排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2015 年 12 月 Dec. 2015 | 第 33 卷 第 12 期 Vol. 33 No. 12
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0166

高压电动机定子绕组绝缘薄弱点的有效定位

龚维明

龚维明[1]，龚静雅[2]，张宇[1]
（1.江苏省江都水利工程管理处，江苏 扬州 225200；2.江苏省鸿源招标代理股份有限公司，江苏 南京 210019）

摘要：针对局部放电检测方法（无论在线还是离线）只能判断一相定子绕组绝缘的放电量，无法定位到绝缘薄弱点的问题，根据局部放电发生时会向周围辐射电磁波和超声波，利用定向天线和超声传感器检测出放电位置和放电强度，并与脉冲电流法检测的幅值和图谱进行比对，从而确定放电位置.根据现场情况，减少噪声、电磁干扰等干扰源对电动机定子绕组局放检测的影响，总结出高压电动机定子绕组声电局放综合检测正常情况、内部放电等情况的参考图形.进行大量现场测试并制定不同类型、不同放电级别的放电点，根据频谱信息验证定位的准确性.声电局放综合检测与脉冲电流检测视在放电量的结合使用，并根据探测器接收的局放信号图谱与脉冲电流检测图谱进行比对，判断高压电机定子绕组不同放电点.通过对高压电动机定子绕组绝缘薄弱点的定位试验，掌握江都站主电动机绕组的绝缘状况及性能，为保障机组安全运行以及大型泵站加固改造提供了重要数据.

关键词：高压电动机；绝缘薄弱点；位置探测系统；定位；局部放电检测
中图分类号：S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2015)12-1091-06

龚维明，龚静雅，张宇. 高压电动机定子绕组绝缘薄弱点的有效定位[J]. 排灌机械工程学报，2015，33(12)：1091-1096.

GONG Weiming，GONG Jingya，ZHANG Yu. High voltage motor stator winding insulation vulnerabilities of effective positioning [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2015，33(12)：1091-1096.(in Chinese)

High voltage motor stator winding insulation vulnerabilities of effective positioning

GONG Weiming[1]，*GONG Jingya*[2]，*ZHANG Yu*[1]
(1. Jiangsu Water Conservancy Engineering Administration Division，Yangzhou，Jiangsu 225200，China；2. Jiangsu Hongyuan Bidding Agency Co.，Ltd.，Nanjing，Jiangsu 210019，China)

Abstract：For partial discharge detection method (no matter online or off-line)，it can only be used to determine the discharge capacity of a phase stator winding insulation，which can be used to detect the discharge position and intensity. According to the situation of the field，the noise，electromagnetic interference and other interference sources to the motor stator winding test were reduced，the high voltage motor stator winding sound power of the test of the normal situation and internal discharge. were summed up. A large number of field tests were carried out to establish the discharge points of different types and different discharge levels，and to carry out the accuracy of the spectrum information and to verify the location. The combined detection of the sound and the pulse current is used in combination

收稿日期：2015-07-23；**网络出版时间**：2015-12-16
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20151216.1724.030.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51379182)；江苏省水利科技基金资助项目(201306)
作者简介：龚维明(1963—)，男，江苏扬州人，高级工程师(965049613@qq.com)，主要从事机电设备的运行、试验及研究.
龚静雅(1990—)，女，江苏南京人，助理工程师(wlxhaohao@sina.com)，主要从事机电设备的运行及招投标研究.

with the pulse current detection, and the different discharge points of the stator winding of high voltage motor are judged by comparing the signal spectrum and the pulse current detection. The insulation condition and performance of the main motor windings of the Jiangdu Railway Station are provided by the positioning test of the weak point of the stator winding insulation of high voltage motor.

Key words: high voltage motor; insulation vulnerabilities; location detection system; positioning; partial discharge detection

从20世纪60年代开始,中国陆续建设了一批大中型泵站,至今已有50多年. 大型泵站多采用6 000 V或1 000 V高压电动机. 在应用过程中,很多运用中的电动机在交直流耐压试验中发生了定子绕组绝缘击穿,甚至在机组运行过程中也发生绝缘击穿事故,对机组乃至泵站的安全运行造成严重威胁,给抗旱排涝工作带来严重影响. 根据泵站机组运行安全,分析电动机定子绝缘老化故障产生的原因及故障等级,准确分析绝缘故障原因,需要依据具体老化情况和环境因素,确定故障的排除方法[1],消除电动机潜伏性故障,防止突发性事故. 局部放电检测方法(无论在线还是离线)只能判断一相定子绕组绝缘的放电量,无法定位到绝缘薄弱点,目前亟须提高诊断技术[2-3].

