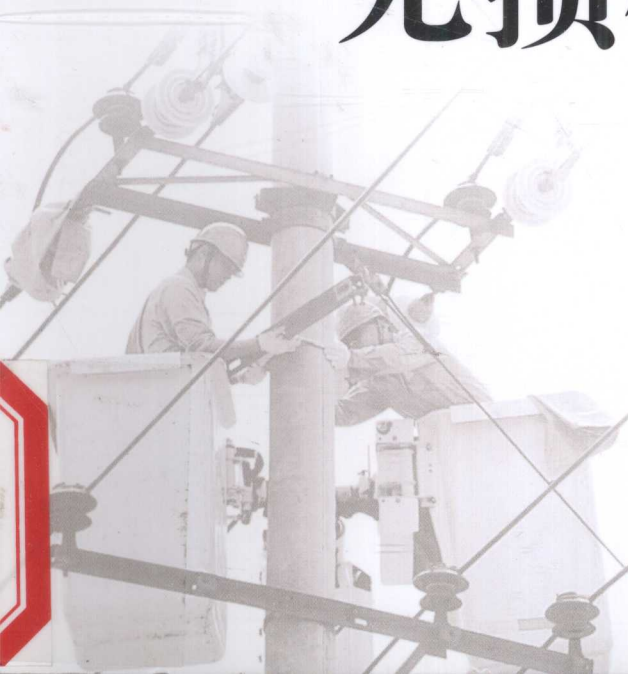




输变电设备 无损检测技术

蔡成良 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

输变电设备 无损检测技术

主编 蔡成良
参编 彭天波 刘桂梅 张 辉



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书紧密联系输变电设备生产和运行实际,全面介绍了输变电设备的无损检测技术。全书共分为六章,第一章简要介绍输变电设备无损检测基础知识;第二章主要介绍输电线路电磁无损检测;第三章主要介绍支柱瓷绝缘子和瓷套无损检测;第四章主要介绍金属结构无损检测;第五章主要介绍混凝土结构无损检测;第六章主要介绍输变电设备无损检测新技术。

本书可作为输变电企业、供电企业和电力试验研究院等单位的生产人员、安装调试人员和技术人员阅读使用,也可供相关技术管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

输变电设备无损检测技术/蔡成良主编. —北京:中国电力出版社, 2010.1

ISBN 978-7-5083-9609-5

I. 输… II. 蔡… III. ①输电-电气设备-无损检验
②变电所-电气设备-无损检验 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 195573 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 1 月第一版 2010 年 1 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 13 印张 226 千字

印数 0001—3000 册 定价 32.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

过去,电力系统无损检测主要是应用于发电厂的汽轮机、锅炉等设备金属部件的损伤检测,主要的检测方法有超声波检测、射线检测、磁粉检测等,电力系统通常所说的无损检测或无损探伤,即指以上这些。

随着科学技术的进步和电力生产的需要,原先应用于发电厂设备金属部件的无损检测方法也直接或间接地应用于电网的输变电设备的无损检测,同时也大量应用于电瓷材料等非金属材料的无损检测。

20世纪90年代,湖北省电力试验研究院在国内较早开展了支柱瓷绝缘子的超声波探伤工作。2000年前后,针对系统出现的多次支柱瓷绝缘子断裂事故,湖北省电力试验研究院在支柱瓷绝缘子断裂机理、防止断裂的措施、探伤方法和检测探头小型化(主要是研制并列式爬波探头)等方面进行了大量的试验研究工作和现场检测工作,取得了多项成果和良好的效果,并在湖北电力系统进行了推广工作;同时,根据华中电网公司要求,为华中电网五省一市电力公司的有关人员进行了支柱瓷绝缘子超声波探伤的技术培训。在为湖北电力系统进行技术服务的同时,湖北省电力试验研究院还为葛洲坝换流站、南桥换流站、龙泉换流站、荆州换流站、宜都换流站、惠州换流站、灵宝换流站等单位进行了大量的支柱瓷绝缘子超声波探伤工作。根据电力系统生产的实际需要,湖北省电力试验研究院在输电线路导地线、混凝土结构等缺陷的无损检测方面也进行了大量的试验研究工作,积累了丰富的经验。

