

超声无损检测及其在电力绝缘子探伤中的应用

范兴明¹, 马世伟¹, 张鑫¹, 凌斯²

(1. 桂林电子科技大学电气工程及其自动化系, 广西 桂林 541004; 2. 浙江临高电气实业有限公司, 浙江 317004)

摘要: 论文论述了超声波检测在无损检测领域的应用特点, 以及超声无损检测在多个领域的应用情况。通过对超声波检测的原理、波型、连续性和显示方式的分析和对比, 重点论述了超声检测在电力系统绝缘子中的应用。介绍了超声绝缘子检测的机理、特点和适用范围, 并对各个方法的优缺点进行了对比。在此基础上阐述了超声检测的发展趋势, 对空气耦合超声和激光超声检测的方法、优缺点及应用前景进行了简单介绍, 为后续的深入研究打下基础。

关键词: 超声无损检测; 支柱绝缘子; 激光超声

中图分类号: TM216

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)03-0109-06

Application of Ultrasonic Non-destructive Testing to Power Insulator

FAN Xingming¹, MA Shiwei¹, ZHANG Xin¹, LING Si²

(1. Dep. of Electrical Engineering & Automation, Guilin University of Electronic and Technology, Guangxi Guilin 541004, China;

2. Zhejiang Lingao Electrical Industrial Co., Ltd., Zhejiang 317004, China)

Abstract: This paper discusses the application characteristics of ultrasonic testing in non-destructive detecting domain, as well as the applications of ultrasonic non-destructive testing in multiple areas. Emphases are placed on the application of ultrasonic testing to the insulators of power system through analysis and comparison of the ultrasonic testing principles, waveforms, continuity and display modes. The mechanism, characteristics and application scope of ultrasonic insulator detecting are introduced, and the merits and demerits of different methods are compared. Furthermore, the development trend of ultrasonic testing is predicted, and the advantages and disadvantages of the air coupling ultrasonic testing and the laser ultrasonic testing are simply introduced with their applications prospect.

Key words: ultrasonic non-destructive testing; supporting insulator; laser ultrasonic

0 引言

超声波探伤是工业无损检测中应用最为广泛的一种检测方法。就探伤而言, 超声波适用于各种尺寸的锻件、焊缝等机械零件的检测; 就检测物理性能而言, 用超声波可以检测材料厚度、强度和晶粒度等。超声检测几乎可以涉及到人们生活的各个领域, 如

在冶金行业中合金内部粗大化合物缺陷的检测^[1]; 建筑和道路工程中的混凝土厚度、强度等检测^[2-3]; 在非金属材料如石墨制品的品质^[4]、玻璃纤维的疲劳损伤裂纹判定等^[5-6]; 食品领域的肉质品等级评定^[7]; 在医学领域中人体器官的健康状况诊断^[8]等。

在国家电网中, 超声检测主要应用在支柱绝缘子表面及内部缺陷的判定和复合绝缘子粘接质量的评价方面。其中《72.5 kV 及以上电压等级支柱瓷绝缘子技术监督规定》中有明确规定, 在安装高压

收稿日期: 2013-11-11; 修回日期: 2013-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(51067002); 广西科学研究与技术开发项目(桂科重1348003-8); 广西制造系统与先进制造技术重点实验室主任课题(13-051-09-002Z)资助项目。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51067002), Guangxi Scientific Research and Technology Development Project (Gui Kezhong 1348003-8), Guangxi Key Laboratory of Manufacturing System and Advanced Manufacturing Technology Director Project(13-051-09-002Z).

支柱绝缘子前后必须要对其进行超声波检测,排除安装有安全隐患的绝缘子及确保安装环节中没有对高压支柱绝缘子造成新的损伤^[9]。该规定要求从投运之日起,3年为一个检测周期,3个检测周期后周期缩短为一年。根据电力公司对全国支柱瓷绝缘子运行统计来看,其运行10年后内部出现裂纹的几率会明显增加。

近年来,电力系统中的支柱绝缘子时常发生断裂,给电网的安全运行造成了严重影响,因其断裂引发的事故目前已成为电力系统中故障率的第一位^[10-12]。采用超声波检测变电站、发电厂及换流站中高压支柱绝缘子是目前应用最为广泛和有效的一种方法。其中以横波、小角度纵波和爬波法为超声检测在支柱绝缘子中常用方法。笔者详细介绍了这3种方法,经实测证明了其可靠性,对确保电网安全运行具有重要意义。

