

孙燕华 康宜华 邱晨 著

永磁扰动 无损检测技术

Nondestructive Testing Technology Based on
Permanent Magnetic Perturbation



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

永磁扰动无损检测技术

**Nondestructive Testing Technology
Based on Permanent Magnetic Perturbation**

孙燕华 康宜华 邱 晨 著

华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 简 介

本书在对现有电磁物理现象也即磁扰动进行分析的基础上,提出永磁扰动检测新原理,并介绍一种永磁扰动无损检测新方法。这种原理和方法成功应用于生产实践,能够很好地与现有检测方法如漏磁及涡流法形成互补,在节约成本的同时,将探伤范围进一步扩展、延伸。

本书内容为:磁场及其磁扰动(第1章)、永磁扰动无损检测方法(第2章)、永磁扰动检测与漏磁和涡流检测的比较(第3章)、永磁扰动检测传感器(第4章)、钻杆螺纹检测系统(第5章)、钢管端部检测系统(第6章)、钢板检测系统(第7章)、永磁扰动检测方法在其他方面的应用(第8章)。

本书可供电磁无损检测、仪器仪表及传感器专业相关技术研究、开发及应用操作人员参考,也可作为高等学校相关专业教师和学生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

永磁扰动无损检测技术/孙燕华 康宜华 邱 晨 著. —武汉:华中科技大学出版社,2012.7
ISBN 978-7-5609-7965-6

I. 永… II. ①孙… ②康… ③邱… III. 电磁检验-无损检验 IV. TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 086002 号

永磁扰动无损检测技术

孙燕华 康宜华 邱 晨 著

责任编辑:徐正达

封面设计:范翠璇

责任校对:祝 菲

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉佳年华科技有限公司

印 刷:湖北恒泰印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:4.75

字 数:88千字

版 次:2012年7月第1版第1次印刷

定 价:12.80元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

随着社会的发展及无损检测要求的不断提高,寻求新的无损检测方法以对现有常规方法进行补充,具有十分重要的意义。目前,主要的无损检测方法几乎都由国外研究者所提出,面对这一状况,我们更有必要探索具有创新意识和具有我国自主知识产权的无损检测新技术。

基于这一思路,笔者在现有电磁物理现象也即磁扰动的分析基础上,提出了永磁扰动检测新原理,发明了一种永磁扰动无损检测新方法,并最终将该方法成功应用于生产实践。该方法能够很好地与现有检测方法如漏磁和涡流法形成互补,在节约成本的同时,使探伤范围进一步扩展、延伸,最终增强了无损探伤行业在社会安全、高效生产中的适应服务功能。同时,将所提出的永磁扰动无损检测方法 with 现有常用的漏磁和涡流检测方法进行了系统的对比并加以阐述,这有助于电磁无损检测理论系统的建立。

本书是笔者几年来在电磁无损检测新技术方面不断研究和实践工作的总结,书中部分内容来源于笔者指导的部分华中科技大学的硕士研究生的学位论文;在技术的工程应用上,得到了武汉华科机电工程有限公司的大力支持。在此一并表示由衷的感谢。

由于笔者的实践经验和理论水平有限,疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

孙燕华 康宜华 邱 晨

于华中科技大学

2012年3月

目 录

1 磁场及其磁扰动	(1)
1.1 磁场及其主要特性	(1)
1.1.1 磁场	(1)
1.1.2 磁场的主要特性	(2)
1.2 磁扰动效应	(4)
1.2.1 磁泄漏效应	(4)
1.2.2 涡流效应	(5)
1.2.3 磁扰动效应	(6)
2 永磁扰动无损检测方法	(8)
2.1 永磁扰动无损检测原理	(8)
2.2 永磁扰动无损检测方法	(9)
2.3 永磁扰动无损检测方法的特性	(11)
2.3.1 可行性测试	(11)
2.3.2 探头提离高度及缺陷尺寸的影响	(12)
2.3.3 探头检测姿态的影响	(14)
2.3.4 缺陷深度的影响	(15)
3 永磁扰动检测与漏磁和涡流检测的比较	(16)
3.1 永磁扰动检测与漏磁检测的比较	(16)
3.1.1 漏磁检测的发展过程	(16)
3.1.2 漏磁检测原理	(17)
3.1.3 漏磁检测机制探讨	(19)
3.1.4 永磁扰动检测与漏磁检测的比较	(21)
3.2 永磁扰动检测与涡流检测的比较	(22)
3.2.1 涡流检测原理	(22)
3.2.2 永磁扰动检测与涡流检测的差异	(23)
4 永磁扰动检测传感器	(25)
4.1 永磁扰动检测传感器结构	(25)
4.2 永磁扰动检测传感器性能参数的优化	(28)
4.2.1 探头扫查姿态对检测信号的影响	(29)
4.2.2 永磁体形状对检测信号的影响	(30)
4.2.3 线圈内径对检测信号的影响	(31)
4.2.4 线圈宽度对检测信号的影响	(32)
4.2.5 线圈匝数对检测信号的影响	(33)
4.2.6 线圈提离高度对检测信号的影响	(34)