本书主要是在上述输变电设备无损检测试验研究工作的基础上编写而成的,全书由蔡成良主编,参加编写工作的有湖北省电力试验研究院蔡成良、彭天波,南京大学张辉,南京卓实电气有限公司刘桂梅。其中,第一章~第三章由蔡成良编写,第四章和第五章由彭天波编写,第六章由刘桂梅、张辉和蔡成良共同编写。

华中科技大学康宜华教授审阅了全书,并提出了宝贵的修改意见。本书在编写过程中得到了湖北省电力公司科技信息部和湖北省电力试验研究院有关领导的大力支持,武汉慧测电力科技有限公司提供了有关支柱瓷绝缘子超声波带电检测方面的资料,写作过程中还参阅了国内有关单位和个人撰写的资料 and 文章,在此一并致谢。

限于作者水平,书中难免存在不妥或疏漏之处,恳请读者批评指正。

编者

2009年10月

目 录

前言

第一章 输变电设备无损检测基础知识	1
第一节 超声波检测.....	1
第二节 电磁检测	10
第二章 输电线路电磁无损检测	21
第一节 输电线路导线和地线检测方法概述	22
第二节 输电线路电涡流检测	26
第三节 输电线路漏磁检测	30
第四节 输电线路综合电磁检测数据采集系统	34
第五节 基于小波分析的缺陷识别	39
第三章 支柱瓷绝缘子和瓷套无损检测	50
第一节 支柱瓷绝缘子生产工艺和生产过程	50
第二节 支柱瓷绝缘子断裂原因	54
第三节 支柱瓷绝缘子和瓷套超声波探伤方法	66
第四章 金属结构无损检测	78
第一节 概述	78
第二节 金属结构缺陷分类、成因及危害	79
第三节 金属结构无损检测方法	92
第四节 金属结构安全控制.....	108
第五章 混凝土结构无损检测	110
第一节 概述.....	110
第二节 混凝土结构分类与监督管理.....	112
第三节 混凝土结构缺陷分类、成因及危害.....	115
第四节 混凝土结构无损检测理论和方法.....	132
第五节 混凝土结构安全控制.....	150
第六节 混凝土变电构架无损检测实例.....	157

第六章 输变电设备无损检测新技术	174
第一节 六氟化硫 (SF ₆) 泄漏的激光成像检测技术	174
第二节 支柱瓷绝缘子激光超声波检测技术.....	182
第三节 采用常规方法改进的支柱瓷绝缘子带电检测技术.....	191
第四节 电力设备紫外线检测技术.....	195
参考文献	199



第一章

输变电设备无损检测技术

输变电设备无损检测基础知识

运行中的输变电设备,不可避免地会发生各种故障,这些故障发生部件有的是金属材料,有的是非金属材料。在处理这些故障过程中,采取了一些破坏性和非破坏性的检测方法来判断设备的损坏程度。其中,采取的非破坏性检测方法就是无损检测。这些检测方法,如输电线路导地线的损伤检测、支柱瓷绝缘子的超声波探伤等,不同于以往电力系统通常进行的金属无损检测,而是将无损检测的对象扩大到了电力系统的非金属绝缘部件,并且随着技术的进步,对输变电设备进行带电无损检测,有的已经实行,有的即将实现。

输变电设备的无损检测,大都建立在常规无损检测基础之上,本章将对常规无损检测知识进行简单介绍,对相关的基本概念和相关的参考专著进行详细介绍。

第一节 超声波检测

一、振动与波动

振动是指物体在其平衡位置附近的来回做往复运动。波动分为机械波和电磁波两大类。机械振动是超声波产生的根源。

弹性介质中一个质点的振动就会引起邻近质点的振动,邻近质点的振动又会引起较远质点的振动,于是振动就由近及远地以一定的速度向各个方向传播开来,从而形成了机械波。

由此可见产生机械波必须具备以下两个条件。

- (1) 有作机械振动的物体,即波源。
- (2) 有传播机械振动的弹性介质。

注意:波动仅是振动状态的传播,介质的质点并不随波前进,各质点只是以交变的振动速度在各自的平衡位置附近做往复运动,如石子落水会在平静的水平

面激起波浪,这时水面上的木块只做上下浮动,并不随波前进。所以,波动只有能量的传播,没有物质的迁移。

二、超声波

人们日常听到的各种声音,都是声源的振动通过空气等弹性介质传播到耳膜,引起耳膜的振动,从而牵动听觉神经,产生听觉。引起听觉的声波频率 $f=20\sim 20\,000\text{Hz}$,振动频率低于 20Hz 的机械波称为次声波,振动频率高于 $20\,000\text{Hz}$ 的机械波称为超声波。

