

磁粉探伤



无损检测人员考核培训教材

劳动人事出版社

无损检测人员考核培训教材

磁 粉 探 伤

全国锅炉压力容器无损检测人员
资格鉴定考核委员会组织编写

劳动人事出版社

本书为锅炉压力容器Ⅱ级无损检测人员培训教材，与其他无损检测人员考核培训教材配套使用。书中系统介绍了磁粉探伤的基础知识和检测原理、方法及操作，对磁粉探伤的仪器、装置、使用条件和范围也做了比较详尽的介绍。本书由全国锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定考核委员会组织编写，供无损检测人员及有关科研人员、大专院校师生使用。

磁 粉 探 伤

**全国锅炉压力容器无损检测
人员资格鉴定考核委员会组织编写**

责任编辑 张 伟

**劳动人事出版社出版
(北京市和平里中街12号)**

隆昌印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

**787×1092毫米 16开本 12.75印张 315千字
1989年5月北京第1版 1989年5月北京第1次印刷
印数：10 120册**

ISBN 7-5045-0336-3/TG·033 定价：6.35元

前 言

磁粉探伤是无损检测常规探伤方法之一，是表面探伤中用得最多、最成熟的方法。本书叙述了磁粉探伤的基本原理、电磁场理论、探伤装置及工艺、缺陷的观察与评定、标准规范、磁粉探伤的应用与磁痕分析等。本书通俗易懂，简明扼要，把Ⅱ级无损检测人员所必要的磁粉探伤专业知识作了全面介绍，是磁粉探伤专业Ⅱ级人员的培训教材，也可作为质量管理人员和设计、检查人员了解无损探伤技术的参考资料。

本书由全国锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定考核委员会组织编写。左厚扬、胡学智、马殿中三人执笔，1987年写出了试用本，于1987年4月在成都Ⅱ级表面探伤班上进行了试用。1987年12月“全国锅炉压力容器Ⅱ级无损检测培训教材审定会”对该书进行了修改和审定。会后，由左厚扬、胡学智、马殿中再次进行了修改和整理，最后由全国考委会秘书处审查定稿。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者指正。

全国锅炉压力容器无损检测
人员资格鉴定考核委员会

1988年7月

目 录

第一章 概 述.....	1
§ 1—1 磁粉探伤及其发展简史.....	1
§ 1—2 电磁检测的分类.....	1
§ 1—3 磁粉探伤的适用性与局限性.....	4
复习思考题.....	4
第二章 电磁场的基本概念.....	5
§ 2—1 电学基本概念.....	5
§ 2—2 磁场的基本概念.....	8
复习思考题.....	13
第三章 物质中的磁场.....	14
§ 3—1 各种物质对磁场的响应.....	14
§ 3—2 磁畴、居里点.....	16
§ 3—3 磁导率.....	17
§ 3—4 磁滞、磁滞回线.....	19
§ 3—5 硬磁和软磁.....	20
复习思考题.....	21
第四章 外加磁化场的定量式.....	22
§ 4—1 载电流长直导线附近的磁场.....	22
§ 4—2 安培环路定律.....	22
§ 4—3 通电导体的磁场分布.....	23
§ 4—4 通电板材的磁场.....	26
§ 4—5 通电螺线管的磁场.....	26
复习思考题.....	28
第五章 缺陷的漏磁场.....	29
§ 5—1 磁粉探伤原理.....	29
§ 5—2 磁路定律.....	30
§ 5—3 边界条件、折射定律.....	32
§ 5—4 缝隙中磁场强度的计算.....	35
§ 5—5 缺陷引起的漏磁场.....	36
复习思考题.....	39
第六章 磁化方法与磁化装置.....	40
§ 6—1 磁化方法与磁化装置的分类.....	40
§ 6—2 交流磁化装置与磁化方法.....	41

§ 6—3	半波直流轴向通电法探伤	43
§ 6—4	全波直流通电磁化和开路线圈磁化	44
§ 6—5	可控硅控制的磁化装置	45
§ 6—6	电容器充放电式的磁化装置	46
§ 6—7	永久磁铁磁化装置	47
§ 6—8	摆动磁场磁化装置	47
§ 6—9	交叉线圈探伤仪	48
§ 6—10	关于断电相位的控制	52
§ 6—11	磁粉探伤机的选用	53
§ 6—12	退磁	54
	复习思考题	55
第七章 磁粉探伤灵敏度试片		56
§ 7—1	日本JISG 0565—82灵敏度试片	56
§ 7—2	英国BS 6072—81标准试件	59
§ 7—3	美国灵敏度试验片	60
§ 7—4	我国灵敏度试验片	62
	复习思考题	63
第八章 磁粉和磁悬液		64
§ 8—1	磁粉	64
§ 8—2	磁粉性能的测定	66
§ 8—3	悬浮液	67
§ 8—4	磁悬液	68
§ 8—5	磁悬液中固体的含量	69
§ 8—6	铁磁粉末含量的测定	70
§ 8—7	防腐性能试验	71
§ 8—8	磁粉探伤的质量控制与安全	72
§ 8—9	喷罐的使用与安全	74
	复习思考题	74
第九章 磁化规范		75
§ 9—1	周向磁化电流值的选择	75
§ 9—2	局部磁化法磁化电流的选择	77
§ 9—3	纵向磁化规范	80
§ 9—4	纵向磁化的影响问题	83
§ 9—5	标准试片确定磁化电流法	85
	复习思考题	87
第十章 磁粉探伤的应用与磁痕分析		88
§ 10—1	非连续性的分类	88
§ 10—2	焊缝的磁粉探伤	90
§ 10—3	铸件的磁粉探伤	97

