

9942

检测 II 级培训教材

涡流检测

WOLIU
JIANCE

中国机械工程学会无损检测学会 编

4-2

机械工业出版社



无损检测Ⅱ级培训教材

涡流检测

中国机械工程学会无损检测学会 编



机械工业出版社

本书较系统地阐述了涡流检测方法的物理基础和检测方法。内容包括：涡流检测的物理基础；涡流探伤装置；探伤方法；对比试样；涡流检测的实例和标准等六章。书后附有80余道思考题及答案。全书插图129幅。

本书是中国机械工程学会无损检测学会组织编写的Ⅱ级涡流检测人员培训通用教材，也可供大专院校有关专业师生、从事无损检测工作的技术人员和质量管理人员参考、使用。

涡流检测

中国机械工程学会无损检测学会 编

责任编辑 武江 方婉莹

*

责任印制：张俊民

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $4\frac{7}{8}$ ·字数 126 千字

1986年11月北京第一版·1990年8月北京第二次印刷

印数 1,701—5,410·定价：3.50元

*

科技新书目：225-006

ISBN 7-111-02359-5/TM·312

前 言

当前，全国各地正在开展对无损检测人员技术培训和资格鉴定，根据目前从事无损检测人员的分布状况来看，Ⅱ级人员处于生产第一线，担负着日常的检验工作，并需签发检验报告、对检验结果负责。为确保受检产品的质量，必须加速对Ⅱ级人员的培训和资格鉴定，这是一项紧迫又繁重的任务。

为了逐步适应广泛国际经济技术合作的需要，我国与国外无损检测学会人员资格互认的时机已日趋成熟，这就要求有一套与各国水平相协调的、全国统一的无损检测的基础培训教材。为此，中国机械工程学会无损检测学会在全国范围内组织力量编写了无损检测五种常规方法的教材，作为全国无损检测Ⅱ级人员培训的通用教材。《涡流检测》就是其中的一本。

本教材在编写时力求简单、明了，尽量避免采用复杂的数学演算，书中用相当的篇幅来阐述检测方法以及国际上通用的有关涡流检测的标准等，使受培训人员在经过短期培训后能对涡流检测技术有较为全面的了解。鉴于涡流仪器发展迅速，品种繁多，本教材对具体仪器及其操作方法不拟作详细介绍，在授课或实验时，可根据情况予以说明。

本教材由徐光华编写；承无损检测学会电磁检测专业组陈小泉、张八虎等同志审定；曾在化工部培训中心试用多次。但由于编著者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

这套教材在组织编著过程中陶亨咸、应崇福、赖坚、许绍高、程瑞全等各级领导同志曾直接予以指导、支持，本教材在编写过程中还得到了郭春枢、张企耀等同志的协助和关心，谨此表示衷心感谢。

编 者

1986年3月

目 录

引言	1
第一章 涡流检测的物理基础	3
第一节 预备知识	3
一、金属的导电性	3
二、金属的磁特性	6
第二节 电磁感应及涡流	15
一、电磁感应	15
二、涡流	17
三、趋肤效应及透入深度	18
第三节 正弦交流电路	19
一、正弦交流电流	19
二、交流电的有效值与平均值	20
三、正弦量的表示法	21
四、电压矢量图	22
五、阻抗	23
六、阻抗矢量图	24
第四节 线圈阻抗	24
一、线圈及其阻抗	24
二、线圈接近导体时的阻抗	27
三、影响线圈阻抗的因素	30
四、铁磁性材料	32
五、线圈结构	33
第五节 信号检出及其处理	33
一、信号的形成	33
二、信号的检出	34
三、信号处理	36
第二章 涡流探伤装置	41
第一节 概述	41
一、手动涡流探伤仪	41

