

摘要

多频点磁性源发射机设计

当今社会快速发展，工业中对矿产资源的需求在不断提高，以频率域电磁法探测为代表的地球物理方法经过多年的发展广泛应用于矿物勘探当中。野外环境下探测情况复杂，有着多层介质，需要采用多个频率信号进行发射探测。探测装置多采用单轴发射线圈不能满足封闭空间中探测要求。针对以上探测要求和勘探问题，本文采用多频序列作为发射信号，设计出一个三轴发射线圈，搭建出多频电磁发射机装置，研究内容如下：

1. 研究频率域电磁法探测过程，电磁场探测传播时特性，从而根据频率域探测时不同地下物质的二次场变化，得出地下空间环境中目标电性，论述地下探测时的工作原理，根据有限元法和 COMSOL 软件进行频域探测仿真，验证出设计的发射频率适用于地下空间探测中，为多频电磁发射装置作理论基础。

2. 对常用电磁发射信号特性和应用存在的问题进行分析，并根据发射条件及探测方式选用多频信号。本文对电磁发射的信号进行对比研究，分析了常规发射和不同伪随机信号的性质，根据设备探测方式和地下勘探应用需求，选用五频伪随机序列通过高频载波融合发射，运用 Labview 仿真发射机发射实验，同时计算发射深度，证明出多频发射信号在地下勘探应用的可行性。

3. 根据封闭空间电磁探测对三轴发射的需求，设计出边长 0.5m 的三轴方形亥姆霍兹发射线圈作为发射机的发射线圈，以应对复杂环境探测。根据电磁理论进行环形和矩形线圈的磁场强度计算比对，对三轴方形亥姆霍兹线圈的磁感应强度进行计算，同时使用 Maxwell 软件在同一发射条件下的单轴方形、环形和三轴环形及方形线圈的发射仿真分析，验证出设计出的发射线圈具备良好发射性能。

4. 对多频点磁性源发射机的软硬件进行设计，测试出发射装置性能。根据发射机的功能需求采用了单片机和 FPGA 双核心的主控模块，FPGA 进行 512Hz 的 2^n 五频伪随机序列和 204.8kHz 载波时序生成，驱动桥路通过线圈进行波形发射。单片机通过 FMC 通信连接以及 GPS 控制工作，电源在经驱动电路控制下通过逆变桥路进行发射。电源电路通过对外接锂电池的电平转换为主控、GPS 同步提供电源，由此实现完整的多频点电磁发射机。为验证出设计的可靠性，在实验室环

境中测试发射机的驱动信号和载波信号，和设计要求保持一致，同时在野外环境中进行发射试验，验证出设计的实用性与可靠性。

关键词：

亥姆霍兹线圈，频率域，多频发射，电磁探测

Abstract

Design of Multi-frequency Magnetic Source Transmitter

In today's rapidly developing society, the demand for mineral resources in the industry is increasing. The geophysical method represented by frequency domain electromagnetic detection is widely used in mineral exploration after many years of development. Detection in the field environment is complex. With multiple layers of media, and the need to use multiple frequency signals for emission detection. Detection devices mostly use single-axis emission coils that can not meet the requirements of detection in closed space. For the above detection requirements and exploration problems, this paper adopts a multi-frequency sequence as the transmitting signal, designs a three-axis transmitting coil, and builds a multi-frequency electromagnetic transmitter device. The research content is as follows.

1. The study of frequency domain electromagnetic detection process, electromagnetic field detection propagation characteristics, so that according to the frequency domain detection of different underground materials in the secondary field changes, the target electrical properties in the underground space environment, discuss the working principle of underground detection, according to the finite element method and COMSOL software for frequency domain detection simulation, to verify the design of the emission frequency for underground space detection, for multi-frequency electromagnetic emission device for Theoretical basis.

2. The common electromagnetic emission signal characteristics and application problems are analyzed, and the multi-frequency signal is selected according to the emission conditions and detection mode. This paper conducts a comparative study on the signals of electromagnetic emission, analyzes the nature of conventional emission and different pseudo-random signals, selects five-frequency pseudo-random sequences to transmit through high-frequency carrier fusion according to the detection mode of equipment and underground exploration application requirements, uses Labview simulation transmitter to transmit experiments, and also calculates the transmitting

depth to prove the feasibility of multi-frequency emission signals in underground exploration applications.

3. Based on the demand for triaxial emission in closed space electromagnetic detection, a triaxial square Helmholtz emission coil with a side length of 0.5m is designed as the emission coil of the transmitter to cope with complex environmental detection. The magnetic field strengths of the toroidal and rectangular coils are compared according to the electromagnetic theory, and the magnetic induction strengths of the three-axis square Helmholtz coil are calculated. The simulations of the single-axis square, toroidal, and three-axis toroidal and square coils under the same launch conditions are also analyzed using Maxwell software to verify the good launch performance of the designed launch coil.

4. The software and hardware of the multi-frequency point magnetic source transmitter are designed and tested out for transmitter performance. A dual-core microcontroller and FPGA master control module were used according to the functional requirements of the transmitter. The FPGA performs 2^n five-frequency pseudo-random sequences at 512 Hz and 204.8 kHz carrier timing generation, and the driver bridge circuit transmits waveforms through the coil. The microcontroller works through the FMC communication connection and the GPS control, and the power supply transmits through the inverter bridge circuit under the control of the drive circuit. The power supply circuit provides power to the master and GPS synchronously through level conversion of external lithium batteries, thus realizing a complete multi-frequency electromagnetic transmitter. To verify the reliability of the design, the drive and carrier signals of the transmitter are tested in the laboratory environment, which is consistent with the design requirements, and the transmitting test is conducted in the field environment to verify the practicality and reliability of the design.

Keywords:

Helmholtz coil, frequency domain, multi-frequency emission, electromagnetic detection

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 地下空间勘探方法研究现状	3
1.2.2 频率域电磁法探测装置研究现状	6
1.3 研究内容和技术路线.....	7
第 2 章 频率域探测方法及理论	10
2.1 频率域电磁法探测基本理论	10
2.1.1 麦克斯韦方程组.....	10
2.1.2 垂直磁偶极子电磁场响应	12
2.1.3 趋肤深度.....	15
2.1.4 地下空间介质电磁特性分析	16
2.2 有限元法及磁场仿真分析	17
2.2.1 有限元法和 COMSOL 软件.....	17
2.2.2 频率域电磁法空间探测仿真	19
2.3 本章小结	22
第 3 章 多频点磁性源发射机架构及发射原理	23
3.1 多频点磁性源发射系统架构	23
3.2 电磁发射装置常用发射信号及特性.....	24

3.2.1	M 序列	24
3.2.2	m 序列.....	24
3.2.3	Gold 序列.....	27
3.2.4	逆重复 m 序列	28
3.2.5	2^n 序列	28
3.3	发射机工作波形的选择.....	33
3.4	发射机多频发射分析及仿真.....	34
3.5	多频发射信号趋肤深度分析.....	36
3.6	本章小结	37
第 4 章	三轴发射线圈设计及仿真	38
4.1	发射线圈理论计算	38
4.1.1	单轴线圈对比研究.....	38
4.1.2	方形与环形发射线圈感性计算	42
4.2	三轴方形亥姆霍兹线圈发射的磁场计算分析.....	42
4.3	不同发射线圈的磁场仿真分析.....	44
4.4	本章小结	49
第 5 章	多频点电磁发射机硬件设计	50
5.1	发射机整体硬件设计	50
5.2	电源模块设计	50
5.3	发射机主控设计	51
5.3.1	处理器方案选择.....	51
5.3.2	控制单元设计.....	52

5.4	发射机同步方案设计	56
5.4.1	GPS 简介	56
5.4.2	同步模块电路设计	56
5.5	发射桥路和驱动设计	58
5.5.1	发射桥路设计	58
5.5.2	驱动电路设计	60
5.6	本章小结	62
第 6 章	发射机软件设计及测试分析	63
6.1	发射机程序功能需求	63
6.2	主控芯片通信方案	63
6.3	同步程控方案	66
6.4	发射机指标及实验测试	68
6.5	本章小结	73
第 7 章	总结与展望	74
7.1	主要工作总结	74
7.2	后续工作建议	75
参考文献	76
作者简介及科研成果	83
致谢	84

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

作为不可再生资源的矿产资源的开发与探测已经成为相关职能部门的焦点，科技的进步和提升使矿产资源储量逐渐明了，而后开采区域的空洞塌陷等问题逐渐显现^[1]。在国家经济建设的发展下，工业化发展、资源勘探技术也不断提出新的要求^[2]。新能源建设不断推进，煤炭等能源在日常中仍占有巨大比例，是人们在工业生产和生活中不可缺少的部分^[3]。随着现代化装备产业技术水平不断提升，掘进深度增加及采空区的探测等取得了一定需求，潜在问题会对人们的生产生活产生较大影响^[4]。进行地下空间的探测能进行风险预知，野外的探测能进行资源勘探。自然资源部数据得出 2010 年到 2018 年地面塌陷及地面沉降多达两千余起，同时矿产等地质资源勘探的需求也在提升，煤层挖掘等复杂地质情况都需要应用地球物理方法进行检测^[5]。对灾害进行预测探究及对矿产资源进行勘探，需要监测数据进行探测^[6]。目前的城市地下空间利用深达几十米，可靠的地下探测也有着深层化、综合化发展的趋势。当前的城市、管道规划的充分利用需要查清地质空间状况，隧道、桥梁及高铁的基础建设对此也有着一定要求，当大雨内涝或者陷落时会有一定的环境风险。作为广泛应用且有效反映地质情况的频率域电磁法，是解决地下勘探、资源监测的重要方式之一^[7]。

在 21 世纪，需要不断将理论应用于矿业资源探测，技术的革新与发展将缓解如今面临的难题，理论方法不断完善，技术不断提升，取得了许多新的成果，然而资源有限的情况下在隐蔽位置地质勘察存在许多困难^[8]。在早期矿业生产中法律监管存在不足，大范围的滥采现象导致存在较大的破坏区，不仅效率低下且对如今的地质造成影响^[9,10]。经过时间流逝，采空区为人为活动产生的“空洞”形变大、隐伏强，原有平衡被打破，应力场转变，存在垮落、沉降等问题^[11]。潜在问题逐渐影响了人们的生产生活，利用相关技术对资源已及采空区的探测要求逐渐提高^[12,13]。2015 年榆林市二墩煤矿采空区塌陷，受损面积多达 130 亩。2017 年 3 月乌鲁木齐八道湾煤矿采空区塌陷，造成 7 人伤亡。2022 年安华湘安钨业塌

陷,造成停产撤离。虽然采空区结构、深度以及时间等情况有着许多不同,而且许多资料遗失,给后续处理带来困难,但运用地球物理方法能够对相当数量的区域进行有效探测,能够有效反映地下结构,因此取得了大量应用。电磁法根据地质差异,通过人工场源进行发射,探测出地下介质深度、大小等的信息,广泛用于灾害预防、地质勘察等领域。

地下空间的分层多变,不同情况适用于不同的方法,地球物理方法中的频率域电测法利用不同频率下的探测深度,来进行探测与结果,常用于地下空间等方面的检测,有着一定的可靠性。频率域电磁发射作为整体探测装置的重要部分,发射的可靠影响着后续的结果,由于探测时的发射强度影响着接收信号的强度,所以发射线圈也需要设计,为了达到不同的探测深度,采用多频发射信号和大磁矩发射线圈结合进行应用,范围广,有效深度高。

1.1.2 研究意义

频率域电磁法勘测是效果良好的地球物理方法,在地下勘探测量中不可或缺。因此需要勘探深度大、效率高的电磁法勘测装置^[14]。在勘探时接收装置接收的地电信息需要稳定可靠的发射系统,尤其在野外环境当中,受多种设施的影响,怎样合理地放射和利用装置,提高发射功率十分重要^[15]。因为发射信号的频率等影响着探测深度,根据趋肤效应探测,设定相应的信号频率,在高频下能够对非深层勘探取得良好效果,易于辨识。

在通过线圈进行发射时,高频的发射会带来感应负载的增加,而使通过的电流降低,因此要进行良好的谐振匹配来提高发射的效率以适应勘探要求。发射线圈的制作总会受到体积、携带、野外适用性的影响,因此设计出大功率下的线圈有一定限制。在提高电压电流发射的过程中,器件研制需要更多的解决方式,复杂程度也随之提高,传统方案进行频域发射时,仅采用单一频率的发射或者采用轮换间断的方式,带来了人力与设备持续性的要求,造成成本的提高,提高工作效率也在要求做出改变。伪随机信号有着一定的抗干扰性且具备多个频点,可以探测不同的地下信息,得出期望的探测效果。发射系统需要通过不断更新迭代,以及反演解释等造成问题。同时,电磁法勘探中环境复杂,对防护等性能有一定要求。