§ 10—4 锻件的磁粉探伤	97
§ 10—5 疲劳缺陷的磁粉探伤	99
§ 10—6 齿轮磁粉探伤	100
§ 10—7 磁粉探伤的过程	101
§ 10—8 缺陷磁痕的等级分类	103
复习思考题	106
实验一、磁粉的磁性称量	107
实验二、磁悬液的配制	108
实验三、磁粉粒度的酒精沉淀检验	109
实验四、磁悬液磁粉浓度的测定	110
实验五、触头法磁粉探伤	111
实验六、磁轭探伤法	111
实验七、缺陷磁痕的贴印	112
实验八、退磁方法与退磁效果实验	112
附录一、磁粉探伤名词术语 (JB3111-82)	114
附录二、中华人民共和国法定计量单位 (或SI制) (选编)	117
附录三、磁粉探伤标准	118
(一) 磁粉探伤机	118
(二) 钢制压力容器磁粉探伤	123
(三) 压力容器锻件磁粉探伤	133
(四) 钢铁材料的磁粉探伤方法	139
(五) 航空零件磁粉探伤说明书	158
(六) 柴油机锻钢曲轴、凸轮轴磁粉探伤技术条件	172
(七) 柴油机球墨铸铁曲轴、凸轮轴磁粉探伤技术条件	174
(八) 内燃机连杆磁粉探伤技术条件	177
(九) 内燃机零、部件磁粉探伤方法	179
(十) 锻钢件的磁粉检验方法	186
(十一) 大型曲轴锻件的磁粉检验	192

第一章 概 述

§ 1—1 磁粉探伤及其发展简史

磁粉探伤是利用缺陷处漏磁场与磁粉相互作用的原理,检测铁磁性材料表面及近表面缺陷的一种无损检测方法。其基本原理是:当工件被磁化时,若在工件表面或近表面存在裂纹、冷隔等缺陷,便会在该处形成一漏磁场。此漏磁场将吸引、聚集探伤过程中施加的磁粉,而形成缺陷显示。

磁粉探伤的设想始于1922年,美国人霍克在切削钢制工件时,发现有铁末聚集在工件表面有裂纹的区域。因此,他提出了可以利用这一现象检验工件表面裂纹的设想。1929年福雷斯特成功地用直流电对钻探用钢管实验了周向磁化,但由于用以显示磁痕的钢屑质量问题,试验结果很不理想。1930年,白茨第一次成功地采用磁粉探伤的方法对焊缝质量进行了检验。苏联学者瑞加德罗对磁粉探伤的研究和发展作出了卓越的贡献。他在大量试验的基础上制订了在有世界上有广泛影响的磁化规范,并于50年代初期首创了鉴定磁粉质量的磁性称量法和酒精沉淀法。

现在磁粉探伤已是一项较成熟的技术,并被广泛地应用于机械、造船、航空、宇航、铁路、兵器等部门。近年来世界上对磁化设备、磁粉性能、全自动探伤装置等的研究,取得了较大的进展。

§ 1—2 电磁检测的分类

利用材料的电磁性质检测材料的性质和性能的方法,必须测定电磁性质因缺陷存在及分布而引起的变化。然而,在很多情况下,电磁性质与缺陷组织等之间对应关系不是一致的,因而要尽可能消除不一致性,简化对应关系。根据具体情况,往往不得不应用两种以上的检测方法进行推断。因而无损检测工作者要掌握多种检测方法。

一、静电法

利用绝缘体表面的微小裂纹导致的静电聚集现象,而检测缺陷的方法称为静电法。利用这种方法可以检测涂敷搪瓷的铁制品、玻璃制品、陶瓷和绝缘材料等缺陷。例如金属上涂敷有搪瓷,如将带正电荷的粉末喷上去,金属本身的电荷分开搪瓷中的电荷也出现极化,但不移动,如图1—1所示。一旦有裂纹存在,由于搪瓷的表面电荷电场的影响比其他部分强,因此使负电荷聚集在裂纹下面的金属部位,若继续喷射带正电荷的粉末,便在裂纹处附着很多粉末,从而显示缺陷的存在。

