

大提离漏磁无损检测方法

唐 健,王荣彪,康宜华

(华中科技大学 机械科学与工程学院,武汉 430074)

摘 要:漏磁检测是一种重要的无损检测方法,广泛应用于石油、钢铁等行业。在漏磁检测中,提离值是最重要的工艺参数之一。就保护探头或曲面检测的角度而言,通常传感器与工件之间始终保持一定的提离值,但漏磁场随提离值的增大会迅速衰减,降低了检测的灵敏度和信噪比。因此如何实现大提离下的高精度漏磁检测,一直以来都是研究的热点。首先探讨了提离值的定义及提离值对漏磁信号的影响;归纳了信源、传递介质以及传感器这3个大提离检测的要素,并根据这3个要素,总结归纳了目前国内外学者提出的诸多大提离漏磁检测方法并介绍了基于转变检测对象的大提离检测方法;最后讨论了大提离漏磁检测方法目前仍存在的问题以及其发展趋势。

关键词:大提离;漏磁检测;无损检测;磁场传递;铁芯

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2022)04-0067-06

Magnetic flux leakage nondestructive testing with large lift-off

TANG Jian, WANG Rongbiao, KANG Yihua

(School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Magnetic flux leakage testing is an important nondestructive testing method, which is widely used in petroleum, steel, and other industries. In magnetic flux leakage detection, the lift-off value is one of the most important parameters. Generally, from the perspective of protecting the probe or curved surface detection, a certain lift-off value needs to be maintained between the sensor and the workpiece. However, the leakage magnetic field decays rapidly with the increase of lift-off value, which reduces the sensitivity and signal-to-noise ratio of detection. Therefore, how to make the sensor realize high-precision magnetic flux leakage detection under large lift-off has been an important research focus. Firstly, this paper discusses the definition of lift-off value and introduces the influence of lift-off value. Secondly, three elements of large lift-off detection are summarized. They are the source, transmitting medium, and sensors. According to the above influencing factors, many magnetic flux leakage detection methods proposed by domestic and foreign scholars are summarized. In addition, the method based on transformation detection object is also introduced. Finally, the existing problems and the development trend of large lift-off magnetic flux leakage detection methods are discussed.

Key words: large lift-off; magnetic flux leakage; nondestructive testing; magnetic field transfer; iron core

金属零部件在交变载荷作用下,其中微小的裂纹容易延伸扩展,造成零部件的断裂失效,严重危害相关人员的生命和财产安全。因此重要的零部件需要在出厂前或服役中进行检测^[1]。漏磁检测是一种

广泛应用于钢管、钻杆、储油罐、汽车零部件等铁磁性材料的无损检测方法。相较于其他方法,其具有灵敏度高、无需耦合剂、操作方便、检测成本低以及易于自动化等优势,对铁磁性工件表面和内部的裂纹、孔洞等缺陷的检测效果显著^[2]。在漏磁检测中,探头与待检测工件表面之间的距离称为提离值,是漏磁检测中最重要的工艺参数之一。通常为了保护传感器或提高检测稳定性,检测时始终会保持一定的提离值^[3],但缺陷的漏磁场会随提离值的增大而

收稿日期: 2021-10-14
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875226)
作者简介: 唐 健(1993—),男,博士研究生,主要研究方向为电磁无损检测新方法
通信作者: 康宜华, yihuakang@hust.edu.cn

迅速衰减^[4],无法有效地检测微小裂纹或在处于复杂电磁环境下的裂纹。笔者首先辨析了探头、传感器和敏感元件的概念,对提离值的定义进行了讨论;然后分析了实现大提离漏磁检测的关键要素;最后对国内外的研究成果进行了归纳总结,以期为进一步开展相关研究及工程应用提供参考。

