

金属磁记忆检测技术在机械设备早期故障诊断中的应用概述*

张慧 高立新

(北京工业大学 北京市先进制造技术重点实验室 北京 100124)

Application of Metal Magnetic Memory Testing in Early Fault Diagnosis of Mechanical Equipment

ZHANG Hui GAO Li-xin

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology Beijing University of Technology Beijing 100124 China)

【摘要】金属磁记忆检测技术(Metal Magnetic Memory Testing)是一种利用金属磁记忆效应来检测部件应力集中部位的无损检测方法。它能够对铁磁金属构件内部的应力集中区,即微观缺陷、早期失效和损伤等进行诊断,防止突发性的疲劳损伤。金属磁记忆检测技术是迄今为止对金属部件进行早期诊断唯一行之有效的一种无损检测新方法。选择适当的特征值对磁记忆信号进行分析,可以准确可靠地探测出被测对象上以应力集中区为特征的危險部位。介绍了金属磁记忆技术理论,并总结了用于机械设备早期故障诊断的特征值。

关键词 金属磁记忆;早期故障诊断;特征值

【Abstract】 Metal Magnetic Memory Testing (MMMT) is a kind of Non-Destructive Testing which can detect the position of stress concentration by the use of Metal Magnetic Memory effects. Using this method the stress concentration area caused by micro-defect and initial failure and damage can be found. So the paroxysmal fatigue damage can be avoided. By now MMT is the only effective NDT new method that can do early diagnosis to metal parts. By choosing proper signal characteristics to analyze the magnetic memory signals, the danger positions with characteristic stress concentration on tested metal parts could be detected reliably and accurately. The MMT theory and signal characteristics were summarized.

Key Words Metal Magnetic Memory; Early Fault Diagnosis; Signal Characteristics

中图分类号: TH16; TP274+.5 文献标识码: A

1 引言

在现代工业中,铁磁性金属构件在机械设备构成中占据重要比例,且大多作为受力构件使用。构件在使用过程中承受各种载荷,其内部不可避免地存在着由于应力集中而产生的疲劳损伤和腐蚀缺陷,从而造成事故隐患。据统计,在现代工业领域中,约(50~90)%的结构破坏是由疲劳失效引发的。

设备的零部件和金属构件发生损坏的主要原因是各种微观和宏观机械应力集中。有效地评价应力集中的状况,特别是导致损伤的临界应力集中状况是评价设备状态、识别零部件早期故障的一个重要依据。金属磁记忆检测技术是一种通过获取工件在地球磁场和工作载荷作用下形成的自身磁性的一种被动检测方法^[1]。

这种方法比其它方法更容易实现检测仪器的小型化以及点磁测量,操作简单、灵敏度高并且对被检工件表面状况要求也不高,一般不需要进行预清理或做其它准备,特别适合现场工作。金属磁记忆检测方法能够检测出金属的早期故障,特别是尚未形成的不连续缺陷,是对铁磁构件进行早期故障诊断的唯一高准确的方法。

2 机械设备早期故障诊断概述

机械设备故障诊断是二十世纪六七十年代产生并发展起来的一门综合性边缘学科。机械设备故障诊断是识别机器或机组运行状态的科学,旨在发现设备的隐患,将设备事故防患于未然,对保障安全生产、提高生产效率起到良好的作用。早期故障诊断的目的即在缺陷产生破坏前对构件进行预测和评估,在零件失效之前采取措施,避免事故的发生。

一般来说,设备出现故障的表现主要有:设备结构的损坏(磨损、腐蚀等)、材料的变质(如材料的老化)、运行失效(如设备的松动引起的气、液介质堵塞、渗漏等)。机械设备出现损坏故障的基本原因是工作载荷造成的应力集中,在应力集中区域,疲劳、腐蚀和蠕变过程的发展尤为剧烈。以转轴为例,转轴断裂主要是由微观应力集中所导致的疲劳失效引起的。其基本特征表现为材料在低于静强度极限的交变应力的持续作用下,萌生多种类型的微观内部缺陷(如位错、滑移、应力诱发相变等),并逐渐演化成为宏观裂纹,以及由于裂纹扩展而导致断裂的过程。

目前,国内外的故障诊断技术主要有:振动诊断技术、油液

* 来稿日期: 2011-12-26 * 基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2009AA04Z417) 北京先进制造技术重点实验室的资助和支持