二、电流法

1. 用电流测定裂纹深度的方法

这种方法用于良导体表面缺陷的检测。当良导体的表面通以与缺陷垂直方向的电流时,

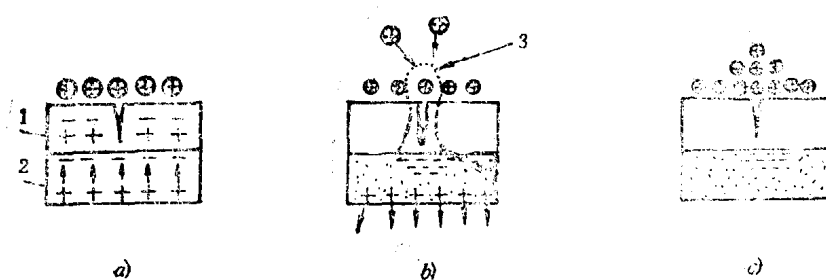


图 1—1 金属上搪瓷敷层裂纹的静电检测原理

- a) 开始将带正电荷的粉末喷射上去时的情况;
- b) 有裂纹时, 裂纹下面的金属对负电荷的影响比其他部分强;
- c) 继续喷射粉末, 粉末在裂纹处聚集

1—搪瓷 2—金属 3—负电荷影响范围

由于缺陷深度的不同, 导致缺陷始端与末端的电压变化就不同, 这种用以求出缺陷深度的方法称为电流法, 或称为裂纹深度测定法。

电极之布置通常采用如图1—2a所示的方式, 求得电压和裂纹深度的关系如图1—2b所示。故该测定法又称为四探针法。

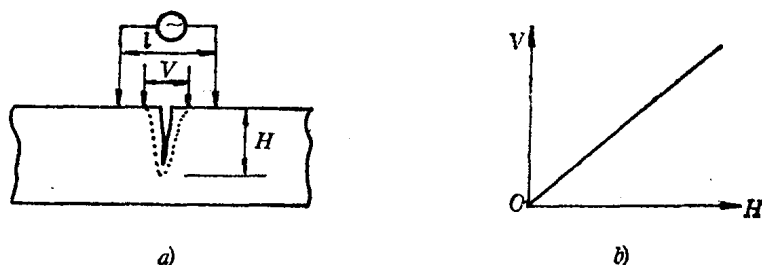


图 1—2 裂纹深度测定方法

H —裂纹深度; V —电压差

2. 用电流法检查夹层

板材较薄时, 让电流从其一面流过, 在另一面上精确测定两点间的电压差, 从而可确定缺陷之有无及分布情况, 如图1—3所示。

三、电磁感应法——涡流法

如将施加于图1—4所示电路上的电源频率逐渐提高, 电流就逐渐变小。将金属放在线圈

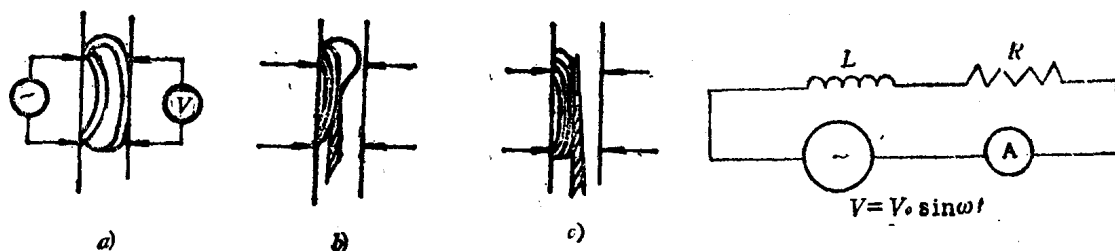


图 1—3 夹层缺陷和电流分布

a) 无夹层; b) 小夹层; c) 大夹层

图 1—4 电磁感应原理图

一侧，将交流电通入线圈时，交流感应的磁通便通过该金属内部，在金属内部磁通随时间而变化，产生互感电动势，从而产生电流，因此将这种现象称为“涡流”。

此涡流将随金属的电导率形状和线圈的相对位置以及流入线圈的电流频率而变化，并与线圈中的电流成正比。然而，导电率不但因材料的种类、成分、加工、热处理、结晶方位、夹杂物的存在等而不同，而且还与缺陷的存在和缺陷的形态有关。此外，涡流还有集肤效应，频率（ f ）高时，局限于试件表面。当导体表面存在均匀的交流磁场时，涡流从表面值下降到 $1/e \approx 0.37$ 的深度 δ 可由下式求出， δ 称为渗透深度。

$$\delta = 1 / \sqrt{\pi f \mu \sigma}$$

式中 μ ——导体的磁导率，

σ ——电导率（电阻率的倒数）。

检测线圈按被检测材料的形状制成各种类型，其原理如图1—5所示。常用的有a、b所示的探头式线圈和c那样的贯穿式线圈。流过线圈的交流电，可以在几百至几兆赫兹的频率范围内，根据使用目的进行选择。

