

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513876

基于改进磁网络法的管内壁缺陷漏磁精确分析^{*}

李 崇, 杨理践, 耿 浩, 苏禹铭

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘要:针对管道永磁内检测装置在设计过程中长期依赖人工经验、缺乏系统性理论指导的现状,提出了一种高效可靠的建模方法,用于精确描述局部饱和磁场及其与管壁缺陷之间的耦合机制,并实现对其性能的定量分析。在传统磁路法的基础上,引入磁场分割理论,构建了一种适用于管道漏磁内检测的改进磁网络模型。该模型充分考虑了边缘效应及铁磁材料非线性磁化特性,通过将检测装置的关键参数与缺陷引起的漏磁场进行耦合建模,揭示了二者之间的内在关联,进而实现了对局部饱和磁场的动态演变过程与空间分布的定量计算。研究提出的改进磁网络法在保证较高计算效率的前提下,展现出良好的通用性与模型适应性。为验证其有效性,分别开展了有限元数值仿真与实验,并对模型计算结果进行了对比分析。结果表明,所建立的改进磁网络模型在磁场分布特征和关键信号响应方面与有限元仿真结果吻合良好,误差控制在5%以内;与实验测量结果相比,总体相对误差<30%,具备工程可接受的准确性。该模型能够有效捕捉由内壁缺陷所引起的磁场扰动趋势,并准确反映其对检测装置输出性能参数的影响,弥补了传统磁路设计理论分析不足的缺陷。所提出的方法兼具较高的计算精度与效率,适用于工程实际中对管道内检测装置的快速性能评估与迭代优化设计,为该类装备的参数设计、性能预测及工程应用提供了可靠的理论依据与模型支持。

关键词:管道内检测;边缘效应;非线性;磁网络

中图分类号: TH878 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460. 40

Accurate analysis of magnetic flux leakage from inner wall defects in pipelines using an enhanced magnetic network method

Li Chong, Yang Lijian, Geng Hao, Su Yuming

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: This paper proposes an efficient and reliable modeling method to address the longstanding reliance on empirical expertise and the lack of systematic theoretical guidance in the design of pipeline permanent magnet in-line inspection tools. This method accurately characterizes the localized saturation magnetic field and the coupling mechanism with pipeline wall defects, enabling a quantitative analysis of the inspection performance. On the basis of the traditional magnetic circuit method, the theory of magnetic field segmentation is introduced, and an improved magnetic network model suitable for internal detection of pipeline leakage is constructed. The model fully considers the edge effect and the nonlinear magnetization characteristics of ferromagnetic materials, combining the key parameters of the detection device with the magnetic leakage field caused by defects. The internal relationship between the two is revealed, and then the quantitative calculation of the dynamic evolution process and spatial distribution of the local saturated magnetic field is realized. The improved magnetic network method proposed in this study shows good versatility and model adaptability while ensuring high computational efficiency. In order to verify its effectiveness, finite element numerical simulation and experiments were carried out respectively, and the calculation results of the model were compared and analyzed. The results show that the improved magnetic network model aligns well with the finite element simulation results in terms of magnetic field distribution characteristics and key signal response, with an error controlled within 5%. Compared to experimental measurement results, the overall relative error is less than 30%, demonstrating acceptable accuracy for engineering applications. The model effectively captures the magnetic field disturbances caused by inner wall

defect, accurately reflecting their influence on the output performance parameters of the detection device, thereby compensating for the shortcomings of traditional magnetic circuit design theory. The proposed method exhibits both high computational accuracy and efficiency, making it suitable for the rapid performance evaluation and iterative optimization design of in-line inspection devices in engineering practice. Moreover, it provides a reliable theoretical basis and model support for the parameter design, performance prediction, and engineering applications of such equipment.

Keywords: in-line inspection; edge effect; nonlinearity; magnetic network

0 引言

管道作为石油运输的重要工具,长期运行在恶劣的环境下易造成管壁出现裂痕泄漏之类的问题,不仅对环境造成严重破坏,引起爆炸、火灾,伤害整个管网,甚至造成人身安全及财产损失^[1-2]。因此,对在役管道寿命评估成为当今的研究热点,管道完整性检测装置越来越受到业内广泛关注。相对于超声式^[3]、涡流式^[4]、金属磁记忆式^[5]等常用的管壁检测装置,永磁内检测装置因高激磁能力、高稳定性、强抗干扰等优点,在管道行业内有着较好的应用前景。当前,永磁检测装置的开发并没有完整、统一的设计方法,主要由经验丰富的工程师依托经验系数进行设计,存在个体认知偏差与隐性知识壁垒的限制,导致设计效率低、预留空间大、材料浪费以及设计成本高等问题。

永磁内检测装置通过缺陷周围存在漏磁场进行管壁缺陷诊断^[6-8]。精确的磁场分析是预测管道完整性、使用寿命评估和判断其设计合理性的前提。电磁场分析中常用的方法有子域分析法、等效磁路法(磁网络法)、有限元分析法、保角映射法和磁偶极子法。在管道检测领域,管道由于长期受输送介质的影响,管内壁会出现不同规则的缺陷,其边界条件难以确定,因此很难直接采用基于麦克斯韦方程的子域法计算管道区域磁场分布。采用有限元法虽可以精确地获得管壁缺陷的磁场分布,但由于缺陷结构的多样性以及软件对网格数量的要求,导致该方法计算时间较长,不利于管道永磁内检测装置的初始设计^[9-11]。磁偶极子法考虑对象单一,仅适用于管壁缺陷漏磁场的分析,虽计算结果的精度适中,但无法给出检测装置结构尺寸与漏磁场之间的关系^[12-15]。保角映射法是将复杂形状的多边形面域变换到规则面域进行求解的一种方法,从而将具有复杂边界条件的电磁场问题变得更加简单的已求解,但不适用于饱和磁场的分析,普遍应用在线性磁场的分析中^[16-18]。传统等效磁路法具有计算速度较快且便于建立磁场与激磁结构尺寸间的对应关系,常用于指导电磁装置结构的初期设计和工程现场的故障分析。但对于管道检测领域的研究文献较少且对管壁缺陷磁场的计算结果精度较差,主要是由于磁路分析中忽视管道材料非线性、检测装置与管壁间磁化边缘效应及管壁缺陷磁阻取值的单一化^[19-20]。

针对电磁场精确计算,相关研究人员提出了多种分析方法。Jiang 等^[21]以磁轴承为研究对象,采用分布式磁路法建立包含多个不同状态的磁路模型,确定初始磁通密度和每个磁路的磁动势,解决传统磁路法无法同时考虑主动磁轴承磁通与饱和耦合的问题。石凡等^[22]以开关磁阻电机为研究对象,给出了单绕组无轴承开关磁阻电机的椭圆形边缘气隙磁场的解析方法,并采用分段线性函数拟合气隙磁压和绕组磁动势之间的非线性关系,实现磁饱和问题的求解。Faradonbeh 等^[23]针对磁体结构几何不对称特征,提出了一种通用成像解决方案,建立了虚拟磁体和虚拟体积电流的磁路模型,并结合二维 Maxwell 方程对永磁电机内部磁场进行分析。Qin 等^[24]利用电磁场理论,矢量磁路理论和电路理论,推导了层压磁芯磁路的磁阻和磁导参数的一般表达式,给出了磁路模型参数随磁路频率变化的规律。闫晨飞等^[25]采用磁路法和有限元法对变磁化方向永磁吸附装置进行优化设计,给出了永磁装置在线性工作区时的磁路分析方法。Cheng^[26]通过建立铁磁结构背面局部磁化的简化磁路模型,研究了初始磁导率与背部减薄区域参数之间的关系。付东山等^[27]建立了有铁心永磁直线电机的等效磁路模型并进行磁场分布规律,并基于该电机磁场分布特征,建立其许-克变换气隙磁场计算模型,给出了该电机电磁推力快速准确的计算方法。佟文明等^[28]建立了考虑磁桥不均匀饱和及饱和偏移现象的内置式永磁同步电机的改进等效磁网络模型,提高了计算精度。梁志文等^[29]以新型盘式行星永磁电机为研究对象,针对气隙不均、定子开槽和漏磁问题,通过引入不均匀气隙位置分布函数,建立了考虑盘式转子与行星定子不均匀气隙的动态等效磁网络模型。王超等^[30-31]通过建立轴向磁通永磁电机磁路饱和情况下的二维等效磁网络模型,准确计算了槽内微小单位储存的磁场能量,得到了精准定子槽漏感。徐伟等^[32]建立了定子不对称极混合励磁双凸极电机的非线性变磁网络模型,解决了传统有限元法和变磁网络模型法很难快速、准确地计算出电机的关键参数及性能指标的问题。Parra-Raad 等^[33]为提高管道无损检测技术识别概率,从检测装置结构优化方面进行了研究。提出了集中参数的等效磁路模型,通过对管壁外的边缘磁场引入并行电阻率实现模型的校准,增强了模型描述物理系统行为的能力。采用遗传算法,在减小磁路尺寸的同时确