根据所面临的问题,设计出应用于多频点磁性源发射系统的三轴发射线圈,

有着大线径、重量轻及有着足够的发射磁矩，针对探测要求做出整体设计方案、仿真及测试等。在单一发射线圈有限的情况下进行三轴发射线圈的制作，以满足及空间情况下的发射要求。对于单频发射的成本提高等问题，采用多频的信号进行发射，提高了实用性，增加了应用范围。发射机的输出功率不仅得到了提升，波形质量也有着良好输出，为电磁勘探提供稳定可靠的发射场源，更优地支持勘探。

1.2 国内外研究现状

地球物理方法及地下空间探测都为通过对异常体或地下不同情况进行探测，不断发展中对地下情况进行精确的探测与成像有一定要求。由于当前的仪器发展和地下空间探测有限，需要不断地改进仪器，满足探测需求。纵观目前的各方面应用，地质勘测与探查中的多种方法，应用较广的探测方法有频率域电磁法、瞬变电磁法、探地雷达法、高密度电法等方法^[16]。

1.2.1 地下空间勘探方法研究现状

(1) 瞬变电磁法

瞬变电磁法探测时发射、接收装置及线圈放置在探测区域上方。发射系统通过线圈发射交变电流，瞬变的一次场信号向大地中感应产生涡流场，在间隔期间形成的二次场包含的地下信息情况进行接收线圈探测、转换、采集及保存，经处理反演解释后可得出地质信息，电阻率高低影响着接收线圈感应得到的感应曲线^[17]。该理论最早在上世纪当中由美国科学家提出，但是在其使用当中分辨率过低而无法应用^[18]。探测应用逐渐发展的过程中实现了正演和反演，从而逐渐得出应用^[19]。随着时间的推移，大批的专家学者为达到更好的效果进行研究做出贡献^[20]。国内的应用虽比较晚，也在迅速发展^[21]。

在向地下发送脉冲场时二次场不会瞬间消失，有着瞬变的过程，线圈接收后观察与时间的变化关系，确定地质分布形态^[22]。从上世纪开始，蒋邦远将瞬变电磁法应用于资源勘探当中，研发出 DCM-1 探测机^[23]。牛之璠出版图册并将其应用在勘探矿产中，有良好效果^[24]。李貅在大地测深中应用瞬变电磁，有一定的实用效果^[25]。Z.R.Dennis 通过瞬变电磁法进行介质探测验证^[26]。Ezersky, N.Yu.Bobrov 等对地下水、介质深度进行分析^[27]。加拿大公司 Geotech 产品用于垂直发射及多

分量接收, 保证地下探测反应不受到干扰, 大功率高效发射, 效果明显^[28]。G&G Science 开发的便携式探测系统单发多接收, 获取多点响应^[29]。瞬变电磁法存在着一次场干扰明显、发射接收重叠等问题。而频率域电磁法则探测应用更广, 深度较高, 对比下在电磁测深中有更好应用。当电阻率越低的情况下, 感应电压越平缓。

(2) 探地雷达法

探地雷达法为经由天线向目标发射高频信号, 由反射波得出探测结果。根据电磁波地下传送时的反射信号得出地下介质信息^[30]。上世纪初开始提出利用脉冲探测地下介质情况, 在 50 年代后研究学者通过无线波探测, 取得了较大进展, 后通过低频进行深度研究, 技术也得到发展, 电子技术等科技进步也在不断带动着前进。国外仪器发展较早, 推出了众多产品。代表性的有加拿大的 Pulse EKKO 产品, 美国的 GSSI 推出的 SIR 系列探地雷达产品, 日本 OYO 的 YLRZ 产品, 瑞典的 GPR 产品等都有着良好的效能^[31]。而国内的弹力雷达研究也取得了一定成果, 包括东南大学的 GPR-1、大连理工大学的 DTL-1 和中科院的 SI²R 等^[32]。

探测雷达采用的频率范围为 10~1000MHz, 有着地面、航空及钻孔用法多种。天线方式的单道、三维也在不断发展^[33]。目前的发展趋势为专用的高性能装置, 而不是多类型的探测系统, 因为目标的不同, 在保证高性能的时候仅适合专用, 而在多层的时候, 要根据相近层针对性的设计, 未来将会向抗干扰性强、采集速度快、分辨率高、经济型、简单便利以及经济成本高等方向发展^[34]。

该方法目前常用于探测电磁特性差异较大的区域, 在国内的工程领域、水文调查、考古研究、矿产勘查及医学探测方面有着一定的应用, 在灾害勘察、建筑物的检测、施工中的初、中、后期都能得到应用^[35]。探地雷达可以根据介电常数特性进行评价和探测地下水情况。考古研究有着无损性的要求, 而探测刚好能应用于此, 得到了相应发展。在上世纪就应用过矿产勘探领域, 岩盐介质中信号损失小, 探测深度高, 在矿物探查中逐步发展^[36]。然而在高频发射的时候, 如果存在地面突起等问题, 就会有一定偏差, 低阻情况勘探浅。与频率域电磁法对比深度较低, 不适用于野外测深应用当中。

(3) 高密度电法

高密度电法勘探由视电阻率剖面测量和竖向测深结合得到, 根据地下介质电

性差异,多电极测量获取测点附近电阻率情况,反映深度及断面特征^[37]。该方法从上世纪七十年代就开始研究,从传统电法的不足中逐渐改进产生使用电磁测量的装置。英国研究者首先进行装置开发,形成最初模式,80年代后,日本研究者使用转换板进行高密度电法测试采集,但因技术发展限制,不足以充分体现优越性^[38]。

此后在多个国家的地球物理勘探研究者进行高密度电法的研究工作,完善理论与技术问题,实现的大的跨越发展^[39]。我国的起步研究较晚,在地矿部及相关研究人员使用中,探查取得了良好效果。高密度电法为多电极测量装置,包含主机和转换开关,在逐步发展当中,实现了自动化采集。

目前国内逐步开发出分布智能式、电子式等形式装置。法国 IRIS 公司、美国 AGI 公司、日本 OYO 公司开发出分开放置转换开关及结合仪器的电阻率仪器。电极排列方式应用较多为 α 、 β 、 γ 排列。在早期探测受采集的限制,电极排列方式单一,经过发展,自定义与组合排列逐渐应用。测量时结合出各个方法的优点不仅提高了测量的效率,还能够增加分辨率及深度。探测时能够针对性研究探测,复杂期情况下的探测优势明显,灵活布置最大限度满足需求^[40]。在地裂缝探测、采空区、铁路路基、堤坝渗漏,探寻地下水和灾害勘察等方面取得了良好探测效果^[41]。然而高密度电法相比频域电磁探测装置,应用范围受限,且在野外环境中会受环境和介质的限制。

(4) 频率域电磁法

频率域电磁法是通过线圈发射交变频率的一次场,发射入地层或者目标空间时,电磁感应有着涡流,伴随产生二次场,由接收装置得到相应频率的二次场数据,虽然和瞬变电磁法类似,但由于是谐变场,相比能够避免信号丢失的问题。频率域电磁法是水文勘探和地质构造勘察等的重要方式^[42]。

在电磁发射的时候,通过单一频率或者多个频率进行应用,实现多地层,高分辨率的探测,有着强的抗干扰性、可控采集周期等优势^[43]。但目前也有着需要谐振匹配和有着可用频谱少的问题^[44]。在当前的国家发展规划当中提到在地质勘测及仪器的开发,减少对外部的依赖,满足在不断发展中的需求^[45]。而本文所进行设计的装置能够一次发射多个频点,因此在复杂环境当中可以实现分层探测,效果大大提高,同时采用多频融合使用线圈进行发射,野外应用性和效果得到了

提升。

1.2.2 频率域电磁法探测装置研究现状

在地球物理勘探领域中，频率域电磁法得到了广泛应用，也诞生出了不同的方法和仪器，有着不同的应用范围，在环境调查，资源勘探、地质研究中都得到了应用和发展^[46]。

国外的仪器勘探研发较早，有着大量的产品，有一定代表的产品为美国公司 Zonge 的 GDP-32, 德国公司 Metronix 公司 ADU 系列的产品, 加拿大公司 Phoenix 的 V8^[47]。这些产品大都用于野外环境中的探测开发，经过长时间工作探测，深度高。而如果在城市或者相关环境中，不仅存在着干扰复杂的问题，而且对探测深度要求不高，相关的开发仪器主要代表有美国和加拿大相关公司开发的 EM 和 GEM 相关电磁勘探产品^[48]。图 1.1 为 EM34 探测仪器。



图 1.1 EM34 探测仪器

GEM 系列和 EM 系列产品各有一定的不同。EM 系列没有地面的接触，通过电阻率的计算判断地下环境情况^[49]。根据接收线圈和发射线圈的设计间距分为 EM34 和 EM31 型号，虽然有着一定的探测深度，但因为频率单一发射，得出单层的地下资料^[50]。在商业化效果良好的 GEM 系列对堤坝、管线等探测方面有效进行，对资源的利用有着极大的帮助。仪器拥有着陆地和航空系列，从而进行复杂地质和平坦野外的勘测，探测应用当中还存在着精度受限等问题。发射、接收和参考线圈扁担式放置的 GEM-2 发射频率较宽，有着 $3A \cdot m^2$ 的磁偶极矩。而 GEM-3 磁矩更大，且能够单点探测，仪器示意图如图 1.2 示。技术的提升也带来仪器的改进，GEM-5 有着 $3000A \cdot m^2$ 的磁偶极矩，发射的频率更广，且分辨率也有着一定提高。仪器在探测时计算机辅助操作设置，采集完成分析与处理结果，

有着小目标探测准确性低的问题。



图 1.2 GEM-3 多频电磁探测仪

我国的电磁发展较为落后，最早期的 DDW-1 仅能单次发单频，设备也比较笨重，每次都要对频率进行修改，多个频率的储存不能同时进行，相比国外仪器探测也有着差距^[51]。吉林大学也做出过相应的宽频探测设备，虽达到了扫频，但是也有着大体积不易携带，上位机操作速度慢的缺点。资源的占用比较大，不能满足高实时性，因此国内外在不断研究。

综上所述，在国内外的频率域电磁法探测装置中，采用单频信号或者进行几个频率多次发射测量，效率较低，采用单轴线圈不能满足封闭空间中全方位的探测要求。因此设计出三轴发射线圈应用于多频点发射机中有着广泛的应用前景。

1.3 研究内容和技术路线

本文以电磁法勘探的相关应用场景，根据现有单频电磁发射的不足，设计出一个基于伪随机序列的频率域电磁发射机，通过阅读文献以及需求分析和发展状况，针对当前单轴发射在封闭空间中探测的不足之处，做出三轴方形亥姆霍兹发射线圈的设计，根据采用多个频率探测应用，选择出具备 5 个频点的伪随机五频波，避免分次换频探测的麻烦和人力物力的浪费。本文从频率域电磁探测基本理论出发，论述地下探测时的工作原理，由设计方法根据有限元法和 COMSOL 软件进行频域探测仿真，验证出设计的发射频率适用于地下空间探测中，为实测提供参考价值。根据发射条件及探测方式选用多频信号。进行常规发射和不同伪随

机信号的性质对比分析，根据设备探测方式和地下勘探应用，选用五频伪随机序列通过高频载波融合发射，运用 Labview 仿真发射机发射实验验证分析。对不同线圈磁感应强度进行计算，同时使用 Maxwell 软件进行在同一发射条件下的单轴方形、环形和三轴环形及方形线圈的发射仿真分析，验证出设计出的发射线圈具备良好发射性能。采用双核心的方式进行控制，利用 FPGA 进行时序发射设计，设计信号驱动电路及逆变桥路等相应硬件通过三轴线圈发射，同时使用 STM32 进行通信、设计和控制，对设计软件进行编写，实现控制。最后完成发射系统测试、整合，参数确定等工作。验证了所涉及装置的实用性和可行性。

