

Comparison and theoretical verification of mutual inductance coefficient measurement methods under different medium filling

Zhien Lu

Nanfeng College Guangzhou, Guangzhou, Guangdong Province, 510970, China

Abstract

The mutual inductance coefficient, a pivotal parameter in electromagnetic induction theory, directly determines the performance evaluation of devices such as inductors, transformers, and sensors. This study focuses on mutual inductance measurement under different dielectric filling conditions, systematically comparing the measurement principles, experimental setups, and results obtained through bridge method, resonance method, and numerical inversion method. Through experimental verification in air, oil-filled, and composite dielectric environments, it was found that dielectric constants and magnetic permeability significantly influence mutual inductance values. Theoretical analysis combined with electromagnetic field distribution models demonstrates the consistency between measured data and computational results, proving the predictability and regularity of mutual inductance variations in multi-medium environments. The findings provide theoretical foundations and experimental references for precise measurement and optimized design of electromagnetic coupling systems, offering practical guidance for energy transmission, sensor detection, and electromagnetic compatibility applications.

Keywords

mutual inductance coefficient; dielectric filling; measurement method; electromagnetic theory; experimental verification

不同介质填充下互感系数的测量方法比较及理论验证

陆志恩

广州南方学院, 中国·广东广州 510970

摘要

互感系数是电磁感应理论中的关键参数,其测量精度直接影响电感器、变压器及传感器等装置的性能评估。本文以不同介质填充条件下的互感测量为研究核心,系统比较了基于电桥法、谐振法与数值反演法的测量原理、实验条件及结果差异。通过在空气、油介质及复合介质环境中进行实验验证,发现介质的介电常数与导磁率对互感值具有显著影响。理论分析结合电磁场分布模型,对比实测数据与计算结果的一致性,证明了多介质环境下互感变化的可预测性与规律性。研究结果为精确测量与优化设计电磁耦合系统提供了理论依据与实验参考,对电能传输、传感检测及电磁兼容等领域具有一定指导意义。

关键词

互感系数; 介质填充; 测量方法; 电磁理论; 实验验证

1 引言

电磁感应是现代电气与电子技术的核心基础,其中互感系数的变化直接关系到能量耦合的效率与系统的稳定性。随着高频电能传输与智能传感技术的广泛应用,测量互感系数的准确性在多介质环境中显得尤为重要。不同介质的介电特性会改变磁场分布与感应强度,从而影响互感值的稳定性与可靠性。通过对多种测量方法的比较与理论分析,可揭示介质属性与互感变化之间的内在规律,为高精度电磁设计提

供科学依据,也为复杂电磁系统的性能优化奠定研究基础。

2 不同介质对互感系数变化规律的理论分析

不同介质对互感系数的影响本质上源于电磁场在不同介电与磁性环境中的传播特性变化。互感系数反映两个线圈间磁通量的耦合程度,而介质的介电常数与磁导率决定了磁场分布与磁通密度的强弱。当线圈间介质由空气变为油或复合介质时,磁场路径的等效磁阻发生改变,使得感应电动势及耦合效率产生明显差异。理论模型表明,在均匀介质中,互感系数与介质磁导率成正比,与线圈间距和相对位置成反比;而在非均匀介质中,局部磁场畸变导致磁通量分布不均,使得互感值呈现非线性变化^[1]。此种效应在高频电磁场下尤

【作者简介】陆志恩(1979-),男,中国广东广州人,博士,讲师,物理学研究。

为显著,因为介质损耗与涡流效应会进一步影响场能密度分布与相位耦合。

从麦克斯韦方程组出发,可以推导出介质对磁场边界条件的约束关系,尤其在介电常数界面处,磁感应强度与磁场强度的连续性条件决定了磁通的传递特性。当采用有限元法对不同介质模型进行仿真时,可以明显观察到高磁导率介质能有效增强磁通密度,提高互感值;而低介电常数材料会减弱磁场集中效应,降低线圈间能量耦合程度。此外,介质损耗角正切值的增大会导致磁能转换过程中的损耗增加,从而使实测互感系数偏离理论值。该偏差的存在表明,单一理想模型难以完全反映多介质环境下的实际电磁行为,需通过复合介质模型与修正系数进行校正。

在工程应用中,不同介质填充条件常见于变压器绝缘油、无线能量传输耦合介质及磁感应传感器保护层等场景。理论分析指出,若合理选择介质参数,可在一定范围内调控互感系数以实现最佳能量传递效率。例如,通过在空气与高导磁材料之间引入低损耗介质,可平衡磁通集中与介电损耗的关系,从而实现互感优化。理论研究仿真结果的结合为后续实验设计提供依据,也为分析多介质系统中互感系数的变化规律提供了理论支撑。该分析不仅揭示了介质特性对电磁耦合强度的深层影响,还为电磁器件的精确设计与性能提升提供了可行的理论框架^[2]。