保管道受损区域磁通泄漏最大化。然而,当前绝大多数电磁场计算都应用于电机性能分析中,在管道类缺陷诊断中很少应用。

管道漏磁检测理论研究的主要问题包括正问题和反问题。正问题是缺陷漏磁场的求解,反问题是根据给定的漏磁场数据来计算缺陷的大小。正向求解方法有磁偶极子法、有限元数值分析法和磁路法,尚未发现磁网络法的应用。由于管道磁化装置结构与电机结构和工作条件的差异,传统的磁网络法主要应用于电机磁场分析中。电机通常由定子、转子、气隙和转轴组成,自身就能构建高效、封闭的内部磁路。与电机磁路不同,管道漏磁检测是通过外部装置(激磁源、钢刷和轭铁组成)主动磁化管道区域,并被动检测管壁缺陷产生的漏磁信号,其闭合磁路依赖于外部装置。同时,电机磁场的磁网络划分侧重于利用周期性结构、构建相对规整的全局网格以捕捉主磁通路径和饱和效应,而管道因与电机结构以及磁化程度不同,在进行磁网络划分时应重点强调对局部不规则缺陷进行高度自适应加密处理,实现多尺度建模以精确解析微小缺陷引起的漏磁场畸变特征。因此,针对二者的差异,本研究在电机磁网络法划分思想的基础上对管道磁化区不同磁导率分布特点进行网格分区处理,同时对管壁缺陷周围进行加密细化。通过查阅大量文献,目前尚没有将磁网络法用于求解管道缺陷漏磁场的研究。本研究借鉴电机磁网络建模思想,通过改进磁网络中的集中参数结构模型,构建了适用于管道漏磁检测的磁网络模型。该模型可实现管道缺陷漏磁场的动态分析,并高效、精确地提取缺陷周围漏磁场的分布形态特征。当前研究主要聚焦于漏磁信号的可检测性,而本研究提出的改进磁网络法则能定量解析漏磁场的空间分布特性,进而实现缺陷磁场的动态演化分析。

为建立管道缺陷磁场与检测装置结构之间的精准模型。本研究从管道缺陷磁检测的电磁场机理入手,提出了管道永磁激磁时考虑激磁装置端部效应和管道磁性材料非线性的通用磁网络模型的构建方法,计算了管内壁长方体缺陷在不同尺寸下的动态漏磁场,并与有限元仿真结果和实验测量结果进行了比较。相关结果表明,本研究提出的改进磁网络法的计算结果较好贴合有限元仿真结果,与有限元仿真结果的误差在 5% 范围内,与实验之间误差在 30% 范围内,验证了改进磁网络方法的可行性以及计算结果的有效性。

1 永磁检测装置拓扑结构

永磁检测装置因结构简单、无需供电系统,自身可提供较大且稳定的激磁源常被用于管道缺陷检测中。管道永磁检测示意图如图 1 所示。

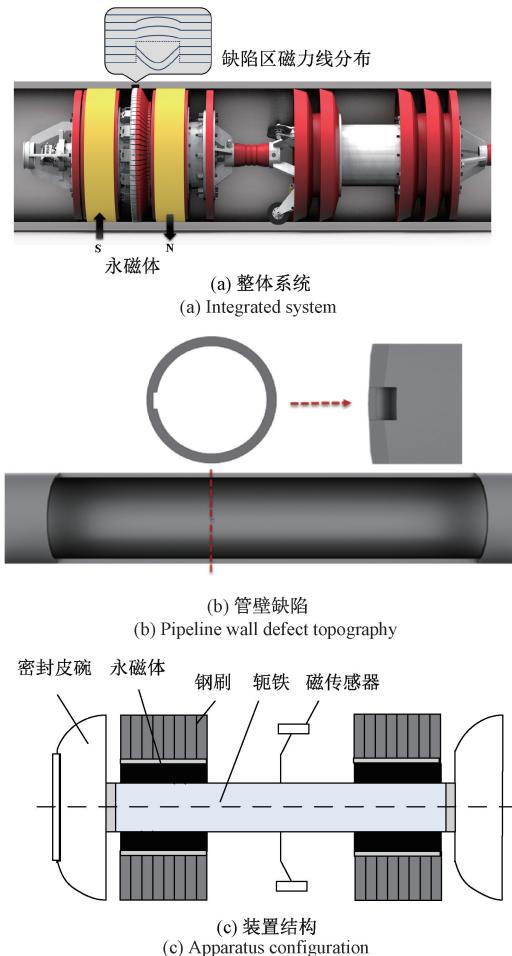


图 1 管道永磁检测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of permanent magnet-based pipeline inspection

其中,图 1(c) 为装置结构图,管道永磁检测装置主要由永磁体、钢刷、轭铁和磁传感器组成。左、右两侧永磁体作为装置的激磁源,均为径向充磁且方向相反,均匀贴附于轭铁周围,主要功能是将被检测的管道磁化至饱和或者接近饱和状态;轭铁不仅是支撑整个装置的核心部件,而且由于材料自身特性,管道磁化时起到磁传导的作用;钢刷置于永磁体外侧,起到聚磁的作用。密封皮碗主要对管道进行清洁营造良好的检测环境。在激磁源的中间区域,多组磁传感器沿轭铁周向排列,用于采集管壁缺陷产生的漏磁信号。管道内永磁装置检测中,磁化区磁场的精准分析既是检测装置结构优化设计的基础,又在一定程度上降低了管壁缺陷漏检的概率。

2 管道永磁激磁区磁网络模型

本部分围绕永磁装置对管道内部激磁检测展开理论研究,其有限元获得的永磁激磁区磁场分布如图 2 所示。

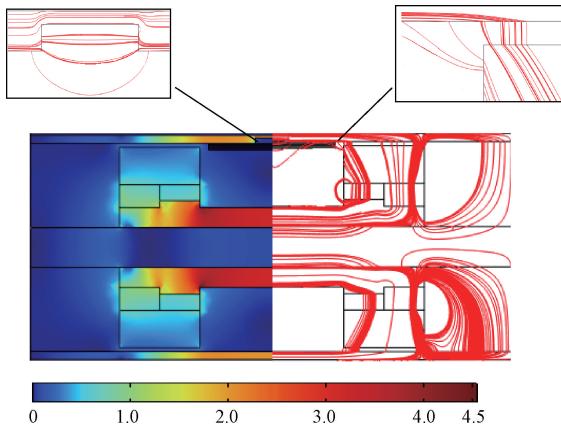


图 2 永磁装置激磁区磁通密度云图

Fig. 2 Contour map of magnetic flux density of a permanent magnet apparatus

由图 2 可知,由于永磁检测装置结构尺寸限制,激磁时钢刷端部会产生边缘效应,钢刷对外磁路提供的磁通被分为两部分:一部分经过主磁路垂直进入管道,为主磁通。若管内壁存在缺陷,则部分主磁通泄漏到空气中形成漏磁通。另一部分由于受钢刷端部边缘效应的影响,产生的边缘磁场经空气进入管道,为边缘磁通;此外,由图 2 的局部放大区域可见,管道饱和区呈现出明显的梯度对称分布特征。为提高管道磁网络模型分析效率,对永磁激磁装置采用磁路法进行建模。对激磁装置与管壁贴合区,管道区以及管壁缺陷漏磁区采用磁场分割法构建磁网络建模。

2.1 永磁装置磁网络构建

永磁检测装置轴对称侧尺寸如图 3 所示。

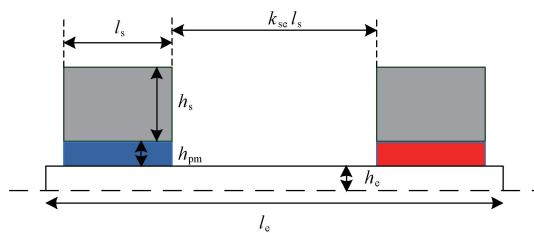


图 3 永磁检测装置轴对称侧尺寸示意图

Fig. 3 Axisymmetric lateral dimensioned schematic of the permanent magnet inspection apparatus