1 超声检测方法的分类

1.1 按超声探伤的连续性分类

超声波检测以其连续性可分为3类,即脉冲

波、连续波和调频波^[13]。其中以脉冲波应用最为广泛,原理是向工件中发射频率不变且不连续的超声波,根据回波在时间轴上的位置和幅值判断工件中缺陷的深度和大小。连续波则为发射频率不变连续的超声波,根据工件的回波强度变化判断工件中有无缺陷。该法不能确定缺陷位置,基本被淘汰,但在超声测厚中仍有应用。调频波是发射频率周期变化的连续波,根据发射波与反射波的差频变化判断工件中是否存在缺陷。该法只适用于检测与探测面平行的缺陷,基本被取代。

1.2 按波型分类

超声检测中主要应用到的波型见表1^[13],其中以纵波应用最为广泛,且在检测中的其余波型多为纵波以不同入射角度入射到界面处产生波型转换得到。在支柱绝缘子超声检测中,综合检测部位的探头可移动范围、表面粗糙度及波型的有效探测范围等因素,应用最多的是纵波和爬波两种波型。

1.3 按探伤原理分类

以超声探伤的原理分类,可分为以下4种方

表1 超声检测波型分类

Tab. 1 The wave type classification of ultrasonic testing

波型	简介	传播介质	适用场合
纵波	介质中质点振动方向与波的传播方向相互平行的波。	固、液、气体	广泛用于金属、非金属等材料的检测中。
横波	介质中质点振动方向与波的传播方向相互垂直的波。	固体	常用于焊缝、钢管检测。
爬波	又称表面下纵波,是以第一临界角入射到被测工件中从而产生的一种沿近表面传播的纵波。	固体近表面	用于金属和非金属材料的近表面缺陷。
表面波	当介质表面受到交变应力的作用时,会形成沿表面传播的一种纵波和横波叠加而成的合成波。	固体表面	适用于工件表面裂纹。
板波	在板厚与波长相当的薄板材料中传播的波。	薄板	适用于薄板和薄壁管裂纹、内分层等。

法。具体的分类及应用情况见表2。

目前超声检测中以反射法应用最为广泛,具体又可分为3种^[14],见表3。

3种方法中应用最多的是缺陷回波法^[16],其原理

见图1。当试件中无缺陷时,在显示屏中只有始波T和底面回波B;而当试件中存在缺陷时,在T和B之间则会出现一个缺陷波F,根据其在时间轴上位置和幅值可判断缺陷深度及大小。目前主流的超声检

表2 超声检测原理的4种方法

Tab. 2 Four methods of ultrasonic testing principle

检测方法	简介	优缺点	应用范围
反射法	根据超声反射回波在时间轴上的位置和幅值判断缺陷的深度、位置和当量等信息 ^[13] 。	灵敏度高,缺陷定位准确,但存在一定的盲区,容易漏检。	应用广泛,是目前主要的检测方法。
共振法	当工件厚度为超声波半波长整数倍时,相位相同的入射波与反射波会产生共振,根据共振点的时间间隔确定工件厚度 ^[14] 。	精度高,灵敏度可达0.1 mm,但对工件表面粗糙度要求较高。	常用作工件测厚,目前已经很少使用。
透射法	将一发一收两探头置于工件两侧,根据所接收声波能量的大小确定内部是否有缺陷 ^[13] 。	设备简单,检测速度快,无盲区;但无法确定缺陷位置。	适合检测薄壁工件。
衍射时差法	当工件中超声纵波遇到缺陷时,纵波会在缺陷端部产生近似球面波或柱面波的衍射波,根据两端面反射波时间差判断缺陷大小 ^[15] 。	缺陷定量不受声束角、表面状态等因素影响,但表面附近存在盲区,无法判断缺陷性质。	适用于金属检测,已在压力容器、锅炉和管道等方面展开了广泛应用。

表 3 3 种超声反射法简介

Tab. 3 The introduction of three kinds of ultrasonic reflection method

反射法	方法简介	优缺点	适用范围
缺陷回波法	若工件中存在缺陷,则超声头波与底波之间会出现缺陷波。根据缺陷波在时间轴上的声程和幅值,判断缺陷深度和大小。	灵敏度高,缺陷定位准确。	主要的探伤手段。
底波高度法	当被测物厚度不变时,底波的高度基本不变。根据反射回波的底波幅值是否下降或者消失,来判断被测物中是否存在缺陷。	缺陷定位困难,灵敏度低。	用做辅助手段,可发现倾斜和小而密的缺陷
多次底波法	被测物厚度较小时,声波在探测面与底面之间往复多次,形成多次底波。根据回波次数和衰减情况判断工件是否有缺陷。	定位困难,灵敏度低。	适用于厚度不大,探测面与底面平行的试件。