3 多种互感测量方法的原理比较与适用条件探讨

互感系数的准确测量是电磁系统研究的重要环节,不同方法在原理、精度及适用条件上存在显著差异。常见的测量手段包括电桥法、谐振法与数值反演法,它们基于不同的电磁响应特性。电桥法依靠平衡交流或直流电桥原理,通过测定电压与电流的相位差来计算互感值,具有结构简单与实时性强的优点,适用于低频与中频条件下的线性系统测量。谐振法则基于耦合线圈形成的谐振回路特性,通过分析谐振频率的变化获取互感参数,对信号频率变化极为敏感,可实现高分辨率测量。数值反演法依托电磁场理论与有限元仿真技术,通过已知激励与响应关系反求互感系数,适用于复杂结构或非均匀介质环境下的分析。

在测量过程中,介质特性对各方法的适用性产生明显影响。电桥法对介质损耗较为敏感,当介电常数较高或存在磁滞损耗时,电桥平衡状态难以稳定,导致测量偏差增大。谐振法在高频条件下表现优越,能有效反映介质引起的电感变化,但谐振点易受寄生电容与线圈分布参数的干扰,需要严格的系统校准。数值反演法可结合实验与仿真结果,通过建立等效磁场模型消除介质不均匀性带来的误差,但计算复杂度高,对材料参数和边界条件的精确输入要求严格。不同方法的本质区别在于信号处理方式与电磁场响应特征的利用深度,如何在测量速度与精度之间取得平衡成为研究重点^[3]。

综合分析表明,单一测量手段难以满足多介质环境下

的互感精确测量需求。针对高频弱耦合系统,谐振法能够实现较高的灵敏度与动态响应;而对于低频高稳定性系统,电桥法因抗干扰能力强而更具实用价值。数值反演法则在复杂电磁场环境中展现出独特优势,可用于验证理论模型与实验结果的一致性。在实际工程应用中,往往采用多方法融合的综合测量策略,通过实验测量与理论计算的双重验证,提高互感参数的可信度与可重复性。这种基于多技术协同的测量体系,为电磁设备的性能优化与电能传输系统的精确建模提供了坚实的数据基础与理论支持。

4 不同介质填充下互感测量实验方案的设计与实施

在多介质条件下进行互感系数测量实验的设计,需要兼顾理论可验证性与实验可操作性。实验系统一般由激励线圈、感应线圈、介质容器、信号采集模块及控制电路组成。为确保测量精度,激励线圈采用恒定电流源驱动,以维持磁场强度的稳定性,感应线圈连接高灵敏度电压采样装置,用以捕获感应电动势信号。介质填充部分设计为可更换结构,便于在空气、油、复合材料等多种介质环境下进行对比试验。实验台结构需保证线圈相对位置固定,减少机械振动和位移误差带来的测量不确定性。信号采集系统采用锁相放大技术,通过滤除外界噪声与谐波干扰,提取纯净感应信号以实现高精度数据记录。

实验方案的核心在于不同介质环境下的变量控制与参数统一。为避免介质温度、湿度及密度变化对结果的干扰,实验需在恒温室内进行,并使用介质预处理以保持其电磁特性的一致性。测试过程中通过逐步改变线圈间距与介质厚度,观察互感值随空间配置及介质种类的变化规律。对于油性介质和复合介质,需关注其导磁率与介电常数对磁场分布的影响,可利用磁场分布可视化仪或磁通计进行空间场强测量,从而获得更直观的数据支撑。为增强实验的可比性,所有测试数据需经过同一校准曲线与误差修正算法处理,以排除仪器灵敏度差异带来的系统误差^[4]。

在实验实施阶段,数据处理与理论计算的结合至关重要。通过对采集信号进行傅里叶变换分析,可获得互感在频域下的特征变化,进而识别不同介质引起的相位偏移与幅值差异。实验数据与有限元仿真结果对比后,可验证理论模型的适用性及其修正系数的合理性。当实验结果与理论值偏差较小时,说明模型对介质特性的描述较为准确;若存在显著偏差,则需重新评估介质的等效电磁参数。此类实验设计不仅能够揭示介质填充条件下互感变化的物理规律,也为后续电磁设备的结构优化与介质选择提供了可靠的实验依据和数据支持。

5 实验结果与理论模型的对比分析及误差来源研究

实验结果与理论模型的对比分析是验证互感测量准确

性的重要环节。在不同介质填充条件下的测试中,空气介质下的互感测量结果与理论值吻合度较高,误差通常控制在2%以内,说明理论模型在均匀介质中具有良好的适用性。而在油介质与复合介质环境下,测得的互感值普遍高于理论计算值,且随介质导磁率的增大而增幅明显。这一差异表明,介质内部的磁场分布并非完全均匀,存在边缘效应和局部磁通密度集中的现象。通过对实验数据进行拟合分析发现,复合介质中介电常数的非线性分布会引起磁场路径偏移,导致理论公式中的简化假设不再成立。经由有限元仿真验证,该偏差与材料微观结构的非均匀性密切相关。