图 3 中 l_s 为钢刷宽度; l_e 为轭铁宽度; h_s 为钢刷高度; h_{pm} 为永磁体高度; h_e 为轭铁高度; k_{se} 为永磁体间距与永磁体之间的比例系数。

永磁装置作为管道漏磁检测唯一的激磁源充磁方向单一且结构简单,可看作是直流电源。本研究对永磁装置建模时忽略装置各部分衔接处的漏磁通并认为材料各项同性。永磁检测装置结构对应的磁路模型,如图 4 所示。

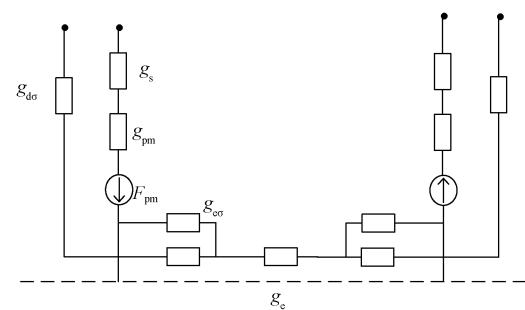


图 4 永磁检测装置轴对称侧磁路模型

Fig. 4 Axisymmetric lateral magnetic circuit model of the permanent magnet inspection apparatus

图 4 中 g_s 为钢刷磁导; g_{pm} 为永磁体磁导; F_{pm} 为永磁体磁势; g_{eo} 为轭铁与永磁体间的漏磁导; g_{de} 为永磁体检测装置在管内壁激磁产生的漏磁导, g_e 为轭铁磁导。

图 4 中磁导和磁势表达式如表 1 所示。表 1 中参数 B_r 为永磁体剩磁; μ_r 为永磁体相对磁导率; μ_s 、 μ_e 、 μ_0 分别为检测装置中钢刷、轭铁以及检测装置端部的磁导率; h_{pm} 、 h_s 、 h_e 为永磁体高度、钢刷高度和轭铁高度; l_{pm} 、 l_s 、 l_e 为永磁体宽度、钢刷宽度和轭铁宽度, 其中 $l_{pm} = l_s$ 。

表 1 永磁装置磁导参数计算公式

Table 1 Analytical formulation for permeance parameters in permanent magnet apparatus

项目	符号	计算公式
永磁磁动势	F_{pm}	$F_{pm} = B_r h_{pm} / \mu_{pm} \mu_0$
永磁体磁导	g_{pm}	$g_{pm} = \mu_{pm} \mu_0 \pi l_{pm} (h_{pm} + h_e) / h_{pm}$
钢刷磁导	g_s	$g_s = \mu_s \mu_0 \pi l_s (h_s + h_{pm} + h_e) / h_s$
轭铁磁导	g_e	$g_e = \mu_e \mu_0 \pi h_e^2 / 2l_e$
轭铁漏磁导	g_{eo}	$g_{eo} = 0$, 假设轭铁材料连续且均匀 $g_{eo} = 0.25 \pi \mu_0 h_e$, 假设轭铁材料非均匀

永磁检测装置轴对称侧的磁导矩阵和磁通矩阵为:

$$\mathbf{G}_d =$$

$$\begin{bmatrix} g_{1-1} & g_{1-2} & \cdots & g_{1-(N_s-1)} & g_{1-N_s} \\ g_{1-2} & g_{2-2} & \cdots & g_{2-(N_s-1)} & g_{2-N_s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ g_{1-(N_s-1)} & g_{2-(N_s-1)} & \cdots & g_{(N_s-1)-(N_s-1)} & g_{(N_s-1)-N_s} \\ g_{1-N_s} & g_{2-N_s} & \cdots & g_{(N_s-1)-N_s} & g_{N_s-N_s} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\Phi_d = [\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \cdots \quad \varphi_{N_s-1} \quad \varphi_{N_s}] \quad (2)$$

式中: g_{i-i} 为第 i 个节点的自磁导; g_{m-n} ($m \neq n$) 为第 m 个与第 n 个节点的互磁导; φ_i 为第 i 个节点的流入磁通, 这里 $N_s = 4$ 。

2.2 缺陷管道磁网络构建

管道由于运输物质具有腐蚀性造成管内壁存在缺陷。基于管道漏磁检测基本原理,激磁装置必须满足能使管道磁化至饱和区要求。若激磁装置磁化区的管道无缺陷,则被磁化的管道区任意点的磁感应强度普遍在1.6~2.0 T;若激磁装置磁化区的管壁某一位置存在缺陷,此时管道内的主磁通部分泄漏到空气中形成漏磁通,因此管道磁化区内存在漏磁路径。管壁缺陷下管道磁场分割模型如图5所示。

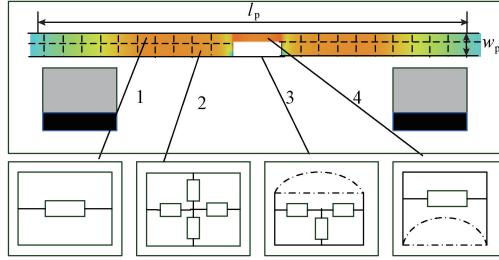


图 5 管道磁化区域的磁场分割模型

Fig. 5 Magnetic field segmentation model for magnetized regions in pipelines

图5中 l_p 为激磁装置磁化区管道的长度; w_p 为管道的厚度。为得到较精准的缺陷管道磁化解,根据磁通路

径进行磁场分割,以此构建出不同分割区域的磁导模型。区域1和2被分割成厚度相等 M 等份,其中区域1为单一磁导网格单元,区域2为十字形磁导网格单元;区域3和4为管道缺陷空气部分和管道部分,被分割成厚度相等的 N 等份,其中区域3为“T”形磁导网格单元;区域4为单一磁导网格单元。图中区域3的缺陷形状可为任意形状。

为了进一步提高磁网络模型的计算精度,本研究将区域2与3沿轴向进行离散化处理,分别划分为 S 个等比例单元。在综合考虑计算效率与模型准确性的基础上,将单元数量 S 设定为2。经上述细分后所建立的管道磁化区磁网络模型如图6所示。

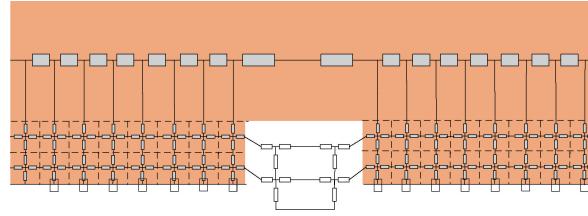


图 6 管道磁网络模型

Fig. 6 Magnetic network model for pipelines

图6中区域1、2、3和4的磁导表达式如表2所示。

表 2 管道磁网络参数计算公式

Table 2 Analytical formulation for magnetic equivalent circuit parameters in permanent magnet apparatus

项目	符号	计算公式
区域1	g_{p1_a}	$g_{p1_a}(m) = \pi\mu_0\mu_r(B) \times (R_{p_i} + h_\sigma)(h_p - h_\sigma)/l_p(m), \quad 1 \leq m \leq l_p - l_\sigma$
区域2	g_{p2_a}	$g_{p2_a}(k, m) = \mu_0\mu_r(B) \times [\pi(R_{p_i} + h_\sigma(k-1)) - w_\sigma] \times h_\sigma(k)/l_p(m), \quad 1 \leq k \leq K, \quad 1 \leq m \leq l_p - l_\sigma$
	g_{p2_r}	$g_{p2_r}(k, m) = \mu_0\mu_r(B) \times [\pi(R_{p_i} + h_\sigma(k-1)) - w_\sigma] \times l_p(m)/h_\sigma(k), \quad 1 \leq k \leq K, \quad 1 \leq m \leq l_p - l_\sigma$
区域3	g_{p3_a}	$g_{p3_a}(k, n) = \mu_0w_\sigma h_\sigma(k)/l_\sigma(n), \quad 1 \leq k \leq K, \quad 1 \leq n \leq l_\sigma$
	g_{p3_r}	$g_{p3_r}(k, n) = \mu_0w_\sigma l_\sigma(n)[1/h_\sigma(k) + 1/h_{adj}], \quad 1 \leq k \leq K, \quad 1 \leq n \leq l_\sigma$
区域4	g_{p4_a}	$g_{p4_a}(n) = \pi\mu_0\mu_r(B) \times (R_{p_i} + h_\sigma)(h_p - h_\sigma)/l_\sigma(n), \quad 0 \leq n \leq l_\sigma$