测方法都是以缺陷反射回波法为基础发展起来的。

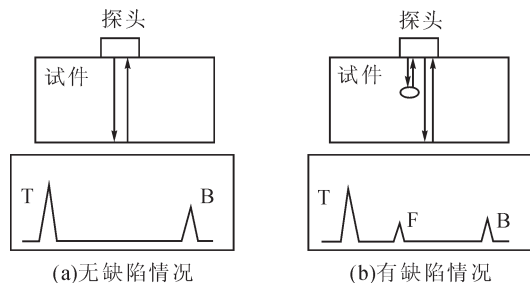


图 1 缺陷反射法原理图

Fig. 1 The diagram of flaw echo method principle

衍射时差法(time of flight diffraction, TOFD)是最近发展起来的一种新的检测方法,文[17]对该方法做了详细介绍,其检测原理图见图 2。从 20 世纪 90 年代开始,该技术在国内外已被广泛应用于石油、化工、核电等工程中的金属检测。中国于 2003 年将该技术引入,目前已在水电站和压力容器等工程中广泛使用。

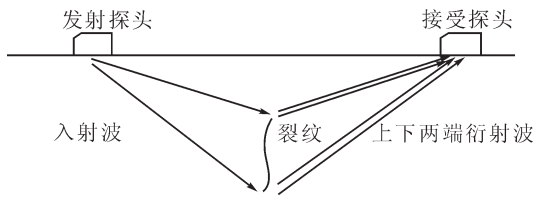


图 2 TOFD 检测原理示意图

Fig. 2 The diagram of TOFD detection principle

1.4 按缺陷显示方式分类

探伤按照显示方式可为 3 种类型^[18]:A 型为一种波型显示,横坐标表示声波传播时间,纵坐标表示反射波幅度,由反射波在时间轴上的位置和幅值估算缺陷的深度和大小;B 型为一种图像显示,探头发射超声声束在水平方向上快速电子扫描,逐次获得其不同位置的深度方向上的反射回波,当一帧扫描完成,便可得到一幅垂直平面二维超声断层图像,该法又称之为线扫描断层图像法;C 型为一种图像显示,横纵坐标靠机械扫描来代表探头在被测工件表面的位置,换能器接收的信号幅值以光点辉度表示。屏幕上的显示为工件内部缺陷的平面图,因此不能显示缺陷的深度。

2 支柱绝缘子检测的研究与应用

绝缘子是在高温下烧结而成的无机电瓷材料,在其表面覆有一薄层釉,拉伸下不会出现塑性形变,但极易在弹性形变后出现脆性断裂。经电力公司统计,95%的支柱绝缘子断裂发生在法兰口部位^[19](外露约 10 mm 至铸铁法兰内约 20 mm)。该部位由陶瓷、水泥和金具紧密粘接在一起,受力较大且 3 种材料的膨胀和导热系数不同,所以极易发生断裂。据美国西屋试验室 Clark 和 Logsdon 的研究证明^[20],绝缘子等陶瓷材料的最小临界裂纹尺寸为 5 mm,2.5 MHz 的纵波灵敏度为 1.2 mm,满足裂纹检出要求,这就为超声检测绝缘子提供了理论依据。超声检测支柱绝缘子原理^[21]见图 3,左端垂直虚线处为被检测区域。