1 漏磁检测中的提离值

1.1 提离值定义

“提离值”源自涡流检测、漏磁检测等电磁无损检测方法中的提离效应,即缺陷产生的扰动磁场在空气中传递迅速衰减,同时导致传感器在不同高度检测到的信号差异较大。

漏磁检测提离值定义如图 1 所示。通常敏感元件和封装外壳构成的传感器可以直接测量漏磁场,如传感器 A,也可以在传感器底部增加汇集磁场的传递介质构成灵敏度更高的传感器,如传感器 B。如果考虑到传感器耐磨、耐高温、防止工件划伤等目的,需要保持传感器与工件之间一定的提离值,即图 1 中的 d_1 ,此时提离值定义中的“传感器”应该理解为具有独立功能和封装结构的传感器。但是,当以“提离效应”讨论提离值时,无论是贴片电感还是霍尔元件,传感器外层的封装结构并不影响提离效应,实际的提离值仍为敏感元件与工件之间的距离,即图 1 中的 d_2 ,而非传感器底面与工件之间的距离 d_1 ,此时提离值定义中的“传感器”应该理解为敏感元件。下文介绍的诸多大提离检测方法,也讨论的是敏感元件到工件的距离。

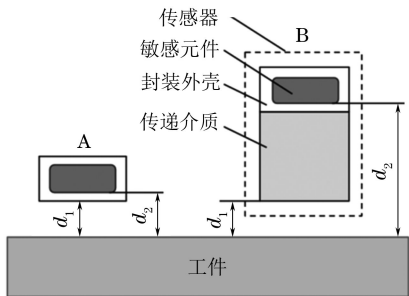


图 1 漏磁检测提离值定义示意

1.2 提离值的影响

漏磁场水平分量与提离值的函数关系如图 2 所示^[5],可见,漏磁场随提离值的增大呈负指数级衰减。因此当提离值较大时,漏磁场信号会大幅衰减,降低信噪比。另一方面,提离值也会影响漏磁信号的稳定性^[6]。由图 2 可以看出,当提离值较小时,提离值变动 Δl 导致漏磁场变动 ΔB_1 ,而当提离值较

大时,漏磁场变动为 ΔB_2 ,可以明显看出, $\Delta B_1 > \Delta B_2$ 。也就是说当低提离时,探头对提离值的变化更加敏感,更加不稳定;而高提离时,探头对提离值的变动更不敏感,信号更加稳定。

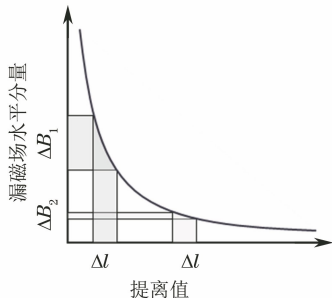


图 2 漏磁场与提离值的函数关系

在高精度漏磁检测中,传感器零提离可以获得最佳的检测灵敏度,但会磨损传感器,而且对于轴承套圈、凸轮轴等表面精密加工的零件而言,传感器直接接触扫查还可能会划伤精加工面。同时,微小提离检测会使机械抖动噪声信号明显,信号不稳定。因此大提离漏磁检测的信号增强方法一直以来是学者们研究的重点。

1.3 大提离检测的要素

将无损检测的传感过程简化为如图 3 所示的系统模型。首先待检测工件产生信源(如光、超声波、磁场、电场、热场等),信源经过传输介质的传导,扩散至传感器所在的区域,传感器将特定的物理信号转化为方便传输、识别、存储的电信号,从而完成信号的拾取和转换。

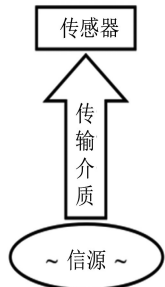


图 3 无损检测传感的系统模型

提离值主要在电磁无损检测领域中使用,通常都在毫米和亚毫米尺度。而光学检测和热成像检测却可以实现分米级甚至米级的远距离检测,主要原因是光学检测通过打光使被检测特征产生足够强和对比度足够高的可见光反射;热成像检测是通过加热使检测对象的热场分布不均且对外产生红外辐射,无论是可见光还是红外辐射都是一种电磁波,电磁波在空气中传播能量集中,衰减很小,通过足够高

分辨率的相机或红外相机就可以捕捉到图像特征。

总之,实现远距离无损检测,首先需要信源的强度和信噪比足够高,这是整个检测过程的基础;其次需要传输介质协助信源的传递,避免信源在介质中衰减;最后需要高灵敏度的传感器对信号进行拾取和转换。