表2中 $\mu_r(B)$ 表示管道相对磁导率; l_p 表示管道磁化区磁路长度; h_p 表示管道厚度; R_{p_i} 表示管道内半径; R_{p_e} 表示管道外半径; μ_0 表示空气磁导率; l_σ 表示管道缺陷长度; h_σ 表示管道缺陷高度; w_σ 表示管道缺陷宽度; h_{adj} 表示装置可检测的偏离高度。

2.3 气隙磁网络构建

根据管道永磁检测装置结构特点,激磁部分与管壁之间不可避免地存在一定宽度的气隙(以下简称气隙区)。在气隙区域的磁路中,由于磁化机理影响,钢刷与管壁接触的端部会发生磁场边缘效应,形成具有一定分布的边缘磁场。为能较精确描述气隙区域磁场分布,本研究依据气隙区磁力线的分布走向,将该区域均匀分割

成厚度相等的 S 等份,并采用十字形磁导网格单元进行离散化建模,从而实现对气隙区边缘磁场的数值表征。激磁端部节点对应气隙区磁网络模型如图7所示。

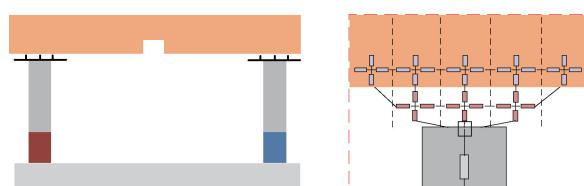
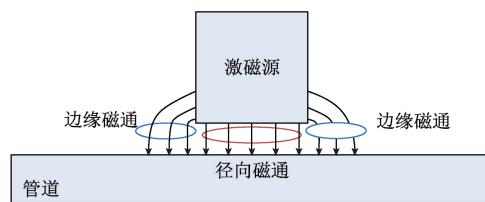


图 7 激磁端部气隙区磁网络模型

Fig. 7 Magnetic network model of the air gap in the excitation end region

管道永磁检测系统中,钢刷边缘效应磁通分布如图 8 所示。其中图 8(a)为激磁源产生的磁通边缘效应示意图。本研究借鉴文献[34-35]中针对圆柱体与球体的分割形态对边缘磁导进行建模,得到图 8(b)永磁装置钢刷与管壁贴合端部气隙边缘磁通分割图。图 8(b)中区域 1 为钢刷端面正对区域,形状为长方体,磁导设为 g_{gap-1} ; 区域 2 为 1/4 圆柱体,其磁导为 g_{gap-2} ; 区域 3 为 1/4 空心圆柱体,磁导为 g_{gap-3} ; 区域 4 为 1/8 实心球体,磁导为 g_{gap-4} ; 区域 5 为空心球体,磁导为 g_{gap-5} 。



(a) 磁通量边缘效应示意图
(a) Schematic diagram of the magnetic flux fringe effect

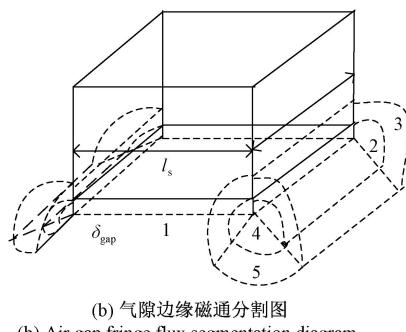


图 8 钢刷边缘效应磁通分布

Fig. 8 Steel brush edge effect magnetic flux distribution

基于磁导解算思想,图 8 中各区对应的磁导公式为:

$$g_{gap-1} = \frac{\mu_0 l_s w_s}{\delta_{gap}} \quad (3)$$

$$g_{gap-2} = \frac{\mu_0 w_s}{1.87} \quad (4)$$

$$g_{gap-3} = \frac{4\mu_0 w_s}{\pi(1 + \delta_{gap}/m)} \quad (5)$$

$$g_{gap-4} = 0.36 \mu_0 \delta_{gap} \quad (6)$$

$$g_{gap-5} = 0.21 \mu_0 m \quad (7)$$

式中: l_s 表示钢刷长度; w_s 表示钢刷宽度; δ_{gap} 表示气隙区长度; m 表示边缘磁通径向长度,其值是气隙长度 δ_{gap} 的 1~2 倍^[36]。管道被磁化至饱和时,考虑气隙区边缘效应情况下其气隙总磁导,即:

$$g_{gap} = g_{gap-1} + 2(g_{gap-2} + g_{gap-3}) + 4(g_{gap-4} + g_{gap-5}) \quad (8)$$

3 通用等效磁网络模型的求解

3.1 管道磁特性

低碳钢材料由于硬度高、抗压能力强常被用于管道生产,因此采用电磁原理对在役管道寿命评价前不仅要考虑结构特点,还应考虑碳钢材料非线性特性。通常,低碳钢材料需要外磁场达到 8 000 A/m^[37] 才能处于近饱和状态,对低碳钢材料的磁化曲线进行非线性拟合可以反映出材料的非线性。目前,拟合近似 B - H 曲线多采用幂方程、指数方程、对数方程、多项式以及分段线性方程、正切方程等。对数方程拟合效果较好、计算简单。因此本研究基于实验测得的 X52 低碳钢磁化数据,采用对数函数对其磁化曲线进行拟合,相应的拟合方程为:

$$B = 1.695e^{8.304 \times 10^{-6}H} - 1.732e^{-6.67 \times 10^{-4}H} \quad (9)$$

X52 型号碳钢的磁化曲线以及非线性拟合曲线如图 9 所示。

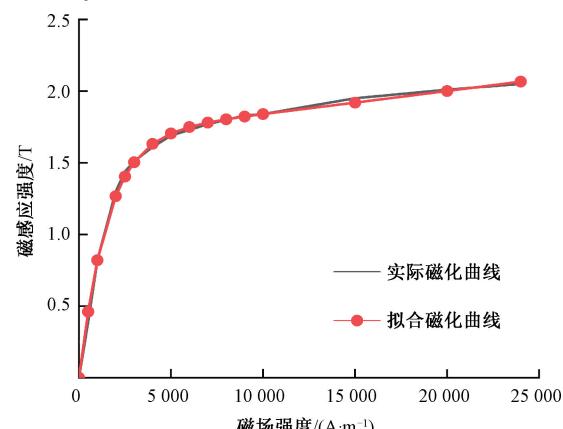


图 9 X52 型号碳钢磁化曲线及拟合曲线

Fig. 9 Magnetization curve and fitting curve for X52 carbon steel

由图 9 可知,拟合曲线近似接近材料的实际磁化曲线。拟合方程具有一定的理论指导性。因此,在管道磁化至饱和过程中,基于式(9)与实际磁特性曲线的迭代修正可确定动态磁阻,并通过磁化区磁导率表征其数值。

3.2 磁网络求解

管道永磁检测装置在内部检测过程中,其对应检测区域内预设有一处缺陷,采用磁网络法对激磁区的磁场进行整体分析时,认为管道磁网络模型与气隙磁网络模型之间的连接是固定的,而气隙磁网络模型与激磁装置模型之间的连接点通过位置而改变。管道永磁内检测装置磁化区的完整磁网络模型如图 10 所示。

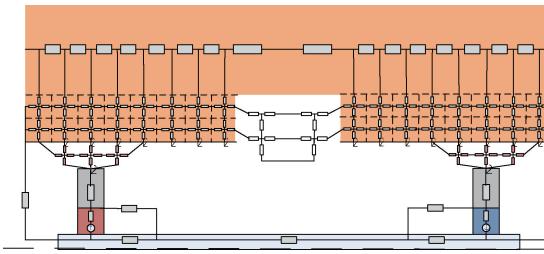


图 10 总磁网络模型

Fig. 10 Integrated magnetic network model

在计算管道缺陷漏磁场时,将激磁装置中钢刷、轭铁和永磁体之间磁导的连接看作是恒定的,仅考虑管道非线性磁导随时间变化。这样处理的好处是模块化求解,便于管内壁不同缺陷形状的组合。