图 1.3 所示为技术路线图：

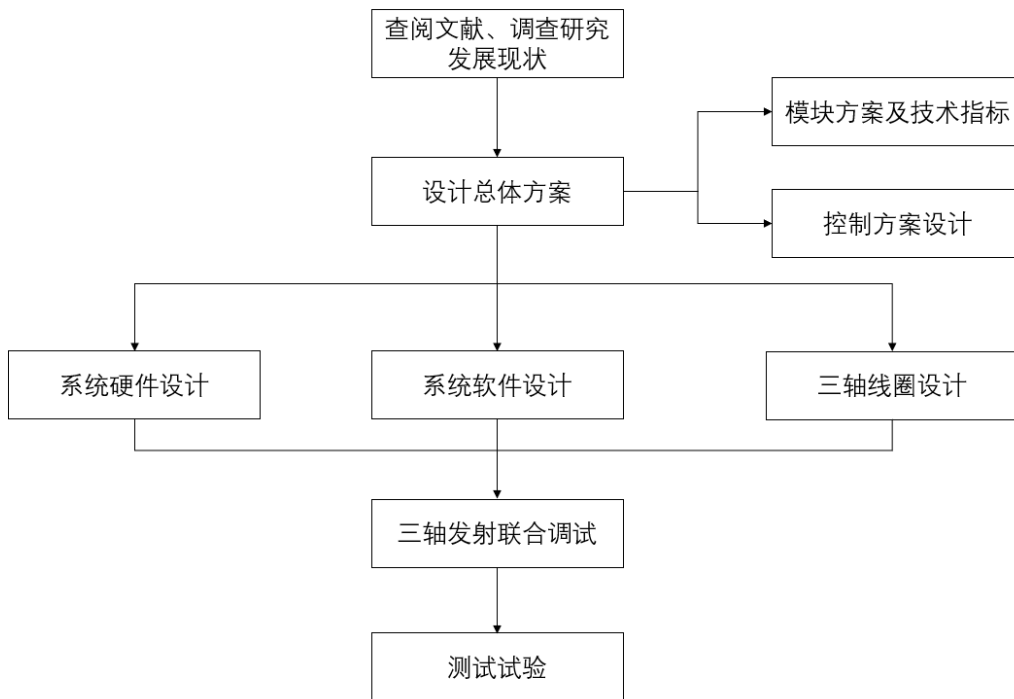


图 1.3 技术路线图

根据以上的内容，本文从以下几个章节进行论述，各部分内容及概述如下：

第 1 章，绪论部分，分析当今探测技术研究现状，以及所面临的地质勘探问题，描述电磁发射装置开发的意义，对不同地质探测方法进行描述和分析应用情况。对频率域电磁探测仪器对比分析，国内外的进展，选择使用的方案和构架。

第 2 章，为多频点磁性源发射机参数和实测可行性进行验证。首先频率域电磁探测基本原理开始，由麦克斯韦方程组出发，得出频率域探测时的应用公式，列举不同物质介电特性，探测时存在感应变化。通过 COMSOL 软件进行空间中

探测模型建立，进行频率域电磁发射仿真分析，得出单方向下的磁场穿透结果，为后文的发射机设计提供基础。

第3章，建立多频电磁发射系统的整体架构和功能分析。为了选取磁性源发射机在地下空间探测中更适用的发射信号，本章对常用电磁法发射信号特性进行分析，对比得出 2^n 序列信号波形在频率域电磁探测时具备多个主频点、精度高和分布良好等优点。文中对发射信号的探测深度计算，得出均匀深度探测，同时采用高频正弦载波和低频信号结合的方式进行信号发射仿真分析，验证出发射信号合理性。

第4章，由于在封闭空间和复杂环境探测要求，需要三轴线圈发射，通过计算方形和环形线圈磁场强度推至三轴环形和方形线圈。使用 Maxwell 仿真软件进行三轴方形线圈和环形线圈发射强度计算，证明设计的三轴方形亥姆霍兹线圈提高了发射磁场强度。

第5章，根据频率域电磁法发射原理和发射仿真结果，设计多频点磁性源发射机整体方案，选用发射机各部分器件，确定发射机相关参数，完成电磁发射机设计。通过各部分硬件模块的设计调试，整合测试，实现多频点电磁发射机的信号发射。

第6章，通过对多频点磁性源发射机主控芯片、GPS 电路等程序设计，完成时序控制、硬件外设通讯等功能，发射机能够完整运行，同时对电磁发射机数据参数列举，发射测试，验证出本设计满足多频点电磁发射设计要求，并具备较高可靠性。

第7章，对论文工作总结和分析展望，提出后续工作建议。

第 2 章 频率域探测方法及理论

根据频率域电磁探测原理，如图 2.1，发射装置发射的一次场感应得出微弱二次场信号，从而得出地下介质特性，不同的电磁信号频率可以测量相应的深度及范围。本章以麦克斯韦方程组为基础，阐述频率域电磁勘探的原理，通过空间仿真进行可行性分析。

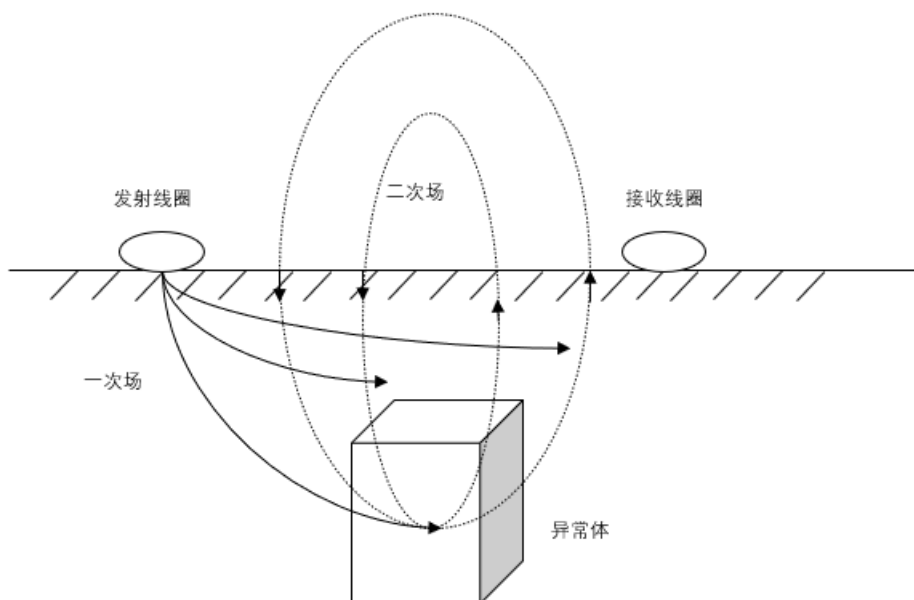


图 2.1 探测示意图

2.1 频率域电磁法探测基本理论

2.1.1 麦克斯韦方程组

麦克斯韦方程组描述了电流、磁场、电荷及电场随空间与时间的变化规律，电磁现象作用得到综合。麦克斯韦在 1864 年推导及完善相关方程，建立起有着电流密度、电荷密度和场强矢量间关系的麦克斯韦方程组^[52]。其中包含高斯定律、磁通连续性定律、法拉第电磁感应定律和安培环路定律，时间域上表达式为：

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

其中, \vec{B} 为磁感应强度, 单位为T; \vec{D} 为电位移矢量, 单位为C/m²; ρ 为自由电荷密度, 单位为C/m³; \vec{H} 为磁场强度, 单位为A/m; \vec{j} 为传导电流密度, 单位为A/m²; \vec{E} 为电场强度, 单位为V/m。

然而频率域电磁法需要经线圈发送交变的电流, 因此空间中就有着人工的激励场, 因此上述无源区域下的麦克斯韦方程组形式不适用, 应进行有源条件下的分析。

令 $\vec{H} = \text{Re}(\vec{H}_0 e^{i\omega t})$, $\vec{E} = \text{Re}(\vec{E}_0 e^{i\omega t})$, $e^{i\omega t}$ 为时谐因子。将上述条件代入麦克斯韦方程组, 得出在有施加激励下的方程组形式^[53]:

$$\nabla \times \vec{H} = (\sigma + i\omega\epsilon)\vec{E} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\nabla \times \vec{E} = i\omega\mu(\vec{H} + \vec{M}) \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

式中, \vec{M} 为外加磁偶源的等效磁化强度。

由上式可得知一个矢量旋度的散度为0, 因此引入电矢量势 \vec{A} , 设定如下关系:

$$\vec{E} = \nabla \times \vec{A} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

代入公式得到:

$$\vec{H} = (\sigma + i\omega\epsilon)\vec{A} - \nabla U \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

U 为任意一个标量函数。

则可得出:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = -i\omega\mu[(\sigma + i\omega\epsilon)\vec{A} - \nabla U + \vec{M}] \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

由矢量函数关系式: $\nabla \times \nabla \times \vec{A} + \nabla^2 \equiv \nabla \nabla \cdot \vec{A}$, 代入展开即可得到:

$$\nabla \nabla \cdot \vec{A} - \nabla^2 \vec{A} = -i\omega\mu[(\sigma + i\omega\epsilon)\vec{A} - \nabla U + \vec{M}] \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

设定波速为 k ，则 $k^2 = -i\omega\mu(\sigma + i\omega\varepsilon)$ ，可得出：

$$\nabla\nabla\cdot\vec{A} - \nabla^2\vec{A} = k^2\vec{A} + i\omega\mu\nabla U - i\omega\mu\vec{M} \quad (2.13)$$

使用洛伦兹条件限定 U 来简便求解，定义为：

$$\nabla\cdot\vec{A} = i\omega\mu U \quad (2.14)$$

从而简化公式为：

$$\nabla^2\vec{A} + k^2\vec{A} = i\omega\mu\vec{M} \quad (2.15)$$

得到谐变场矢量势 \vec{A} 波动方程。

2.1.2 垂直磁偶极子电磁场响应

设发射磁矩为 \vec{M} ，计算公式为 $M = I \cdot S \cdot N$ ， N 为线圈匝数， S 为线圈面积， I 为发射电流。图 2.2 为探测介质图示，首先设置线圈置于水平面上的发射系统，此时磁偶极子垂直于面上仅有着 z 方向上的场^[54]，在模型设置中电场不存在垂直分量，电矢量势 \vec{A} 也是仅 z 分量，将波动方程化为标量：

$$\nabla^2 A + k^2 A = i\omega\mu M \quad (2.16)$$

在平面上方 h 处放置磁偶极子的情况下，真空磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ ，电导率为 0 ，根据地下情况分层分析深度 h_n 、波数 k_n 、电导率 σ_n 和磁导率 μ_n ($n = 1, 2, 3, \dots, n$)，代表着不同层下的地质信息^[55]。设置收发距为 r ，选用柱坐标系进行求解。此时 \vec{A} 解为：

$$\vec{A} = \frac{i\omega\mu_0\vec{M}}{4\pi} \int_0^\infty (e^{u_0(z-h)} + r_{TE}e^{-u_0(z+h)}) \frac{\lambda}{u_0} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (2.17)$$

在发射线圈距离 r 处电磁场为：

$$H_z = \frac{Ia}{2} \int_0^\infty (e^{u_0(z-h)} + r_{TE}e^{-u_0(z+h)}) \frac{\lambda^2}{u_0} J_1(\lambda a) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (2.18)$$

其中，反射系数为 r_{TE} ，积分变量为 λ ， J_0 为零阶贝塞尔函数， J_1 为一阶贝塞尔函数， a 为发射线圈半径， I 为激发电流。

$$r_{TE} = \frac{u_0 - u^1}{u_0 + u^1} \quad (2.19)$$

u^i 为地表导纳，通过公式求得：

$$u^i = u_i \frac{u^{i+1} - u_i \tanh(u_i d_i)}{u_i + u^{i+1} \tanh(u_i d_i)}, (i = 1, \dots, n-1) \dots\dots\dots (2.20)$$

$$u^n = u_n, (i = n) \dots\dots\dots (2.21)$$

第*i*层特性导纳 u_i 为：

$$u_i = \sqrt{\lambda^2 - k_i^2} \dots\dots\dots (2.22)$$

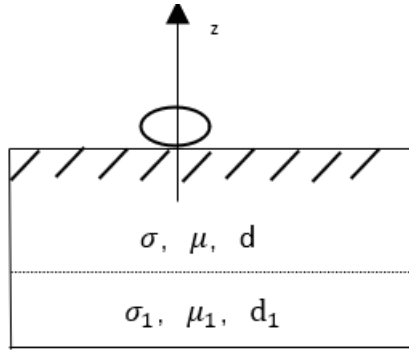


图 2.2 介质模型图

在接收和发射线圈在同一水平面时， $z = 0, h = 0$ ，接收和发射的距离为 r ，首先从单层的均匀空间计算分析，由前面设定的波数为 k_1 ，电导率为 σ_1 ，磁导率为 μ_1 ，且设为真空磁导率计算，忽略位移电流情况下 $u_0 = \sqrt{\lambda^2 - k_0^2}$ ，约为 λ 。

在垂直磁偶极子的情况下，接收线圈接收到的是发射线圈的一次场和探测得到的二次场，此时磁场垂直分量为：

$$H_z = -\frac{M}{4\pi r^3} \frac{2}{(k_1 r)^2} \{9 - [9 - 9ik_1 r - 4(k_1 r)^2 + i(k_1 r)^3] e^{ik_1 r}\} \dots\dots\dots (2.23)$$

