

电磁场理论的应用

电磁场理论是工科电类专业的一门重要的技术基础课。它在物理电磁学的基础上,进一步研究了宏观电磁现象的基本规律和分析方法,是深入理解和分析工程实际中电磁问题所必须掌握的基本知识,很多实际工程问题只有通过电磁场才能揭示其本质。本部分内容收集了一些电磁场理论应用方面的典型例子,作为学习电磁场理论的参考和补充,藉以增加读者学习电磁场理论的积极性,并进一步了解应用电磁场理论分析、解决实际问题的方法和途径,培养和提高读者解决实际问题的能力。

第一部分 静电场的应用举例

1、悬式瓷绝缘子和玻璃绝缘子的电场分布

分析悬式瓷绝缘子和玻璃绝缘子的电场分布时,可以将其近似认为是同心球极间电场,示意图如图 1 所示

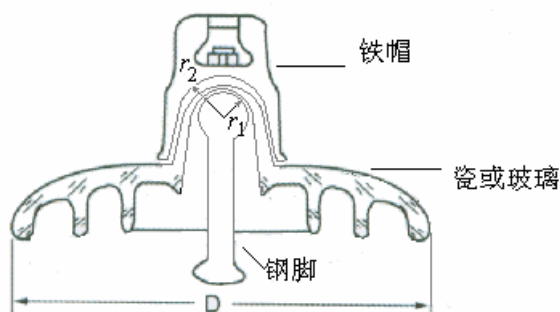


图 1 瓷或玻璃悬式绝缘子极间电场示意图

由高斯定理可得同心球的电极间任一点的电场 $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2}$, E 的最大值在 r_1 处。

$$\text{极间电压 } U = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

故
$$E = \frac{U(r_1 r_2)}{r^2(r_2 - r_1)}$$

而
$$E_{\max} = \frac{U(r_1 r_2)}{r_1^2(r_2 - r_1)} = \frac{U r_2}{r_1(r_2 - r_1)}$$

当 r_2 一定时，改变 r_1 可使 E_{\max} 达到极小值，令

$$\frac{dE_{\max}}{dr_1} = \frac{d}{dr_1} \left(\frac{U(r_1 r_2)}{r_1^2 (r_2 - r_1)} \right) = 0$$

得 $r_1 = r_2 / 2$

此时

$$E_{\max} = \frac{Ur_2}{\frac{r_2}{2} \left(r_2 - \frac{r_2}{2} \right)} = \frac{4U}{r_2}$$

如瓷绝缘子的临界电场强度为 135kV/cm，已知 $r_2 = 5\text{cm}$ ，则允许的最大电压为

$$U_{\max} = E_{\max} \frac{r_2}{4} = 168.75\text{kV}$$

2、电容式传感器

电容量和极板面积、极板间的距离，以及极板间所充的介质有关，改变其中任何一项，就可以改变电容量。利用这个特性，可以构成“电容式传感器”，它可以把物理量的变化转化为电容的变化。如果把这个电容器接在桥式电路中或是一个振荡电路中，就可以把电容的变化，转化成电量的变化。经过放大处理，可以实现对于原物理量的检测或控制。

图 2a、2b 分别为改变面积和介质的电容传感器原理图

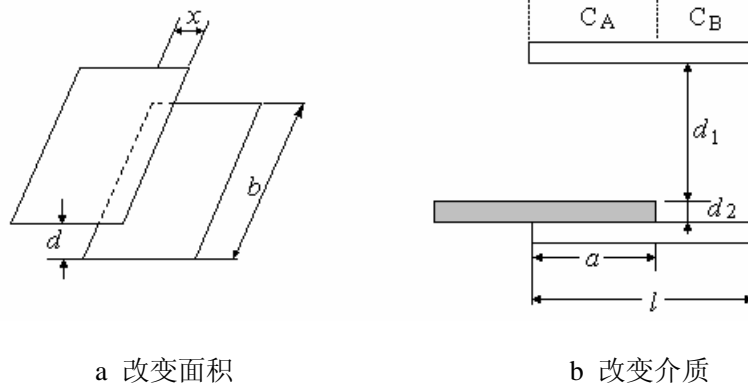


图 2 电容式传感器的原理图

由图 2a 得 $C_x = \frac{\epsilon b x}{d}$ ，其灵敏度为

$$K = \frac{dC_x}{dx} = \frac{\epsilon b}{d}$$

利用这个传感器，可以用来测量物体得位移。

由图 2b 得

$$C_A = \frac{ab}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2}}$$

$$C_B = \frac{(l-a)b}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_1}}$$

故

$$C = C_A + C_B = \frac{lb}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_1}} \left(1 + \frac{a}{l} \frac{1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}{\frac{d_1}{d_2} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \right)$$

可见，变化量与电容量 C 有明确的关系。

在实际应用中，为了提高传感器的灵敏度，常常做成差动式传感器。例如图 3 所示，为一变面积的差动式电容传感器，其中间为一动片，上下两个园筒是定片，当动片上升时， C_1 增大 C_2 减小，当动片下降时则相反，所以动片位置的变化转化成 C_1 、 C_2 的变化。若将其放于桥路中，就可以将电容的变化变换成电压的变化。

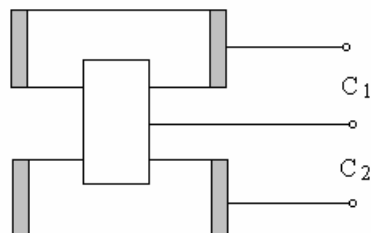


图 3 差动式电容式传感器的原理图

电容式传感器常常用于测量零件的尺寸、物位、位移的变化等等。

3、静电技术应用

任何事物都有两重性，给人们带来许多麻烦的静电能也能变害为利，它在静电分选、静电除尘、静电分离、静电植绒、静电纺纱、静电喷漆、静电复印等方面大显身手。

静电分选:是利用各种塑料不同的静电性能来进行分选的方法。利用静电进

行分选，对于多种混杂在一起的废旧塑料需通过多次分选。静电分选法特别适用于带极性的聚氯乙烯，分离纯度可达 99%。物料经送料系统均匀散布在接地转动电极光滑表面上，荷电的物料与接地转辊电极交换，两种不同静电性能不同的物料有差异。然后荷电的物料进入分选区，在静电力、重力、离心力 等的合力下落。完成两种不同电性物料的分离。

