

电磁场理论对无线充电技术的原理阐释

吴舒涵

江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月26日

摘要

无线充电技术能够摆脱传统线缆的束缚, 提升设备的便携性以及用户体验, 但由于公众对基础科学原理的认知较模糊, 并且存在效率和安全性方面的问题, 限制了其广泛应用。本文的目的是系统地阐释电磁场理论如何成为无线充电技术的基石, 对麦克斯韦方程组、电磁感应以及电磁谐振等核心原理进行分析, 解释无线能量传输的实现机制以及关键影响因素。通过研究发现, 基于电磁感应原理的紧耦合方式适用于短距离、高效率充电场景, 而采用磁耦合谐振原理的松耦合方式可以实现更加灵活的中距离能量传输, 其传输效率以及稳定性很大程度上依赖于线圈设计、频率匹配、电磁屏蔽等方面的参数。研究进一步指出, 电磁场理论能够提供理论框架来进行系统设计优化、传输效率以及安全性提升, 同时也能为处理设备互操作性和制定行业标准指明方向。本研究的理论阐释有助于深化对无线充电技术的科学理解, 推动其从经验性应用向原理性设计的转变, 对促进该技术的规范化发展、增强公众接受度以及拓展其在物联网、电动汽车等领域的创新应用具有基础性意义。

关键词

电磁场理论, 无线充电, 电磁感应

Interpretation of Wireless Charging Technology Principles Based on Electromagnetic Field Theory

Shuhan Wu

School of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi

Received: April 25, 2026; accepted: May 18, 2026; published: May 26, 2026

Abstract

Wireless charging technology can break free from the constraints of traditional cables, improving

device portability and user experience. However, its widespread application is limited due to the public's vague understanding of basic scientific principles, as well as existing issues concerning efficiency and safety. This paper aims to systematically explain how electromagnetic field theory serves as the cornerstone of wireless charging technology. It analyzes core principles including Maxwell's equations, electromagnetic induction and electromagnetic resonance, and interprets the implementation mechanism and key influencing factors of wireless energy transmission. The study finds that the tightly coupled mode based on electromagnetic induction is suitable for short-distance and high-efficiency charging scenarios, while the loosely coupled mode adopting magnetic coupling resonance can achieve more flexible mid-range energy transmission. Its transmission efficiency and stability largely depend on parameters such as coil design, frequency matching and electromagnetic shielding. The research further points out that electromagnetic field theory can provide a theoretical framework for system design optimization, transmission efficiency improvement and safety enhancement. It also points out the direction for addressing device interoperability and formulating industry standards. The theoretical interpretation of this study helps deepen the scientific understanding of wireless charging technology, promoting its transformation from empirical application to principle-based design. It is of fundamental significance for promoting the standardized development of the technology, enhancing public acceptance, and expanding its innovative applications in the Internet of Things, electric vehicles and other fields.

Keywords

Electromagnetic Field Theory, Wireless Charging, Electromagnetic Induction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 电磁场理论：无线充电技术的物理基石

1.1. 麦克斯韦方程组与电磁场基本规律

麦克斯韦方程组是电磁场理论的基石，能够为理解无线充电技术中的能量传输提供最基本的物理框架。该方程组以积分或微分的形式，系统地描述了电场以及磁场相互激发、转化的基本规律。变化的磁场能够产生涡旋电场，这是由法拉第电磁感应定律所表述的内容；变化的电场以及传导电流可以激发磁场，这是由包含位移电流的安培环路定律所概括的。高斯定律揭示了电场和磁场源的特性，在无线充电场景中，能量通过发射端线圈中时变电流所激发的时变磁场来进行传递，该磁场会在空间当中进行传播，并且作用于接收端的线圈。根据法拉第定律，变化的磁通量能够在接收线圈当中感应出电动势，来驱动负载完成电能的传输。因此，无线能量传输的物理本质，完全蕴含于麦克斯韦方程组所揭示的电磁场动力学行为之中[1]。

