综合技术

基于金属磁记忆的汽轮机叶片早期诊断

杨伟东[1]，李 岩[2]，徐 贤[2]，李 亮[1]，李 喆[1]，杨 浩[1]，常 伟[1]
（1. 宁夏电力能源科技有限公司， 宁夏 银川 750011；
2. 国电科学技术研究院， 江苏 南京 210031）

摘 要： 针对火力发电厂汽轮机低压转子末级叶片早期诊断困难的问题，提出了应用金属磁记忆技术对低压转子叶片进行检测的方法，并将其应用于宁夏某电厂低压转子末一、二级叶片的检测工作中。结果表明：金属磁记忆技术作为一种新型无损检测手段，对汽轮机叶片的早期诊断具有良好效果。

关键词： 金属磁记忆； 汽轮机叶片； 检测
中图分类号： TM714 **文献标志码：** A **文章编号：** 1672-3643(2014)03-0063-05
有效访问地址： http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2014.03.015

Early diagnosis on turbine blades based on metal magnetic memory

YANG Weidong[1], LI Yan[2], XU Xian[2], LI Liang[1], LI Zhe[1], YANG Hao[1], CHANG Wei[1]
(1. Ningxia Power Energy Resources Science & Technic Co., Ltd., Yinchuan Ningxia 750011, China;
2. Scientific Technology Research Institute of State Power Co., Nanjing Jiangsu 210031, China)

Abstract: Aiming at the problem of the early diagnosis difficulty for the last stage blades of turbine low-pressure rotor in coal-fired power plant, puts forward the method of using metal magnetic memory technology to detect turbine low-pressure rotor blades, and applies in the detection of the primary and secondary grade blades at the bottom of the low-pressure rotor in a power plant of Ningxia. The result shows that metal magnetic memory technology, as a new way of non-destructive test, has better effect for the early diagnosis of turbine blades.

Key words: metal magnetic memory; turbine blade; detection
DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2014.03.015

在火力发电机组中，叶片是汽轮机中完成能量转换的重要部件。机组运行过程中，叶片将同时受到气流冲击等多种外力共同作用[1]。极端的工况条件是叶片发生断裂事故的主要原因，而叶片一旦断裂，将直接造成汽轮机严重损伤，最终导致机组停运，产生巨大的经济损失。有数据显示[2]，

收稿日期： 2014-03-02
作者简介： 杨伟东(1987)，男，硕士研究生，主要从事电厂金属检测、焊接工作。

在我国，叶片损坏事故占汽轮机事故的 30%。因此，叶片检测一直是电站金属监督工作中必不可少的一部分。

为了有效减少汽轮机叶片损伤事故的发生，检测人员付出了巨大的努力。磁粉、超声波以及涡流等常规检测方法都曾被尝试应用于叶片的检测上，并且都取得了一定的效果[3-5]。然而，这些常规的检测方法有一个共同的缺点：只能对已经发展成型的缺陷进行检测，无法在缺陷形成前对叶片的应力状态进行分析诊断。然而，汽轮机叶片所处的环境决定了缺陷一旦形成便会迅速扩展，直至叶片断裂。因此，在缺陷形成前对叶片的应力状态进行诊断在叶片监督工作中显得十分必要。

金属磁记忆检测方法首先由俄罗斯学者杜波夫教授提出，其原理是：由铁磁性材料制备的部件受到工作载荷与外界磁场的共同作用时，部件中应力集中的区域会因磁致伸缩效应而产生磁畴组织定向且不可逆的重新取向，这种磁畴组织的重新取向宏观表现为在应力集中区表面产生一定大小的漏磁场[6]。外加载荷消除后，漏磁场依然存在，即所谓的“磁记忆”效应。该漏磁场表现出切向分量 $H_p(x)$ 具有最大值，而法向分量 $H_p(y)$ 改变符号且过零值点的特征，如图 1 所示。金属磁记忆检测方法以此为理论依据，通过检测部件表面漏磁场法向分量来确定构件的应力集中位置及大小。

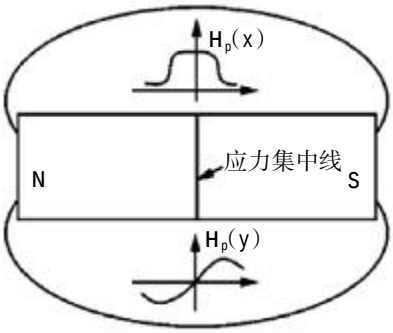


图 1　磁记忆检测原理

金属磁记忆检测技术最大的特点在于它可以对零部件进行早期诊断，防止零部件发生突发性破坏，这对汽轮机叶片的监督工作意义重大。然而，作为一项极具潜力的新技术，金属磁记忆技术的应用目前仍处于探索阶段。希望能够通过本文的探讨进一步推广金属磁记忆技术在电站金属监督工作中的应用。

