

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.11.006

车轮辐板裂纹涡流检测探头的提离抑制研究

孙振国¹, 蔡 栋¹, 李 东^{1,2}, 张文增¹, 陈 强¹

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 深圳大学 光电工程学院, 广东 深圳 518060)

摘要:针对火车车轮辐板裂纹涡流检测中的提离问题, 设计了新型探头结构, 可在保证抑制提离效应且高信噪比的前提下提高探头的灵敏度, 以实现对粗糙表面裂纹的准确检测。提出了一种小体积的适用于辐板裂纹检测的并肩型探头结构, 并基于场路耦合模型对探头进行了有限元分析, 计算了探头磁场分布情况。通过实验测量了不同探头在不同提离下的线圈电压, 对所提出的并肩型探头和传统差动探头的性能进行了比较, 并利用该探头对实际车轮辐板裂纹进行了检测。研究表明, 具有闭合磁路的探头对提离效应的抑制优于普通的差动式探头, 所提出的并肩型探头能有效地检测出车轮辐板裂纹, 并可实现车轮辐板裂纹长度的定量测量。

关键词: 辐板裂纹; 涡流检测; 提离效应; 探头优化

中图分类号: TH73; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)11-1423-05

Suppressing lift-off effect in eddy current testing on the plate cracks in a wagon wheel

SUN Zhen-guo¹, CAI Dong¹, LI Dong^{1,2}, ZHANG Wen-zeng¹, CHEN Qiang¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Aiming at the lift-off effect during the inspection of plate cracks using eddy current, the probe was optimized, which can ensure the high signal-noise-ratio and suppress the lift-off effect with the increase of sensitivity, to realize the accurate detection of the cracks in the rough surface. A side-by-side type probe with small size, suitable for the detection of plate crack, was proposed. The magnetic field induced by the probe was calculated with the numerical analysis of probes based on field-circuit coupling. Experiments were conducted to compare the performance of the proposed probe with traditional one. The results indicate that the probe with a closed magnetic circuit can suppress the lift-off effect more effective than the traditional differential probe, and side-by-side type probe can effectively detect the plate cracks in a wagon wheel and realize the quantitative measurement of crack length.

Key words: plate cracks; eddy current testing; lift-off effect; probe optimization

0 引 言

为保证货车车轮的安全使用和科学管理, 需要定期对车轮的辐板裂纹进行检测, 以淘汰报废超出安全许可范围的车轮。目前, 国内针对车轮辐板裂纹的研究主要集中在分析裂纹的成因和扩展规律以及失效容限等^[1-3], 而针对粗糙表面裂纹缺陷的探伤, 目前的检测

技术一般需要对待检车轮进行或多或少的表面处理工作。传统的检测方法是磁粉探伤。这种检测方法需先将轮对拆下, 进行表面清理, 然后用磁粉对裂纹进行显影, 手动测量裂纹长度, 因而检测周期长、效率低, 需要研究一种能适应粗糙表面的实时在线检测方法和设备。

涡流检测能实现现场实时非接触式检测, 广泛应用于铁道机车车辆^[4]、油气管道^[5]、航空航天^[6]等领

收稿日期: 2015-06-10

作者简介: 孙振国(1971-), 男, 江苏南京人, 副教授, 博士生导师, 主要从事无损检测、光机电一体化技术方面的研究。E-mail: sunzhg@tsinghua.edu.cn

域。受工件表面粗糙不平所引起的提离效应的影响,在实际应用时需要将传统的涡流检测技术进行一定的改进。对于抑制提离效应的研究一直是涡流检测领域的热点,文献[7-11]主要从信号处理角度实现对涡流检测提离效应的抑制。

本研究针对辐板裂纹涡流检测中的变提离问题,改进探头结构,提出一种适用于火车车轮辐板裂纹涡流检测的小体积探头结构,在保证高信噪比的前提下提高探头的灵敏度,以实现粗糙表面裂纹的准确检测。此外,本研究基于场路耦合模型^[12]对探头进行有限元分析,并通过实验验证所优化的涡流检测探头的检测效果。

1 探头结构优化设计

在被测工件表面进行涡流检测时,往往会因为抖动或被测工件表面状况的变化,导致探头和被测工件表面之间的距离发生变化。可将涡流检测中提离效应的影响,看作是在原感应电压信号上叠加了噪声,即提离噪声。实际探伤时,缺陷产生的电压变化可能会淹没在提离噪声中,这将影响涡流检测结果的可靠性。