文中以江苏省江都抽水站为例,通过对高压电动机定子绕组在进行传统脉冲电流法局部放电测量的同时,配合超声波法和电磁波法对局部放电信号图谱进行综合分析,从而实现采用脉冲电流法结合超声波和电磁波进行定量、定位检测的目的. 这一方法可以为电动机定子绕组绝缘薄弱点就地、及时处理提供依据,从而避免返厂更换定子绕组,其经济效益明显,推广应用价值巨大.

1 主电动机定子绝缘故障成因与维修

1.1 定子绕组绝缘故障形式

根据近年来泵站电动机运行资料统计,大型泵站同步电动机,随着运行时间和日历时间的增加,定子绝缘故障事故发生较多[4]. 主要原因有:

1) 定子生产过程中由于端部成型不规整,工艺不良,而导致绝缘磨损而短路;

2) 运行时间长,绝缘老化,电气强度降低,造成运行过程中绝缘击穿;

3) 由于安装、大修或其他原因,在电动机内部有一定的金属遗留,从而导致绝缘损坏.

1.2 江都抽水站情况

根据近年来泵站电动机发生事故资料[5],江苏省大型泵站同步电动机由于运行时间较长诱发的定子绝缘问题所造成的事故较多. 江都抽水站装机共33台套,1975—1998年共发生16次因电动机绝缘老化损坏进行大修处理或更换的事故,影响机组运行. 具体情况如表1所示.

表1 江都抽水站电动机定子绝缘故障与维修情况

Tab.1 Motor stator insulation fault and maintenance of Jiangdu pump station

单位	时间	故障机组	故障描述	处理方法
一站	1975.01	5#主机	电动机单相接地故障	返厂处理
	1980.11	3#主机	交流耐压试验时A相定子绕组线圈击穿	返厂处理
	1987.12	7#主机	定子绝缘下降	更换主电动机
	1988.03	6#主机	定子线圈绝缘下降,矽钢片变形	
二站	1972.12	5#主机	定子线圈老化,绝缘电阻不够	进行烘干处理
	1996.03	3#主机	定子线圈老化	主机改用一站更换下来的7#主机
三站	1983.02	1#主机	高压试验时,定子线圈绝缘损坏击穿	返厂处理
	1993.01	6#主机		返厂处理
	1992.05	3#主机		返厂处理
	1996.06	1#主机	定子引线绝缘击穿短路	返厂处理
	1997.06	6#主机		返厂处理
	2002.08	10#主机		返厂处理
四站	1994.05	4#主机	定子击穿	返厂处理
	1999.11	2#主机		
	1996.10	4#主机	定子绝缘下降	更新定子
	1998.10	7#主机		

2 电动机定子绝缘现行检测参数与方法

2.1 检测参数

电动机绝缘结构设计时,应充分考虑以下因素:介电性能、机械性能、热性能和化学性能等. 对高压电动机,介电性能起着决定性作用,为此,高压电动机在投入运行之前都要通过相关测试,其中主要有耐压试验和绝缘电阻的测量. 表2为现行的绝缘检测参数及其优缺点.

高压电动机运行可靠性主要决定于电动机绝缘的质量. 电动机绕组绝缘应具有产品所要求的耐热等级、足够的耐电强度、优良的力学性能和良好的工艺

性,并要求在规定的环境条件下长期运行,其机电性能不致下降到影响电动机安全运行水平.