1　磁记忆检测对象及方法

在宁夏某电厂 1 号机大修期间，对机组汽轮机励磁侧及汽侧末一、末二级叶片进行金属磁记忆检测。叶片属于变截面扭叶片，材质为 0Cr17Ni4Cu4Nb-T6，其简化图如图 2 所示。采用俄罗斯动力诊断公司开发的 TSC-1M-4 型应力集中指示仪进行检测。检测方法为将载有探头的小车平放在叶片上，用手推动小车，使小车以不超过 500 mm/s 的速度从叶顶向叶根移动（如图 2 中虚线所示），此时仪表将检测到金属表面的自有漏磁场强度 H，并以曲线的形式在仪表显示屏上显示，手动存储检测数据。将数据导入与该设备配套的 MM-system 软件中进一步分析，获得评价应力集中大小的重要参数——自有漏磁场梯度 dH/dx。

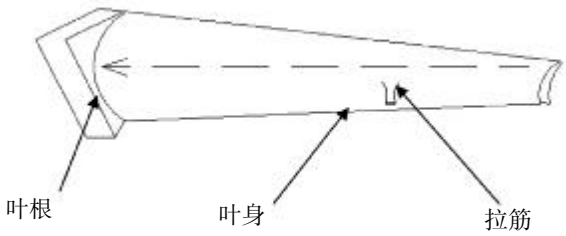


图 2　末级叶片

叶片是否存在应力集中及应力集中大小的判定依据为：当小车经过叶片某一部位，该部位磁场法向分量经过零值点，即符号由负变正或相反，且自有漏磁场梯度具有很大的值时，认为该部位存在应力集中[7]；反之则认为叶片不存在应力集中。采用 HS500 型数字式超声波探伤仪对存在应力集中的叶片进行复检，确认是否存在缺陷。

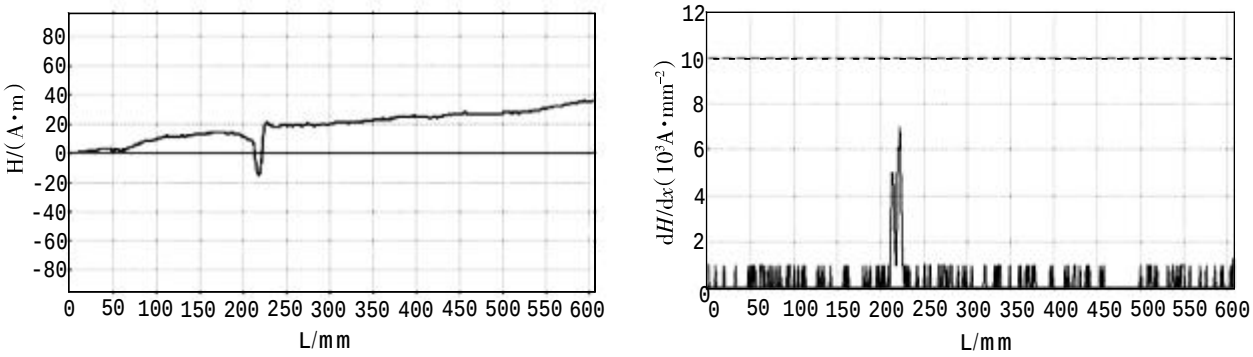
2　数据采集及分析

随机选择 10 根励磁侧末一级叶片作为检测对象，发现励磁侧末一级叶片普遍存在自有漏磁场强度 H 突变的现象。以编号为 Z6-03 和 Z6-22 的叶片为例分析，图 3 为编号 Z6-03 叶片的金属磁记忆检测结果。图 3(a)为叶片表面自有漏磁场

强度图,观察发现,叶片表面自有漏磁场强度 H 在距离叶端 220 mm 处（拉筋处）发生突变且过零点;图 3(b)为叶片漏磁场梯度图,观察发现漏磁场梯度值 dH/dx 在自有漏磁场强度发生突变的位置明显提高,达到 7×103 A/mm²,远大于其他部位的 1×10³ A/mm²。分析认为叶片在此处存在一定程度的应力集中。图 4 为编号 Z6-22 叶片的自有漏磁场强度及梯度图，观察发现在距离叶端 600 mm 的位置(叶根)同样存在应力集中,且漏磁场梯度值 dH/dx 达到 17×10³ A/mm²,应力集中程度更严重。