分析技术、温度监测技术、无损检测技术以及起辅助作用的机器性能参数测定法。在机械设备故障早期,反映设备故障特征的振动信号相对较小,而且受到信号传播途径、传播介质、背景噪声的影响,导致信号的信噪比很低,难以得到信号中所携带的设备运行状态和故障信息。而相对于传统的诊断技术及其它无损检测方法,金属磁记忆检测技术不仅可以检测出已经出现的缺陷及其分布,而且可以检测出不影响机械设备性能的缺陷,实现对铁磁性构件进行早期诊断的目的。

3 金属磁记忆检测方法

3.1 磁记忆检测技术的发展

金属磁记忆检测方法是由俄罗斯专家 A.A. Doubov 教授在 1997 年提出的一种无损检测方法,之后主要在前苏联和东欧的一些国家和地区得到推广和应用。苏联解体后, Doubov 教授成立了俄罗斯动力诊断公司,向世界各地推广这项技术。该技术于 20 世纪末引入我国,并于 2001 年 8 月在北京召开了首届全国金属磁记忆检测技术研讨会^[1]。目前一些大学和研究所开展了初步的检测机理方面的研究工作,许多检验单位在锅炉、压力容器、压力管道、飞机、气轮机和一些金属结构构件上开展了检测应用,并取得了初步成果。

3.2 磁记忆检测技术原理

金属磁记忆检测实质上是从金属表面拾取地磁场作用条件下的金属构件漏磁场信息,获取的是在微弱地磁场作用下构件本身具有的“天然”磁化信息。在这种状态下,金属零件的应力分布情况可以通过磁场分布清晰地显现出来。通过评价该部位应力集中程度来发现缺陷,因此金属磁记忆方法的优势应在检测肉眼难以发现的微缺陷,适用于早期诊断。

金属磁记忆检测技术是记录工作载荷作用下,设备在应力集中区产生的自有漏磁场的无损检测方法。其原理是:铁磁工件在载荷的作用下,磁晶体内的应力能会增加。为了使铁磁构件内的总的自由能趋于最小,在磁机械效应和磁致伸缩效应的共同作用下,构件内部磁畴组织的畴壁必将产生位移甚至产生不可逆的重新取向排列,从而以增加磁弹性能的形式来抵消应力能的增加。在载荷消除之后,这种磁畴组织的的变化也会保留下来,并在应力集中区形成类似缺陷的漏磁场分布。

应用磁记忆检测技术进行机械设备故障诊断的整体思路,如图 1 所示。磁记忆检测仪可以直接显示由磁敏传感器测得的磁信号的垂直分量($H_p(y)$)及磁场强度 K 的波形图,根据垂直分量过零点及梯度最大值,判断应力集中区的位置,对于复杂的工程应用,也可将数据传输到计算机上,做进一步的处理分析。

4 磁记忆检测技术的特征值

磁记忆检测技术主要是对铁磁构件的应力集中程度进行评估,以确定缺陷的位置和大小。因此找到能够表征应力集中程度的特征值至关重要。目前国内外学者提出了多种磁记忆监测信号的特征值。

4.1 法向分量零点及梯度

杜波夫教授通过对疲劳损坏进行了磁记忆诊断研究,给出

了应力集中区极限状态的确定方法,通过试验研究和工业试验得出了检测应力集中区的场强零线标准和场强导数标准^[4],并在各国申请了专利。

(1) 磁场强度法向分量过零点 $H_p(y)=0$ 点

在应力集中区,构件表面漏磁场的切向分量 $H_t(x)$ 具有最大值,而漏磁场的法向分量的符号发生变化,存在零点 $H_p(y)=0$,所以通过测定 $H_p(y)=0$ 线即可确定应力集中区,如图 1 所示。

(2) 磁场强度梯度 K

通过测定磁场法向分量梯度值(变化强度) $K=dH_p(y)/dL$ 评定应力集中水平。在一定条件下, K 值越大,构件的应力集中程度越严重。目前梯度 K 是最有效、应用最广泛的反应应力集中程度的特征值。