超声波探伤频率一般为 $0.5\sim 10\text{MHz}$,常用 $2\sim 5\text{MHz}$ 。

超声波之所以能用于探伤,是因为超声波具有以下一些重要特性。

(1) 良好的方向性。超声波频率高,波长短,具有可见光一样良好的方向性,能定向传播。利用超声波可在被检对象中进行有效地探测,以发现材料内部的缺陷。

(2) 超声波在介质中传播时,遇异质界面会产生反射、折射和波型转换。工件中缺陷表面就是一种异质界面,超声波入射到缺陷表面就会产生反射波。超声波反射法就是利用工件中缺陷反射波来判定工件内部的缺陷情况的。人们利用超声波在介质中传播时这些物理现象,经过巧妙地设计,使超声检测工作的灵活性、精确度得以大幅度提高。

(3) 超声波传播能量高,声压、声强高,超声检测的工作频率远高于声波的频率,超声波的能量远大于声波的能量。材料的声速、声衰减、声阻抗等特性携带有丰富的信息,成为广泛应用超声波的基础。

(4) 良好的穿透能力。超声波在介质中传播损失小,对于大多数介质而言,它具有较强的穿透能力。探测深度大,一般可达数米。

(5) 对人体无害。

1. 描述超声波的基本物理量

(1) 声速。声速是单位时间内,超声波在介质中传播的距离,用 c 表示,它是每秒钟超声波等相位面所通过的距离。

(2) 频率。频率是单位时间内,超声波在介质中任一给定点所通过完整波的个数,用 f 表示。

(3) 波长。声波在传播时,同一波线上相邻两个相位相同的质点之间的距离即为波长,用 λ 表示。

(4) 周期。声波向前传播一个波长距离时所需的时间称为周期,用符号 T 表示。

(5) 角频率。角频率以符号 ω 表示, 定义为 $\omega = 2\pi f$ 。

上述各量之间的关系为

$$T = 1/f = 1/2\pi\omega = \lambda/c$$

2. 描述超声场的物理量及介质的声参量

超声波存在的空间称为超声场。

(1) 声压 p 。超声场中某一点在某一瞬间所具有的压强 p_1 与没有超声场存在时同一点的静态压强 p_0 之差, 称为该点的声压, 用 p 表示。 $P = p_1 - p_0$, 单位为帕 [斯卡], 记作 Pa ($1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$)。

声压的幅值与介质的密度、波速和频率成正比。因为超声波的频率很高, 所以超声波的声压也很大。

(2) 声强 I 。在超声波传播的方向上, 单位时间内介质中单位面积上的声能叫声强, 常用 I 表示, 声强是一个矢量, 其方向为声能的传播方向, 声强的单位为 W/cm^2 。

当超声波传播到介质中某处时, 该处原来静止不动的质点开始振动, 因而具有动能。同时该处介质产生弹性变形, 因而也具有弹性位能, 其总能量为两者之和。

超声波的声强正比于质点振动位移振幅的平方, 正比于质点振动角频率的平方, 还正比于质点振动速度振幅的平方, 由于超声波的频率远大于可闻声波, 因此超声波的声强也远大于可闻声波的声强。这是超声波能用于探伤的重要原因。

(3) 分贝和奈培。声振动的能量范围很宽, 人耳对声振动的接收近似与声强的对数成正比, 声学中使用对数标度来度量声强和声压, 分贝与奈培就是两个同量纲的量之比取对数后的单位。