2 大提离漏磁检测方法

2.1 调整信源

信源是检测的基础,对于漏磁检测来说,大提离检测要求信源的强度和信噪比足够高。通常来说,缺陷的漏磁场随磁化场强度的增大而增大,最后趋于饱和,因此常规的漏磁检测要求在饱和磁化或近饱和磁化状态下进行^[7]。

除了饱和磁化之外,SUN 等^[7]研究发现,漏磁场不仅和磁化场、缺陷尺寸有关,还和缺陷附近的背景磁场有关,背景磁场会抑制漏磁场的传播范围和强度,导致大磁化反而不一定得到大的漏磁场。这就是所谓的磁压缩效应,基于此,孙燕华等^[8]提出了一种基于磁真空泄漏原理的漏磁无损检测新方法(见图 4),该方法使用磁屏蔽罩大幅降低背景磁场,促使工件中的磁场向上方的传感器泄漏,扩大了漏磁场的扩散范围,显著提高了磁敏元件在大提离值下的检测灵敏度。

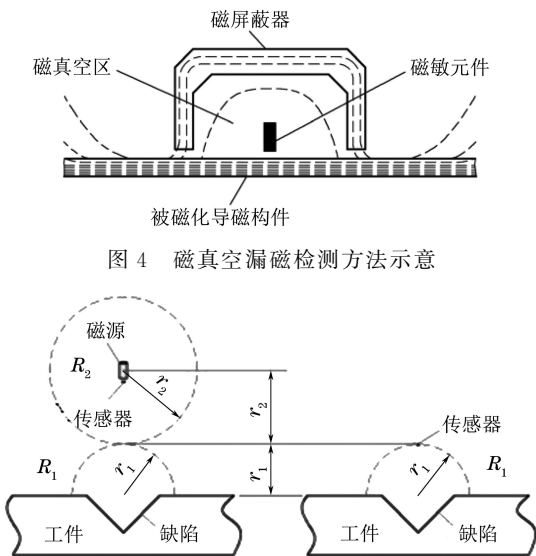


图 4 磁真空漏磁检测方法示意

图 5 磁场扰动漏磁法与常规漏磁法对比

SUN^[9]的另一个研究提出了基于磁场扰动的大提离检测方法。磁场扰动漏磁法与常规漏磁法对比如图 5 所示,常规的漏磁检测中只有一个缺陷漏磁场 R_1 ,漏磁场的扩散半径仅为 r_1 。在磁场扰动方法中,在传感器上方增加一个附加磁源 R_2 ,磁源

R_2 的磁场影响范围为 r_2 ,磁源 R_2 会与磁源 R_1 相互作用,在 r_1 和 r_2 的范围内磁场产生相互扰动。这样通过两个磁源的相互扰动作用,就可以在磁源 R_2 附近检测到缺陷信号。显然这样布置的传感器可以有很大的提离值,从而实现了基于磁场扰动的大提离检测。

2.2 改变传递介质

漏磁场被传感器拾取需要经过提离空间的传递,而在常规的漏磁检测中漏磁场通过空气传播到传感器时已经经过了大幅度衰减。因此如何改变传递介质避免漏磁场在空气中的衰减一直是提离漏磁检测的重点研究内容,许多学者都在这个领域提出了大提离的检测方法。

WU 等^[10]在研究井口钻杆漏磁检测中提出了使用聚磁铁芯的方法实现大提离检测。聚磁铁芯大提离检测原理如图 6 所示。因为空气的相对磁导率接近于 1,磁阻很大,漏磁场在空气中传播时衰减迅速,故使用传统的感应线圈进行信号拾取,灵敏度较差,而铁磁性材料的相对磁导率通常是空气的成百上千倍,因此对空气中的漏磁通就有聚集的作用。在大提离情况下,聚磁铁芯将低处的漏磁场汇聚到铁芯中(见图 6)。感应线圈缠绕在聚磁铁芯上,制成大提离传感器(见图 7),感应线圈内部的磁通量也就相应增大,从而实现大提离漏磁检测。