4.2.7	漆包线直径对检测信号的影响	(35)
4.2.8	永磁体厚度对检测信号的影响	(36)
4.2.9	永磁体直径对检测信号的影响	(37)
4.3	永磁扰动检测传感器优化设计	(38)
4.3.1	永磁扰动检测传感器	(38)
4.3.2	阵列永磁扰动检测传感器	(39)
5	钻杆螺纹检测系统	(41)
5.1	钻杆螺纹检测概述	(41)
5.2	钻杆螺纹永磁扰动检测探头设计	(42)
5.3	钻杆螺纹永磁扰动检测系统	(46)
5.3.1	钻杆螺纹复合电磁检测原理	(46)
5.3.2	检测扫查方案	(47)
5.3.3	检测系统设计	(48)
5.3.4	检测系统测试	(51)
6	钢管端部检测系统	(52)
6.1	钢管端部检测概述	(52)
6.2	钢管端部永磁扰动检测探头设计	(52)
6.2.1	检测方案设计	(52)
6.2.2	实验验证	(53)
6.2.3	检测探头设计	(55)
6.3	钢管端部永磁扰动检测系统	(56)
7	钢板检测系统	(59)
7.1	钢板检测概述	(59)
7.2	钢板永磁扰动检测探头设计	(59)
7.3	钢板永磁扰动检测系统	(61)
8	永磁扰动检测方法在其他方面的应用	(65)
8.1	钢轨检测	(65)
8.1.1	钢轨检测概述	(65)
8.1.2	检测探头设计	(65)
8.1.3	钢轨检测系统	(66)
8.2	钢管内部缺陷与表面缺陷区分检测	(67)
8.3	锅炉管检测	(68)
8.4	镀锌钢板检测	(69)
	参考文献	(70)

1 磁场及其磁扰动

1.1 磁场及其主要特性

1.1.1 磁场

磁现象起源于人们对于“磁石吸铁”的认识。磁场是指存在磁力作用的空间,它是由电流(或运动电荷)产生的,为物质存在的基本形式之一。一切磁现象和磁相互作用,实际上是电流显示出的磁效应和电流之间的相互作用。永磁体产生磁场,也是因为永磁体内部存在着分子电流。恒定电流在空间产生不随时间变化的磁场称为恒定磁场,交变电流在空间产生随时间变化的磁场称为交变磁场。世界上第一个磁场图(见图 1-1)是法国科学家笛卡儿(R. Descartes)于 1644 年绘制出来的。

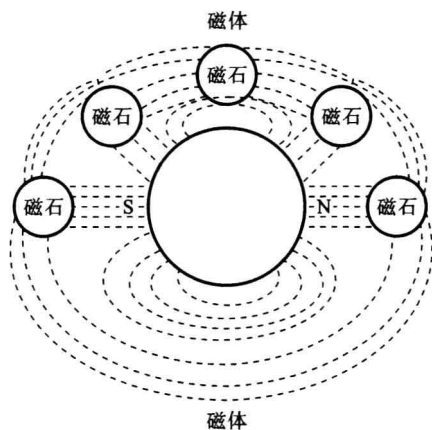


图 1-1 世界上第一个磁场描绘图

磁场的主要描述物理量有磁感应强度 B 、磁场强度 H 等。磁感应强度也称为磁通量密度或磁通密度,用以描述磁场的强弱和方向,它对任意闭合曲面的磁通量恒等于零。这表明“磁场是无源场”这样一个重要性质。磁场强度是在任何磁介质中某点的磁感应强度与同一点上的磁导率 μ 的比值,即 $H=B/\mu$,它是单纯由电流或运动电荷所引起的。磁场的分布可用磁感应线即磁力线来描述,磁力线密或疏的程度表示磁场的强或弱,它的方向规定为在磁体外部由 N 极到 S 极而在磁体内部由 S 极到 N 极,这样,磁力线构成一个闭合曲线。磁力

线的方向即为磁场方向,磁力线上某点的切线方向就是磁场在该点的磁场强度方向。

在磁场作用下能发生变化并能影响原磁场的媒质称为磁介质。放在磁场中的磁介质会与磁场相互作用,相互影响,使磁介质处于一种特殊的磁化状态中。这个过程称为磁介质的磁化。磁化后的磁介质也会产生一个附加磁场,并对原磁场产生影响。