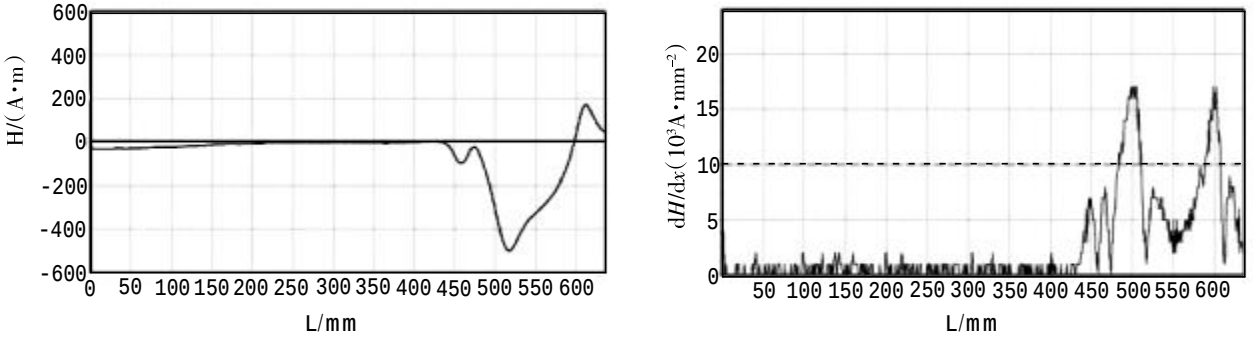
在汽侧末一级随机选择 10 根叶片进行检测,以 U6-03 为例分析。图 5 所示分别为汽侧末一级叶片 U6-03 的自有漏磁场强度图和漏磁场梯度图,观察发现,自有漏磁场强度曲线平缓,自有漏磁场梯度 dH/dx 只有 2×10³ A/mm²,分析认为叶片不存在严重的应力集中。其它被检叶片检测结果与该叶片基本一致。

分别在励磁侧末二级和汽侧末二级叶片中随机选择 5 根叶片进行检测。图 6 和图 7 分别为励磁侧末二级编号为D4-42 叶片和汽侧末二级编号为 L4-50 叶片的检测结果,观察发现自有漏磁场强度曲线过渡平缓,无突变,虽有多处磁场强度过零