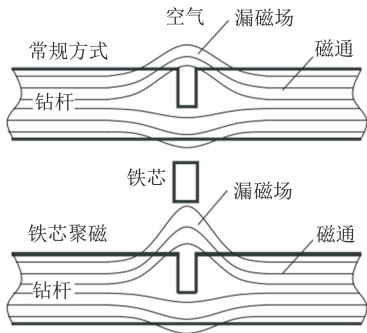


图 6 聚磁铁芯大提离检测原理示意

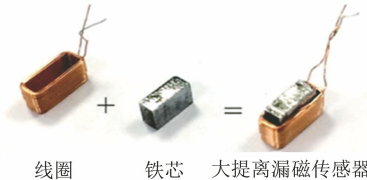


图 7 聚磁铁芯式大提离传感器实物

MA 等^[11]为了提高钻杆漏磁检测信噪比也提出了一种聚磁方法,由高相对磁导率的材料制成的双“L”型聚磁装置(见图 8),漏磁场泄漏到空气后由聚磁装置汇聚,引导至包含磁传感器的测量通路中。

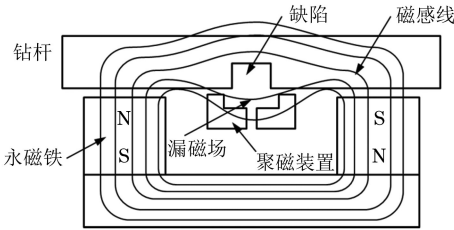


图 8 钻杆漏磁检测聚磁装置结构示意图

研究发现,使用该形式的聚磁装置可以降低测量回路中的磁阻,有效提高了漏磁场的信噪比,也相应地降低了对提离值的要求。

LEE 等^[12]提出了一种通过磁导管传递漏磁场的大提离检测方法,其原理如图 9 所示。该方法在磁传感器的下方放置磁导管(细长杆状的铁芯),使漏磁场的磁感线通过磁导管传递至高处的磁传感器。其整个磁场的传递过程基于磁畴的动力学模型,外部的磁化会使磁导管内部的磁畴重新分布,使磁畴变大,且方向与外部磁化场逐渐趋近。但是由于磁畴壁不能在位错、晶结或裂纹处移动,即使在 x 方向上施加漏磁场,磁柱边界处的磁畴壁也不会重新分布。而在 z 方向的磁化下,磁畴壁容易沿着 z 方向重新定位,从而使磁柱产生磁各向异性。因此细长的磁导管就可以有效地将漏磁场传递至高处的磁传感器,实现了大提离的检测。

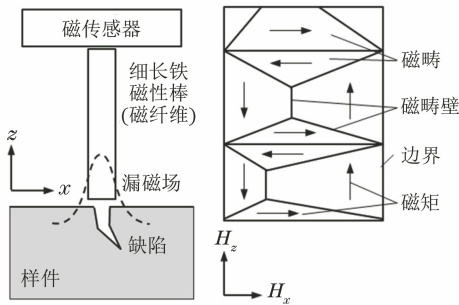


图 9 磁导管传递漏磁场原理示意

此外 LEE 等^[13]还提出了一种磁透镜检测方式,该方法也是基于聚磁铁芯的原理,使用放置在橡胶或塑料磨具中的磁流体形成“磁透镜”,并在磁透镜表面阵列放置霍尔传感器。与矩形磁透镜相比,圆形的磁透镜消除了边缘效应,并且可以阵列更多的传感器以增强空间分辨率。与铁氧体或者硅钢等材料制作的聚磁体相比,采用磁流体的磁透镜方式在实现聚磁效果的同时还避免了铁磁性材料剩磁强度和磁滞效应对聚磁效果产生的不利影响。

2.3 采用高灵敏度传感器

对于漏磁检测而言,大提离会导致传感器拾取到的漏磁信号幅值降低,信号淹没在噪声中,容易产

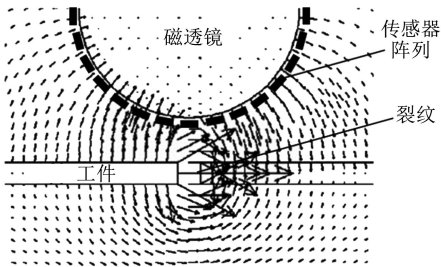


图 10 磁透镜汇聚漏磁场原理示意

生漏检。传感器的噪声通常由传感器内部的电路特性和电磁环境造成,与提离值关系不大^[14-15],而缺陷的漏磁场信号随提离值迅速衰减。因此提高传感器的灵敏度就可以提高缺陷大提离检测的信噪比。

