

电工学教学小丛书

磁路和铁磁器件

高联辉 编

高等教育出版社

本书是 1980 年 6 月在成都召开的高等学校工科电工教材编审委员会扩大会议拟定编写的电工学教学小丛书之一。可作为高等学校工科非电类专业的学生在学完电工学课程后的补充读物。

本书内容有磁路计算和铁磁器件两部分。

本书从最基本的概念开始,阐明磁和铁磁质的特性;讨论磁路计算的基本理论和计算方法。在铁磁器件中,重点分析了电磁铁的吸力和磁路结构,并介绍电磁铁的实例;然后介绍非线性电抗器件、电声器件、磁性记录器件和电工仪表的测量机构。在叙述各种铁磁器件的工作原理时尽量从物理概念着手;对器件的磁路结构的分析尽可能结合到目前产品。

本书也适用于具有一定电工知识的读者,并可供一般工程技术人员参考。

电工学教学小丛书
磁路和铁磁器件
高联辉 编

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京大兴北臧乡印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 5.25 字数 100,000

1982年12月第1版 1984年8月第2次印刷

印数 6,001—10,000

书号15010·0466 定价0.67元

目 录

第一章 磁和铁磁的基本知识	1
§1-1 磁学发展简史	1
§1-2 磁现象和磁场	2
§1-3 电磁现象	6
一、电流的磁场	6
二、载流导体在磁场中所受的力	7
三、磁介质和磁场强度	8
四、电磁感应	11
§1-4 铁磁质的铁磁特性	14
一、铁磁性的本质	14
二、铁磁质的磁化特性	16
三、磁滞回线	19
§1-5 铁磁材料	24
一、软磁材料	24
二、硬磁材料	28
第二章 磁路	32
§2-1 磁路计算的基本定律	33
§2-2 气隙磁导	38
§2-3 直流磁路的计算	43
一、忽略漏磁的磁路计算	44
二、忽略铁心磁阻的磁路计算	49
三、考虑漏磁和磁阻的磁路计算	53
§2-4 交流磁路的特点及计算	56
一、交流磁路的特点及简化计算	56
二、考虑铁耗的交流磁路计算方法	59
§2-5 永久磁铁磁路简介	63
第三章 电磁铁	68

§3-1 概述	68
§3-2 电磁铁的吸力计算	70
一、直流电磁铁的吸力	70
二、交流电磁铁的吸力与分磁环	74
§3-3 电磁铁吸力的近似估算及其吸力特性	77
一、拍合式电磁铁	77
二、U形磁路电磁铁	80
三、E形磁路电磁铁	81
四、装甲螺管式电磁铁	82
§3-4 电磁铁的实例	86
一、牵引电磁铁	87
二、阀用电磁铁	89
三、制动电磁铁	93
四、电磁离合器	99
第四章 其它铁磁器件	105
§4-1 非线性电抗器件	105
一、饱和电抗器	105
二、磁放大器	110
三、铁磁稳压器	117
§4-2 电声器件	122
一、扬声器	122
二、传声器	127
§4-3 磁性记录器件	132
一、磁头与磁带	132
二、磁芯	138
§4-4 电工仪表测量机构的工作原理和磁路结构	142
一、概述	142
二、磁电式仪表	147
三、电磁式仪表	152
四、电动式仪表	154
五、感应式电度表	154

第一章 磁和铁磁的基本知识

§1-1 磁学发展简史

磁现象是自然界中非常基本的、非常普遍的现象。小到分子和原子等基本粒子，大到地球和星体等天体，它们的周围都存在磁现象。

我国是发现和应用磁现象最早的国家之一。在公元前三世纪（战国时期），古籍《吕氏春秋》已有“慈石召铁，或引之也。”的记载。这是我国古书上明确提出磁石能吸铁的最早记录。磁石首先应用于叫“司南”的仪器上，用以指示方向。公元十一世纪（北宋），我国科学家沈括阐述了指南针，随后指南针也被应用于航海事业上。西方发现磁石能吸铁的现象，在时间上大致也和我国相同，但在指南针的发明和应用上，至少要比我国晚一、二百年。所以指南针是我国古代的四大发明之一，它是我们祖先对人类文化的重要贡献。