本研究可从探头设计角度抑制或消除提离噪声,一种传统的方法是采用自比较式的差动探头,其结构如图 1 所示。

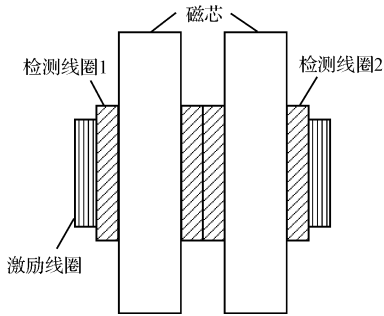


图 1 传统差动式探头结构

检测线圈采用差动连接,当探头接近缺陷时,检测线圈输出不为零的电压。但实际操作时,难以保证探头在移动过程中其始终垂直于被测工件的表面,特别是当被测件表面粗糙不平时不能有效抑制提离噪声。

为抑制提离噪声,探头应在一定的提离高度时仍能保持足够高的检测灵敏度。因此,需要保证在一定提离范围内,探头在被测工件中激励的磁场变化平缓,并保持较高的信噪比。本研究从有效磁导率角度,设计适用于辐板裂纹检测并有效抑制提离效应的探头。

考虑磁路存在气隙的情况,磁路的有效磁导率如下式:

$$\mu_e = \frac{\mu_i}{1 + g\mu_i/l_e} \quad (1)$$

式中: μ_i —初始磁导率, l_e —有效磁路长度, g —气隙长度。

本研究将涡流检测探头和被测工件当作磁路的一部分,提离高度即为磁路的气隙。磁路中的磁场强度随磁路的有效磁导率的增大而增大。探头设计时应保证磁路的有效磁导率尽量大,即探头和被测工件尽量构成闭合的磁路,以保证足够高的磁场强度。

文献[13]提出了一种 U 型磁芯探头,该探头的原理结构如图 2 所示。

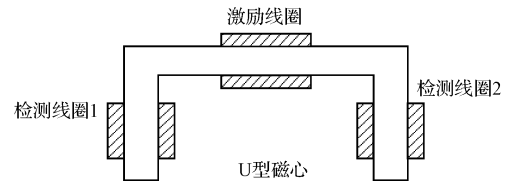


图 2 U 型磁芯探头结构

检测线圈 1 和检测线圈 2 分别缠绕在 U 型铁氧体磁芯的两扼上,一方面能保证感应电压差动后能完全抵消,另一方面磁路具有较高的有效磁导率,可产生更大的磁场强度,提高了探头的检测灵敏度,从而达到抑制提离噪声的效果。

在实际应用中,U 型磁芯探头虽然能很好地抑制提离效应及其他噪声,但由于探头体积大,在形状很不规则的车轮辐板上运动不方便,有位置死区,同时对裂纹长度的测量精度也不高。

因此,本研究提出的并肩型探头结构如图 3 所示,以实现粗糙表面裂纹的更有效检测。

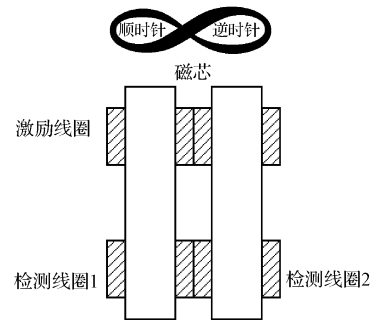


图 3 并肩式磁芯探头

并肩式磁芯探头采用两磁芯,检测线圈 1 和检测线圈 2 的结构相同,缠绕在铁氧体磁芯的下端。上端为倒“8”字形绕法的激励线圈,各磁芯上所绕匝数相同。磁力线沿两磁芯形成闭合回路,检测线圈 1 和 2 差动连接,其感应电压相互抵消,输出电压为零。

该探头性能和 U 型磁芯相近,不仅能抑制提离效

应,同时对探头的抖动也不敏感,而且体积大大地减少,可作为点探头。

2 探头有限元分析

本研究采用场路耦合模型,通过有限元分析计算前文提到的 3 种探头的磁场分布,以验证所提探头是否达到了提高磁感应强度的目的。

笔者在有限元分析软件 ANSYS 中建立传统差分式探头、U 型磁芯探头和并肩式探头模型,设置相同的线圈参数和激励参数,其中线圈均为 60 匝,激励频率为 5 000 Hz,得到各型磁力线分布和磁场强度分布图。

