

## 摘要

无线电能传输（Wireless Power Transfer, WPT）作为一种新型的供电方式，摆脱了传统供电方式的束缚，应用更加便捷，具有广阔的市场前景。WPT 系统因漏磁会对周围空间产生电磁辐射，造成环境电磁污染。因此，有必要通过有效的电磁环境评估方法和合理的电磁屏蔽措施来提升 WPT 系统电磁环境的安全性。

从 WPT 系统的传输原理出发，基于电路理论建立了 S-S 型 WPT 系统的等效电路模型，在此基础上推导了磁感应强度和系统工作参数的函数关系。分析无源屏蔽技术和有源屏蔽技术的屏蔽机理，为电磁屏蔽措施的选择提供理论依据。同时根据实际情况确定电磁环境评估的参考标准与测量方式。

为提升电磁环境评估的灵活性，首先基于笛卡尔坐标系下的子域分析技术，建立考虑电磁屏蔽介质的二维子域模型。其次，结合各子区域的边界条件求解矢量磁位方程中存在的未知系数。在此基础上，将补偿函数引入到二维子域解析模型当中，并根据磁场的叠加原理得到含电磁屏蔽介质耦合机构三维解析模型。为了提升模型的计算成本，基于 Biot-Savart 定律对有源屏蔽线圈部分的模型进行优化，优化后模型的计算时间减少了 17.8%。最后，基于有限元分析法对模型的准确性进行了仿真验证，结果表明线圈不同工况下的模型计算值和有限元仿真值之间的相对误差均小于 3%，验证了本文所推导模型的有效性。

基于所建立的含屏蔽介质耦合机构三维解析模型，研究了无源屏蔽介质和有源屏蔽线圈对 WPT 系统电磁环境的影响，采用有限元法分析了不同电磁屏蔽介质对空间磁场分布的影响。在此基础上，搭建了用于电磁环境评估的 WPT 系统实验平台，揭示了线圈偏移和传输距离等不同工况对磁感应强度的影响规律，为进一步开展 WPT 系统电磁环境评估及优化提供了理论依据。

**关键词：**无线电能传输；解析模型；电磁屏蔽；电磁环境评估

## Abstract

Wireless Power Transfer (WPT), as a new type of power supply, has a broad market prospect as it is free from the traditional power supply methods and has more convenient applications. Due to magnetic flux leakage, the WPT system will produce electromagnetic radiation to the surrounding space and cause environmental electromagnetic pollution. Therefore, it is necessary to enhance the safety of the electromagnetic environment of the WPT system through effective electromagnetic environment assessment methods and reasonable electromagnetic shielding measures.

From the transmission principle of the WPT system, the equivalence circuit model of the S-S type WPT system is used to derive the function relationship between the magnetic flux density and the system operating parameters. Based on the electromagnetic shielding mechanism, the influence of passive shielding medium and active shielding coil on the electromagnetic environment of the system is analyzed. In addition, according to the actual working conditions of the system, this paper expounds on the electromagnetic environment assessment standards and measurement methods.

To enhance the flexibility of electromagnetic environment assessment, a two-dimensional sub-domain model considering electromagnetic shielding medium is established based on the sub-domain analysis technique under the Cartesian coordinate system. Secondly, the unknown coefficients existing in the magnetic vector potential equation are solved by combining the boundary conditions of each subdomain. On this basis, the compensation function is introduced into the two-dimensional subdomain analytical model, and then the three-dimensional (3D) analytical model of the coupling mechanism with electromagnetic shielding medium is obtained. In order to increase the calculation cost of the model, the model of the active shielding coil is optimized based on Biot Savart law, and the calculation time of the optimized model is reduced by 17.8%. Finally, the accuracy of the model is verified by simulation based on the finite element analysis method. The results show that the relative error between the model calculation value and the simulation value under different working conditions of the coil is less than 3%, which verifies the effectiveness of the model deduced in this paper.

Based on the 3D analytical model of the coupling mechanism with shielding medium, the effects of passive shielding medium and active shielding coil on the electromagnetic environment of the WPT system are studied, and the effects of

different electromagnetic shielding media on the spatial magnetic field distribution are analyzed by finite element method. On this basis, the WPT system experimental platform for electromagnetic environment assessment is built, and the influence laws of different working conditions such as coil misalignment and transmission distance on magnetic flux density are revealed, which provides a theoretical basis for further electromagnetic environment assessment and optimization of WPT system.

**Keywords:** Wireless power transfer; Analytical model; Electromagnetic shielding; Electromagnetic environment assessment

# 目录

摘要 .....	I
<b>Abstract</b> .....	II
目录 .....	IV
<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 研究意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.2.1 WPT 系统电磁环境评估的研究现状 .....	2
1.2.2 WPT 系统电磁屏蔽的研究现状 .....	6
1.3 论文主要研究内容 .....	8
1.4 本章小结 .....	10
<b>第 2 章 WPT 系统电磁屏蔽机理及评估方法</b> .....	11
2.1 引言 .....	11
2.2 WPT 系统传输原理 .....	11
2.3 电磁屏蔽机理与措施 .....	14
2.3.1 无源屏蔽 .....	14
2.3.2 有源屏蔽 .....	15
2.4 电磁环境评估标准和测量方法 .....	17
2.4.1 电磁环境评估标准 .....	17
2.4.2 电磁环境测量方法 .....	18
2.5 耦合机构对电磁环境的影响 .....	18
2.6 本章小结 .....	19
<b>第 3 章 含屏蔽介质耦合机构三维解析模型</b> .....	21
3.1 引言 .....	21
3.2 含屏蔽介质的耦合机构 .....	21
3.3 耦合机构三维解析模型 .....	22
3.3.1 耦合机构二维子域模型 .....	22
3.3.2 边界条件 .....	27
3.3.3 二维子域模型的补偿函数 .....	28
3.3.4 三维解析模型的建立 .....	30
3.4 有源屏蔽线圈模型优化 .....	31
3.5 三维解析模型验证 .....	34
3.6 本章小结 .....	35

---

第 4 章 WPT 系统电磁环境评估.....	36
4.1 引言.....	36
4.2 电磁屏蔽措施对电磁环境的影响.....	36
4.2.1 无源屏蔽介质.....	37
4.2.2 有源屏蔽线圈.....	39
4.3 耦合机构工况对电磁环境的影响.....	42
4.3.1 耦合机构偏移.....	43
4.3.2 传输距离.....	44
4.4 本章小结.....	45
第 5 章 总结与展望.....	46
5.1 总结.....	46
5.2 展望.....	46
参考文献.....	48
致谢.....	53
攻读硕士学位期间发表的学术论文及参与的科研项目.....	54
一、攻读硕士学位期间发表的学术论文.....	54
二、攻读硕士学位期间参与的科研项目.....	54

# 第 1 章 绪论

## 1.1 研究意义

随着科技的日新月异,电力能源凭借经济、容易控制等优点已经渗透到日常的生产、生活中<sup>[1-2]</sup>。以电能为基础的有线充电方式,在能量传输的过程中存在线路老化、漏电等问题,给电力设施的日常的运行和维护带来了挑战<sup>[3-4]</sup>。时至今日,WPT 系统已然成为规避上述问题的有效方法。该技术借助物理空间内电磁场的传播特性将能量通过电磁耦合机构传输给用电负载,凭借其便捷、智能的特点<sup>[5-7]</sup>,推动了电动汽车<sup>[8-10]</sup>、智能家居<sup>[11-12]</sup>、医疗器械<sup>[13-15]</sup>、工业生产<sup>[16-17]</sup>等领域无线充电化的进程,其市场潜力不可小觑。

美国科学家 Nikola Tesla 在 1891 年成功将电能以电磁波的形式传输到目标电气设备中<sup>[18]</sup>,初步探索了无线电能传输这一未知领域。随着无线电能传输实验的成功,WPT 技术应运而生,该技术的出现对现有的充电模型产生了革命性的影响,开启了各国科研人员在无线电能传输领域研究的新篇章<sup>[19-20]</sup>。1995 年,奥克兰大学的 Boys 教授所带领的团队以电动汽车为研究背景,成功将 WPT 技术引入大功率的应用场景,向世人展现了无线电能传输技术卓越的市场前景<sup>[21-22]</sup>。2007 年,MIT 的 Marin Soljatic 教授所在课题组基于电磁共振的原理<sup>[23]</sup>,首次完成了远距离的无线电能传输,将耦合机构间的传输距离提升到了米级,摆脱了近场能量传输的局限性,为 WPT 技术的提供了全新的研究方向。



图 1-1 电动汽车无线充电技术

WPT 技术凭借彰显出来的科研潜力<sup>[24]</sup>被《MIT Technology Review》杂志认定为是“未来十大新兴科技”之一。2011 年,以三星公司为代表的手机厂商在市场上推出使用的无线电能传输技术的手机。海尔、美的等制造企业也尝试将无线电能传输技术

与家电、数码等电子设备相结合,推动了无线充电技术市场化的进程。特斯拉、宝马、奔驰等传统汽车厂商也相继推出自家的无线充电电动汽车,争相抢占市场份额,如图 1-1 所示。2017 年,美国高通公司为了弥补电动汽车续航不足的局限性,铺设一条布满耦合线圈的行驶路径,为行驶过程中的电动汽车提供持续供电,基于动态 WPT 技术能够弥补电动汽车续航不足的局限性,有效的延长了电动汽车的行驶里程<sup>[25]</sup>。WPT 技术的发展也受到了各国的青睐,随着物联网的兴起,轨道交通也在探寻与无线电能传输技术的合作契机,以此来丰富万物互联的网络体系,其中致力于电力系统电力安全的无线电能传输智能巡检机器人和智能可穿戴巡检设备等项目的落实<sup>[26]</sup>,体现出 WPT 技术广阔的市场需求与发展前景,但在此之前,其电磁环境的安全性问题还需要进一步研究。

