

新员工磁芯知识教案

一、磁芯材料基本知识

a、基本术语定义

1、初始磁导率 μ_i

初始磁导率是磁芯材料的磁导率 (B/H) 在磁化曲线始端的极限值,

$$\text{即 } \mu_i = 1/\mu_0 (\lim_{B \rightarrow 0} B/H) \propto 0$$

式中 μ_0 : 真空磁导率 ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)

H: 交流磁场强度 (A/m)

B: 交流磁通密度 (T), 测试时小于

0.25mT。

注: μ_i 通常用规定尺寸的环形磁环测量而得。

2、有效磁导率 μ_e

为了绕制的方便, 变压器或电感磁芯, 常用非闭合的E型U型和其他等配对磁芯。其磁路各部分形状尺寸不同, 且结合面不可避免有残余气隙。此时必须用有效磁导率 μ_e 来表征磁芯的磁性能。

磁芯的有效磁导率可表示为:

$$\mu_e = (L l_e) / (4 \pi N^2 A_e)$$

式中 L: 装有磁芯的线圈的自感量 (mH)

N: 线圈匝数

$l_e/A_e = C_1 = \text{磁芯常数} (\text{mm}^{-1})$

6648828 南油酒店

3、振幅磁导率 μ_a

作为功率变换用的开关电源变压器磁芯是工作在高磁通密度下, 此时若用弱磁场中引出的磁参量 μ_i , (μ_e) 显然不妥。因此引入振幅磁导率 μ_a 或增量磁导率的概念。

在指定的交流磁通密度 (或交流磁场强度) 下的磁导率称振幅磁导率, 可表示为:

$$\mu_a = B / (\mu_0 H)$$

式中 $\mu_0 H B$ 的含义及单位与 μ_i 表达式相同, 仅测试时, 需要规定的B值比测试 μ_i 高出数百倍以上 (例如 200mT)

4、增量磁导率 μ_Δ

单极性开关电源变压器磁芯。除工作在高磁通密度条件下, 也常常处于一个恒定磁场的作用下。因此引入交流叠加下的增量磁导率和可逆磁导率 μ_{rev} 的概念。

在规定条件下, 存在恒定磁场时的磁导率定义为增量磁导率

$$\mu_\Delta = \Delta B / \mu_0 \Delta H$$

式中: ΔH 磁场强度改变的峰峰值 (A/m)

ΔB 相应于 ΔH 作用下的磁通密度变增量。

当交变磁场强度接近于零时, 增量磁导率的极限值定义为可逆磁导率, 即:

$$\mu_{rev} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \mu_\Delta \propto 0$$

5、饱和磁通密度, B_s

磁化到饱和状态的磁通密度; (在磁场强度是 1194A/m=15Oe下测试)

6、剩余磁通密度, B_r

除去磁场后, 剩余的磁通密度。

7、矫顽力, H_c

除磁场后, 磁芯继续被反向的磁场磁化, 直至磁通密度减小到零, 此时的磁场强度称为矫顽力

8、损耗因数, $\tan \delta$

损耗因数是磁滞损耗, 涡流损耗和剩余损耗三者之和。

$$\tan \delta = \tan \delta_h + \tan \delta_e + \tan \delta_r = h_1 i (L/V)^{1/2} + e_1 f + r_1$$

损耗因数也可用电阻和电抗之比来表示:

$$\tan \delta = (R_m) / (\omega L) = (R_{eff} - R_W) / (\omega L)$$

式中 $\tan \delta_h$: 磁滞损耗因数

$\tan \delta_e$: 涡流损耗因数

$\tan \delta_r$: 剩余损耗因数

h_1 : 磁滞损耗系数

L: 装有磁芯线圈的自感量 (H)

V: 磁芯体积 (M^3)

i: 电流 (A)

f: 频率 (Hz)

7887447

e1: 涡流损耗系数
r1: 剩余损耗系数
Rm: 磁芯损耗的等效电阻 (Ω)
ω: 角速度(2πf, rad/s)
Reff: 包括磁芯损耗的总电阻 (Ω)
RW: 线圈的电阻 (Ω)

注: h1可用下式表示:

$$h1 = (V/L)^2 (R2 - R1) / [(V2 - V1)W]$$

式中: R1=电压V1的损耗电阻

R2=电压V2的损耗电阻

9、品质因数, Q

品质因数为损耗因数的倒数

$$Q = 1 / \tan \delta = (\omega L) / Rm$$

注: 装有磁芯线圈的品质因数可表示为:

$$Qe = (\omega L) / Reff$$

10、电感因数, AL

装有磁芯线圈的电感与线圈匝数平方的比值

$$AL = L / N^2$$

L: 装有磁芯线圈的自感量 (H)

N: 线圈匝数

11、居里温度, Tc

在该温度下磁芯状态由铁磁性 (或亚铁磁性) 转变成顺磁性。

12、减落因数, DF

在恒温条件下, 完全退磁后的磁芯的初始磁导率随时间的衰减变化为减落因数:

$$DF = (U1 - U2) / \lg(t2/t1) \cdot u f$$

(t2 > t1)

式中: μ1: 退磁后t1分钟的初始磁导率

μ2: 退磁后t2分钟的初始磁导率

注: 通常取t1为10分钟, t2为100分钟。

13、电阻率 ρ

具有单位截面积和单位长度的磁性材料的电阻。

b、软磁材料分类

合金: 硅钢片

坡莫合金

非晶及微晶合金

粉芯: 铁粉芯

铁硅铝

高磁通粉芯 (HighFlux)

坡莫合金粉芯 (MPP)

铁氧体: Mn₂Fe₂O₄: 功率铁氧体、高导铁氧体

NiZn

c、常用软磁磁芯特点

1 铁粉芯:

价格最低

饱和磁感应强度值在14000GS

磁导率从22~100

高频损耗高

初始磁导率 μi随频率的变化稳定性好

2 坡莫合金粉芯:

饱和磁感应强度值7500GS

磁导率范围大 (14~550)

粉末磁芯中具有最低的损耗

温度稳定性极佳

磁致伸缩系数接近零

粉芯中价格最贵

3 高磁通粉芯 (HighFlax) :

饱和磁感应强度值在15000GS
磁导率从14~160
粉末磁芯中有最高的磁感强度
价格低于MPP

4 铁硅铝粉芯:

饱和磁感应强度值在10500GS
磁导率从26~125
磁致伸缩系数接近零
损耗比铁粉芯低80%
具有最佳的性能价格比

5 软磁铁氧体:

磁导率随频率的变化特性稳定, 150KHz以前基本不变
磁导率随温度有较大的上升
对应力不敏感
损耗随温度变化, 在80~110℃有最低损耗
形状多
nZn产量用量最大, 成本低, 电阻率 (1~10 Ω·m)
CuZn电阻率高 (102-104 Ω·m)
(Ni-Zn)在100KHz~10MHz的无线电频段的损耗小

6 硅钢片:

高饱和磁感应强度 (20000GS)
可以冲片、切割, 有叠片式及卷绕式
价格便宜, 产量大
使用频率不超400Hz
工作温度可超过200℃

7 坡莫合金:

有十万的初始磁导率
有接近1或接近零的矩形系数
工作温度可超过200℃
价格高

8 非晶及超微晶合金:

初始磁导率 $\mu_0=14 \times 10^4$ 钴基非晶
矩形比Br/Bs=0.995 钴基非晶
饱和磁化强度18300GS 铁基非晶
高饱和磁感应强度 (1.54T) 铁基非晶合金
铁损低 (取向硅钢片1/3~1/5) 铁基非晶合金

d、几种开关电源铁氧体材料的比较

1 日本TDK公司

参数	测试条件	温度	PC30	PC40	PC44	PC50
		25℃	130	120		
	25kHz	60℃	90	80		
磁芯损耗密度 Pc	200mT	100℃	100	70		
kW/m ³	正弦波	120℃		85		
		25℃	700	600	600	
	100kHz	60℃	500	450	400	
	200mT	100℃	600	410	300	
	正弦波	120℃		500	380	
	500kHz	25℃				130
	50mT	60℃				80
	正弦波	100℃				80

2 日本TOKIN公司

表二列出了TOKIN公司2500B、BH1、BH2、2500B3材料的电磁性能参数, 2500B的性能低于PC30, BH2与PC40性能相当, BH1的性能比PC44好, 在选用时要注意区别。

参数	测试条件	温度	2500B	BH2	BH1	2500B3	B40
磁芯损耗	100kHz	25℃	950	600	550		
密度Pc	200mT	60℃	700	450	350		
kW/m ³	正弦波	100℃	750	410	250		
	500kHz, 100mT 正弦波	23℃					
		60℃					580
		80℃					500
	1MHz 50mT	60℃					360
		80℃					380

3 西门子公司

表三列出了西门子公司N27、N67、N87、N49材料的电磁性能参数，N27的性能低于PC30，N67的性能略低于PC4，N87材料的性能比PC40材料的性能好而低于PC44，N49材料的性能比PC50材料差，在选用时要注意区别。

参数	测试条件	温度	N27	N67	N87	N49
	25kHz, 200mT 正弦波	100℃	155	80		
磁芯损耗 密度Pc	100kHz, 200mT 正弦波	100℃	920	525	385	
	300kHz, 100mT	100℃		560	410	600
kW/m3	500kHz, 50mT 正弦波	100℃				120
	1MHz, 50mT	100℃				560

4 Philips 公司

荷兰飞利浦公司

表四列出了Philips公司3C85、3C90、3F3、3F4材料的电磁性能参数，3C85的性能低于PC30，3C90的性能略低于PC40，3F3是一种介于PC40和PC50之间的材料，3F3材料在100kHz时的损耗大于PC40，在400kHz时的损耗小于PC40材料，3F4材料使用的频率范围为0.8MHz~3MHz，在选用时要注意区别。

参数	测试条件	温度	3C85	3C90	3F3	3F4
	25kHz, 200mT 正弦波	100℃	<140	<80		
磁芯损耗 密度Pc	100kHz, 100mT 正弦波	100℃	<165	<80	<80	
kW/m3	100kHz, 200mT 正弦波	100℃		450		
	400kHz, 50mT 正弦波	100℃			<150	
	1MHz, 30mT 正弦波	100℃				<200
	3MHz, 10mT 正弦波					<320

5 南京金宁无线电器材厂 (898厂)

表五列出了898厂R2kD、R2kBD、R2kB1、R1.4k材料的电磁性能参数，R2kD材料的性能低于PC30材料，R2kD材料在100℃时的损耗大于室温时的损耗，原则上不宜选用，R2kBD、R2kB1、R1.4k材料的性能分别与PC30、PC40、PC50材料的性能相同，在选用时要注意区别。

参数	测试条件	温度	R2kD	R2kBD	R2kB1	R1.4k
	16kHz, 150mT	25℃	57			
		60℃	53			
	25kHz, 200mT 正弦波	25℃		130		
磁芯损耗		60℃		90		
kW/m3		100℃		100		
	100kHz, 200mT 正弦波	25℃			600	
		60℃			450	
		100℃			410	
	500kHz, 50mT 正弦波	25℃				130