表 2　大型电动机绝缘测试参数

Tab. 2　Insulation test parameters of large electrical machines

检测参数	优点	缺点
绝缘电阻、吸收比	检验绝缘性能最简单又可靠	一般不能反映主绝缘的局部缺陷
介质损失角正切值 tg δ	使用较多且对判断绝缘较为有效,可以反映出绝缘的一系列缺陷	难以反映出绝缘内部的工作电压下局部放电性缺陷
耐压试验	真实有效地发现绝缘缺陷,对绝缘的考验是严格的,特别是能揭露那些危险性较大的集中性缺陷	可能会对绝缘造成一定的损伤
局部放电	非破坏性试验	需要进行信号的干扰抑制

2.2　检测方法

目前,针对绝缘故障检测的研究,主要集中在绝缘故障导致的局部放电特性的研究上[6-7]. 电气设备局部放电检测方法主要有: ① 电气测量法,如脉冲电流法; ② 非电气测量法,如光测法、超声波法、超高频法等多种检测方法. 与电气测量法相比,利用非电气检测法对电气设备进行故障诊断更为有效[8]. 超声波在传播过程中不受电磁干扰的影响,易于实现在线监测与定位,利用超声波检测法在电气设备故障诊断中取得一定的成效[9].

传统的电动机绝缘检测参数与检测方法,只能反映定子的整体绝缘性能. 局部放电的在线检测法和离线检测法均只能检测一相定子绕组绝缘的放电量,无法定位到绝缘薄弱点,对设备的检修、维护起不到决定性的指导作用.

3　局部放电位置探测系统

该系统在变压器绝缘薄弱点定位装置研究的基础上,根据电动机定子绕组的特点,配合脉冲电流法通过声电综合检测法来判断局部放电位置. 其原理是,在对高压电动机定子绕组进行传统脉冲电流法局部放电测量的同时,配合超声波法和电磁波法对局部放电信号图谱进行综合分析,从而实现脉冲电流法定量、超声波和电磁波综合检测定位的目的.

3.1　系统组成

电动机定子内部绝缘发生放电时,会向局部空间辐射高频电磁波信号,同时会产生超声波信号并向四周传播. 图 1 为局部放电探测器原理框图. 局部放电探测器利用电信号的定向传感器接收局部放电的电磁波信号,同时利用超声传感器接收局部放电的超声波信号,将电声信号放大处理后,通过光纤传输到 TWPD 系列局放分析仪,完成对电、声信号幅值和时差变化的分析,确定放电部位的三维空间位置.

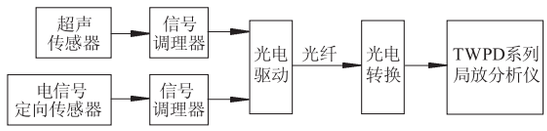


图 1　局部放电探测器原理

Fig. 1　Schematic of partial discharge detector

图 2 为局部放电定位探测器原理框图. 定位探测器由 2 部分组成:一部分为超声信号调理模块,由输入保护、阻抗匹配、前置放大、带通滤波和电光转换等模块组成;另一部分为电场信号调理模块,由输入保护、阻抗匹配、前置放大、带通滤波、宽带检波和电光转换等模块组成.

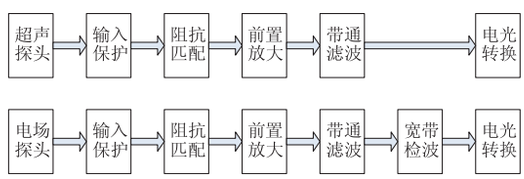


图 2　局部放电定位探测器原理

Fig. 2　Block diagram of partial discharge location

经过探头预处理的信号进入局放仪后,首先经过电光转换模块把局放信号转换成电信号,然后经过程控放大、滤波处理后送到 ADC 模块进行模拟量到数字量的转换. 数据缓存到 RAM,微处理器对数据进行一系列处理后以数字或者波形、指纹图、柱状图等方式显示在显示器上. CPLD/FPGA 模块执行处理器发出的指令,对数据采集的整个过程进行控制. 同步信号首先经过防雷滤波模块,泄放电源线的高能量冲击杂波,滤除信号上的噪声,然后经过信号调理模块送到 ADC 采集模块. 同步信号主要是为局放采集提供参考相位,为后期的软件处理、放电类型识别和抗干扰提供有利条件.