1.1.2 磁场的主要特性

电磁相互作用是自然界四种基本相互作用之一。电磁场理论由麦克斯韦方程组描述,麦克斯韦方程组由安培环路定律、法拉第电磁感应定律、高斯电通定律和高斯磁通定律组成,如方程(1-1)、(1-2)、(1-3)、(1-4)所示。它们分别表示:变化的电场和传导电流是磁场的“涡旋源”;变化的电场产生磁场;电场是有“通量源”的场,其源为电荷;磁场无“通量源”,即磁场不可能由磁荷产生。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1-1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1-3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-4)$$

式中 \mathbf{H} ——磁场强度;
 \mathbf{J} ——传导电流密度;
 \mathbf{E} ——电场强度;
 \mathbf{D} ——电感应强度;
 \mathbf{B} ——磁感应强度;
 ρ ——自由电荷体密度;
 $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ ——位移电流密度。

1. 磁场的边界连续条件

在两种介质(介质1和介质2)的分界面处,磁场应满足下列连续性条件:① 介质分界面两侧 \mathbf{B} 的法向分量连续;② 介质分界面两侧 \mathbf{H} 的切向分量连续。也即

$$\begin{cases} \mathbf{e}_n \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{0} \\ \mathbf{e}_n \cdot (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

式中 \mathbf{e}_n ——垂直于分界面的单位矢量,由介质1指向介质2。

若介质分界面两侧介质1和介质2的相对磁导率分别为 μ_1 和 μ_2 ,则由 $\mathbf{B} = \mu\mu_0 \mathbf{H}$ (μ_0 为真空磁导率)可知,分界面两侧 \mathbf{B} 的切向分量和 \mathbf{H} 的法向分量有如下

关系:

$$\mathbf{B}_{2\tau} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \mathbf{B}_{1\tau} \quad (1-6)$$

$$\mathbf{H}_{2n} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \mathbf{H}_{1n} \quad (1-7)$$

式中 $\mathbf{B}_{1\tau}$ 、 $\mathbf{B}_{2\tau}$ ——介质 1、介质 2 内磁感应强度的切向分量;

\mathbf{H}_{1n} 、 \mathbf{H}_{2n} ——介质 1、介质 2 内磁场强度的法向分量。

2. 电磁场的能量转换与传递

根据磁场的近距离作用的观点,磁能是定域于磁场之中的,它只与磁场和磁场分布的空间有关。磁场能量只能反映空间体积 V 内的总能量,不能反映磁场的能量分布情况,故必须引入描写磁场分布的物理量——能量密度 w_m 。由能量密度可以计算任意一个磁场的能量 W_m ,即

$$W_m = \int_V dw_m = \frac{1}{2} \int BH dV \quad (1-8)$$

最小能量原理指出:当一个体系达到稳定的平衡态时,总是处于最低的能量状态。磁能主要以磁场的形式存在,并且在静稳态的磁场中处于一种低能态。当磁相互作用状态变化时,磁能会发生一个从高能态到最低能态的突变。静态的磁相互作用场已经处于稳定状态,当这个平衡的体系被打破时,磁能会因尽可能地趋于低势稳态而发生变化,直至它再次处于最低能态,此时磁相互作用场也再次恢复静稳态。

由式(1-8)可知,磁场能量的变化会引起 \mathbf{B} 和 \mathbf{H} 的变化,而这又是通过空间磁场的改变表现出来的。磁相互作用场在静态→中间变化→静态的过程中发生了场的重构,且这一重构过程的时间很短。相对于原本静态的磁相互作用场来说,其瞬间的重构变化就称为磁扰动。

3. 电磁场作用的磁力线表象

磁场以磁力线为特征表象,而磁力线用以描述反映磁场的固有物理特性的抽象物质。磁场的固有物理特性表现在磁力线上,其具体特性主要有:① 磁力线为连续的,并且形成闭合回路;② 磁力线不交叉且具有排斥性;③ 磁力线总是趋于最短。在上述固有物理特性作用下,磁场之间易形成相互磁作用。最终导致磁场间的相互作用有:磁聚集和磁扩散。

当然,这些磁作用也包括在同一种介质内和不同介质内的磁聚集和磁扩散。磁聚集与磁扩散现象如图 1-2(a)及图 1-2(b)所示。另外,从磁场的相互作用中也存在磁力线在另一种磁场的作用下发生改变的现象,也即磁力线会被压缩变形,如图 1-2(c)所示。