静电复印：现在静电复印得到广泛使用。静电复印机的中心部件是一个可以旋转的接地的铝质圆柱体，表面镀一层半导体硒，叫做硒鼓。半导体硒有特殊的光电性质：没有光照射时是很好的绝缘体，能保持电荷；受到光的照射立即变成导体，将所带的电荷导走。复印每一页材料都要经过充电、曝光、显影、转印等几个步骤，这几个步骤是在硒鼓转动一周的过程中依次完成的。充电:由电源使硒鼓表面带正电荷。曝光:利用光学系统将原稿上的字迹的像成在硒鼓上。硒鼓上字迹的像，是没有光照射的地方，保持着正电荷。其他地方受到了光线的照射，正电荷被导走。这样，在硒鼓上留下了字迹的“静电潜像”。这个像我们看不到，所以称为潜像。显影:带负电的墨粉被带正电的“静电潜像”吸引，并吸附在“静电潜像”上，显出墨粉组成的字迹。转印:带正电的转印电极使输纸机构送来的白纸带正电。带正电的白纸与硒鼓表面墨粉组成的字迹接触，将带负电的墨粉吸到白纸上。此后，吸附了墨粉的纸送入定影区，墨粉在高温下熔化，浸入纸中，形成牢固的字迹。硒鼓则经过清除表面残留的墨粉和电荷，准备复印下一页材料。

静电除尘，具有效率高的优点，现在很多空气净化器就是用静电能吸除空气中的很小的尘埃，使空气净化，静电在环境保护中能发挥重要作用。以煤作燃料的工厂、电站，每天排出的烟气带走大量的煤粉，不仅浪费燃料，而且严重地污染环境。利用静电除尘可以消除烟气中的煤粉。除尘器由金属管 A 和悬在管中的金属丝 B 组成，A 接到高压电源的正极，B 接到高压电源的负极，它们之间有很强电场，而且距 B 越近，场强越大。B 附近的空气分子被强电场电离，成为电子和正离子。正离子被吸到 B 上，得到电子，又成为分子。电子在向着正极 A 运动的过程中，遇到烟气中的煤粉，使煤粉带负电，吸附到正极 A 上，最后在重力的作用下落入下面的漏斗中。静电除尘用于粉尘较多的各种场所，除去有害的微粒，或者回收物资，如回收水泥粉尘。

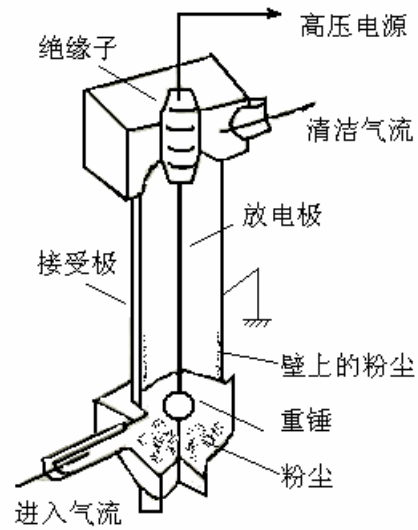


图4 静电除尘原理图

静电喷涂:设法使油漆微粒带电,油漆微粒在电场力的作用下向着作为电极的工件运动,并沉积在工件的表面,完成喷漆的工作.这就是静电喷涂.用静电喷涂家用电器如洗衣机、电冰箱的外壳非常均匀。

第二部分 恒定电场应用举例

由于媒质具有导电性，在有电场存在的区域都有电流存在。电场恒定，则媒质中的电流也恒定。这种与恒定电场同时存在的恒定电流区域称为恒定电流场。

恒定电场在电磁场课程中所占比例较小，但其应用却很广泛。直流电路的应用实质上就是恒定电流场的应用，只是把场限制在特定的线路中。现代大型铝电解槽，其工作电流达 100kA。由于巨大电流所带来的电磁力作用于铝液问题，已成为国内外研究的重要课题。使电流场的应用理论又进一步丰富。实际电工设备如电缆头、高压套管、绝缘子、电机和变压器等的似稳电场与一些非电工程中的物理量的模拟都运用了恒定电场的理论。另外，跨步电压和接地电阻等等的计算都有用到恒定电场理论。

在输油管、水管等其他金属管道的无损检测和在线监测上，应用恒定电场的理论，开发了各种裂纹探测仪器。

在地质勘探、探矿采矿及油田的勘探等一系列重大问题上，恒定电场的理论得到广泛的应用，形成了专门的学科——电法勘探。电法勘探的方法非常多，其应用范围也在不断扩大，例如，一种利用电阻率法注入恒定电流场，探测堤坝漏水的仪器在江、河、水库堤坝上得到广泛应用，它能探明重大漏水险情、蚁穴、管涌及渗漏、临江侧集中渗漏进水点等，为及时抢护加固，预防大堤决口发挥了重要作用，并为洪水过后彻底处理堤防隐患提供了科学依据。

在超导理论中，也涉及到恒定电场理论。

地震的准确预报是目前尚未解决的重大课题。目前，有日本科学家提出从地电阻率的改变中来进行预报的思路受到广泛的重视。

1、裂纹测深仪

裂纹测深仪的应用场合在：（1）系统运行过程中使用——通过定时监测，掌握构件上裂纹的发展状况，保证系统安全运行。用变针距探头，配合计算机通讯，可实现设备安全或生产质量的在线检测和预报。（2）加工制造过程中使用——根据测量结果和制造要求制定修补措施或决定对工件的取舍。

裂纹测深仪采用电位检测法。电位检测法又称电位差检测法或电导检测法，

其物理原理基于金属的导电性。它已应用到裂纹深度测量、板材厚度测量、焊缝熔深检测、表面淬硬层、渗层深度和复合板结合层质量检测等诸多方面。

当一定值电流流经被检金属试件时，试件两端的电位差应服从欧姆定律： $U=IR$ ，由于电流 I 为恒定值，故电位差 U 仅取决于试件的电阻 R 。电阻 R 是受材料中许多因素影响的，例如试件的几何形状、尺度、试件自身的材质、试件是否有缺陷存在、缺陷的尺度、方向等。利用电位差与上述因素之间的对应关系可以实现对试件几何尺寸的测量；可以用于材质检验；缺陷检测及对裂纹深度的测量等等。

裂纹深度测量原理：当电流从被检工件的检验部位通过时，将形成一定的电流、电位场。如工件表面存在裂纹，随着裂纹的形位、尺度的不同，它对电流电位场的影响也不同。利用测量电位分布的方法来判断金属材料中裂纹的状况，是电位法测量裂纹深度的依据。图 5 所示是将四个电流电极（或称电流探针）分别直线排列放置在工件的无裂纹部位（a）和有裂纹部位（b）时的电流、电位场。一个恒定的电流通过电流探针 A 和 B 在工件中产生电流场和一个与材料的组成和结构特性有关的电位分布，通过另一对电极 c 和 d 可以检测某两点间的电位差，并在电压表上显示。假定与材料有关的影响因素和几何尺寸均相同，以相同的电流分别在无裂纹和有裂纹的试样上测试，显然在测量极 c 和 d 之间无裂纹试样的电位差与有裂纹试样的电位差之间的差异是由裂纹引起的。如果保持试验电流、被检工件材质、厚度不变，而只有裂纹深度变化时，则该电位差是一个裂纹深度的函数，通过标定可将电测系统取得的电位差信号转化成裂纹尺寸，从而实现裂纹深度的测量。

一个探伤仪系统由电源、探头、测量回路、显示器构成。探头分向工件被检部位通以恒定电流的电流探针和拾取电位差信号的测量探针。电源用于提供足够大的高稳定激励电流，探头的电流探针在工件被检部位建立电场，测量探针拾取电位信号，经测量回路放大供显示器显示。