将检测线圈移近试件并作相对移动，就能检测出缺陷。因涡流随各种条件的不同而变化。对于强磁性材料同样受电磁感应的作用，但磁性的影响过大，所以在利用与磁性有关的现象时，利用电磁感应以外的其他磁性方法较好。

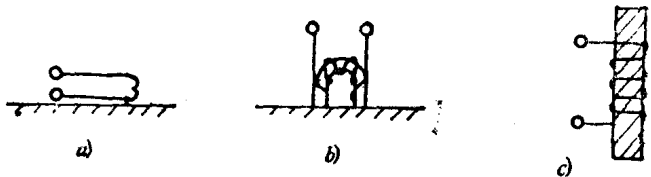


图 1—5 检测线圈

a) 探头式线圈；b) 探头式线圈；c) 贯穿式线圈

四、磁性检测法

利用磁性的方法只能用于磁性材料。其原理是，将磁性材料放入磁场使之磁化，由于组织状态和缺陷的存在，使磁导率发生变化，或产生漏磁，利用这种磁性现象进行材料检验的方法统称之为磁性检测法。

1. 霍耳传感器法

使电流流过一种称之为霍耳元件的半导体时，在垂直于电流的方向施加磁场后，就在垂直于两者的方向产生电压，利用这种现象进行无损检测的方法称为霍耳传感器法。

由于此时产生的电压与通过霍尔元件的磁通量成比例，故用这种方法就可以测出试件上的相对漏磁通，从而测出试件表面上的缺陷和裂纹深度。

2. 磁带录磁法（磁强自动记录法）

将磁带紧贴于试件上使之磁化，漏磁通便被录磁。再通过带有可变阻抗录音头的检测器将此磁带上的讯号在示波器上定量地显示出来而称为磁带录磁法。

3. 磁粉法

这种方法是将铁磁性粉末材料（又称之为磁粉）撒于磁化的试件表面上，在缺陷处的漏磁通多的部位感应并吸附较多的磁粉，以显示缺陷的位置、形状和大小的检测方法称之为磁粉探伤法或简称为磁粉法。这是本书要详细介绍的探伤方法。

五、电磁鉴别法

为了快速鉴别材料的性质、硬度、热处理条件和应力等，可采用电磁鉴别的方法。这种方法不是直接检查硬度、应力等性能，而是通过测定硬度和应力等性能和电导率或矫顽力之

间对应关系的方法，称之为电磁鉴别法。因此，仅当硬度等和这些性能之间有对应关系时才能进行测定。但如果把化学成分等变化的条件都考虑在内，对应关系就可能消失了。因此，必须事先确定其他的影响因素所造成的误差达到什么程度。为此，须要进行一些预研工作。

§ 1—3 磁粉探伤的适用性与局限性

磁粉检测的特点是利用试件上能建立强的磁感应强度，并在缺陷附近产生足以吸收铁磁粉的漏磁场而呈现磁粉堆积——可见的磁痕。因此检测灵敏度取决于试件的磁特性（曲线）、有效磁化场强度与缺陷方向之关系、磁粉的磁性、试件的表面状态（表面粗糙度、电镀层等）、磁场波形、磁化探伤工艺等。

磁粉检测铁磁性材料表面缺陷的灵敏度较高，而对于表面以下的缺陷则缺陷越深检测越困难。对于非铁磁性材料根本不能应用该种检测方法。我们将要在以后各章节，详细讨论磁粉探伤的特点和磁粉探伤方法的适用性与局限性。参见表1—1所列的有关内容。

表 1—1 磁粉探伤方法的特征、适用性与局限性

项	目	要	点
方 法 特 征	方法原理	磁力作用(漏磁场作用)	
	检测条件	1. 铁磁性试件 2. 磁化装置 3. 磁粉	
	缺陷显示	1. 磁粉聚集——磁痕显示 2. 灵敏度高 3. 缺陷显示直观 4. 对缺陷的性质、大小和分布易于判定	
	检验速度	快	
	检验费用	省	
	污染环境	轻	
适 用 性	应用范围	探伤	
	检验材料条件	强磁性材料中磁导率差异大的部位	
	检验缺陷部位	表面及近表面	
	检验缺陷方向	缺陷的方位与磁力线的交角愈大愈易发现	
	主要检验缺陷	裂纹、发纹、折叠和夹杂等	
局 限 性	不适用性	即非适用性的内容	
	其他	点状缺陷、平行于表面的分层	