人们对磁的发现虽然早于对电的发现，但对磁的认识却经过了较长的时期。在开始的一段时期里，曾认为磁性起源于“磁荷”，并认为磁极是磁荷集中的区域。在一段时期里，磁学和静电学是各自独立发展的，那时从假想的“磁荷”出发，确立了一系列磁力相互作用的规律，对磁学的发展起了一定作用。

1819年奥斯特发现载流导体的周围有磁场。1820年安培

发现磁场中的载流导体会受到力的作用，并于1822年提出了解释磁性本质的分子电流假说。1831年法拉第发现电磁感应定律。这些发现确认了磁现象和电现象之间的密切联系；认识到“磁荷”是不存在的，磁性是起源于电荷的运动。

铁磁物质的铁磁性能是非常复杂的，十九世纪并没有对这些特性加以解释。仅从本世纪起才开始弄清铁磁现象的本质，1916年爱因斯堪和德-哈斯通过实验证明，铁磁性主要是由电子的自旋磁矩在一定的条件下引起的。现在，由于铁磁学说的研究和发展，已在相当大的程度上阐明了铁磁体磁化时所发生的各种基本过程及铁磁现象本身的物理实质，从而能够制造具备工程上所需要的、具有一定性质的铁磁体。合金铁磁质和铁氧体等新的铁磁材料的出现，为大量的、优质的铁磁器件创造了条件。

在现代人们的生活中，铁磁性物质起着特殊的作用，各种自动化元件、电机、电磁铁、电声器件、电工测量仪表和计算机等装置中都用到铁磁体。有人说，如果一旦铁磁体失去铁磁性，将会引起整个工程危机。这是毫不夸张的。

§1-2 磁现象和磁场

磁铁具有吸引铁屑等物体的性质，这一性质称为磁性。磁铁上磁性最强的区域称为磁极。磁铁有两个磁极：一个称为北极（N），一个称为南极（S）。两块磁铁的磁极之间有相互作用，同号磁极互相排斥，异号磁极互相吸引。把原来没有磁性的铁块移近磁铁时，铁块也将产生磁性，这时的铁块称为被磁化。如果把条形磁铁分成两半，想把它N极和

S 极分开，我们将发现这是不可能的，即使把磁铁捣成粉末，在每个颗粒上仍然具有 N 极和 S 极。由此可知，磁铁的磁极不可能单独存在（即不存在“磁荷”）。

不仅磁铁具有磁性，而且电流也具有磁性，电流可以对磁铁产生作用力，这种现象称为电流的磁效应。在通电直导线的附近的磁针会发生偏转，在通电螺线管附近的磁针也会产生偏转。如图 1-1 为

一个通电细长螺线管，螺线管的一端相当于磁铁的 N 极，另一端相当于 S 极。螺线管的电流磁效应应用很广，电磁铁以及许多其他铁磁器

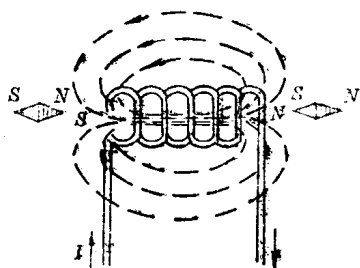


图 1-1 螺线管通电流后的磁效应

件都是将螺线管绕放在铁心上，通以电流产生强大的磁力而工作的。

安培根据电流产生磁性的事实提出了分子电流假说，他认为一切磁现象都起源于电流。磁铁是由许多最小单元磁分子组成，每个磁分子都有环形电流，这环形电流的两个面就形成两个不同极性的磁极。这些磁分子环形电流在磁铁中定

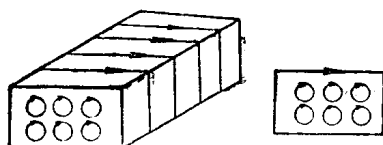


图 1-2 磁铁中的分子电流

向的排列起来，如图 1-2 所示，这样在两个相邻的分子电流中间，其电流方向恰恰相反，因此互相抵消；只有在磁铁的边缘上的分子电流相

互合成，好像有很多环形电流把磁铁包围起来，很象螺线管，因此磁铁的对外两端面就形成了两个磁极。安培的假说还可以说明两种磁极不能单独存在的原因，因为环形分子电流的两个面总是同时出现。现在我们已知道原子内的电子运动（绕原子核的运动及自旋运动）是形成相当于环形分子电流的原因。所以不论是磁铁的磁性，还是电流的磁效应，都是起源于电荷的运动。