主要软磁材料厂材号对照表

南京898	TDK	SIEMENS	PHILIPS	TOKIN
R2KBD	PC30	N27	3C85	2500B
R2KB1	PC40	N67 N87	3C90 3F3	BH2
R1.4	PC50	N47 N49	3F4	B40
R5K	H5B HS50	N30	3E4	4000H
R7K	H5B2 HS72	T35	3E25	6000H
R10K	H5C2	T38	3E5	12001H

e、常用磁粉芯简介

常用磁粉芯主要有铁粉芯、铁硅铝粉芯、高磁通量 (High Flux) 粉芯、坡莫合金粉芯 (MPP)。

1 铁粉芯

铁粉芯由碳基铁磁粉及树脂碳基铁磁粉构成，由于价格低廉，铁粉芯至今仍然是用量最大的磁粉芯。需要注意的是，在高于75℃的大功率应用中，必须考虑由于有机成分的老化而引起的电感和品质因数的永久性降低，降低的程度取决于时间、温度、磁芯大小、频率和工作磁通密度，根据Micrometall的研究，T130-8/90磁芯在0.0465T、80kHz、100℃环境下仍然可安全运行十万小时。表一列出了Micrometall生产的铁粉芯材料牌号、参考磁导率、密度、相对成本、磁粉芯颜色，在选用其它供应商生产的铁粉芯

时，可做参考。表二列出了Micrometall铁粉芯的损耗与直流偏磁。

铁粉芯的应用有悠久的历史，在本世纪初已用于电话线路中作加感线圈磁芯，目前主要用于各种电源的输入、输出滤波电感、功率因数校正器等，使用频率可达100kHz。

国内能生产铁粉芯的供应商有多家，公司认证的有嘉诚和可达，嘉诚可生产-8、-18、-26、-28、-33、-40、-52材料，可达仅能生产-26、-40、-52材料。

表1 Micrometall铁粉芯材料特性

材料牌号	参考磁导率 m0	Bsm (T)	材料密度 (g/cm3)	相对成本	铁粉芯颜色
-2	10	0.5	5.0	2.7	红/清
-8	35	1.25	6.5	5.0	黄/红
-18	55	1.03	6.6	3.4	绿/红
-26	75	1.38	7.0	1.0	黄/白
-28	22	0.974	6.0	1.9	灰/绿
-33	33	1.1	6.3	1.6	灰/黄
-38	85		7.1	1.1	灰/黑
-40	60	1.38	6.9	1.0	绿/黄
-45	100		7.2	2.6	黑/黑
-52	75	1.4	7.0	1.4	绿/蓝

表2 Micrometall铁粉芯损耗与直流偏磁比较

材料 牌号	铁粉芯损耗 (mW/cm3)						Hdc=500e	
		1kHz 0.15 T	10kHz 0.05T	50kHz 0.0225 T	100kHz 0.014T	500kHz 0.005T	%me	me
-2	19	32	32	28	19	12	100	10.0
-8	45	64	59	50	36	28	91	31.9
-18	48	72	71	63	46	37	74	40.7
-26	33	60	75	89	83	139	51	38.3
-28	38	80	120	164	158	247	91	20.0
-33	37	80	126	182	180	291	84	27.7
-38	31	57	72	99	103	217	51	43.4

2 铁硅铝粉芯

铁硅铝粉芯的典型成分为：9%Al、55Si、85%Fe。由于在纯铁中加入了硅和铝，使材料的磁滞伸缩系数接近零，降低了材料将电磁能转化为机械能的能力，同时也降低了材料的损耗，使铁硅铝粉芯的损耗比铁粉芯的损耗低。铁硅铝粉芯的饱和磁感应强度在1.05T左右，磁导率有26、60、75、90、125等5种，比铁粉芯具有更强的抗直流偏磁能力。由于不含有有机成分，铁硅铝粉芯不存在老化问题，工作温度可达200℃。上海钢研所精密器材研究所研制的SA-35、SA-60材料性能接近ARNOLD公司的铁硅铝粉芯性能。

3 高磁通量 (High Flux) 粉芯

高磁通量 (High Flux) 粉芯的成分为：50%Ni、50%Fe，饱和磁感应强度为1.4T左右，磁导率有14、26、60、125、147、160等，是磁粉芯中具有最强抗直流偏磁能力的材料（如磁导率为60的HF材料在1000Oe磁场下仍然没有饱和），磁芯损耗与铁粉芯相近，比铁硅铝大许多。主要用在高DC偏压、大直流电和低频交流电路中，也用于线路滤波器、交流电感、输出电感、功率因数校正电感等，价格高于铁粉芯和铁硅铝粉芯。国内没有与Magnetics公司产品相近的HF粉芯材料。

4 钼坡莫合金粉芯

钼坡莫合金粉芯 (MPP) 的成分为：81%Ni、2%Mo、19%Fe，饱和磁感应强度较低，约为0.75T，磁导率变化范围大，从14到550，磁滞伸缩系数接近零，温度稳定性极佳（磁导率小于330的材料从-60℃到80℃磁导率相对变化小于0.4%），在磁粉芯中具有最低的磁芯损耗，抗直流偏磁能力仅次于铁硅铝粉芯，由于含镍量高，价格也是磁粉芯中最贵的。主要用于高品质因数滤波器（300kHz以下）、感应负载线圈、谐振电路、对温度稳定性要求高的LC电路输出滤波电感、功率因数补偿电感等。

5 常用磁粉芯性能价格比较

表3给出了MPP粉芯、铁硅铝粉芯和HF粉芯的磁芯损耗比较。铁粉芯的损耗变化较大，在100kHz以内，铁粉芯的损耗与HF粉芯相近。表4给了尺寸为F46.7、24.1F18、磁导率为60的磁粉芯价格的比较。

表3 磁粉芯损耗比较

材料类型	磁芯损耗 (相对单位)			
	10kHz	100kHz	500kHz	1MHz
MPP粉芯	1 x	1 x	1 x	1 x
铁硅铝粉芯	1 x	2 x	1 x	1.6 x
HF粉芯	5 x	6 x	7 x	8 x