通常将引起听觉的最弱声强为 $I_1 = 10^{-16} \text{W/cm}^2$ 作为声强的标准, 另一声强 I_2 与标准声强 I_1 之比的常用对数称为声强级, 单位为贝尔 (BeL)。

$$\Delta = \lg I_2 / I_1 \quad \text{BeL}$$

实际应用贝尔太大, 故常取 1/10 贝尔即分贝 (dB) 来作单位, 即

$$\Delta = 10 \lg I_2 / I_1 = 20 \lg p_2 / p_1 \quad \text{dB} \quad (1-1)$$

(4) 声阻抗。声场中任一点的声压 p 与该点的质点的振动速度 v 之比叫声阻抗, 用 Z 表示, 单位: $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 或 $\text{kg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

$$Z = \frac{p}{v} \quad (1-2)$$

声阻抗表示声场中介质对质点振动的阻碍作用。在同一声压下, 介质的声阻

抗越大，质点的振动速度就越小。当超声波由一种介质传入另一种介质，或是从介质的界面上反射时，主要取决于这两种介质的声阻抗。

(5) 声速。声波在介质中传播的速度称为声速，用 c 表示。

在同一种介质中，不同类型的超声波，其传播速度也各不相同，超声波的声速还取决于介质的特性（如密度、弹性模量等）。

(6) 超声波的衰减。超声波在介质中传播时，随着传播距离的增加，能量逐渐减弱的现象叫做超声波的衰减。超声波的衰减有以下几种形式。

1) 扩散衰减。声波在介质中传播时，因其波前在逐渐扩展，从而导致声波能量逐渐减弱的现象叫做超声波的扩散衰减。它主要取决于波振面的几何形状，与传播介质无关。

2) 散射衰减。散射是物质的不均匀性产生的。不均匀材料含有声阻抗急剧变化的界面，在这两种物质的界面上，将产生声波的反射、折射和波形转换现象，必然导致声能的降低。

3) 吸收衰减。超声波在介质中传播时，由于介质点间的内摩擦和热传导引起的声波能量减弱的现象，叫做超声波的吸收衰减。介质质点间的内摩擦、热传导、材料中的位错运动、磁畴运动等都是导致吸收衰减的原因。

在固体介质中，吸收衰减相对于散射衰减几乎可以忽略不计，但对于液体介质来说，吸收衰减是主要的。

三、超声波的波形

超声波在介质中传播的波形主要取决于介质本身的固有特性和边界条件，根据介质中质点的振动方向与波的传播方向的关系，可以将波分为纵波、横波、表面波和板波等几种波形。

1. 纵波 L

介质中质点的振动方向与波的传播方向相同的波为纵波，用 L 表示。介质质点在交变拉压应力的作用下，质点之间产生相应的伸缩变形从而形成了纵波。

固体、液体和气体介质都可以传播纵波。纵波的产生和接收都比较容易，在超声波检测中得到了广泛地应用。

2. 横波 S

介质中质点的振动方向垂直于波的传播方向的波叫横波，用 S 表示。

横波的形成是由于介质质点受到交变切应力作用时，产生了切变形变，所以横波又称为切变波。液体和气体介质不能承受切应力，只有固体介质能够承受切应力，因而横波只能在固体介质中传播，不能在液体和气体介质中传播。

3. 表面波 R

当超声波在固体介质中传播时,对于有限介质而言,有一种沿介质表面传播的波称为表面波。1885年瑞利(Raleigh)首先对这种波给予理论上的说明,因此表面波也称为瑞利波,常用R表示。

超声波在介质表面以表面波的形式传播时,介质表面的质点做椭圆运动,椭圆的长轴垂直于波的传播方向,短轴平行于波的传播方向,介质质点的椭圆振动可视为纵波与横波的合成。表面波同横波一样只能在固体介质中传播,不能在液体和气体介质中传播。

4. 板波

在板厚和波长相当的弹性薄板中传播的超声波叫板波(或兰姆波)。板波传播时薄板的两表面和板中间的质点都在振动,声场遍及整个板的厚度。薄板两表面质点的振动为纵波和横波的组合,质点振动的轨迹为一个椭圆,在薄板的中间也有超声波传播。

