

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514587

基于叠阵涡流的核燃料包壳管电导率和壁厚同时测量方法*

黄 璞, 韩 正, 彭丽莎, 李世松, 黄松岭

(清华大学电机工程与应用电子技术系 北京 100084)

摘 要:燃料组件是核反应堆中关键的释热部件,承担着核能发电的能量转换功能。其中,锆合金包壳作为燃料棒的第 1 道安全屏障,不仅承担导出裂变热的重要任务,还能有效阻止放射性裂变产物的逸散。在核电站运行过程中,包壳管长期处于高温、高压、强辐照等苛刻工况下,其壁厚和材料性能可能发生退化,包壳管壁厚和电导率的高精度表征已成为核电安全检测领域亟待突破的关键技术难题。针对锆合金包壳管的快速、精确检测需求,提出了一种基于叠阵涡流传感器的扫频检测方法。首先,设计了一种由 3 个绝对式线圈构成的同轴叠阵涡流探头,通过多线圈布局增强对管材不同深度电磁特性的响应能力。根据该涡流传感器的结构配置,建立管道涡流检测的解析理论模型。基于解析理论模型,在扫频模式下提取各线圈自感变化的交叉频率,根据解析计算结果发现交叉频率的对数与提离距离呈线性关系,该线性关系的斜率仅取决于壁厚,且与被测材料的电导率无关,进而可通过拟合直线的斜率估算壁厚。随后,将包壳管涡流检测问题转化为最小二乘参数反演问题,将壁厚测量结果作为先验信息,采用改进 Newton 迭代算法反演包壳管电导率。最后,搭建涡流检测平台验证所提方法的有效性,实验验证表明所提方法的最大相对测量误差仅为 1.7%,可以应用于包壳管池边在线检测。

关键词:叠阵涡流检测;核燃料包壳管;电导率;壁厚;扫频测量

中图分类号: TH878 TM154 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.40

Simultaneous measurement method for conductivity and wall thickness of nuclear fuel cladding tubes based on stacked array eddy current testing

Huang Pu, Han Zheng, Peng Lisha, Li Shisong, Huang Songling

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Fuel assemblies, serving as the heat-releasing components within nuclear reactors, constitute the energy source for nuclear power generation. Among these, the zirconium-based cladding of nuclear fuel acts as the primary safety barrier in nuclear power plants. It effectively prevents the dispersion of fission products while conducting heat away, thereby avoiding fuel corrosion due to cooling. Therefore, the structural characteristics of cladding tubes are closely related to the performance of fuel assemblies. Conducting effective non-destructive testing on zirconium-based fuel cladding to achieve high-precision wall thickness and electrical conductivity characterization remains a critical challenge in nuclear safety inspection. This article investigates a novel stacked eddy current sensor for the conductivity and thickness measurement of a cladding tube. Firstly of all, a stacked array eddy current sensor consisting of three absolute coils is designed. Based on the structural configuration of this sensor, the analytical solution is established for cladding tube detection. Based on the analytical solution, the cross-frequency of self-inductance can be extracted in sweep mode. Moreover, the logarithm of the cross-frequency exhibits a linear relationship with the lift-off distance. The slope of this linear relationship depends solely on the wall thickness and is independent of the conductivity of the material. Consequently, the wall thickness can be estimated by the slope of the fitting line. Subsequently, the eddy current testing problem can be transformed into a least-squares problem for the cladding tube. Taking the wall thickness measurement results as prior information, the conductivity of the cladding tube is inverted through the improved Newton iteration algorithm. Finally, the eddy current testing experiment platform is established to validate the effectiveness of

收稿日期: 2025-10-16 Received Date: 2025-10-16

* 基金项目: 国家自然科学基金(U23B20113, 52507011)项目资助

the proposed method, and the results show that the maximum measurement error of the proposed method is only 1.3%.

Keywords: stacked array eddy current testing; nuclear cladding tube; conductivity; wall thickness; sweep frequency measurement

0 引 言

核电发展是能源战略的重要组成部分,随着核工业的快速发展,核安全始终是备受关注的核心议题。燃料组件作为核反应堆内的发热元件,是核电发电的能源来源^[1]。核反应堆结构主要由二氧化铀燃料棒、支撑组件及核燃料包壳构成。锆合金因其热中子吸收截面小、导热性高、熔点高、抗水侧腐蚀性强及机械强度高特性,目前已成为最常用的燃料包壳材料^[2]。因此,锆基包壳是核电站的首道压力边界与安全屏障。

实际上,锆基包壳的氢吸附行为会破坏其晶粒的完整性,降低锆基包壳的韧性和强度。若氢吸附量超过锆合金的溶解极限,锆的氢化物将析出,这对核燃料包壳具有极大的破坏性。包壳管减薄还可能诱发氢脆、微裂纹及氢泡,进而导致腐蚀和壁厚减薄。因此,准确检测锆基包壳厚度至关重要。此外,包壳管的电导率与其结构和强度信息密切相关,监测电导率变化可以评估其在服役过程中的性能劣化,为预测性维护和安全预警提供关键依据^[3]。当前主流检测方法是热室检测法,需将核燃料组件运入热室进行破坏性分析。相较于该方法,基于无损检测技术的池边在线检测技术在锆基包壳安全检测方面具有显著优势。

金属管材常用的无损厚度测量方法主要包括超声波检测、射线检测和涡流检测^[4-7]。超声检测技术具有扫描速度快、分辨率高、探伤能力强等优势,且不受被测件导电性限制。其缺点包括需使用耦合剂,以及超声作用机制复杂多样。除此之外,射线成像技术能够获取三维视觉图像,且数据可快速便捷地进行分析。其缺点在于检测效率低、检测成本高、安全性较低,不适用于检测平面薄板构件及大型构件的现场检测。尽管如此,该方法仍存在检测效率低、成本高昂及安全性不足的问题。常用的金属电导率测量方法主要包括四探针检测、微波谐振腔测量和涡流检测^[8-10]。直流四探针检测方法原理,其具有操作方便、速度快、检测可靠性和效率高的优点,但是该方法要求试件的体积参数如长、宽、高需遵循一定的比例,且接触测量容易损伤试件。微波谐振腔测量方法具有测量精度高,适用范围广,操作方便,易于实现自动化检测。然而,微波谐振腔法只能在离散频率点测量,频带宽度较窄,且灵敏度受工作频率的限制。此外,微波源对人体有伤害,对操作者要求高,检测结果受试件的几何形状、振动、电磁波干扰的影响。涡流检测技术具有非接触检测,无需耦合介质,灵敏度较高,检测速度快,可以实