表4 磁粉芯价格 (单位: 人民币元) 比较

	铁粉芯-33	上钢所铁硅铝	Magnetics铁硅铝	Arnold HF	Arnold MPP
	4.4	15	29	82.4	113

f、电磁元件损耗与温升的简易计算方法

开关电源变压器的损耗由绕组铜损耗和磁芯损耗两部分组成。
各绕组铜损耗计算

变压器 绕组热态 (α ℃) 铜阻比冷态铜阻 (20℃) 加的倍数KT为:

$$KT = (234.5 + \alpha) / (234.5 + 20)$$

设变压器各绕组直流电阻为 $R_i' (\Omega)$, 则各绕组运行时的热态电阻为:

$$R_i = KT * R_i'$$

所以 各绕组的铜损耗为:

$$P_{mi} = I_i^2 * R_i$$

式中: I_i -- 各绕组电流有效值 (A)

变压器总铜损耗

$$P_m = \sum I_i^2 * R_i$$

当绕组导线直径小于两倍穿透深度时, 不考虑趋肤效应的影响, 当绕组导线直径大于两倍 穿透深度时, 应采用小直径的多股导线并绕或宽而薄的扁铜带, 多股导线的直径或铜带厚度应小于穿透深度的两倍, 穿透深度可由下式计算:

$$e = 66.1 / f^{1/2} \text{ (mm)}$$

式中: f -- 电源频率 (Hz)

2 磁芯损耗计算

磁芯损耗取决于工作频率, 工作磁感应强度, 电路工作状态和所选用的磁性材料的性能, 对于双极性开关变压器, 磁芯损耗为:

$$P_e = P_b \cdot V_c$$

式中: P_b -- 在给定的工作频率、工作磁感应强度时单位体积的磁芯损耗 (kW/m^3), 一般可以磁芯材料手册上得到。

V_c -- 磁芯体积

对于单极性开关变压器, 由于磁芯工作于磁滞回线的半区, 所以磁芯损耗约为 双极性开关变压器的一半。

3 变压器总损耗计算

变压器的总损耗 P_z 为铜损耗和铁损耗之和, 即:

$$P_z = P_m + P_e$$

4 温升计算

开关变压器工作时, 其功耗的一部分为损耗, 损耗最终转换成热能使变压器温度上升, 当温度超出绝缘材料的耐受温度时, 将使变压器的绝缘遭受破坏, 设计完成的变压器应进行温升计算, 使之符合设计要求。

变压器的损耗转换成的热能通过辐射, 对流和传导的共同作用, 从变压器的表面散发。因此, 变压器的温升还取决于变压器表面积的大小。

在自然冷却条件下, 变压器表面温升可按下式估算:

$$\Delta T = K_t * P_z / S_t$$

式中: q -- 单位面积损耗 (W/cm^2)

S_t -- 变压器表面积 (cm^2)

K_t -- 是散热系数。在环境温度为 25℃ 时, K_t 一般取 850, 在环境温度为 50℃ 时, K_t 一般取 710。

$$S_t = K_s * A_P^{0.5}$$

式中: A_P --- 磁芯截面积窗口截面积乘积, cm^4

K_s --- 表面积系数, 其值见表 1

$$A_P = A_c * A_m$$

式中: A_c --- 磁芯截面积, cm^2

A_m --- 磁芯窗口截面积, cm^2

表1 表面积系数Ks

磁芯形式	罐形磁芯	E形磁芯	C形磁芯	环形磁芯
Ks值	33.8	41.3	39.2	50.9

二、电磁元件工艺设计规范

a、变压器工艺设计规范

1 安规要求

UL标准要求所有用于变压器结构的材料应为UL认证的材料。

2 爬电距离

变压器输入与输出电路带电部分之间的爬电距离一般不低于8mm；当壳体接到保护地时，带电部分与壳体之间的爬电距离一般不低于4mm；当壳体不接到保护地且人体可以触摸到壳体时，带电部分与壳体之间的爬电距离一般不低于8mm。以上爬电距离对于二次电源不作要求。

3 变压器的绝缘设计

内层绝缘（骨架的加强绝缘）

由于骨架上有棱角，且一般靠近骨架的导线较细，为使导线与骨架之间有缓冲层，一律包一层0.08mm厚的电缆纸或一层0.05mm厚的聚酯薄膜。

绕组层间绝缘

如果绕组层间电压大于200V，层间应采用垫纸工艺或分段绕制工艺，否则用层间不垫纸工艺。

采用层间不垫纸工艺要注意以下几点：

- (1) 漆包线排漆要整齐。
- (2) 拉力均匀大小合适。
- (3) 采用厚漆层漆包线，例如用三层漆包线或QZ-2漆包线。

绕组间绝缘

绕组间的绝缘由相邻绕组间的最大电位差和受潮后高温最小绝缘电阻的要求来选择。

线包外层绝缘

如果采用灌注工艺时，外包1~2层电话纸或电缆纸作机械性保护。如采用端封时，外包承担防潮抗电作用，所需绝缘总层数应当适当增加。

4 温度要求

对一个特定绝缘级，正常工作下的最大稳定温度不应超过这一绝缘等级所规定的值，这些值详见表1。

绝缘等级	最大温度℃
A (105)	95
E (120)	105
B (130)	110
F (155, 只对60Hz应用)	140
H (180, 只对60Hz应用)	165