传统差分式探头仿真结果如图 4 所示。

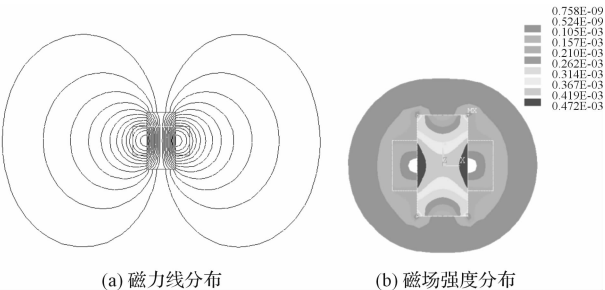


图 4 传统差分式探头仿真结果

U 型磁芯探头仿真结果如图 5 所示。

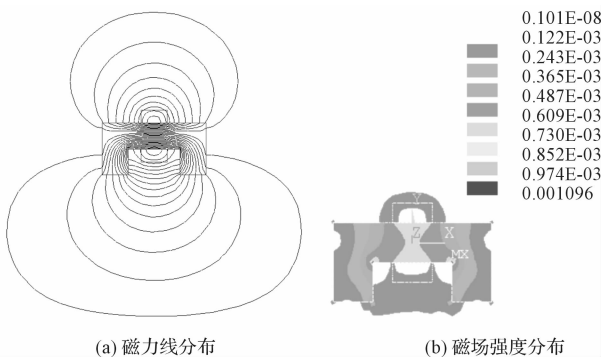


图 5 U 型磁芯探头仿真结果

并肩式磁芯探头仿真结果如图 6 所示。

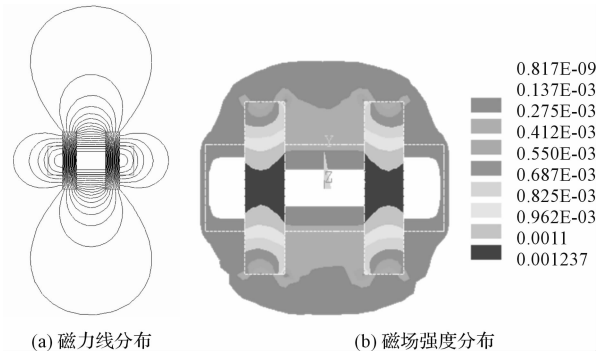


图 6 并肩式磁芯探头仿真结果

从图 5 和图 6 可以看出,U 型磁芯探头和并肩式探头磁力线在探头端面分布较密,即此处产生磁感应强度大;U 型磁芯探头和并肩式探头在探头端面磁感应强度要明显大于传统差分式探头端面磁感应强度。

由此可见,本研究提出的小体积探头同样能有效提高探头的磁感应强度。

3 裂纹检测实验及结果分析

首先笔者对前文所述的差动式探头、U 型磁芯探头和并肩式探头对提离的抑制性能进行比较。

本研究所研制的探头实物图如图 7 所示。

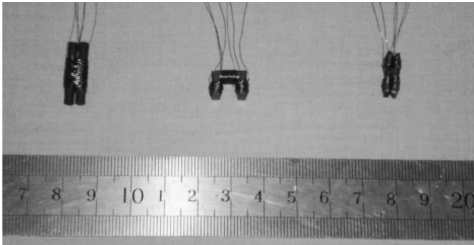


图 7 探头实物图

该实验系统由 5 部分构成:激励电路、涡流探头、试块、信号调理电路和示波器。其中,激励电路包括正弦信号发生电路和功率放大电路,后者选用体积小、失真小的集成音频功率放大芯片 TDA2009A 进行构建。

实验时,采用的激励频率为 5 kHz,探头的激励电流为 0.5 A。试块材料为 50 钢,尺寸为(长×宽×高)300 mm×300 mm×20 mm。实验过程中保持探头与试块面垂直,依次改变提离高度,测量相应的线圈电压。

由于不同探头的结构不同,因而在相同的激励条件下感应线圈所产生的电压幅值也不同。为了比较随提离高度增加信号衰减的变化趋势,笔者对其进行归一化处理。

本研究通过实验获得 3 种探头在不同提离高度的下的线圈电压如图 8 所示。

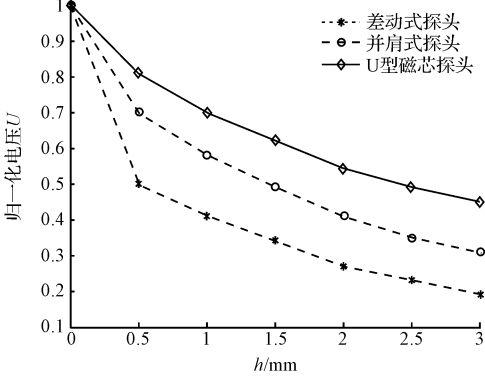


图 8 提离对不同探头的影响

从图 8 可以看出,随着提高高度的增大,各探头的感应电压幅值均减少。通过比较不同探头随提高的变化曲线可知,具有闭合磁路的探头对提高效应的抑制优于普通的差动式探头。