根据磁网络与电网络的相似性,固定管道非缺陷区磁导矩阵、激磁值和磁传感器偏离位置不变,基于基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律,实现改进磁网络模型的求解。因此,磁网络模型中,节点磁势、磁阻和磁动势源的关系可表示为:

$$\mathbf{F} = \mathbf{G}^{-1} \cdot \boldsymbol{\Phi} \quad (10)$$

式中: \mathbf{G} 为磁阻矩阵; \mathbf{F} 为永磁体磁势; $\boldsymbol{\Phi}$ 为磁通矩阵。

管道磁化区的磁导,因碳钢材料非线性 B - H 曲线特性的影响,其磁导率 μ_r 将发生变化,采用牛顿-拉夫逊迭代法求解方程组,其关键步骤为:

1) 设置迭代终止误差 ε_0 ,假定每个磁导中的磁密为 B_0 ,由碳钢材料 B - H 曲线拟合公式得出管道磁化区的磁导率 μ 和磁场强度 H 。

2) 计算出磁导矩阵与磁通矩阵,然后求得每个节点相对于零节点的磁动势矩阵 \mathbf{F} 。

3) 根据各节点磁动势,计算出磁化区管道非线性磁导上对应的磁密 B_1 ,得到 2 个迭代前后磁密的误差表达式,即:

$$\varepsilon = |(B_1 - B_0)/B_0| \times 100\% \quad (11)$$

若 ε 小于迭代终止误差 ε_0 ,相关迭代过程终止,输出最终结果。然后,计算得到的 B_p 有时可能并未落在 B - H 曲线范围内。此时,为解决此问题,同时提高收敛速度,可进一步采取迭代法获得新的初始磁密后再次进行计算。对 B_1 进一步修正为:

$$B_p = \begin{cases} B_{\min}, & B_1 < B_{\min} \\ B_0 + \alpha(B_1 - B_0), & B_{\min} < B_1 < B_{\max} \\ B_{\max}, & B_1 > B_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: α 为迭代过程修正系数; B_{\min} 和 B_{\max} 分别为 B - H 曲线上磁密的最小值和最大值。基于上述分析,迭代流程图如图 11 所示。

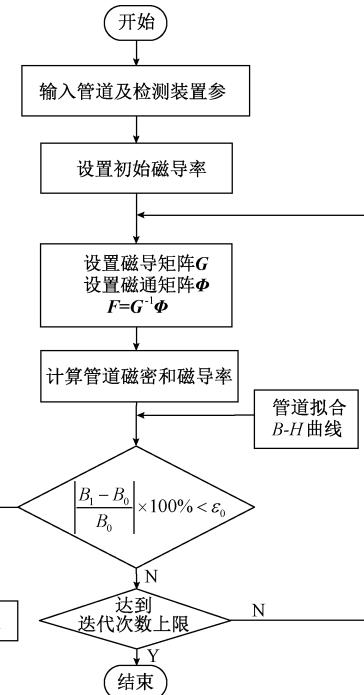


图 11 非线性磁路模型求解迭代过程

Fig. 11 Iterative process of solving nonlinear magnetic circuit model

4 计算结果与实验分析

为验证提出的管道磁场分析的改进磁网络模型的有效性和计算精度,在管道内壁引入多尺寸长方体缺陷进行理论分析,并通过模拟实际损伤特征的缺陷进一步验证该方法的可靠性。

4.1 有限元仿真

为验证改进磁网络模型的可靠性,采用 Comsol Multiphysics 软件构建了管道内壁永磁检测装置轴向磁化的三维有限元模型(仿真得到的磁通密度云图如图 2 所示)。具体过程为:建模过程中管道材料赋予 X52 型号碳钢 B - H 曲线(如图 9 所示),并以离散数据形式导入求解器,表征其非线性磁特性;在管道缺陷区域引入等效磁导率张量,用来精确描述缺陷导致的磁场畸变效应;轭铁区赋予 Q235 型号的 B - H 曲线;永磁体和钢刷部分采用相对磁导率模型简化计算;同时,在模型剖分求解前,设置模型边界条件如图 12 所示。

由图 12 可知,外围空气层施加磁力线平行边界条件,模拟自由空间磁场衰减情况;管道轴向对称面设置磁绝缘边界,降低模型自由度;永磁体施加磁通守恒条件,确保磁场闭合特性。网格剖分时,重点对管道缺陷区域实施分层细化策略,通过局部网格加密提升漏磁场分布

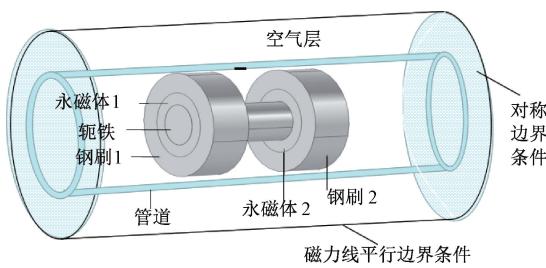


图 12 边界条件示意图

Fig. 12 Schematic diagram of boundary conditions

的空间分辨率,确保磁场在缺陷处突变的捕获精度;采用静磁场模块进行稳态求解,获取缺陷漏磁场空间分布特征。

4.2 实验装置

以小口径管道为实验对象,采用永磁激磁装置对其内壁进行完整性检测分析。管道永磁拖拉实验装置系统如图 13 所示。



图 13 拖拉实验系统

Fig. 13 Traction testing system

管道拖拉实验开始前,人为在钢板上制造不同尺寸的长方体缺陷后整体卷成管状放置在拖拉实验平台上,永磁检测样机放置于管道入口处,检测样机入口端与卷扬机相连实现动力牵引,控制中心一方面用于控制卷扬机的牵引速度,另一方面实现检测样机中磁传感器信号的回传监控。实验过程中,控制中心设置卷扬机运行于匀低速状态,保证磁传感器高精度采集。图 13 拖拉实验中管内壁缺陷磁化区相关结构参数如表 3 所示。

为保证试验的有效性,在管道内壁制造了不同尺寸的长方体缺陷如图 14 所示。图 14(b) 中 l_σ 、 h_σ 、 w_σ 分别表示长方体缺陷的长度、高度和宽度。

图 14 中所有缺陷信息显示如表 4 所示,其中包含缺陷的时钟位置。

表 3 管道永磁激磁区主要参数表

Table 3 Permanent magnet detection device main parameters

参数	取值/mm
气隙长度 δ	2
钢刷外径 R_s	152
永磁体外径 R_m	94
轭铁外径 R_e	70
管道外径 R_p	168
管道厚度 D_p	6
管壁缺陷长度 l_p	20
管壁缺陷高度 h_p	2
管壁缺陷宽度 w_p	10
永磁体磁通利用率 γ	0.86

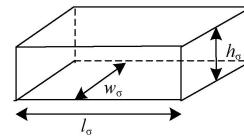
(a) 缺陷标识
(a) Defect characterization(b) 长方体缺陷结构
(b) Structural schematic of a cuboid defect

图 14 管壁缺陷

Fig. 14 Pipe wall defects

表 4 管内壁缺陷位置尺寸

Table 4 Position and dimensions of defects on the inner wall of the pipeline

缺陷序号	长度/mm	宽度/mm	深度/mm	(缺陷深度/管壁厚度)	时钟位置/°
G1	10	5	2	0.30	15
G2	12	5	2	0.30	30
G3	15	5	2	0.30	35
G4	20	10	3	0.50	50
G5	20	10	2	0.30	65
G6	20	10	1	0.16	95
G7	5	8	2	0.30	125
G8	5	10	2	0.30	200
G9	5	12	2	0.30	240

实验过程中,通过计算机与管道内检测器的网络端口连接,从而控制检测器的操作并将其设置为实时数据采集模式。断开控制连接器后,牵引机操纵管道内检测器,使其在管道内以一致的速度运行。完成拖拉过程后,通过网络接口建立重新连接,以下载在拖拉期间累积的数据。该序列数据有效反映了管壁缺陷信息,实现了管道完整性的评价。

4.3 结果分析

1) 方法对比

在管内壁制造一个长方体缺陷 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,探测器距管内壁位置 2 mm ,改进磁网络法、有限元法和实验测量得到的缺陷漏磁场的分布波形如图 15 所示。

