

电气工人适用

电工学

中 册

修订版

哈尔滨工业大学电工学教研室

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是为电工行业的职工学习用电的基本理论而编写的，全书分为上、中、下三册(另编写了一本《电工学复习题与习题》)。中册是电机、变压器部分，共分十三章，主要内容有：铁磁性材料和磁路，交流铁芯线圈电路，直流电机，变压器，三相异步电动机和同步发电机等。

本书可以作为电工培训或自学教材，也可以作为非电专业工程技术人员参考书，或相应专业的教学参考书。

中册由郭文安、徐吉生、吴项编写，刘祥文修订，吴项主编。

3536/25

符 号 说 明

符 号	意 义
a	直流电机电枢绕组支路对数
B	磁感应强度 (磁通密度)
B_0	空气中的磁感应强度
B_r	剩磁感应强度
C	电容
C_e	直流电机的电动势常数
C_M	直流电机的转矩常数
E	直流电动势 交流电动势的有效值
e	交流电动势的瞬时值
F	磁动势
F_R	同步电机中的气隙磁动势
f	交变量的频率
H	磁场强度
H_0	空气中的磁场强度
H_c	矫顽磁场强度 (矫顽力)
I	直流电流 交变电流的有效值
i	交变电流的瞬时值
K_L	变压器的负载系数
k	变压器的变压比
k_a	自耦变压器的变压比
k_v	电压互感器的变换倍率
k_i	电流互感器的变换倍率
k_p	磁路饱和系数
L	自感系数
M	转矩
N	线圈 (绕组) 匝数

n	转速
n_1	同步转速
P	功率 交流电路中的有功功率
ΔP	功率损失
p	电机磁极对数
Q	交流电路中的无功功率
$R(r)$	电阻
R_{mt}	磁阻
R_m	励磁电阻
S	视在功率 电气设备容量
s	转差率
T	周期
t	时间 温度
V	直流电压 交流电压的有效值
v	交流电压的瞬时值 速度
W	电能
X	电抗
X_m	励磁电抗
X_c	同步电抗
Z	复阻抗
z	阻抗
z_m	励磁阻抗
α	铁内损失角
δ	气隙宽度
η	效率
λ	过载系数
μ	铁磁材料的磁导率
μ_0	真空 (或非磁性材料) 的磁导率
μ_r	相对磁导率
τ	极距
Φ	磁通
ϕ	交变磁通的瞬时值
φ	功率因数角

$\cos\varphi$	功率因数
Ω	角速度 欧姆
ψ	变压器、同步电机的内功率因数角
θ	同步电机的功率角

下 标

符号	意 义	举 例
a	电枢	V_a 电枢端电压
cr	临界	n_{cr} 临界转速
Cu	铜	ΔP_{Cu} 铜损
d	纵轴（直轴）	X_d 纵轴电抗
em	电磁	M_{em} 电磁转矩
f	励磁	I_f 励磁电流
Fe	铁	ΔP_{Fe} 铁损
l	线	V_l 线电压
L	负载	Z_L 负载阻抗
me	平均	B_{me} 平均磁感应强度
mh	机械	ΔP_{mh} 机械损耗
n	额定	I_n 额定电流
q	横轴（交轴）	X_q 横轴电抗
S	短路	V_s 短路电压
ST	起动	M_{ST} 起动转矩
σ	漏	Φ_σ 漏磁通
ψ	相	I_ψ 相电流

目 录

第二十一章 铁磁性材料和磁路	1
21-1 铁磁性材料的磁导率	1
21-2 铁磁性材料的磁化现象	3
21-3 磁路和磁路欧姆定律	5
21-4 铁磁性材料的磁饱和现象	9
21-5 磁场强度和B-H曲线	11
21-6 磁滞现象和永久磁铁	12
21-7 简单磁路的计算	17
21-8 具有气隙的磁路	19
21-9 磁路和电路的比较	22
第二十二章 直流电机的基本工作原理	25
22-1 直流发电机的基本工作原理	26
22-2 直流电动机的基本工作原理	30
22-3 直流电机的构造	32
22-4 直流电机的电枢绕组	36
22-5 直流电机的电枢电动势	42
22-6 直流电机的电磁转矩	46
22-7 直流电机中电磁功率及能量的变换	49
22-8 直流电机的电枢反应	52
22-9 直流电机绕组元件中的电流换向问题	56
22-10 直流电机的铭牌和额定数据	61
第二十三章 直流发电机的运行特性	63
23-1 并励发电机的电压是怎样建立的	63
23-2 直流发电机电动势和转矩的平衡关系	68
23-3 并励发电机的空载特性	71
23-4 并励发电机的外特性	73
23-5 并励发电机的调节特性	76