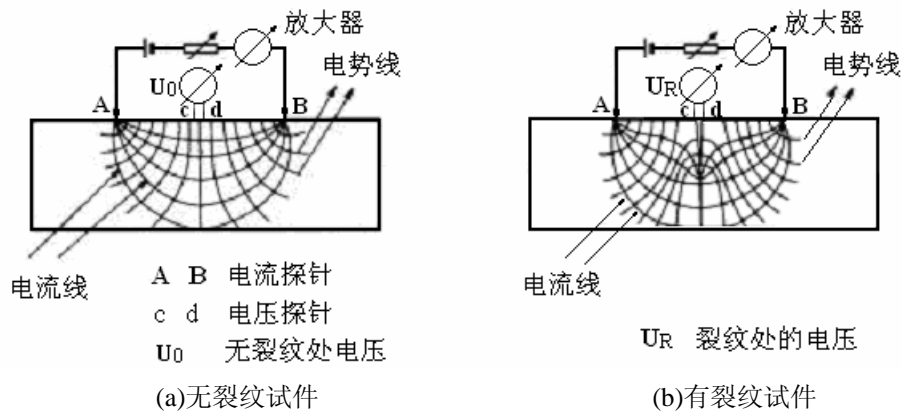


图 5 电流电位场

系统工作框图：

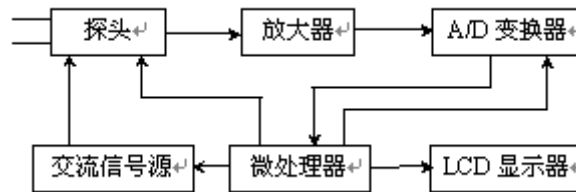


图 6 系统工作框图

(http://www.chivykarl.com.cn/CrackDepth_1.htm)

2、电法勘探

根据地壳中各类岩石或矿体的电磁学性质（如导电性、导磁性、介电性）和电化学特性的差异，通过对人工或天然电场、电磁场或电化学场的空间分布规律和时间特性的观测和研究，寻找不同类型有用矿床和查明地质构造及解决地质问题的地球物理勘探方法。主要用于寻找金属、非金属矿床、勘查地下水资源和能源、解决某些工程地质及深部地质问题。电法勘探的方法，按场源性质可分为人工场法（主动源法）、天然场法（被动源法）；按观测空间可分为航空电法、地面电法、地下电法；按电磁场的时间特性可分为直流电法（时间域电法）、交流电法（频率域电法）、过渡过程法（脉冲瞬变场法）；按产生异常电磁场的原因可分为传导类电法、感应类电法；按观测内容可分为纯异常场法、总合场法等。我国常用的电法勘探方法有电阻率法、充电法、激发极化法、自然电场法、大地电磁测深法和电磁感应法等。

电法勘探中的电阻率法常用的几种方法有：电剖面法；电测深法；高密度电

阻率法。

电剖面法全称电阻率剖面法，采用固定电极距的电极排列，沿剖面线逐点供电和测量，获得视电阻率剖面曲线。通过分析对比，了解地下岩、土层电性变化，有效地解决某些地质问题。如追索构造破碎带，划分不同岩性陡立接触带，地下暗河、溶洞等。现场工作方法：（1）联合剖面法；（2）对称四极法；（3）复合对称四极法；（4）中间梯度法。

电测深法又称电阻率垂向测深法。它是对同一个测点，用一系列由小到大的极距进行视电阻率测量，反应由浅至深的地层垂向变化情况。通过对现场实测曲线进行分析和解释，可对观测点处垂向各地电性层的厚度和电阻率的大小。

电测深法最适合于解决产状近水平，具有明显性差异的下列工程地质问题：（1）查明基岩埋深，确定覆盖层厚度，查明基岩风化层发育深度，划分有较明显电性差异的第四纪分层等；（2）查寻岩溶发育带，确定具有明显电性差异的断层破碎带，并了解其产状。现场工作方法：（1）三极测深；（2）对称四极测深；（3）环形测深。

高密度电阻率法又称高密度电法。它的基本原理与普通电阻率法相同，它集中了电剖面法和电测深法的特点，由仪器的先进设计及资料处理能力及高密度电法仪，能快速而准确地获取丰富的地下信息。一条高密度电法测线能了解地下一个面状信息，通过合理布置测线，能三维勾划地质体，从而达到立体勘探。对解决圈定岩溶大小、断层破碎带的追索等地质问题非常有效。

从恒定电场的应用角度，介绍一种常用的现场工作方法——对称四极测深，对称四极剖面装置如图 7 所示。

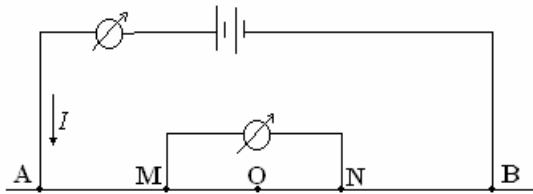


图 7 对称四极剖面装置

装置形式为四个金属电极 AMNB 沿测线对称 O 点分布。其中两根 A、B 与电源相接，分别向地表注入电流 I 及 $-I$ ，另两根 M、N 与电压表相接用于测量电压。则 A、B 连线上任一点 M 的电位为

$$\varphi_M = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{AM} + \frac{-I\rho}{2\pi} \frac{1}{BM}$$

故 A、B 连线上任意两点 M、N 间的电位差为

$$U_{MN} = \varphi_M - \varphi_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)$$

根据上式，土壤电阻率 ρ 就可以由电流 I 、电压 U_{MN} 和各点间的距离得出

$$\rho = \frac{U_{MN}}{I} \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}$$

简记为

$$\rho = K \frac{U_{MN}}{I}$$

式中 $K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}$ ，称为“布极常数”。这种运用四个电极进行的

土壤电阻率测量的方法，称为“四极法”。

运用“四极法”所测得的土壤电阻率，称为土壤的视电阻率，视电阻率含有平均的意义。值得注意的是，虽然不同的土壤结构其视电阻率不同，然而当土壤结构不变，布极方式与距离的配置不同时，所得的视电阻率也是不同的。这是因为电流所流经的路径不同，所遇到的接地电阻不同之故。如图 8 所示。

从图 8 可以看出，固定测点距离 MN 不变，当 AB 之间距离较小时，亦即当第一层土壤厚度 $h_1 \geq \frac{AB}{2}$ 时，大部分电流流经靠近地表的岩层土壤，四极法所测

得的视电阻 ρ 几乎与靠近地表岩层的电阻率 ρ_1 相等。当 AB 增大时，使 $h_1 \approx \frac{AB}{2}$ ，

则相当一部分电流流经深部岩层土壤，这时深部的岩层的导电性能就会反应出来，而 $\rho_2 > \rho_1$ 的情况下，那么测得的 ρ 就会大于 ρ_1 而小于 ρ_2 。若再加大 AB 间的距离第一层相对变薄，其作用可以忽略，此时，所测得的视电阻 ρ 几乎与第二层的土壤的电阻率 ρ_2 相等了。