无线电能传输是一种利用电磁场的传播特性将能量通过电磁耦合机构传输给用电负载的一种新型供电方式,在进行能量传输的过程中,以高频电磁场作为 WPT 系统的传能介质,不可避免的会产生影响生物安全的电磁辐射。现有的研究表明,当生物体长时间暴露于电磁环境中,电磁辐射会对其身体机能造成严重的影响<sup>[27]</sup>,除此之外,电磁环境中的敏感设备同样也会受到杂乱电磁场的干扰。因此,电磁环境潜在的问题已然成为无线电能传输技术商业化进程中亟待解决的难点。为了构建电磁和谐的 WPT 系统,国内外研究学者主要从 WPT 系统的电磁环境评估方法以及电磁屏蔽措施两个方面进行相关的研究。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 WPT 系统电磁环境评估的研究现状

根据 WPT 系统的传输特性可知,导致 WPT 系统电磁环境出现安全性问题的原因之一是原边、副边耦合线圈利用交变磁场进行双边的能量传输,在此过程中,系统环境中伴随着较强的磁场分布,由于接收线圈与发射线圈之间存在气隙,从而导致 WPT 系统主耦合区域的磁场泄露到周围的环境中造成电磁干扰。尤其当该技术应用于电动汽车、轨道交通等大功率应用场景,以及长时间与人体近距离接触的消费电子产品时,会对周围的人体、其它生物以及敏感电气设备造成电磁干扰。因此,对 WPT 系统开展电磁环境评估研究是该技术走向产业化的必要前提。有效的电磁环境评估方法,能够及时的获取 WPT 系统中的电磁分布和性能参数,有助于消除人们对 WPT 产品的电磁安全顾虑。目前 WPT 系统的电磁环境评估主要借助于电磁仪器测量和电磁建模分析等方法。本文将从有限元仿真、数学模型以及电磁仪器三个方面分析耦合磁场的干扰机理、干扰现象以及有效的电磁屏蔽措施,从而指导 WPT 系统电磁环境的安全性设计。

通过电磁仪器对 WPT 系统进行电磁环境评估是无线电能传输类产品投入市场前不可或缺的一道工序<sup>[29-31]</sup>。市面上的电磁测量仪器的品牌繁多,使用最为广泛的有 Norde、Keysight、Aaronia 等品牌。文献[32]采用传统的电磁检测仪对无线电能传输产品供电过程中所发出的杂散磁场进行测量,以评估 WPT 系统运行过程中技术人员的安全性,当在线圈两侧增添了屏蔽层后,系统的电场和磁场数值均控制在暴露限值的范围内,受到测量环境的限值,未实现全方位以及大功率电磁环境下的电磁评估。传统的电磁检测仪能够精确检测相关频域内的场强,但大多价格昂贵且不是专用于无线电能传输系统场强的测量,对于设备的测量环境以及测量方式均存在一定要求。为此,国内外研究团队针对适用于无线电能传输系统的电磁检测仪进行了探究。天津工业大学张献教授团队搭建了 WPT 系统三维磁场测量系统,利用该装置分析了无屏蔽和金属屏蔽材料对耦合线圈周围电磁环境的影响,并完整的绘制出了 WPT 系统的空间磁场的分布情况,所测得的磁场与有限元仿真相比,仅存在较小的偏差<sup>[33]</sup>。尽管电磁仪器能够实时的反映线圈电磁场的分布情况,但存在极大的局限性。譬如,电磁仪器测量无法为 WPT 系统线圈的预先设计、屏蔽措施的选择提供理论指导,并且受测量环境限制较为严重。

电磁环境建模法在一定程度上可以弥补仪器测量法的不足,传统的电磁环境建模法可分为有限元分析法和解析计算法。有限元分析法是目前应用较为主流的电磁评估方法之一,主要是借助有限元(Finite-Element Method, FEM)仿真软件,根据 WPT 系统的特征参数合理的设计耦合机构和边界条件,辅助性地完成 WPT 系统的电磁环境评估。文献[34]通过 FEM 仿真结合相关电磁评估指标对人体模型在电磁环境中不同位置的比吸收率(Specific Absorption Rate, SAR)进行了安全性评估,并进一步探究了电磁环境中对人体内部结构的影响。文献[35]开发出一种考虑不同材料特性的全波多解算器,将该应用集成到 FEM 仿真软件中,不但传承了 FEM 仿真软件能够量化分析的优点还使 WPT 系统的解析过程更加高效和精确。文献[36]利用 FEM 软件构建三个不同的人体模型和一个全尺寸的电动汽车模型,模拟实际运行过程中电动汽车的电磁环境,评估过程中考虑了成人模型在三种暴露场景下所受到的电磁辐射,提出了可行性的措施来保护人体免受 WPT 系统电磁辐射的危害。

在实际的应用过程中,有限元分析法与解析计算法往往是相辅相成的。解析计算法主要以电磁理论为基础,来构建磁场的解析计算模型。文献[37]对现有的 WPT 系统电磁环境的评估方法进行了阐述。矩量法(Method of Moments, MOM)是一种将积分、微分方程转化为代数方程的数值计算方法,由于其能够对边缘效应、复杂传输介质精确建模的特点,被广泛应用于电磁场领域的计算。文献[38]采用传统的 MOM 探究耦合机构的输入阻抗、输入电流和系统效率等系统参数的内在联系,同时改变无线电能传输系统的谐振频率探究不同频率点对无线电能传输系统电磁环境的影响,以



线圈结构为变量探究了常见的两种不同线圈机构的鲁棒性，通过实验进一步探究了线圈结构对空间电磁分布情况，并对处于电磁环境中生物体的电磁安全进行了评估。

Yee 网格空间离散方式现如今已成为电磁兼容领域最重要的数值算法之一，又称为 FDTD 法。以 WPT 系统电磁场求解为例，FDTD 法基于 Maxwell 旋度方程组完成 WPT 系统电磁场的解析，该方法突出的优点在于能够精准的描述电场在不同环境下的传播特性，能够有效的模拟不同的电磁环境，对 WPT 系统不同线圈几何结构、参数以及传输介质的电场的求解具有普适性。Andreas Christ 团队采用 MOM 法与 FDTD 法相结合的方法将四种不同人体结构的解剖模型在不同线圈结构电磁环境中，对人体模型的 SAR 水平参数进行电磁干扰分析，通过 FDTD 模拟复杂的人体组织结构并根据 SAR 来评估人体在电磁环境中的安全阈值<sup>[34]</sup>，实验结果表明相同电磁环境中不同的人体模型中磁场的 SAR 值存在较大差异，为评估无线电能传输系统人体电磁暴露限值的科学性提供了理论依据。然而与有限元分析法相似，FDTD 法会随着线圈、屏蔽层尺寸的增加其解析时间也会大幅度的增加。为了优化电磁解析算法的时间成本，文献[39]基于传统的 FDTD 算法进行改良，利用 WPT 系统磁场的等效原理解析出电磁耦合线圈传能过程中产生的非均匀磁场，再利用准静态 FDTD 法推导该电磁环境下人体模型的 SAR，该方法成功优化了三维磁场的解析时间，极大的优化了磁场的解析成本。

与 MOM 或 FDTD 法相比准静态法节约了磁场的计算成本，当 WPT 系统的工作频率点保持在低频段(MHz)以内时，由于可以忽略空气区域的影响，极大的减少了建模的工作量。准静态法实际是一种近似估算的解析方法，在分析过程中不考虑位移电流以及生物体模型对源磁场分布的干扰，该方法通过需要借助 MOM 法、FEM 等解析方法求得磁场源的场分布，再对处于电磁环境中人体的比吸收率进行计算。由于准静态两步法在低频段解析时间的优势，不少学者利用准静态两步法对 WPT 系统的电磁环境进行初始评估。文献[40]基于准静态两步法对 WPT 系统周围的电磁场进行计算，并对同时考虑电场与磁场的时域有限差分法以及仅考虑磁场的阻抗法进行对比试验，对人体模型在以 WPT 系统为干扰源的电磁环境中受到的电磁辐射以及比吸收率之间的差异进行分析。该团队将矩量法和标量势有限差分法相结合，提出了一种解析 WPT 系统电磁环境中生物体比吸收率的准静态法的两步计算方法，通过该方法高效的解析电磁环境中人体的安全系数以此对无线电能传输系统的安全性进行评估，并与全波电磁分析计算的结果进行比较，实验结果表明，两种方法所得的磁场振幅保持高度一致，除此之外两步静态法的所需要的解析时间缩短了十分之一，极大的节省了磁场解析计算所需要的时间<sup>[41-43]</sup>。

除了上述解析方法之外，贝塞尔函数、Biot-Savart 定律等也常用于构建 WPT 系统的数学解析模型。文献[44]选择圆形线圈作为 WPT 系统的传输线圈，建立了适用

于圆形线圈的数学模型,揭示了品质因数与磁感应强度间的对应关系,以最小化 WPT 系统相关区域辐射水平为目的,将所推导的数学模型与智能优化算法相结合对 3.3kW 电动汽车的线圈参数进行了优化,使电动汽车周围的磁感应强度控制在公众电磁暴露极限以内。文献[45]基于叠加定理和 Biot-Savart 定律建立了常见耦合机构的 WPT 系统数学模型,采用极化理论探究了 WPT 系统运行过程中所产生的磁场的基本特性,增强了对 WPT 电磁干扰机理的认知。文献[46]推导出矩形线圈三维磁场分布的半解析模型,该模型用傅立叶级数描述磁场,通过求解麦克斯韦方程组得到磁矢量和标量位,实验表明,该方法与有限元分析法所得到的数值基本保持一致,验证了该方法在无线电能传输领域的有效性。为了提升 WPT 系统电磁环境评估模型的灵活性和普适性,文献[47]采用电磁理论建立了考虑几何结构、线圈参数和线圈工况的平面螺旋线圈的磁感应强度解析模型。并在此模型的基础上,提出了对正多边形线圈结构具有普适性的正多边形通用磁场模型,在模型中引入线圈边数作为模型的变量,增强了 WPT 系统电磁环境评估方法的灵活性,如图 1-2 所示,但该方法仅考虑了线圈结构、工况对磁感应强度的影响,在实际的应用过程中,合理的屏蔽措施是无线电能传输系统必不可少的,为此在数学模型中引入电磁屏蔽层,逐渐成为研究热点。文献[48]基于傅立叶分析、磁矢量和标量势构建了 WPT 系统的三维解析模型。利用所提出的三维分析模型,分别计算了偏移工况下有无屏蔽介质时磁场的分布情况。通过数值模型和有限元分析法得到的互感和磁场分布结果与实验结果进行了比较,两种方式测得的结果变化趋势基本保持一致。但文中只考虑了发射线圈的磁屏蔽。Luo 等人基于傅里叶-贝塞尔变换和对偶傅里叶变换,建立了半无限磁屏蔽的方形和圆形平面螺旋线圈的解析模型,但为了便于建模,这两篇论文均理想化的假设电磁屏蔽为无限维,与实际不符<sup>[49]</sup>。文献[50]将子域技术引入到 WPT 领域,利用两个二维子域解析模型叠加,得到一种有限尺寸的磁屏蔽模型,将子域模型得到的结果与 FEA 结果以及实验结果三者进行对比,实验结果表明两种方法所测得磁感应强度的吻合较好,验证了子域模型的有效性。但仅考虑了无源屏蔽介质对 WPT 系统的影响,对水平方向上的漏磁的