其中， i 为虚数， M 为磁矩， r 为收发距，波数由位移电流和感应电流运算，为 $k = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - i \omega \mu \sigma}$ ， ω 为角频率。

在设定空间中一次场为：

$$H_p = -\frac{M}{4\pi r^3} \dots\dots\dots (2.24)$$

接收线圈得到的磁场减去一次场，即可得出所需二次场：

$$H_s = H_z - H_p = H_p \left\{ -1 - \frac{2}{k_1^2 r^2} [9 - (9 - 9ik_1 r - 4(k_1 r)^2 + i(k_1 r)^3)] e^{ik_1 r} \right\} \quad (2.25)$$

对 $e^{ik_1 r}$ 进行泰勒展开:

$$e^{ik_1 r} = 1 + ik_1 r + \frac{1}{2}(ik_1 r)^2 + \frac{1}{6}(ik_1 r)^3 + \frac{1}{24}(ik_1 r)^4 + \dots \quad (2.26)$$

二次场与一次场进行归一化处理, 应用于 $r \ll \delta$ 时, 可以得到 $k = \sqrt{-i\omega\mu\varepsilon}$, 对泰勒展开式忽略高次项推得:

$$\frac{H_s}{H_p} \approx \frac{(ik_1 r)^2}{4} = -\frac{i\omega\mu_0\sigma r^2}{4} \quad (2.27)$$

通过推得的公式可以得出在收发距一定时, 感应的二次场和发送的一次场相比与电导率呈线性关系。由公式:

$$\sigma = \left| \frac{4}{\omega\mu_0 r^2} \right| \frac{H_s}{H_p} \quad (2.28)$$

即可得出探测处视电导率。

从平面得到的视电阻率经数据分析与处理得出相应的地下电阻率信息, 分析层状大地的情况, 感应的电流流动为水平方向, 忽略掉不同层的互感。可以得出在距离 r 处接收的二次场垂直分量:

$$H_z^s(h) \int_0^\infty \lambda^2 \frac{\lambda - u_1}{\lambda + u_1} e^{-2h\lambda} J_0(r\lambda) d\lambda \quad (2.29)$$

响应函数定义为:

$$R_V(h) = \frac{H_z^s(h)}{H_z^s(0)} \quad (2.30)$$

函数表示了经电磁发射后深度 h 下介质二次场占发射产生的二次场垂直分量的比例。

$$H_z^s(0) = H_0 \frac{(ik_1 r)^2}{4} = -\frac{M}{4\pi r^3} \cdot \frac{(ik_1 r)^2}{4} = \frac{k_1^2 M}{16\pi r} \quad (2.31)$$

继续简化分析, 在发射信号的频率较低、忽略掉位移电流时, k 值就比较小, $\lambda \gg k$ 时对 u_1 展开则得到:

$$R_V(h) = r \int_0^{\infty} e^{-2h\lambda} J_0(r\lambda) d\lambda = \frac{r}{\sqrt{4h^2 + r^2}} \dots\dots\dots (2.32)$$

在深 h 层中的响应密度函数 $\phi_V(Z)$ 通过对 $R_V(Z)$ 积分得到:

$$\phi_V(Z) = \frac{4Z}{(4Z^2 + 1)^{\frac{3}{2}}} \dots\dots\dots (2.33)$$

式中相对深度 $Z = h/s$ 。

在检测过程中的每一部分介质感应的值都可单独分析, 地下介质的电导率即可得出, 通过自下而上的计算, 以两层为例, 实际得视电导率 σ 为^[56]:

$$\sigma = \sigma_2 R_V(Z) + \sigma_1 [1 - R_V(Z)] = \sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1) R_V(Z) \dots\dots\dots (2.34)$$

其中, $\sigma_2 R_V(Z)$ 为第二层, 第一层的为 $\sigma_1 [1 - R_V(Z)]$ 。对于更多层的复杂地质情况则增加方程, 逐步求解。

2.1.3 趋肤深度

在远区的条件下, 可以看作电磁波在均匀介质中传播, 因此这里计算单一方向的交变电磁场沿 z 轴方向传播, 随着深度的增加呈衰减状态。公式为:

$$E = E_0 e^{-bz} e^{-i(\omega t - az)} \dots\dots\dots (2.35)$$

其中 a 与 b 为衰减系数, 电磁波传播距离为 z , 电磁场在趋肤深度下能量衰减到 $\frac{1}{e}$, 此时电磁波的能量大部分已经衰减损耗掉, 深度更深的情况下, 已经达到可以忽略的程度, 公式为:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \dots\dots\dots (2.36)$$

从公式可以得出探测时的穿透深度 δ 和进行探测时发射角频率 ω 、磁导率 μ 以及目标电导率 σ 相关。因此单一频率的发射信号也仅能有一个探测深度, 如果要得到一整片区域的整体情况, 需要设置不同频率进行探测, 然而进行多个频率的发射存在工作量加大的问题, 多次试验时, 会造成一定的误差^[53]。

磁导率取 $\mu = \mu_0$, 公式简化得:

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \dots\dots\dots (2.37)$$

频率域电磁探测理论上能达到很深, 但实际中存在着噪声压制及接收系统的

分辨率等的制约，会有着一定的限制。在不同的测点情况下电阻率不同，探测深度也在发生着变化，探测区域的电阻率较低情况下，需降低发射的频率以达到探测的目的。

实际情况下计算的收发距偏大，且地下介质中具有非均匀性，因此有效的探测深度为：

$$h = 256 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \dots\dots\dots (2.38)$$

根据所推得的频率域电磁探测公式，得出频率越高，探测深度越浅的结论，为后续采用高频载波进行多频发射的探测深度运算作基础。

2.1.4 地下空间介质电磁特性分析

在进行地球物理方法研究的过程中，探测区域包含各种矿物、岩石、土壤等介质^[57]。探测基本原理为地下介质存在差异时，发射的电磁波地下经反射和感应得到的信号有所不同^[58]。表 2.1 和表 2.2 所示为不同介质情况^[59]。

表 2.1 常见材料的电导率和磁导率

材料	相对电导率	相对磁导率	材料	相对电导率	相对磁导率
铜	1	1	钢	0.10	50~1000
金	0.70	1	铁	0.17	50~1000
银	1.05	1	不锈钢	0.02	500
铝	0.61	1	高导磁硅钢	0.06	80000
镍	0.20	1	热轧钢	0.038	1500
铅	0.08	1	铁镍钼合金	0.023	100000

给出材料的电导率和磁导率都为铜的相对值。铜的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ，电导率为 $\sigma_0 = 5.82 \times 10^7 \text{S/m}$ 。

在地下探测时，由于介质情况复杂，实际环境中探测深度远低于理想的趋肤深度。

表 2.2 不同水质电导率

材料	电导率(S/m)	材料	电导率(S/m)
卤水	>4.5	中含盐水	0.2~1.0
极高含盐水	2.0~4.5	微含盐水	0.07~0.2
高含盐水	1.0~2.0	纯水	<0.07

在地下空间探测时，如果在空洞条件下，空洞磁导率可视作真空磁导率，因空洞附近电导率远高于空洞的电导率，存在高阻异常情况。如果在金属矿产附近，通过表 2.1 的分析，电导率远高于附近区域，为低阻异常。如果在其他不同地质情况下根据电性差异进行介质材料分析，通过地下环境电磁特性分析达到地下勘探的目的。

2.2 有限元法及磁场仿真分析

在进行电磁探测研究中，需要设定模型情况进行仿真求解，为实际的探测研究做理论准备。目前有限体积法、有限单元法及有限差分法等应用于电磁场研究当中，有限元法能够精确地模拟出不同地下情况时的模拟求解，应对复杂情况求解良好，有着一定的优越性。使用 COMSOL 软件进行有限元法的空间发射模型建立运算，从而模拟出频率域电磁探测的状况。

2.2.1 有限元法和 COMSOL 软件

有限元法是一种高效处理的先离散后组合的思想方法，随科技发展在实际应用越来越广泛的。有限元法起源于上世纪 40 年代，由 R.Courant 开创性提出，50 年代后用于进行模型的网格划分，矩阵求解，稳定性分析。60 年代后 Clough 进行有限元法的命名使用。最初是用于计算科学领域，在多年的发展中越来越成熟。在电磁场研究中也大量应用^[60]。

电磁场分析时的采用的有效方法是有限元法。有限元法通过将复杂连续结构化为简单的单元进行求解^[61]。目前，有限元法在各个领域都有着一定的发展，复杂的工程问题也在应用处理，在电力设备计算模拟上效果良好^[62]。

有限元法可以看作一种数值拘束。首先进行离散，将连续性的整体作有限单元处理，拆分后的域称之为有限元。同时交界处为离散点，建立单元节点插值函

数，从而得出形函数值，在进行计算求解得出刚度矩阵，由多个单元点的矩阵得出总刚度矩阵，建立有限元方程并施加边界条件进行计算。

在进行电磁场分析计算时，有限元法能够完成电场和磁场的计算，基本的计算步骤为：

- (1) 提出对应问题。根据实际问题选择所求解的类型。
- (2) 区域离散。将所要求的区域离散化处理得出有限个三角形的单元，并编号。
- (3) 边界条件和源设定。通过状态变量微分方程结合进行有限元的求解。需要设定出边界条件和激励源。其中微分方程要进行形式转换。
- (4) 单个处理。从先前的单元得出近似解进行各单元离散关系的选定，得出单元矩阵。
- (5) 建立方程组。对每个划分出的矩阵进行元素相加，得出整体系数和激励矩阵，求解总矩阵。
- (6) 求解方程。运用数学方法进行方程组的求解，由于是近似值，所以在设定条件下重复运算，得出较精确数值。

COMSOL 在机械、电气等领域当中大量使用，可以进行温度场、应力场、磁场、电场等的模型分析，包含各种物理场的分包，有着独特的求解算法，可以进行高精度运算，运用于众多研究者的研究工作当中，对工作研究有着重要帮助。本文中应用软件进行电磁场运算，完成对磁性源的发射强度分析，实现对电磁勘探的测试仿真。软件的理论方法基础为有限元法，通过网格划分来进行单元分析，得出场的计算方程，耦合并计算，效果可靠性高，通过一维、二维及三维的模型建立，直观得出仿真结果^[63]。

图 2.3 为 COMSOL 进行均匀介质电磁探测时的有限元仿真流程图。首先根据物理场的条件，将问题数学化，再根据实际探测的情况，选择出三维模型，进行绘制和构建，根据设计所需磁矩等参数进行设定。选定各个域中的材料和边界条件，搭建出基本的模型后进行网格剖分进行有限元分析，经过运算后得出仿真结果。得到的结果有一定不足，根据实际中的情况修改模型，逐步优化处理，以达到实际最优效果^[64]。

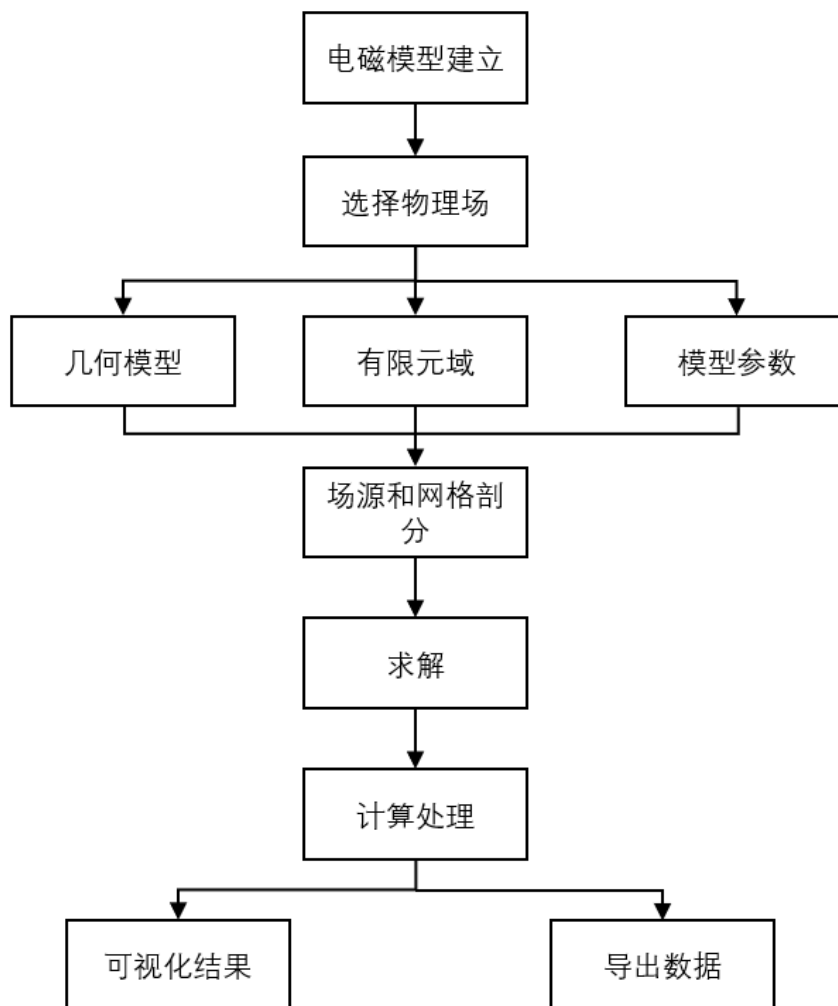


图 2.3 COMSOL Multiphysics 计算求解过程

2.2.2 频率域电磁法空间探测仿真

进行频率域电磁法探测时，为对不同情况进行分析处理，在发射分析时首先进行简单的磁偶极矩在相应地质情况下的探测仿真，实际探测的情况下，放置于地面的线圈发射电磁信号，因为探测目标为地下空间，所以在仿真模拟中以均匀介质为测量传输对象，其中包含着一段高阻介质，设定在各边长为 100m 的正方体封闭空间中进行探测，内部空间区域中材料为空气，内部空间中采用 $60\text{m} \times 30\text{m} \times 8\text{m}$ 和 $40\text{m} \times 10\text{m} \times 5\text{m}$ 两个长方体组成，外层内材料为 $50\Omega \cdot \text{m}$ ，内层材料为 $1000\Omega \cdot \text{m}$ 介质，y 轴方向磁偶极矩为 $1\text{A} \cdot \text{m}^2$ 的环境下进行频率测试，选用 10Hz 至 316Hz 下进行仿真求解。图 2.4 为磁偶极矩对组合情况介质探测图：