23-6 复励发电机	77
第二十四章 直流电动机的运行特性	80
24-1 直流电动机的转矩和反电动势的平衡关系	80
24-2 并励直流电动机的机械特性	82
24-3 并励直流电动机的调速	85
24-4 并励直流电动机的起动方法	90
24-5 怎样改变并励电动机的转向	93
24-6 怎样使并励电动机快速停车——制动	94
第二十五章 交流励磁的铁芯线圈电路	96
25-1 交流铁芯线圈电路中的电磁关系	96
25-2 交流磁路中磁通与线圈端电压的关系	101
25-3 交流铁芯线圈电路中电流的波形畸变	103
25-4 交流磁路的气隙	105
25-5 涡流现象和涡流损失	107
25-6 磁滞损失	109
25-7 交流磁路与直流磁路的比较	110
25-8 交流铁芯线圈电路的相量图	112
25-9 交流铁芯线圈的等效电路	113
第二十六章 变压器的变压原理和分析方法	116
26-1 为什么在电力系统中要使用变压器	116
26-2 变压器空载时的原、副边电磁关系	119
26-3 变压器接负载时原、副边的电磁关系	123
26-4 变压器的变压比和原、副边电流关系	126
26-5 变压器的基本构造	129
26-6 变压器的相量图	132
26-7 变压器的等效电路	135
26-8 三相变压器组与三相变压器	139
26-9 自耦变压器	144
26-10 电压互感器	148
26-11 电流互感器	151
第二十七章 变压器的工作性能	154
27-1 变压器的外特性和电压变化率	154
27-2 变压器的损耗和效率	158

27-3	变压器的空载试验和励磁阻抗	161
27-4	变压器的短路试验和短路电压	163
27-5	变压器的铭牌值	166
第二十八章 变压器的连接组和并联运行		170
28-1	变压器线圈的极性	171
28-2	怎样测定变压器线圈的极性	174
28-3	三相变压器线圈的连接	175
28-4	三相变压器的连接组别	177
28-5	为什么并联运行变压器的连接组别必须相同	180
28-6	为什么并联运行变压器的变压比必须相等	181
28-7	并联运行的变压器间负载电流的分配	182
第二十九章 三相异步电动机的工作原理		186
29-1	异步电动机是怎样旋转起来的	186
29-2	异步电动机的基本构造	188
29-3	异步电动机中的定子旋转磁场是怎样产生的	191
29-4	旋转磁场的转向和转速	196
29-5	定子绕组的接用和判断始、末端的方法	197
29-6	异步电动机的转差率	201
29-7	旋转磁场对定子绕组的作用	202
29-8	旋转磁场的磁通与电源电压的关系	204
29-9	旋转磁场对转子绕组的作用	206
29-10	定、转子电路之间的电磁关系	210
29-11	三相异步电动机的铭牌数据	213
第三十章 三相异步电动机的工作特性		215
30-1	异步电动机中的能量转换	215
30-2	异步电动机的电磁转矩	217
30-3	异步电动机的转矩特性曲线	221
30-4	异步电动机的额定转矩和过载能力	222
30-5	异步电动机的起动问题	224
30-6	鼠笼式电动机的起动方法	226
30-7	绕线式异步电动机的起动	232
30-8	单相异步电动机	234