现电导率和厚度的同时测量^[11-12]。然而,涡流响应信号包含丰富的参数耦合信息,检测结果易受到提离距离波动的影响^[13-14]。

为克服提离距离对检测精度的影响,有研究提出了一种基于可调基准电压的电路方案。其核心思路是通过分析提离距离对探头线圈电压的作用,相应调整基准电压,以此实现信号相位与幅值的解耦^[15]。此外,自动补偿提离效应的算法也已取得进展。Huang 等^[16-19]采用“一激多收”的传感器结构,提出了一系列提离距离波动抑制方法,提高电磁参数和厚度的测量精度。该类算法通过分析提离距离与探头差分信号的变化规律,动态修正其对测量结果的影响,从而有效提升检测的可靠性。除此之外,一些涡流响应信号特征,例如脉冲涡流的提离距离交叉点和扫频涡流的提离距离不敏感点,提供了抑制提离效应的新途径^[20-22]。

近年来,为了解决涡流检测过程中参数耦合效应干扰以实现更精确可靠的测量,北京航空航天大学 Chen 等^[23]将涡流参数测量问题构建为最小二乘优化模型,并基于有限元法与 Dodd-Deeds 正向模型,采用改进的 Levenberg-Marquardt 算法实现了金属材料电磁参数的有效解耦。近两年,曼彻斯特大学团队采用基于最小二乘的多参数测量方法应用于金属管道、金属球的电磁参数测量中,并取得不错的测量精度^[24]。然而,迭代初始值的选取对上述方法的有效性至关重要。Adewale 等^[25]通过瞬态响应解耦电导率,利用稳态响应确定磁导率。电子科技大学 Yu 等^[26]采用有限元数值模型发现同轴涡流传感器在特定的激励频率和提离距离下,涡流信号对多层构件中某一层的电导率变化不敏感,基于该特性可以实现电磁解耦。此外,机器学习也展现出其在建模复杂关系、从涡流检测数据中实现材料特性多参数解耦测量^[27]。

本文提出了一种基于锆基包壳的叠阵涡流扫频检测方法。首先,设计了一种由 3 个绝对线圈构成的叠阵涡流传感器,并据此建立管道涡流检测的解析模型。基于该模型,在扫频过程中提取自感变化的交叉频率,其对数与提离距离呈线性关系,且该线性关系的斜率仅取决于壁厚,与材料电导率无关,从而可通过拟合直线斜率估算壁厚。进一步地,将包壳管涡流检测问题转化为最小二乘问题,以壁厚测量结果为先验信息,采用改进 Newton 迭代算法反演其电导率。最后,通过搭建实验平台验证所提方法的有效性,实验结果显示最大测量误差为 1.7%。

1 解析理论模型分析

图1为包壳管检测示意图,线圈靠近包壳管,且管轴与线圈轴相互垂直。假设线圈的匝数为 N ,线圈的内径和外径分别表示为 r_{e1} 和 r_{e2} ,高度和提离距离分别表示为 h 和 b 。线圈中通过幅度为 I 、角频率为 ω 的交流电流。

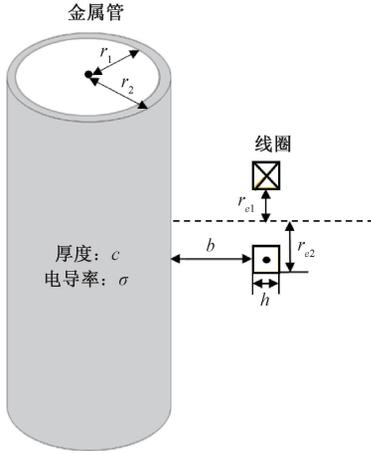


图1 包壳管涡流检测示意图

Fig. 1 Diagram of eddy current testing for cladding tube

首先,建立金属管检测解析理论模型,定量分析金属管厚度、电导率和涡流信号的关系。为处理涡流场的边值问题,引入二阶磁矢量势方法以简化电磁场分析过程。结合勒让德函数性质与贝塞尔函数加法定理,推导了线圈区域在局部球坐标系下的磁标量势,并将全局柱坐标系进一步扩展^[28]。基于磁场密度与磁标量势的关系,线圈自感的变化可相应表达为式(1)。

$$\Delta L = \frac{8N^2\pi^2}{\mu_0 I^2} \int_0^\infty \sum_{m=-\infty}^{\infty} \alpha^2 C_s(\alpha, m) \frac{C_s(\alpha, m)}{K_m(|\alpha|(r_1 + c))} d\alpha \quad (1)$$

$$\left[\frac{\alpha_k^2 S}{\alpha^2} \Gamma - I_m(|\alpha|(r_1 + c)) \right] d\alpha$$

式中:

$$C_s = n \int_b^{h+b} \int_{r_{e1}}^{r_{e2}} C_{ss} dcd r_0 \quad (2)$$

$$C_{ss} = \frac{j\mu_0 I}{\alpha^2 \pi^2} \int_{r_2}^{r_2+b} (C_{sa} + C_{sb}) \sin(\alpha \sqrt{(r_1 + c)^2 - \kappa^2}) d\kappa \quad (3)$$

$$C_{sa} = \frac{d|\alpha|}{\sqrt{d^2 + \kappa^2}} K'_m(|\alpha|\sqrt{d^2 + \kappa^2}) \cos\left(m \cdot \arctan \frac{\kappa}{d}\right) \quad (4)$$

$$C_{sb} = \frac{m\kappa}{d^2 + \kappa^2} K_m(|\alpha|\sqrt{d^2 + \kappa^2}) \sin\left(m \cdot \arctan \frac{\kappa}{d}\right) \quad (5)$$