板波按其传播方式又可分为对称型板波(S形)和非对称型(A形)板波两种。

(1) S形:薄板两面有纵波和横波成分组合的波传播,质点的振动轨迹为椭圆。薄板两面质点的振动相位相反,而薄板中部质点以纵波形式振动和传播。

(2) A形:薄板两面质点的振动相位相同,质点振动轨迹为椭圆,薄板中部的质点以横波形式振动和传播。

四、超声波在平面界面上的反射和折射

当超声波倾斜入射到不同介质的交界面时,超声波会产生传播方向的改变和能量的再分配,除产生同种类型的反射和折射波外,还会产生不同类型的反射和折射波,这种现象称为波型转换。

1. 斯涅耳定律

当纵波倾斜入射到固/固界面时,除产生反射纵波和折射纵波外,还会产生反射横波和折射横波。超声波在两种固态介质交界面上的反射和折射如图1-1所示,反射和折射关系如下

$$\frac{\sin \alpha_L}{c_{L1}} = \frac{\sin \gamma_L}{c_{L1}} = \frac{\sin \gamma_S}{c_{S1}} = \frac{\sin \beta_L}{c_{L2}} = \frac{\sin \beta_S}{c_{L2}} \quad (1-3)$$

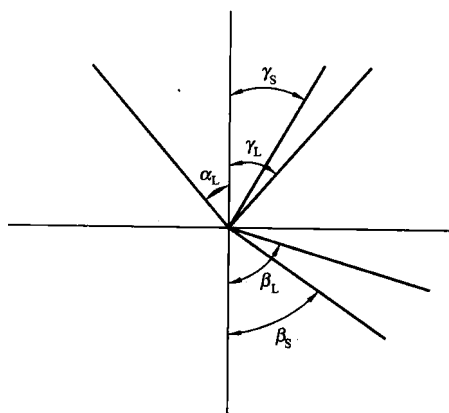


图1-1 超声波在两种固态介质交界面上的反射和折射

式中 α ——入射角；
 β ——折射角；
 γ ——反射角；
 L ——纵波；
 S ——横波。

2. 临界角（专指入射角）

(1) 第一临界角 α_I 。当 $c_{L2} > c_{L1}$ 时, $\beta_L > \alpha_L$, 随着 α_L 的增加, β_L 也增加, 当 α_L 增加到一定程度时, $\beta_L = 90^\circ$, 这时所对应的纵波入射角称为第一临界角, 用 α_I 表示

$$\alpha_I = \arcsin \frac{c_{L1}}{c_{L2}} \quad (1-4)$$

此时, 第二介质中将只存在折射横波。

(2) 第二临界角 α_{II} 。当 $c_{S2} > c_{L1}$ 时, $\beta_S > \alpha_L$, 随着 α_L 增加, β_S 也增加, 当 α_L 增加到一定程度时, $\beta_S = 90^\circ$, 这时所对应的纵波入射角称为第二临界角, 用 α_{II} 表示

$$\alpha_{II} = \arcsin \frac{c_{L1}}{c_{S2}} \quad (1-5)$$

当 $\alpha_L = \alpha_{II}$ 时, 第二介质中既无折射纵波, 又无折射横波, 这时在介质的表面将产生表面波。

(3) 第三临界角 α_{III} 。当超声波横波倾斜入射到界面时, 在第一介质中产生反射纵波和反射横波。横波倾斜入射时, 同样存在第一、第二临界角, 在实际探伤中无实际意义。由于在同一介质中, c_{L1} 恒大于 c_{S1} , 所以 α_L 恒大于 α_S 。随着 α_S 的增加, 当 $\alpha_L = 90^\circ$ 时, 介质中只存在反射横波, 即

$$\alpha_S = \alpha_{III} = \arcsin \frac{c_{S1}}{c_{L1}} \quad (1-6)$$

显而易见, 只有第一介质为固体时, 才会有第三临界角。当 $\alpha_S > \alpha_{III}$ 时, 第一介质中只有反射横波, 没有反射纵波, 即横波全反射。