二、自动涡流探伤仪	41
第二节 检验线圈	42
一、按结构分类	42
二、按用途分类	43
三、按比较方式分类	43
四、检验线圈的几个例子	46
第三节 自动涡流探伤装置	47
一、涡流探伤仪的组成	47
二、振荡器	48
三、桥路	48
四、放大器	49
五、相敏检波器	50
六、移相器	53
七、自动平衡器	56
八、滤波器	57
九、拒斥器	59
十、显示器	60
十一、直流电源	61
十二、记录装置	62
十三、传送装置	62
十四、磁饱和装置	63
第四节 探头式线圈的涡流探伤仪	63
第三章 探伤方法及对比试样	67
第一节 探伤方法	67
一、穿过式线圈	67
二、内插式线圈	67
三、探头式线圈	67
第二节 应用范围及检验明细表	68
第三节 检验准备工作	69
一、检验方法和仪器的选择	69
二、检验线圈的选择	69
三、预处理	70
四、对比试样的制备	70

一、机身结构件的检验	92
二、发动机部分的检查	94
第四节 管线在役检查	94
一、管线在使用中产生的缺陷	94
二、操作	95
第五节 材质检验	98
一、非铁磁性材料的材质检验	98
二、钢铁材料的材质检验	100
第六节 膜层测厚	102
一、测厚范围及仪器	102
二、标准试块及校正曲线	103
三、测量顺序	104
第六章 标准	105
第一节 国外有关电磁感应（涡流）检测标准	105
一、美国标准	105
二、日本工业标准	106
三、其他国家的标准	106
第二节 日本工业标准 JIS G 0568—1974 钢（棒、管、 线）的涡流探伤方法	106
第三节 日本工业标准 JIS H 0502—1974 铜及铜合金管的 涡流探伤方法	126
第四节 美国ASTM标准 E 426—76 奥氏体不锈钢及类似合 金属材料无缝管和焊接管的电磁感应（涡流）探伤的推 荐操作方法	130
思考题	136

引 言

涡流检测是以电磁感应原理为基础的。金属材料在交变磁场作用下产生了涡流，根据涡流的大小和分布可检出铁磁性和非铁磁性材料的缺陷，或用以分选材质、测膜层厚度和工件尺寸以及材料某些物理性能等。

用涡流法检测金属材料或零件有以下特点：

(1) 检测时，线圈不需接触工件，因此探伤速度快。对管、棒材探伤，一般每分钟可检查几十米；线材每分钟可检查几百米甚至更多，且易于实现现代化生产的自动探伤。

(2) 对工件表面或近表面的缺陷，有较高的检出灵敏度。

(3) 能在高温状态下进行管、棒、线材的探伤；对矩形、三角形、带筋的异形或薄壁管材以及钻孔内壁等亦能进行探伤，为其它无损检测方法所不及。

(4) 能测量金属覆盖层或非金属涂层的厚度。

(5) 除了能进行金属材料的探伤外，还可检验能感生涡流的非金属材料——石墨等。

涡流检测适用于产品在制造过程中作半成品和成品的生产检验，或对在役设备的管子部件及管线作例行检验。这种检验有利于改进制造工艺，提高产品质量。然而，由于存在“趋肤效应”（见第一章），涡流探伤的有效范围仅局限于工件表面的有限深度内，此外，还存在信号显示难以判断缺陷类型和被检工件的形状亦不能太复杂等缺点。尽管如此，涡流法还是弥补了其它探伤方法的不足，成为近代无损检测五种常规方法之一。涡流检测的应用范围见下表。

涡流检测的应用范围

检测分类	目的	线圈类型	被检材料形状和种类	用途
探 伤	检出缺陷	穿过式线圈	线、管、棒、球	生产过程质量管理
		探头式线圈	管、棒、板、坯料、零件、焊缝	生产过程质量管理
		内插式线圈	管内壁、孔、零件	维修检查
分 选	混料及	穿过式线圈	管、棒、铸锻件、零件	质量管理
	材质分选	探头式线圈	板、零件	
	电导率测量	探头式线圈	板、棒	主要用于铜、铝等
膜厚测定	涂层、膜层厚度测定	探头式线圈	管、管、零件	非铁磁性膜层及金属材料上非金属涂层厚度
尺寸测量	尺寸、形状的变化	穿过式线圈	线、管、棒	生产过程质量管理、振动、位移、偏心度等
		探头式线圈	板、零件	

应用涡流方法的由来已久，早在1879年，Hughes已用来比较不同温度下金属材料的差别；到20世纪40年代初期，联邦德国的Förster和Zuschlag等人研制了一些涡流仪器，并在工业生产中得到了较广泛的应用。之后，美、英、苏、日等国在50年代亦开始了这方面的研究和应用。