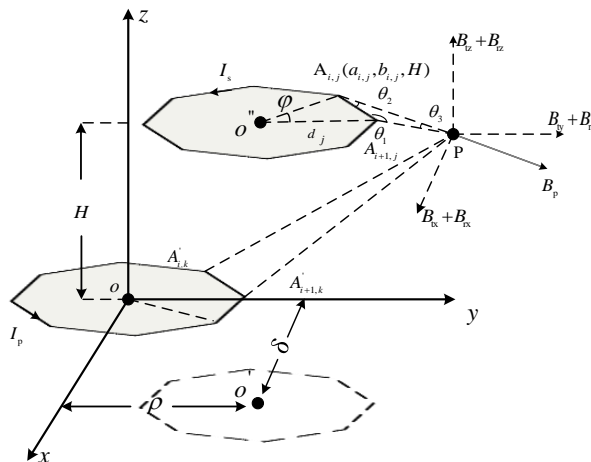


图 1-2 磁感应强度示意图

抑制能力存在局限性。为此有必要构建一个综合考虑无源屏蔽（铁氧体、铝板）与有源屏蔽（有源屏蔽线圈）的磁场解析模型，提升 WPT 系统电磁环境评估的普适性与灵活性。

### 1.2.2 WPT 系统电磁屏蔽的研究现状

随着 WPT 技术市场渗透率的提高，WPT 系统运行过程中带来的电磁安全问题成为研究者所关注的关键性能指标之一。为了消除 WPT 系统运行过程中的电磁安全性问题，有必要选择合理的电磁屏蔽措施对 WPT 系统的传播途径以及干扰源端产生的电磁辐射进行抑制。合理的线圈参数优化是提高 WPT 系统磁耦合系数、降低系统磁感应强度的方法之一，通过智能优化算法与数学模型相结合来优化线圈参数从干扰源端减小漏磁的释放。但该方法一般不能适用于磁耦合系数很低的线圈以及气隙较大的无线电能传输系统<sup>[51]</sup>，不具备普适性。为此本文采取电磁屏蔽技术来提升 WPT 系统的电磁兼容性。

电磁屏蔽技术是一种从耦合途径中对 WPT 系统的磁场进行抑制的方法。根据屏蔽原理的不同可分为有源屏蔽技术、无源屏蔽技术以及无功电流谐振环屏蔽技术三类<sup>[58]</sup>。其中无源屏蔽技术是指借助铝板、铜板、铁氧体等金属屏蔽材料对空间中的磁场进行反射、吸收或者引导，进而达到消除或削弱磁场的目的。金属屏蔽材料根据其材料特性又能分为铁磁性金属材料以及非铁磁性金属材料。无源屏蔽介质作为最实用的抑制措施之一，诸多实验表明其高效的电磁抑制能力，已经成为削弱电动汽车等大功率应用场景电磁场泄露必不可少的一环。早在 2013 年，韩国科学技术研究院（KAIST）综合考虑了屏蔽材料对无线电能传输系统电场强度的影响，仿真结果表明铝板、铁氧体等金属屏蔽材料对纵轴方向上的漏磁场起到了极好的抑制效果<sup>[52]</sup>，但对水平方向上漏磁的抑制能力还需要探寻其它有效的电磁屏蔽措施。文献<sup>[53]</sup>针对电动汽车无线电能传输过程中对非工作区域产生的电磁辐射，在 WPT 系统的耦合机构中增加了铁磁性金属材料（铁氧体），利用铁氧体的高磁导率，将耦合磁场牢牢束缚在 WPT 系统的工作区内，减小系统漏磁对电磁环境内敏感设备、生物体等的干扰。同时，铁氧体的引入会使线圈间的互感得到显著的提升，从而增强了系统整体的传输效率。并将铁氧体分别和非铁磁性材料（铝、铜）相结合，分析了两种常见非铁磁性材料（铝、铜）的干扰机理。文献<sup>[54]</sup>利用有限元仿真软件分析了屏蔽层位于发射线圈不同位置的屏蔽效果，以系统的安全性为目标优化屏蔽层、线圈的结构和尺寸，最后通过有限元仿真和实验表明带边沿扇型屏蔽相较于其它三种屏蔽层的综合性能更为突出。除此之外，一些学者还提出将金属屏蔽层垂直放置以减小水平方向的漏磁的方法<sup>[55]</sup>。然而，铁磁性和非铁磁性材料相结合的方法随着金属屏蔽材料的增加，导致系统的负担增加，并且屏蔽材料水平或垂直放置的形式同样也无法应对 WPT 系统

不同的工况需求。

有源屏蔽技术又称为电磁辐射主动抑制方法，该方法对于 WPT 系统水平方向上的电磁干扰起着极佳的抑制效果，一定程度上弥补了无源屏蔽技术的不足。该方法利用带有电流的有源屏蔽线圈，通过调整独立电源和补偿网络来改变有源屏蔽线圈的幅值和相位，并根据系统的需求改变有源屏蔽线圈与主线圈的相对位置，使有源屏蔽线圈产生与干扰源反向的磁场来削减 WPT 系统主线圈产生的部分漏磁，极大的提升了含屏蔽措施 WPT 系统的灵活性和普适性，因此吸引各国研究人员对有源屏蔽技术进行探究。文献[56]提出了一种由两个半环形的独立有源线圈组成的屏蔽结构如图 1-3 所示，以此提升电磁屏蔽措施的抑制能力，并从干扰源的抑制以及生物或敏感元器件的防护两部分进行屏蔽实验，实验结果表明该方法在不降低 WPT 系统传输性能的前提下具有良好的屏蔽性能。文献[57]以无线充电汽车作为研究背景，根据相关电磁环境的评估标准，基于感应式无线电能传输系统(Inductive Power Transfer System, IPTS)提出了一种新的主动电磁屏蔽方法。根据 IPTS 磁场的传输特性，找到了主线圈与有源屏蔽线圈的最佳间距，提出了有源屏蔽线圈的最优参数。最终针对有源屏蔽线圈匝数、尺寸等各种条件进行实验，成功将测量点处的电磁场维持在安全阈值以内，验证了所提屏蔽策略的有效性。相比于无源屏蔽技术，有源屏蔽技术显然更加的灵活、应用场景也较广，但该方法也存在一些局限性，例如设计复杂、成本较高以及影响 WPT 系统传输效率等问题<sup>[58]</sup>。在实际的设计过程中，常常根据需求有选择的将无源屏蔽技术和有源屏蔽技术结合，以完成 WPT 系统的电磁安全性设计。

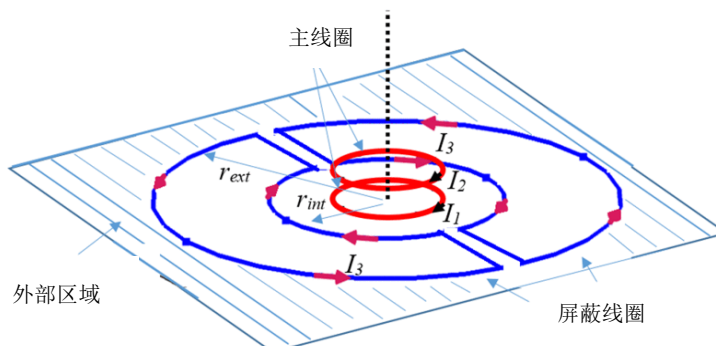


图 1-3 主动屏蔽系统设计

2014 年，该研究院在现有的理论基础上，提升 WPT 系统的功率等级，对大功率环境下的电磁环境进行评估，以一台大功率的电动汽车作为电磁干扰源，提出了利用无功电流谐振环技术对 WPT 系统进行主动屏蔽的方法，该方法集成了有源屏蔽措施的优势，弥补了上述屏蔽措施的成本高、影响系统传输效率等问题。2014 年韩国学者提出了一种谐振式 WPT 系统电抗性屏蔽的概念和设计方法如图 1-4 所示，通过调节补偿电路调节有源屏蔽线圈的相位，并借助从原磁场感应到的反向磁场减小电动汽车充电过程中所产生的漏磁场<sup>[59]</sup>，该抑制措施在无需接入主电路的情况下，降低了 WPT 系统 64% 的漏磁，相比于同尺寸的无源屏蔽方法仅降低了 15% 的磁场辐射，

不管是传输效率还是抑制效果，无功电流谐振环屏蔽技术均显现出明显的优势。但该方法在实际的操作过程中往往难以精准的调整屏蔽线圈的相位<sup>[60]</sup>。实际应用场景中，同样也需要跟其它屏蔽措施相结合，共同完成 WPT 系统漏磁的抑制，仅依靠线圈间的耦合特性完成电磁屏蔽，相较于其它电磁屏蔽方法其设计更为复杂，系统的特征参数也难以确定。