麦克斯韦方程组的微分形式可表示为：

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

其中，法拉第电磁感应定律(第三式)直接揭示了时变磁场激发电场的机制，是无线充电接收端感应电动势的根本来源。而安培环路定律(第四式)中的位移电流项 $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ 则描述了时变电场激发磁场的过程，为电磁波的传播与谐振耦合提供了理论基础[2]。

1.2. 电磁感应与磁耦合谐振原理

在无线充电技术中，电磁感应和磁耦合谐振是基于麦克斯韦方程组来开展的两种主流实现方式，其物理机制和适用场景有着很大程度上的差异。电磁感应方式是基于紧耦合变压器原理来开展的，需要将发射线圈与接收线圈紧密对准并且距离极近。其物理机制是源于法拉第定律：当发射线圈当中有高频交变电流时，就会产生时变磁场，该磁场会穿过邻近的接收线圈，进而感应出交变电动势。这种传输工作效率较高，功率较大，但空间自由度较低，主要应用于电动牙刷、手机接触式充电底座等固定位置、短距离的精确对位场景[3]。

磁耦合谐振原理是通过让发射回路与接收回路保持相同的谐振频率来开展工作，实现松耦合情形中的中等距离能量传输。其核心是，谐振能够大幅度提高线圈之间磁场能量的交换效率，即使线圈之间存在一定的错位或者距离，也能维持有效的能量传输通道。该方式牺牲了部分效率以换取空间自由度，适用于为多台设备在一定范围内灵活充电，如消费电子产品的桌面无线充电区域，两者都是基于电磁场理论通过开展不同物理参数的设计，进而满足高功率定点传输以及灵活中距传输差异化需求[4]。

1.3. 近场区电磁能量传输特性

近场区是无线充电技术得以有效开展工作的核心空间域，其电磁场分布以及能量约束条件会直接决定系统的传输性能。根据电磁场理论，近场区是距离辐射源大约一个波长之内的区域，电磁能量主要是以非辐射感应场的形式存在，电场以及磁场分量的相位差大约为 90 度，能量会在源以及周围空间当中开展振荡交换，而非向外进行辐射[5]。对于工作频率处于百 kHz 至十 MHz 量级的典型无线充电系统，它的工作距离远远小于电磁波长，即处于近场区中。在这个区域中，磁场能量会集中在发射线圈附近，其强度会随着距离的增大而快速衰减，一般会遵循和距离立方成反比的规律[6]。这种强烈的空间衰减特性构成了无线充电有效工作距离的物理上限，能量传输效率对线圈间的距离和相对方位极为敏感，近场能量传输本质上来说是受控的局域化能量耦合过程，系统设计需要把该区域电磁场衰减特性以及空间分布模式进行精确匹配，来实现能量高效定向传输[7]。

根据麦克斯韦方程组，在近场区(r)，电偶极子辐射场的电场分量 E_θ 与磁场分量 H_ϕ 可近似表示为：

$$E_\theta \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_0 \sin\theta}{r^3} e^{-jkr}, H_\phi \approx \frac{j\omega p_0 \sin\theta}{4\pi r^2} e^{-jkr}$$

其中 p_0 为偶极矩振幅。可见，电场分量与 r^3 成正比，磁场分量与 r^2 成正比，且两者相位相差 90°，能量主要在源与近场之间振荡交换，而非向外辐射。这一特性决定了无线充电系统的有效工作距离受限于近场区的空间尺度[8]。

2. 无线充电系统的关键原理与实现机制

2.1. 基于电磁感应的紧耦合能量传输

电磁感应紧耦合能量传输是开展短距离并且高效率无线充电的核心机制。其工作原理是基于法拉第电磁感应定律，即变化的磁场会在邻近的导体当中感应出电动势。在典型的紧耦合系统中，发射以及接收线圈通常会选用平面螺旋结构，并且紧密对准放置，间距要远远小于线圈的直径，从而实现磁通交链的最大化[9]。

发射线圈通高频交流电时，周围会产生强度大且集中的交变磁场，该磁场会穿过接收线圈，在接收线圈当中感应出交流电压，经过整流滤波以后就为负载提供电力供应。这种传输方式对线圈的几何参数、相对位置及角度极为敏感，微小的错位或距离增加都会导致磁耦合系数急剧下降，进而显著影响传输效