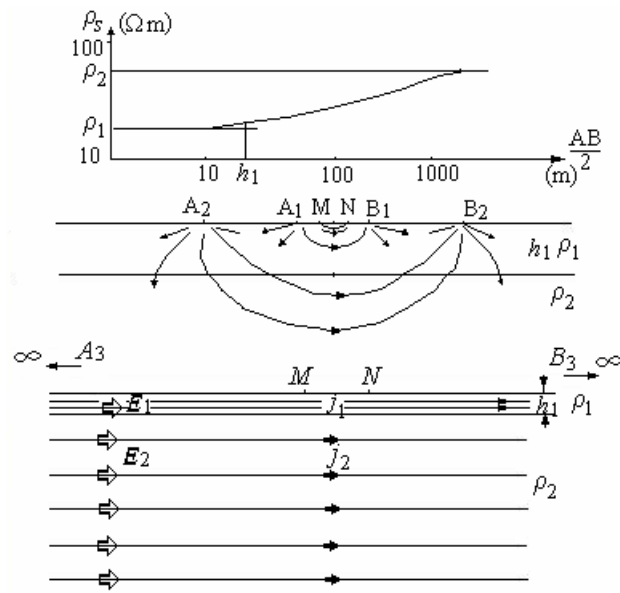


图 8 电流分布与供电电极间距离的关系

按此方法，若以距离的对数为横坐标，以相应测得的视电阻值为纵坐标，就可以得到某测点（指 MN 所在位置）的视电阻率测深曲线，它反应了该点附近土壤视电阻率随深度变化的关系，根据它，可以推测出地下岩层是否存在断裂情形。

以上只是列举了一个简单的例子来说明恒定电场理论在地质勘探方面的应用，一本电法勘探的著作就是电磁场理论在地质勘探中的应用的专著。

第三部分 恒定磁场应用举例

我国是发现和使用天然磁石最早的国家，早在两千多年前的春秋战国时期我们的祖先就发现了能够吸引铁的“慈石”。在西方，磁现象首先由古希腊著名的哲学家泰勒斯发现。公元前三世纪的战国时期，在《韩非子》这部著作中，记载了用磁石指示方向的仪器——司南，后将磁针装在轴上，放在盒子里，成为罗盘。后来，指南针经阿拉伯传入欧洲，在航海领域显示出巨大的价值。

在磁的本质探索方面，经过了长期多次的反复曲折过程。直到 1820 年，丹麦物理学家奥斯特发现了电流的磁效应，才使数百年的电磁无关论的错误思想得到了纠正，开辟了电磁两者相结合的研究道路。电流的磁效应发明后，制造出了电磁铁，开创了磁学应用的新时代，1831 年，英国科学家法拉第发现了电磁感应现象和电磁感应定律，使发电机登上了历史的舞台，是一个划时代的发现。

当前，人们已经认识到，“磁”是一种普遍存在的物质，小至电子、原子、分子，大至地球、太阳系、银河系都有或强或弱的磁场。人体内部的心、肺、大脑和肌肉也存在着微弱的磁场，磁在探病和治病方面已经取得了大量的成就，成为磁场应用的一个重要的分支。

磁记录技术已成为磁学应用的一个重要的分支。磁悬浮列车已在我国上海开始运行，它是利用车厢底部的强磁场与放在两条铁轨之间的定子绕组之间的电磁力，使列车浮起，不再与铁轨接触，由于没有摩擦阻力，可以实现高速运行。

利用磁场控制电子的运动，制造出各种各样的电子仪器设备，如电子显微镜、加速器、示波器、显像管等等。在核物理研究中使用的磁谱仪，也是利用磁场对带电粒子的作用来测定新元素和新同位素以及各种基本粒子的能量。

在电机、电器、变压器、电磁仪表、电磁铁和各种电气设备中，常利用长短不同的螺管线圈获得磁场，如亥姆霍兹线圈，它是两个半径相等的圆形线圈，线圈之间的距离等于线圈的半径，可以在轴线中点附近获得均匀磁场。电视显像管的偏转线圈套在显像管的管颈上，中间产生一个均匀的磁场。磁镜是由很多匝线圈绕成的直管形状的管室，两端线圈的匝数比中间密，从而两端磁场比中间强。这样，绕着磁力线旋转进来的粒子进入端口的强磁场区域，就会受到一反作用力。这个力迫使粒子的速度减慢，轨道的螺距缩短，然后停下来并反射回去，反射回

去的粒子达到管子中心区域后，又向另一端旋进，达到端口后又被反射回来，就像光在两个镜子之间来回反射，称为磁镜。它用于热核反应中约束等离子体的约束系统，称为“磁约束系统”。

工业企业中，经常碰到非电量的测量问题，一般是将其转换成电学量，再进行测量。电测法测量范围广，可实现远距离测量，精度高，测量结果可以用数字显示并进行处理。测量机构一般又三个基本部分组成：传感器、测量电路和输出电路。非电量转换成电量由传感器完成。电感式传感器利用电磁感应原理、磁伸缩效应或压磁效应等磁场的基本原理将非电量转换成电量。

磁性液体，又简称磁流体、磁液。是纳米尺寸的磁性微粒均匀分散、悬浮在油基液中构成地超顺磁性材料。它在重力场、磁场、离心力场中都很稳定、固液不分离。国外已在航空、航天、电子、仪表、机械、冶金、环保、医疗等领域广泛应用。目前最精彩的应用是在各种工况下的旋转轴动态密封。还可以作转动轴的润滑剂，填充磁隙的填充剂，代替硅钢和铁氧体等固体磁性材料作为变压器的铁心。磁性液体扬声器是将磁性材料注入扬声器的音圈气隙对音圈的运动起一定的阻尼作用，并能使音圈自动定位，音圈发热可以通过磁性材料散发，在同样结构的条件下可提高扬声器的输入功率达两倍之多，同时，可以改善其频率特性，提供保真度。磁性液体还可以做成旋转和线性阻尼器件，可消除外界振动噪声的干扰，保证精密仪器的正常工作。在分离不同比重的非磁性矿物方面，磁性液体也发挥着独特的作用。另外，还有用于精密研磨和抛光磁性液体技术、磁性液体开关、用于测量石油勘探中钻头的加速度和倾斜的磁性液体传感器，因此磁液的应用前景广阔。

在其他方面，磁场拉线装置、磁场打磨装置、利用磁场进行高速焊接、高梯度磁场分离技术应用于污水和工业废水中的金属杂质等等使古老的磁学焕发出新的活力，并且开拓出许多应用的新领域。

1、医学方面的应用之一——磁疗

磁疗是利用磁场作用于人体治疗疾病的方法。世界上的一切物体，小至基本粒子，大至天体都具有一定的磁性。地球本身是一个巨大的磁场。地球上的一切生物和人体一直受着地磁场这一物理环境因素的作用，地磁场成为生物体维持正