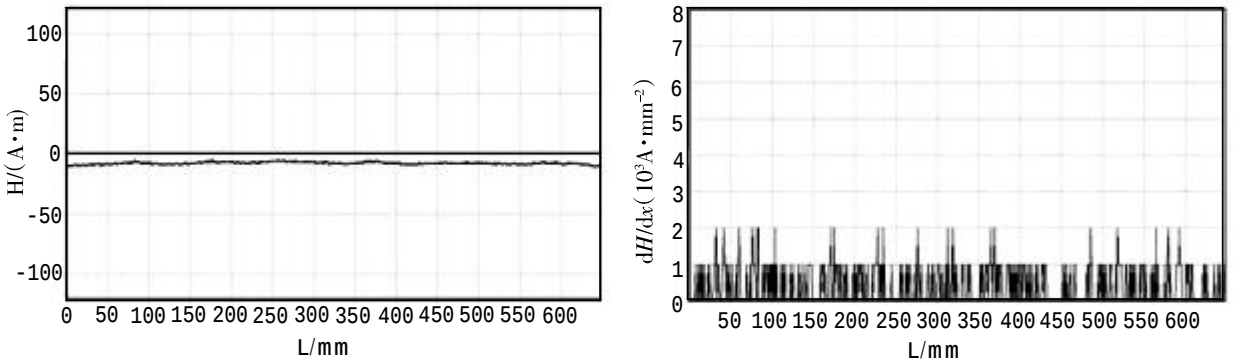
(a)漏磁场强度　　(b)梯度

图 3　Z6-03 叶片磁记忆检测结果



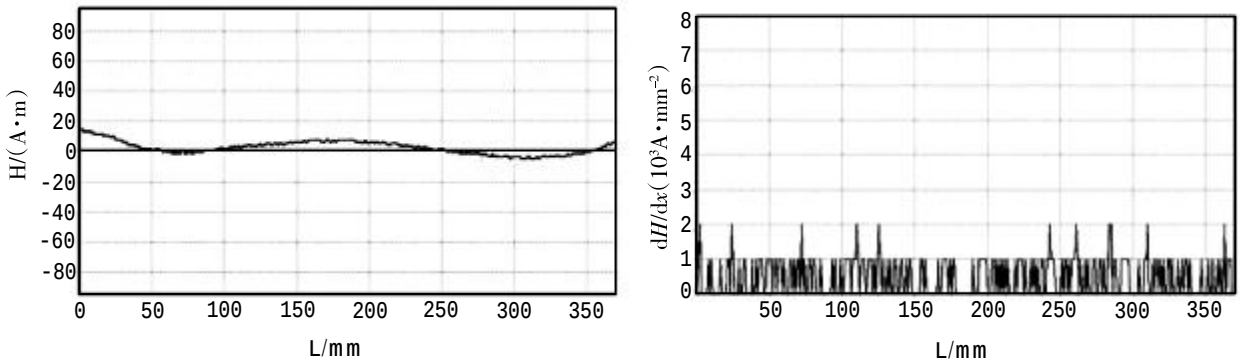
(a)漏磁场强度　　(b)梯度

图 4　Z6-22 叶片磁记忆检测结果



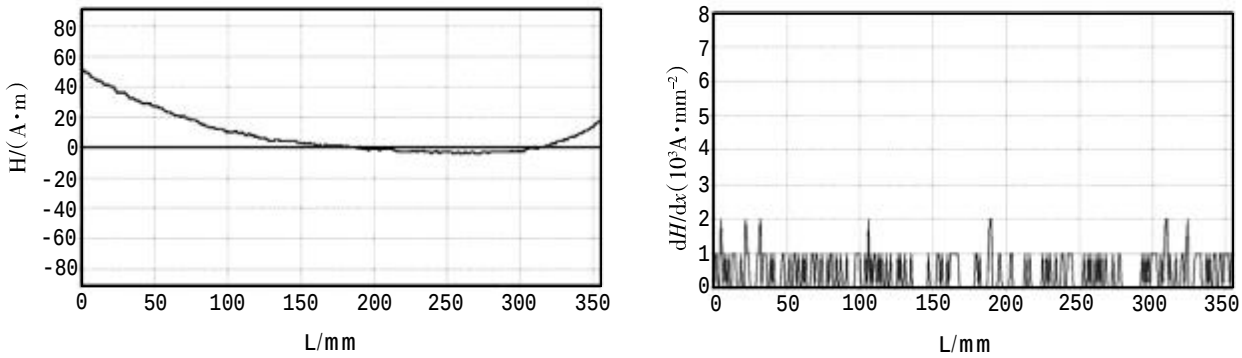
(a)漏磁场强度　　(b)梯度

图 5　U6-03 叶片磁记忆检测结果



(a)漏磁场强度　　(b)梯度

图 6　D4-42 叶片磁记忆检测结果



(a)漏磁场强度　　(b)梯度

图 7　L4-50 叶片磁记忆检测结果

点,但最大自有漏磁场梯度 dH/dx 仅为 2×10^3 A/mm²。其他被检叶片的检测结果均显示自有漏磁场强度无突变,自有漏磁场梯度不大于 2×10^3 A/mm²。表明励磁侧及汽侧末二级叶片均无应力集中区。

对所有被检测叶片自有漏磁场强度 H 突变情况和自有漏磁场梯度 dH/dx 大小进行统计，结果如表 1 所示。表 1 结果显示,励磁侧末一级的所有被检叶片均表现出不同程度的漏磁场强度突变,且自有漏磁场梯度 dH/dx 较其他叶片大的多。此外,同侧叶片的自有漏磁场梯度 dH/dx 相比较,末一级更大。

表 1　各级叶片磁记忆检测结果

项目	自有漏磁场发生突变叶片占被检叶片比例/%	自有漏磁场梯度最大值/(10^3 A·mm^{-2})	dH/dx 平均值/(10^3 A·mm^{-2})
励磁侧末一级	100	26	11.2
励磁侧末二级	0	3	2.8
汽侧末一级	0	4	3.2
汽侧末二级	0	3	2.6