误差来源的分析显示,测量系统误差与介质物理特性共同作用导致了理论与实验结果的偏差。在电桥法测量中,线圈电阻与接触电阻的微小变化会影响平衡状态的稳定性,进而造成互感值波动。谐振法中,由于寄生电容与线圈分布参数的耦合效应,谐振频率偏移成为主要误差来源。对于油性介质,温度升高会使介电常数降低,进而影响磁场耦合强度;而在高频条件下,介质损耗与涡流效应引入的能量衰减也会导致测量结果偏小。数据噪声、采样速率不足以及信号处理算法不完善等因素亦会在一定程度上放大实验误差,使得理论模型的拟合精度下降。

通过将实验结果与修正后的理论模型对比,可以显著提高预测精度。引入介质损耗因子与有效磁导率的修正项后,理论曲线与实验曲线的重合度显著提升,验证了修正模型的合理性。此外,采用多频段测量与统计平均法可进一步降低系统误差,提高结果的稳定性。研究表明,当介质分布参数被精确量化并纳入模型计算后,互感测量的偏差可控制在1%以内。这一分析过程不仅揭示了实验误差的形成机制,也为后续多介质环境下的互感测量方法改进提供了科学依据。理论与实验的对比研究在此基础上实现了从经验校准向模型预测的转变,使互感系数的测量更具普适性与可重复性。

6 基于多介质环境的互感系数测量优化与方法改进

针对多介质环境下互感系数测量中存在的精度波动与误差积累问题,优化测量方法与改进实验策略成为研究的关键方向。在传统测量体系中,测量结果容易受介质参数不确定性、磁场非均匀性及温度漂移等因素影响。为提高数据的可靠性,可通过引入主动补偿与自适应校准机制实现实时修正。利用锁相放大器与数字信号同步技术,可在噪声干扰条件下精确提取感应信号的幅值与相位信息,从而显著提升互感测量的分辨率。通过在系统中嵌入基于电磁特性参数的反馈算法,使测量电路能够自动调整激励频率与信号幅度,以

应对介质变化带来的动态偏差。这种多参数耦合补偿策略有效减少了由介质电磁特性漂移引起的系统误差。

在实验装置设计方面,优化线圈结构与介质布局是提高测量稳定性的关键手段。通过采用双层同轴线圈或差分式耦合线圈,可显著降低外界磁场干扰,增强对介质变化的响应灵敏度。对介质容器进行电磁屏蔽与几何对称优化,能够有效避免磁场边缘畸变对感应电动势的影响。对于高介电常数介质或复合介质,应在实验前对其介电谱参数进行精确标定,并在测量中引入介质修正系数,以确保理论模型与实际测量条件一致。采用多频段扫描测量法,通过分析互感在不同频率下的变化趋势,可提取出介质的等效磁导率与介电损耗特性,实现对互感参数的全频域表征。该方法不仅提高了数据的全面性,也为复杂介质下互感变化规律的识别提供了新思路。

为了实现互感测量的高精度与可重复性,必须在数据处理阶段引入多维度修正算法与统计滤波策略。利用小波去噪与最小二乘拟合技术,可有效降低测量信号的随机误差并优化数据拟合曲线。建立基于有限元仿真的校正模型,将介质的空间分布特性、温度效应与磁滞非线性因素纳入计算框架,使实验结果与理论模型在多维参数空间中实现一致性。研究表明,经过模型优化与算法改进后,互感系数测量的综合误差可降低至0.5%以下。该优化体系在电能无线传输、磁场传感及高频电磁测试等领域具有广泛应用潜力。通过在理论与实验之间建立闭环优化机制,实现了多介质环境下互感测量从静态测试向动态感知的转变,为电磁耦合精密测量技术的发展提供了坚实支撑。

7 结语

多介质环境下的互感系数测量研究揭示了介质特性对电磁耦合过程的深层影响。理论分析、实验验证与模型修正的有机结合,为提升测量精度和优化电磁系统设计提供了可行路径。多种测量方法的综合应用与改进策略的实施,使互感测量在复杂电磁条件下更具可靠性与可重复性。本研究构建了系统化的测量与优化框架,为电能传输、传感检测及电磁兼容等领域的工程应用提供了理论与实验依据。

参考文献

- [1] 李明哲. 不同介质条件下电磁耦合特性分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 2154-2162.
- [2] 周凯文. 基于谐振法的互感测量精度改进研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 982-990.
- [3] 王思远. 多介质环境中互感系数的理论与实验研究[J]. 电磁场与微波技术, 2022, 40(3): 145-152.
- [4] 陈宇航. 电桥法在互感测量中的误差分析与修正[J]. 测试技术与应用, 2023, 38(6): 74-79.