常生命活动的不可缺少的环境因素。在二千多年前，我国西汉时代已利用磁石（ Fe_3O_4 的天然矿石）来治病。在国外，在 16 世纪末已制成各种磁疗器械，如磁椅、磁床、磁幅等用于临床。近 20 年来，国内外对磁场的生物学作用进行了广泛的研究，包括磁场的治疗和诊断疾病的应用，磁卫生学、磁生态学、生物磁学等，并且取得了明显的进展。

（1）恒定均匀磁场对肿瘤的作用

恶性肿瘤是当今世界危及人类生命的主要疾病之一，积极有效的治疗至今仍未获得突破性进展。人们仍在不断探索和寻求治疗肿瘤的各种方法。应用磁场的物理特性，对肿瘤进行治疗是近年来才开始研究的课题，可望为恶性肿瘤的综合治疗提供新的途径和方法。

恒定均匀磁场是由于优化磁路设计的超导磁体或恒磁体所产生的磁场。它的主要特点是要求磁场在一定范围内磁场强度保持均匀恒定。恒定均匀磁场的强度一般为 $0.05\sim 1.5\text{T}$ ，有的可达 $2\sim 4\text{T}$ 。主要应用于医学成像和波谱学的研究。因此，MRI 的恒定均匀磁场可作为一种新的研究手段，用于肿瘤的研究。西安医科大学第一附属医院影像中心的研究人员经过试验证明，磁场可加速肿瘤细胞凋亡的发生，从而达到抑制肿瘤生长的作用。

（2）磁化水及其应用

水以一定流速（0.1 米/秒左右），垂直于磁力线方向通过磁场后，即为磁处理水。为此制有专门的磁水器。磁水器的磁场强度一般为 $200\sim 500\text{mT}$ ，水流切割磁场数次至十几次。磁处理水能使水分子间的结合状态发生变化。水并非均以单分子 H_2O 所组成，水分子之间存在力的作用呈结合状态。水分子是极性分子，当水分子通过磁场时，其两端正、负电荷受到劳伦兹力的作用，水分子发生形变而改变了水分子的结合状态，从复杂的长链折散成简单的短链。这样水容易渗入坚硬水垢的缝隙中，使原来较坚固的大块结晶变成小圆球，而使原来较松软的结石表现为平板破碎。长期饮用大量磁处理水，对结石的局部及周围组织的慢性炎症有溶解、冲洗和消炎作用。

2、磁记录技术

磁记录（写入）再生（读出）是由以磁性材料为主构成的磁头完成的。记录

磁头是把电信号转变为磁场，这种磁头由线圈、软磁合金铁芯构成。磁介质是硬磁材料，为使磁化反转记录头必须产生一强磁场，它们之间相对移动在介质上就形成连续的磁化图形。再生磁头则是介质磁场转变成电信号，从而读出所记录的信号。

以磁盘机、磁带机为代表的数字磁记录设备作为计算机外存设备的主体，几十年来在外存领域一直占据统治地位。近年来，磁光盘和大容量半导体存储器的发展，已对磁记录的地位构成了一定的威胁。磁记录设备必须进一步提高记录性能、增大容量、缩小体积，才能适应计算机不断发展的需要，巩固其在外存领域的地位。另一方面，随着计算机应用领域的扩大，对外存设备的环境适应能力也提出了越来越高的要求。特别在军事、航天以及高温高湿高污染等特殊应用场合，不仅要求设备具有优良的存储记录性能，而且要求它们具有优良的抗恶劣环境的能力，以保证在这些条件下工作的可靠性。磁盘、磁带等磁记录介质是磁记录设备中记录和存储信息的载体，它们的性能对磁记录设备的记录性能和环境适应能力有着决定性的影响。因此，为了适应计算机的发展和实际应用的需要，除了不断开发新型的高密度记录介质外，还必须改进和提高介质抗恶劣环境的能力。数字磁记录介质的发展概况及动向。

磁记录技术已有近一个世纪的发展历史。从本世纪 50 年代起，随着计算机的发展，磁记录技术在数字磁记录领域获得了广泛的应用。这一技术数十年来一直长盛不衰，主要原因在于记录性能的不断改进和提高。过去 30 年来，磁记录设备的记录密度提高了近 1000 倍。由于磁头、磁道定位技术，读写信道电子学以及磁记录介质等方面的进步，当初预测的密度极限不断突破。近年来，在硬盘中已经实现了 $1 \sim 2 \text{ GB/in}$ 的记录密度。随着这些技术的继续改进，磁记录系统的性能还将获得进一步提高。

3、电感式传感器

传感器由两个基本部分组成，敏感元件又称预变换器，它的任务是将被测的非电量转化成易测的非电量。对于易测的非电量，就不需要这个环节。变换器是将被测非电量变换成电量的器件，又称变换元件。没有敏感元件的传感器也称为变换器。

变换器的种类很多，按其输出电信号的性质来分，有电参数变换器（包括电阻式、电容式、电感式和频率式）和电量变换器（包括电压、电荷等），下面仅介绍自感式变换器，自感式变换器又分为闭磁路自感变换器和开磁路自感变换器两种类型。

（1）闭磁路自感式变换器

如图 9（a）所示， A 为固定铁心， B 为可动铁心且用拉簧定位。

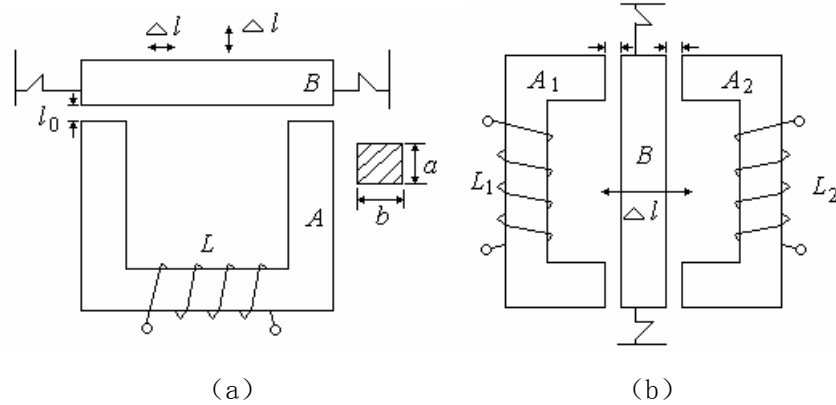


图 9 闭磁路自感变换器

线圈中未通过电流时， A 、 B 间有一定的距离 l_0 ，铁心截面 $S=ab$ ，线圈的匝数为 N ，则线圈的自感可用下式计算

$$L = \frac{\psi}{I} = \frac{N\phi}{I}$$

根据磁路定律有

$$\phi = \frac{NI}{R_m}, \quad R_m = \sum \frac{l_k}{\mu_k S_k} + \frac{l_0}{\mu_0 S_0}$$