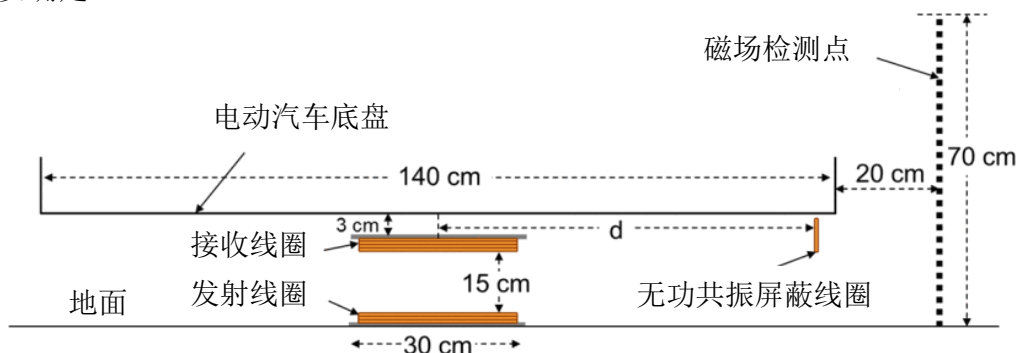


图 1-4 无功电流谐振环屏蔽技术

目前主流的屏蔽方法大多从传播途径中对 WPT 系统电磁场进行抑制，除此之外，诸如扩频技术、线圈参数优化等方法均对 WPT 系统的磁场起到良好的抑制作用。目前本文仅考虑无源屏蔽技术与有源屏蔽技术对 WPT 系统电磁环境的影响，构建了考虑电磁屏蔽措施、线圈参数以及线圈工况的三维解析模型对 WPT 系统的电磁环境进行评估。

### 1.3 论文主要研究内容

本文以含电磁屏蔽措施的 WPT 系统作为研究对象，在笛卡尔坐标系中将 WPT 系统工作区域按照材料特性进行区域划分，从而建立考虑电磁屏蔽措施的三维解析模型对 WPT 系统的电磁环境进行评估，通过 Biot-Savart 定律提出一种有源屏蔽线圈的建模方法以此优化三维解析模型的计算时间，搭建考虑电磁屏蔽措施的 WPT 实验平台并结合有限元仿真验证了模型的有效性，最后基于该模型对 WPT 系统的电磁环境进行评估，为系统耦合机构参数的设计和电磁屏蔽措施的选择提供理论依据。本文技术路线如图 1-5 所示，具体研究内容主要包括含屏蔽介质的磁场建模以及电磁环境评估两部分。



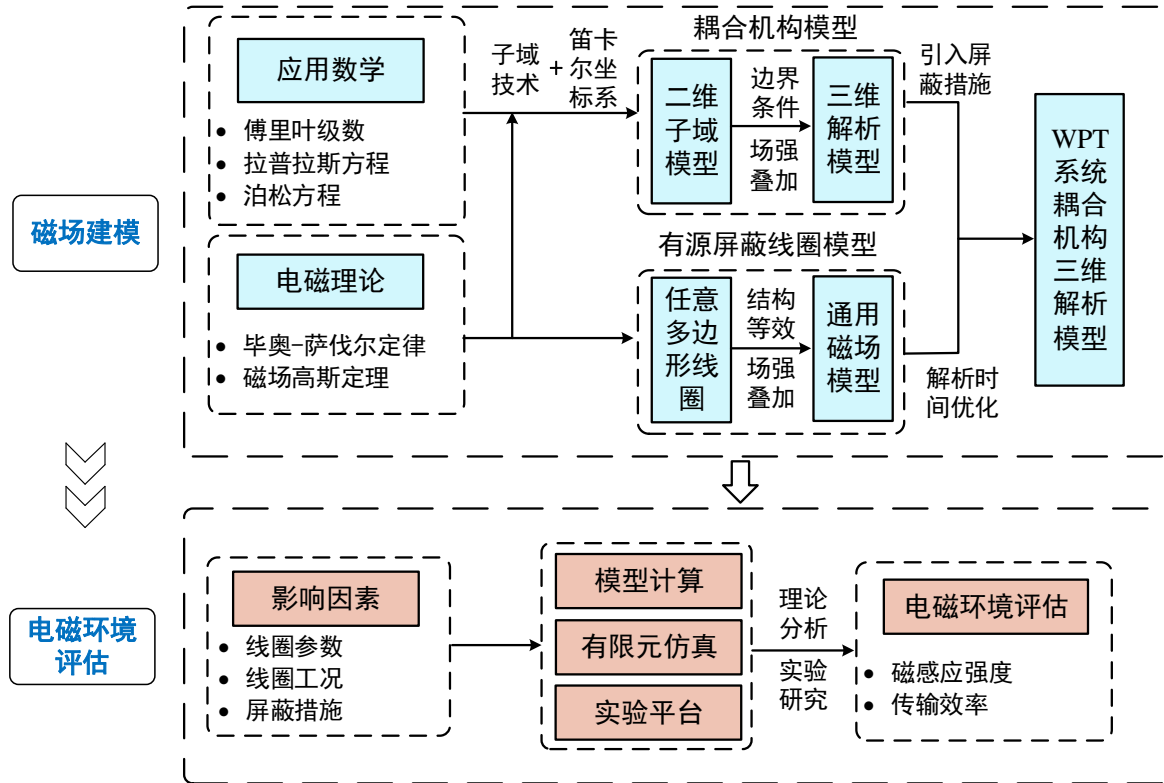


图 1-5 技术路线

第一章 绪论。本章简要的回顾了 WPT 系统的研究背景及意义，针对 WPT 系统显现出来的电磁环境安全性问题，提出利用电磁环境评估方法和电磁屏蔽措施相结合的方法来构建安全的电磁环境。总结现有电磁环境评估方法和电磁屏蔽措施的难点与不足，进而表明本文研究的必要性。最后总结本文的论文结构和技术路线。

第二章 WPT 系统电磁屏蔽机理及评估方法。本章首先建立 S-S 型 WPT 系统的等效电路模型，推导电磁环境与工作性能参数的对应关系。然后分析了无源屏蔽和有源屏蔽的屏蔽机理。并确定电磁安全评估标准及测量方法，最后探究几何结构对电磁环境的影响，为线圈几何结构的选择提供理论依据。

第三章 含屏蔽介质耦合机构三维解析模型。本章首先基于笛卡尔坐标系下的子域分析技术，将电磁屏蔽介质引入到二维子域模型当中。基于 Biot-Savart 定律获取二维子域解析模型的补偿函数，构建含屏蔽介质耦合机构三维解析模型。并根据叠加定理和电磁理论提出一种有源屏蔽线圈的建模方法，以此优化三维解析模型的计算时间。最后通过有限元分析法验证了模型的正确性。

第四章 WPT 系统电磁环境评估。本章以正方形线圈为例，基于含屏蔽介质耦合机构三维解析模型，研究了常见电磁屏蔽措施和线圈工况对 WPT 系统电磁环境的影响，同时综合评估不同电磁屏蔽措施对 WPT 系统传输效率的影响，合理的选择 WPT 系统的电磁屏蔽措施。最后，结合有限元分析法并搭建 WPT 系统电磁环境评估的实验平台，验证了本文所研究屏蔽措施的有效性。

第五章 总结与展望。本章总结本文的研究工作、实验结果以及达到的效果，针

对现有工作的不足之处做出展望。

## 1.4 本章小结

本章阐述了 WPT 系统的研究背景及意义，针对 WPT 系统显现出来的电磁环境安全性问题，提出利用电磁环境评估方法和电磁屏蔽措施相结合的方法来构建安全的电磁环境，介绍了电磁评估方法以及电磁屏蔽措施的研究现状，在此基础上总结现有电磁环境评估法和电磁屏蔽措施的难点与不足，表明本文研究的必要性。最后，概括本文的结构框架。

## 第 2 章 WPT 系统电磁屏蔽机理及评估方法

### 2.1 引言

合理的电磁屏蔽措施和有效的电磁环境评估方法是提升电磁环境安全性的前提。本章从 WPT 系统的传输原理出发，基于串串型 (Series-Series, S-S) WPT 系统建立电磁环境与系统参数之间的对应关系。其次，分析无源屏蔽技术和有源屏蔽技术的屏蔽机理，为电磁屏蔽措施的选择提供理论依据。同时根据实际情况确定本文用于电磁环境评估的参考标准与测量方式，探究了线圈几何结构对电磁环境的影响，最终选择方形线圈作为后文的研究对象。

### 2.2 WPT 系统传输原理

WPT 系统主要由电能转换的初级能量发射端、次级能量接收端和进行能量传输的耦合机构组成，其能量传输流程如图 2-1 所示。

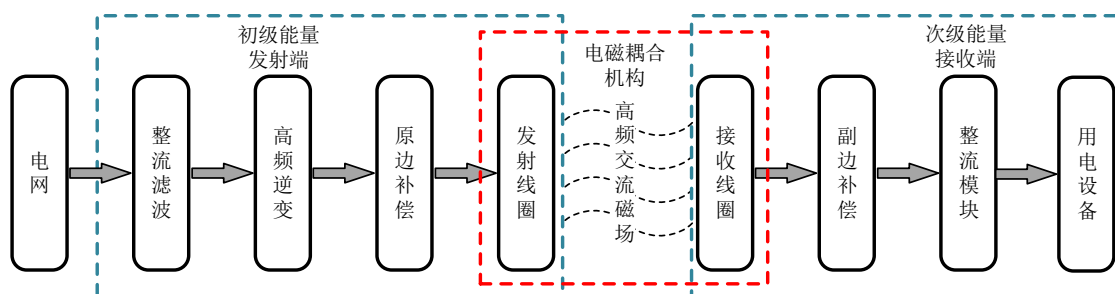


图 2-1 WPT 系统传输流程图

在 WPT 系统能量传输的过程中，这三部分各司其职。其中，初级能量发射端将电网端传输过来的工频交流电变为可供 WPT 系统双边耦合机构进行能量传输的高频交流电，然后将相应频段的交流电注入初级能量接收端当中，使其在相应的区域中产生交变磁场，在能量传输的过程中会对系统的电磁环境造成干扰。因此需要借助相应的电路模型分析电磁环境与 WPT 系统工作性能参数之间的关系。