磁铁和通电导体对周围的运动电荷有力的作用，它是通过一种特殊物质——磁场来传递的（运动电荷的周围空间，除了存在电场外，还存在磁场）。磁场是物质存在的一种形式，它具有物质的属性：它能对在磁场中运动的电荷产生作用力，磁场本身也具有能量。

磁场中任何一点，都存在一特定的方向，当电荷 q 沿该方向运动时并不受到作用力，该方向是该点磁场的磁感应强度 B 的方向。当电荷垂直于磁感应强度 B 的方向运动时，其速度为 v_1 ，则作用力 $f \propto q v_1$ 。实验证明，在磁场中的同一点，对于不同的 q 和 v_1 其比值 f/qv_1 都相同。可见这一比值反映了磁场性能的本质，我们把这比值定为磁感应强度 B 的大小，为

$$B = \frac{f}{qv_1} \quad (1-1)$$

磁感应强度有大小和方向，所以是一矢量。磁感应强度的单位可由式(1-1)中推导出来，在国际单位制中

$$[B] = \frac{\text{牛顿}}{\text{库仑} \cdot \text{米/秒}} = \frac{\text{牛顿}}{\text{安} \cdot \text{米}}$$

上述磁感应强度的单位通常称特斯拉。目前工程上习惯采用

国家规定可并列使用的电磁单位制的磁感应强度单位高斯。高斯与特斯拉的换算关系为

$$1\text{特斯拉} = 10^4\text{高斯}$$

通常用假想的磁力线来形象地描述空间各处磁场的强弱和方向。认为磁力线各点的切线方向与该点的 B 的方向一致， B 的大小则用磁力线的疏密显示。螺线管的磁力线如图 1-1 所示，不同磁场中磁力线的分布，可以通过撒在玻璃上的铁屑在磁场中的排列情况显示出来。

通过一个面的磁力线总数称磁通量，简称磁通，用 Φ 表示。计算非均匀磁场中任意曲面的磁通量时，可先将曲面分割成许多面元 dS 。只要面元 dS 足够小，我们就可以把它看成平面，并且认为面元上的磁场是均匀磁场，故穿过面元的磁通量

$$d\Phi = B \cdot dS$$

整个面上的磁通量则为

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \quad (1-2)$$

如果面积 S 上各点 B 的大小相等， B 的方向垂直于该面积，则

$$\Phi = BS, \quad B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-3)$$

故 B 又称为磁通密度。在国际单位制中，磁通量的单位为韦伯。磁感应强度为 1 特斯拉时，通过垂直磁场方向上 1 平方米的截面积上的磁通量为 1 韦伯。

电磁单位制中磁通量的单位为麦克斯韦。韦伯与麦克斯韦的换算关系为

$$1\text{麦克斯韦} = 10^{-8}\text{韦伯}$$

§1-3 电 磁 现 象

一、电流的磁场

电流周围有磁场，人们研究并得出了电流周围磁场分布的一般规律。直导线的电流方向与周围磁场方向之间的关系可由右手定则确定。如直导线中的电流为 I ，与导线距离为 r 的点的磁感应强度的大小为

$$B = K \frac{I}{r} \quad (1-4)$$

比例系数 K 在真空中和单位制有关，在国际单位制中 $K = \mu_0/2\pi$ ，式(1-4)可写为

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r} \quad (1-5)$$

式中 μ_0 称为真空磁导率，它的值测定为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 牛顿/安²。

