The transfer impedance of coaxial cables with braided outer conductor," Proc. 3rd Int. Symp. Electromagnetic Compatibility, Wroclaw, Poland, 1976, pp.410-419.
- [7] B. Demoulin and P. Degauque. Shielding Effectiveness of Braids with High Optical Coverage[C] Proceedings of the International Symposium on EMC, Zurich, 1981: 491-495.
- [8] 马晖,葛景谚,吴楷,等.编织型同轴电缆转移阻抗的研究[J].电线电缆,1993(6):2-7.
- [9] 杨佩铭,卢铁兵,齐磊,等.编织型屏蔽电缆转移阻抗的计算[C].电工理论与新技术学术年会论文集.2005: 319-321.
- [10] 杨佩铭.电力系统屏蔽电缆转移阻抗的计算与测量方法研究[D].河北:华北电力大学电工理论与电工新技术学科硕士学位论文,2005:1-4.
- [11] 王添文,郭艳辉,丁永平,等.屏蔽电缆屏蔽编织优化分析[J].安全与电磁兼容,2011(06):12-14.
- [12] 王添文,李子森,王欢,等.屏蔽电缆屏蔽效能与转移阻抗关系研究[J].安全与电磁兼容,2015,(01):60-63.
- [13] 张轩,万书亭,刘荣海,等.电缆主绝缘缺陷电场数值分析[J].云南电力技术,2015,43(03):105-109.
- [14] M. Vincent, M. Klingler, Z. Riah and Y. Azzouz, A method to overcome the load connection restrictions in the combined MoM/MTL approach[C]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2016:565-570.
- [15] J. Luo, J. Wang , etc, A hybrid method for EMI effect simulation of cable-interconnect network[C]. 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), Suzhou, 2017: 1-2.
- [16] Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966,14(3):302-307.
- [17] 郑奎松,葛德彪,葛宁.三维电磁散射的网络并行 FDTD 计算和加速比分析[J].电波科学学报,2004,19(06):767-771.
- [18] 陈鑫,胡军.电磁脉冲对埋地电缆耦合的 FDTD 仿真分析[J].安全与电磁兼容,2006,(06):93-96.
- [19] 冯琳琳.基于 FDTD 方法的泄漏同轴电缆辐射场的研究[D].哈尔滨工程大

- 学,2008.
- [20]夏怀民.屏蔽线对直埋电缆直击雷的防护作用[J].电瓷避雷器,2020,(01):82-87.DOI:10.16188/j.isa.1003-8337.2020.01.014.
- [21]R. F. Harrington. Matrix methods for field problems[J]. Proceedings of the IEEE, 1967,55(2), 136-149.
- [22]焦金龙,王晨,刘源.线缆束电磁兼容仿真技术[J].微波学报,2012,28(S3):57-60.
- [23]边晓燕,周歧斌,符杨.有限长同轴电缆电容的数值计算方法[J].高电压技术,2009,35(08):1920-1926.
- [24]张焕估.基于矩量法的轨旁电缆串扰耦合研究[D].北京交通大学,2023.
- [25]Lager, I. E., Mur, G. Finite element method for stationary and static electromagnetic fields[J]. Journal of Applied Physics, 1997,81(8):4079-4081.
- [26]M. Kaltenbacher and S. Reitzinger. Appropriate finite-element formulations for 3-D electromagnetic-field problems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002,38(2):513-516.
- [27]R. Otin. A high-order nodal finite element formulation for microwave engineering[C].the 24th Int. Review Progress Applied Computational Electromagnetics, Niagara Falls, ON, Canada, 2008.
- [28]R. Otin, J. Verpoorte and H. Schippers. Finite Element Model for the Computation of the Transfer Impedance of Cable Shield[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(4):950-958.
- [29]王小铃.屏蔽电缆转移阻抗的测量与仿真方法研究[D].哈尔滨工业大学,2012.
- [30]周香. 电缆屏蔽效能测试方法比较[J]. 世界华商经济年鉴, 高校教育研究, 2008(15):177-178.
- [31]张晗. 射频同轴电缆的屏蔽效能测试系统[D]. 西安邮电大学,2016.
- [32]周香,蒋全兴,陈旻,等.功率吸收钳法与线注入法电缆屏蔽性能测试对比分析[J].东南大学学报(自然科学版),2009,39(06):1161-1164.
- [33]Huang J. EMI shielding plastics: a review[J]. Advances in Polymer Technology, 1995, 14(2): 137-150.
- [34]Chung D D L. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials[J]. Carbon, 2001, 39(2): 279-285.
- [35]司琼. 电磁屏蔽涂料的研究现状及发展趋势[J]. 上海涂料, 2005, 43(4): 26-28.
- [36]Cao M, Song W, Hou Z, et al. The effects of temperature and frequency on the dielectric properties, electromagnetic interference shielding and microwave absorption of short carbon fiber/silica composites[J]. Carbon, 2010, 48(3): 788-796.
- [37]Ghosh S, Remanan S, Mondal S, et al. An approach to prepare mechanically robust full IPN strengthened conductive cotton fabric for high strain tolerant electromagnetic interference shielding[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 344: 138-154.
- [38]Tian M, Du M, Qu L, et al. Electromagnetic interference shielding cotton fabrics with high electrical conductivity and electrical heating behavior via.
- [39]Skotheim T A. Handbook of conducting polymers[M]. New York: CRC press, 1997.
- [40]Saini P, Choudhary V, Vijayan N, et al. Improved electromagnetic interference shielding response of poly (aniline)-coated fabrics containing dielectric and