$$S = \frac{|\alpha|}{\alpha_k} [I'_m(|\alpha_0|r_2) - I_m(|\alpha_0|r_2)M] \quad (6)$$

$$\Gamma = \frac{FI_m(\alpha_k r_1) - EK_m(\alpha_k r_1)}{\Lambda} \quad (7)$$

$$\Lambda = BE - AF \quad (8)$$

$$A = \frac{\alpha_k MI_m(\alpha_k(r_1 + c))}{|\alpha|} + \frac{m^2 k^2 [LI_m(\alpha_k(r_1 + c)) + (r_1 + c)GU]}{\alpha_k^2 \alpha^2 (r_1 + c)^2} - I'_m(\alpha_k(r_1 + c)) \quad (9)$$

$$B = \frac{\alpha_k MK_m(\alpha_k(r_1 + c))}{|\alpha|} + \frac{m^2 k^2 [LK_m(\alpha_k(r_1 + c)) + (r_1 + c)HU]}{\alpha_k^2 \alpha^2 (r_1 + c)^2} - K'_m(\alpha_k(r_1 + c)) \quad (10)$$

$$E = \frac{\alpha_k NI_m(\alpha_k r_1)}{|\alpha|} + \frac{m^2 k^2 [PI_m(\alpha_k r_1) + r_1 GV]}{\alpha_k^2 \alpha^2 (r_1 + c)^2} - I'_m(\alpha_k(r_1 + c)) \quad (11)$$

$$F = \frac{\alpha_k NK_m(\alpha_k r_1)}{|\alpha|} + \frac{m^2 k^2 [PK_m(\alpha_k r_1) + r_1 HV]}{\alpha_k^2 \alpha^2 (r_1 + c)^2} - K'_m(\alpha_k(r_1 + c)) \quad (12)$$

$$G = \frac{I_m(\alpha_k r_1)}{r_1} - \frac{QI_m(\alpha_k(r_1 + c))}{(r_1 + c)} \quad (13)$$

$$H = \frac{K_m(\alpha_k r_1)}{r_1} - \frac{MK_m(\alpha_k(r_1 + c))}{(r_1 + c)} \quad (14)$$

$$M = \frac{K'_m(|\alpha|r_1)}{K_m(|\alpha|r_1)} \quad (15)$$

$$N = \frac{I'_m(|\alpha|r_1)}{I_m(|\alpha|r_1)} \quad (16)$$

$$L = \frac{K_m(|\alpha|(r_1 + c))}{K'_m(|\alpha|r_1)} \quad (17)$$

$$P = \frac{K_m(\alpha_k r_1)}{K'_m(\alpha_k r_1)} \quad (18)$$

$$U = \frac{I_m(\alpha_k(r_1 + c)) - LI'_m(\alpha_k(r_1 + c))}{J} \quad (19)$$

$$V = \frac{I_m(\alpha_k r_1) - PI'_m(\alpha_k r_1)}{J} \quad (20)$$

$$Q = \frac{K'_m(\alpha_k r_1)}{K'_m(\alpha_k(r_1 + c))} \quad (21)$$

$$J = I'_m(\alpha_k r_1) - QI'_m(\alpha_k(r_1 + c)) \quad (22)$$

$$\alpha_k = \sqrt{\alpha^2 + j\omega\sigma\mu_0} \quad (23)$$

式中: α 表示积分变量; r_1 和 r_2 分别表示包壳管内半径和

外半径; σ 和 c 分别为包壳管的电导率和壁厚; μ_0 为空气的磁导率; I_m 和 K_m 分别表示 m 阶第1类和第2类修正贝塞尔函数。

2 有限元数值仿真验证

为了进一步验证解析解的正确性,进一步建立三维有限元数值仿真模型,如图2所示。整个模型由空气域、线圈和包壳管组成。模型中包壳管的长度为200 mm,线圈的内半径和外半径分别为1和3 mm,高度为2 mm。对激励线圈施加的激励电流幅度为1 A,激励频率范围为10 Hz~1 MHz。线圈自感变化解析与数值计算结果如图3所示,二者的计算趋势吻合良好,最大计算误差仅为0.5%。误差的来源一方面来自于高频下趋肤效应导致涡流渗透深度较浅,需要进行更加细致的网格划分,另一方面解析模型在推导过程中存在理论近似。尽管如此,上述结果在一定程度上表明所提出的解析理论模型是正确的。

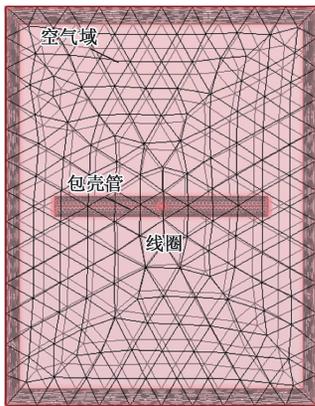


图2 商业有限元数值仿真模型

Fig. 2 Commercial finite element numerical simulation model

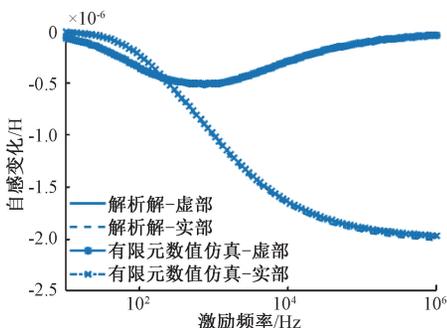


图3 包壳管涡流检测解析解与有限元数值解计算结果对比

Fig. 3 Comparison of analytical solutions and finite element numerical solutions for cladding tube