式中 R_m 为磁阻， l_k 、 μ_k 、 S_k 分别为铁心第 k 段的长度、磁导率和截面积， l_0 、 μ_0 、 S_0 分别为铁心空气隙的长度、磁导率和等效截面积，铁心不饱和时，铁心的磁阻可以忽略不计。将 ϕ, R_m 表达式代入 L 的计算式，得

$$L = \frac{N^2 \mu_0 S_0}{2l_0}$$

可见， L 与 S 及 l_0 有关，利用这一点， S 及 l_0 可以作为变换器得输入量，当铁心上下移动或左右移动时，改变 S 或 l_0 这种输入量为直线位移。改变可动铁心得形状，让其旋转，输入量也可以是角度，当 B 旋转时，可以改变气隙的有效

面积。变换器还可以做成差动式，如图 9 (b) 所示。调整 B 使无输入量时的两个线圈的电感相等，若有输入量时，一个线圈的电感变大，而另一个的电感变小。

(2) 开磁路自感变换器

开磁路自感变换器由空心螺线管中间插入铁心构成。当铁心发生直线位移时，螺线管具有不同的电感，因此，输入量时直线位移，输出量是电感。这种变换器的铁心磁路只占一部分，空气的磁路很长，故称开磁路。

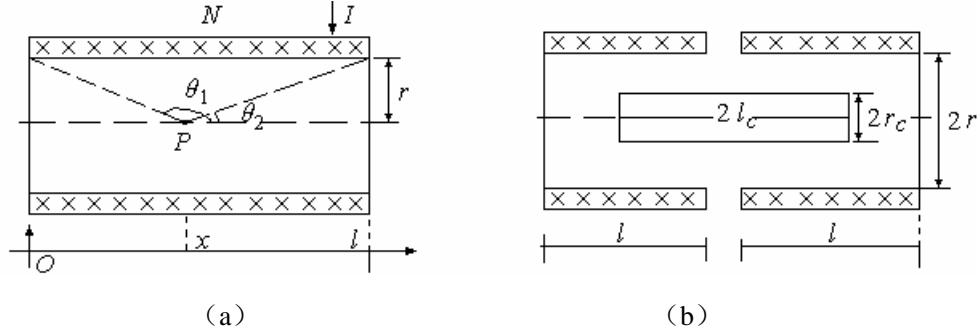


图 10 开磁路自感变换器

如图 10 (a) 所示空心螺线管长度为 l ，总匝数为 N ，内半径为 r ，通有电流 I ，则中心线上任一点的磁感应强度为

$$B = \frac{N\mu_0 I}{2l} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1)$$

当 $l \gg r$ 时，螺线管中间一段的磁场近似均匀，因此可以略去磁感应强度的径向分量。取平均磁感应强度作为螺线管内磁感应强度，即

$$\begin{aligned} B &= \frac{N\mu_0 I}{2l} \frac{1}{l} \int_0^l (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) dx \\ &= \frac{N\mu_0 I}{2l} \frac{1}{l} \int_0^l \left(\frac{l-x}{\sqrt{r^2 + (l-x)^2}} + \frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}} \right) dx \\ &= \frac{N\mu_0 I}{l^2} (\sqrt{r^2 + l^2} - r) \end{aligned}$$

空心螺线管的电感为

$$\begin{aligned} L_0 &= \frac{\psi}{I} = \frac{N\phi}{I} = \frac{\mu_0 N^2 \pi r^2}{l^2} (\sqrt{r^2 + l^2} - r) \\ &\approx \frac{\mu_0 N^2 \pi r^2}{l^2} \end{aligned}$$

若有一半径为 r_c 、磁导率为 μ 的铁心插入此螺线管内，长度为 l_c ，则与 L_0 的式子相似，其电感值为

$$L_{Fe} = \frac{\psi}{I} = \frac{N\phi}{I} = \frac{\mu_0\mu_r N^2 \pi r^2}{l_c^2} \left(\sqrt{r_c^2 + l_c^2} - r_c \right)$$

由于 $\mu \gg \mu_0$ ，故有铁心的螺线管的电感可写成为

$$L = L_0 + L_{Fe} = \frac{\mu_0 N^2 \pi}{l^2} \left[r^2 \left(\sqrt{r^2 + l^2} - r \right) + r_c^2 \mu_r \left(\sqrt{r_c^2 + l_c^2} - r_c \right) \right]$$

近似写成为

$$L = \frac{\mu_0 N^2 \pi}{l^2} \left[r^2 l + r_c^2 \mu_r l_c \right]$$

开磁路自感变换器常做成差接式，如图 10（b）所示。左右两个螺线管完全一样，铁心的初始位置放在两个螺线管的中间，所以，两个螺线管的初始电感值相等，当铁心移动 Δx 时，一边电感增加，另一边电感减小，即

$$L_1 = \frac{\mu_0 N^2 \pi}{l^2} \left[r^2 l + r_c^2 \mu_r (l_c + \Delta x) \right]$$

$$L_2 = \frac{\mu_0 N^2 \pi}{l^2} \left[r^2 l + r_c^2 \mu_r (l_c - \Delta x) \right]$$

利用这一差异，就可以进行测量。

第四部分 时变电磁场的应用举例

1831 年法拉第发现的电磁感应定律是时变电磁场特有的规律之一，磁场的变化可以产生电场，不仅为电磁场的完整方程打下了基础，而且表明机械能可以转化成电能。电磁感应定律为设计发电机、电动机和变压器等电工设备提供了理论依据。从而促进了电力工业和电气化的发展。法拉第还提出了场的概念。1862 年，麦克斯韦提出位移电流的假设，说明电场的变化也会产生磁场，并将电磁场理论归结为四个微分方程，即麦克斯韦方程。在此基础上，他预见到电磁波的存在。1990 年，坡印亭提出了能流理论。1900 年左右洛仑兹和彭加勒提出关于电磁冲量和电磁能流的相联系的知识。1901 年列别节夫进一步证明了场的物质属性。

我们经常碰到的电磁问题，可以说极大多数属于时变电磁场问题。其变化频率分布在一个广泛的范围内。由电力工业 50Hz 到电话、广播的音频范围，到各种频段的无线电波，以至电视、雷达、光纤通讯等等。除了电磁波在无线电的应用外，还在检测控制、高频加热、地质勘探、电磁干扰及危害等方面，也需要对有关电磁问题进行研究。

1、电磁感应现象及其应用

1831 年 8 月，法拉第把两个线圈绕在一个铁环上，线圈 A 接直流电源，线圈 B 接电流表，他发现，当线圈 A 的电路接通或断开的瞬间，线圈 B 中产生瞬时电流。法拉第发现，铁环并不是必须的。拿走铁环，再做这个实验，上述现象仍然发生。只是线圈 B 中的电流弱些。为了透彻研究，电磁感应现象法拉第做了许多实验。1831 年 11 月 24 日，法拉第向皇家学会提交的一个报告中，把这种现象定名为“电磁感应现象”，并概括了可以产生感应电流的五种类型：变化着的电流、变化着的磁场、运动的稳恒电流、运动的磁铁、在磁场中运动的导体。法拉第之所以能够取得这一卓越成就，是同他关于各种自然力的统一和转化的思想密切相关的。正是这种对于自然界各种现象普遍联系的坚强信念，支持着法拉第始终不渝地为从实验上证实磁向电的转化而探索不已