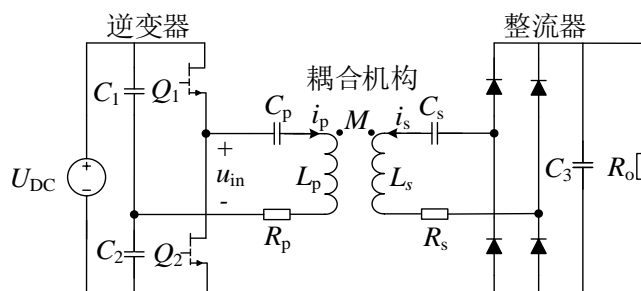


图 2-2 WPT 系统电路模型

串串型补偿 (Series-Series, S-S) 无线电能传输系统补偿电容的值仅与自感和频率



相关，为了便于后续的实验研究，本文选择 S-S 型补偿电路作为本文的谐振补偿网络。S-S 型 WPT 系统作为研究过程中的电磁干扰源，主要由接收线圈、发射线圈、直流电压源、高频逆变器、整流器、补偿网络以及负载电阻等组成，如图 2-2 所示。其等效电路如图 2-3 所示。

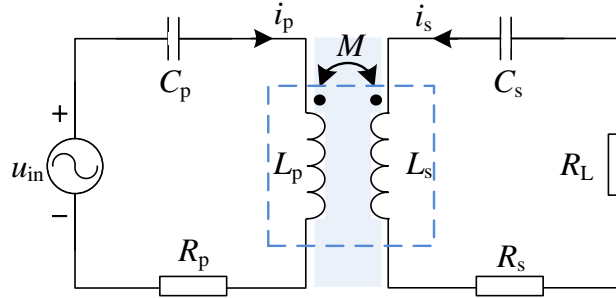


图 2-3 WPT 系统等效电路图

其中  $U_{in}$  为输入电压， $L_p$  和  $L_s$  表示原边、副边耦合机构的电感， $C_p$  和  $C_s$  表示原边、副边耦合机构的补偿电容， $i_p$  为发射侧电流， $i_s$  为接收侧电流， $R_L$  为负载电阻， $R_p$ 、 $R_s$  表示原边、副边耦合机构的等效串联电阻， $M$  表示原边、副边耦合机构间的互感。

根据图 2-3 所示的 S-S 型 WPT 系统的等效电路，利用基尔霍夫定律电压定律可得电路的 KVL 方程：

$$\begin{cases} \dot{U}_{in} = Z_{TX} \cdot \dot{I}_P + j\omega M \cdot \dot{I}_s \\ 0 = j\omega M \cdot \dot{I}_P + Z_{RX} \cdot \dot{I}_s \end{cases} \quad (2-1)$$

当选择 S-S 型补偿电路时初级能量发射端的阻抗  $Z_{TX}$  和次级能量接收端的阻抗  $Z_{RX}$  分别为：

$$\begin{cases} Z_{TX} = R_p + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} \\ Z_{RX} = R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_L \end{cases} \quad (2-2)$$

其中等效电阻  $R_L$  为：

$$R_L = \frac{\pi^2}{8} R_o \quad (2-3)$$

结合公式(2-1)和(2-1)得到原边、副边线圈中的电流：

$$i_p = \frac{Z_{RX} \cdot u_{in}}{Z_{TX} Z_{RX} + (\omega M)^2} \quad (2-4)$$

$$i_s = \frac{-j\omega M \cdot u_{in}}{Z_{TX} Z_{RX} + (\omega M)^2} \quad (2-5)$$

当 S-S 型 WPT 系统处于谐振状态时，系统处在最佳的传输状态，其谐振频率应满足以下关系：

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (2-6)$$

则 WPT 系统的输入功率和输出功率如下所示：

$$P_{in} = \frac{(R_s + R_L) \cdot V_{in}^2}{R_p (R_s + R_L) + (\omega M)^2} \quad (2-7)$$

$$P_{out} = \frac{(\omega M)^2 \cdot V_{in}^2 \cdot R_L}{[R_p (R_s + R_L) + (\omega M)^2]^2} \quad (2-8)$$

结合公式(2-7)和(2-8)，得到 WPT 系统的传输效率：

$$\eta = \frac{R_L}{\frac{R_p \cdot (R_s + R_L)^2}{\omega^2 M^2} + R_s + R_L} \quad (2-9)$$

综上所述，此时原、副边的电流公式(2-4)和(2-5)可进一步表示为：

$$i_p = \sqrt{\frac{P_{out}}{\frac{R_L}{R_p \cdot (R_s + R_L)^2 + \frac{\omega^2 M^2}{R_s + R_L}} \cdot (R_s + \frac{(\omega M)^2}{R_p + R_L})}} \quad (2-10)$$

$$i_s = \sqrt{\frac{P_{out}}{R_L}} \quad (2-11)$$

其中，对于原副边线圈的等效串联电阻分别为  $R_p$  和  $R_s$ ，为了便于后续电磁环境的评估且不影响系统磁感应强度准确度的前提下，本文在数值建模的过程中仅考虑欧姆损耗电阻<sup>[61]</sup>，因此可得原副边线圈的等效电阻为  $R_p$  和  $R_s$ ：

$$R_p = \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2\sigma}} \frac{l_p}{2\pi a} \quad (2-13)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2\sigma}} \frac{l_s}{2\pi a} \quad (2-14)$$

本文的线圈均采用利兹线绕制，取电导率  $\sigma = 5.8 \times 10^7 S/m$ ，式中  $l_p$ 、 $l_s$  分别表示原副边耦合机构的总线长。

通过 WPT 系统等效电路的推导，得到线圈原副边的电流，因此可根据 Biot-Savart 定律，得到载流导线在空间中任意一点  $P(x,y,z)$  处产生的磁感应强度：

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{idl \times r}{r_c^2} \quad (2-15)$$

其中  $r_c$  为 P 到通电导线的垂直距离，通过式 (2-15) 可以初步的了解到，WPT 系统的磁感应强度  $B$  与激励电流  $i$  函数关系，原副边电流的具体表达式如(2-10)和(2-11)所示。后续将以数学模型的方式进一步探究磁感应强度与系统参数之间的对应关系。

## 2.3 电磁屏蔽机理与措施

由于接收线圈和发射线圈之间存在间隙，导致 WPT 系统进行能量传输的过程中会产生影响外部环境的漏磁，若不加以限制会对系统环境中的人体、电子元器件造成电磁干扰。为了提升 WPT 系统的电磁环境的安全性，需要根据系统的需求选择相应的电磁屏蔽措施，抑制 WPT 系统主耦合区域的电磁泄露。

### 2.3.1 无源屏蔽

无源屏蔽技术是指无需添加电源，仅凭借金属屏蔽材料的特性来遏制耦合机构产生的高频交变磁场对电磁环境的干扰，又可分为非铁磁性金属屏蔽材料和铁磁性金属材料。

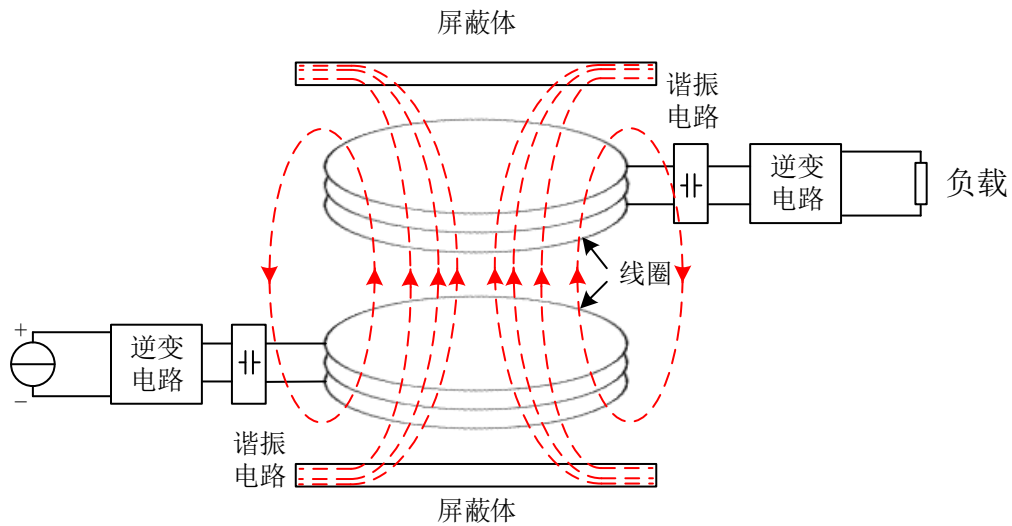


图 2-4 屏蔽后磁场分布示意图

常见的非铁磁性金属屏蔽材料主要包括铜、铝、钢板等。这些材料具有低电阻率且不容易被磁化等特点，当 WPT 系统环境中存在非铁磁性金属介质时，会使电磁环境中磁场分布发生变化。耦合机构运行过程中产生的高频电磁场会在金属屏蔽媒介中产生影响磁感应强度的涡流损耗，进而达到削弱耦合机构间主磁场的目的。金属屏蔽材料位置的不同屏蔽效果同样也不同，当非铁磁性金属板添加到耦合机构两端时，会阻碍耦合机构间磁场能量的传输，使初级能量发射端传输到次级能量接收端的磁

力线数目大大减小如图 2-4 所示，抑制了 WPT 系统磁场对外部环境的干扰，同时低电阻率的非铁磁性屏蔽层的引入也会对传输性能造成一定干扰。

常见的铁磁性金属介质包括铁、铁氧体以及薄硅钢片等。铁磁性金属材料相较于非铁磁性金属介质具有更好的介电性能。铁氧体等铁磁性材料的引入能够有效的凝聚主耦合区域的磁场，减小系统环境中的漏磁，从而达到提升耦合区域的磁通密度、降低周围环境电磁干扰的目的。当铁磁性金属增加到耦合机构两端时，初级能量发射端与次级能量接收端的等效自感会有所变化，但此时系统的谐振电容并未发生改变，导致 WPT 系统谐振频率偏离开关频率，造成系统失谐，从而对 WPT 系统的传输效率造成影响。但铁磁性材料的高磁导率，能够有效的增强线圈间的互感，然而一味的在 WPT 系统中引入铁磁性金属材料，也存在导致系统出现频率分叉。为此，通常采用非铁磁性金属材料 and 铁磁性金属材料组合的双层屏蔽介质来优化 WPT 系统的电磁环境。