3.2　系统工作原理

高压电动机定子绝缘薄弱点定位试验包括两个过程,即定相试验和定位试验. 定相试验是指采用脉冲电流法分别对电动机的三相绕组试验,找出放电量大的绕组,从而确定绝缘薄弱的绕组相;定位试验是指针对定相试验找出的绝缘薄弱相,采用声电复合探测器来逐一检测电场信号和超声信号强度大的点,从而可以定位绕组的绝缘薄弱点. 在局部放电的检测过程中,当局部放电超标时就需要

一种方法去检测出定子绕组中的放电部位. 当局部放电发生时会向周围辐射电磁波和超声波,利用定向天线和超声传感器可检测出放电位置和放电强度,并与脉冲电流法检测的幅值和图谱进行比对,从而确定放电位置. 整个检测过程与高压电动机定子绕组无任何接线,探测器与检测仪器利用光纤隔离,使检测过程安全方便. 系统包括局部放电位置探测传感器以及专用配套软件.

4 现场检测与分析

高压电动机定子绕组绝缘薄弱点定位试验在江都抽水站进行,前后包括2次试验.

4.1 第一次试验

第一次试验在江都三站4#机组上进行,试验时间为2013年3月5日,采用未改进的局部放电定位探测器来检测定位定子绕组绝缘薄弱点. 具体试验结果如表3所示.

表3 第一次试验记录
Tab.3 The first test record

试验明细	试验记录
电动机型号	立式同步电动机 三站4#机组:额定电压6 kV,额定功率1 600 kW.
使用设备	局部放电综合分析仪TWPD-2C、校准脉冲发射器TWPD-02、连接电缆若干条、输入适配器、光纤若干条、电转换放大器、局部放电定位探测器(未改进)、操作箱、变压器和千伏表.
试验方法	首先采用定相试验,找出放电量大的绕组相;其次进行定位试验,利用电信号定向传感器接收局放电场信号,同时利用超声探头接收局放超声波信号,将电声信号经放大处理后,通过光纤传输到TWPD系列局放分析仪,完成对电、声信号幅值和时差变化的分析,确定放电部位的三维空间位置.
试验结果	利用现有组合探测器只能初步实现对高压电动机定子绕组的局部放电定位.
存在问题	现有组合探测器端部传感器部分直径偏大,定位精度不高.

4.2 第二次试验

第二次试验采用了新型定位探测器,分别对江都三站4#机组、9#机组和四站4#机组进行试验. 试验时间为2013年12月20日,具体试验结果如表4所示.

表4 第二次试验记录
Tab.4 The second test record

试验明细	试验记录
电动机型号	立式同步电动机 三站4#机组:额定电压6 kV 额定功率1 600 kW;三站9#机组:额定电压6 kV 额定功率1 600 kW;四站4#机组:额定电压6 kV 额定功率3 400 kW.
使用设备	局部放电测量系统一般由6个部分组成:测量仪器、耦合装置、校准装置、传输系统(光纤)、局部放电定位探测器和辅助装置. 测量仪器:局部放电综合分析仪1台,型号TWPD-2C.
试验方法	首先采用定相试验,找出放电量大的相绕组;其次用局部定位探测器进行定位试验,确定放电部位的三维空间位置.
试验结果	有效确定了各自绝缘薄弱点的位置.

图3为三站4#机组检测结果,其中q为放电量,u为交流电压. 从图3a中可以得出在相同的外加电压下,V相和W相的放电量基本相同,U相放电量在激励电压3 500~4 000 V时放电量上升,所以可以确定相较其他两相绕组,U相存在绝缘薄弱点的可能性更大. 从图3b定位试验中可以看出,放电最大处在各个电压下都比其他位置的放电量大,所以可以确定最大放电位置就是U相的绝缘薄弱点.