在式(1-5)两边各乘 $2\pi r$ ，便得 $B \times 2\pi r = \mu_0 I$ ，一般有

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I \quad (1-6)$$

式(1-6)可以适用于任意稳定电流所产生的磁场，在一般情况下所选取的 $\mathbf{B}$ 的圆周积分路径内不一定只包围一个电流，于是有

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \sum I \quad (1-7)$$

上式为安培环路定律。

空心环形螺线管如图1-3所示，导线密绕的环形螺线管通电后产生的磁场可认为几乎全部集中在螺线管内部。通电

螺线管的磁场方向和通电电流方向之间的关系可用右手螺旋定则决定。

设管的截面积很小，环形螺线管的半径为 r ，总匝数为 N ，通过的电流为 I ，根据安培环路定律可得

$$B \times 2\pi r = \mu_0 IN$$

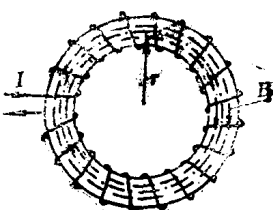


图 1-3 空心环形螺线管

而 $2\pi r = l$ 为环形螺线管中心线的周长，管内磁场可看作均匀磁场，故管内磁感应强度

$$B = \mu_0 \frac{IN}{l} \quad (1-3)$$

式中 IN 称为安匝。式(1-8)为适用于闭合的、各处截面均匀的磁场的安培定律形式。

二、载流导体在磁场中所受的力

实验证明：在磁场中的载流导体要受到作用力，这力称为电磁力。电磁力的方向由左手定则决定。电磁力 F 和磁感应强度 B 、导线长度 l 及导线中通过的电流 I 成正比，并与电流方向和 B 的方向的夹角的正弦成正比，在国际单位制中其

比例常数为1，因此有

$$F = BIl \sin \theta \quad (1-9)$$

当 $\theta = 90^\circ$ 时， $F = BIl$ 为最大；

当 $\theta = 0^\circ$ 时， $F = 0$ 。

如图1-4所示有一矩形导线框 $abcd$ ，放在磁感应强度为 B 的均匀磁场中，框的两个边长为 l_1 和 l_2 ，通入电流为 I ，线框平

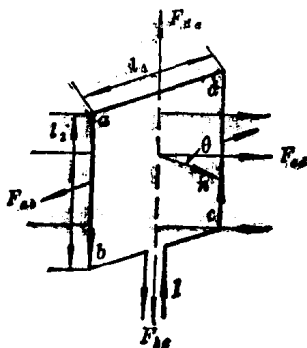


图 1-4 磁场对矩形导线框的作用

面的法线 n 和 B 的方向成 θ 角。线框 da 边和 bc 边的电流方向和 B 的方向的夹角分别为 $(\frac{\pi}{2} + \theta)$ 和 $(\frac{\pi}{2} - \theta)$ ，故

$$F_{da} = BIl_1 \sin(\frac{\pi}{2} + \theta) = BIl_1 \cos\theta$$

$$F_{bc} = BIl_1 \sin(\frac{\pi}{2} - \theta) = BIl_1 \cos\theta$$

故两力大小相等。根据左手定则两力方向相反，它们的作用点都在轴线上，方向和轴线重合，故这一对力互相抵消。而线框 ab 边和 cd 边所通过的电流方向和 B 的方向始终垂直，其大小为

$$F_{ab} = F_{cd} = BIl_2$$

力 F_{ab} 和 F_{cd} 方向相反，故形成一力偶，其力偶矩为

$$M = F_{ab} l_2 \sin\theta = BIl_1 l_2 \sin\theta = BIS \sin\theta \quad (1-10)$$

式中 S 为线框面积，如线框有 N 匝则

$$M = BSIN \sin\theta \quad (1-11)$$

设 $P_M = INS$ ， P_M 称为线框磁矩，则

$$M = P_M B \sin\theta \quad (1-12)$$

当线框平面的法线方向与 B 的方向垂直时，则力偶矩最大， $M = P_M B$ 。当线框平面的法线方向与 B 的方向一致时，则力偶矩最小， $M = 0$ 。上述线框力偶矩的概念可引伸到任意平面回路电流。可以证明：磁场对任意形状的回路电流产生力偶矩，力偶矩的方向是欲使回路平面的法线方向和 B 的方向一致。物质的分子电流也有完全确定的磁矩。