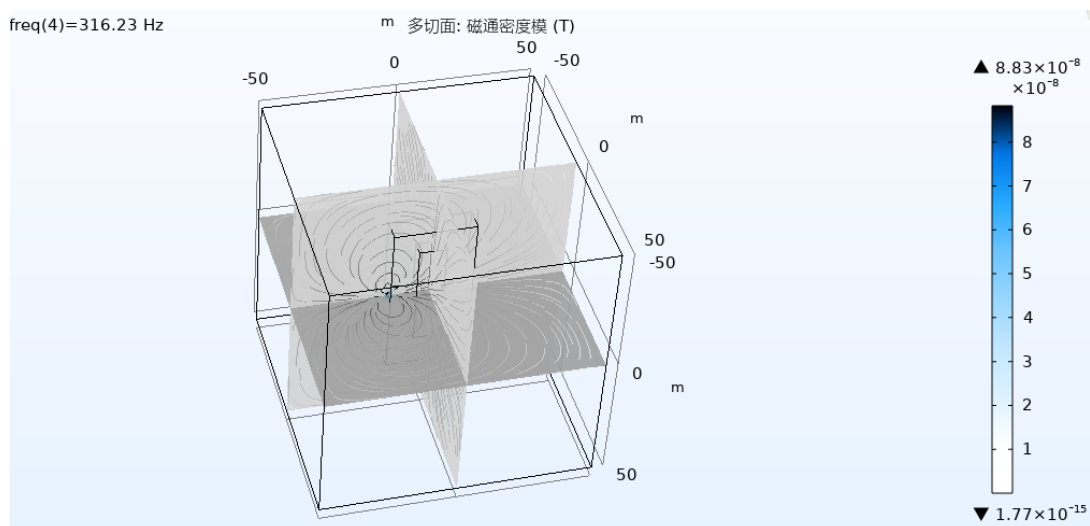


图 2.4 均匀介质探测示意图

在模型建立时，通过三组长方体进行构建组合形成联合体，得到空间物体有限元仿真的简要模型。再根据发射条件设定磁场磁偶极点数值，设定各区域材料，进行频域研究，在网格剖分时，在过密剖分的情况下计算速度会大大减慢，产生假异常的情况。横向两侧点要有竖向网格线，如果较多情况下需要保持等距，水平剖分网格的时候，最小趋肤深度大于最上层水平的网格，后设定测量条件，进行空间磁场仿真。发射时为使测试效果更为直观，选用 10Hz、31Hz、100Hz 低频信号进行磁偶极矩发射，从磁偶极点以 y 轴为直线测量磁感应强度，根据计算结果如图 2.5 示。同时选取磁偶极点对称点进行测量，此时磁感应强度为 $6.744e^{-12}T$ ，得出在空间发射条件下磁场变化和数值。

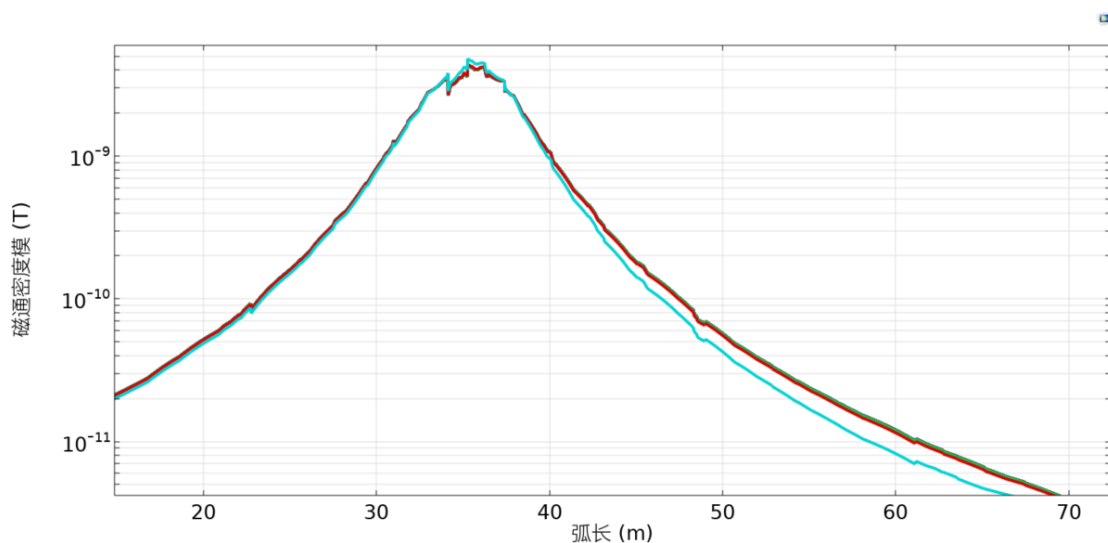


图 2.5 频率探测响应曲线

建立均匀层状空间下探测模型仿真，100m 的正方体封闭空间中进行探测，

内部空间区域中材料为空气，空间探测采用两个 10m 深的均匀介质，电阻率为 $50\Omega \cdot m$ 和 $150\Omega \cdot m$ ，模型剖分图如 2.6 所示。使用 512Hz、2048Hz 频率进行均匀介质探测仿真，得出仿真图 2.7 和图 2.8。

为验证垂直探测下对应频率探测时的磁感应强度，介质探测选用 512Hz、2048Hz 频率发射信号研究，以 5m 为间隔深度为测点测量，得出均匀介质下探测深度 20m 时强度能达到 $2.02e^{-10}T$ 以上。根据仿真图通过仿真分析得出在距离发射点 60m 远的点，穿透空间两层介质，依旧能达到足够的探测强度，能够对设计发射机所需要的发射磁矩和在野外发射条件下的发射设计提供参考，测点的磁感应强度也说明出发射磁矩的探测深度和探测接收的可行性。

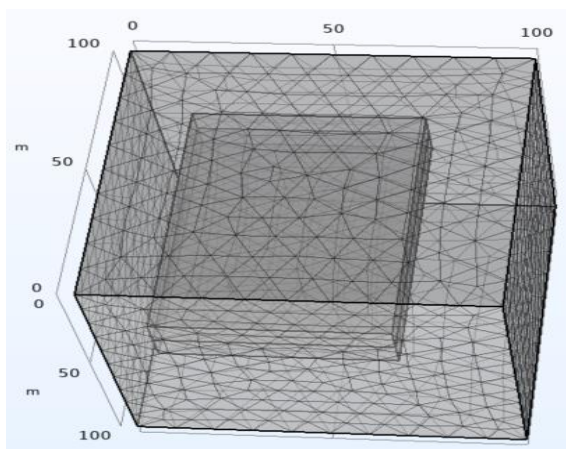


图 2.6 仿真模型网格剖分

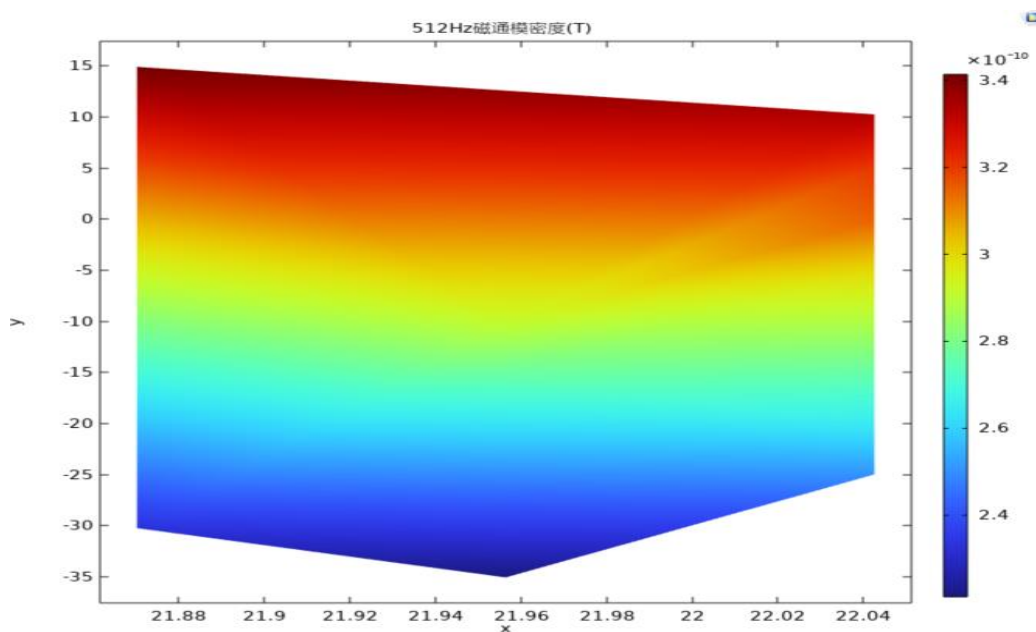


图 2.7 512Hz 频率信号强度图

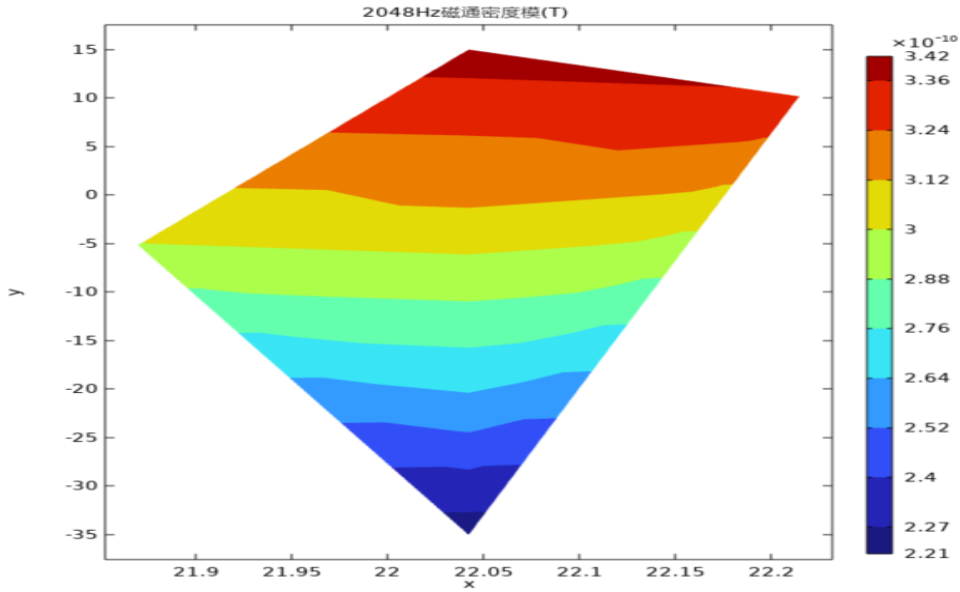


图 2.8 2048Hz 频率信号强度图

2.3 本章小结

因为需要对探测理论和设计基础进行分析,本章主要对频率域电磁探测基本理论和有限元法空间进行仿真分析及验证,设计多频点磁性源发射机参数和验证实测可行性。首先频率域电磁探测基本原理开始,由麦克斯韦方程组出发,得出频率域探测时的应用公式,列举不同物质介电特性,探测时存在的感应变化。介绍了有限元仿真流程和 COMSOL 软件,通过软件建立空间中探测模型,进行频率域电磁发射仿真分析,得出单方向下的磁场穿透结果,为后文的发射机设计提供基础。