第三十一章 同步发电机的电动势和电枢反应	238
31-1 同步发电机是怎样发电的	238
31-2 同步发电机转速与电动势频率的关系	240
31-3 同步发电机的基本结构	242
31-4 同步发电机的磁路	245
31-5 定子一相绕组中感应电动势的大小与高次谐波	247
31-6 怎样消除三次谐波电动势	252
31-7 同步发电机的励磁方式	254
31-8 同步发电机的电枢反应	256
31-9 $\dot{I}_a$ 与 $\dot{E}_0$ 同相位时的电枢反应	258
31-10 $\dot{I}_a$ 与 $\dot{E}_0$ 的相位差为 90° 时的电枢反应	260
31-11 $\dot{I}_a$ 与 $\dot{E}_0$ 的相位差小于 90° 时的电枢反应	262
31-12 同步发电机的铭牌数据	264
第三十二章 同步发电机的运行特性	266
32-1 同步发电机的空载特性	266
32-2 汽轮发电机的电压平衡关系和同步电抗	269
32-3 汽轮发电机的相量图	272
32-4 同步发电机的外特性	276
32-5 同步发电机的电压变化率和调节特性	278
32-6 同步发电机的损耗和效率	280
第三十三章 同步发电机的功角特性和并联运行	283
33-1 同步发电机的功率和功率角	284
33-2 同步发电机的功角特性	287
33-3 同步发电机与无穷大电网并联运行时有功功率的调节	290
33-4 同步发电机的静态稳定	293
33-5 同步发电机无功功率的调节	295
33-6 同步发电机的 U 形曲线	299
33-7 同步发电机投入并列的条件	301
33-8 同步电动机	306
33-9 同步调相机	312

第二十一章 铁磁性材料和磁路

我们知道，在通有电流的线圈周围会产生磁场。但是，空心载流线圈所产生的磁场较弱，一般不能满足电工设备的需要。在电机或者变压器里，线圈都绕在又大又重的铁芯上。就是在体积很小的仪表或继电器中，线圈也都是绕在一定形状的铁芯上的。因为制造铁芯的铁磁性材料（如硅钢片等）比空气的导磁能力强得多，在电工设备的线圈中有了铁芯可以获得较强的磁场。

实际上，在线圈里面加入铁芯之后，还会出现一些空心线圈所没有的磁特性。在这一章里，我们要讨论铁磁性材料的几个基本特性——高导磁性、磁饱和性和磁滞性；介绍什么是磁路，以及怎样分析直流磁路。

21-1 铁磁性材料的磁导率

我们已经讲过，在通电线圈的周围是存在着磁场的。实验证明，如果在线圈中放入用铁磁性材料（譬如说，用硅钢）制成的铁芯，那么在同样大小电流的作用下，线圈内有铁芯时的磁感应强度会比没有铁芯时增大许多倍。于是可以说，硅钢的导磁能力比空气的导磁能力要大得多。

在工程上，通常用磁导率 μ 表示各种材料导磁能力的强弱，并且根据磁导率的大小，把各种材料分成铁磁性材料（又叫磁性材料或铁磁物质）和非铁磁性材料（又叫非磁性材料）两大类。

象空气、木材、铜、铝这一类材料，它们的导磁能力很差，

● 磁导率又可以叫做导磁率或导磁系数。

叫做非铁磁性材料。它们的磁导率用符号 μ_0 表示^①。从实验中测得， μ_0 是一个大小不变的恒定数值

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ 亨/米}$$

硅钢、铸钢、坡莫合金这一类材料的导磁能力很强，叫做铁磁性材料，现在知道的铁磁性材料是五种金属元素（铁、镍、钴、钼、镨）以及它们的许多种合金和化合物。它们的磁导率用符号 μ 表示。各种铁磁性材料的磁导率 μ 比非磁性材料的磁导率 μ_0 大得多，而且它们彼此之间的差别很大。导磁能力愈强的铁磁性材料，磁导率 μ 的数值愈大。例如坡莫合金（一种铁和镍的合金）就比硅钢的磁导率大得多。另外，铁磁性材料的磁导率 μ 不是一个恒定的数值， μ 的大小和材料所在处的磁场强弱程度有关系（这个问题后面还要讨论）。

为了便于比较铁磁性材料和非磁性材料的导磁能力，把任何一种铁磁性材料的磁导率 μ 和非磁性材料的磁导率 μ_0 的比值，叫做这种铁磁性材料的相对磁导率，用符号 μ_r 表示

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (21-1)$$

μ_r 是一个没有单位的数，它表示铁磁性材料的导磁系数比空气等非磁性材料的导磁系数大多少倍。表21-1是几种常用的铁磁性材料的相对磁导率。

表 21-1 几种常用铁磁性材料的相对磁导率

铁磁性材料	相对磁导率 μ_r	铁磁性材料	相对磁导率 μ_r
铸 铁	200~400	铝硅铁粉芯	2.5~7
铸 钢	500~2200	镍锌铁氧体 (用于1兆赫以上)	10~1000
硅 钢 片	7000~10000	锰锌铁氧体 (用于1兆赫以下)	300~5000
坡 莫 合 金	20000~200000		