我国于50年代末，开展了涡流检测的研究工作，先后研制成穿过式线圈和旋转式线圈的涡流探伤仪、电导率测定仪、涂层厚度测量仪和材质分选仪等，初步形成了我国涡流检测仪器的系列，为我国工业生产提供了检测手段，发挥了积极的作用。

第一章 涡流检测的物理基础

第一节 预备知识

一、金属的导电性

1. 金属的电阻

根据物质的导电性能可分为导体、绝缘体和半导体。例如金、银、铜、铝、铁等金属都是良好的导体；橡胶、陶瓷、云母、塑料、竹木等都是绝缘体；另外还有一类物质的导电性能介于导体和绝缘体之间，这类物质称为半导体，例如硅、锗等就是常用的半导体材料。

一切物质都是由原子组成，而原子又是由带正电的原子核和带负电的电子所组成。电子在原子核外分层绕核不停地运动。原子核所带正电荷的数量和核外电子的负电荷数量相等，所以原子平时呈现电中性。不同物质的原子核所带正电荷数和核外电子数都是不同的。

由于电子带负电，原子核带正电，它们之间就有相互的吸引力，电子被束缚在原子核的周围运动。在金属物质的原子中，外层电子受原子核的吸引力较小，在其余电子的排挤下，挣脱了原子核的吸引使它在金属中自由“游荡”，成为自由电子。失去了外层电子的原子变成带正电的离子，在平衡位置附近作热振动。所以，金属是由热振动的正离子和无规则运动的自由电子组成的。而绝缘体中的原子，由于外层电子受原子核的束缚力很大，不容易形成自由电子，所以难以导电。

应该说明，绝缘体和导体的界限并不是绝对的，在一定的条件下可以相互转化，例如玻璃在常温时是绝缘体，高温熔化后就变成导体了。

自由电子受电场作用力的影响会向反方向作定向移动，从而形成电流，所以金属易于导电。电流的强弱可用电流强度来表示，

它代表单位时间内通过导体横截面的电量，单位为安培(A)。

自由电子在运动中总要与金属晶格中的正离子碰撞，次数频繁，每秒约 10^{15} 次(见图1-1)。这种碰撞会阻碍自由电子的定向移动。导体阻碍电荷移动的能力称为电阻，其大小与导体长度 l 成正比，与横截面 S 成反比，还与导体材料有关，以下式表示：

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (\Omega) \quad (1-1)$$

式中 S —— 导体横截面积 (mm^2)；

l —— 导体长度 (m)；

ρ —— 导体电阻率 (电阻系数) ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)。

电阻率的倒数为电导率 σ ，以下式表示

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad [\text{m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)] \quad (1-2)$$

我们还可用%IACS (国际退火铜标准) 来表示电导率，这种单位规定退火工业纯铜 (电阻率在温度 20°C 时为 $0.017241 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) 的电导率作为100%IACS。现有电阻率为 $x \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 的某一金属，若需用%IACS来表示，则为

$$\sigma = \frac{1.724}{x} \times 100 \% \text{IACS}$$

各种材料的电阻率见表1-1。

表1-1 电阻率及电阻温度系数

名称	符号	密度 (g/cm^3)	电阻率 (20°C) ($10^{-2} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	电阻温度系数 (20°C) ($10^{-3}/^\circ\text{C}$) ($0 \sim 100^\circ\text{C}$)
银	Ag	10.50	1.6	4.1
铜	Cu	8.90	1.673	4.3
金	Au	19.30	2.3	3.9

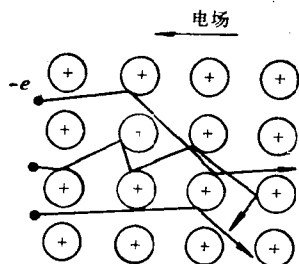


图1-1 金属中电子的运动与晶格中正离子碰撞的示意图

(续)