电磁感应现象是电磁学的重大发现之一，这一重大发现进一步揭示了电和磁

的密切联系，为后来麦克斯韦建立完整的电磁理论奠定了基础。根据这一发现后来发明了发电机、变压器等电气设备，使电能在生产 and 生活中得到广泛应用，开辟了电气化时代。

（1）电感器和变压器

电感器（电感线圈）和变压器均是用绝缘导线（例如漆包线、纱包线等）绕制而成的电磁感应元件，也是电子电路中常用的元器件之一。

自感：当线圈中有电流通过时，线圈的周围就会产生磁场。当线圈中电流发生变化时，其周围的磁场也产生相应的变化，此变化的磁场可使线圈自身产生感应电动势（电动势用以表示有源元件理想电源的端电压），这就是自感。

互感：两个电感线圈相互靠近时，一个电感线圈的磁场变化将影响另一个电感线圈，这种影响就是互感。互感的大小取决于电感线圈的自感与两个电感线圈耦合的程度。电感器的主要作用是对交流信号进行隔离、滤波或与电容器、电阻器等组成谐振电路。变压器是利用电感器的电磁感应原理制成的部件。

变压器是利用其一次（初级）、二次（次级）绕组之间圈数（匝数）比的不同来改变电压比或电流比，实现电能或信号的传输与分配。其主要有降低交流电压、提升交流电压、信号耦合、变换阻抗、隔离等作用。

（2）电机

电磁感应原理的最重要的应用之一是电机。电磁感应的最重要的应用之一是电机。图 11 所示是简单的交流发电机的原理图。

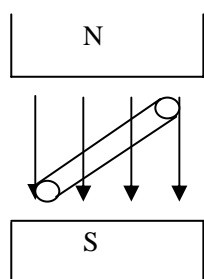


图 11 简单的交流发电机的原理图

一个线圈在均匀的磁场中旋转，由于线圈转动，穿过它的磁通便要发生改变，

在线圈中便产生了感应电动势。

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(BS \cos \omega t) = BS\omega \sin \omega t$$

如果把这个线圈接到一个电阻 R ，将引起电流 $i = e/R$ ，提供的电功率为 $P_{\text{电}} = ie = BS\omega \sin \omega t$ 。这个载流线圈在磁场中旋转，要受到磁场力，为了抵抗磁场力所做的机械功等于转矩 τ 与角速度 ω 的乘积，而转矩 τ 又等于线圈磁矩 iS 和磁感应强度 B 以及它们间夹角的正弦的乘积，故有： $P_{\text{机}} = \omega i S B \sin \theta$ 。它正好等于 $P_{\text{电}}$ ，可见机械功通过电磁感应转换为电功。

再来研究一下常用的感应电动机，它也是基于电磁感应的原理而工作的。感应电动机的定子由三组互成 120° 的绕组构成，其中通入三相对称电流。其产生的合成磁场是在空间不断旋转的“旋转磁场”，其转速为 $n_0 = \frac{60f}{p} r/\text{min}$ ， p 为磁极对数。感应电动机的转子通常是鼠笼式的转子（它由铜条两端用铜联接起来，形似鼠笼），相当于一个短路的次级线圈，由于转子线圈和旋转磁场的相互作用，在转子中产生感应电动势和电流。而感应电流和旋转磁场产生的电磁力，便使转子旋转起来。转子的转速 n 和旋转磁场的转速 n_0 并不相等，否则就没有感应电动势了，二者的差叫做转差率 s ， $s = \frac{n_0 - n}{n_0}$ ，它是感应电动机的一个重要参量。

（3）感应式传感器

前面已经介绍过电感式传感器，它是将机械量变为电感量的变化，达到测量的目的。在一对磁极间平放一绕组，它是直接和电磁感应有关的感应式变换器，当绕组 ω 不动时，其两端的感应势为零。当 ω 在被测量作用下运动时，与其键连的磁通发生变化，在绕组中便会引起感应电动势，感应电动势的大小和运动的速度成比例。绕组不动，使磁铁运动，也可达到同样的效果。另一种感应式变换器中，永久磁铁及线圈均不动，电动势则由改变磁阻和磁通的方法产生。图 12 所示结构中。

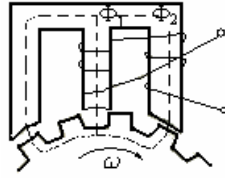


图 12 电感式传感器原理图

在带齿转子旋转过程中，磁通在绕组间交替分配，（如 Φ_1 、 Φ_2 。当铁心对准转子齿时，磁通最大，而当铁心对准转子槽时，磁通最小。）从而在绕组中感应出电动势，其频率决定于转速和齿数。这种变换器可用于测量转轴转速的仪表中。将感应式变换器的输出电压进行积分和微分，也可用来测量位移和加速度。

2、涡流与集肤效应的应用

在电机中，当槽内线圈的铜排通以交流电时，将产生槽内漏磁场，铜排与定子交变磁场交链，在不同槽高处交链的情况不同，在各铜排中感应的漏磁感应电动势不等，导致在各根导体之间形成涡流，而使导体截面的电流密度沿槽高分布不均匀，且越靠近槽口处的电密越高，形成电流的集肤效应。集肤效应使导体内的有效电阻和铜耗增大。

在变压器铁心中的变化磁场，其分布也是不均匀的。并且变化的磁场引起包围它的电场和电流，这种电流称为涡流。

磁的集肤效应和涡流引起的损耗，是设计变压器和电器时考虑的问题之一。

（1）电机槽中导体的电流分布

如图 13 所示，假设槽内有 n 根导体。导体次序自槽底数起，选取合适的坐标系，使电流密度 \mathbf{J} 只有 Z 轴分量 J_z ，因而电场 \mathbf{E} 只有 Z 轴分量 E_z 。假定铁心的磁导率足够大，铜排导体所产生的槽漏磁通，垂直地从齿地侧面穿出，平行地跨过槽宽而在铁心中闭合，所以磁场 \mathbf{H} 只有 X 轴分量 H_x 。