复 习 思 考 题

1. 简述在工业生产与锅炉压力容器的定期复检工作中应用磁粉探伤方法的重要性。
2. 磁粉探伤在无损检测方法中的地位怎样？
3. 假若你学习了两种无损检测方法，试选择某一种无损探伤方法与磁粉探伤方法的特征进行分析比较，并指出掌握两种以上探伤方法的重要意义。

第二章 电磁场的基本概念

§ 2—1 电学基本概念

一、电场、电位

1. 凡是有电荷的地方, 其四周空间里的任何其他电荷都受力的作用, 我们把这样的空间称为电场。因此, 电场是一种特殊物质, 电荷之间是通过电场这个特殊物质发生相互作用的。

设有一点电荷 Q 在真空中产生电场, 另一试验电荷 Q_0 位于电场中某点 P , P 与点电荷 Q 之间的距离为 r 。根据库仑定律试验电荷 Q_0 所受的力为:

$$F = \frac{Q}{r^2} Q_0 \quad (2-1)$$

即: 在真空中, 两个点电荷间的相互作用力, 沿着它们之间的连线, 大小相等, 方向相反, 作用力的大小与两个电量的乘积成正比, 与两个点电荷之间的距离平方成反比。

由此可见: $\frac{F}{Q_0}$ 是一个无论大小和方向都与试验电荷无关的矢量, 它是反映电场本身性质的。我们把它定义为电场强度。简称场强。用 E 表示:

$$E = \frac{F}{Q_0} \quad (2-2)$$

所以, 某处电场强度矢量是这样—个矢量, 它的大小等于单位电荷在该处所受到的力, 其方向与正电荷在该处所受电场力的方向一致。

在实用单位中, 电场的单位是伏特每米。

2. 电场中某 P 点的电位 (电势) U , 在数值上等于放在该点的单位电荷的电位能 W_P/Q_0 , 或等于单位正电荷从该点移到无限远处时电场力所做的功 U ,

$$U = \frac{W}{Q_0} \quad (2-3)$$

U 是与试验电荷无关的量。它反映了电场本身的性质。

电位的单位是伏特 (V), 电荷量的单位是库仑 (C)。电位能的单位是焦耳 (J)。

3. A 点和 B 点间的电位差, 等于单位正电荷由 A 点移动到 B 点时电场力所做的功 A_{AB} , 用 U_{AB} 表示。

$$U_{AB} = \frac{A_{AB}}{Q_0} \quad (2-4)$$

$$U_{AB} = U_A - U_B$$

$$A_{AB} = W_{AB} = Q_0 (U_A - U_B) \quad (2-5)$$

上式说明, 在静电场中, 电荷从一点移到另一点时电场力所做的功等于电荷与这两点电

位差的乘积。

在公式 (2—5) 中, 若 $U_a > U_b$ 且 $Q_0 > 0$ (或 $U_a < U_b$ 且 $Q_0 < 0$), 我们有 $A_{ab} > 0$, $W_{ab} > 0$, 即从 a 点到 b 点电场力作正功, 电位能减少。由此可见:

(1) 在电场力的作用下, 正电荷从电位高的地方移向电位低的地方, 而负电荷从电位低的地方移向电位高的地方。前者通常规定的电流的流动方向, 后者即金属导体中电子的流动方向。

(2) 对正电荷来说, 电位高就意味着电位能高。对负电荷来说, 电位高就意味着 电位能低。

(3) 电荷在电场力的作用下, 其电位总是趋于减少。

二、稳恒电流与交变电流

1. 电流的强度和方向都不随时间而改变, 这样的电流叫做稳恒电流或称直流 $I = I_0$ 。如图 2—1 所示。在电流流动过程中, 如果我们把每一瞬间到达导体 A 的负电荷不断地送回到 导体 B 上 (或者说, 把到达导体 B 上的正电荷不断地输送到导体 A 上), 那末我们就能保持导体 A 和 B 之间的电势差不变, 也就是说, 使金属导线内建立的电场保持不变, 成为恒稳电场。在导体内的恒稳电场要靠电源来维持, 并且在维持这种电场的同时电源要不断地做功, 换句话说, 恒稳电场是以消耗其他形式的能量来维持的。

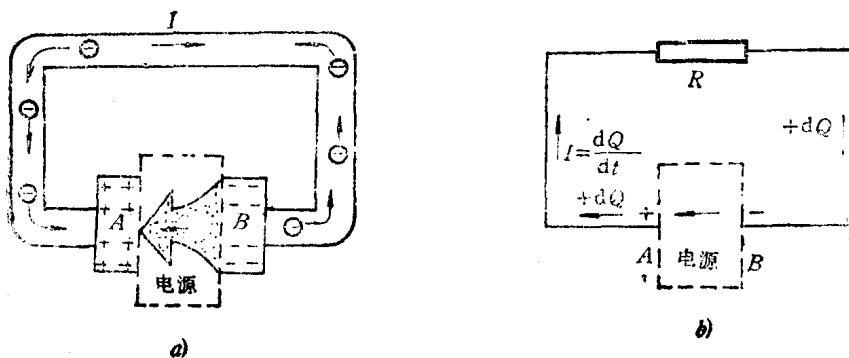


图 2—1 恒稳电源图示

a) 电源的作用一把正电荷从 B 处经电源内部移到 A 处, 使导体内保持恒稳电场。

b) 电源的电动势 $\mathcal{E} = \frac{dA}{dQ}$, dA 是正电荷 dQ 从负极经电源内部移到正极时, 电源克服静电力所作的功。

2. 电流强度和方向都作周期性变化的电流, 叫做交变电流或简称交流电。可表示为:

$$I = I_m \sin \omega t \quad (2-6)$$

式中 ω 为圆频率或角频率, 即发电线圈在磁极中匀速转动的角速度 ω (弧度/秒)。 t 为时间, I_m 为感生电流的最大值, 又简称之为电流的幅值。

交流电的变化每重复一次, 习惯上我们称为交流电完成一次全振动。交流电完成一次全振动的时间叫做交流电的周期。周期用字母 T 表示, 单位是秒。在一秒钟里交流电振动的次数叫做交流电的频率。频率用字母 f 表示, 单位是赫兹。

频率和周期互为倒数, 即

$$f = \frac{1}{T} \text{ 或 } T = \frac{1}{f} \quad (2-7)$$

交流电的圆频率或角频率，它跟周期和频率有下列关系，

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (2-8)$$

我国发电站发出来的交流电，一般周期是1/50秒，即频率等于50赫兹，在1秒钟里，电流的方向要改变100次。

3. 交流电的有效值

我们已经知道，正弦式交流电的电动势和电流强度都按照正弦规律跟着时间改变。当然，在交流电路里，任何一段导线上的电压也按正弦规律跟着时间改变。所谓有效值，是根据电流的热效应来规定的。让交变电流和稳恒电流通过同样大小的电阻，如果它们在相同的时间里放出相等数量的热，我们说这一个稳恒电流的大小就是这个交变电流的有效值，用 I_* 表示。根据电流的有效值和电阻，用欧姆定律计算出的电压就是交变电压的有效值，用 V_* 表示。

显然，交变电压和交变电流的有效值总比它们的幅值（即最大值）来得小。理论和实验都证明，正弦式交流电的有效值等于幅值的 $1/\sqrt{2}$ 倍，即0.707倍；因此，我们得出

$$\text{电流:} \quad I_{\text{有效值}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad (2-9)$$

$$\text{电压:} \quad V_{\text{有效值}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}. \quad (2-10)$$

4. 交流电的平均值

平均值：在交流电的半个周期范围内，各瞬间的算术平均值称为平均值。用 $\bar{i}$ 表示。

5. 磁化电流表

一般的工业电流表中，用于交流的表示有效值（ I_* ），用于直流的表示平均值（ $\bar{I}$ ），因此，都不适用于磁化装置。

校准峰值首先应求出磁化电流值，例如，交流时可使用交流器和交流电流表（校对用），脉动电流时可使用分流器和直流电压表。然后，将求出的磁化电流值乘以表2—1中列出的峰值换算系数（ k ），就可以算出峰值电流 $I_m = kI$ 。

表 2—1 电 流 峰 值 换 算 系 数

电流波形(I)	系数(k)
交流(有效值)	$\sqrt{2}$
单相半波(平均值)	π
单相全波(平均值)	$\pi/2$
三相半波(平均值)	$2\pi/3 \times \sqrt{3}$
三相全波(平均值)	$\pi/3$

三、欧姆定律

德国物理学家欧姆在1862年从实验中得出：通过给定导线的电流强度，与导线两端的电势差（即导线上的电压）成正比，与导线的电阻成反比，以后称之为欧姆定律。

而电流强度 I 等于流过导体中任一横截面的电量 Q 和所用的时间 t 之比, 即 $I = \frac{Q}{t}$ 。

当导体的材料一定时, 导体的直流电阻 R 与它的长度 l 成正比, 与它的横截面积 S 成反比。表示为:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2-11)$$

ρ 是比例恒量, 称为电阻率 (单位名称: 欧姆米)

直流电路的欧姆定律公式可写成:

$$I = \frac{V}{R} \quad (2-12)$$

交流电路的欧姆定律公式可写成:

$$I = \frac{V}{Z} \quad (2-13)$$

式中 Z 为阻抗, 由电阻 R (单位: 欧姆 Ω)、电感 L (单位: 亨利 H)和静电容 C (单位: 法拉 F)组成的电路的阻抗 $Z(\Omega)$, 用下式表示:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (2-14)$$

其中 ω 为圆频率。

另外, 电流与电压间的滞后角 φ 由下式求出:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \right) \quad (2-15)$$