5 抗电强度

变压器各绕组之间及各绕组与铁芯间的应能承受50Hz, 3750V (一次电源),

DC1500V (二次电源)的电压，漏电流小于1mA，实验时间1min内而无击穿和飞弧现象。

6 绝缘电阻

变压器各绕组间及各绕组与磁芯间施加500VDC，绝缘电阻不小于100MW。

7 工艺要求

变压器要采用真空浸漆及烘干工艺。

变压器各绕组线径一般不应小于0.1mm。

变压器各绕组要测直流电阻，以确保铜线质量，防止阻值大引起铜耗大而产生过热问题。

变压器引脚漆包线缠绕浸锡部分相距不得小于1.5mm，以防引脚之间相碰造成短路(两脚相连的除外)。

变压器各绕组引线出头部分缠绕在引脚根部，其浸锡后的高度不得高于四角支柱的高度，引脚长度从支柱截算起大于4mm。

8 设计要求

为使效率高，损耗低，原边与副边的损耗应相等，铜耗与铁耗应平衡。

应使原、副边绕组的漏感尽可能小。

为了满足该项要求，在绕线时，应将原、副边绕组的位置尽可能安排得均匀些，必要时：原、副边绕组分层交替绕制；原、副边绕组之间的距离应尽量小；而在变压器电流较大时，不应该用粗导线，需改用等面积的多股导线或薄铜皮绕制。

9 屏蔽

为了消除绕组间通过分布电容产生的电耦合，防止外界高频信号对变压器工作信号和负载的干扰，必要时可采用静电屏蔽，磁芯接地及变压器加金属罩等措施。

10 趋肤效应

在设计变压器绕组，选择电流密度和线径时，必须考虑趋肤效应引起的有效截面的减小。在选用变压器初、次级绕组线径时，应遵循导线直径小于两倍穿透深度的原则，当导线直径大于由穿透深度决定的最大直径时，可采用小直径的导线并绕，或采用多股线、扁铜带绕制。

包不得过大，过挤。

b 电感设计工艺规范

1 电感量的允许误差

对耦合线圈和高频扼流圈：10 ~15 % (测试条件：50mV,1KHz)，设计时还要注意漏感量的控制。

对振荡线圈：±0.2 ~0.5 % (测试条件：50mV,1KHz)

2 电感器需采用浸漆工艺，必要时可采用真空浸漆工艺。

3 灌封工艺

为了增加绝缘强度及防潮性能，降低噪声，电感器在必要时需采用灌封工。

4 安规要求

所有用于电感器结构的材料应为经过UL认证的材料

5 抗电强度要求

线圈对磁芯间施加1500V，50Hz的电压，漏电流要小于1mA，持续时间1min，无击穿和飞弧现象。

6 绝缘电阻

线圈与磁芯间施加500VDC，绝缘电阻不小于100兆欧。

7 导线问题

为防止电感器在长期运行过程中出现断线情况，绕组线径一般应大于0.1mm。

电感器要测直流电阻，以确保铜线质量，防止阻值大引起铜耗大而产生过热问题。

当电感器在高频工作时，在选择导线时需考虑趋肤效应与邻近效应的影响。

8 骨架的选择

骨架在很大程度上影响电感器的电参数及生产的经济性，故须考虑以下几个方面：

要有足够的机械强度，结构牢固。

能支持导线不滑动、不松散。

便于安装。

9 设计出的变压器必须满足易批量生产加工的原则，线包不得过大，过挤

三、我司电磁元件MRPII状况

a、我司电磁元件现状

1、我司目前应用的电磁元件几乎囊括了现行软磁器件主要的种类有：

- 电感
 - 贴片电感 磁放 EMI磁阻
 - 棒状电感 工字形电感
 - 高频插装电感 空心线圈
 - 扼流圈
 - 共模电感 可变电感
- 变压器
 - 音频变压器
 - 工频变压器→R型变压器冷轧硅钢、特种变压器
 - 驱动变压器
 - 通讯接口变压器
 - 电流互感器

主要使用到的软磁材料有：

- 磁粉芯类
 - MPP
 - 高磁通粉芯
 - 铁硅铝
 - 铁粉芯
- 铁氧体
 - MnZn { 功率铁氧体
 - NiZn { 高导铁氧体
 - CuZn
- 合金类
 - 硅钢片
 - 坡莫合金
 - 非晶及超微晶合金

2、我司电磁元件的编码和型号

我司电磁元件分为三大类：一类是变压器类代码是09；一类是电感类代码是10；一类是磁芯类代码是17。

具体编码含义如下：

- 变压器类：09 [X][X] [X][X][X][X] →序号
 - 0 1 → 音频变压器
 - 0 2 → 工频变压器
 - 0 3 → 驱动变压器
 - 0 4 → 高频变压器
 - 0 5 → 通讯接口变压器
 - 0 6 → 电流互感器
- 电感器类：10 [X][X] [X][X][X][X] →序号
 - 0 1 → 高频插装电感器
 - 0 2 → 可变电感器
 - 0 3 → 贴片电感器
 - 0 4 → 共模电感器

五、电磁元件样件试制流程

电磁元件样件试制流程

1. 目的

以电磁元件试制为主线，规范电磁元件的设计图纸审核、发放和管理、送样、承认书审核和归档等工作，保证样件满足规定的要求，以及技术图纸与承认书的一致性。同时，穿插着对电磁元件物料替代时的样件试制也进行了规范。