率，因此系统设计需要精确地优化线圈匝数、形状、尺寸，选用铁氧体等导磁材料来开展磁屏蔽和聚拢，构建起高耦合系数的闭合磁路，以此确保在毫米至厘米级距离中实现高效的能量传输[10]。

2.2. 基于磁耦合谐振的松耦合能量传输

与紧耦合系统不同，磁耦合谐振的松耦合能量传输为中距离以及灵活性充电方面提供了解决方案，其核心是让发射端以及接收端的线圈，都处于相同的谐振频率，通过谐振来增强磁场的强度，从而实现能量在超过线圈直径数倍距离的有效传输。如表 1 所示，当系统发生谐振时，能量主要是通过近场区也就是感应场区的磁场进行耦合交换，即使线圈之间有比较大的轴向距离或者存在一定角度的偏移，还能够维持相对稳定的功率传输。这种传输方式对于线圈之间进行精确对准的要求比较低，可以让设备在一定空间当中自由地放置，极大程度上提高了用户体验。然而，其传输效率很大程度上依赖于频率匹配的精度，如果谐振频率产生偏移，能量的传输效率会立即下降[11]。

Table 1. Analysis and comparison of different transmission modes

表 1. 不同传输方式的分析对比

传输方式	典型工作频率	有效传输距离(与线圈直径关系)	对线圈对准要求	主要应用场景
紧耦合电磁感应	100 kHz~300 kHz	<1 倍直径	极高，需紧密对准	电动牙刷、智能手表、手机接触式充电
松耦合磁谐振	6.78 MHz/13.56 MHz	1~3 倍直径	较低，允许一定偏移	手机、平板电脑桌面无线充电、小型家电

数据来源：无线充电联盟(WPC)Qi 标准与 AirFuel Alliance 谐振标准白皮书。

2.3. 系统效率与功率传输的关键影响因素

系统效率和功率传输性能会受到多重因素所制约。线圈参数属于基础内容，发射以及接收线圈的几何尺寸、匝数以及线径会直接对电感量以及品质因数(Q 值)造成影响，并且决定耦合系数和系统谐振特性。工作频率的选择需要在传输效率以及电磁干扰(EMI)之间取得平衡，如果频率过高，虽然能够提升传输距离，但是会增加涡流损耗以及辐射风险，线圈之间的空间对准包含轴向距离、角度偏移以及中心错位等方面，是对耦合效率产生影响最直接的影响。如果严重失准的话，就会导致磁通交链面积急剧减少。此外，环境当中的金属异物以及交变电磁场会产生干扰，造成能量损耗、频率失谐，甚至带来安全隐患，所以电磁兼容(EMC)设计以及异物检测(FOD)机制是至关重要的[12]。

2.4. 无线充电系统的电路模型与效率定量分析

为从电路层面定量描述无线充电系统的能量传输效率，可建立串联-串联(SS)补偿型磁耦合谐振等效电路模型。该模型由发射端与接收端两个 RLC 串联回路构成，通过互感 M 实现耦合[13]。

设发射线圈与接收线圈的自感分别为 L_1 和 L_2 ，内阻分别为 R_1 和 R_2 ，补偿电容分别为 C_1 和 C_2 ，负载电阻为 R_L 。当系统工作于角频率 ω 且满足谐振条件 $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ ，系统传输效率 η 可表示为：

$$\eta = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{1 + k^2 Q_1 Q_2} \cdot \frac{R_L}{R_2 + R_L}$$

其中， $Q_1 = \frac{\omega L_1}{R_1}$ ， $Q_2 = \frac{\omega L_2}{R_2 + R_L}$ 分别为发射端与接收端品质因数。由上式可知，效率 η 随品质因数 Q_1, Q_2