§ 2—2 磁场的基本概念

一、磁体

一些具有吸引铁质物体性质的物体, 叫做磁体。而具有吸引铁质物体的能力称为磁性。

约在公元前300年, 我国劳动人民就发现了某些铁矿石能够吸引铁制的物品。这种铁矿石我们称为天然磁体, 其化学成分是四氧化三铁 (Fe_3O_4)。用天然磁体去和磁性物质 (例如一根钢条) 沿一定的方向摩擦, 被摩擦的钢条就具有吸引铁屑的性质。这样所得到的磁性物体叫做人造磁体。磁体的形状很多, 用途较为普遍的是棒形磁体和环形磁体。

图2—2所示的是一块磁体吸引铁屑的情况。由图可以看出, 磁体吸引铁屑最多的地方, 是在它的两端附近, 也就是在它的两极。这种产生磁力的区域叫做磁极。磁极区域表现的磁性最强。

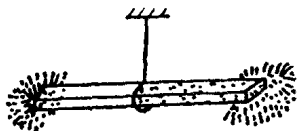


图 2—2 磁极

把一块棒形磁体悬挂起来, 使它能够自由转动时, 磁体的一个磁极永远指向地球的北方, 而另一个磁极永远指向地球的南方, 我们把前者叫做指北极 (简称 N 极)。把后者叫做指南极 (简称 S 极)。由于一个磁体悬挂起来时其南北指向恒定。到公元1600年, 有人即指出

地球是一个大磁体。地球的 N 极座落在地球南极附近, 地球的 S 极座落在地球的北极附近。所谓磁针指南指北, 只是一种近似的说法。精确的观测指出, 地球的北磁极 ($N_{地}$) 在南半

球南纬 $70^{\circ}51'$ 和西经 96° 的地方。即当假设确定了地球的磁极方向，那么磁针（或一般磁体）的极性就依其在地球上的指向而确定了。

每个磁体都具有一个N极和一个S极。根据观察，人们发现同性磁极（N极与N极，S极与S极相斥，异性磁极（N极与S极）相吸，如图2—3所示。

磁体最显著的特性之一，是当把它一分为二时，每块仍然是一个磁体，各块仍具有一个N极和一个S极，如图2—4所示。这充分说明，自然界中尚没有单独存在的N极或S极。

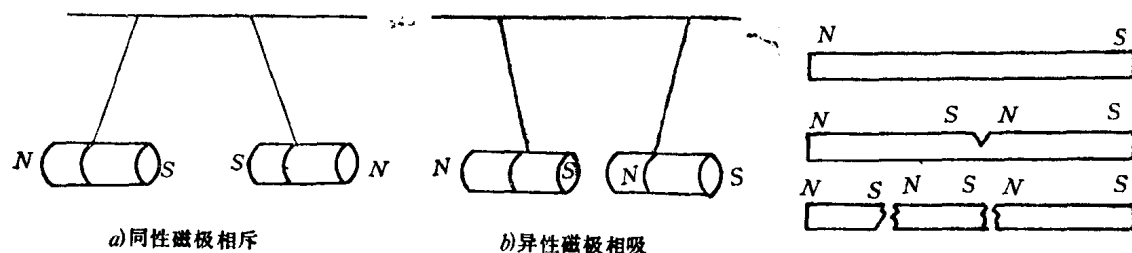


图 2—3 磁体极性间之相互作用图

图 2—4 一块磁体被断开时，两个断端分别具有相反的磁极

二、磁场

磁性作用的范围称之为磁场。它是一种特殊的物质，存在于磁体的周围，也存在于通电导体之中及其周围。

1. 磁体的磁场

磁体的周围出现磁场，磁体之间的相互排斥或吸引是由于这种磁场的作用。磁场可以通过磁粉之排列图象显示出来。我们先看一下磁体或磁化了的磁性物质吸引铁屑的现象。如图2—5所示，因为每一颗粒铁屑在磁体的磁场的影响下被磁化，两端分别形成了N极和S极，所以同磁体的两极发生作用。

从图示现象可以看出，磁体附近，铁屑呈现出较为有规则的线条状排列；在磁极附近，磁粉线条较密集，远离磁体处则较稀疏。显然，线条密集处，对应的磁场较强，线条稀疏处，显示的磁场较弱。因此，我们可以用磁力线来显示磁体的磁场，即在磁场中所画出的曲线，使曲线上的每一点的切线方向指示出该点上的磁场方向。假定磁体的磁力线由N极出发，从S极进入磁体，并在磁体内由S极通向N极，从而组成闭合的曲线。每条磁力线不能切割或并入另一条磁力线。这样的曲线称之为磁力线（在真空中），在磁介质中，具有上述性质的曲线称为磁感应线。