近年来,高灵敏度磁传感器发展迅猛,尤其是以各向异性磁敏电阻(AMR)^[16]、巨磁电阻(GMR)^[17]以及隧道磁敏电阻(TMR)^[18-19]等为代表的磁敏电阻开始广泛应用于精密漏磁检测中微弱磁场的检测。与传统的霍尔传感器相比,新型磁敏电阻传感器具有灵敏度更高、分辨率更高等特点,适合在大提离下拾取微弱的漏磁场信号,不同磁传感器技术参数对比如表 1 所示。

表 1 不同磁传感器技术参数对比

传感芯片	灵敏度/ ($\text{mV} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{mT}^{-1}$)	工作范围/ mT	分辨率/ μT	适用温度/ $^{\circ}\text{C}$
霍尔元件	0.5	0.1~100	50	<150
AMR	10	0.000 1~1	0.01	<150
GMR	30	0.01~3	0.2	<150
TMR	200	0.000 1~20	0.01	<200

此外,新的传感器设计也有助于灵敏度的提升或信噪比的增强。JIN 等^[20]对比研究了基于 MTJ (磁隧道结)的单 TMR 传感器和全桥惠斯通电桥式 TMR 传感器,全桥式惠斯通电桥 TMR 连接方式如图 11 所示。相较于单 TMR 传感器而言,虽然全桥惠斯通电桥式 TMR 传感器灵敏度较低,但是惠斯通电桥有效抑制了传感器的白噪声,因此获得了较高的信噪比。试验结果表明,在 4~20 cm 的提离范围内,全桥式 TMR 传感器在更大的提离值下可以获得与单 TMR 相同的信噪比。

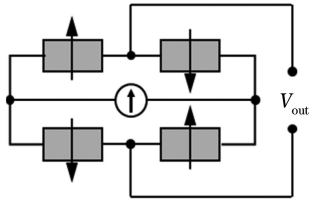


图 11 全桥式惠斯通电桥 TMR 连接方式示意

WU 等^[21]提出了一种差分漏磁检测方法, 差分式漏磁检测传感器配置(双传感器差分配置)如图 12 所示。该方法通过优化双传感器差分间距, 可以提高检测灵敏度, 此外检测信号几乎不受背景磁场和机械振动的影响, 具有良好的信号稳定性。

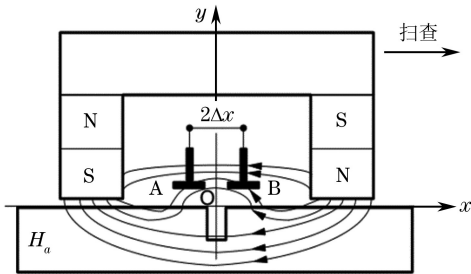


图 12 差分式漏磁检测传感器配置示意

另外 WANG 等^[22]提出了一种交直流互扰的大提离漏磁检测方法, 交直流互扰漏磁检测原理如图 13 所示。缺陷在磁化作用下产生漏磁场, 该方法的新传感器由感应线圈和激励线圈构成, 激励线圈产生的高频磁场作为载波与低频漏磁场调制, 调制后的磁场包含完整的漏磁场信号。信号调制使漏磁信号频率增大, 而感应线圈测量的是磁通的变化量, 对高频敏感, 因此感应线圈对调制后的漏磁信号检测灵敏度较高。虽然检测的形式与漏磁、涡流检测形式相似, 但检测原理不同, 试验结果表明, 与常规漏磁和涡流检测相比, 交直流互扰检测方法的信号更强, 信噪比更高, 有利于铁磁性材料检测。