### 2.3.2 有源屏蔽

有源屏蔽技术作为一种新兴的电磁屏蔽技术，主要是通过外加激励源使耦合机构产生与原磁场方向相反磁场，对目标区域的磁场进行抑制或抵消，一定程度上够弥补了无源屏蔽措施水平方向抑制能力不足。有源屏蔽技术还可以有选择性的对敏感设备或生物体所在区域进行保护。除了有源屏蔽线圈的幅值与相位的调控以外，有源屏蔽线圈的线圈参数与主线圈之间的位置同样也是电磁安全性设计过程中值得深入探究的问题。在实际电磁安全性设计过程中，根据 ICNIRP 导则的参考值，将有源屏蔽技术与铁氧体、铝板等无源屏蔽介质组合使用，进而达到全方位电磁辐射屏蔽的目的，但有源屏蔽线圈也存在相位、幅值调节困难等问题。

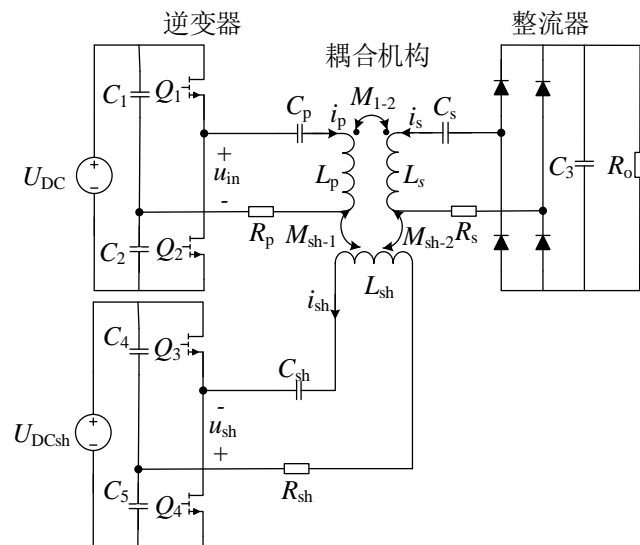


图 2-5 有源屏蔽措施与 WPT 系统结合电路图

如图 2-5 所示为有源屏蔽系统和 WPT 系统联合的电路图。图中上半部分为无线

电能传输系统，下半部分为有源屏蔽系统，其中  $u_{in}$  为输入电压， $u_{sh}$  为屏蔽线圈的输入电压， $L_{sh}$  和  $C_{sh}$  分别为屏蔽线圈的电感和补偿电容， $i_{sh}$  为屏蔽线圈的电流， $R_{sh}$  屏蔽线圈的等效串联电阻， $M_{sh-1}$  和  $M_{sh-2}$  分别为屏蔽线圈与接收线圈和发射线圈之间的互感。如图 2-6 所示为有源屏蔽系统和 WPT 系统联合的等效电路图。

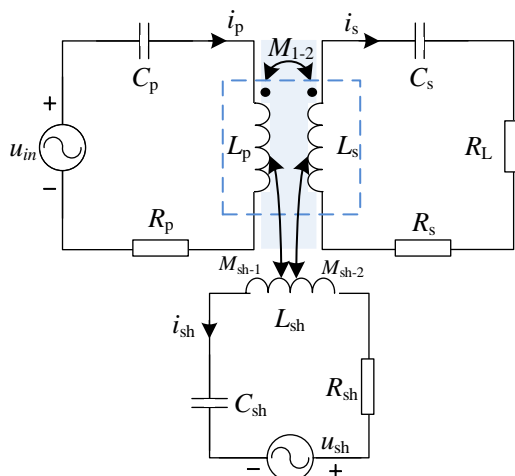


图 2-6 有源屏蔽与 WPT 系统结合等效电路图

为了提升 WPT 系统的电磁安全性，需要根据电磁评估标准调节有源屏蔽线圈的相位和幅值以产生抵消或削弱原磁感应强度的  $B_{sh}$ 。如图 2-7 有源屏蔽措施对 WPT 系统电磁分布影响的示意图。

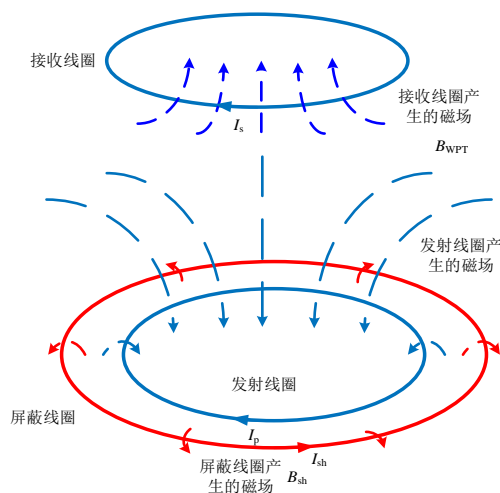


图 2-7 有源屏蔽措施对磁场分布的影响示意图

WPT 系统原磁场中，发射线圈与接收线圈电流的频率均为 85kHz，其表达式如下所示<sup>[62]</sup>：

$$\begin{cases} \mathbf{B}_{WPT} = (|B_{WPT,x}|x + |B_{WPT,y}|y + |B_{WPT,z}|z) \sin(\omega_{WPT}t + \varphi_{B,WPT}) \\ \quad = |B_{WPT}|r_{B,WPT} \times \sin(\omega_{WPT}t + \varphi_{B,WPT}) \\ \omega_{WPT} = 2\pi f_{WPT} \end{cases} \quad (2-16)$$

其中  $B_{WPT,x}$ 、 $B_{WPT,y}$ 、 $B_{WPT,z}$  为主线圈沿  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴的磁感应强度分量。所以总磁感应强度  $B_{sh}$  表达式为:

$$\begin{aligned} B_{sh} &= (|B_{sh,x}|x + |B_{sh,y}|y + |B_{sh,z}|z) \sin(\omega_{sh}t + \varphi_{B,sh}) \\ &= |B_{sh}|r_{B,sh} \times \sin(\omega_{sh}t + \varphi_{B,sh}) \end{aligned} \quad (2-17)$$

为了实现目标空间区域的磁场屏蔽,应当保证  $f_{sh}=f=85\text{kHz}$ , 为此考虑主动屏蔽措施 WPT 系统的总磁感应强度为:

$$\begin{aligned} B_{\text{final}} &= B_{WPT} - B_{sh} \\ &= (|B_{WPT}| + |B_{sh}|r_{B,sh}) \sin(\omega_{WPT}t + \varphi_{B,WPT}) \\ &= |B_{\text{final}}|r_{\text{final}} \times \sin(\omega_{WPT}t + \varphi_{B,WPT}) \end{aligned} \quad (2-18)$$

为了使有源屏蔽线圈处在最佳的工作状态, 需要保证无线电能传输系统和有源屏蔽线圈的工作频率保持一致, 再根据 ICNIRP2010 导则中的公众暴露限值对屏蔽线圈的电流相位、大小进行调整。

## 2.4 电磁环境评估标准和测量方法

WPT 系统显现出来的电磁问题与人们的健康密切相关, 特别是消费电子、电动汽车等与人们息息相关的产品需要符合相关的电磁安全准则。因此合理的电磁评估标准以及正确的测量方法是电磁环境评估过程中必不可少的。

### 2.4.1 电磁环境评估标准

目前关于无线电能传输电磁安全的评估标准以及测量方式各国间还存在一定的差异, 国际非电离辐射防护委员会制定的 ICNIRP1998 和 ICNIRP 2010<sup>[63-64]</sup>的电磁安全准则是国际上具有代表性的电磁安全评估导则, 在世界范围内存在极高的认可程度, 相较于 ICNIRP1998, 修订后的 ICNIRP2010 导则中公众与职业的电磁暴露限值更为严苛, 为此本文以 ICNIRP2010 中提出的公众暴露限值作为 WPT 系统的电磁作

表 2-1 ICNIRP 2010

频率范围	电场强度 $E(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})$	磁场强度 $H(\text{A}\cdot\text{m}^{-1})$	磁感应强度 $B(\mu\text{T})$
1-8 Hz	5	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$
8-25 Hz	5	$4 \times 10^4 / f$	$5 \times 10^3 / f$
25-50Hz	5	160	200
50Hz-400Hz	$250 / f$	160	200
400-3000 Hz	$250 / f$	$6.4 \times 10^4 / f$	$8 \times 10^4 / f$
3-100kHz	0.087	21	27
100-150 kHz	0.087	5	6.25
0.15-1 MHz	0.087	$0.73 / f$	$0.92 / f$
1-10 MHz	$0.087 / f^{1/2}$	$0.73 / f$	$0.92 / f$

为设计准则，本文以 85kHz 的无线电能传输系统为研究背景，在后文的实验过程中将以公众电磁暴露安全限值  $27\mu\text{T}$  作为电磁环境的评估标准，其它频段的电磁安全参考值如表 2-1 所示。

## 2.4.2 电磁环境测量方法

电磁环境的测量方法同样也存在不统一的问题，需要根据应用场景的不同选择相应的电磁环境测量方法。为了对 WPT 系统的电磁环境进行有效的评估，本文将参考国际电工技术委员会于 2009 年颁布的 IEC62110-2009<sup>[65]</sup>中所提出的广泛应用于交流电磁场检测的方法三点法和五点法。因此本文将根据实际测量环境的不同，使用这两种方法对 WPT 系统的电磁环境进行评估。其测量点的取点方法如图 2-8 所示。