各种临界角如图 1-2 所示。

3. 声压反射率与透射率

超声波反射、折射定律只讨论了各种反射波、折射波的方向问题, 未涉及声压反射率和透射率问题。

在斜入射情况下, 各种类型的反射波和折射波的声压反射率和透射率, 不仅与界面两侧介质的声阻抗有关, 而且还与入射波的类型以及入射角的大小有关, 其理论计算公式十分复杂。借助于由公式或实验得到的集中常见界面的声压反射率和透射率图来确定检测方案, 不失为一种方便、快捷之举。

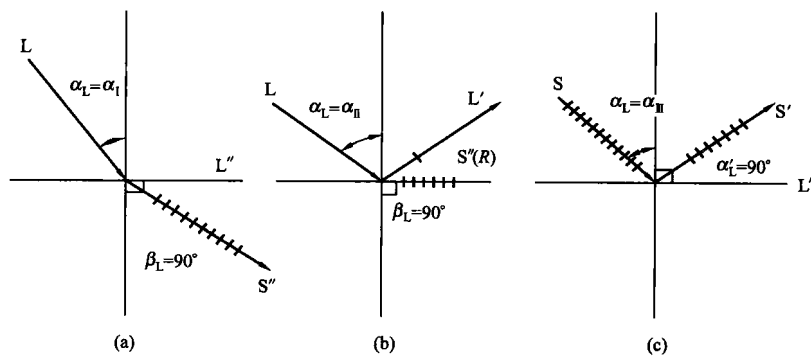


图 1-2 临界角

(a) α_I ; (b) α_{II} ; (c) α_{III}

4. 端角反射

超声波在两个平面构成的直角内的反射叫做端角反射。在端角反射中，同类型的反射波和入射波总是互相平行，方向相反；不同类型的反射波和入射波互不平行，且难以被发射探头接收。端角反射现象在工程实践中得到了广泛地应用。

五、声源的声场特性

声源的声场特性是指声场中的声压分布及其指向性。

在超声波检测中，超声波探头的主要部件是用压电材料做的压电晶片，在压电晶片的两个表面涂有导电银层作为电极，利用逆压电效应在交变电压的激励下是晶片振动，向周围介质辐射超声波，晶片的这种振动恰如活塞做往复运动一样，通常称之为活塞声源，将直探头所产生的超声场作为圆形活塞声源来处理。

六、超声波检测设备

超声波检测设备包括超声波检测仪器、检测探头、检测试块等。实际检测中，选择合适的仪器，和仪器匹配良好的探头，选择标准试块或自制与被检测对象的材质一样的试块，以及辅助工具和耦合介质等，是保证检测质量的重要因素。

1. 超声波检测仪器

超声波探伤仪有 A 型显示、B 型显示、C 型显示等类型。

A 型显示脉冲反射式超声波探伤主要由同步、时基、接收放大、显示、时标和电源等部分组成，应用最为广泛，其优点是结构简单、使用方便、适用面广、缺陷定位精度高、能确定缺陷的当量尺寸、灵敏度高，其缺点是难以判断缺陷的几何形状和缺乏直观性。

B型显示是一种可以显示出工件的某一纵断面的声像显示方法。C型显示是一种可以显示出工件的某一横断面的声像显示方法。C型显示是很直观的显示方法之一，它同时采用高分辨力探头，主要用于要求较高的工件的检测。

2. 超声波检测探头

超声波检测中用的超声探头即压电超声换能器，是以压电效应为工作原理的超声波探头。超声波检测探头是超声波检测设备的重要组成部分。

通常，超声波探头既可以发射，又可以接收。发射时，发射电路产生的电脉冲加到压电晶片上，晶片产生逆压电效应，将电能转换成声能（机械能），从而向外发射超声波。反之，接收时，晶片产生正压电效应，将声能（机械能）转换成电能，声信号转换成为电信号，并被送入接收、放大电路并在荧光屏上进行显示。