① 严格地说， μ_0 是真空的磁导率，各种非磁性材料的磁导率并不相同。不过，所有非磁性材料的磁导率彼此之间相差很小，和真空的磁导率 μ_0 非常接近。

我们知道，利用良导体做成的金属壳或金属网可以隔离外部电场对壳（网）内仪器设备的影响（见上册第一章1-5节），这种作用叫做电屏蔽。类似的道理，可以利用具有高导磁性的铁磁性材料实现磁屏蔽。例如一些需要防磁的仪器设备，常常在外面罩上一个铁壳。由于铁壳比空气的磁导率大得很多，外部磁场的磁力线主要在铁壳中通过，铁壳外部磁场对铁壳内部仪器设备的影响就可以大大减弱了。另一方面，在设备外面加上铁壳，还可以防止设备内部的磁场散布到空间去影响其它设备。

21-2 铁磁性材料的磁化现象

为什么线圈绕在用铁磁性材料做成的铁芯上，线圈中的磁场会大大增强呢？这就需要搞清楚铁磁性材料的磁性是怎样产生的。

通电导体的周围存在着磁场。即当电荷运动（即形成电流）时，它周围的空间会产生磁现象，这叫做电流的磁效应。从物质的内部结构来看，任何物质都由分子和原子组成。原子中的电子不仅围绕原子核旋转，电子本身还有自转（或叫自旋）。电子的这两种运动，都会产生磁效应。在铁磁性材料中，由电子自旋所产生的磁场是很强的。

另一方面，在铁磁物质内部，原子和原子之间还存在着强烈的相互作用，这种作用使得若干个原子的磁场具有相同的方向，它们一起组成一个小磁体，叫做磁畴。铁磁物质就是由许多这样的磁畴组成的，不过各个磁畴的体积既不一样，磁性方向也各不相同，在铁磁物质内部杂乱无章地排列着，如图21-1所示。显然每个磁畴都具有相当强的磁性，但是它们的磁性互相抵消了，所以整块的铁磁性材料就显不出磁性来。随便拿起一块铁来是不会发现它有什么磁性的，就是这个道理。

磁畴现象可以用实验方法观察，这种实验叫做粉纹照相。在一块磨得很光的铁磁性材料的表面上，撒一层弥漫在胶质溶液中

的极细的铁粉，这些铁粉将在那些磁场很强而又很不均匀的地方沉淀下来，而磁畴的边界恰好是这种磁场很强而又很不均匀的地方，所以沉淀下去的粉末正好把磁畴的边界描绘出来。在一般的显微镜下，就可以看到这种磁畴的粉线图，如图21-2所示。

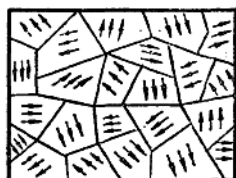


图 21-1 铁磁性材料中的磁畴

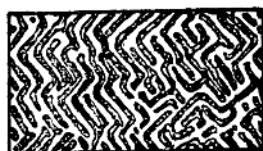


图 21-2 磁畴的粉线图

当把铁磁性材料放到外磁场（例如通电线圈产生的磁场）中去时，磁畴会受到外磁场的作用。首先，磁畴的体积将发生变化，与外磁场方向接近的磁畴体积会增大，而与外磁场方向不一致的磁畴体积会缩小，也就是磁畴边界会发生移动。其次，外磁场还使与它本身方向不一致的磁畴向外磁场的方向转动，如图21-3所示，

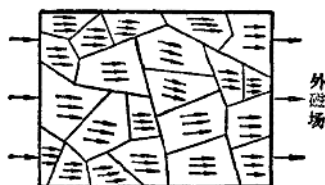


图 21-3 在外磁场的作用下，磁畴按照外磁场的方向整齐地排列

这个现象叫做磁化。铁磁性材料磁化之后，磁畴的磁性不再互相抵消，于是，这块铁磁性材料变成了磁铁，对外显示出很强的磁性。这样，铁芯中的附加磁场^①和通电线圈中的外磁场叠加起来，使得线圈中的磁场大大地加强了。