为了进一步验证金属磁记忆检测到的应力集中区是否已发展为成型缺陷，检测人员对应力集中较严重的励磁侧末一级叶片做了超声波检测，结果表明无成型缺陷存在。

3　磁记忆诊断结果

对利用磁记忆设备采集到的数据进行对比分析，认为励磁侧末一级叶片存在一定程度的应力集中,这与其所处的工作环境和位置密不可分。在机组运行过程中,腐蚀、水蚀以及接触疲劳等原因共同影响叶片的性能，尤其在拉筋和叶根等截面发生突变的部位，受到外力时更容易产生应力集中。此外,检测结果显示,同侧叶片相比较,末一级叶片应力集中程度远大于末二级叶片，这可能是由两方面的因素造成的,一方面,末一级叶片所处位置蒸汽温度更低,湿度更大,服役条件更差;另一方面,相比末二级叶片,末一级叶片长度更长,且有拉筋,结构更复杂。因此,末一级叶片更容易产生应力集中。

超声波检测结果显示，在励磁侧末一级叶片拉筋处的磁场突变仅为应力集中，暂没有发展成为危害严重的成型缺陷。但在接下来的运行中，应将励磁侧末一级叶片作为监督重点，防止事故的发生。

4　结论

(1)对宁夏某电厂低压转子末一、二级叶片进行金属磁记忆检测，发现励磁侧末一级叶片在拉筋处(个别在叶片根部)普遍存在应力集中，其他叶片无明显应力集中。

(2)对励磁侧末一级叶片做超声波检测，结果显示无明显裂纹，表明应力集中暂未发展为成型缺陷。

(3)应在今后的机组运行过程中将励磁侧末一级叶片作为重点监督对象，以防事故的发生。

(4)本次检测结果表明金属磁记忆技术作为一种新型检测手段对汽轮机叶片的早期诊断有良好效果。

参考文献：

[1] 秦文防.汽轮机叶片损坏事故分析[J].电力通用机械，2012(1):76-78.

[2] 罗剑斌，谭士森，袁立平.大型汽轮机叶片事故原因分析[J].电力安全技术，2002,4(8):11-12.

[3] 王朝华. 2Cr13 汽轮机叶片裂纹磁粉检测工艺选择与应用[J]. 河南科技，2007(2):34-35.

[4] 赵延武. 某电厂汽轮机叶片裂纹的超声波横波检测[J]. 城市建设，2009(32):327-328.

[5] 邵泽波，宋树波.汽轮机叶片的涡流检测[J].无损检测，2002,24(10):444-453.

[6] 邓勇刚，刘念念，黄怡然，等.高强度连接螺栓金属磁记忆检测[J]. 钻采工艺，2010,33(1):60-62.

[7] 蹇兴亮. 一种新型金属磁记忆检测仪的研制 [D].南京：南京航空航天大学，2007 年.

紧急声明

近期，社会上出现盗用《宁夏电力》期刊刊名、刊号、主管单位和主办单位名称，以所谓“《宁夏电力》杂志社北京编辑部”为名，非法出版“《宁夏电力》(学术版)”的情况，严重扰乱了科技期刊出版市场，损害了我刊声誉和权益。为此，《宁夏电力》期刊编辑部郑重声明如下：

1.《宁夏电力》期刊是经过国家新闻出版总署批准，公开出版发行的专业技术类期刊，主管单位为宁夏回族自治区电力公司，由宁夏回族自治区电力公司和宁夏电机工程学会主办。《宁夏电力》期刊为双月刊，每双月 28 日出版，全年出版 6 期，无单月刊和所谓“学术版”。

2.《宁夏电力》期刊的编辑出版单位是《宁夏电力》期刊编辑部。《宁夏电力》期刊编辑部设于银川，通信地址为：宁夏银川市金凤区黄河东路 716 号，邮编：750011。投稿邮箱为：nxdl1971@163.com。编辑部联系电话：0951-4911970。本刊未在北京及国内其他地方设立分支及代理机构。

3. 最近发现的盗刊名为：“《宁夏电力》(学术版)”；非法联系人为：王老师；非法电话：010-56708927(兼传真)；非法地址为：北京市昌平区政府街邮局 39 号信箱，邮编：102200；互联网非法投稿邮箱：nxdl1971@126.com；非法投稿网站：http://www.qikan.com.cn（龙源期刊网）及 http://www.lc365.net(365 学术交流网)；非法编辑部网址为：http://www.nxdlxueshu.com。请广大作者注意甄别，谨防上当。

4. 盗刊是国家严禁的非法出版物，每个公民都有抵制和向有关部门举报的义务。向盗刊投稿所造成的一切损失和后果均由投稿者自负，与本刊无关。

5. 盗刊者已触犯了国家相关法律、法规及管理条例，本刊保留向司法机关追究其法律责任的权利。

《宁夏电力》期刊编辑部