3 包壳管电导率和壁厚测量方法

3.1 涡流扫频信号交叉频率特征提取及壁厚测量

交叉频率是涡流扫频测量信号中的关键频率,对应于互感变化实部与虚部相等的频率点,如图4所示。从物理机制来看,自感变化的实部随频率升高而下降,反映了反射磁通量的增加,这一现象与集肤效应密切相关^[29]。而自感变化的虚部则代表导电线中涡流引起的热损耗。因此,交叉频率可视为集肤效应与涡流热损耗达到动态平衡的特征频率。实际上,峰值频率容易受到温度漂移、探头提离效应,以及电磁噪声等干扰因素的影响。一个微小的扰动就可能导致峰值频率的误判,稳定性较差。相比于峰值频率,交叉频率是由两条曲线的整体趋势共同决定的,通过拟合或寻找趋势交点的方法来确定交叉频率,可以有效平滑随机噪声的干扰,使得测量结果更加稳定和可靠。这种方法对测量系统的轻微波动不敏感,具有更好的鲁棒性。

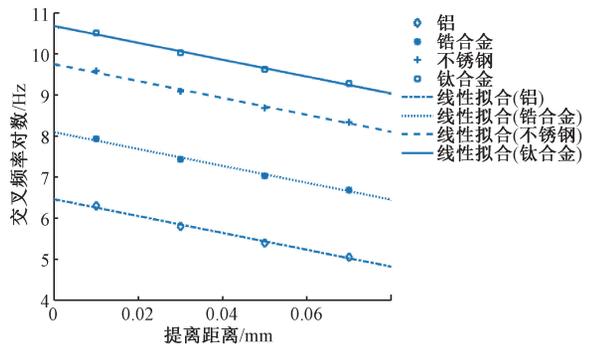


图4 不同材料下交叉频率随提离距离变化

Fig. 4 Crossover frequency variation with lift-off distance under different materials

图5展示了不同电导率管道(包括铝、铝合金、不锈钢和钛合金)中交叉频率对数与离壁距离的关系。由于交叉频率表征集肤效应与涡流热损耗达到动态平衡的特征频率,该特征与涡流能量密切相关。涡流能量反射的二次磁场随着传播距离的增加以指数形式衰减,因此采用线性拟合表征提离距离与交叉频率的对数之间的关系,如图5所示。表1所示为不同金属管电导率和厚度对拟合斜率的影响,可以从表中看出拟合直线的斜率不受金属管电导率变化,最大相对偏差也仅为0.1%,可以用于测量管道壁厚信息,且不受电导率变化的影响。

采用解析方法计算了不同壁厚管材自感变化的交叉频率。提取各壁厚对应的交叉频率后,利用图6中的拟合直线描述了不同金属管壁厚下提离距离与交叉频率

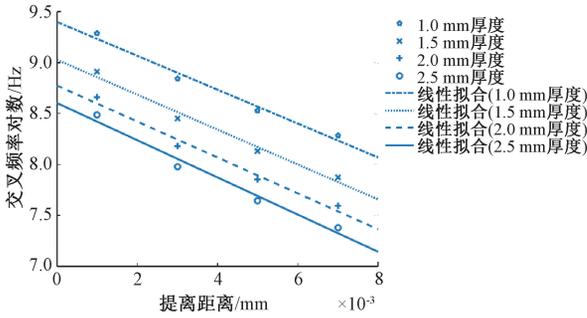


图5 不同厚度下交叉频率随提高距离变化

Fig. 5 Crossover frequency variation with lift-off distance under different thicknesses

表1 不同金属管电导率和厚度对拟合斜率的影响

Table 1 Effect of conductivity and thickness of different metal tubes on fitting slope

材料	厚度/mm		
	1.0	1.5	2.0
铝	-166.23	-171.34	-176.76
铝合金	-166.22	-171.34	-176.75
不锈钢	-166.22	-171.33	-176.74
钛合金	-166.21	-171.32	-176.74

对数值之间的关系,所有拟合直线的决定系数(R^2)均>0.98。如图6所示,拟合直线的斜率随壁厚增加而逐渐增大。因此,结合不同提高距离下的交叉频率对数拟合直线,通过拟合直线斜率实现对壁厚反演,该拟合直线的 R^2 值接近1,且该特性不受提高距离和电导率的影响。

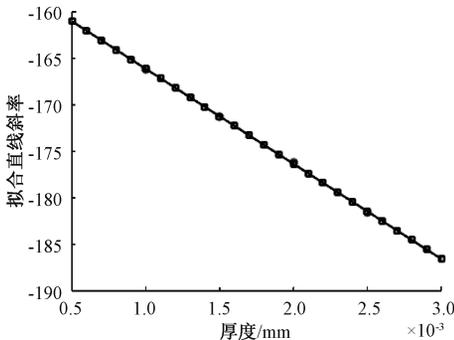


图6 线性拟合表征壁厚和拟合直线斜率关系

Fig. 6 Fitting lines characterizing the relationship between the thickness and slope of the fitting line

3.2 基于Newton迭代反演的多参数测量方法

根据包壳管壁厚测量结果,本节进一步将电导率反演问题转化为数学优化问题,把实际测量得到的检测信号与解析计算正问题模型产生的输出信号进行比较,得

到评估因子。调整待测参数,继续比较直到评估因子满足条件为止,得到最终的电导率反演结果。在求解该问题时,将原问题转化为最小二乘问题,利用Newton迭代法求解待测参数。

涡流解析理论模型具有计算速度快、数值计算稳定的优点,可以被用来计算涡流正问题。反问题是根据与频率相关的电感测量值来确定待测构件的电导率。由于迭代算法的收敛特性,改进的Newton迭代方法可以调整每个待测参数,在最小二乘意义上拟合互感。上述最小二乘问题的定义为:

1) $\Delta L_0 \in R^m$: 以矢量形式排列的观测自感变化(包括自感的实部和虚部), m 是测量频率的个数。

2) $F: R^n \rightarrow R^m$: 将具有 n 个自由度($n=2$,分别为电导率,厚度)的输入信号映射到一组 m 个互感变化观测值函数, F 可以通过解析模型计算。