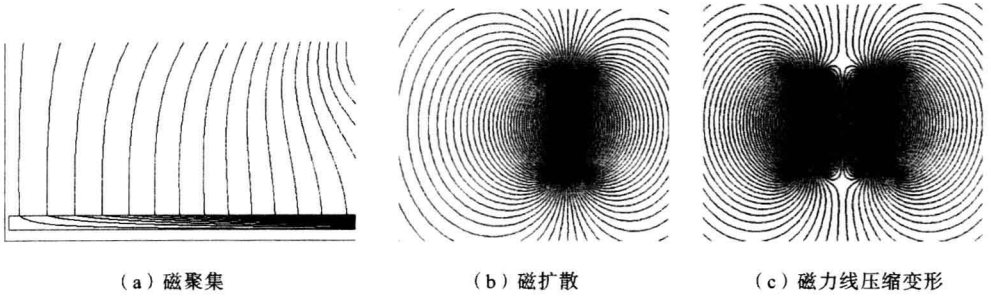
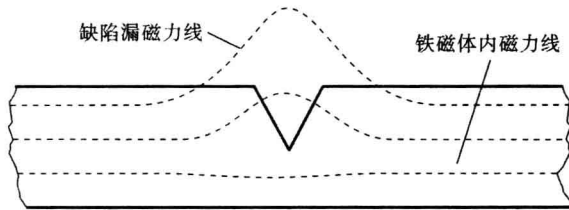


图 1-2 恒定磁场作用的磁力线表象

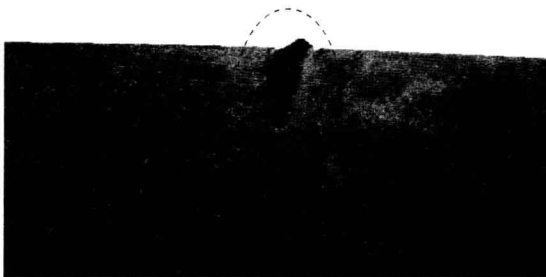
1.2 磁扰动效应

1.2.1 磁泄漏效应

1922年,美国工程师霍克(W. F. Hoke)在加工装在磁性夹头上的钢件时,观察到铁粉被吸附在金属裂缝上的现象,这就是最早观测到的磁泄漏效应(见图 1-3)。



(a) 缺陷磁泄漏



(b) 缺陷磁泄漏显示(磁粉)

图 1-3 缺陷的磁泄漏效应

铁磁材料(铁磁体)具有高磁导率,它被磁化后在体内可聚集高密度的磁感应场。当铁磁体上与空气相接触的界面处产生不连续性即出现缺陷时,由于磁的边界条件首先引发磁折射,铁磁体内磁感应场会由磁折射作用而被折射偏转到缺陷附近空气中去,并很快形成磁扩散;但由于缺陷附近空气区域中较强背景

磁场的存在,扩散场磁力线在该背景磁场的阻碍作用下发生反向挤压变形,导致发生磁扩散的同时又发生反向磁压缩,最终形成缺陷漏磁场。

铁磁材料内磁通经过上述磁折射、扩散及反向磁压缩过程后,形成最终缺陷漏磁场。进一步地说,缺陷漏磁场(磁感应强度为 B_{m1})的形成机制可用数学式描述为

$$B_{m1} = B_r + B_d - B_c \quad (1-9)$$

式中 B_r ——缺陷处磁折射产生的磁感应强度;

B_d ——缺陷处磁扩散产生的磁感应强度;

B_c ——缺陷处磁压缩产生的磁感应强度。

从式(1-9)可知,磁扩散是紧随磁折射作用的,它们对缺陷磁泄漏起促进作用;而后的磁压缩作用是在磁扩散作用的反作用原理基础上所导致的,它对缺陷磁泄漏起着阻碍作用,使得缺陷的磁泄漏效应打折扣。

1.2.2 涡流效应

如图 1-4(a)所示,当导体靠近变化着的磁场或作切割磁力线运动时,由电磁感应定律可知,导体内必然会感应出呈涡状流动的电流,即所谓涡电流。进一步地说,将通有交变电流的螺线管产生交变的磁场靠近导体时,会在导体表面或近表面产生涡电流,如图 1-4(b)所示。