U 型磁芯探头体积大,在车轮辐板上运动不方便,因此,在车轮辐板裂纹检测中,采用并肩式探头更为合适。并肩式探头采用 2 片 1.2 mm×4 mm×20 mm 的铁氧体 TP3/I 型磁芯绕制,其结构如图 7 所示;其中,激励线圈左右磁芯各绕 60 匝。

探头参数如表 1 所示。

表 1 并肩式探头参数

线圈类型	匝数	电阻/ Ω	电感/ μH
激励线圈	120	6.49	106.22
检测线圈	60	3.24	23.83

本研究所研制的并肩式探头尺寸(长×宽×高)约为 4 mm×3 mm×20 mm。

将前述实验系统中的试块替换成车轮,车轮辐板存在一个长 15 mm 宽 5 mm 的裂纹。实验时,本研究分别对辐板的无裂纹位置和裂纹位置进行扫描,检测线圈经参考电压相量电路提高抑制后差分输出幅值调制的正弦波,通过幅值包络检波放大处理后得到检测信号。根据该信号的幅值判断是否有裂纹。

当探头经过裂纹时,其输出波形如图 9 所示。

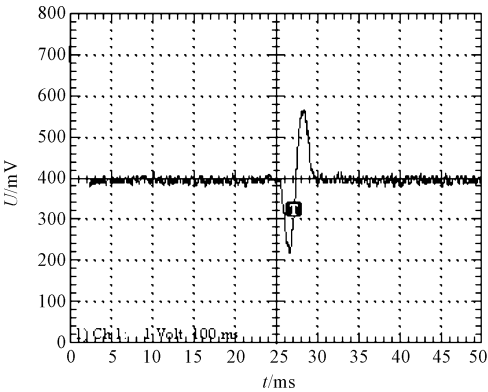


图 9 探头经过裂纹时的输出波形图

本研究通过探头在车轮辐板上进行扫描,得到的探头在车轮辐板上运动时输出信号数据如表 2 所示。

表 2 并肩式探头辐板裂纹检测数据

提高值 /mm	无裂纹处 $\Delta u_{\max}/\text{mV}$	裂纹处 $\Delta u_{\text{crack}}/\text{mV}$	信噪比 $\Delta u_{\text{crack}}:\Delta u_{\max}$
0	800	2 000	2.5:1.0
2	400	1 200	3:1.0

其中,无裂纹处 $\Delta u_{\max}$ 表示的是探头运动过程中由于表面粗糙不平引起探头提高或者晃动造成的最大噪声幅值; Δu_{crack} 表示检测到裂纹时探头输出的电压

幅值。

由表 2 可知,采用并肩式差动探头,裂纹产生的信号幅值远大于探头提高或晃动引起的噪声,信噪比大于 2.5,说明该方法能适应车轮表面凹凸不平、有防锈漆、氧化皮以及锈蚀等恶劣工况的能力,有效检测出车轮辐板裂纹。车轮辐板无缺陷处 $\Delta u_{\max}$ 相比铝板提高变化大很多,这是由于车轮为铁磁性材料, $\Delta u_{\max}$ 同时受表面磁导率变化的影响导致的。

本研究使用该探头对前述的车轮辐板裂纹进行长度测量,在探头中心距离裂纹边缘 1 mm 处,能输出裂纹信号。沿裂纹长度方向进行垂直扫描,测得裂纹长度约为 16 mm。该实验表明,该探头能用于车轮辐板的裂纹检测,其裂纹长度测量误差约为 2 mm。

4 结束语

为提高探头的灵敏度,基于闭合磁路思想,本研究设计了一种适用于车轮辐板裂纹检测的小体积差分式探头,并利用有限元方法在场路耦合模型的基础上对探头进行了磁场分布计算,验证了所设计探头在增强磁感应强度方面的有效性。通过实验比较所提探头与传统差分探头在提高效应抑制方面的性能,并利用所提探头对车轮辐板裂纹进行了实际探伤。

研究结果表明,该探头能有效抑制提高,提高检测灵敏度,并能在一定程度上克服辐板表面粗糙、凸凹不平及锈蚀等影响,较准确地检出裂纹,信噪比大于 2.5,并可实现车轮辐板裂纹长度的定量测量,测量误差不超过 2 mm。

参考文献(References):

[1] 田 军. 货车车轮辐板孔裂纹及其运用安全性研究[D]. 北京:北京交通大学机械与电子控制工程学院,2014.