2. 范围

适用于公司所有的电磁元件的样件试制。

职责

3.1 开发工程师

3.1.1 对电磁元件进行设计，输出规范的技术图纸；

3.1.2 索要、确认样件，确保其满足技术图纸和其他规定的要求；

3.1.3 索取、审核、归档承认书。

3.2 器件工程师

3.2.1 审核技术图纸，确保样件试制的必要性以及图纸的正确性。

3.2.2 控制技术图纸的版本和发放，保证送给外协厂样件试制技术图纸的有效性；

3.2.3 审核承认书，确保与技术图纸要求的一致性。

3.3 工艺工程师

3.3.1 对制作承认书的技术图纸进行审核。

4. 流程概要

基于产品开发需要新的电磁元件，或者物料替代的要求，开发工程师绘制电磁元件的技术图纸，经过业务主管审核后提交给器件工程师；

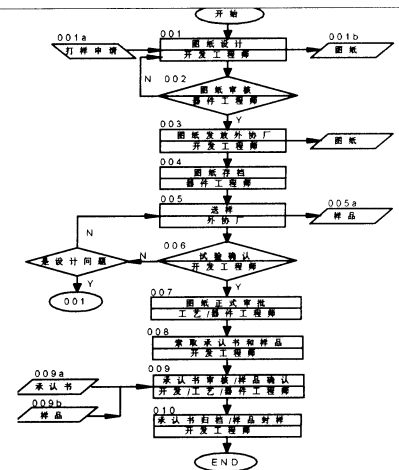
器件工程师审核样件试制的必要性和图纸的正确性，通过后对技术图纸进行控制；

开发工程师发放图纸给外协厂，要求其提供样品；

开发工程师检验样品，合格后将图纸提交工艺工程师、器件工程师进行正式审批，通过后通知外协厂准备、提交承认书和重新提交样品；

开发工程师、工艺工程师和器件工程师审核承认书，确认样品，通过后由开发工程师归档承认书于产品数据管理中心；承认书的更改应遵照《设计更改流程》进行。

5. 流程图



6. 流程说明

001 图纸设计

开发工程师根据电磁元件的试制请求按照公司标准图纸格式进行图纸设计。

1001a 试制请求 试制请求来自两个方面：一是新产品开发需要新的电磁元件物料；二是物料替代。

001b 图纸

002 图纸审核

业务经理审核图纸的规范性和正确性，通过后开发工程师将图纸提交器件工程师进行审核。主要审核样件试制的必要性以及技术图纸的正确性。通过后器件工程师进行版本标识并加盖物料品质试验部印章。

对于任何图纸上的修改，修改者都应该在修改处签名并注明日期。

003 图纸发放外协厂

开发工程师将审核通过图纸的复印件或以传真的形式发放给外协厂，同时注明要求样品到货的时间、送样的地点、联系人、联系电话等信息。

004 图纸存档

器件工程师存档技术图纸的原稿。

对于不须要改动技术要求的物料替代，可以省略以上步骤。直接由器件工程师将被替代物料的承认书发给外协厂即可，外协厂按照承认书进行样件加工。

005 送样

外协厂根据技术图纸/承认书的要求加工样品，完成后按照要求的方式送样。

005a 样品

006 试验确认

开发工程师对样件进行试验，检验其是否符合技术图纸规定的要求，如果不通过，当是设计问题时需要重新设计，流程

007 图纸正式审批

开发工程师在对样件检验合格后，开发工程师提交技术图纸给工艺工程师、器件工程师进行审批。审批通过后，器件工程师在图纸上盖章，表明图纸用于承认书制作。

当图纸有所变化时，器件工程师应以不同版本对图纸进行标识，任何手工修改的地方修改者都应该在修改处签名并注明修改日期。

008 索取承认书和样品

图纸正式审批通过后，开发工程师通知供应商检验结果，发送通过后的技术图纸给供应商。要求其根据技术图纸要求和产品的特点制作产品的承认书和样品并送公司审批。

009 承认书审核/样品确认

开发工程师、工艺工程师和器件工程师分别根据技术图纸、样件的检验记录对承认书进行审核。以确认承认书的要求包含技术图纸要求并与其一致。器件工程师对承认书进行编号，编号的规则如下：

□□ ■产品型号

↓
厂家代码

009a 承认书

009b 样品

为此，器件工程师应建立并保存厂家与代码的对照表，以正确地标识、区分承认书和厂家。

010 承认书归档

开发工程师将承认书归档于产品数据管理中心。同时，将样品送IQC部以便于进货检验。

对于物料替代产生的新的承认书，器件工程师应以填写设计更改单，说明原来的承认书的处理办法：是增加一份承认书还是回收原来的承认书，详细参见《设计更改流程》。

8. 表格和记录

R&D/QR3.221-01 承认书

9. 参考文件

R&D/WI3.220 设计更改流程

磁性材料知识交流教案

一、磁学历史与发展

磁学的研究是从研究永磁体开始的，天然磁铁矿（ Fe_3O_4 ）是人类最早发现 and 应用的永磁体。北宋自然科学家沈括在《梦溪笔谈》一书中总结了永磁体指南针的制作与应用，其为磁性应用的最早记载。

磁学作为一门科学，直到19世纪才开始发展，几个主要标志是：丹麦物理学家奥斯特在1820年发现电流的磁效应，拉开了磁与电的序幕。同年安培证明通电的圆形线圈和普通磁铁一样，提出了磁体的“分子电流”假说，认为一切磁性都起源于电流，预言了原子和物质的磁性的现代电子理论，成为磁学的理论基础。1831年，法拉第发现了电磁感应定律，揭示了电与磁之间的内在联系。麦克斯韦将电磁的联系建立了严密的电磁场理论。

专题研究主要有：

1845年，法拉第确定了抗磁性和顺磁性的存在

1895年，居里对抗磁和顺磁性的温度关系作了实验研究，总结出定理描述顺磁性的居里定律。

1932年，夸耳提出反铁磁性概念

本世纪40年代高频电子技术推动着铁氧体的磁性材料的研究和应用。1948年：夸耳提出解释尖晶石型铁氧体磁性的亚铁磁性理论。说明亚铁磁物质具有此铁磁物质更为多样的饱和磁化强度——温度曲线。

关于铁磁性的研究：1881年瓦尔堡和尤固观测到铁的磁滞回线。

本世纪30年代研制成功品粒取向硅钢片，铝镍钴合金。

40年代出现高频软磁铁氧体

50年代钡铁氧体永磁、微波技术用的旋磁铁氧体和矩磁铁氧体相继出现

60~80年代研制成功钕铁硼三代稀土永磁，我国目前Nd-Fe-B型的（BH） m 实验室水平达 4.5KJ/m^3 ，相当于理论上限（ 525KJ/m^3 ）的80%。