名称	符号	密度 (g/cm ³)	电阻率 (20℃) (10 ⁻² Ω·mm ² /m)	电阻温度系数 (20℃) (10 ⁻⁸ /℃) (0~100℃)
铝	Al	2.70	2.69	4.2
钼	Mo	10.20	5.7	4.23
钨	W	19.30	5.5	4.6
锌	Zn	7.14	5.92	4.2
镍	Ni	8.90	6.844	6.81
铁	Fe	7.86	9.71	6.51
铂	Pt	21.45	10.6	3.92
锡	Sn	7.30	12.8	4.2
铅	Pb	11.37	20.6	3.36
汞	Hg	13.55	95.8	0.89

2. 影响电阻的主要因素

(1) 温度对电阻的影响 金属的电阻随温度的升高而增大。当温度接近于熔点或接近 0K, 电阻与温度呈下式所表示的线性关系:

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (\Omega) \quad (1-3)$$

式中 R ——温度 T 时的电阻 (Ω);

R_0 ——温度 T_0 时的电阻 (Ω);

α ——电阻温度系数。

电阻温度系数随所选择的起始温度 T_0 而异。当电阻率与温度呈线性关系时, 对不同起始温度的电阻温度系数, 可用下式换算:

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_1(T_2 - T_1)} \quad (1-4)$$

式中 α_1 ——温度 T_1 时的电阻温度系数;

α_2 ——温度 T_2 时的电阻温度系数。

(2) 杂质对电阻的影响 纯金属具有规则的结晶格子, 因此电阻率 ρ 很小。杂质, 即使含量极少, 也会导致金属晶格的畸变, 造成电子散射, 电阻率增加。图 1-2 表示杂质含量不同时铜导电性的变化。

(3) 冷变形对电阻的影响 金属冷加工引起的变形对电阻亦有影响,当冷变形度超过10%时,电阻稍有增加,通常纯金属由冷变形引起的电阻率的增加约为2~6%。

(4) 热处理对电阻的影响 导电金属经冷变形后,强度和硬度增高,导电性降低。退火后,其电导率可得到恢复。退火温度对电导率的影响见图1-4。

二、金属的磁特性

上一节已谈到了一切物质都是由原子所构成的,而原子则是由原子核和电子所组成,这些运动着的电子(它不仅绕核旋转,而且还有自旋)相当于一个闭合回路的电流,这种特殊形式的电流在它自己的周围产生了磁场,因此物质的磁性是电子在原子中的旋转运动所引起的。也就是说,自然界中没有非磁性的物质,它们毫无例外地都具有不同程度的磁性。根据磁性的强弱,又可将物质分为抗磁性、顺磁性和铁磁性三类。

抗磁性物质有氢、

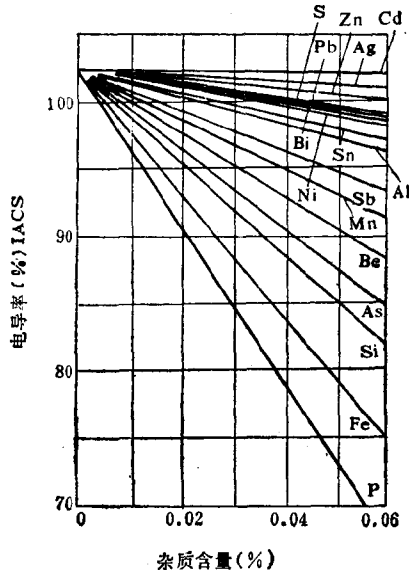


图1-2 杂质对铜导电性的影响

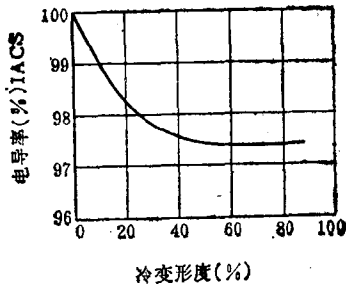


图1-3 冷变形度对铜的电导率的影响

水、金、银、铜、铋等。顺磁性物质有氧、空气、铝、铂等。在较高温度下，铁、镍和钴等也具有顺磁性。无论顺磁性还是抗磁性物质，它们的磁化能力都较弱，其相对磁导率都接近于1。