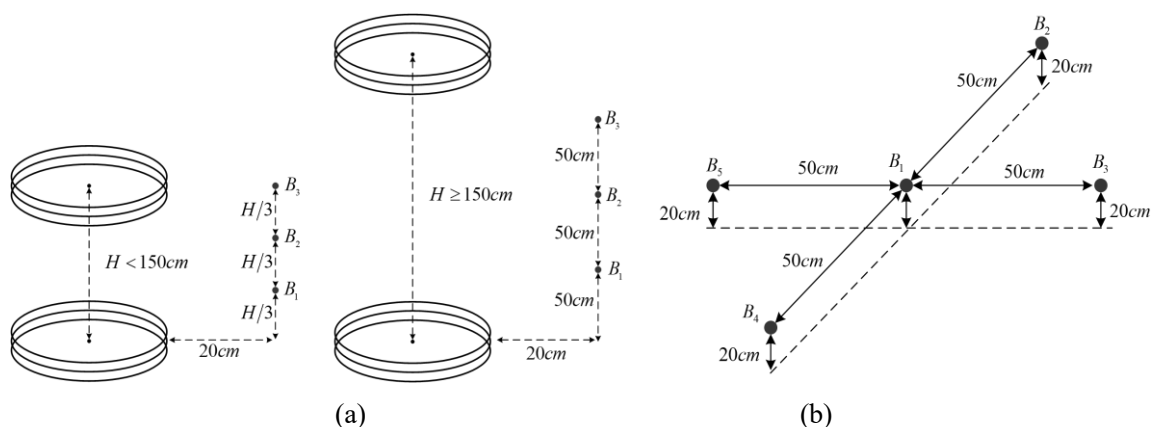


图 2-8 WPT 系统电磁测量方法 (a)三点法 (b)五点法

为了避免测量方式与评估标准的不统一所导致电磁环境评估的偏差，为此本文将以 ICNIRP2010 中 85kHz 频段的公众电磁暴露限值作为电磁环境评估标准，以 IEC62110 中所提出的三点法与五点法作为本文的测量方法。

## 2.5 耦合机构对电磁环境的影响

WPT 系统的电磁环境评估，主要是针对耦合机构产生的磁场。因此探究耦合机构对 WPT 系统电磁环境的影响，是后续实验的基础。本文基于 ICNIRP2010 和三点法，对三种典型耦合机构（方形、六边形、圆形）不同匝数和匝间距下 WPT 系统的电磁环境进行评估。

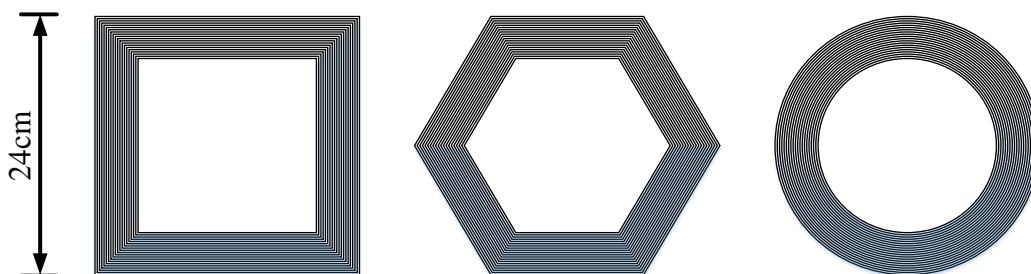


图 2-9 典型耦合机构

如图 2-9 所示为三种典型的耦合机构，假设三种耦合机构均处于正对工况下，传输距离  $H$  为 10cm，系统输出功率为 50W 恒定不变，匝间距分别为 0.2mm、0.4mm、0.6mm，线圈外径为 24cm，耦合机构匝数在 5-35 匝范围内变化时，对比三种典型耦合机构对电磁环境的影响，如图 2-10 所示。

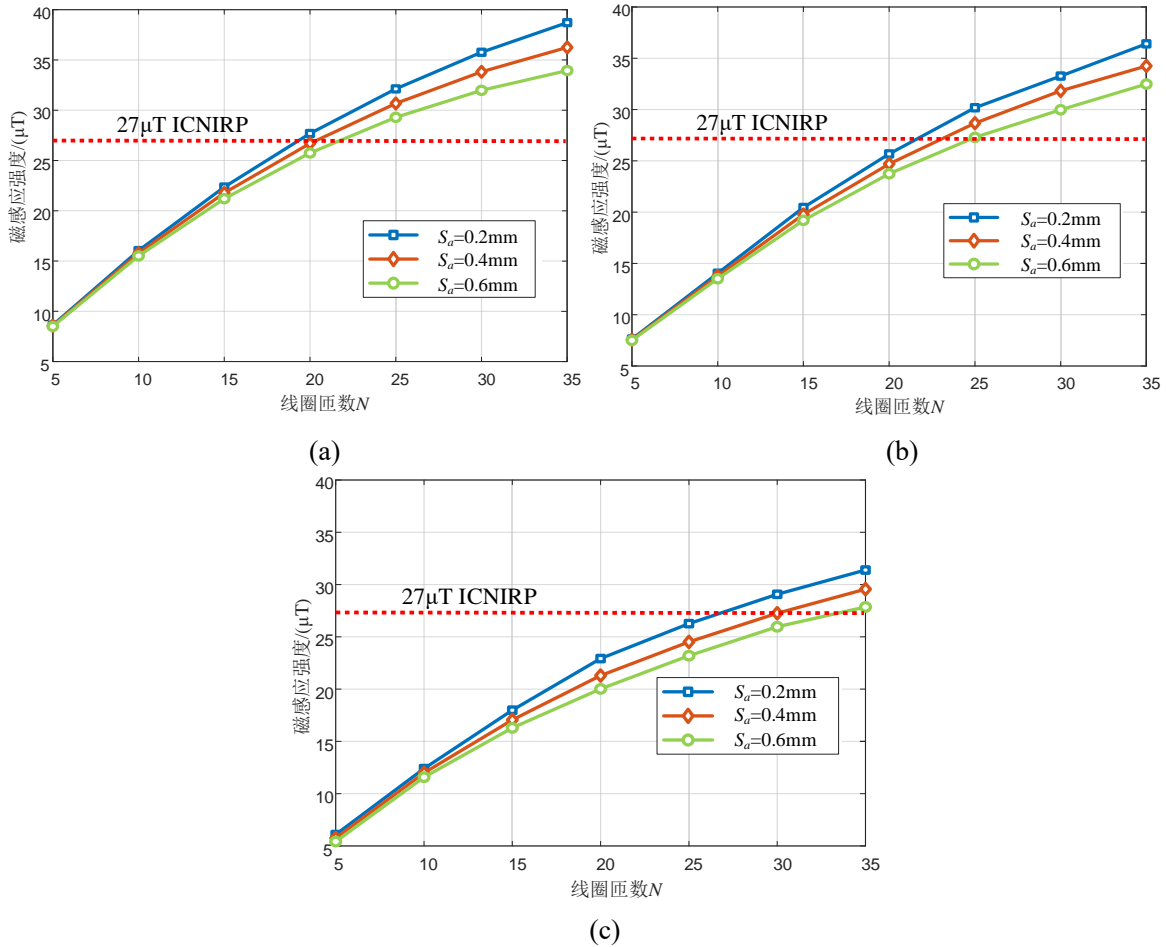


图 2-10 线圈匝数  $N$  和匝间距  $S_a$  对磁感应强度的影响 (a)正方形 (b)六边形 (c)圆形

如图 2-10 可知，本文基于文献[47]提出的通用磁场模型分析耦合机构对电磁环境的影响，当线圈匝数从 5 匝增加到 35 匝的过程中，通过三点法测得线圈周围的磁感应强度并根据 ICNIRP2010 的公众安全暴露限值对三种耦合机构的电磁安全性进行评估。从图中可以看出，系统的磁感应强度与线圈匝数正相关，与匝间距负相关。当线圈匝数、匝间距以及系统输出功率一致时，以正方形线圈为耦合机构的 WPT 系统所测得的磁感应强度更高，相较于其它耦合机构，方形线圈电磁环境的安全性更低。后续实验中将以方形线圈作为研究对象进行电磁环境评估实验。

## 2.6 本章小结

本章介绍了 WPT 系统的传输原理，建立了 WPT 系统的等效电路模型，对系统的磁感应强度与输入电流之间关系展开研究。分析了无源屏蔽技术和有源屏蔽技术



的屏蔽机理, 推导了含有源屏蔽措施无线电能传输系统的总磁感应强度。根据系统的工作频率以及实验环境确定了 WPT 系统电磁环境的评估标准以及测量方法, 为 WPT 电磁环境评估的科学性提供理论依据。在此基础上, 通过对比三种典型耦合机构的电磁环境, 最终选择电磁环境中磁感应强度最大的方形线圈作为本文的研究对象。

## 第 3 章 含屏蔽介质耦合机构三维解析模型

### 3.1 引言

WPT 系统运行过程中的电磁环境问题，需以科学可靠的理论模型来对系统的电磁环境进行评估。传统的磁场模型存在考虑屏蔽措施不全面、解析时间长等问题。本章利用子域技术建立含屏蔽介质的二维子域解析模型，根据磁场的可叠加性得到含电磁屏蔽耦合机构的三维解析模型<sup>[50]</sup>。并根据电磁理论提出一种有源屏蔽的建模方法，优化了模型的计算时间。通过有限元分析法和优化后的三维解析模型得到耦合机构不同工况下的磁感应强度及互感，以此验证模型的有效性。

### 3.2 含屏蔽介质的耦合机构

在实际的应用场景中，WPT 系统和谐、安全的电磁环境往往离不开有效的电磁屏蔽措施，为了抑制 WPT 系统在运行过程中所产生的漏磁场，本文将无源屏蔽介质与有源屏蔽措施相结合，构建考虑了含屏蔽介质耦合机构三维解析模型，含屏蔽介质的耦合机构示意图如图 3-1 所示。