60年代开始非晶磁泡的研究和应用

70年代开始磁光存储材料应用研究

80年代出现纳米磁性材料的研究与应用，同时研制成功有机铁磁体。

1、磁学与磁性材料近代发展概要：

1895年 居里定律

1905年 抗顺磁性理论

- 1915年 回转磁效应实验（爱因斯坦）
- 1919年 巴克豪生效应
- 1920年 发明玻明伐合金
- 1925年 电子旋磁矩实验
- 1927年 布里渊函数
- 1928年 海森堡交换相互作用
- 1930年 单畴粒子理论，低温自旋波理论建立
- 1931年 粉纹磁畴实验，发明铝-镍-钴硬磁
- 1932年 原子磁矩性质，反铁磁理论
- 1935年 建立磁畴结构理论
- 1936年 铁磁性能带理论
- 1938年 磁铅石型铁氧体合成
- 1945年 发展铁氧体（研究与应用，1935年开始）
- 1946年 金属的铁磁共振实验
- 1948年 夸耳建立亚铁磁性理论
- 1949年 建立旋磁性和张量磁导率理论
- 1951年 提出巡游电子铁磁性理论
- 1952年 钡铁氧体合成
- 1954年 卡姆拉斯发表 γ - Fe_2O_3 磁粉专利
- 1955年 夸耳畴壁，石榴石型铁氧体合成
- 1957年 提出磁光记录原理
- 1958年 出现超导性铁磁合金
- 1959年 建立绝缘化合物铁磁性理论
- 1960年 日本金夫秀子发明铁-铬-钴硬磁
- 1964年 近藤效应
- 1967年 博贝克发明磁泡，第一代稀土钴硬磁产生
- 1973年 非晶态磁性材料发展
- 1974年 TDK公司制成AVILYN包钴 γ - Fe_2O_3 磁粉
- 1978年 出现金属薄膜磁带
- 1980年 日本KDD公司制成磁光盘（1988上市）
- 1983年 第三代稀土硬磁产生
- 1987年 有机铁磁体发现
- 1992年 稀土-铁-氮化物硬磁崭露头角

2、展望

(1) 开拓超微结构领域的磁性研究将会取得进展

目前外斯分子场、磁畴等只对粒子数为无限大的体系严格适用，已经成熟，很难有新的成就，但从微观结构的研究，已经从普通的材料中发现了崭新的磁性质。如近几年的纳米颗粒磁性材料、磁性薄膜等表现出不同的磁性，给磁学提供了新的发展。

(2) 磁学与生命科学相结合获得新的发展

(3) 磁学从有机铁磁性材料的研究与开发中获得发展

1987年发现有机铁磁体以来，打破了有机物与铁磁性无缘的传统观念。有机物是很好的绝缘体，密度低，能够用做微波磁性材料和航天磁性材料。预计，有机铁磁体在21世纪将会得到重大发展。

(4) 新型磁性材料的研究和开发

A、磁记录上，永磁型磁浮列车

B、第四代稀土永磁材料

3、磁性应用的物理基础

磁性材料的内禀性质、外磁场的响应特性，各磁效应

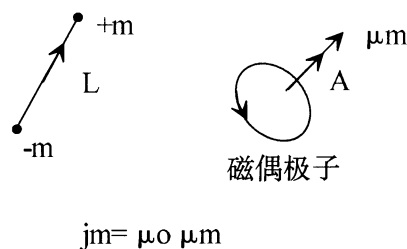
内禀性质：饱和磁化强度、居里温度、磁各向异性和磁致伸缩，它们由材料的物相（如晶体结构、有序程度）成份所决定，与材料的结构状态（如晶粒大小、掺杂、缺陷、机械加工和热处理）无关。

响应磁特性包括：磁导率、矫顽力、剩磁、矩形比和磁损耗等。各参量都是由磁化曲线和磁滞回线来决定，与材料结构有关。

二、磁学基础知识

1、磁矩

一个小磁体，就其在距离比其本身尺寸大得多的所有点上点磁场而言，它可以用一个平面电流回路来代替，这样，一个能够用无限小电流回路所表示的小磁体定义为磁偶极子，磁偶极矩为 $j_m = mL$ ，磁矩 $\mu_m = iA$



磁偶极矩等于真空磁导率 μ_0 与磁矩的乘积， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H} \cdot \text{M}^{-1}$