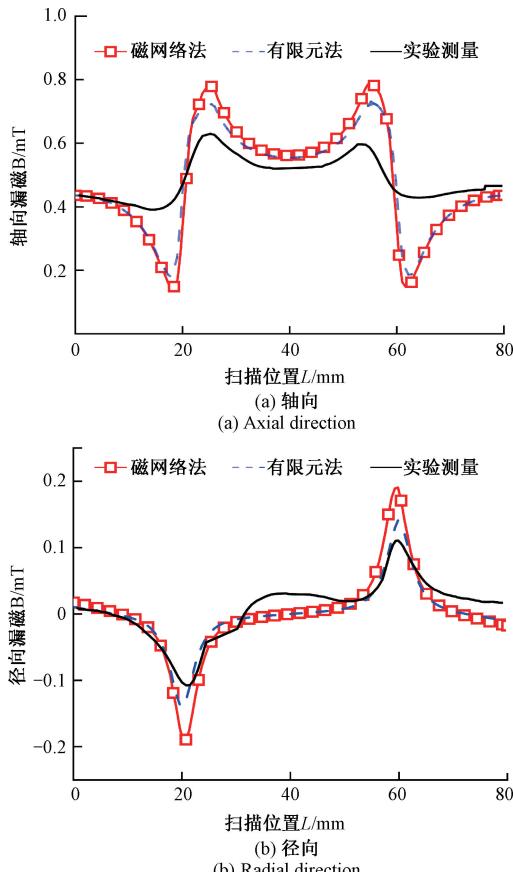


图 15 管内壁长方体缺陷漏磁场

Fig. 15 Magnetic flux leakage field of cuboidal defects on the inner wall of the pipeline

从图 15 中可以看出 3 种方法得到的缺陷漏磁场整体变化趋势是一致,并且改进磁网络法与有限元法计算出的缺陷漏磁场相差不大。改进磁网络法的轴向漏磁场幅值为 0.81 mT ,比有限元结果高出 0.04 mT ,相对误差 5.2% ;径向漏磁场幅值为 0.19 mT ,比有限元结果高出 0.06 mT ,相对误差 4.1% 。从实验测量结果看:理论分析

值与实验值偏差较大,相对误差为 $27\% \sim 29\%$,造成这种误差结果主要是由于在磁网络法分析中和有限元仿真分析中均忽略了外界磁场干扰、磁传感器采集精度等因素的影响。

为深入分析理论值与实验值的误差成因,本研究对管道内壁长方体缺陷的漏磁信号进行谐波分析。受实验系统中探头固有检测噪声的限制,所用实验数据均经低通滤波处理获得。实验数据与理论数据的漏磁场谐波成分分析如图 16 所示。

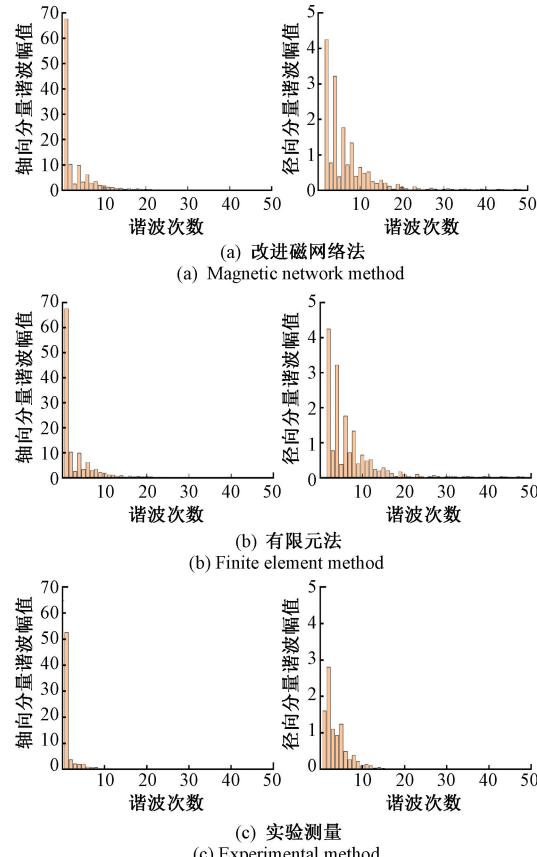


图 16 漏磁场谐波成分分析

Fig. 16 Analysis of harmonic components in leakage magnetic field

由图 16 可知,实验数据中轴向与径向分量谐波均呈现显著衰减。而实验数据中有效谐波分量的同步衰减,导致实验波形与理论波形出现偏差。理论数据的对比分析表明,改进磁网络分析法与有限元法所得的谐波成分较为吻合。通过对不同缺陷尺寸数据的分析,可判定谐波成分与缺陷尺寸的关联性。实验与理论数据的差异主要源于低通滤波过程,该过程在一致噪声的同时衰减了有效信号,造成关键谐波信息损失。

2) 缺陷尺寸变化对磁场的影响

为更进一步验证提出的改进磁网络法的有效性和可

适用性,基于上述研究的基础上,保持提离位置 2 mm 不变,分别对长方体缺陷长度 $L=5, 10, 20\text{ mm}$,宽度 $W=6, 8, 10\text{ mm}$,高度 $H=1, 2, 3\text{ mm}$ 时的缺陷进行研究。

固定长方体缺陷宽度 $W=10\text{ mm}$ 和深度 $H=2\text{ mm}$,改变缺陷长度为 $5, 10, 20\text{ mm}$,得到的管内壁缺陷漏磁场的分布波形如图 17 所示。

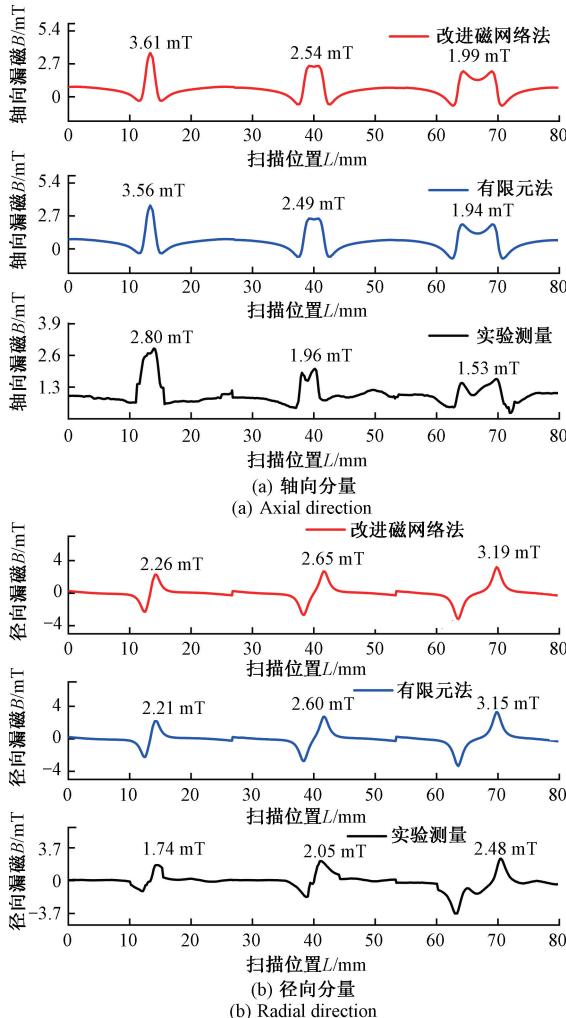


图 17 改变缺陷长度的漏磁分布

Fig. 17 Magnetic flux leakage distribution for changing defect length

由图 17 可知,长方体缺陷宽度和深度固定,漏磁场轴向峰值与缺陷长度成反比,漏磁场径向峰值与缺陷长度成正比。在漏磁波形形状变化趋势方面,可以看出随着缺陷长度的增加,漏磁轴向分量波形的顶部区域呈双峰值变化特征,即长度增加,与磁化方向垂直面的尖端磁场效应越明显。

固定长方体缺陷长度 $L=20\text{ mm}$ 和宽度 $W=10\text{ mm}$,改变缺陷深度为 $1, 2, 3\text{ mm}$,得到的管内壁缺陷漏磁场的分布波形如图 18 所示。