[2] 肖 兵. 铁路货车车轮疲劳分析方法研究[D]. 北京:北京交通大学机械与电子控制工程学院,2012.

[3] 周素霞,肖 楠,谢基龙. 多轴载荷下车轮辐板裂纹扩展特性研究[J]. 工程力学,2010(1):41-46.

[4] CARBONI M, BERETTA S, LO C A. Research on corrosion fatigue of railway axles[J]. **Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**, 2011, 53(7): 361-367.

[5] 黄松岭,徐 琛,赵 伟,等. 油气管道变形涡流检测线圈探头的有限元仿真分析[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2011(3):390-394.

[6] 丁 华,何宇廷,焦胜博,等. 面向飞机结构健康监测的花萼状涡流传感器优化设计[J]. 北京工业大学学报,2013

- (12):1769-1776.
- [7] HOU D, LIU B, TANG H, et al. Study of lift-off invariance transformation method for quantitative defect estimation in eddy current testing[J]. **Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**,2015,57(2):92-97.
- [8] YU Y, YAN Y, WANG F, et al. An approach to reduce lift-off noise in pulsed eddy current nondestructive technology[J]. **NDT & E International**,2014(63):1-6.
- [9] HE Y, PAN M, CHEN D, et al. PEC defect automated classification in aircraft multi-ply structures with interlayer gaps and lift-offs[J]. **NDT & E International**,2013(53):39-46.
- [10] TIAN G Y, HE Y, ADEWALE I, et al. Research on spectral response of pulsed eddy current and NDE applications[J]. **Sensors and Actuators A: Physical**,2013(189):313-320.
- [11] HE Y, PAN M, LUO F, et al. Reduction of lift-off Effects in Pulsed Eddy Current for defect classification[J]. **IEEE Transactions on Magnetics**,2011,47(12):4753-4760.
- [12] 李 东,陈 强,孙振国. 基于场路耦合的涡流检测的数值模拟[J]. 清华大学学报:自然科学版,2010(2):195-199.
- [13] 李 舒. 基于脉冲涡流理论的便携式缺陷检测装置研制[D]. 北京:清华大学电机系,2005.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

孙振国,蔡 栋,李 东,等. 车轮辐板裂纹涡流检测探头的提高抑制研究[J]. 机电工程,2015,32(11):1423-1427.

SUN Zhen-guo, CAI Dong, LI Dong, et al. Suppressing lift-off effect in eddy current testing on the plate cracks in a wagon wheel[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(11):1423-1427.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>

(上接第 1411 页)

本研究为该并联机构的设计提供了参考和理论依据。在工程应用中,根据实际设计要求,可利用工作空间度量参数公式和雅克比矩阵的条件数确定该机构最优的结构参数。其中,笔者推导出的工作空间度量参数能较完善地描述该机构的工作空间,具有推广价值。

参考文献(References):

- [1] 刘海波. 基于 Delta 机构的高速并联装箱机器人[D]. 济南:山东大学控制科学与工程学院,2014.
- [2] 梁香宁. Delta 机器人运动学建模及仿真[D]. 太原:太原理工大学机械工程学院,2008.
- [3] 高秀兰,鲁开讲,王娟平. Delta 并联机构工作空间解析及尺度综合[J]. 农业机械学,2008,39(5):146-149.
- [4] 郭新宇. 3 自由度 Delta 并联机构的特性分析与运动仿真[D]. 邯郸:河北工程大学机电工程学院,2013.
- [5] 许 敏. 改进的 Delta 型并联机器人机构运动性能研究[D]. 沈阳:东北大学机械与自动化学院,2007.
- [6] 胡福生. 3PTT 并联机构的研究及应用初探[D]. 淄博:山东理工大学机械工程学院,2006.
- [7] 胡 峰,骆德渊,段栋栋,等. 基于 Pro/E 与 Simulink 的 Delta 并联机器人运动仿真[J]. 机电工程,2012,29(8):982-984.
- [8] 黄 真. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 1 版. 北京:机械工业出版社,1997.
- [9] CLAVEL R. Delta, a Fast Robot with Parallel Geometry[C]// Proceedings of 18th International Symposium on Industrial Robots. Sydney, Australia: [s. n.],1988:91-100.
- [10] STAICU S. Recursive modelling in dynamics of Delta parallel robot[J]. **Robotica**,2009,27(2):199-207.

[编辑:李 辉]