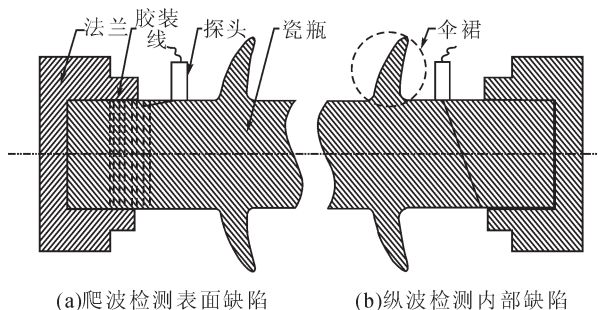


图 3 支柱绝缘子超声检测示意图

Fig. 3 The schematic diagram of ultrasonic detection of post insulator

2.1 横波探测法

利用有机玻璃楔块,使纵波倾斜射至界面,当入射角在第一临界角与第二临界角之间时,在被检测材料中就会获得单一折射的横波。横波在绝缘子中声速小,与同频率纵波相比波长小,因此检测灵敏度高^[22]。支柱瓷绝缘子铸铁法兰和最近伞盘之间的距离经测量可知:无角度的绝缘子一般为 20~40 mm,有角度的绝缘子为 40~80 mm 之间。文[22]通过计算可知,横波探伤方法不能检测有角度的绝缘子;对无角度的绝缘子,横波探头基本不能探测到铸铁法兰附近及外露区域,所以横波不适用检测此类支柱瓷绝缘子。同时由于横

波波长小,在屏幕上杂波较多,判断缺陷波时间长,因此瓷瓶探伤中不常使用横波法。该法主要应用于绝缘瓷套和特种设备行业中焊接头和管材的检测。

2.2 纵波检测法

纵波检测可分为直射法和小角度纵波法。直射法是纵波探头以 0° 入射角对绝缘子进行检测,其折射角为零,在绝缘子内部不发生波型转换^[20],其检测原理见图4。该法优点是对内部空隙、气孔等体积型缺陷较敏感,但对人们最为关心的线性缺陷如裂纹等不是很敏感,尤其是当裂纹与检测波成一定角度时易漏检。该法应用于瓷体未安装铸铁法兰前,从两端对其进行轴向检测,排除有安全隐患的绝缘子进入电网。

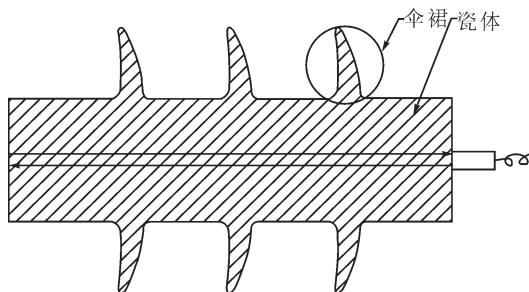


图4 直探头检测绝缘子原理图

Fig. 4 The straight probe detection principle diagram of insulator

小角度纵波斜入射法是指在第二介质中折射角小于 15° 的纵波^[23]。最近几年,中国华东地区和青海省等电网开始采用该方法对绝缘子进行超声检测,实用效果较好^[20]。他们设计了不同曲率的凹型接触面探头,更好地改善了耦合条件。该方法可对绝缘子铸铁法兰附近外漏区域和法兰口内部孔隙、微裂纹和表面裂纹等缺陷进行检测。由于小角度纵波探头尺寸小,纵波一次声程前没有横波干扰,因此可以用于检测爬波探头无法放置的绝缘子。文[23]通过实验得知,该法在探伤时,若裂纹深度不大,易受瓷瓶表面砂粒影响,识别回波比较困难,易漏检和误判,检测有效性有所降低。通过研究可得纵波入射角在 $5^\circ \sim 8^\circ$ 之间时,不同直径、不同配方及不同晶粒度等因素对探伤灵敏度影响较小^[19]。

2.3 爬波检测法

爬波是折射角为 90° 的压缩纵波,当入射角 $\alpha = \arcsin(C_{1L}/C_{2L})$ 时,纵波的折射角等于 90° ,此时就会在第2种介质中激发出沿近表面传播的爬波^[24],爬波的产生和其声场特性见图5。

图5(a)中的 α_1 为第一临界角, β_1 为横波折射角,

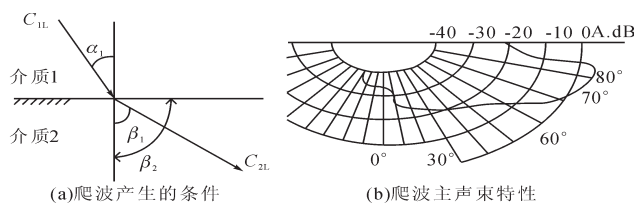


图5 爬波的产生和声束特性

Fig. 5 Climb wave produce conditions and the main beam characteristics

β_2 为纵波折射角。图5(b)中的指向即为爬波声束方向,其有效检测深度约为15 mm,因此无法检测绝缘子内部及瓷套内壁。爬波在传播过程中伴随有横波的转换,其声压会随着距离的增大而急剧衰减,在绝缘子中理论有效声程为45 mm^[24]。爬波对工件表面的状况不敏感,不易受到该处瓷砂、胶装水泥等表面粗糙物的影响^[25]。