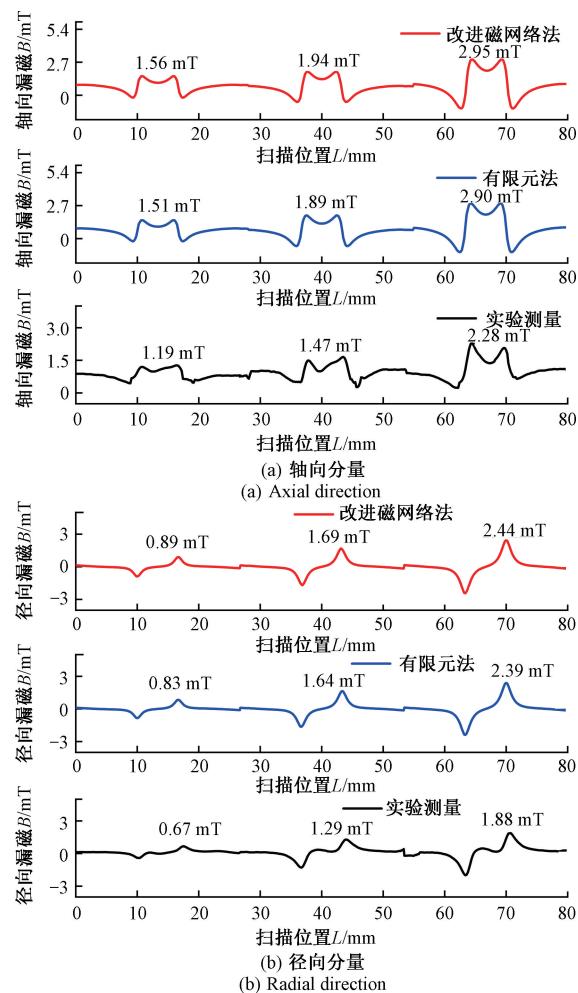


图 18 改变缺陷深度下的漏磁分布

Fig. 18 Magnetic flux leakage distribution for changing defect depths

由图 18 可以看出长方体缺陷长度和宽度固定的条件下,漏磁轴向峰值和径向峰值均随缺陷深度的增加而呈线性增大的趋势。同时,缺陷深度的改变并未引起漏磁场波形形态的显著变化,波形整体特征保持稳定。即缺陷深度主要影响漏磁场的幅值大小,而对波形分布形态影响较小。

固定长方体缺陷长度 $L=20\text{ mm}$ 和深度 $H=2\text{ mm}$,改变缺陷宽度为 $6, 8, 10\text{ mm}$,得到的管内壁缺陷漏磁场的分布波形如图 19 所示。

由图 19 可以看出长方体缺陷长度和深度保持不变的条件下,漏磁信号的轴向峰值和径向峰值均随缺陷深度的增加呈正相关增长趋势。同时,漏磁场波形的形态并未有明显变化,波形整体特征保持一致。与图 17(a)相比,图 18(a)的轴向漏磁信号随缺陷尺寸变化的增长速率较为缓慢,可能与漏磁通的分布机制有关。

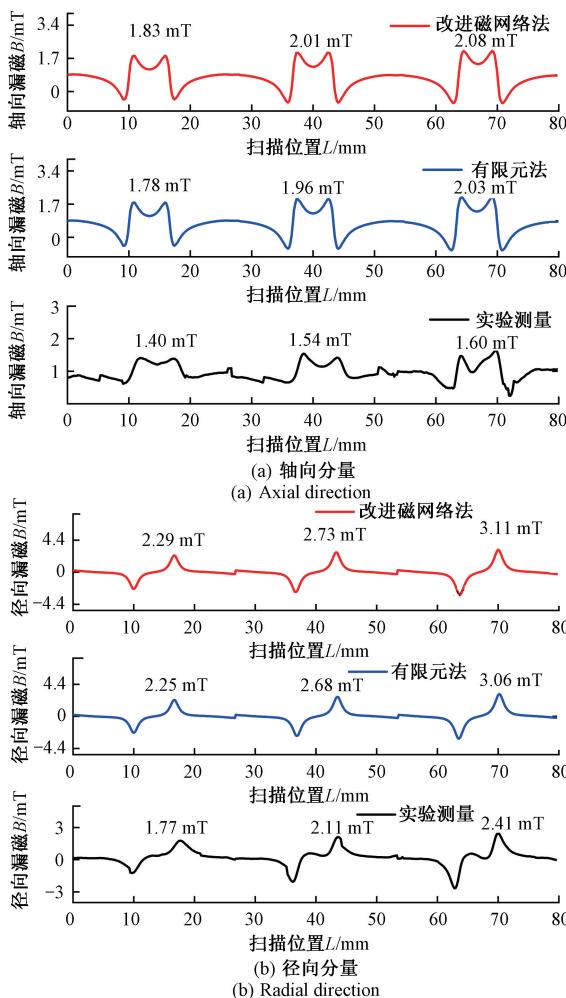


图 19 改变缺陷宽度下的漏磁分布

Fig. 19 Magnetic flux leakage distribution for changing defect widths

从图 17、18 和 19 的综合分析可知,无论长方体缺陷的尺寸如何改变,则磁网络法计算的结果与有限元仿真结果的误差均在 5% 范围内,与实验测量结果之间误差在 30% 范围内。

3) 仿真时间

用上述 2 种方法对管内壁长方体缺陷的漏磁性能进行详细分析,其求解步长均为 0.01 s,求解时间如表 5 所示。

表 5 求解时间

Table 5 Solution time

方法	时间/s
有限元法	780
改进磁网络法	125

由表 5 可知,与有限元法相比,改进磁网络法能够减低漏磁场求解时间。

5 结 论

基于在役管道寿命评估的热点问题,建立管壁缺陷漏磁场与永磁激磁装置结构参数的精准模型。本研究提出了一种考虑激磁装置端部效应和管道磁性材料非线性的改进磁网络模型构建方法,解决了传统有限元法计算时间偏长与传统磁路法计算条件过于理想化不适用于磁动态分析等问题。可得出的主要结论为:

1) 所提出的改进磁网络模型构建方法可建立缺陷漏磁场与激磁装置结构参数的关系,能够适用于管壁缺陷动态磁场的计算研究。

2) 相比较有限元法,所提出的改进磁网络模型能够在保证管内壁长方体缺陷漏磁场计算准确性的同时,降低 20% 的计算时间。

3) 相关实验结果验证了所提出的改进磁网络模型性能计算结果的可行性和有效性。改进磁网络模型计算结果与有限元仿真结果误差在 5% 范围内,与实验测量结果误差在 30% 范围内。

参考文献

- [1] 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. Study on the electromagnetic method for measuring pipe yield strength [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(10): 75-84.
- [2] 赵东升,杨理践,耿浩,等. 基于多尺度特征的管道环焊缝定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 118-129.
ZHAO D SH, YANG L J, GENG H, et al. Research on the localization method of pipeline girth weld based on multi-scale feature [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 118-129.
- [3] 高波,杨理践,黄平. 基于磁涡流效应的低磁化强度缺陷检测技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(6): 205-214.
GAO B, YANG L J, HUAGN P. Study on defection technology for low-magnetization materials based on magnetic eddy current effect [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(6): 205-214.
- [4] 吕瑞宏,解海龙,王晨丽,等. 基于空耦超声管道防