图2—6所示的磁体的磁场中的磁感应线图。

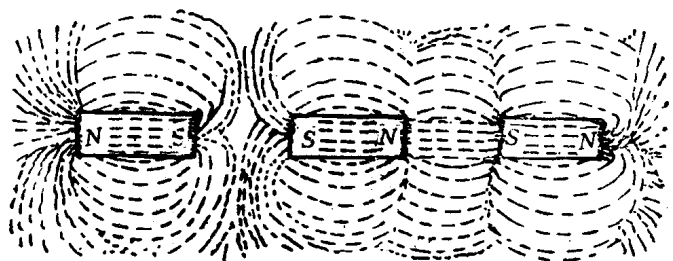


图 2—5 磁极的相斥与相吸的磁力线

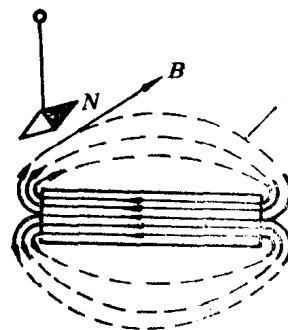


图 2—6 在磁场内的磁针指向磁场方向

为了使磁感应线能够定量地描述磁场，我们规定：穿过每个磁感应线成正交的单位面积〔平方米〕的磁感应线的条数（单位是：韦伯（Wb））就等于该点的磁通量密度 B ，国际单位制中以特斯拉（T）为单位。这样，磁感应强度较强的地方磁感应线就较密，反之就较稀。

2. 电流载体的磁场

将一段长导线经过一个电键接到一个电池的两极，如图2—7所示，当电键断开时，我们将导线放置在磁针上方，并使导线与磁针平行，然后合上电键。若导线中的电流足够强，我们可以看到磁针突然偏转，此时磁针的指向与导线垂直。由此可知，电流载体能在其周围空间产生磁场。

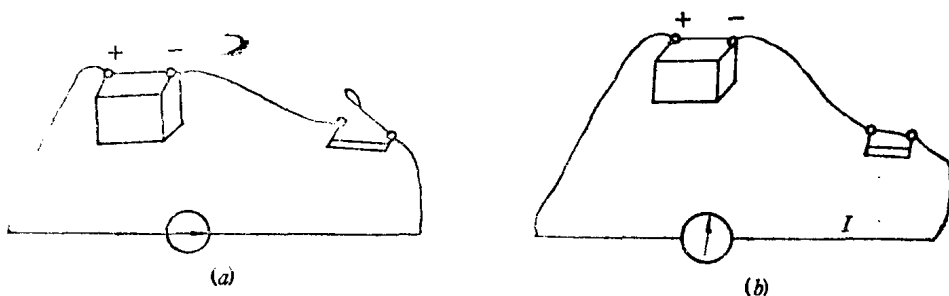


图 2—7 电流载体的磁场检验

- a) 将一条导线放置在磁针上方，使导线与磁针平行，电键断开时导线内没有电流。
b) 当导线内通过电流时磁针偏转，方向与导线垂直。

试将一些细小铁屑撒在纸上，并轻轻地敲击，便能显示电流通过直长导线的磁场的磁力线，如图2—8a所示。再将小磁针放在磁场内不同位置，就可以确定出磁场的方向，如图示2—8b用箭头表示之。

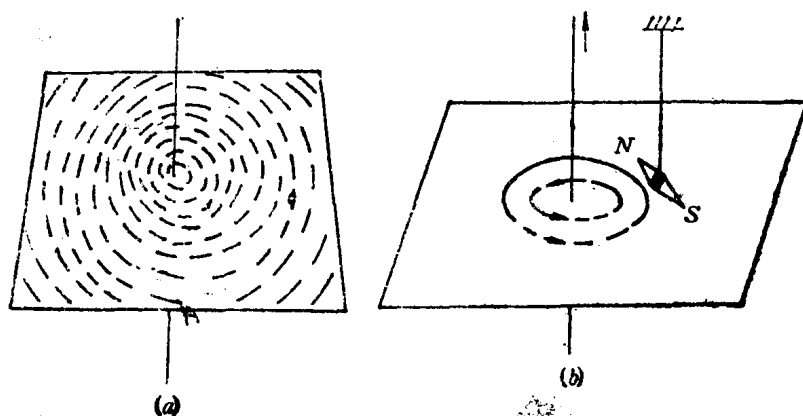


图 2—8 磁场的显示

- a) 通过电流的长直导线的磁场显示。
b) 通过电流的长直导线附近的磁力线。

如图2—9所示，可用右手定则确定直长导线的磁场方向与电流方向之间的关系。即：将右手的拇指指向电流的方向，则环绕导线的其余四指所指的方向就是磁场的方向。

同理，可用右手螺旋定则描绘螺线管中的磁场与电流的关系。即：如图2—10所示，右手握螺线管，用四指指向电流的方向，则大拇指所指的就是螺线管内部的磁场方向。