3) $\phi = 1/2 [F - L_0]^T [F - L_0]$: 是测量自感和估计互感的平方误差。

优化问题是寻找到点 (σ^*, c^*) 使得 ϕ 在最小二乘意义下局部最优,为了寻找合适的最优值 (σ^*, c^*) 以使 ϕ 最小,计算 ϕ 对 (σ, c) 的偏导,并令结果等于零矢量,可以得到式(24)。

$$\phi' = [F']^T [F - M_0] = 0 \quad (24)$$

式中: F' 是雅可比矩阵,因为 F 是 (σ, c) 的非线性函数,对 ϕ' 在参考点 $(\hat{\sigma}, \hat{c})$ 进行泰勒展开,并作线性化处理,可以得到式(25)。

$$\phi' \approx \phi'([\hat{\sigma}, \hat{c}]) + \phi''([\hat{\sigma}, \hat{c}])[\Delta\sigma, \Delta c]^T \quad (25)$$

式中: $[\Delta\sigma, \Delta c]^T = [\sigma, c]^T - [\hat{\sigma}, \hat{c}]^T$; $\phi''([\hat{\sigma}, \hat{c}])$ 是黑塞矩阵,该项较难计算,可以通过式(26)在 $[\hat{\sigma}, \hat{c}]^T$ 处附近进行局部近似计算^[30]。

$$\phi''([\hat{\sigma}, \hat{c}]) = [f'([\hat{\sigma}, \hat{c}])]^T [f'([\hat{\sigma}, \hat{c}])] \quad (26)$$

将式(24)和(26)代入式(25),并求解 $[\Delta\sigma, \Delta c]^T$,可以进一步得到式(27)。

$$[\Delta\sigma, \Delta c]^T = - [[f'([\hat{\sigma}, \hat{c}])]^T [f'([\hat{\sigma}, \hat{c}])]]^{-1} \cdot [f'([\hat{\sigma}, \hat{c}])]^T [f'([\hat{\sigma}, \hat{c}]) - L_0] \quad (27)$$

$F'([\hat{\sigma}, \hat{c}])$ 可以采用微扰法计算,微扰法的原理是通过单一参数的微小扰动所引起的互感变化除以参数的变化来近似代替,即差商代替导数。

采用Newton迭代法进行求解,为了简化表示法,使用 J 近似表示雅可比矩阵,迭代公式可以表示为式(28)和(29)。

$$[\Delta\sigma, \Delta c]^T = - [J^T J]^{-1} J^T [f'([\hat{\sigma}, \hat{c}]) - L_0] \quad (28)$$

$$[\sigma, c]^T = [\hat{\sigma}, \hat{c}]^T + [\Delta\sigma, \Delta c]^T \quad (29)$$

在迭代的过程中,厚度的初始值采用基于交叉频率特征反演的结果。根据低导电金属材料的电磁特性,电导率的初始值设置为1 MS/m。

根据上述分析,采用由 3 个同轴线圈组成的叠阵涡流传感器。如图 7 所示,3 个线圈在测量金属管过程中位于不同的提高距离,每个线圈以扫频模式测量自感变化信号,并提取对应的交叉频率。随后采用线性函数拟合 3 组交叉频率对离壁距离的对数关系,据此估算拟合直线的斜率,并反演初始壁厚,该方法不受管材导电性影响。在此基础上,进一步采用 Newton 迭代算法反演最终金属管的电导率和壁厚,整个算法的流程如图 8 所示。



图 7 叠阵涡流传感器检测示意图

Fig. 7 Diagram of the stacked array eddy current sensor

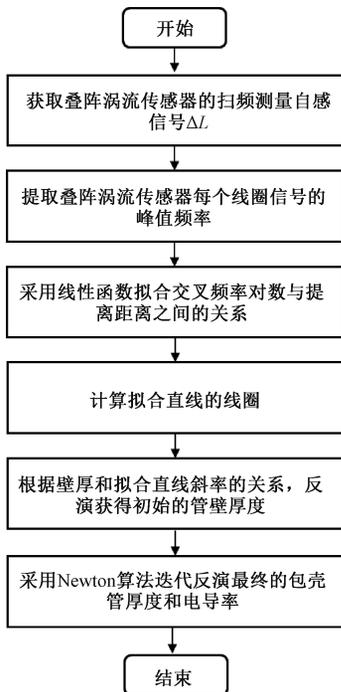


图 8 所提出算法流程

Fig. 8 Flowchart of the proposed method

4 实验验证

图 9 为实验装置图,包含叠阵涡流传感器、Hoki 电感电容电阻 (inductance capacitance resistance, LCR) 测试仪、锆基包壳管及三轴位移平台。传感器由 3 个结构相

同的线圈堆叠构成,各线圈均固定于 3D 打印的塑料基座中,以保证定位精度,线圈的具体参数如表 2 所示。锆基包壳管的电导率为 1.2 MS/m,相对磁导率为 1。管体内径为 5 mm,外径分别为 6、6.5 和 7 mm,对应壁厚范围为 1~2 mm。管体总长约 600 mm,远大于线圈尺寸,可忽略端部效应影响。壁厚与长度均使用游标卡尺测量,误差 < 0.01 mm,并取其算术平均值作为结果。采用 Hoki 3536 型 LCR 测试仪在 100 Hz~1 MHz 频率范围内测量阻抗谱,测量精度达 0.05%。实验中可通过位移平台精确调节传感器的提高距离。

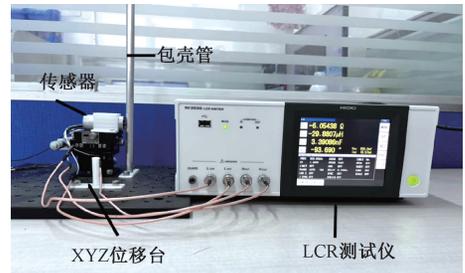


图 9 实验装置

Fig. 9 Experiment setup

表 2 叠阵涡流传感器线圈参数

Table 2 Coil parameters in stacked array sensor

线圈结构参数	数值
内径/外径	1 mm/3 mm
高度	2 mm
匝数	100
间距	0 mm

如图 10 所示,实测电感值与解析模型的计算结果高度一致。鉴于此,本研究通过分析交叉频率对数与提高距离的线性关系,得到 3 组拟合线的斜率。如图 11 所示,所有拟合结果的确定系数 R^2 均 > 0.98,证明了拟合的可靠性及所获系数的高准确性。