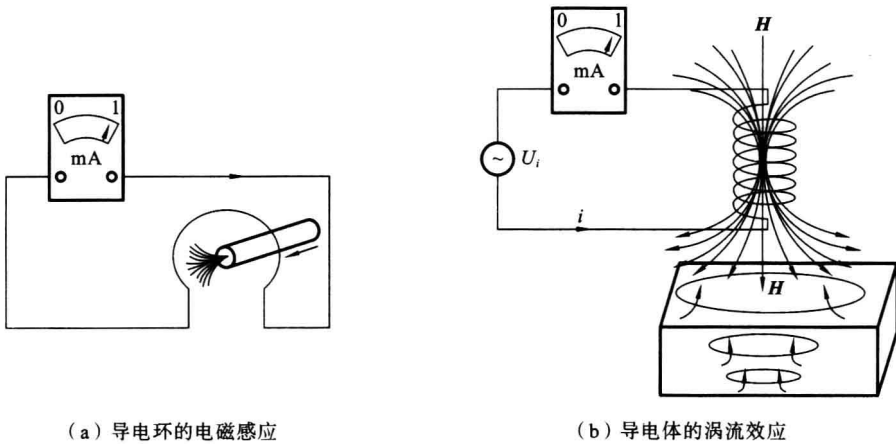


图 1-4 电磁涡流效应

电磁涡流效应的利用装置有涡流加热装置及涡流传感器等,其避免涡流发热的装置有变压器铁芯等。1824年,法国的弗朗索瓦·阿拉戈(F. Arago)第一个观察到涡电流并称之为旋转磁现象,同时提出了大多数导体可能已经被磁化的说法;1855年,法国物理学家莱昂·傅科(J. Foucault)通过铜片在磁场旋转实验证实涡电流的存在,并记录了涡电流产热的现象。1879年,涡电流第一次被用

到无损检测中。

1.2.3 磁扰动效应

磁扰动是常见的电磁场物理现象,如浪涌电磁扰动、地震电磁扰动及磁暴电磁扰动等。磁场的固有物理特性主要有:磁能尽可能趋于低势稳态;磁力线彼此不交叉,具有排斥性和封闭性,且路径最短,在磁极处最密。当磁相互作用的局部发生变化时,磁能由于要趋于低势稳态,会引起局部磁场强度或磁感应强度的突变。在上述磁场的固有物理特性的约束下,该局部磁场的突变引起电磁密度起伏,产生磁收缩与膨胀及磁力线重构,并遵循介质分界面处磁感应强度的法向分量连续和磁场强度的切向分量连续的规则进一步扩散,最终引起大范围的变化——磁扰动。

磁扰动普遍存在于各种电磁作用场中,它的形成与扩散,如扭曲不稳定性、漂移不稳定性、互换不稳定性及耗散不稳定性等宏观变化,也是短时间内电磁场中诸多不稳定性的一种结果。磁相互作用场中,从初稳态到出现扰动再到次稳态,经历了扰动源的扩散与衰变,最终以扰动的衰减而结束,这一过程的出现与衰减存在着电磁能、机械能及热能的转换。磁扰动的确是客观存在的一种物理现象,它表现为静态磁相互作用场中磁能或磁场强度的变化过程。

假设原有稳态磁场为 \mathbf{B}_0 , ξ 为磁扰动源,引入扰动量 $\xi\mathbf{B}$,则磁扰动方程可描述为

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \xi\mathbf{B} \quad (1-10)$$

通过拉格朗日变换,可获得由 $\xi\mathbf{B}$ 所引起的磁扰动 $\xi_L\mathbf{B}$,且

$$\delta_L\mathbf{B} = \nabla \times (\xi \times \mathbf{B}) \quad (1-11)$$

通过欧拉变换,可获得由 $\xi\mathbf{B}$ 所引起的磁扰动 $\delta_E\mathbf{B}$,且

$$\delta_E\mathbf{B} = \xi \cdot \nabla \mathbf{B} + \delta_L\mathbf{B} \quad (1-12)$$

由式(1-11)及式(1-12)可以得到由磁扰动源 $\xi\mathbf{B}$ 所引起的磁扰动 $\delta\mathbf{B}$ 。

对磁扰动的扩散进一步描述,建立极坐标系,定义扰动量

$$\delta B_{r,\theta,z}(r,z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \delta B_{r,\theta,z}(r,\theta,z) d\theta$$

$$\delta B_1 \equiv \delta B - \delta \bar{B}$$

$$\int_0^{2\pi} \delta B_1 d\theta = 0$$

磁场扰动方程细化为

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{\delta \bar{B}_r + \delta \bar{B}_{1r}}{B_0 + \delta B_\theta} \quad (1-13)$$

$$\frac{dz}{d\theta} = \frac{\delta \bar{B}_z + \delta \bar{B}_{1z}}{B_0 + \delta B_\theta} \quad (1-14)$$