所以，材料的导磁能力实际上是指在外磁场的作用下，材料可能被磁化的程度。非磁性材料内部没有磁畴结构，在外磁场作

① 铁磁性材料在外磁场中磁化后所形成的磁场叫做附加磁场。

用下不会发生磁化现象，所以导磁能力差。铁磁性材料在外磁场作用下发生磁化现象，使得磁场大为增强，所以导磁能力很强。或者说铁磁性材料具有高导磁性。当然，不同种类的铁磁性材料，它们的导磁能力是不同的。如前所述，可用磁导率 μ 或相对磁导率 μ_r 的大小说明各种材料导磁能力的强弱。

不仅可以使磁性的铁芯在外磁场中磁化，而且可以利用高温和振动以及其它方法，使已经磁化的磁铁退磁。因为在高温的情况下，磁铁中分子的热运动会破坏磁畴的有规则排列，打击和振动磁铁也会破坏这种排列，削弱磁铁的磁性，从而实现退磁。

21-3 磁路和磁路欧姆定律

由于铁磁性材料具有高导磁性，因而常常用来做成各种形状的铁芯，以获得较强的磁场。图21-4是电工设备中常见的几种铁

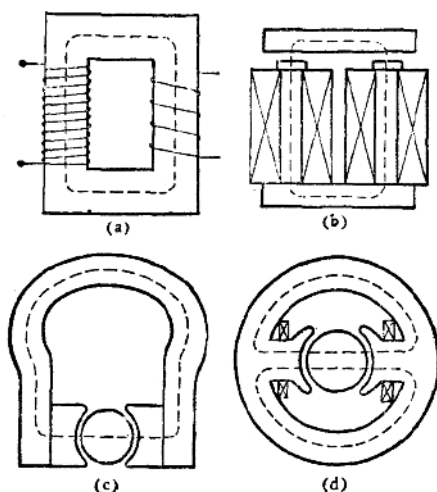


图 21-4 电工设备中常见的几种磁路
(a)变压器；(b)电磁铁；(c)磁电式仪表；(d)直流电机

芯。由于铁芯被磁化使得磁场大为增强，所以通电线圈产生的磁场主要集中在闭合的铁芯中（图 21-4, a），或者集中在包括一小段空气隙的铁芯中（图 21-4, b, c, d）。磁场的强弱可以用磁感应强度表示，而磁场内某一截面的磁感应强度和截面积的乘积叫做穿过该截面的磁通。当通电线圈中具有铁芯时，磁通主要集中在由铁芯所规定的路径内。这种磁通集中的路径叫做磁路，

如图 21-4 中虚线所示的路径。

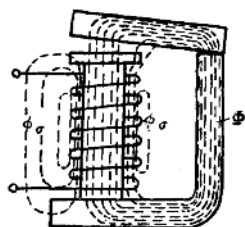


图 21-5 磁路中的主磁通和漏磁通

沿着铁芯（包括气隙）所规定的磁路通过的磁通叫做主磁通，图 21-5 是电磁型继电器的磁路示意图， Φ 是它的主磁通。穿出铁芯经过空气（或其它非磁性材料）而闭合的一小部分磁通叫做漏磁通（图 21-5 中的 ϕ ）。在许多情况下，漏磁通很小，计算或分析磁路时，有时可以忽略不计。这样，就把漫布

在空间的磁场问题，变为局限于主要由铁芯所规定的路径内的磁路问题了。

在磁路中，用来产生磁通的电流叫做励磁（或激磁）电流。流过励磁电流的线圈叫做励磁（或激磁）线圈。由直流电流励磁的磁路叫做直流磁路，由交流电流励磁的磁路叫做交流磁路。这一章只讨论直流磁路的特点和分析方法。

励磁电流和由它所产生的磁通之间有什么关系呢？图 21-6 是一个空心环形螺管线圈①，改变励磁电流 I 的大小或线圈匝数 N 的多少时可以看到，励磁电流 I 愈大，产生的磁通愈多②；线圈

- ① 用密绕的环形螺管线圈，可以减小漏磁，并能在线圈内部得到比较强的磁场。
- ② 线圈中磁通的大小可用磁通计来测量。磁通计是一种特殊形式的磁电式检流计，测量时将磁通计的测量线圈与被测磁通相交链，被测磁通的变化使磁通计指针偏转，指示出磁通的数值。