铁磁性物质有铁、镍和钴，它们对磁场的影响特别强，其相对磁导率很大。

铁磁性物质是强磁性物质，顺磁性和抗磁性物质均为弱磁性物质，为此，在本书范围内，将分为铁磁性和非铁磁性材料二类。

1. 磁场

当一根磁铁棒放在另一根磁铁棒的附近，两根磁铁棒的磁极间产生了相互的作用力，同性相斥，异性相吸。这种作用力，可以认为在该空间存在着磁场。磁场是一种矢量场，它除了有大小的不同，还有方向的差别。用假设的磁力线来描述磁场的强弱和方向，可以看出磁力线从磁铁棒的N极发出，经过空间到达磁铁棒的S极，而在磁铁棒内部，则又从S极返回到N极，如图1-5所示。磁力线密度与磁场强弱成正比，在图中磁铁棒两端磁极区的磁力线最密，所以这个区间的磁场最强。

磁场不只是由磁铁产生，电流也能产生磁场。当长导线内有电流通过时，在电流周围就存在着磁场，如图1-6所示。它是一组组从密到疏、由小到大的同心圆。如果改变电流方向，各点的磁场方向亦随之相反，长导线电流方向跟它的磁力线方向之间的关系可以用右手螺旋定则来判定。在离导线的距离 r 处的磁场强度 H 为。

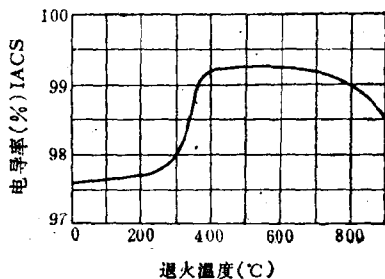


图1-4 退火温度对硬铜线电导率的影响(铜99.92%，冷变形度90%)

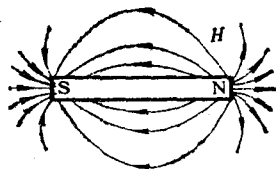


图1-5 磁铁棒的磁力线

$$H = I / 2 \pi r \quad (\text{A/m}) \quad (1-5)$$

式中 r —— 距离 (m);
 I —— 导线通过的电流 (A)。

由式 (1-5) 可知, 流过导线的电流越大, 磁场 H 亦大; 距离导线越近的点, 磁场亦越强。

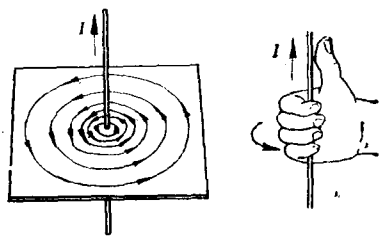
如果圆环导线通以电流, 导线附近磁场的磁力线见图1-7。以半径为 r , 电流强度为 I , 在圆环导线中心处的磁场强度则为:

$$H = I / 2r \quad (\text{A/m}) \quad (1-6)$$

式中 r —— 距离 (m);
 I —— 圆环通过的电流 (A)。

此式表明, 圆环导线中心的磁场强度与通过导线的电流强度成正比, 而与圆环导线的半径成反比。

在实际应用中, 常把导线一圈圈地密绕在圆筒上制成螺线管。通电后, 附近的磁场与条形磁铁的磁场十分类似(见图1-8)。



磁力线分布 安培定则

图1-6 长导线中电流所产生的磁场

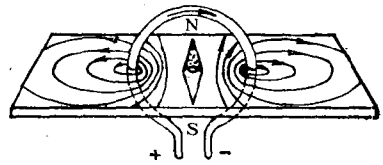


图1-7 圆环导线周围磁场的磁力线

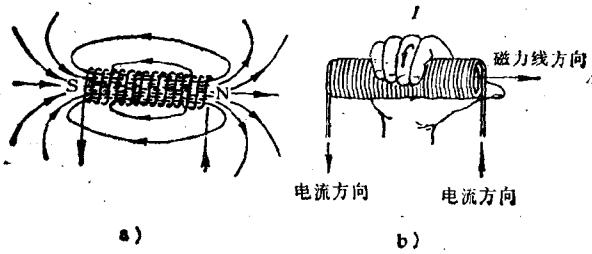


图1-8 通电螺线管周围磁场的磁力线

它的磁力线方向与导线内电流流动方向有关，仍按右手定则来确定。

若螺线管长度为 l ，匝数为 n ，并且是密绕的，就可把它近似看成是由一系列圆环导线叠排组成的。当螺线管的长度远大于管径时，它内部的磁场强度基本上是均匀的，可用下式表示：