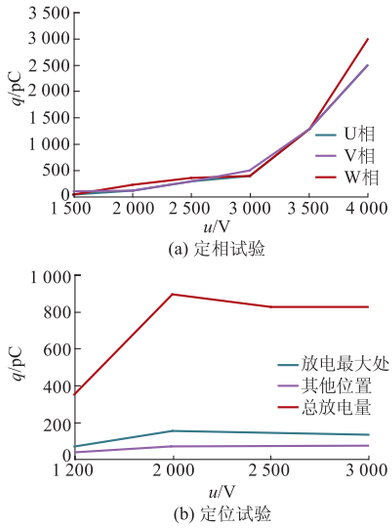


图3 三站4#机组试验结果
Fig.3 Test results of the third station 4# unit

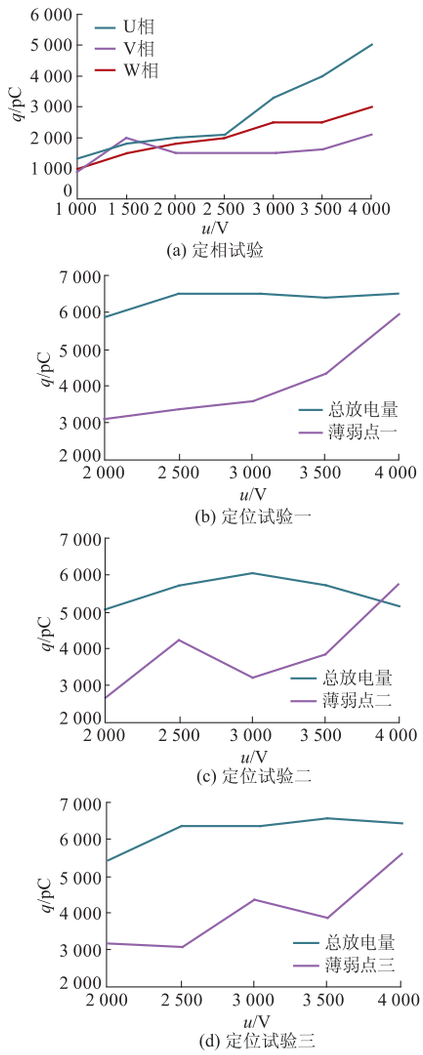
图4为三站9#机组检测结果. 从图4a中可以得出在相同的外加电压下,三相绕组的放大量都达到较高的数值,所以这三相绕组都存在一些绝缘薄弱点. 其中V相和W相的放电量都在3 000 pC之下,U相放电量在激励电压3 500~4 000 V时放电量达到4 000~5 000 pC,所以可以确定相较其他两相绕组,U相存在绝缘薄弱点的可能性更大.

定位试验数据如图4b,c,d所示,这3组数据都是测量U相绕组所得. 从这3组图中可以看出放电最大处都在3 000 pC之上,且都快接近最大放电量,所以这3个最大放电处就是U相的绝缘薄弱处.

在检测过程中,根据电动机定子绕组线圈几种不同放电量值和不同放电类型分别进行了标记,并且记录了电磁波、超声波信号和视在放电量之间的关联关系,并分别标记,如图5所示.

在实际应用过程中对于存在问题的一个电动机定子绕组线圈进行了检测,根据视在放电量与电磁波信号的对应关系,发现了一处典型缺陷,如图6

所示.



(a) 定相试验
(b) 定位试验一
(c) 定位试验二
(d) 定位试验三

图 4　三站 9#机组试验结果

Fig. 4　Test results of the third station 9# unit

图 5　电动机定子绕组线圈

Fig. 5　Site breakdown point mark

图 7 为四站 4#机组检测结果. 从图 7a 中可以得出在相同的外加电压下,V 相和 U 相的放电量基本相同,W 相放电量在激励电压 3 000 ~ 3 500 V 时放电量达到 6 000 ~ 7 000 pC,所以可以确定相较其他两相绕组,W 相存在绝缘薄弱点的可能性更大. 从图 7b 的定位试验中可以看出,在外加电压 3 000 ~ 4 000 V 时,放电最大处的放电量为 1 500 ~ 2 000 pC,所以可以确定最大放电位置就是 W 相的绝缘薄弱点.

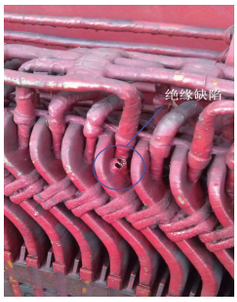
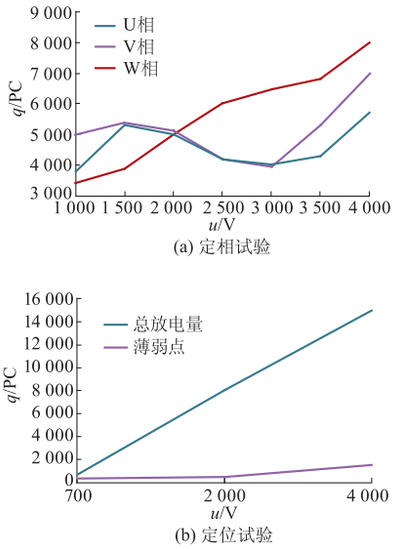