可以获得

$$\frac{dr}{dz} = \frac{\delta \bar{B}_r(r, z)}{\delta \bar{B}_z(r, z)} \quad (1-15)$$

因为

$$\begin{aligned} \delta \bar{B}_r(r, z) &= -\frac{\partial A(r, z)}{\partial z} \\ \delta \bar{B}_z(r, z) &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [rA(r, z)] \end{aligned}$$

式(1-15)可简化为

$$rA(r, z) = \text{const.} \quad (1-16)$$

式(1-16)描述了由磁扰动所引起的场变化及其扩散。磁扰动引起磁场的重构及磁力线的重连接,形成所谓“磁岛”。例如,图 1-5 左边的两个小孔状扰动可转换为右边的单个“磁岛”。

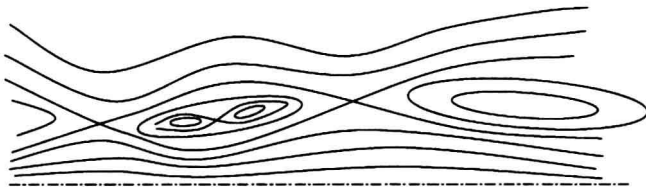


图 1-5 磁场扰动及其转换

2 永磁扰动无损检测方法

2.1 永磁扰动无损检测原理

将永磁体靠近铁磁构件,就会产生磁相互作用,形成磁扰动环境。以铁磁构件上的不连续突变作为扰动源,就会形成磁扰动并被观察到。如图 2-1 所示,永磁体在带缺陷的铁磁构件上匀速移动,保持相对姿态不变,关注几个关键位置变化点:经过铁磁构件无缺陷处(见图 2-1(a)),经过铁磁构件上缺陷处(见图 2-1(b)、(c)、(d))。这样,当永磁体在铁磁构件上匀速移动时,就会出现局部扰动源从无到有的突变过程。

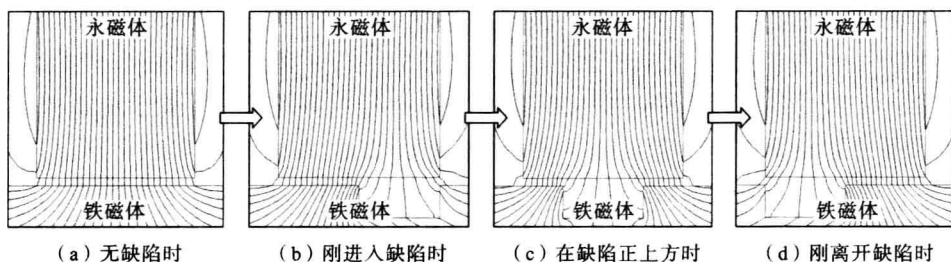


图 2-1 永磁体经过带缺陷的铁磁构件上方的磁力线分布

由图 2-1 可知:铁磁构件上出现不连续的磁扰动源时,在缺陷的上方,特别是永磁体内并没有发现明显的异常,这可能是由于永磁体内强大的磁感应强度掩盖了所产生的磁扰动;磁力线只能粗略地反应磁场的趋势,即使在磁力线细化到最密集时也如此。在这里,改变观察方式,通过磁云图并将其作特别细化和色泽过滤处理,获得如图 2-2 所示的磁感应线分布。

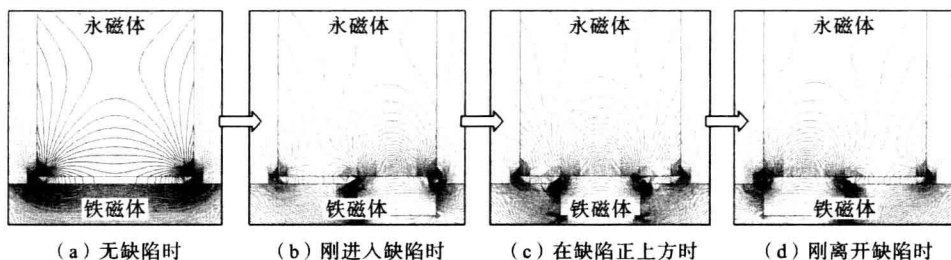


图 2-2 永磁体经过带缺陷的铁磁构件上方的细化磁力线分布

很显然,图 2-2(b)、(c)、(d)中,铁磁构件上出现不连续突变时,永磁体内存在着较大的磁扰动变化。靠近缺陷的永磁体磁极端发生磁扰动变化,引起了整个永磁体内磁质的变化,与之相对的磁极端也随之发生相应的磁质翻转变,最终引起整个 N—S 磁极之间,乃至贯穿整个永磁体的磁质变化,即永磁体内的磁扰动变化,如 2-3 图所示。