国内绝缘子制造厂家和变电站有利用传统串联式爬波法对瓷绝缘子进行超声检测的报道。支柱绝缘子被测区域的特点是水平跨距小,有砂层覆盖,而串联式爬波探头所需最小跨距至少为20 mm,体积较大。因此该方法有效耦合性较差,往往得不到稳定的缺陷回波信号^[20]。

目前,东北和华东等电网已经开始采用微型并联式爬波探头对支柱瓷绝缘子表面进行质量检测,它解决了串联爬波法探头无法放置的问题,并且同样依据绝缘子曲率设计了与之相吻合的凹型接触面,耦合效果较好。虽然爬波只能对其表面和近表面检测,但由于在检测时,屏幕上仅有缺陷波的显示,无底波和内部缺陷干扰波,因此检测速度快^[20]。爬波检测时会产生横波,但其声速仅为爬波的一半,回波信号在时基线上的位置明显滞后,所以不会对检测产生干扰^[19]。

文[23]通过对变电站300多根支柱绝缘子实测,验证了小角度纵波及爬波检测方法的有效性,研究了检测距离、裂纹深度及裂纹回波高度之间的影响关系,以及瓷砂对两种检测方法的影响。国内绝缘子断裂的特点是裂纹往往从表面开始,然后逐渐向内部发展。所以结合两种主要检测方法的优缺点,笔者认为在停电检修时,首先利用爬波对绝缘子表面进行快速扫描,如果发现可疑缺陷,再利用小角度纵波法进一步确认,这样既可以节省检测时间,又可以提高检出率。以上几种探伤方法的共同点是都需要有耦合剂才能实现有效检测,无法满足实时在线检测的要求,下面介绍两种无需耦合剂的超声探伤方法。

3 支柱绝缘子检测的新技术和发展方向

3.1 空气耦合超声波技术

随着工业水平的提高,人们对电网的稳定和持续运行提出了更高要求,应当避免长时间的断网检修。因此,实时的在线监测系统就显得格外重要。然而目前的检测方法都需要人工涂抹耦合剂才能有效检测,但在线的监测系统无人员操作,所以很难做到这一点。因此在线监测的关键在于空气耦合超声波换能器的研制。文[26-27]针对非接触超声无损检测技术原理及提高检测能力的途径做了相应的介绍。

空气耦合优点是无需耦合剂、非接触、可快速扫描和易实现波形的模式转换等。其缺点也较为明显,由于空气对高频超声波段的高吸收损耗和气、固分界处的巨大声阻抗差异造成的反射损耗,主要有转换效率低、信号的衰减很大、作用距离短等缺点,并且实现空耦检测对系统的技术要求也很高。到目前为止,已经有相关应用产品面世,因此空耦技术有望应用在电网支柱绝缘子在线检测系统中。

3.2 激光超声波无损探伤技术

激光超声技术是超声检测的另一个新的方向,原理是用受调制的高能量激光脉冲照射被测材料表面,使固体表面产生热特性区,小热层会在材料内部向四周热扩散产生热应力,通过这种热应力激励出超声波,并利用多普勒效应原理等光学方法接收超声波的一种新型无损检测方法^[28]。其接收方法又分为3种:外差法、自差法和共焦球面布里—珀罗干涉法。利用布里—珀罗干涉仪接收超声的方法抗干扰能力较强,属于速度干涉法,适用于工件表面超声振动的探测,文[29]对其原理做了详细介绍。但此干涉仪结构复杂,加工精度要求高,且调焦困难,尤其对腔长和工作点的控制更为困难。

激光超声检测优点是无需耦合剂,不需要精确地控制表面和换能器之间的角度,检测点很小,适用于非接触检测形状复杂或尺寸较小的工件。其缺点是超声接收系统复杂、灵敏度低、体积庞大、造价昂贵,且需要严格的激光防护措施^[30]。

激光超声技术的应用,使超声检测的应用范围大大拓宽,如应用超声表面波可以进行表面微裂纹检测。激光超声是国内外研究最活跃的非接触超声换能方法之一,它具有时间与空间上的高分辨力,适用于检测尺寸较小、结构复杂的复合材料以及材料的高温特性等^[31]。国外该技术主要应用在航空工业中,如大曲面复合材料及涂层的监测与控制,以