针对 0.5~1.5 mm 壁厚的包壳管,采用实验测试获得不同壁厚下的拟合直线斜率,如图 12 所示。可以从图 12 中看出拟合直线的斜率随壁厚增加而逐渐增大。因此,结合不同提高距离下的交叉频率对数拟合直线,通过拟合直线斜率实现对锆基包壳管壁厚初步反演,该拟合直线的相关系数为 0.998。根据表 3 的反演结果表明,在传感器初始提高距离为 0.5 mm 时,壁厚测量的最大误差与平均误差分别仅为 2.0% 和 1.8%。拟合直线的斜率随壁厚的变化率,即斜率的变化量,可直接表征该反演方法的测量灵敏度,其结果如图 13 所示。分析表明,该方法在 0.5~1.5 mm 的壁厚测量范围内具有较高的灵敏度 ($1.02 \times 10^4 \sim 1.03 \times 10^4 \cdot \text{m}^{-1}$)。此外,该灵敏度值在此范

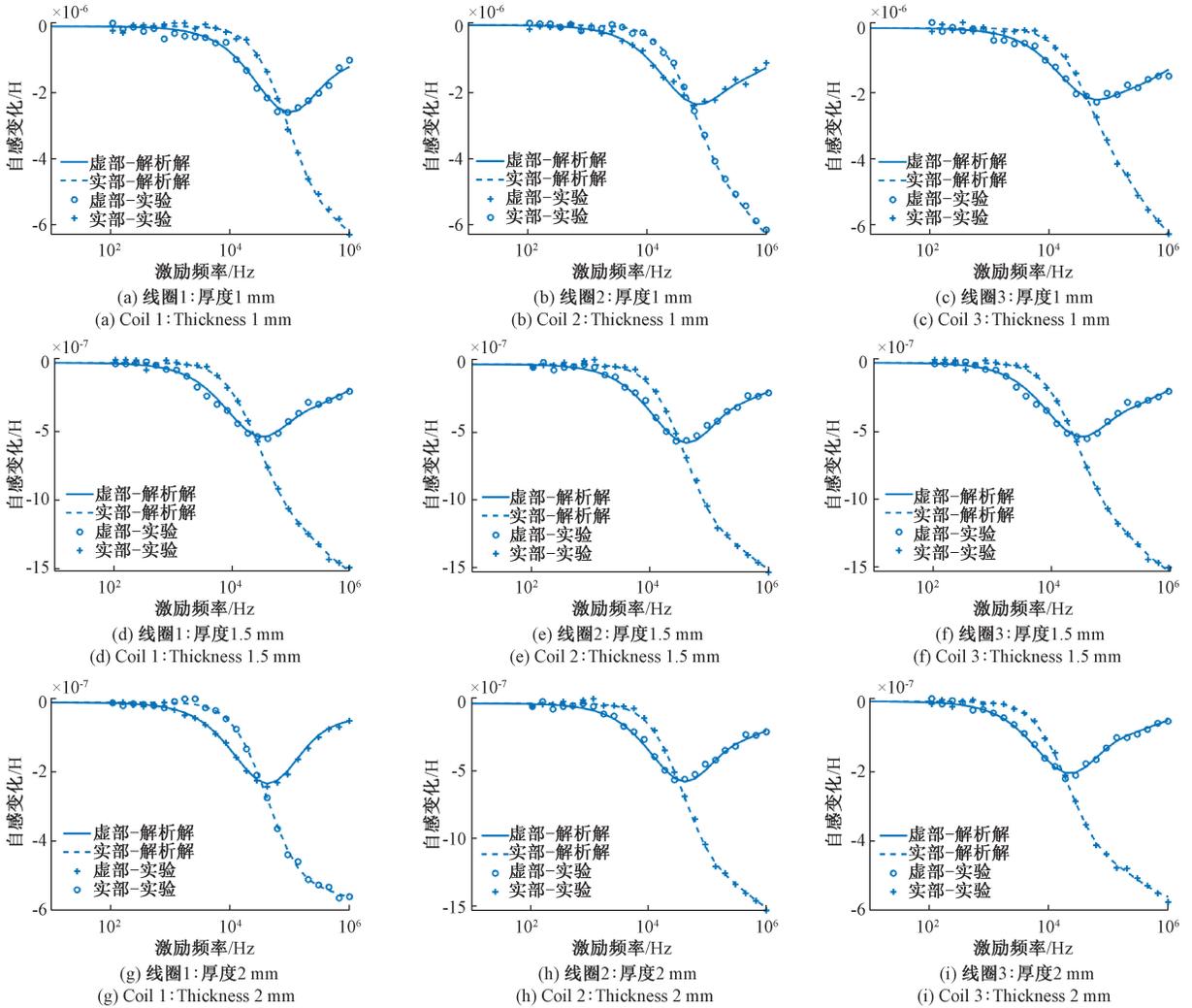


图 10 不同厚度的包壳管所引起的自感变化

Fig. 10 Self-inductance variation caused by a tube with different thickness

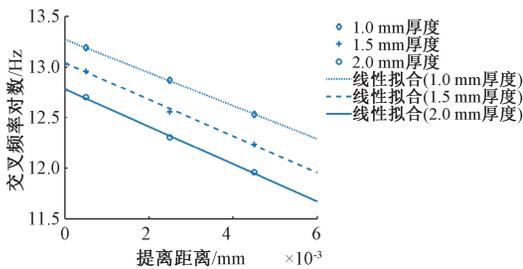


图 11 实验中不同管壁厚度的交叉频率对数与提高距离关系

Fig. 11 Fitting lines representing the relationship between the logarithm of the crossover frequency and lift-off distance for a tube with different thicknesses in the experiment

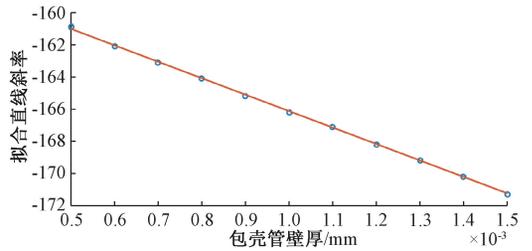


图 12 壁厚和拟合直线斜率关系

Fig. 12 The relationship between the thickness and slope of the fitting line in the experiment