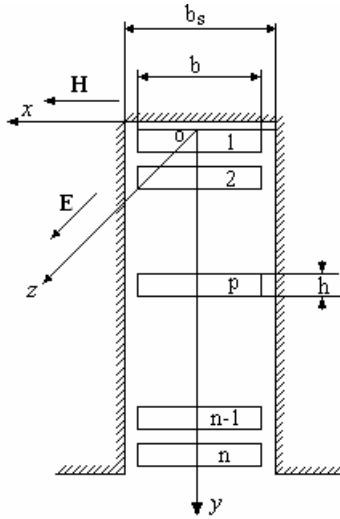


图 13 矩形开口槽内的 n 根导体

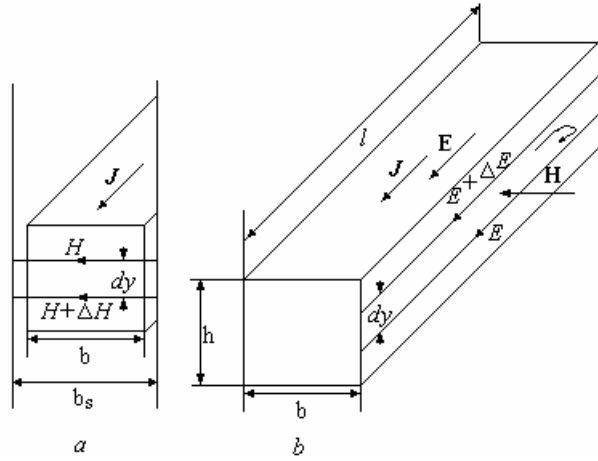


图 14 第 p 根导体内的电磁场

设每根导体的高度是 h ，宽度是 b ，长度是 l ，取第 p 根导体来研究，如图 14 所示，由 14a 可得

$$Hb_s - (H + \Delta H)b_s = Jb dy$$

$$Hb_s - \left(H + \frac{\partial H}{\partial y} dy \right) b_s = \sigma E b dy$$

即

$$-\frac{\partial H}{\partial y} = \frac{b}{b_s} \sigma E$$

由图 14b 可得

$$(E + \Delta E)l - El = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$\left(E + \frac{\partial E}{\partial y} dy \right) l - El = -\frac{\partial}{\partial t} (\mu_0 H l dy)$$

即

$$-\frac{\partial E}{\partial y} = \mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}$$

得

$$\frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{b}{b_s} \mu_0 \sigma \frac{\partial H}{\partial t}$$

这就是一维涡流方程。频率为 ω 的正弦电流对应的方程为

$$\frac{d^2 \dot{H}}{dy^2} = j \frac{b\omega}{b_s} \mu_0 \sigma \dot{H} = \gamma^2 \dot{H}$$

由于 $\mu = \infty$ ，槽漏磁通穿过铁心部分的磁动势为零，全部磁动势均匀地消耗

在槽的宽度上，所以有边界条件

$$\begin{cases} y = (p-1)h & \dot{H} = \frac{(p-1)}{b_s} \dot{I}_m \\ y = ph & \dot{H} = \frac{p}{b_s} \dot{I}_m \end{cases}$$

\dot{I}_m 为每根导体电流的复振幅，代入边界条件，解得

$$\dot{H} = \frac{\dot{I}_m}{b_s sh \gamma h} [(p-1)sh \gamma (ph-y) - psh \gamma (ph-h-y)]$$

其中

$$\gamma = \sqrt{j \frac{b}{b_s} \omega \mu_0 \sigma} = (1+j)k$$

$$k = \sqrt{\frac{b}{2b_s} \omega \mu_0 \sigma}$$

同时可得

$$\begin{aligned} \dot{E} &= -\frac{\partial \dot{H}}{\partial y} \frac{b_s}{b \sigma} \\ &= \frac{\dot{I}_m \gamma}{\sigma b sh \gamma h} [(p-1)ch \gamma (ph-y) - pch \gamma (ph-h-y)] \end{aligned}$$

于是电流密度函数可以写成

$$\begin{aligned} \dot{J} &= \sigma \dot{E} \\ &= \frac{\dot{I}_m \gamma}{b sh \gamma h} [(p-1)ch \gamma (ph-y) - pch \gamma (ph-h-y)] \\ &= \frac{\dot{J}_0 \gamma h}{sh \gamma h} [(p-1)ch \gamma (ph-y) - pch \gamma (ph-h-y)] \end{aligned}$$

式中 $\dot{J}_0 = \frac{\dot{I}_m}{bh}$ 是电流均匀分布时的电流密度复振幅。这样就可以求出磁通密度和

电流密度的分布。

第 p 根导体的电阻增大系数为 $K_{rp} = \frac{R}{R_0} = \varphi(\xi) + p(p-1)\psi(\xi)$ ，其中：

$$\xi = kh$$

$$\varphi(\xi) = \xi \frac{sh 2\xi + \sin 2\xi}{ch 2\xi - \cos 2\xi}$$

$$\psi(\xi) = 2\xi \frac{sh \xi - \sin \xi}{ch \xi + \cos \xi}$$

（2） 感应加热

利用涡流的热效应，可以用来进行感应加热，图 15 是感应加热的示意图。高频磁场在导体内引起感应涡流，频率愈高，涡流流过的导体表明层愈薄，导体加热深度也愈浅。感应加热的能量是由被加热物体材料在电磁场作用下发出的，因此可以直接对物体进行加热，完全避免了热能的传导损失，从而提高了加热设备的效率。同时高频加热可以把能量集中在一个局部的范围，加热速度快，能进行选择性的加热。并且可以通过电气参数进行精确的工艺控制。

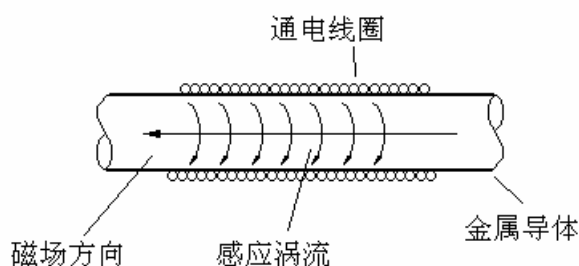


图 15 感应加热的示意图

感应加热的方式有：工件穿透加热；表面感应加热；焊接；溶化。

除了感应加热外还有介质加热，又称电容加热。它是利用高频电场使介质反复极化，介质内部之间发生摩擦发热，于是介质便被加热。

（3） 无损检测

无损检测是采用不破坏被测试件的方法，对材料或产品的性能进行检查和评估。各种无损检测方法的原理可以概括为：利用某种形式的能量与被检测对象进行交互作用，产生某种信号来指示材料的性能或产品的缺陷与损伤。在无损检测中，人们不仅关心已知的缺损会产生什么信号，更关注的是检测得到的信号对应什么性质及何等程度的缺损，前者称为正问题，后者称为逆问题。电磁无损检测方法则基于电磁场能量与被检测零部件的交互作用所产生的现象或信号。

电磁无损检测方法包括：漏磁检测、涡流检测和远场涡流检测等。

涡流无损检测是基于交变电磁场与导电材料或零部件交互作用所产生的信号来检测线圈的阻抗变化或状态。信号通常是检测线圈的阻抗变化，通过阻抗平面图表示出来。若零件或导电材料中存在缺陷或材料不均匀，会使感生涡流轨迹发生变化，从而得到各种不同的测试线圈阻抗。根据这些阻抗的变化程度就可以判定被测工件是否合格。

参考文献

- 1、网上资料
- 2、周省三， 张文灿， 杨宪章. 电磁场的应用 北京：高等教育出版社，1991
- 3、周克定等著 工程电磁场数值计算理论方法及其应用 北京：高等教育出版社，1994
- 4、胡之光. 电机电磁场的分析与计算.北京：机械工业出版社，1982.