及飞机各个结构件的检测等^[32]。目前国内该技术还处于研究阶段。

4 结语

目前,电网支柱绝缘子的超声波检测主要有小角度纵波和并联爬波两种方法,结合两种方法的优缺点,可以实现对绝缘子的全面检测。采用上述方法的共同点是都需要在断网的情况下检测,且维护人员的工作量巨大。因此,能够实时的对支柱绝缘子运行状态的在线检测是智能电网的重点发展方向。目前还未见超声在线检测系统应用于绝缘子的报道,主要原因在于目前的方法中所使用的超声探头都需要涂抹耦合剂,因此上述两种都无法在线检测中使用。而空气耦合超声检测和激光超声检测这两种方法恰恰可以克服上述缺点,是目前超声研究领域两个重点发展方向,文中对这两种方法的原理和优缺点做了简单的介绍。如何将这两种方法应用于在线超声支柱绝缘子检测中,还有很多待研究的问题。开展这方面前沿技术的研究,对提高中国无损检测水平具有重要的理论和工程价值。

参考文献:

- [1] 张晓霞. 变形铝合金产品粗大金属间化合物缺陷超声波探伤[J]. 无损探伤, 2011, 35(5): 46-48.
ZHANG Xiaoxia. The flaw detection of thick intermetallic compound in wrought distortion products by ultrasonic[J]. Nondestructive Inspection, 2011, 35(5): 46-48.
- [2] 刘其伟, 程跃辉, 王键, 等. 超声波无损检测的特点分析及其在混凝土缺陷评定中的应用[J]. 华东公路, 2003, 4(4): 58-60.
LIU Qiwei, CHENG Yuhui, WANG Jian, et al. Analysis of the characteristics of ultrasonic non-destruction detection and in the application of concrete defects[J]. East China Highway, 2003, 4(4): 58-60.
- [3] 薛晶, 薛莉, 马会良. 超声波技术在道路测试中的应用[J]. 黑龙江工程学院学报, 2005, 19(2): 8-10.
XUE Jing, XUE Li, MA Huiliang. Application of ultrasonic technology in the road-test field[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2005, 19(2): 8-10.
- [4] 李平, 陈锐, 李婉秋. 石墨制品的超声波无损检测技术[J]. 炭素, 1997(4): 32-36.
LI Ping, CHEN Rui, LI Wanqiu. Supersonic nondestructive examination technique for graphite products[J]. Carbon, 1997(4): 32-36.
- [5] MOURITZ A P, TOWNSEND C, SHAH K Z. Non-destructive detection of fatigue damage in thick composites by pulse-echo ultrasonics[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(1): 23-32.