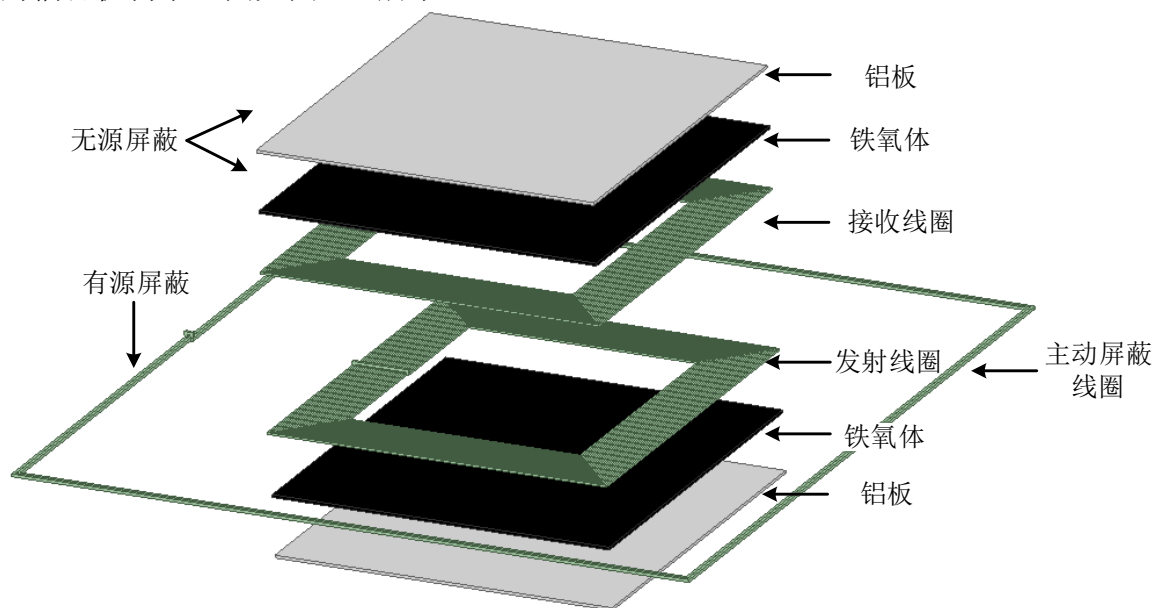


图 3-1 含电磁屏蔽介质的耦合机构

如图 3-2 所示为 WPT 系统初级能量发射端的机构剖面图。本文的电磁干扰源主要是指 WPT 系统的传输线圈。为了抑制主线圈区域带来的电磁干扰，在干扰源周围放置一个有源屏蔽线圈，称为有源屏蔽，并根据系统对安全性的需求在接收、发射线圈的两端增加相应的金属屏蔽材料，自此得到含屏蔽介质 WPT 系统耦合机构。其中有源屏蔽线圈和接收线圈均为方形线圈，线径均为 1.35mm，匝间距均为 0.1mm，有源屏蔽线圈匝数和主线圈匝数分别为  $N_{sh}=2$  匝和  $N=27$  匝，发射线圈与有源屏蔽线圈

之间的距离  $a=12\text{cm}$ ，屏蔽介质为与主线圈等大小、厚度为  $2\text{mm}$  的铝板和铁氧体，铁氧体和铝板的相对磁导率分别为  $2500$  和  $1$ 。其它参数如表 3-1 所示，为此本文将根据模型参数构建含屏蔽介质耦合机构的三维解析模型，并通过有限元分析法和三维解析模型探究线圈工况和磁感应强度的演化规律，以此来验证模型的准确性。

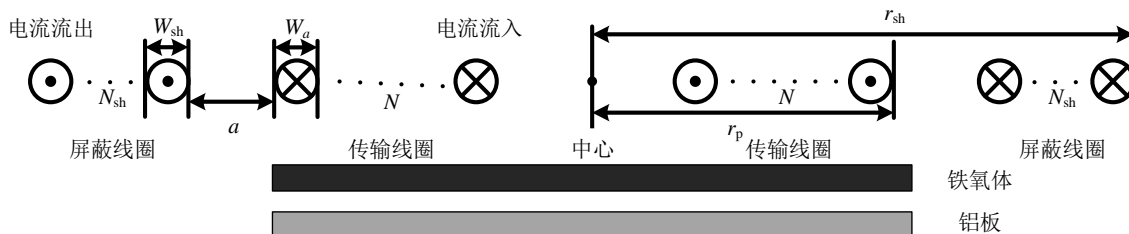


图 3-2 WPT 系统初级能量发射端剖面图

表 3-1 线圈参数

参数	主线圈	屏蔽线圈
匝数	27	2
匝间距/mm	0.1	0.1
线径/mm	1.35	1.35
线圈外径/mm	166.85	484.75
线圈外径/mm	244.95	490.35

### 3.3 耦合机构三维解析模型

#### 3.3.1 耦合机构二维子域模型

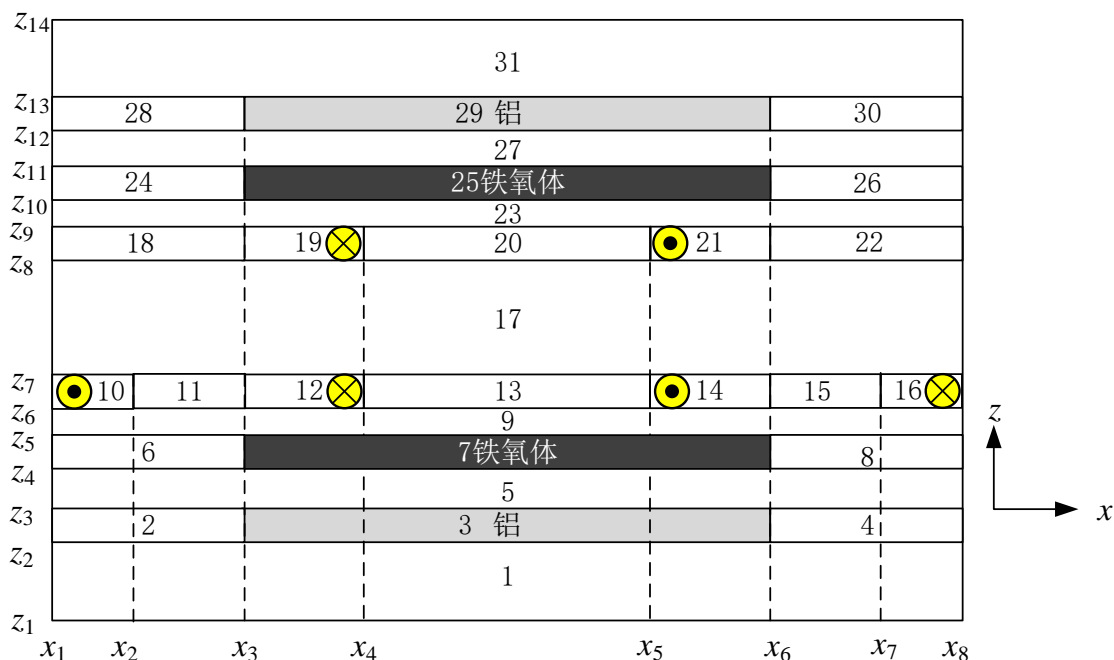


图 3-3  $xz$  平面中 WPT 系统耦合机构二维子域模型

由于 WPT 系统中存在铁氧体和铝板等无源屏蔽介质，会对系统的传输性能造成一定的干扰，同时也会扰乱系统的磁场分布。根据第一章的分析可知，常见的电磁评估模型显然无法评估含电磁屏蔽介质的耦合机构，为了建立含屏蔽介质耦合机构三维解析模型，需要借助笛卡尔坐标系和子域分析法对 WPT 系统进行解析。

图 3-3 为含屏蔽介质耦合机构的  $xz$  平面截面图。根据材料和传输特性将二维子域模型划分为 31 个只包含单一媒介的子区域。图中区域 3 和 29 为铝板屏蔽；区域 7 和 25 为铁氧体屏蔽；区域 12、14 和区域 19、21 分别为发射线圈和接收线圈，这两个区域总称为主线圈区域；区域 10 和 16 为有源屏蔽线圈。由于本文考虑了有源屏蔽线圈，因此系统中激励源主要来自有源屏蔽线圈区域以及主线圈区域，根据矢量恒等式，并考虑到库伦规范，得到电流激励存在区域的矢量磁位  $A_r$  满足的泊松方程：

$$\nabla^2 A_r = \frac{\partial^2 A_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_r}{\partial z^2} = -\mu_0 \mu_r J_r \quad (3-1)$$

其中  $r$  表示子区域的编号， $\mu_0$  表示真空磁导率， $\mu_r$  和  $J_r$  分别为  $r$  区域的相对磁导率和沿  $y$  轴方向输入激励源的电流密度， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$  为真空磁导率， $\nabla^2$  为拉普拉斯算子。对于所有不存在激励源的区域泊松方程可简化为拉普拉斯方程表示为：

$$\nabla^2 A_r = \frac{\partial^2 A_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_r}{\partial z^2} = 0 \quad (3-2)$$

采用分离变量法对公式 (3-1) 和 (3-2) 进行求解，根据磁场高斯定理  $\nabla \cdot \mathbf{B}_r = 0$ ，因为存在  $\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}_r) = 0$ ，因此可将系统磁感应强度转化为矢量磁位  $A_r$  的旋度：

$$\mathbf{B}_r = \nabla \times \mathbf{A}_r \quad (3-3)$$

根据式 (3-3) 可得到沿  $x$  方向的磁感应强度分量：

$$B_x = \frac{\partial A_r}{\partial z} \quad (3-4)$$

同理可以求得  $z$  方向的磁感应强度分量。其中  $A_r$  为第  $r$  区域的矢量磁位。为了简化后续的计算和计算，利用分离变量的方法可以求解 (3-1) 中的二阶偏微分方程，将  $A_r$  根据方向分解成  $A_r^x$  和  $A_r^z$ 。根据图 3-2 中各子区域边界特征的不同，将 31 个子区域分类进行讨论。主要分为主线圈、屏蔽介质、空气介质以及有源屏蔽线圈四部分。

#### 1) 主线圈区域

区域 12、14、19、21、7、25：该区域主要由接收线圈以及发射线圈组成。线圈区域是指存在恒定的电流传输的导线区域，因此在闭合路径周围的磁场强度旋度必须包含电流密度，通过式 (3-1)，得到线圈区域的矢量磁位的表达式，如下所示。

$$\mathbf{A}_r = (A_r^x + A_r^z + A_r^i) \vec{e} \quad (3-5)$$

其中  $A_r^x$ 、 $A_r^z$ 、 $A_r^i$  的表达式如下所示：

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/578111045045006026>