- magnetic nanoparticles[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2012, 116(24): 13403–13412.
- [41]MacDiarmid A G. “Synthetic metals”: a novel role for organic polymers[J].Angewandte Chemie International Edition, 2001, 40(14): 2581–2590.
- [42]李建娜.电磁屏蔽用柔性经编金属网基复合织物的制备及性能研究[D].东华大学,2023.DOI:10.27012/d.cnki.gdhuu.2023.000024.
- [43]邓浩, 王建坤. 电磁辐射及防电磁辐射纺织品的发展现状[J]. 染整技术, 2015, 37(10): 4–8.
- [44]PAUL C R. 电磁兼容导论[M]. 闻映红, 译. 第二版. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [45]李晓露. 飞机线缆屏蔽层破损对屏蔽效能影响的研究[D]. 天津:中国民航大学, 2020.。
- [46]XIAOLING W, CHAO L, HAO D, et al. An improved model for the transfer impedance calculations of braided coaxial cables[C]//Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference: 卷 2. 2012: 1078-1081.
- [47]马晖,葛景滂,王惠明,等.编织型同轴电缆的编织层参数与屏蔽特性的研究[J]. 电线电缆,1994,(04):2-6.
- [48]肖珺, 杨阳, 杨硕, 等. 飞机电气线路互联系统仿真及试验验证技术[J]. 飞机设计, 2022, 42(4): 61-65.
- [49]苗帅帅.碳纤维材料在强电磁脉冲作用下的屏蔽效能研究[D].西安电子科技大学,2022.
- [50]谢彦召, 王赞基, 王群书等. 高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析[J]. 强激光与粒子束, 2003.。
- [51]李飞. 高空核爆炸的电磁脉冲对地面线缆的影响[D]. 南京:南京邮电大学, 2017.
- [52]盖歆楠. 风机内部电子设备雷击电磁干扰的场线耦合研究[D]. 济南:山东大学, 2020.
- [53]余丹阳. 高空核爆电磁脉冲对输电线缆的耦合效应研究[D]. 成都:电子科技大学, 2019.

攻读学位期间录用的学术论文

- 1、刘浩,陈其工,方昊虹. 编织屏蔽电缆转移阻抗及屏蔽效能的研究[J].电线电缆. 已录用

致谢

随着本论文的圆满结束，我衷心地对在这个过程中给予我无私帮助和支持的每一个人表示感谢。

首先，我要向我的导师表达深深的谢意。正是他专业的指导和耐心的释疑，使我在研究过程中避免了许多不必要的曲折。他对待科研的严谨态度和精湛的学术造诣，为我树立了榜样，也激发了我对研究的热情。每当我遇到困惑或难题时，他总是能给予我及时的指导和鼓励，让我能够坚定信心，继续前行。

同时，我要感谢我的同学们。在论文的撰写过程中，我们相互讨论、共同进步。他们的不同观点和见解为我提供了宝贵的思路启发，也帮助我在多个问题上找到了突破口。与他们的合作与交流，让我深刻体会到了团队的力量和友谊的温暖。

最后，我要感谢所有参与论文评审和答辩的专家和老师。他们的宝贵意见和建议，为我提供了进一步改进和提升的空间。他们的严谨和负责，让我深刻认识到了学术研究的严肃性和重要性。

在此，我再次向所有在这个过程中给予我帮助和支持的人们表示最诚挚的感谢！是你们的陪伴与共同努力，让我能够顺利完成这篇论文。未来的道路上，我将继续秉持着这份感恩之心，不断前行，为学术研究和事业发展贡献自己的力量。