- [6] WISHEART M, RICHARDSON M W. Low velocity response of a complex geometry pultruded glass/polyester composite[J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(5): 1107-1116.
- [7] 胡晓亮, 刘宝林, 周国燕. 猪肉品质的超声波无损检测实验研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2011, 28(4): 819-822.
HU Xiaoliang, LIU Baolin, ZHOU Guoyan. Experimental study of non-traumatic ultrasonic testing for pork quality[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2011, 28(4): 819-822.
- [8] 林书玉, 杨月花. 医学超声治疗技术研究及其应用[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2004, 32(2): 117-122.
LIN Shuyu, YANG Yuehua. Medical ultrasonic therapy and its applications[J]. Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition, 2004, 32(2): 117-122.
- [9] 72.5 kV 及以上电压等级支柱瓷绝缘子技术监督规定[S]. 北京: 国家电网公司, 2005.
Technical supervision regulation of 72.5 kV and above strut porcelain insulator voltage grade[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2005.
- [10] 艾川, 吴章勤, 赵永强, 等. 电网支柱式瓷绝缘子检验方法[J]. 云南电力技术, 2007, 35(1): 18-19.
AI Chuan, WU Zhangqin, ZHAO Yongqiang, et al. Study on the method for checking porcelain post insulators of power grid[J]. Yunnan Electric Power, 2007, 35(1): 18-19.
- [11] 李西育, 党镇平. 特高压支柱瓷绝缘子弯曲强度可靠性分析[J]. 电瓷避雷器, 2013(2): 17-23.
LI Xiyu, DANG Zhenping. Bending strength reliability analysis of the post porcelain insulator for UHV[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(2): 17-23.
- [12] 黄军凯, 曾华荣, 杨佳鹏, 等. 红外热像技术在低零值绝缘子检测中的应用[J]. 电瓷避雷器, 2013(2): 40-44.
HUANG Junkai, ZENG Huarong, YANG Jiapeng, et al. Application of infrared thermal imaging technology to detection of low and zero resistance insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(2): 40-44.
- [13] 蒋云, 王维东, 蔡红生, 等. 支柱瓷绝缘子及瓷套超声波检测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
JIANG Yun, WANG Weidong, CAI Hongsheng, et al. Ultrasonic testing of porcelain post insulators and bushing[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [14] 徐开兴. 高频超声共振法测厚[J]. 应用声学, 1991, 10(6): 42.
XU Kaixing. High frequency ultrasonic thickness resonance method[J]. Applied Acoustics, 1991, 10(6): 42.
- [15] 梁玉梅, 王琳, 王彦启. 超声 TOFD 检测原理探析[J]. 无损检测, 2010, 32(7): 533-538.
LIANG Yumei, WANG Lin, WANG Yanqi. The principle analysis of ultrasonic TOFD[J]. Nondestructive Testing, 2010, 32(7): 533-538.
- [16] 郑晖, 林树青. 超声检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008.
ZHENG Hui, LIN Shuqing. Ultrasonic testing[M]. Beijing: China's Labor Social Security Press, 2008.
- [17] 史俊伟, 刘松平. 浅谈超声衍射时差法(TOFD)检测技术[J]. 航空制造技术, 2009(z1): 96-100.
SHI Junwei, LIU Songping. Ultrasonic TOFD technology for detection[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(z1): 96-100.
- [18] 宋黎明. 数字超声波探伤扫描技术在锅炉检测中的应用[J]. 金属材料与冶金工程, 2011, 39(2): 40-43.
SONG Liming. Application of digital ultrasonic nondestructive inspection scanning technique in the detection of the boiler[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2011, 39(2): 40-43.
- [19] 王维东, 刘勇. 支柱绝缘子及瓷套超声波探伤工艺方法研究[J]. 无损检测, 2006, 28(9): 460-462.
WANG Weidong, LIU Yong. Research on ultrasonic inspection technique of pillar insulators and porcelain cover[J]. Nondestructive Testing, 2006, 28(9): 460-462.
- [20] 王立新, 卫志刚, 孙丙新, 等. 变电站支柱瓷绝缘子超声波检测工艺方法的选择和试验分析[J]. 无损检测, 2006, 28(12): 636-640.
WANG Lixin, WEI Zhigang, SUN Bingxin, et al. Selection and test analysis of ultrasonic testing technology of strut porcelain insulator[J]. Nondestructive Testing, 2006, 28(12): 636-640.
- [21] 蒋云, 王维东. 电网在役支柱瓷绝缘子及瓷套超声波检测技术[J]. 华东电力, 2010, 38(10): 1566-1569.
JIANG Yun, WANG Weidong. Ultrasonic detection technology for grid post porcelain insulator and porcelain bushing in service[J]. East China Electric Power, 2010, 38(10): 1566-1569.
- [22] 何喜梅, 丁辉. 支柱瓷绝缘子超声波检测研究[J]. 青海电力, 2003(1): 7-11.
HE Ximei, DING Hui. Study of strut porcelain insulator's ultrasonic detection[J]. Qinghai Electric Power, 2003(1): 7-11.
- [23] 李晓红, 王敏, 吴敏, 等. 支柱瓷绝缘子的超声检测有效性[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 159-163.
LI Xiaohong, WANG Min, WU Min, et al. Ultrasonic testing validity of porcelain post insulators[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(9): 159-163.
- [24] 江山, 霍立兴, 樊立国, 等. 表面及近表面裂纹的爬波无损检测[J]. 无损探伤, 2005, 29(3): 7-11.
JIANG Shan, HUO Lixing, FAN Liguang, et al. Crawl wave nondestructive testing of the surface and near surface crack[J]. Nondestructive Inspection, 2005, 29(3): 7-11.
- [25] 陈开路. 基于爬波的在役支柱绝缘子表面裂纹检测[J]. 福建电力与电工, 2005, 25(4): 29-31.
CHEN Kailu. Check and test for cracks on the surface of the running post insulators based on creep wave[J]. Fujian

(下转第 119 页)