第3章 多频点磁性源发射机架构及发射原理

本章建立多频电磁发射机的整体架构并进行功能分析。为了选取磁性源发射机在地下空间探测中更适用的发射信号,本章对常用电磁法发射信号特性进行分析,对比得出 2^n 序列信号波形在频率域电磁探测时具备多个主频点、精度高和分布良好等优点。文中对发射信号的探测深度计算,同时采用高频正弦载波和低频信号结合的方式进行信号发射仿真分析,验证出发射合理性。

3.1 多频点磁性源发射系统架构

通过对频率域电磁法的分析并参考国内外电磁勘探仪器的研究方案,设计出基于伪随机序列的多频点磁性源发射机,能够满足实际中的便捷操作^[65]。发射装置由主控芯片、驱动电路、H桥路及三轴发射线圈等部分组成。图3.1为发射系统总体框图。

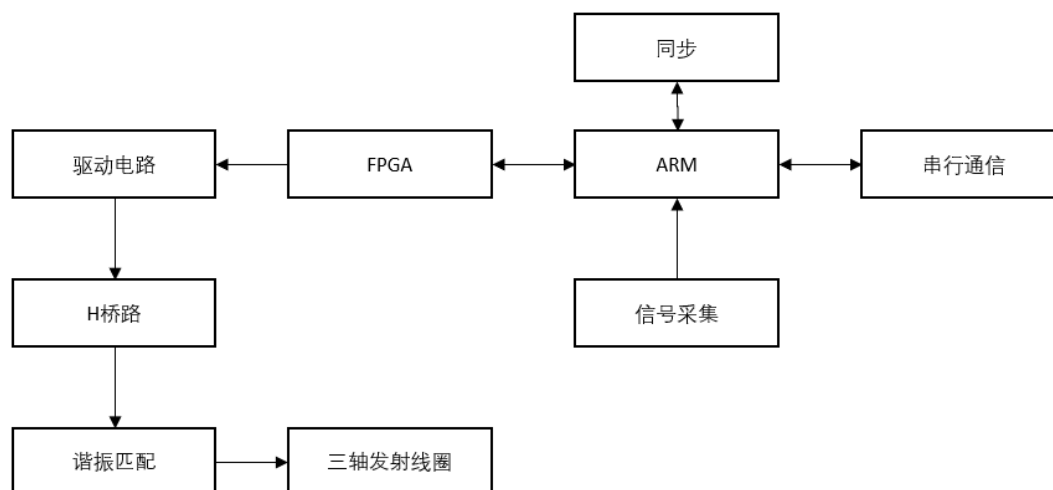


图 3.1 发射系统总体框图

频率域电磁勘探装置由接收和发射装置两部分组成。发射装置通过线圈进行三轴发射,与地下介质进行感应,得到的二次信号经接收机接收,从电磁信号分析出地下信息。电磁信息经接收线圈接收、放大及滤波等过程后,AD芯片和接收主控核心进行信号转化,从而进一步地分析处理。上位机将接收的信号存储至存储卡中,进行处理解释。发射机的发射装置以STM32和FPGA作为主控核心,FPGA通过控制发射时序信号经驱动模块控制桥路发射,利用单片机实现人机交互,完成通信及对同步电路参数进行设置。

3.2 电磁发射装置常用发射信号及特性

传统的频率域电磁法通过单个频率的发射进行单一深度的测量,工作效率较低。而奇次谐波法能够不同频点量在同一地点进行测量,不等精度情况的测量。有着频差固定的相邻电、谐波升高、频点接近等局限性。电磁发射时在基波精度得到供电电流强度的提供保证,谐波的精度得不到保证,大电流情况下的高次谐波精度得到保证,但对基波和其他谐波存在一定浪费,而且也对发射条件提高了更大要求^[66]。当前逐渐应用伪随机序列发射信号用于电磁发射,但特性不同适用的电磁发射方式也不同,需要进行分析。

3.2.1 M 序列

作为周期序列的 M 序列,为最长非线性移位寄存器序列,序列有着 2^n 长度码长,通过 n 级寄存器产生,因为 n 级移位寄存器最大周期为码长缘故,称作全长序列。主要构造方式为通过并圈法和 D-同态法^[67]。

M 序列有着 0 与 1 个数相同、周期 $N=2^n$, 则 2^{n-1} 个游程,且 0 与 1 游程数相同;必须具备移位相加的特性。所以自相关函数是多值函数,没有双值特性^[68]。n 阶状态的情况下每种状态在一个周期当中仅产生一次。因序列的研究和理论应用不太成熟,因此还在探索发展当中,作为非线性结构的 M 序列在色彩信息编码、密码和声学中得到一定应用,但目前还不适用于频率域电磁测深应用当中。

3.2.2 m 序列

m 序列作为典型的伪随机序列,也叫最大长度线性移位寄存器,通过正负电平信号表示。阶数为 n 情况下, m 序列长度为 $N = 2^n - 1$, 自相关特性良好,一个周期当中 0 或 1 次数接近相同, 1 与 0 出现次数变化为 1。在码数越长的情况下相关特性与随机噪声相似,且序列与移位后的序列相加运算,为相移不同的序列。通过线性反馈移位寄存器和数学理论两种主要方式构建序列,长周期随机性强^[69]。图 3.2 为序列原理图。

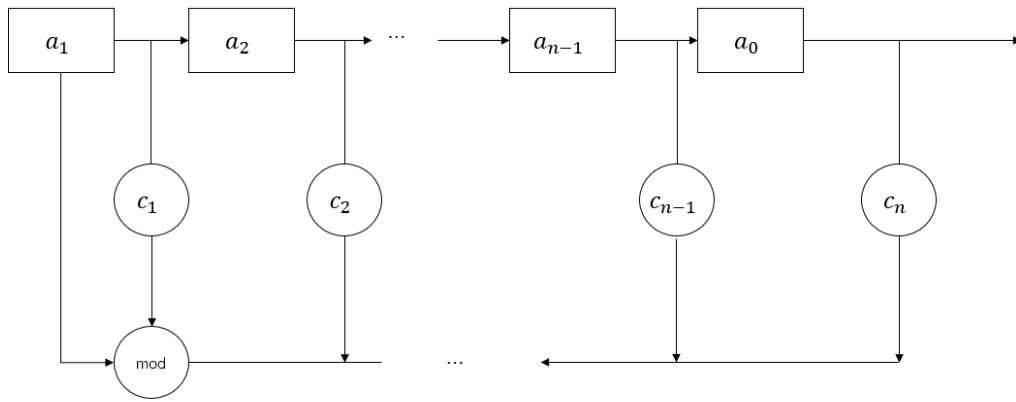


图 3.2 m 序列原理图

反馈线每一级状态值为 0 时，反馈停止，为 1 时参与反馈。递归产生伪随机序列的表达式为：

$$a_n = \left(\sum_{i=1}^n c_i a_i \right) \text{mod}(2) \dots\dots\dots (3.1)$$

其中反馈系数 c_i 为 0 或 1，寄存器状态 a_i ，模 2 运算生成 a_n ，移位时钟输入时，输出为 $2^n - 1$ 信号，组成的本原多项式公式为：

$$f(x) = 1 + \sum_{i=1}^n c_i x^i \dots\dots\dots (3.2)$$

若序列的阶数为 $n = 5$ ，则 $f(x) = 1 + x^3 + x^5$ ，m 序列数状态表达为 1111100110100100001010111011000。若 n 为 11，则 $f(x) = 1 + x^3 + x^8 + x^9 + x^{11}$ “游程”为连续的元素，长 i 游程表示为 $\left(\frac{1}{2^i}\right) * 2^{n-1} (1 \leq i \leq n - 2)$ ，模 2 相加如下表 3.1 所示：

表 3.1 模 2 相加

A	B	$A \oplus B$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

依据移位寄存器得到长信号相对复杂，通过递归则可大大简化，任意 n 初始

状态及反馈级数 k ，公式为：

$$Q_r = Q_{r-k} \oplus Q_{r-n} \dots\dots\dots (3.3)$$

Q_r 表示序列某一信号状态， Q_{r-k} 为从 Q_{r-1} ，倒数 k 为对应状态， Q_{r-n} 为从 Q_{r-1} 开始倒数 n 位状态。递推前已知 n 位状态，第 $n+1$ 位从倒数 n 位状态和倒数 k 位状态模 2 相加。 Q_{n+2} 为 Q_{n+1} 倒数 k 位状态与倒数 n 位对应状态模 2 相加。自相关函数为：

$$R_x(\tau) = \begin{cases} a^2 \left[1 - \frac{|\tau|}{\Delta t} \frac{N+1}{N} \right], & -\Delta t \leq \tau \leq \Delta t \\ -\frac{a^2}{N}, & -|\Delta t| \leq \tau \leq |(N-1)\Delta t| \end{cases} \dots\dots\dots (3.4)$$

其中信号长度 $N = 2^n - 1$ ，信号电平为电平为 $\pm a$ ，周期为 $T = N\Delta t$ ，时钟周期为 Δt 。当自相关函数宽远大于周期长，就可认为有白噪声特性。

5 级 m 序列波形图及信号频谱图通过仿真如图 3.3 和图 3.4 所示，可以看出序列频谱杂乱且均匀分布，类似于白噪声的特性。

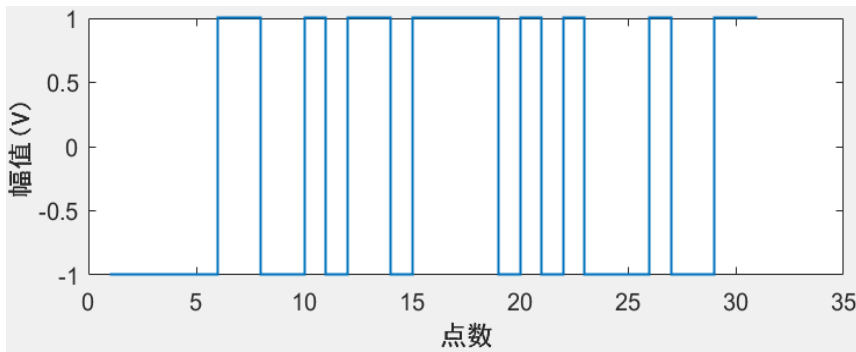


图 3.3 5 阶 m 序列波形仿真

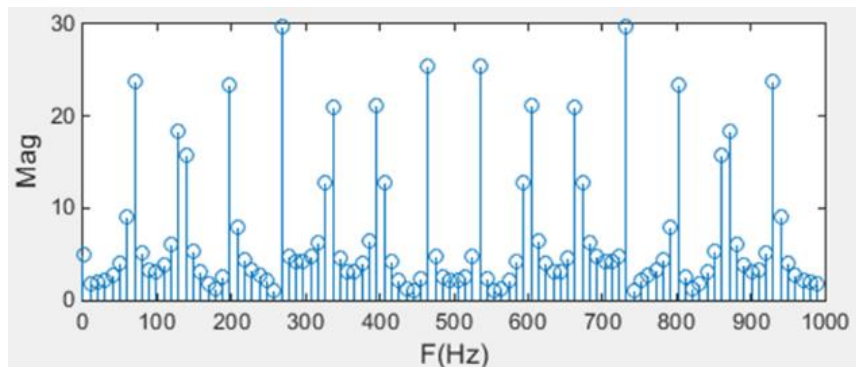


图 3.4 m 序列频谱图

n 级线性移位寄存器存在以下特点：

- 1、初始状态不为全“0”。如果全为 0 的初始状态，输出就为 0；
- 2、移位寄存器确定的情况下，初始状态直接关联输出；
- 3、周期性：输出的寄存器序列有着一定的周期；
- 4、同样级数移位寄存器序列中输出状态直接相连反馈函数选择。

m 序列早年在扩频通信获得了普遍的应用，因其抗干扰性强在电法勘探中取得良好效果，随稳定性及精度需求的增高，正在快速研究发展。但因其特性探测效果一般，在频率域电磁探测不能够良好应用。

3.2.3 Gold 序列

Gold 序列由 R·Gold 提出，通过两个 m 序列处理运算得到。图 3.5 为 Gold 序列生成原理。减少了复杂度及序列数目，但两个序列都是线性序列，因此都有着复杂度低的问题，有时需要复杂度高去选择长序列选段使用或者用 M 序列等非线性序列扩频使用。通过互为优选相同时钟速率以及周期的 m 序列，实际结构为两序列串联或者并联组成^[70]。