的增大而提高。这一关系揭示了线圈设计与频率选择对系统性能的定量影响机制。

3. 电磁场理论指导下的技术挑战与优化路径

3.1. 传输效率提升与电磁屏蔽设计

传输效率是无线充电系统实现实用化的核心指标，其损耗主要源于电磁场理论所揭示的多种物理机制。基于麦克斯韦方程组，当交变电磁场在空间当中传播时，会有部分的能量以辐射的形式耗散。如果出现非理想对齐的情况或者是距离增大，辐射耗散就会加剧，同时涡流效应会在邻近金属物体当中产生感应电流，从而产生欧姆损耗；线圈导体的趋肤效应以及邻近效应，增加了在高频情况下的导体损耗。这些损耗机制会直接制约能量传输的有效距离以及功率水平。为提高效率，需要从开展电磁场分布的优化工作着手，如对线圈结构进行精细设计，即利用利兹线、优化匝数与形状等来增强耦合系数，选用低损耗磁芯材料来引导磁力线，减少漏磁[14]。

电磁屏蔽设计是开展抑制干扰与损耗、保障系统稳定性的关键，其理论依据在于利用高导电率或高磁导率材料构成低磁阻路径，为杂散电磁场提供“短路”通道，从而限制其向外部空间扩散或侵入敏感区域。对无线充电系统而言，有效的屏蔽策略是把铁氧体等磁屏蔽材料布置在线圈背部或者周围，约束磁场，减少对周边金属物体进行的涡流加热；同时，运用导电屏蔽层来把关键电路包裹起来，对不必要的电场分量进行吸收或者反射。借助电磁场仿真进行屏蔽体形状、位置以及材料参数的优化，在确保能够高效进行能量传输的同时，可以很大程度上降低电磁辐射对于环境所产生的影响，提高系统电磁兼容性。

3.2. 安全性考量与电磁辐射控制

无线充电系统的广泛应用需要严格去考量它的电磁辐射对人体健康和周边电子设备所带来的潜在影响。电磁场理论为开展评估以及控制提供了基础框架。国际非电离辐射防护委员会以及其他机构制定了电磁场暴露限值标准，其核心依据是电磁波和生物组织进行相互作用所存在的热效应以及非热效应理论。对于工作于百 kHz 至 MHz 频段的典型无线充电系统，其近场区磁场强度是主要评估对象。为了实现将辐射水平控制在安全限值内，需要从源头开展电磁场分布的优化工作。例如采用异物检测技术，在金属异物进入耦合区域时及时降低或切断功率，既可防止过热风险，也能减少因异物扰动导致的异常辐射。对于设备电磁兼容性，需抑制充电过程中产生的高次谐波对通信频段等敏感设备的干扰，这依赖于良好的滤波电路设计与系统整体的电磁屏蔽完整性[15]。

3.3. 互操作性难题与标准化理论依据

互操作性难题是制约无线充电技术规模化应用的关键。其核心在于不同厂商的设备是否可以高效且稳定地开展协同充电。从电磁场理论出发，互操作性实现的基础是要保证设备之间实现电磁兼容，并且实现谐振参数匹配，电磁兼容方面的要求是，要让不同充电设备在共享的电磁环境中，既能够按照预期来开展能量传输工作，同时又不会产生不可接受的电磁干扰。这需要发射端与接收端的电磁场分布、工作频率及谐波特性在设计上遵循共同的理论边界，例如通过标准化的频段划分与调制方式，减少系统间的相互串扰。更为关键的是基于磁耦合谐振的系统中，传输效率对谐振频率的匹配度极为敏感。不同设备的线圈电感、寄生电容等参数存在差异，这会使得固有谐振频率出现偏移，进而破坏最佳磁耦合状态，从而导致效率大幅下降，甚至无法进行充电。因此，标准化理论依据需从电磁场耦合模型出发，对线圈几何参数、品质因数以及系统调谐机制的容许范围进行规定，从而为设备间自动频率匹配以及阻抗调谐提供统一的理论框架，实现在物理层开展奠定跨设备以及跨平台无线充电互操作性基础。