围内保持相对稳定,这表明壁厚与斜率之间存在良好的线性关系,进一步验证了该反演方法的线性度较好。

为验证基于 Newton 迭代法的反演算法性能,利用图 10 所示的涡流检测装置获得扫频信号,并根据式(28)和(29)对包壳管的电导率和壁厚进行了迭代反演,结果如表 4 所示。

表 3 初步包壳管壁厚测量结构

Table 3 Preliminary wall thickness measurement results in experiment

拟合直线斜率	真实厚度/mm	初步反演厚度/mm	相对误差/%
-166.22	1.0	1.02	2.0
-171.33	1.5	1.53	2.0
-176.74	2.0	1.97	1.5

成影响,该原因可以解释为线圈互感变化对厚度的灵敏度远小于其他参数的灵敏度,使得黑塞矩阵的病态性增大,降低参数的重建精度。因此,合适的厚度反演初始点可以提高电导率的反演精度,进一步证明所提出方法的有效性和可靠性。

5 结 论

本研究创新性地提出了一种基于叠阵涡流的锆基包壳壁厚和电导率同时测量方法。在方法构建过程中,首先设计了由 3 个绝对线圈组成的叠阵涡流传感器,为后续检测提供了坚实的硬件基础。基于该传感器的独特结构配置,成功建立了管道涡流检测解析模型,为深入理解涡流检测机制提供了理论支撑。随后,在壁厚测量方面,基于解析解在扫频模式下提取自感变化的交叉频率,发现交叉频率的对数与提离距离呈线性关系,且该线性关系的斜率仅取决于壁厚,与材料的导电率无关。基于该特性,通过拟合直线的斜率即可准确估算壁厚,有效避免了材料导电率对测量结果的干扰,提高了测量的准确性和可靠性。在此基础上,进一步将包壳管涡流检测问题巧妙转化为最小二乘问题,并把壁厚测量结果作为先验信息,采用改进 Newton 迭代算法进行反演。这种处理方式充分利用了壁厚与电导率之间的内在联系,提高了电导率和壁厚反演的精度和效率。

为验证所提方法的有效性,搭建涡流检测平台并开展实验。实验结果表明所提方法的最大测量误差仅为 1.7%,这一数据充分证明了该方法在实际应用中的高精度和可靠性。本研究所提出的锆基包壳叠阵涡流扫频检测方法,通过独特的传感器设计、精准的解析模型建立、创新的壁厚测量与电导率反演策略,成功实现了对核燃料锆基包壳的高精度无损检测。该方法不仅为核电安全检测领域提供了一种行之有效的解决方案,也为保障核电站的安全运行提供了有力的技术支持。未来,可进一步优化传感器结构和检测算法,拓展该方法在不同类型核燃料包壳检测中的应用,为核电行业的安全发展做出更大贡献。

参考文献

[1] SUN L, XIAO Y CH, HUANG W J, et al. Review on the preparation and high-temperature oxidation resistance of metal coating for fuel cladding zirconium alloys[J]. Nuclear Science and Engineering, 2024, 198(4): 755-770.

[2] NI Y ZH, TOPHAM R, SKIPPON T, et al. Detection of zirconium hydrides in transmission electron micrographs using deep neural networks[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 117: 105573.

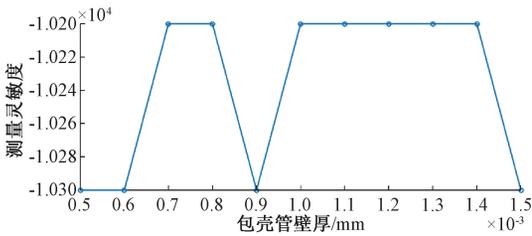


图 13 包壳管壁厚测量灵敏度

Fig. 13 Measurement sensitivity of wall thickness of cladding tube

表 4 包壳管参数测量结构

Table 4 Parameters measurement results of the cladding tube

反演壁厚 /mm	真实厚度/mm	相对误差/%	电导率测量结果 /($MS \cdot m^{-1}$)	电导率测量结果 /($MS \cdot m^{-1}$)	相对误差/%
1.01	1.0	1.0	1.2	1.22	1.7
1.51	1.5	0.7	1.2	1.21	0.9
1.99	2.0	0.5	1.2	1.19	0.9

实际上,初始值的选取对迭代求解具有重要影响,选择不同的初始值进行迭代求解,不同初值点对于壁厚为 1 mm 的包壳管参数反演结果如表 5 所示。

表 5 初始值对包壳管参数测量的影响

Table 5 The effect of initial values on the measurement of cladding tube parameters

初始电导率 /($MS \cdot m^{-1}$)	初始厚度/mm	电导率反演结果 /($MS \cdot m^{-1}$)	厚度反演结果 /mm	电导率反演误差 /%	厚度反演误差 /%
1	2	1.15	1.06	4.2	6
1	3	1.13	1.10	5.8	10
1	4	1.10	1.16	8.3	16