如图 3.5 所示设定好两 m 序列初始状态，根据时钟控制条件下的两 m 序列进行模二和得出 Gold 序列，一个 Gold 序列为改变两个序列的相对位移得到，加上总共 $2^n + 1$ 个 m 序列，得出完整一族 Gold 序列，每族序列周期与 m 序列相同为 $2^n - 1$ 。虽然为 m 序列组合产生，但是 Gold 序列不为 m 序列且有着一定的性能差异，相对位移比特在 0 的情况下两种序列自相关特性相同，非 0 情况下是不同的情况。不同族 Gold 序列峰值较大且无规则的多值，理论结果不统一^[71]。

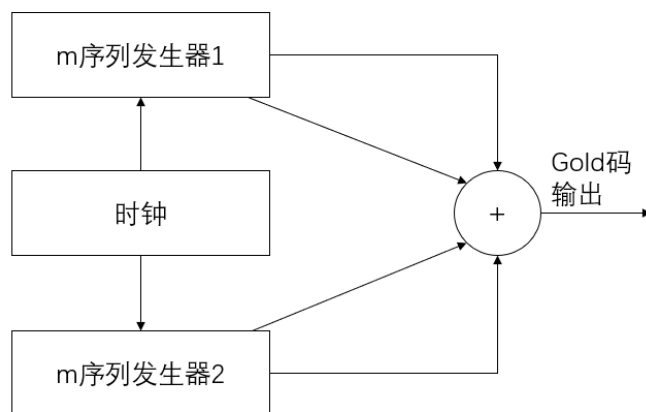


图 3.5 Gold 码输出原理

虽然序列有着接近白噪声的序列特性，但是平衡特性十分重要。通常用正负电平表示序列，平衡状态下正负电平大体相同，在信号发送中体现为提高系统性能和良好频谱特性，但是也有着抗干扰弱的缺点，实际系统中的需求得不到满足，理论结果还未统一，实际应用有许多限制。

3.2.4 逆重复 m 序列

通过 m 序列隔位取逆即可得到逆重复 m 序列，也叫 L 序列。能够克服直流成分和 m 序列在系统辨识中“净扰动”缺陷。通过 2n 位 m 序列与正负相交方波模 2 相加产生，较容易生成。逆重复 m 序列有着与原来的 m 序列互不相关、周期为原来序列的 2 倍、前后两部分互相逆对称、两电平出现次数相同四个特性，由其性质可以得出逆重复的含义。因其特性序列适用于抑制系统辨识的情况下直流漂移的影响^[72,73]。根据其特性知在频率域电磁探测当中，不能够实现多层探测效果。其中自相关式为：

$$R_{xx}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i x_{i+k} = \begin{cases} a^2 & k = 0(\text{模}2N) \\ a^2 & k = N\Delta(\text{模}2N) \\ -\frac{a^2}{N} & k = \pm\Delta, \pm3\Delta, \dots(\text{模}2N) \dots\dots\dots (3.5) \\ \frac{a^2}{N} & k = \pm2\Delta, \pm4\Delta, \dots(\text{模}2N) \end{cases}$$

3.2.5 2ⁿ序列

2ⁿ序列伪随机由中南大学何继善提出和命名，在频率域研究中广泛应用，编码三元素集合中自封闭加法。三码元表示不同频率下的激励。随着 n 的变化频谱也在相应改变，序列的带宽可以控制，能量集中于等间距频率中，应用于频率域电磁法勘探当中，一次测量可以得到众多信息，抗干扰强，频点分布按照二进制。2ⁿ序列有着 A 与 -A 两元素相间不定出现的随机性，概率相同出现，有规律和周期的性质。波形有通过调整过零点与时刻，增加可用频点，频率在 2^kf(k = 0, 1, ..., n - 1)幅值较高频点，基频为 f。n 值的不同决定了时频特性，n 频点能量基本相同，集中在这些频点的能量远多于谐波的能量。多频融合波形的伪随机序列可以多频发射，效率高，同一条件即可测得，有较高的电源利用率，频率值在坐标上均匀分布。一般称 n 为 5 的 2ⁿ序列为伪随机序列 5 频波，n 为 7 的 2ⁿ序列为伪随机序列 7 频波，以此规律推至其它^[74,75]。

序列的状态值。看似没有规律的伪随机序列实际是按照对应周期符合规律的编码。移位寄存器每一级当中有两种状态，代表逻辑含义的 0、1，包含两元素二元集重新制定模 2 运算的运算规则。为了自封性的保持，须对此时的相加逻辑为 0 或 1 作出规定。

分析以上公式及状态，n 频伪随机序列有着以下规律：

- 1、 f_{n-2} 组成 f_n 第二个 $\frac{1}{4}$ 周期；
- 2、 f_{n-2} 第一个 $\frac{1}{2}$ 组成 f_n 第二个 $\frac{1}{8}$ 周期；
- 3、 f_{n-2} 第一个 $\frac{1}{4}$ 组成 f_n 第二个 $\frac{1}{16}$ 周期；
- 4、 f_n 前两位元素是 $2^{\frac{n+1}{2}} - 1$ 和-1，以此规律类推可得其他情况及信号分解的状态。

2^n 序列的频率谱分析，傅里叶分析原理得出，在 T 上周期函数满足狄利克雷条件根据傅里叶级数展开。从上述可知 $f(2^n, t)$ 为奇函数，且有有限间断点，满足条件。函数展开得出以下傅里叶级数：

$$f_T(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t) \dots\dots\dots (3.11)$$

$f_T(t)$ 的圆频率 ω 为 $\frac{2\pi}{T}$ ，而每个频率成分 a_0 、 a_k 、 b_k 傅里叶级数为：

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f_T(t) dt \dots\dots\dots (3.12)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f_T(t) \cos k\omega t dt \dots\dots\dots (3.13)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f_T(t) \sin k\omega t dt \dots\dots\dots (3.14)$$

函数是奇函数，所以通过上述公式可以得到 a_0 、 a_k 值为 0。将上述 $f(2^n, t)$ 代入 $f_T(t)$ 可以得出：

$$b(2^n, k) = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(2^n, t) \sin k\omega t dt \dots\dots\dots (3.15)$$

简化得到：

$$b(2^n, k) = \frac{2A}{k\pi} \left\{ 1 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{m}{2}-1} \left[(-1)^i \cos\left(\frac{1_i}{2^{n-1}} k\right) \right] + \cos(k\pi) \right\} \dots\dots\dots (3.16)$$

其中，m 为伪随机序列波形于单周期中的间断点数， $1_i/2^{n-1}$ 为 i 个间断点位置。就可得到伪随机序列傅里叶级数的表达式：

$$f(2^n, k) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2A}{k\pi} \left\{ 1 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{m}{2}-1} \left[(-1)^i \cos\left(\frac{1_i}{2^{n-1}} k\right) \right] + \cos(k\pi) \right\} \sin k\omega t \dots\dots\dots (3.17)$$

根据公式及原理计算得 2^n 伪随机序列不同频振幅，振幅表如 3.2:

表 3.2 不同频伪随机序列振幅

n	3	4	5	6	7
k=1	0.9003	0.5881	0.6317	0.4738	0.4776
k=2	0.6366	0.5436	0.5881	0.4665	0.4738
k=4	0.6366	0.4777	0.5434	0.4532	0.4665
k=8		0.4777	0.4775	0.4038	0.4532
k=16			0.4775	0.3979	0.4308
k=32				0.3979	0.3979
k=64					0.3979

根据计算公式，代入可得到 2^n 伪随机 3 频波、5 频波、7 频波傅里叶系数：

$$b(2^3, k) = \frac{2A}{k\pi} \left(1 - 2 \cos \frac{3k\pi}{4} + \cos k\pi \right) \dots\dots\dots (3.18)$$

$$b(2^5, k) = \frac{2A}{k\pi} \left[1 - 2 \left(\cos \frac{7k\pi}{16} - \cos \frac{8k\pi}{16} + \cos \frac{11k\pi}{16} - \cos \frac{12k\pi}{16} + \cos \frac{13k\pi}{16} \right) + \cos k\pi \right] \dots\dots\dots (3.19)$$

$$b(2^7, k) = \frac{2A}{k\pi} \left[2 \left(\cos \frac{15k\pi}{64} - \cos \frac{k\pi}{4} + \cos \frac{23k\pi}{64} - \cos \frac{3k\pi}{64} + \cos \frac{27k\pi}{64} - \cos \frac{7k\pi}{16} + \cos \frac{29k\pi}{64} - \cos \frac{k\pi}{2} + \cos \frac{39k\pi}{64} - \cos \frac{5k\pi}{64} + \cos \frac{43k\pi}{64} - \cos \frac{11k\pi}{16} + \cos \frac{45k\pi}{64} - \cos \frac{3k\pi}{64} + \cos \frac{51k\pi}{64} - \cos \frac{13k\pi}{16} + \cos \frac{53k\pi}{64} - \cos \frac{7k\pi}{8} + \cos \frac{57k\pi}{64} \right) + \cos k\pi + 1 \right] \dots\dots\dots (3.20)$$

在设计时采用的5频伪随机波,代入公式进行频谱分析,结果如图3.6所示:

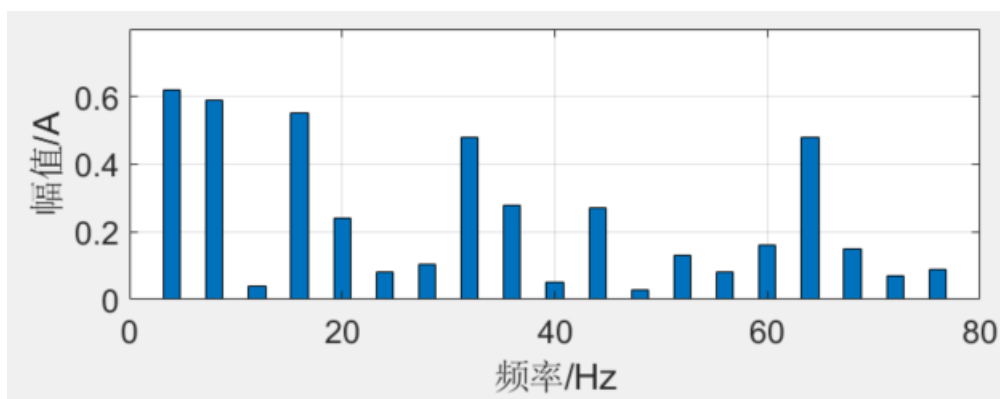


图 3.6 5 频伪随机序列频谱图

在微处理器或可编程逻辑器件上根据上述规律可以较易实现逻辑发射,作为相邻主频频比固定,在不同时钟激励条件下得到需要的伪随机序列。发射时选用 Altera 的 FPGA 芯片 EP4CE10E22C8N 为发射主体,通过对应集成软件和 Verilog HDL 硬件描述语言实现发射。在发射时的逻辑实现思想为:以 2^n 伪随机序列为基础构建二进制序列,使用 Verilog HDL 状态机生成所需要的逻辑信号,通过时钟分频状态机得出伪随机 2^n 伪随机 5 频波。具体来说,根据上述表达式以每一位状态值据 1 和 0 代表导通与关断进行编码,此时 5 频波为 32 个状态,长度 32 位,状态机根据式中激励完成转换,编码产生。

3.3 发射机工作波形的选择

早期频率域电磁法大多采用方波或者类方波以及特殊伪随机序列当作发射信号,方波容易发射大功率信号且没有绝对值的变化。近些年逐渐应用到良好抗干扰特性的伪随机序列作为电磁发射信号。其中 2^n 伪随机序列发明后,相比方波不仅带宽可控,还容易进行大功率发送,实际发射当中控制带宽从而改变测量方式,提升了探测的效率。通过上述章节的各伪随机序列特性分析, 2^n 伪随机序列能够更良好的应用在频率域电磁勘探领域当中。对 2^n 伪随机信号频谱分析等,可以得出 2^n 序列作发射机发射波形的优点为:

①有着较高的观测精度。因为各主频振幅相差不大,测量状态在同等精度下,因此有效提高观测精度。

②有着高效的观测效率: 2^n 伪随机信号可以一次性发射包含多主频点的信号

得出 n 个频点的数据信息, 得出不同深度的地质信息, 减少了操作, 工作效率得到了提高。

③能量集中分布在主频点上。伪随机序列几个主频点能量集中且能量相近, 提高电源效率。

④分布良好。通过分析可以得出伪随机序列主频以 2^n 步进, 可得对数坐标上各个频率均匀分布, 实际电磁法勘探中有重要作用。

⑤易于实现相位测量。由于各个主频点一致的起始相位, 所以在复电阻率法、激电法等当中较为简便测量相位。

⑥信息充足, 可以实现多状况下的探测。场源采用 2^n 伪随机序列, 应用可控源音频大地电磁法、多频激电法等多种理论方法中, 进行相位、振幅数据测量, 通过结果计算得视电阻率、相位信息等参数, 可以应用于不同条件下的电磁勘探, 满足需要。