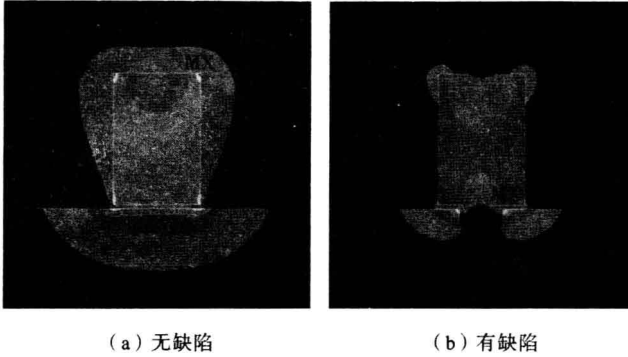


图 2-3 永磁体内的磁扰动变化

因此,直接利用缺陷的空间永磁扰动所引起的永磁体内扰动反馈作为一种探测量,可获得一种缺陷直接反馈的检测方法——永磁扰动无损检测方法,其原理如图 2-4 所示。

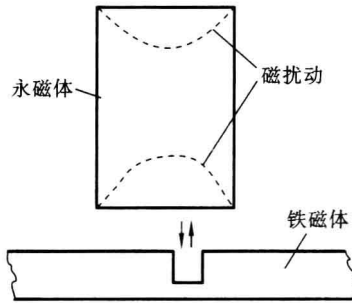


图 2-4 永磁扰动无损检测原理

2.2 永磁扰动无损检测方法

利用永磁扰动检测原理,可获得一种基于永磁体磁扰动的无损检测方法:将永磁体靠近待检测铁磁构件,从而建立起磁相互作用场,当该构件上发生不连续突变时,所构建的磁相互作用场会有磁扰动产生并反馈到永磁体;采用一定方法捕获到永磁体的磁扰动变化,便可获得铁磁构件上与之对应的不连续信息。在获取永磁体磁扰动信息的过程中,由磁扰动所引起的自身体积、磁阻或电阻等的

变化微弱,不易被测量,所以直接从永磁体自身参数上获得变化信息较为困难。但是,永磁体内磁场的变化较明显,易于被检测到,所以,可采用漆包线(一般为漆包铜线,下同)环绕在永磁体上,以检测永磁体因磁扰动而引起的体内磁场的变化,从而间接地实现永磁体磁扰动的测量。这样,通过捕获由缺陷产生的永磁体上的磁扰动,便可获得缺陷存在与否的检测评判依据,最终完成缺陷的无损检测。

如图 2-5 所示,一检测信号由环绕在永磁体上的穿过式线圈得到,由线圈和永磁体构成的永磁扰动探头匀速扫查待检测铁磁构件表面,遇有构件表面的不连续就会在线圈上产生电压突变,该电压突变随后经过放大、滤波及 A/D 转换进入计算机数据处理系统。