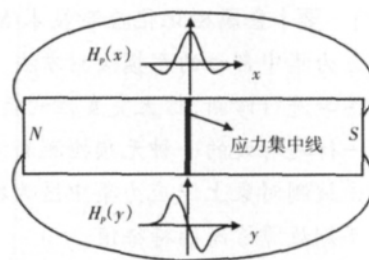


图 1 漏磁场分量与应力集中区的关系示意图

一些科研人员通过现场实际测试制定了一系列指导性文件,比如管道、锅炉、汽轮机、发电机等的检测方法。在国内外的应用研究中,应用 $H_p(y)=0$ 确定应力集中区,实验室研究具有较好的检测效果。目前一些检测研究,从整体检测长度上找出同时有过零点和周围相比较梯度较大的地方,认为危险区域,很多不同行业和设备上的检测实验中均发现了梯度较大的地方的确有应力集中现象或者缺陷存在。

4.2 其他特征值

虽然上述特征值在实验研究中效果良好,但在复杂的工程应用中单纯应用此特征值容易造成误检、漏检。在有些情况下,在没有过零点的位置也同样存在着应力集中。受外界磁场的干扰,梯度较大的位置也并非都是应力集中或缺陷的位置。国内外学者在选取适当的特征值来表征应力集中的位置及缺陷程度与漏磁场信号的关系等方面做了大量的试验研究,总结起来主要有以下几种。

(1) 法向磁场分量极大值与极小值之差,记为 δ

在焊缝裂纹的拉伸试验中,卸载后的 δ 值比卸载前要高,如果卸载前应力达到屈服极限以上,随着卸载前应力的增大,卸载后 δ 值将有更大的保留,存在一个临界的 δ 值,当低于该值时承载的检测对象处于高危险状态。

(2) 相位突变点^[6]

将去噪后的磁记忆信号做傅立叶变换求出信号的幅值和相位后,发现磁记忆信号的相位谱在某处的相位有奇异性突变,与此对应的测量位置可能就是缺陷的位置。

(3) 过零点峰峰值的梯度^[6]

在提取裂纹磁记忆原始信号的基础上,对信号进行微分并归一化处理,然后,计算过零点峰峰值的梯度。该梯度值超过一定

量值时判定该处存在缺陷或者应力集中。

过零点峰峰值的梯度的计算方法为：

A 为正区间内的一个最高点 B 为负区间内与 A 相邻的最低点。 h_1 表示 A 与 B 的高度差 d_1 表示 A、B 两点的位移差。则该过零点峰峰值梯度的计算公式为 如图 2 所示。

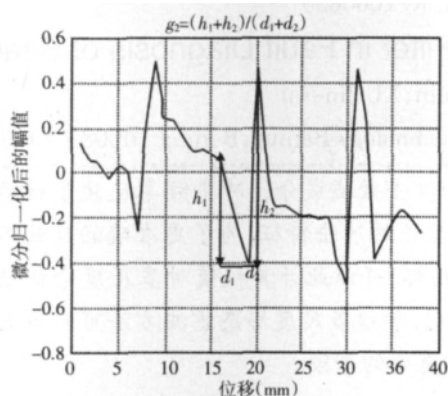


图 2 过零点峰峰值梯度计算示意图

(4) 临界磁场梯度指数

$$m = \frac{k_{\max}}{k_{\text{mean}}}$$

式中 k_{mean} —磁场梯度的平均值 k_{\max} —试件被测部位磁场梯度的最大值 m —被测试件上应力集中区的应力集中水平。

试验数据显示 随着载荷的增加 在应力集中部位由于磁机械效应的作用使得材料表面漏磁场增强 其磁记忆信号的磁场梯度指数增大。

$$m_c = \frac{k_{\max}}{k_{\text{yield}}}$$

式中 k_{yield} —材料内部应力水平达到屈服强度 δ_s 时 最大应力集中部位磁场梯度的平均值。当材料的磁场梯度指数大于铁磁材料的临界磁场梯度指数 m_c 时 即可认为被测试件的应力集中区处于濒临开裂的临界状态 需要对该部为进行重点分析。