3.4 发射机多频发射分析及仿真

根据上文分析对电磁发射中常用的发射信号分析, 选用 2^n 伪随机序列作为频率域电磁发射的信号。在 2^n 伪随机发射信号的应用中, 因为采用磁性源方式进行电磁发射, 需要应用载波在信号当中, 通过将伪随机序列和基频信号进行融合控制开关器件通断, 能量经线圈进行发射。实际野外探测环境当中经历反射、感应及滤波, 即可得出多频发射信号进行探测的情况。

为保证发射可靠性, 对方法进行可行性验证, 采用的方法为: 首先对五个设定的频率信号 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 与高频载波进行融合发射, 得出的信号再使用低通滤波方式代替大地的高频滤波作用, 从而得到对应接收信号信息, 从而为野外环境中的地下勘探作基础。为了分析方便, 仿真采用正弦波作发射波形。根据所述发射信号的融合, 采用 Labview 进行发射信号的仿真分析, 得出发射时的信号, 进行信号比对, 同时进行滤波处理, 以证明出信号发射的良好效果和状态。其中设计采用的 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 分别为 512Hz、1024Hz、2048Hz、4096Hz、8192Hz 下的正弦信号, 结合 204.8kHz 的正弦波相加模拟实测发射时的信号波形, 因为采用信号相乘的方式, 所以存在着滤波前后波形幅值的差异。通过融合信号和滤波图形分析证明应用的可行性和可靠性, 融合波形和所接收的波形如图 3.7 和图

3.8 所示。采用与正弦仿真同样的方式使用方波进行仿真，融合波形和滤波后波形如图 3.9 所示。

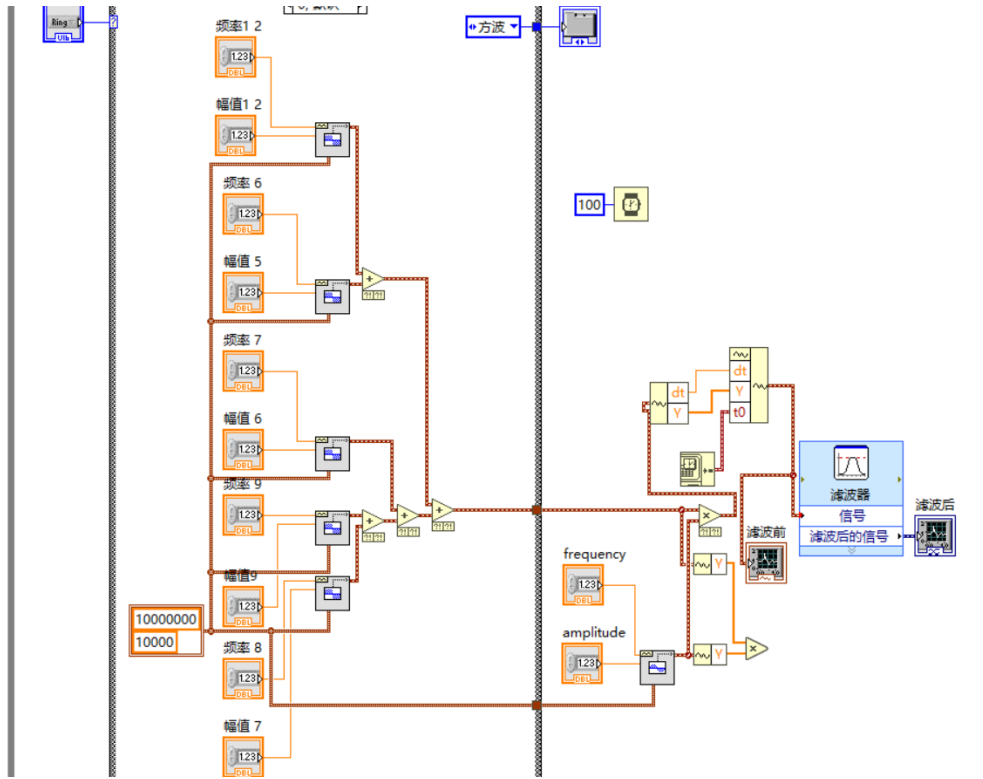


图 3.7 Labview 程序框图

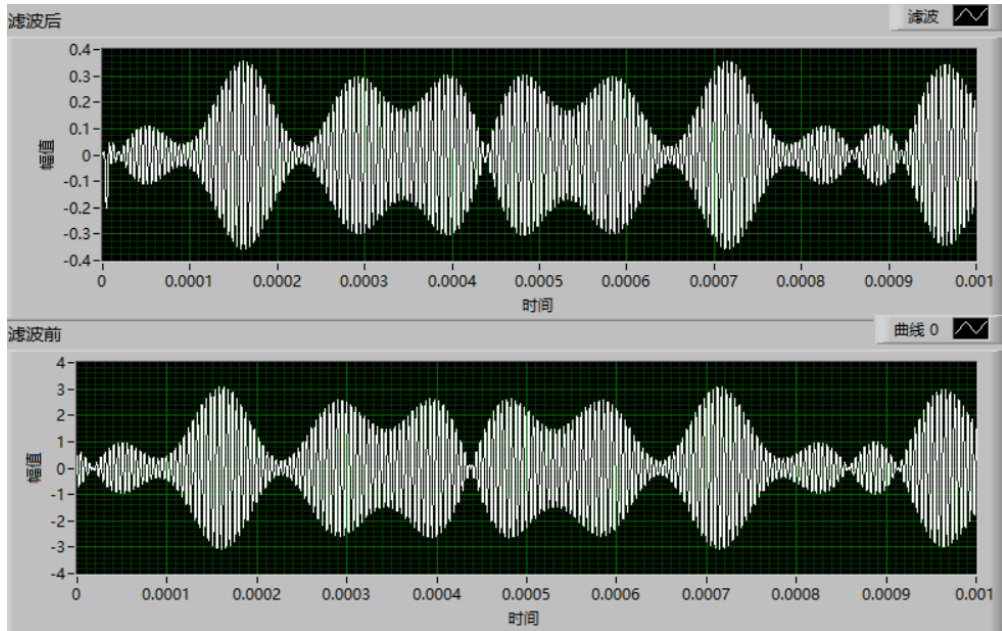


图 3.8 测试前后波形对比

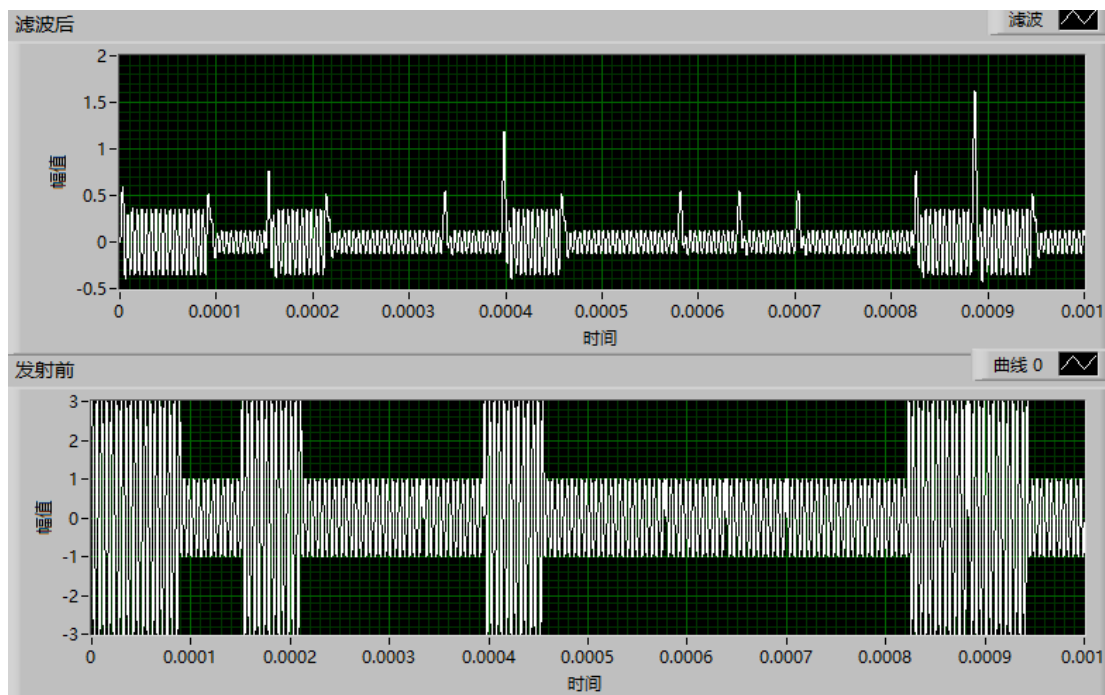


图 3.9 方波融合测试仿真图

通过对正弦和方波信号的设计频率仿真，得出模拟大地探测时发射。滤波前后也代表着能够发射出去的信号和进行探测的频率信号。在进行探测时信号经高频载波至环境当中，能够得到良好的保持，满足实际探测时的需求。因此对多频点磁性源机发射时的信号传播问题得到了验证，说明出能够可靠发射。

3.5 多频发射信号趋肤深度分析

根据上文分析系统采用的 2^n 伪随机五频波有着五个频点，从频率域电磁法探测理论得出，各个频点分别能达到不同深度，根据第2章所分析的趋肤深度公式，频率越低的情况下有着更深的勘探深度，设定 $\mu = 4\pi \times 10^{-7} H/m$, $\sigma = 0.01 S/m$ 时，代入公式，从而获取得到各个频率的趋肤深度表 3.3 及探测深度示意图 3.10, 2^n 伪随机序列频点均匀分布，探测的深度在发射机设计的频率为 512Hz, 从而在频点上以近乎 50m 的分层探测，表 3.3 中体现出伪随机序列进行发射时，不仅可以探得多个均匀分布的地层信息，且能量集中在这些主频点上，效率得到了极大的提高。

本节针对单个频率发射时的人力和物力成本提高，对采用的伪随机信号计算发射时的探测深度，从而分析出以 2 为倍频的频点信号探测深度，因此以 2^n 序列为发射信号满足发射机设计的多层探测的要求。

表 3.3 不同频率下趋肤深度

频率 (Hz)	趋肤深度 (m)	频率 (Hz)	趋肤深度 (m)
1	5030	64	1258
2	3557	128	1220
4	2515	256	1154
8	1778	512	1098
16	1395	1024	1049
32	1299	2048	889

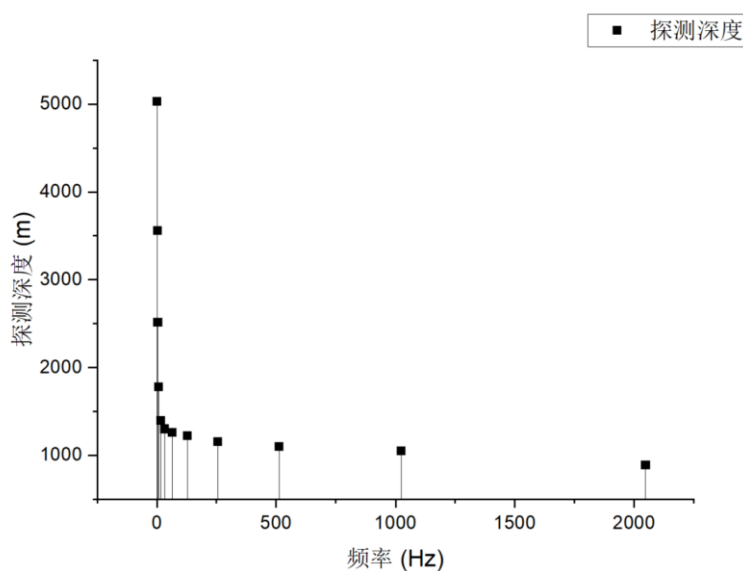


图 3.10 探测深度示意图

3.6 本章小结

在本章进行常用电磁发射信号分析和系统架构的搭建。首先对系统的整体架构进行搭建，分析实现情况。因为当前频率域电磁发射多采用单频发射造成资源浪费以及成本增加，逐渐应用出伪随机序列。本章对有着良好抗干扰及发射的伪随机序列特性进行分析应用。发射机选择 2^n 序列作为实际发射的波形，可一次发射有多个频点，效率高，应用性强。由于发射系统通过高频载波进行发射，采用正弦波方式进行多频信号发射仿真，得出发射前后信号波形，证明出发射的实用性与可靠性。同时对伪随机发射进行趋肤深度分析，探测深度分布均匀，多层探测。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/527104012102006044>