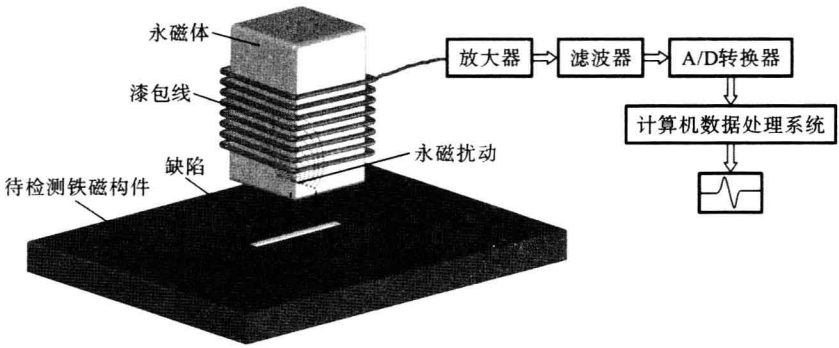


图 2-5 永磁扰动无损检测过程

永磁扰动无损检测方法的磁扰动机理(见图 2-6)可描述为:永磁体在待检测

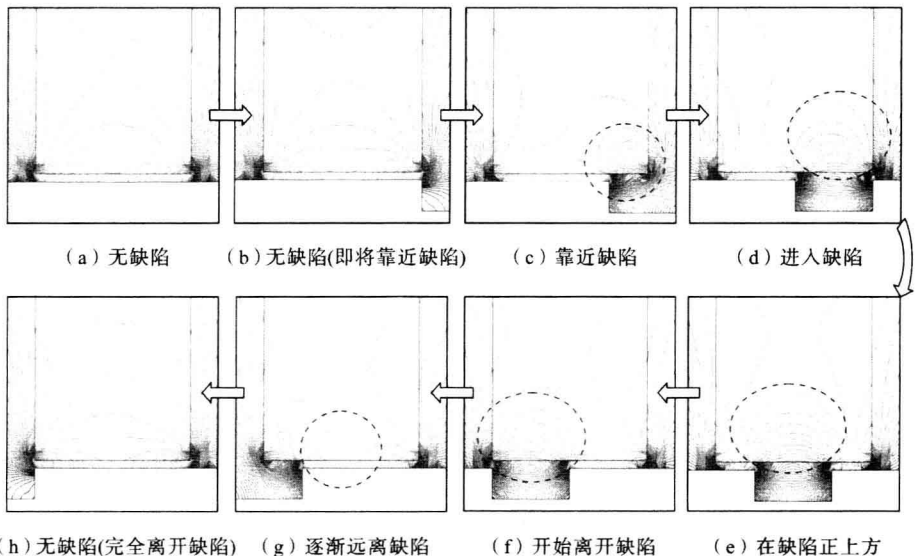


图 2-6 永磁扰动无损检测方法的磁扰动机理

铁磁构件表面上方作等距离相对移动。当无缺陷出现时,无磁扰动出现;当开始靠近缺陷时,磁扰动开始产生,并随着缺陷范围的增大而增大;当永磁体处于缺陷正上方时,磁扰动最大;随着永磁体扫查逐渐远离缺陷,磁扰动逐渐减小,直至消失,然后回到初始的无缺陷状态。特别值得注意的是,当永磁体处于缺陷正上方时,所产生的磁扰动最大。

2.3 永磁扰动无损检测方法的特性

2.3.1 可行性测试

为了验证永磁扰动的存在及该检测方法的可行性,制作了如图 2-7(a)所示的测试样板。在样板上通过电火花工艺加工了尺寸均为 0.3 mm (宽) $\times 0.3\text{ mm}$ (深) $\times 10\text{ mm}$ (长)但走向不同的五个模拟裂纹,分别标记为 b、c、d、e、f,同时加工了一个 $\phi 0.8\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 深的盲孔,标记为 a。采用永磁扰动探头沿箭头所指的 S 向扫查,获得如图 2-7(b)所示的对应的检测信号波形。

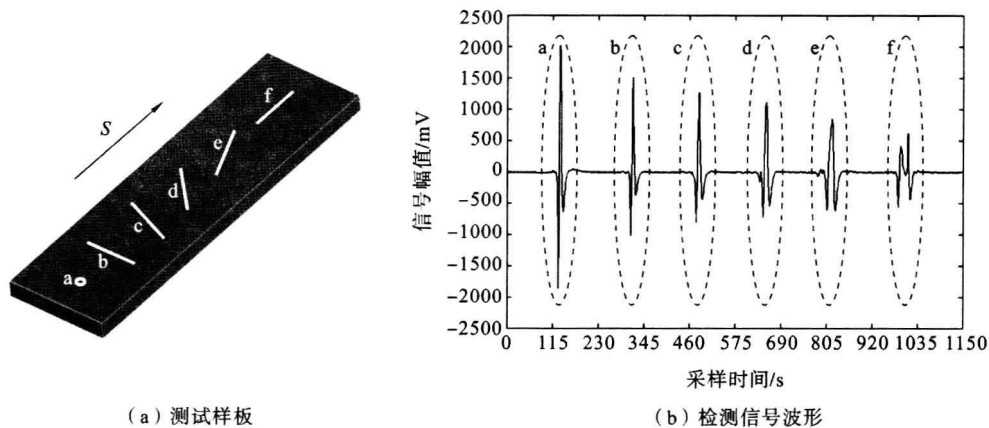


图 2-7 测试样板及检测信号波形

从检测信号波形可以看出,该探头对铁磁构件上的各种微小缺陷有着很好的检测效果。与扫查方向平行的裂纹 f 通常最难检测到,但永磁扰动探头也可以检测出,这表明永磁扰动无损检测方法的检测敏感性与缺陷的走向无关。

这种方法之所以对全方位走向的缺陷都能够检测出,主要是因为:它磁相互作用场突变时会产生磁扰动,探头检测的是整个磁相互作用场的扰动变化,待检测构件只要存在不连续突变就会产生磁扰动,而与不连续突变的走向无关。除此之外,从裂纹 f 的信号波形可以看到,当裂纹走向与扫查方向平行时,检测信号波形会从中间断开而形成“凹谷”。这可以作为一个区分纵向缺陷与横向缺