4. 结语

无线充电技术本质上是把电磁场理论运用到现代能量传输的一次实践。本文以麦克斯韦方程组为起点, 系统性地开展电磁感应以及磁耦合谐振这两种无线能量传输方式的物理机制和适用边界的阐释工作, 揭示近场区电磁能量传输衰减规律和空间约束特性。研究表明, 无线充电系统的性能, 包括传输效率、功率密度、空间自由度以及电磁安全性等方面, 从根本上会受制于电磁场近场区的分布形态以及耦合行为。紧耦合方式通过高磁通交链, 也就是依赖高磁通交链来开展工作, 适宜用于短距离、高效率的定点充电场景; 谐振式松耦合通过频率匹配来开展增强磁场能量交换的工作, 进而拓展能量传输的空间维度, 这样就为多设备灵活布局应用提供了可能。与此同时, 开展传输效率的优化工作、进行电磁辐射的控制工作以及实现设备间的互操作性, 都需要基于电磁场理论来开展系统设计以及参数匹配工作。未来, 无线充电技术会持续拓展在物联网、电动汽车、医疗植入设备等领域的应用探索, 这将会对电磁场分布的精细调控、谐振网络的自适应匹配以及复杂环境电磁兼容性的保障提出更高的要求。只有以电磁场理论为根本指导, 方能推动无线充电技术从经验性应用走向原理性设计, 实现其从“可充”向“优充”的根本跃迁。

参考文献

- [1] 汤瑞豪. 无线充电技术应用研究[J]. 汽车知识, 2026, 26(1): 254-256.
- [2] Yadav, A. and Bera, T.K. (2023) Ferrite Shielding Thickness and Its Effect on Electromagnetic Parameters in Wireless Power Transfer for Electric Vehicles (EVs). *Journal of Engineering and Applied Science*, **70**, Article No. 132. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00298-2>
- [3] 刘霞. 无线充电: 迅猛发展易, 保障安全难[N]. 科技日报, 2025-12-11(004).
- [4] 艾森特, 刘奕晨, 杨海军, 等. 无线充电技术在可穿戴治疗设备中的应用研究[J]. 数字通信世界, 2025(11): 15-18.
- [5] 万勇. 磁谐振无线充电技术在矿用传感器上的应用研究[J]. 自动化仪表, 2025, 46(6): 53-57, 64.
- [6] 张龙玺. 磁耦合谐振无线电能传输控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2025.
- [7] 刘祺, 薛明, 章鹏程, 等. 基于无线充电系统的多模块扩展均压技术研究与设计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(22): 6980-6989.
- [8] Chakibanda, V. and Komanapalli, V.L.N. (2023) Optimization in Magnetic Coupler Design for Inductively Coupled Wireless Charging of Electric Vehicle: A Review. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **48**, 14257-14294. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08119-7>
- [9] Verma, A.K., Kanakasabapathy, P. and Sudha, R. (2024) A Non-Radiative Wireless Power Transfer System for Medical Implant Deployment: An Experimental Validation. *Wireless Personal Communications*, **136**, 2443-2456. <https://doi.org/10.1007/s11277-024-11393-9>
- [10] 王馨语, 周王球, 周颢, 等. 磁共振无线充电技术: 进展与展望[J]. 计算机研究与发展, 2025, 62(1): 232-255.
- [11] Panda, B., Rad, F.M. and Rajabi, M.S. (2023) Wireless Charging of Electric Vehicles through Pavements. In: Fathi, M., Zio, E. and Pardalos, P.M., Eds., *Handbook of Smart Energy Systems*, Springer, 3235-3260. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97940-9_212
- [12] 王金明, 胡越, 于长虹, 等. 电动汽车双向无线充电系统及其控制技术研究[J]. 电源学报, 2025, 23(7): 210-217.
- [13] Bornemann, S. (2025) Wireless Interface. In: Bornemann, S., Ed., *Development of a Self-Sufficient, Wireless Sensor Node Using the Outer FML Layer as an Antenna*, Springer, 15-59. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70648-6_3
- [14] 裴明阳, 朱宏昱. 电动汽车动态无线充电路段优化建模方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(10): 135-151.
- [15] 马涛, 裴耀文, 陈丰, 等. 感应充电路面技术研究现状与展望[J]. 中国公路学报, 2022, 35(7): 36-54.