- [7] 浦广益. Ansys Workbench 12 基础教程与实例详解[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.
- PU Guangyi. Ansys Workbench 12 basic tutorial [M]. Beijing:China Waterpower Press, 2010.
- [8] Ansys, Inc. Ansys verification manual[EB/OL]. <http://www.ansys.com>, 2013-11-06.
- [9] MEDINA S, NOWELL D, DINI D, et al. Analytical and numerical models for tangential stiffness of rough elastic contacts[J]. Tribology Letters, 2013, 49(1): 103-115.
- [10] 许京荆. Ansys13.0 Workbench 数值模拟技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.
- XU Jingjing. Ansys13.0 Workbench numerical simulation technology[M]. Beijing:China Waterpower Press, 2012.
- [11] 王福军, 王利萍, 程建钢, 等. 并行有限元计算中的接触算法[J]. 力学学报, 2007, 39(3): 422-427.
- WANG Fujun, WANG Liping, CHENG Jiangang, et al. A contact algorithm for parallel computation of FEM[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(3): 422-427.
- [12] GHORBANI M A, PASBANI K M, MOGHADDAM R M. Nonlinear analysis of shear wall using finite element model[J]. World Academy of Science, Engineering & Technology, 2009(58): 427-431.
- [13] IMAOKA S. Contact analysis Tips[EB/OL]. http://ansys.net/Sheldon_tips, 2013-11-06.
- [14] SHARMA D S. Stress concentration around circular/elliptical/triangular cutouts in infinite composite plate[J]. Engineering Letters, 2012, 20(1): 1-6.
- [15] 戴涛, 杨林青, 匡同春. 整体式自力型铜钨触头质量分析[J]. 硬质合金, 2000, 7(2): 112-114.
- DAI Tao, YANG Linqing, KUANG Tongchun. Quality analysis of self-pressure by total CuW contact[J]. Cemented Carbide, 2000, 7(2): 112-114.
- [16] KHURI A I, MUKHOPADHYAY S. Response surface methodology[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2010, 2(2): 128-149.

张沛文(1982—), 男, 助理工程师, 学士, 从事 GIS 设计及工程应用方面的工作。

陈伯荣(1967—), 男, 高级工程师, 从事 GIS 开发及设计工作。

周庆清(1974—), 男, 高级工程师, 从事 GIS 开发及设计工作。

(上接第 114 页)

- Power and Electrical Engineering, 2005, 25(4): 29-31.
- [26] 夏利利, 杨文革, 董正宏. 非接触超声检测技术在航天无损检测中的研究与应用[J]. 装备指挥技术学院学报, 2007, 18(4): 58-62.
- XIA Lili, YANG Wenge, DONG Zhenghong. Applications and research on air-coupled ultrasonic technique for aerospace nondestructive testing[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2007, 18(4): 58-62.
- [27] 董正宏, 王元钦, 李静. 非接触空气耦合式超声检测技术研究及应用[J]. 无损探伤, 2007, 31(2): 1-6.
- DONG Zhenghong, WANG Yuanqin, LI Jing. Applications and research on air-coupled ultrasonic technique[J]. Nondestructive Inspection, 2007, 31(2): 1-6.
- [28] 杜丽婷, 刘松平. 激光超声检测技术[J]. 无损探伤, 2011, 35(5): 1-4.
- DU Liting, LIU Songping. Laser ultrasound testing technology[J]. Nondestructive Inspection, 2011, 35(5): 1-4.
- [29] 尹向宝, 金永君. 基于共焦球面法布里-珀罗干涉仪的激光超声信号检测[J]. 无损检测, 2009, 31(7): 531-533.
- YIN Xiangbao, JIN Yongjun. Signal detection of laser ultrasound based on spherical confocal Fabry-Perot interferometer[J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(7): 531-533.
- [30] 曾宪林, 徐良法. 激光超声技术及其在无损检测中的应用[J]. 激光与红外, 2002, 32(4): 224-227.
- ZENG Xianlin, XU Liangfa. Laser ultrasonic technique and its applications in non-destructive testing[J]. Laser & Infrared, 2002, 32(4): 224-227.
- [31] MATSUMOTO T, NOSE T, NAGATA Y, et al. Measurement of high-temperature elastic properties of ceramics using a laser ultrasonic method[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2001, 84(7): 1521-1525.
- [32] MONCHALIN J B, CHOQUET M, PADIOLEAU C, et al. Laser ultrasonic system for on-line steel tube gauging[C]// AIP Conference Proceeding in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. America: [s.n.], 2003: 264-272.
- 范兴明(1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为智能化电器、高电压新技术。
- 马世伟(1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能化电器。
- 张鑫(1976—), 女, 讲师, 主要研究方向为智能化电器与智能控制技术。
- 凌斯(1972—), 男, 工程师, 主要从事高压开关及成套电器的设计开发工作。