$$H = nl \quad (\text{A/m}) \quad (1-7)$$

式中 n ——螺线管单位长度上导线匝数 (T/m)。

由此式可看出，螺线管中各点的磁场强度与电流和单位长度上导线匝数成正比。

假定螺线管上导线总匝数为 N ，螺线管长度为 l 米，上式就改为：

$$H = NI/l \quad (\text{A/m}) \quad (1-8)$$

在螺线管两管端处磁场迅速减弱，其磁场强度只有螺线管内部的一半。

2. 磁化及磁化曲线

没有磁场，铁磁性物质不会表现出自己的铁磁性质，要铁磁性物质表现出磁性，需要经过磁化的步骤。所谓磁化，就是把铁磁性物质放在磁场中，经该磁场的“感应”，物质就表现出磁性来。

当一根铁磁性棒材放在线圈中（如图1-9所示），没有外磁场作用，棒材内部各磁畴（见后节）的磁矩取向呈无规则分布，磁矩是相互抵消的，宏观地看，该棒材不呈现磁性，处于未磁化状态。但当线圈通入电流后，产生了磁场（称磁化场），在磁化场的作用下，各磁畴磁矩在一定程度上沿着磁场方向排列起来，这就是说，棒材被磁化了，对外显示出一定的磁性。

显然，已磁化的棒材体积越大，它的磁矩也越多。为估计样品的磁化程度，通常是以

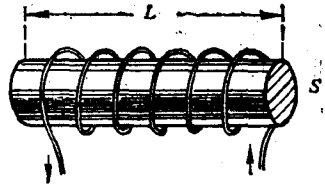


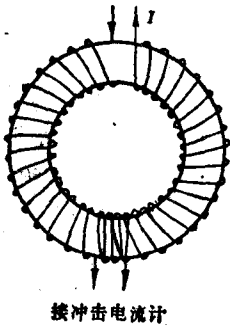
图 1-9 有铁芯的线圈

单位体积内的磁矩——磁化强度 M 来表示，当然它也是个矢量。

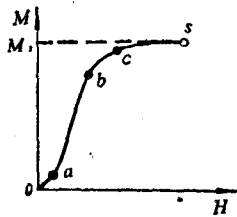
为将问题简化，在此只讨论闭合环状铁芯样品的 $H-M$ 关系，这个关系只能通过实验方法来获得。

如图1-10所示，被测样品的磁化场由绕在环状铁芯上的螺管线圈产生，改变磁场强度是用改变电流大小的方法来得到（见式1-7）。

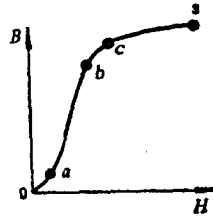
样品处于磁中性状态时，以 $H=0$ ， $M=0$ 为出发点，就可测出 $M-H$ 曲线（见图1-11 a）。当磁场增加时，样品的磁化强度也增加，起初，在很弱的磁场时增加得较慢（如图1-11 a $0a$ 部分），而后随磁场强度的增加，磁化强度增加得很快（如图1-11 a ab 部分），再后磁化强度增加又慢了（如图1-11 a bc 部分），到磁场相当强时，磁化强度的增加实际上很少了（如图1-11 a cs 部分），此时达到饱和状态。这条曲线称之为初始磁化曲线。



冲击电流计



a) 磁化曲线图



b) 磁感应曲线图

图1-10 求磁化曲线的
环状铁芯和线圈绕组

图1-11 磁化曲线及磁感应曲线

研究铁磁性材料的磁化曲线时，应用磁化率 χ 这个量，在磁化曲线上，不同位段的 χ 是不同的，磁化曲线越陡， χ 越大。磁化强度 M 与磁场强度 H 的关系是：

$$M = \chi H \quad (1-9)$$

式中 χ ——磁化率。

我们常常不是用磁化率而是用磁导率 μ ，这样更为方便。在