当初始值远离真值,重建的误差将进一步增大,这是由于 Newton 迭代法获得的最优值是局部最优。此外,仅当厚度的初始值远离真值,也会对电导率的重建结果造

- [3] 任吉林, 张泽义, 陈金贵, 等. 数显涡流电导仪的研制[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(8): 1451-1455.
REN J L, ZHANG Z Y, CHEN J G. Development of digital electrical conductivity meter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(8): 1451-1455.
- [4] BAHONAR M, SAFIZADEH M S. Investigation of real delamination detection in composite structure using air-coupled ultrasonic testing [J]. Composite Structures, 2022, 280: 114939.
- [5] XU H, YAN Z H, JI B W, et al. Defect detection in welding radiographic images based on semantic segmentation methods[J]. Measurement, 2022, 188: 110569.
- [6] 金新玖, 耿浩, 杨理践. 基于电磁法的管道屈服强度检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(10): 75-84.
JIN X J, GENG H, YANG L J, et al. Study on the electromagnetic method for measuring pipe yield strength [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(10): 75-84.
- [7] 李威, 段淑玉, 宋韵, 等. 基于 Laplace 小波特征频率的不锈钢板脉冲涡流测厚方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 166-172.
LI W, DUAN SH Y, SONG Y, et al. A pulse eddy current thickness measurement method of stainless steel plate based on Laplace wavelet's characteristic frequency[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 166-172.
- [8] BOWLER J, TRUNG T N, SACKS P. Evaluation of electrical conductivity and magnetic permeability variations with depth from surface voltage measurements[J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2021, 29(6): 831-860.
- [9] 束文生. 吸波材料电磁参数测量方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
SHU W SH. Study on measurement methods for electromagnetic parameters of absorbing materials[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [10] HUANG P, LI ZH Y, LONG J, et al. Measurement of lift-off distance and thickness of nonmagnetic metallic plate using pulsed eddy current testing[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 6006810.
- [11] 陈国龙, 张帅帅, 樊乐, 等. 柔性差测量科赫分形涡流传感器内部裂纹检测[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(11): 234-242.
CHEN G L, ZHANG SH SH, FAN L, et al. Flexible differential pick-up Koch fractal eddy current sensor for internal crack detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 234-242.
- [12] 李满宏, 王经天, 吴玉, 等. 电涡流传感器性能优化关键技术[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(7): 233-243.
LI M H, WANG J T, WU Y, et al. Key technologies for eddy current sensor performance optimization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7): 233-243.
- [13] 殷晓康, 杨丽强, 王伟, 等. 外穿式集中绕组激励旋转电磁场涡流无损检测系统[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 239-250.
YIN X K, YANG L Q, WANG W, et al. Encircling rotating field eddy current non-destructive evaluation system with concentrated excitation windings[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 239-250.
- [14] HUANG P, DU K Y, XIE Y D. An eddy current method for electromagnetic property and diameter measurements of metallic rods immune to sensor offset [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2025, DOI: 10.1109/TMECH.2025.3625761.
- [15] SREEVATSAN S, GEORGE B. Simultaneous detection of defect and lift-off using a modified pulsed eddy current probe[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(4): 2156-2163.
- [16] HUANG P, PU H, LI J Y, et al. A novel eddy current method for defect detection immune to lift-off[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 6005913.
- [17] LU M Y, MENG X B, HUANG R CH, et al. Lift-off invariant inductance of steels in multi-frequency eddy current testing[J]. NDT & E International: Independent Nondestructive Testing and Evaluation, 2021, 121: 102458.
- [18] MENG X B, LU M Y, YIN W L, et al. Inversion of lift-off distance and thickness for nonmagnetic metal using eddy current testing[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 6003208.
- [19] LU M Y, MENG X B, HUANG R CH, et al. Inversion of distance and magnetic permeability based on material-independent and liftoff insensitive algorithms using eddy current sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 6001609.
- [20] FERRIGNO L, LARACCA M, MALELUNOHAMMDI H, et al. Comparison of time and frequency domain features' immunity against lift-off in pulse-compression eddy current imaging[J]. NDT & E International, 2019, 107: 102152.

- [21] XIE SH J, ZHANG L, ZHAO Y, et al. Features extraction and discussion in a novel frequency-band-selecting pulsed eddy current testing method for the detection of a certain depth range of defects[J]. *NDT & E International*, 2020, 111: 102211.
- [22] FAN M B, CAO B H, TIAN G Y, et al. Thickness measurement using liftoff point of intersection in pulsed eddy current responses for elimination of liftoff effect[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 251: 66-74.
- [23] CHEN X L, LEI Y ZH. Electrical conductivity measurement of ferromagnetic metallic materials using pulsed eddy current method[J]. *NDT & E International*, 2015, 75: 33-38.
- [24] HU G, XIA Z H, YIN W L, et al. Estimation of thickness and radius of hollow metallic spheres with a simplified forward model [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(9): 9402-9409.
- [25] ADEWALE I D, TIAN G Y. Decoupling the influence of permeability and conductivity in pulsed eddy current measurements [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(3): 1119-1127.
- [26] YU Y T, ZOU Y, HOSANI M A, et al. Conductivity invariance phenomenon of eddy current NDT: Investigation, verification, and application[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, 53: 6200207.
- [27] HUANG P, ZHAO J Y, LI ZH Y, et al. Decoupling conductivity and permeability using sweep-frequency eddy current method[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 600191.
- [28] 毛雪飞, 雷银照. 金属管道外放置式偏心弯曲矩形线圈涡流场的解析解 [J]. *电工技术学报*, 2012, 27(9): 153-159.
MAO X F, LEI Y ZH. Analytical solution for the eddy current field due to an air-cored eccentric curved rectangular probe coil on the outside of a metal pipe[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(9): 153-159.
- [29] XIE Y D, HUANG P, DING Y Q, et al. A novel conductivity measurement method for non-magnetic materials based on sweep-frequency eddy current method [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 6004212.
- [30] LU M Y, XIE Y D, ZHU W Q, et al. Determination of the magnetic permeability, electrical conductivity, and thickness of ferrite metallic plates using a multifrequency electromagnetic sensing system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(7): 4111-4119.

作者简介



黄璞, 2017 年于太原工业学院获得学士学位, 2020 年于东北大学获得硕士学位, 2024 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为清华大学博士后, 主要研究方向为电磁无损检测、计算与成像。

E-mail: huang_pu@mail.tsinghua.edu.cn

Huang Pu received his B.Sc. degree from Taiyuan Institute of Technology in 2017, received his M.Sc. degree from Northeastern University in 2020, and his Ph.D. degree from Beihang University in 2024. He is currently a postdoctoral fellow at Tsinghua University. His main research interests include electromagnetic nondestructive testing, Calculation and tomography.



黄松岭(通信作者), 1991 年于东南大学获得学士学位, 2001 年于清华大学获得博士学位, 现为清华大学教授, 主要研究方向为电磁无损检测、电磁测量和智能传感器。

E-mail: huangsling@tsinghua.edu.cn

Huang Songling (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Southeastern University in 1991, received his Ph.D. degree from Tsinghua University in 2001. He is currently a professor at Tsinghua University. His main research interests include electromagnetic nondestructive testing, electromagnetic measurement and intelligence sensor.