超声波探头的种类繁多，可分为如下几类。

(1) 根据波形分为直探头（纵波探头）、斜探头（横波探头）、表面波探头和板波探头。

(2) 根据接触方式可分为直接接触探头和水浸探头。

(3) 一般常用的探头主要有纵波探头和横波探头，探头的性能指标主要有频率、检测灵敏度和分辨力。

3. 超声波检测试块

超声波检测试块通常是只具有简单几何形状的人工反射体的试件。探头仪器、探头都是超声波探伤的重要工具。

超声波检测试块的主要作用是校验仪器和探头的性能，确定检测灵敏度和缺陷的大小，调整探测范围和确定缺陷位置，测量材料的声学特性。

超声波检测试块主要分为两种：标准试块（缩写 STB）和参考试块（也叫对比试块，缩写 RB）。标准试块是标准机构制定和检定的试块，参考试块是根据检测对象的具体要求而设计制作的试块，参考试块和标准试块所起的作用是一致的。

七、超声波检测方法

超声波探伤方法是无损检测中最重要的手段，超声波探伤的方法很多，分类的方法也各不相同。下面就按原理分类进行简要说明，超声波探伤方法按原理可分为共振法、穿透法和脉冲反射法。

1. 共振法

根据驻波理论，当被检测物体的厚度为声波半波长的整数倍时，产生共振。

利用声波在物体的相对表面上反射,发生同相位叠加的共振现象进行检测的方法,称为共振法。

利用超声波的谐振特性在试件中形成驻波,可以测定试件的厚度,在测得超声波的频率和共振次数后,由下式计算试件的厚度 δ

$$\delta = n \frac{\lambda}{2} = \frac{nc}{2f} \quad (1-7)$$

式中 δ ——试件厚度;

c ——超声波在试件中的传播速度;

λ ——超声波波长;

f ——超声波的频率;

n ——共振次数(半波长的整数倍)。

由于测量精确,共振法常用于壁厚的测量。此外,当工件中存在较大缺陷或其厚度改变时,将导致共振现象消失或共振点的偏移,利用次现象可以检测复合材料的胶合质量、板材点焊质量、均匀腐蚀和金属板材内部夹层缺陷等。

2. 穿透法

穿透法又叫透射法,是最早采用的一种超声波检测方法。

穿透法是根据超声波穿透试件后的能量变化情况来判断试件内部缺陷情况的方法。穿透法探伤可采用连续波和脉冲波两种不同的方式。

检测时,将发射探头和接收探头分别置于试件的两个相对面上,如试件内没有缺陷,超声波穿透后衰减小,接收信号就较强;如试件内有小缺陷存在,超声波部分被缺陷遮挡,使之在缺陷后形成阴影,接收探头只能受到较弱的信号;若试件中缺陷面积大于声束截面时,声束被缺陷全部遮挡,接收探头则收不到发射信号。

穿透法的优点为在试件中不存在盲区,与缺陷取向无关,在试件中超声波只做单声程传播。因此,穿透法便于自动探伤,适宜进行薄壁工件的检测和高衰减材料的检测。

穿透法的主要缺点是只能判断缺陷的有无和大小,而不能确定缺陷的深度位置,探测灵敏度低,对发射探头和接收探头的相对位置要求严格。

3. 脉冲反射法

脉冲反射法是应用最广泛的一种超声波检测方法。在实际检测中,最常用的是直接接触脉冲反射法,该方法按波型可分为纵波法、横波法、表面波法、板波法。

脉冲反射法是利用超声波脉冲入射到不同的两种介质界面时,发生反射的原

理进行检测的方法。采用一个探头兼做发射和接收,接收信号在探伤仪的屏幕上显示,根据屏幕上显示出的缺陷及底面反射波的情况来判断缺陷的有无、大小及其位置。

脉冲反射法的优点是检测灵敏度高,检测精度高,适用范围广,操作简便,容易实施,能发现较小的缺陷,能够对缺陷进行定位和定量。

脉冲反射法的缺点是存在一定的盲区,不适用于薄壁试件和近表面缺陷的检测,容易发生漏检,不适用于衰减太大的材料。

第二节 电 磁 检 测

电磁检测是利用被检测材料在电磁作用下表现出的电学和磁学性质,检测材料相关性能的方法。电磁检测方法包括电涡流检测、磁粉检测、电磁材质测试、漏磁检测、微波检测和电位检测等,本章将简要介绍输变电设备无损检测常用的电涡流检测和漏磁检测。