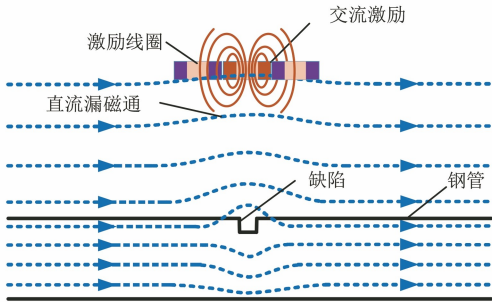


图 13 交直流互扰漏磁检测原理示意

2.4 转变检测对象

除了依据上述方法之外, 在某些条件下, 也可以跳出“信源-介质-传感”的检测系统, 由物理场的传递, 转变为检测对象的转换, 实现大提离漏磁检测。

录磁检测法也是一种基于漏磁原理的检测方法。其首先对待检测工件施加合适的磁化场, 在缺陷附近就会产生漏磁场, 然后通过柔性的磁带覆盖在工件表面记录漏磁场(见图 14), 再对储存了漏磁场信息的磁带进行读取(见图 15), 从而对工件进行检测。就检测原理而言, 录磁检测与常规的漏磁检测方法类

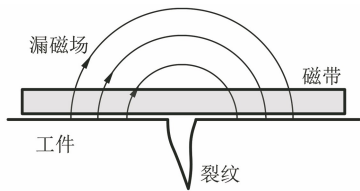


图 14 磁带录磁检测示意

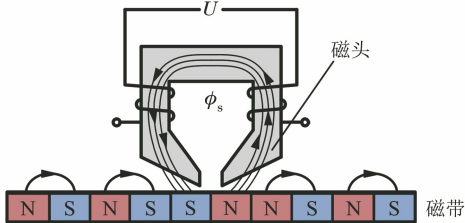


图 15 磁带磁信号拾取示意

似, 都是拾取缺陷的漏磁场。不同的是, 常规漏磁检测直接用磁传感器拾取漏磁场, 而录磁检测通过磁带转录, 再读取磁带上的磁信息。虽然录磁检测步骤较为复杂, 但磁带与工件直接接触, 零提离拾取漏磁场, 可以获得很高的灵敏度。该方法再使用磁传感器在远离工件的位置读取磁带中的漏磁场信息, 转变漏磁检测的对象, 从某种意义上而言, 间接地实现了大提离漏磁检测, 并且提高了检测灵敏度^[23]。

此外 YANG 等^[24]提出了一种结合磁粉检测和漏磁检测的高灵敏度大提离检测方法。首先对工件进行适当磁化, 在工件表面喷洒一层磁粉, 由于磁粉与工件表面是零提离, 漏磁场强度大, 对微米级别的裂纹也有较高的灵敏度, 但是仅用磁粉检测不便于自动化和定量化检测。因此, 需在此基础上, 再进行漏磁检测(见图 16)。这时漏磁检测的对象已经不再是工件上的裂纹, 而是聚集在裂纹附近的磁粉堆, 检测对象发生了转变。因为磁粉的聚集范围大于裂纹的宽度, 所以喷洒的磁粉一方面对裂纹具有放大作用; 另一方面, 磁粉聚集具有一定的高度, 抬高了检测对象, 降低了提离值, 使信号强度增大。需要说明的是裂纹缺陷是凹向工件一侧的, 漏磁信号呈现大于背景磁场的形态, 而当磁粉聚集在裂纹附近后,

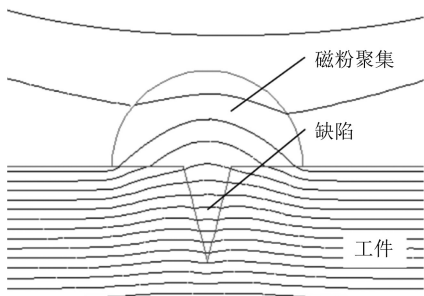


图 16 磁粉漏磁联合检测原理示意

磁粉聚集是凸向空气一侧的,根据磁折射原理,此时的漏磁场形态与原先方向相反,呈现小于背景磁场的形态。该方法通过磁粉检测与漏磁检测的结合,转换了检测对象,实现了微裂纹的大提离检测。

3 结语

总结归纳了目前大提离漏磁检测的诸多方法,学者们主要从增大信源、改变传递介质以及开发灵敏度更高、抗干扰能力更强的磁性传感器等3个方面入手提高检测能力,此外还可通过转换检测对象提高检测能力。

目前,漏磁检测在钢管、钻杆、钢丝绳等零部件中的检测应用已经较为成熟。而漏磁检测在精密汽车零部件上的应用也正在快速发展,但其主要难点在于汽车零部件形状复杂,三维曲面较多,常规漏磁传感器很难适应其内部凹面,造成提离较大,且表面裂纹微小,信号微弱,缺陷难以检出。因此大提离漏磁检测仍然是未来的研究重点和技术难点。

参考文献:

[1] 周志新. 机械裂纹无损检测方法综述[J]. 机电工程, 2017,34(10):1138-1143.