(5) 幅值谱熵

对磁记忆监测信号做傅立叶变换得到其幅值谱序列 $X(i)$ ($i=1, 2, \dots, N$)。根据信息熵的概念 其幅值谱熵为：

$$H_f = - \sum_{i=1}^N (q_i) \cdot \log(q_i)$$

式中 $q_i = \frac{|X(i)|}{\sum_{j=1}^N |X(j)|}$ $i=1, 2, \dots, N$ 它反映的是单一幅值谱在整个

频谱中所占的比例 即谱的集中程度。

谱熵越小 谱越集中 谱熵越大 谱在整个频率成分上分布得越均匀 则信号越复杂 不确定性程度也就越大。当材料内部应力水平较低时 随着应力水平的增加 其金属磁记忆信号的幅值谱熵先增后降 但其值相对较低 当材料内部的应力集中水平达到某一水平时 其幅值谱熵达到最大 并随着应力水平的增加而降低 但其值较应力水平小时略大。利用铁磁材料金属磁记忆信号幅值谱熵的上述特征 可以确定材料内部应力的状态。

(6) 关联维数

关联维数是分维数的一种定义方法 它可以表示信号的复杂度。根据 Grassberger 和 Procaccia 提出的 G-P 算法 关联维数

的计算过程为 设信号序列为 $\{x_n\} (k=1, 2, \dots, N)$ 记：

$$X_n(m, \tau) = (x_n, x_{n+\tau}, \dots, x_{n+(m-1)\tau}) \quad n=1, 2, \dots, N-m+1$$

式中 τ —时间延迟 $\tau = k \cdot \Delta t$ Δt —采样间隔 k —整数 m —重构相空间维数。

记 C_r 为：

$$C_r = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-m+1} \sum_{j=1}^{N-m+1} H(r - |X_i(m, \tau) - X_j(m, \tau)|) \quad i \neq j$$

式中 r — m 维超球半径 $H(x)$ —阶跃函数 $H(x) = \begin{cases} 1 & \text{当 } x \geq 0 \\ 0 & \text{当 } x < 0 \end{cases}$ 。

则信号的关联维数为：

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{d(\ln C_r)}{(\ln r)}$$

计算时 需要根据不同的情况选择嵌入维数 m 。研究表明：材料内部的应力水平与其金属磁记忆信号的关联维数之间存在着线性关系 随着应力水平的增加 其金属磁记忆信号的关联维数降低。关联维数可以作为反映材料内部应力状态的一个特征量 当材料进入塑性状态时 其磁记忆信号细节分量的关联维数在 1.3 以下 这为有效解决机械应力与磁记忆信号之间的关系问题提供了一条有效的途径。

5 结束语

金属磁记忆检测技术是利用铁磁构件在工作载荷和地磁场的作用下 其残余磁性会改变及重新分布 并在工作载荷消除后保留下来的磁记忆效应 能及时准确测定铁制件以应力集中区域为特征的 危险部位 是一种崭新的早期诊断方法。对于磁记忆信号与应力集中的关系 除杜波夫教授提出的经典特征值外 国内外研究者也提出了诸多特征值用以表征应力集中的位置及缺陷的大小与漏磁场信号的关系。这些特征值的可靠性及其与磁记忆信号的定量关系都有待研究和验证。

参考文献

- [1] 刘三江, 李邦宪. 金属磁记忆检测技术概况及初步应用[J]. 无损检测, 2002, 24(9): 400-402.
- [2] 仲维畅. 金属磁记忆法诊断的理论基础[J]. 无损检测, 2001, 23(10): 424-426.
- [3] 王丽, 冯蒙丽. 金属磁记忆检测的原理和应用[J]. 物理测试, 2007, 25(2): 25-30.
- [4] Dubov A. A. etc. Review of Welding Problems and Allied Processes and Their Solution Using the Metal Magnetic Memory Effect[J]. Welding in the World, 2005, 49(9): 306-313.
- [5] 于凤云, 弓乐. 基于金属磁记忆检测技术的应力早期诊断方法[J]. 机械设计与制造, 2005(6): 10-12.
- [6] 任吉林, 林俊明. 金属的磁记忆检测技术[J]. 无损检测, 2001, 23(4): 154-156.
- [7] Doubov A. A. Screening of weld quality using the magnetic metal memory effect[J]. Welding in the World, 1998(41): 196-199.
- [8] 梁志芳. 焊缝裂纹的金属磁记忆特征研究[D]. 天津: 天津大学, 2004: 74-80.
- [9] 孙艳婷. 金属管道裂纹的金属磁记忆量化评价方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010(46).
- [10] 邱新杰. 焊缝裂纹的金属磁记忆信号量化特征研究[D]. 天津: 天津大学, 2007: 60-65.