一、电涡流检测

电涡流检测是利用电磁感应原理,通过检测被检测材料内部感应产生的电涡流的变化情况来评定其性能或发现其缺陷的一种无损检测方法。它适用于导电材料,如各种金属材料和石墨等少数非金属导电材料。

1. 电磁感应及电涡流

当穿过闭合导电回路所包围面积的磁通量发生变化时,回路中就产生电流,这种现象叫做电磁感应现象,回路中所产生的电流叫做感应电流。

当闭合回路中的一段导线在磁场中运动并切割磁力线时,导体也会产生感应电流。置于交变磁场中的导体中会有感应电流产生,此感应电流就是电涡流。

在任何电磁感应现象中,不论是什么样的闭合路径,只要穿过路径围成的面积内的磁通量有了变化,就有感应电动势。任何不闭合的路径,只要切割磁力线,也会产生感应电动势。

2. 电涡流的趋肤效应及渗透深度

当交流电流通过导体时,导体横截面各处的电流密度是不一样的,即导体横截面的电流密度具有非均匀分布的特性,导体表面的电流密度最大,越接近导体中心电流密度就越小,这一现象即为趋肤效应。

由于趋肤效应的存在,离导体表面某一深度处的电流密度是表面值的 $1/e$,即 36.8%,此深度称为渗透深度 δ ,即

$$\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \gamma} \quad (\text{m}) \quad (1-8)$$

式中 f ——交流电流的频率, Hz;

μ ——材料的磁导率, H/m;

γ ——材料的电导率, S/m。

渗透深度是反应电涡流密度分布与被检测材料的电导率、磁导率及激励频率之间基本关系的特征值。被检测材料表面的电涡流密度最大, 它有最高的检出灵敏度, 离被检测材料表面越深, 电涡流密度越小, 检出灵敏度就越低。由式(1-8)可知, 只要降低激励频率 f , 就能获得较大的透入深度, 对于给定的被检测材料, 可根据检测深度的要求, 合理选择涡流检测的频率。

3. 电涡流检测线圈的阻抗分析

电涡流检测是通过检测被检测材料内部感应产生的涡流的变化情况来评定其性能或发现其缺陷。电涡流检测就是借助检测线圈阻抗的变化, 检测被检测材料内部感应产生的涡流的变化情况, 从而反应出被检工件的技术状态, 判断其物理或工艺性能的变化及有无缺陷存在。因此, 检测线圈的阻抗分析是电涡流检测的基础。

在电涡流检测中, 检测线圈和被检对象之间的电磁联系可以等效于两个线圈的耦合, 这两个线圈相距很近而又有互感, 一个为相当于一次线圈的检测线圈, 另一个为相当于二次线圈的被检测对象, 等效的电路图如图 1-3 所示。

要了解电涡流检测中被检测对象的某些性质与检测线圈电参数之间的关系, 就必须对检测线圈的阻抗进行分析。

设一次线圈的自身阻抗为 Z_0 。当一次线圈与二次线圈相互耦合时, 由

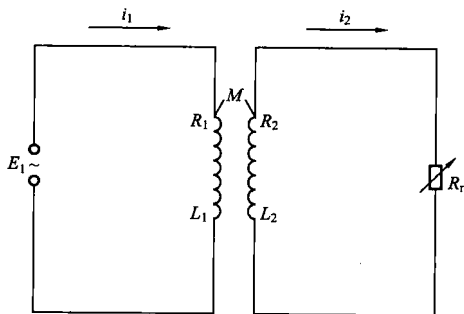


图 1-3 耦合线圈互感等效电路

于互感的作用, 闭合的二次线圈内会感生出电流, 并因此影响到一次线圈中电压与电流的关系。这种影响可以通过互感, 用一次线圈作用到一次线圈上的等效阻抗 Z_e 来体现。 Z_0 与 Z_e 之和 Z 称为一次线圈的视在阻抗。

根据电路理论, 求得耦合线圈互感电路中一次线圈的视在阻抗为

$$\begin{aligned} Z &= R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{(R_2^2 + R_r^2) + \omega^2 L_2^2} (R_2 + R_r) + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{(R_2^2 + R_r^2) + \omega^2 L_2^2} \omega L_2 \right) \\ &= R + jX \end{aligned} \quad (1-9)$$