- 腐层裂纹识别算法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12):234-245.
- LYU R H, XIE H L, WANG CH L, et al. Research on crack identification algorithm of anti-corrosion layer of air coupling ultrasonic pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12):234-245.
- [5] 刘斌, 罗宁, 武梓涵, 等. 基于双磁场的管道非体积损伤检测研究 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(8):77-91.
- LIU B, LUO N, WU Z H, et al. Research on non-volume damage of pipeline based on dual magnetic field detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(8):77-91.
- [6] WANG R B, KANG Y H, TANG J, et al. Analysis of the mechanism of leakage magnetic field generated by internal defects [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2023, 42(2): 1-9.
- [7] 李春晖, 吕岩, 孟祥来, 等. 基于 YOLOv8 的油气管道漏磁检测缺陷智能识别技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 247-254.
- LI CH H, LYU Y, MENG X L, et al. Research on intelligent defect recognition in oil and gas pipeline magnetic flux leakage detection based on YOLOv8 [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 247-254.
- [8] 刘金海, 赵真, 付明芮, 等. 基于主动小样本学习的管道焊缝缺陷检测方法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(11): 252-261.
- LIU J H, ZHAO ZH, FU M R, et al. Active small sample learning based the pipe weld defect detection method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11): 252-261.
- [9] DUBAS F, BOUGHRATA K. New scientific contribution on the 2-D subdomain technique in polar coordinates: Taking into account of iron parts [J]. Mathematical and Computational Applications, 2017, 22(4): 42-71.
- [10] 刘真伟, 韩文花, 杨婷. 一种快速计算二维缺陷漏磁场的有限元建模和求解方法 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 192-202.
- LIU ZH W, HAN W H, YANG T. Fast finite element modeling and solving method for 2D defect magnetic leakage field [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 192-202.
- [11] GAO P F, GENG H Y, YANG L J, et al. Research on quantification method of ellipsoidal defects based on leakage magnetic detection [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(9): 14503-14518.
- [12] LONG Y, ZHANG J H, HUANG S L, et al. A novel crack quantification method for ultra-high-definition magnetic flux leakage detection in pipeline inspection [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(16): 16402-16413.
- [13] ZHONG Y, WANG G, YU X, et al. Defect size quantification for pipeline dynamic MFL detection via 3-D dynamic magnetic dipole forward model [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74(1): 6001910.
- [14] LI SH P, BAI L B, FENG CH R, et al. An improved magnetic dipole model for MFL testing based on non-uniform magnetic charge distribution [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2023, 39(7): 1960-1979.
- [15] 杨理践, 梁成壮, 高松巍, 等. 管道漏磁内检测的管壁缺陷漏磁场解析模型 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 106-114.
- YANG L J, LIANG CH ZH, GAO S W, et al. Analytical model of magnetic flux leakage field of pipe wall defects based on magnetic flux leakage internal detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 106-114.
- [16] ZHU J W, ZUO Y F, CHEN H, et al. Deep-investigated analytical modeling of a surface permanent magnet vernier motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(12): 12336-12347.
- [17] PESONEN N, KAHN W K, ALLEN R A, et al. Application of conformal mapping approximation techniques: Parallel conductors of finite dimensions [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(3): 812-821.
- [18] 张志弘, 韩勤锴, 徐学平, 等. 基于保角变换与等效磁路法的永磁直驱发电机气隙磁场计算 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(3): 703-711.
- ZHANG ZH H, HAN Q K, XU X P, et al. Air gap magnetic field calculation of permanent magnet direct drive generator based on conformal mapping and magnetic equivalent circuit method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3): 703-711.

- [19] 杨理践, 崔益铭, 高松薇, 等. 管道漏磁内检测装置的磁路优化设计 [J]. 沈阳工业大学学报, 2010, 32(3): 311-315.
YANG L J, CUI Y M, GAO S W, et al. Optimization design of magnetic circuit in pipeline magnetic leakage internal detecting device [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2010, 32(3): 311-315.
- [20] 杨理践, 张国光, 刘刚, 等. 管道周向励磁漏磁检测磁路设计[J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(1): 39-40,44.
YANG L J, ZHANG G G, LIU G, et al. Magnetic circuit design of pipeline circumferential excitation leakage detection [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2010, 37(1): 39-40,44.
- [21] JIANG H, SU ZH ZH, WANG D. Analytical calculation of active magnetic bearing based on distributed magnetic circuit method [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 1841-1851.
- [22] 石凡, 王宏华, 李昊, 等. 一种计及定转子磁极磁阻的单绕组无轴承开关磁阻电机新型数学模型[J]. 电工技术学报, 2024, 39(24): 7712-7727.
SHI F, WANG H H, LI H, et al. A new mathematical model for single-winding bearingless switched reluctance motor considering the reluctance of stator and rotor poles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(24): 7712-7727.
- [23] FARADONBEH V Z, RAHIDEH A, AMIRI E, et al. General 2-D analytical framework for no-load analysis of interior permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(1): 2020-2033.
- [24] QIN W, CHENG M, WANG J X, et al. Compatibility analysis among vector magnetic circuit theory, electrical circuit theory, and electromagnetic field theory [J]. IEEE Access, 2023, 11: 113008-113016.
- [25] 闫晨飞, 孙振国, 张文增, 等. 变磁化方向单元组合式永磁吸附装置优化设计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 188-194.
YAN CH F, SUN ZH G, ZHANG W Z, et al. Optimization design of the unit combined permanent magnetic adsorption device with variable magnetization directions [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 188-194.
- [26] CHENG W Y. Non-destructive testing of back-side local wall-thinning by means of low strength magnetization and highly sensitive magneto-impedance sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(14): 5548-5556.
- [27] 付东山, 吴康伊, 郑萍, 等. 磁路互补性横向磁通切换直线电机电磁推力计算与特性分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(22): 5717-5727.
FU D SH, WU K Y, ZHENG P, et al. Analysis of electromagnetic thrust characteristics of magnetic circuit complementary transverse flux switching linear motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(22): 5717-5727.
- [28] 佟文明, 姚颖聪, 李世奇, 等. 考虑磁桥不均匀饱和的内置式永磁同步电机等效磁网络模型[J]. 电工技术学报, 2022, 37(12): 2961-2970.
TONG W M, YAO Y C, LI SH Q, et al. Equivalent magnetic network model for interior permanent magnet machines considering non-uniform saturation of magnetic bridges [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12): 2961-2970.
- [29] 梁志文, 刘欣. 新型盘式行星永磁电机的等效动态网络模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(10): 2182-2191.
LIANG ZH W, LIU X. Equivalent dynamic magnetic network model of novel discplanetary permanent magnet motor [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(10): 2182-2191.
- [30] 王超, 彭兵, 闫伟, 等. YASA 轴向磁通永磁电机定子槽漏感计算[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(10): 4082-4091.
WANG CH, PENG B, YAN W, et al. Calculation of slot inductance of axial flux permanent machine with yokeless and segmented armature [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 4082-4091.
- [31] 刘柯, 曾成碧, 李明贤, 等. 轴向磁通永磁同步电机快速等效磁路分析 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(24): 14-20.
LIU K, ZENG CH B, LI M X, et al. Fast equivalent magnetic circuit analysis of axial flux permanent magnet synchronous motor [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(24): 14-20.
- [32] 徐伟, 张祎舒, 曹辰, 等. 定子不对称极混合励磁双凸极电机改进型非线性变磁网络模型构建方法研
徐伟, 张祎舒, 曹辰, 等. 定子不对称极混合励磁双凸极电机改进型非线性变磁网络模型构建方法研

- 究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 304-317.
- XU W, ZHANG Y SH, CAO CH, et al. Improved construction method of nonlinear varying equivalent magnetic network model for hybrid excitation asymmetric stator pole double salient machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 304-317.
- [33] PARRA-RAAD J A, ROA-PRADA S. Multi-objective optimization of a magnetic circuit for magnetic flux leakage-type non-destructive testing[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2016, 35(1): 14-25.
- [34] 汪小娜, 张筱琛, 吴旭升, 等. 基于磁场分割法的 IPT 系统耦合线圈电感计算[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 31-37.
- WANG X N, ZHANG X CH, WU X SH, et al. Inductance calculation of coupling coils IPT system based on magnetic-field division[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(1): 31-37.
- [35] SUDHOFF S D. Magnetics and magnetic equivalent circuits[J]. Power Magnetic Devices, 2014; 70-81.
- [36] LIU X, HAN B CH. The multiobjective optimal design of a two-degree-of-freedom hybrid magnetic bearing [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(9): 2313315.
- [37] 柯松, 张辉, 倪泽钧. 常用钢材磁特性曲线速查手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- KE S, ZHANG H, NI Z J. Quick reference manual for magnetic characteristic curves of commonly used steel

materials [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003.

作者简介



李崇, 2008 年于沈阳大学获得学士学位, 2011 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学在读博士研究生, 主要研究方向为长输油气管道漏磁内检测技术及相关理论。

E-mail: Lc_study123@123.com

Li Chong received her B. Sc. degree from Shenyang University in 2008, and her M. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2011. She is currently a Ph. D. candidate at Shenyang University of Technology. Her main research interests include magnetic flux leakage internal testing technology and related theory for long oil and gas pipelines.



杨理践(通信作者), 1981 年于沈阳工业大学获得学士学位, 1984 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学教授, 主要研究方向为长输油气管道内检测技术及相关理论、无损检测技术。

E-mail: yanglijian888@163.com

Yang Lijian (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 1981, and his M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1984. He is currently a professor at Shenyang University of Technology. His main research interests include internal inspection of long-distance oil and gas pipeline, related theory, and nondestructive testing technology.