三、磁介质和磁场强度

电流周围总有物质存在，物质分子电流的磁矩受到电流

磁场的影响，即受到力偶矩的作用。由于力偶矩的作用，使分子电流平面的法线方向和外磁场方向一致，分子电流因此产生附加磁场而影响原来的外磁场，这些能影响外磁场的物质称为磁介质。

设原来电流磁场的磁感应强度为 B_0 ，磁介质的附加磁场的磁感应强度为 B' ，总磁场的磁感应强度为 B 。

$$B = B_0 + B' \quad (1-13)$$

不同磁介质的附加磁场是有差异的。那些 B' 和 B_0 方向相同的磁介质称为顺磁物质，如铝 (Al)、钨 (W)、钠 (Na) 以及氯化铜 (CuCl_2) 等都是顺磁物质；那些 B' 和 B_0 方向相反的磁介质称为抗磁物质，如铋 (Bi)、铜 (Cu)、氯化钠 (NaCl) 以及石英等都是抗磁物质。实验表明这些磁介质的 B' 比 B_0 小很多倍，只有十万分之几。另外还有几种磁介质，它在外磁场中所产生的附加磁场 B' 和 B_0 同方向，而且 B' 比 B_0 大几百倍、几千倍，所以 $B \gg B_0$ ，这种磁介质称为铁磁质，它们有铁 (Fe)、钴 (Co)、镍 (Ni) 以及钆 (Gd) 等元素及其合金。

我们有时把铁磁质称为磁性材料，把顺磁质和抗磁质称为非磁性材料。但实际上所有物质都是磁介质，所以可把前者称强磁性物质，后者称弱磁性物质。铁磁质有一些特有的性质，在生产上有广泛的应用，我们在以后将叙述这些问题。

B' 和 B_0 之间有一关系式

$$B' = 4\pi\eta B_0 \quad (1-14)$$

式中 η 为磁化率，由式 (1-13)，可得

$$B = (1 + 4\pi\eta)B_0$$

令 $\mu_r = 1 + 4\pi\eta$, μ_r 称为相对磁导率, 则

$$B = \mu_r B_0 \quad (1-15)$$

真空中的相对磁导率 $\mu_r = 1$, 顺磁物质的相对磁导率 μ_r 略大于 1, 抗磁物质的相对磁导率 μ_r 略小于 1, 而铁磁物质的相对磁导率 $\mu_r \gg 1$, 且不是常数。

为了进一步叙述磁场的性质, 引入磁场强度 H 这一物理量。 H 的定义为

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1-16)$$

μ 为磁导率, $\mu = \mu_r \mu_0$ 。在国际单位制中, H 的单位为安/米; 在电磁单位制中 H 的单位为奥斯特。它们的换算关系为

$$1 \text{ 安/米} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ 奥斯特} \approx 0.0126 \text{ 奥斯特}$$

由于在电磁单位制中 $\mu_0 = 1$, 这时在真空中 (或近似于真空) 的磁感应强度 $B = H$ 。又由于历史上在讨论磁现象时都是研究空气中的磁现象, H 和 B 在数值上没有很大区别, 所以把衡量磁场的强度的物理量用 H 表示, 这已成为历史的习惯。而现在描写磁介质中磁场的强度的物理量则应用磁感应强度 B 来表示, 而不把它称为磁场强度。我们应分清: 真正确定磁场的强度大小的物理量是 B , 而不是 H 。磁场强度 H 这个物理量在磁路计算中要用到它, 它是作为一个重要辅助量出现的。

由式 (1-8), 可得到一闭合的、各处截面均匀的磁场的安培定律形式为

$$H = \frac{IN}{l} \quad (1-17)$$

由此，磁场强度 H 的大小和磁介质无关，而和安匝成正比。 IN 又称为磁动势（或磁势）。

四、电磁感应

(1) 电磁感应定律

法拉第从实验中发现，穿过线圈的磁通发生变化，就会在线圈中产生感应电动势。如果线圈闭合，就会有感应电流。法拉第分析了实验结果得到如下结论：回路中产生的感应电动势 e 和穿过回路的磁通 Φ 的变化率成正比。可写为