图 6　定子绕组绝缘缺陷点

Fig. 6　Stator winding insulation defects point



(a) 定相试验
(b) 定位试验

图 7　四站 4#机组试验结果

Fig. 7　Test results of the fourth station 4# unit

4.3　检测结果分析

从探测试验结果可知,手持式局部放电探测仪能准确地定位到定子端部的绝缘薄弱点位置,从而能采取有效的措施来弥补绝缘薄弱处,降低电动机因绝缘故障而出现问题的概率,利用手持式局部放电探测仪定位电动机定子绝缘薄弱点的方法可行,具有推广价值.

电动机绝缘损坏的恢复,必须进行大修. 按目前行情,1 台主机组大修费用在 23 ~ 40 万元,主机定子根据损坏程度修复费用在 10 ~ 55 万元. 平均计算,1 台主机组大修费用为 30 万元,电动机绝缘修复费用为 30 万元,共需 960 万元. 如能及时、准确发现电动机绝缘缺陷及其位置,并及时处理,可阻止故障扩大,大大减少维修费用. 按节省 80% 费用计

算,可节省费用768万元,平均每年节省32万元.江都抽水站装机容量6.58万kW,全国省级水利系统大型水泵装机容量4 100万kW,按此装机容量故障比例计算,全国每年至少可减少1.99亿元的维修费用.

5 结 论

通过高压电动机定子绕组绝缘薄弱点的定位试验,及时掌握主电动机绕组的绝缘状况及性能,对定子绕组绝缘的薄弱点进行准确定位,可以避免发生严重的绝缘故障,节省大量检修费用和检修工作量,对今后泵站运行管理将起到积极推动作用.

水利行业内尚有一部分泵站主机组已超期服役,仍带"病"坚持运行,针对绝缘开始劣化的机组,应加强维修养护工作,组织对这部分高压电动机定子绕组绝缘薄弱点的定位试验,以确保机组安全运行和泵站效益的正常发挥.

参考文献(References)

[1] 王强,王开谟.同步电机绝缘老化修复技术研究[J].中国农村水利水电,2006(1):107-108.
WANG Qiang,WANG Kaimo. Study on the technology of insulation aging for synchronous motor[J]. China rural water and hydropower,2006(1):107-108.(in Chinese)

[2] AIHARA K, ADACHI M. Associative dynamics in a chaotic neural network [J]. Neural network,1997,10(1):83-98.

[3] CAO Zhitong, CHEN Hongping, EWEN Ritchie. Rotor fault diagnosis of induction motors based on a dynamic associative memory of chaotic neural network [C]//Proceedings of International Conference on Electrical Machines. Finland: Helsinki, 2000:863-867.

[4] 王绍禹,周得贵.大型发电动机绝缘的运行特性与试验[M].北京:水利电力出版社,1992:23-68.

[5] 储训,陈履.大型泵站建设和更新改造对策[M].南京:河海大学出版社,2000:21.

[6] KIM S D. Electrical and microstructure properties of large turbine generator stator insulations[C]. IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2004,1(1):478-481.

[7] 郝艳捧,王国利,闫波,等.大电动机定子线棒绝缘状态诊断的研究进展[J].高电压技术,2001,27(1):4-6.
HAO Yanpeng,WANG Guoli,YAN Bo,et al. The review of diagnosis of stator insulation in large electrical machine[J]. High voltage engineering,2001,27(1):4-6.(in Chinese)

[8] 张毅刚,郁惟镛,黄成军,等.发电机局部放电在线监测研究的现状与展望[J].高电压技术,2002,28(12):32-35.
ZHANG Yigang, YU Weiyong,HUANG Chengjun,et al. Research status of on-line partial discharge monitoring system for generators [J]. High voltage engineering,2002,28(12):32-35.(in Chinese)

[9] 舒乃秋,胡芳,周粲.超声传感技术在电气设备故障诊断中的应用[J].传感器技术,2003,22(5):1-4.
SHU Naiqiu , HU Fang , ZHOU Can. Application of ultrasonic transducer technology in fault diagnosis of electric equipment[J]. Journal of transducer technology,2003,22(5):1-4.(in Chinese)

(责任编辑 徐云峰)