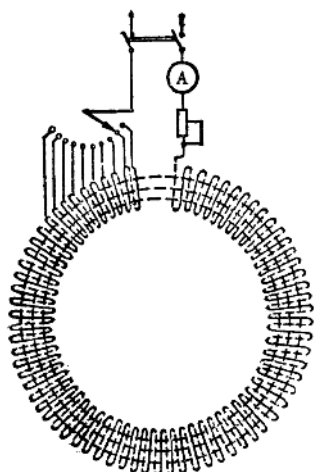


图 21-6 用空芯螺管线圈实验验证
明励磁电流和磁通的关系

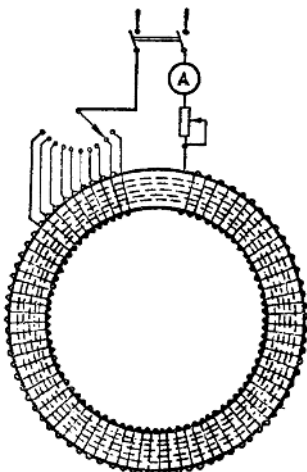


图 21-7 铁芯螺管线圈的
实验电路

匝数 N 愈多，产生的磁通也愈多。可以把励磁电流 I 和线圈匝数 N 的乘积 NI 看做是磁路中产生磁通的根源，叫做磁动势，就象电路中电动势是产生电流的根源那样。磁动势用符号 F 表示

$$F = NI \quad (21-2)$$

磁动势的单位是安匝，用符号 At 表示。

在另一个结构相同，但具有铁芯的线圈中（图21-7），如果保持磁路的磁动势与没有铁芯时一样（即保持线圈的安匝数一定），就可以看到，铁芯材料的磁导率 μ 愈高，磁路中的磁通就愈多。用硅钢做铁芯时，比用铸钢做铁芯时所产生的磁通大几十倍，比没有铁芯时大几千倍。当铁芯材料不变，而改变铁芯的尺寸时，可以看到，在磁动势不变的条件下，铁芯的截面积愈大，磁通愈多；铁芯的平均长度（就是磁路中心线的长度）愈长则磁通愈少。实验证明，当磁动势 F 一定时，磁路中的磁通与铁芯材料的磁导率 μ 成正比，与铁芯截面积 S 成正比，而与磁路的平均

长度 l 成反比。这样的关系可以表示为

$$\Phi = F \frac{\mu S}{l} = \frac{NI}{\frac{l}{\mu S}} \quad (21-3)$$

假设 $R_{mg} = \frac{l}{\mu S} \quad (21-4)$

就得到 $\Phi = \frac{F}{R_{mg}} = \frac{NI}{R_{mg}} \quad (21-5)$

或 $F = NI = \Phi R_{mg} \quad (21-6)$

拿(21-6)式与电路中的欧姆定律相比较, 磁动势 $F = NI$ 相当于电动势, 磁通 Φ 相当于电流, R_{mg} 相当于电阻, 叫做磁阻。因此, 借用电路中欧姆定律的名称, (21-6)式所表达的关系叫做磁路的欧姆定律。

从(21-4)式可以看出, 磁路截面积 S 愈大, 磁阻愈小; 磁路材料的磁导率 μ 愈高, 磁阻愈小; 磁路的平均长度 l 愈长, 磁阻愈大。这与电阻和导电材料的性质及尺寸的关系是类似的。

用图21-6的空心环形螺管线圈做实验, 可以通过测量计算出空气的磁导率 μ_0 。根据(21-3)式

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu_0 S}} = \frac{NI \mu_0 S}{l}$$

所以 $\mu_0 = \frac{\Phi l}{NIS} \quad (21-7)$

当磁路的几何尺寸(环形铁芯的截面积 S 和平均长度 l) 已知时, 在具有 N 匝的线圈中通入励磁电流 I , 测出线圈中的磁通 Φ , 根据上述数据, 算出空气的磁导率是

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ 亨/米}$$

应用上述实验, 也可以测出铁磁性材料的磁导率 μ 。不过, μ 的数值会随着外磁场的强弱而变化, 不是一个常数, 可见, 铁芯的磁阻不是恒定的常数, 它会随着磁通的变化而变化。因此, 磁路的欧姆定律主要用来对磁路进行定性分析, 一般不能直接用