[2] 林俊明. 漏磁检测技术及发展现状研究[J]. 无损探伤, 2006,30(1):1-5.

[3] WU D H, ZHANG Z Y, LIU Z L, et al. 3-D FEM simulation and analysis on the best range of lift-off values in MFL testing [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2015,43(3):20130133.

[4] HUANG Z Y, QUE P W, CHEN L. 3D FEM analysis in magnetic flux leakage method[J]. NDT & E International. 2006, 39(1): 61-66.

[5] 崔伟,黄松岭,赵伟. 传感器提离值对管道漏磁检测的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007,47(1): 21-24.

[6] 任吉林,林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京:科学出版社, 2008.

[7] SUN Y H, KANG Y H. Magnetic compression effect in present MFL testing sensor [J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2010,160(1/2):54-59.

[8] 孙燕华,康宜华. 一种基于磁真空泄漏原理的漏磁无损检测新方法[J]. 机械工程学报, 2010,46(14):18-23.

[9] SUN Y H, LIU S W, JIANG X Y, et al. A novel electromagnetic testing method based on the magnetic field interaction [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019,55(8):1-12.

[10] WU J B, FANG H, LI L, et al. A lift-off-tolerant magnetic flux leakage testing method for drill pipes at

wellhead[J]. Sensors, 2017,17(12):201.

[11] MA Y L, HE R Y, CHEN J Z. A method for improving SNR of drill pipe leakage flux testing signals by means of magnetic concentrating effect[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015,51(9):1-7.

[12] LEE J Y, JUN J, KIM J, et al. Electromagnetic nondestructive testing at high lift-off using a magnetic image conduit[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013,27(5):1287-1293.

[13] LEE J Y, SEO D W, SHOJI T. Numerical consideration of magnetic camera for quantitative nondestructive evaluation [J]. Key Engineering Materials, 2004,270/271/272/273:630-635.

[14] 曹江伟,王锐,王颖,等. 隧穿磁电阻效应磁场传感器中低频噪声的测量与研究[J]. 物理学报, 2016, 65(5):304-310.

[15] 刘竹琴,白泽生. 传感器电路的噪声及其抗干扰技术研究[J]. 现代电子技术, 2011,34(14):161-165.

[16] WANG C Y, SU W, HU Z Q, et al. Highly sensitive magnetic sensor based on anisotropic magnetoresistance effect [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018,54(11):1-3.

[17] PELKNER M, NEUBAUER A, REIMUND V, et al. Routes for GMR-sensor design in non-destructive testing[J]. Sensors, 2012,12(9):12169-12183.

[18] 张继楷,杨芸,康宜华,等. TMR 传感器及其在电磁检测中的应用[J]. 无损检测, 2016,38(12):36-39,67.

[19] 沈铭鸿. 基于 TMR 磁传感器的无损检测技术研究[D]. 苏州:苏州大学, 2019.

[20] JIN Z H, MOHD NOOR SAM M, OOGANE M, et al. Serial MTJ-based TMR sensors in bridge configuration for detection of fractured steel bar in magnetic flux leakage testing [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2021,21(2):668.

[21] WU D H, SU L X, WANG X H, et al. A novel non-destructive testing method by measuring the change rate of magnetic flux leakage [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2017,36(2):1-11.

[22] WANG R B, DENG Z Y, LIU R, et al. A large lift-off nondestructive testing method based on the interaction between AC magnetic field and MFL field[C]//23rd International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation. Detroit:IOS Press, 2019

[23] 田鸿立. 国内外录磁探伤成象技术综述[J]. 无损检测, 1988,10(12):360-362.

[24] YANG Y, LI L, DENG Z Y, et al. Theoretical analysis and simulation of a new SNR improvement method for the rough surface crack in MFL detection[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016,52(3/4):1401-1408.