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1-18)$$

上式不仅可确定感应电动势的大小，并且可确定在设定感应电动势正方向和设定磁通正方向下的感应电动势的方向，称为法拉第电磁感应定律。

根据法拉第电磁感应定律是这样来确定感应电动势的方

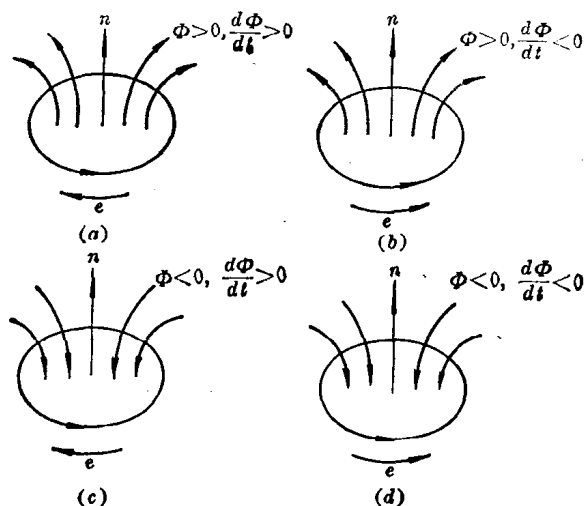


图 1-5 感应电动势的方向

向的。为说明问题简单起见，任取一与磁通垂直的回路，如图1-5所示，并设定回路的正方向为逆时针方向，其法线方向为 n 。设感应电动势的正方向和回路的正方向一致，磁通的方向和回路 n 的正方向符合右手螺旋定则时为正。当穿过回路的磁通变化率 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ 时，即正的磁通随时间增加或负的磁通随时间减小，由式(1-18)可知 e 为负，说明 e 的实际方向为顺时针方向，如图1-5(a)及(c)所示。当穿过回路的磁通变化率 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ 时，由公式可知 e 为正，说明 e 的实际方向为逆时针方向，如图1-5(b)及(d)所示。

如果回路是匝数为 N 的线圈，则式(1-18)可写为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (1-19)$$

式中 $\Psi = N\Phi$ 称为磁通匝链或磁链。

(2) 电感和磁场能量

设线圈中通过电流 i ，根据安培环路定律，由 i 所产生的磁感应强度与 i 成正比，所以通过线圈的磁通 Φ 也正比于 i 。如线圈为 N 匝，总磁链也正比于 i ，可写为

$$\frac{\Psi}{i} = L \quad (1-20)$$

式中 比例系数 L 称为线圈的自感系数或称电感。在国际单位制中，电感的单位为

$$\frac{[\Psi]}{[i]} = \frac{\text{韦伯}}{\text{安}} = \frac{\text{伏} \cdot \text{秒}}{\text{安}} = \text{欧} \cdot \text{秒} = \text{亨利}$$

自感系数的计算一般都比较复杂，通常都用实验方法来测定。螺线管的磁感应强度可从式(1-8)求出，则通过每匝线圈的磁通 $\Phi = BS$ ，总磁链

$$\Psi = N\Phi = \mu_0 \frac{N^2 I}{l} S$$

设单位长度的匝数为 $n = N/l$ ，则

$$\Psi = \mu_0 n^2 V I$$

式中 $V = lS$ 为螺线管的体积，则

$$L = \frac{\Psi}{I} = \mu_0 n^2 V \quad (1-21)$$

由电工学中已知，电感储藏的磁能 $A = \frac{1}{2} LI^2$ ，将式(1-21)代入

$$A = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \mu_0 n^2 V I^2$$

螺线管的磁感应强度 $B = \mu_0 IN/l = \mu_0 In$ ； $H = \frac{IN}{l} = In$ 代入上式

$$A = \frac{1}{2} BHV$$

单位体积的磁能为 W 则

$$W = \frac{1}{2} BH \quad (1-22)$$

可以证明上述根据螺线管特例得出的结论对其他情况仍能成立。

(3) 涡流现象

如把一整块铁心外绕线圈如图1-6所示，并给线圈通以交流电。由于通过铁心的磁通发生变化，因此在铁心中将产生感应电动势，电动势在垂直于磁感应强度的平面上产生自成回路的环流 i_w ，称为涡流。由于整块铁心的电阻很小，涡流可以达到很大数值，使铁心发热，在铁磁器件中甚至能使