2、磁化强度M

单位体积磁体内磁偶极子具有的磁矩矢量和称为磁化强度

3、磁场强度H和磁感应强度B

(1) 无限长载流直导线的磁场强度

r 为计算点至导线的距离。

(2) 载流环形线圈圆心上的磁场强度

r 为环形线圈的半径

(3) 无限长载流螺线管的磁场强度

$$H=nI$$

n 为螺线管上单位长度的线圈匝

(4) $B=\mu_0(H+M)$

在自由空间里， B 和 H 是平行的，即 $B=\mu_0H$ ，在磁体内必须用 $B=\mu_0(H+M)$ 表示，而且方向不一定平行。

(5) 单位转换：

$$1G=10^{-4}T$$

(6) 磁化率和磁导率

磁体被置于外磁场中，它的磁化强度将发生变化

$$M=XH$$

X 称为磁体的磁化率

$$B=\mu_0(H+M)=\mu_0(H+XH)=\mu_0(1+X)H$$

定义 $\mu=(1+X)$ 为相对磁导率

$$\text{即 } \mu=B/\mu_0H$$

$\mu_{\text{绝对}}=B/H$ ，一般不用，一般所讲的磁导率均指相对磁导率。

(7) 起始磁导率

起始磁导率是磁中性状态下磁导率的极限值。

(8) 最大磁导率 μ_{Max}

(9) 振幅磁导率 μ_A

B_a 、 H_a 分别代表磁体在交变磁场（无稳恒磁场）中由磁中性状态被磁化时在一定振幅下的磁感应强度和磁场强度值。

(10) 复数磁导率

磁体在交变磁场中磁化时，其磁感应强度和磁场强度，有一个随时间作正弦变化，由于 B 和 H 之间存在相位差，另一个侧只能选取相同频率作正弦变化的分量。

(11) 增量磁导率 μ_Δ

(12) 可逆磁导率 μ_{rev}

当交变磁场强度趋于零时，增量磁导率的极限值定义为可逆磁导率。

4、磁性分类

(1) 抗磁性，是一种原子系统在外磁场作用下获得与外磁场方向反向的磁矩现象，磁化率 $X_d < 0$ ，数值很小，抗磁性物质的磁化曲线为一直线。

(2) 顺磁性，在外磁场作用后，感生出与磁化磁场同方向的磁化强度，磁化率 $X_p > 0$ ，数值很小。（ $10^{-3} \sim 10^{-6}$ ）

(3) 反铁磁性，磁化率在某个临界温度存在极大值的物质。

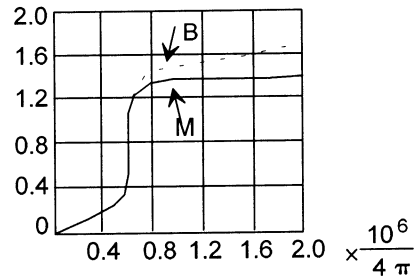
(4) 铁磁性，这类物质有很大的磁化率 $X_f > 0$ （ $10^1 \sim 10^6$ ），在很小的磁场作用下就能被磁化到饱和。反复磁化时出现磁滞现象。

(5) 亚铁磁性，宏观磁性与铁磁性相同，仅仅是磁化率的数量级稍低一些，大约为（ $10^0 \sim 10^3$ ），铁氧体是典型的亚铁磁性物质。

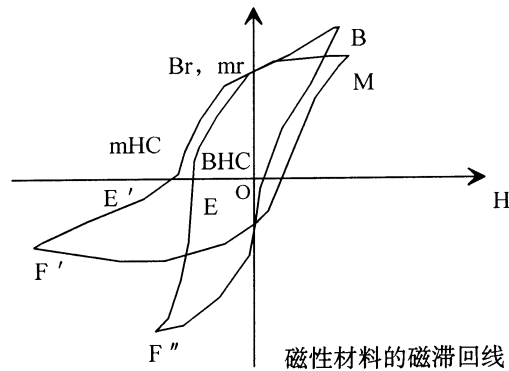
5、磁化曲线

磁化曲线一般通过环形磁性材料样品测量而画出。

$$B = \mu (H + M)$$



6、磁滞回线



三、磁性起源

原子磁矩有三个来源：

- 1、电子轨道磁矩
- 2、电子自旋磁矩
- 3、原子核磁矩

原子核磁矩一般很小，忽略不计。

抗磁性是所有物质的共性。

四、自发磁化

磁性物质某一小区域内，如果相邻原子磁矩数值相等排列方向相反，这种现象称为反铁磁性，如果所有原子磁矩都朝一个方向排列，这种现象称为铁磁性。如果相邻原子磁矩排列方向相反，但数量不等，在某一方向显示出原子磁矩同向排列的效果，这种现象称为亚铁磁性。凡磁性体内任一小区域内的所有原子磁矩由于内部相互作用呈磁有序现象称为自发磁化。

1、铁磁性物质基本特征

(1) 铁磁性物质内存在按磁畴分布的自发磁化，磁畴和自发磁化是铁磁（或亚铁磁）性物质的基本特征。

(2) 铁磁性物质磁化率很大， χ_f 达 $10^5 \sim 10^6$

(3) 铁磁性物质的磁化强度与磁场强度之间不是单值函数关系，显示磁滞现象，具有剩余磁化强度。

(4) 铁磁性物质有一个磁性转变温度——居里温度。

(5) 铁磁性物质在磁化过程中，表现出磁晶各向异性、磁致伸缩，具有静磁能量现象。

2、亚铁磁材料

(1) 当温度低于铁磁居里点时，亚铁材料呈现与铁磁性相似的宏观磁性。

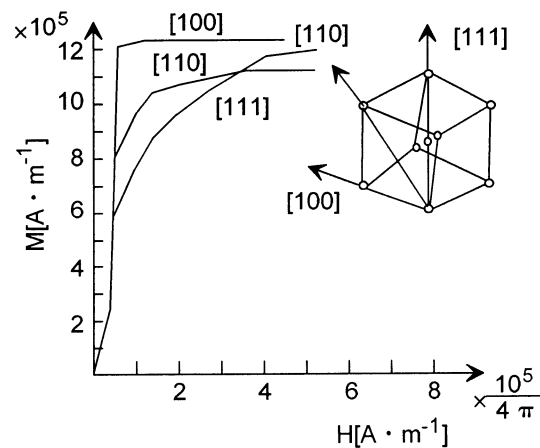
(2) 当温度高于居里点时，呈顺磁性。

(3) 亚铁磁性物质中典型材料——铁氧体的电阻率 ρ 很高可达 $10^{10} \Omega \cdot m$
按晶格分①尖晶石型铁氧体；②石榴石型铁氧体；③磁铅石型铁氧体。

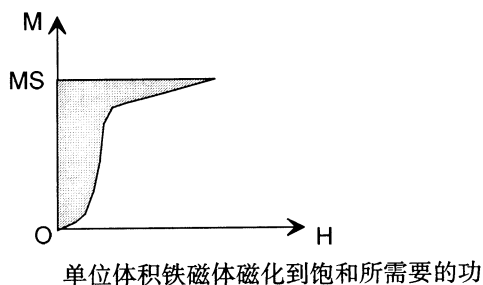
五、磁各向异性

1、磁各向异性

磁体被磁化在其某些方向容易，而在另一些方向较难。说明磁体存在各向异性。



从能量观点而言，铁磁体从退磁状态磁化到饱和状态，M-H曲线与M轴之间所包围的面积等于磁化过程中做的功。



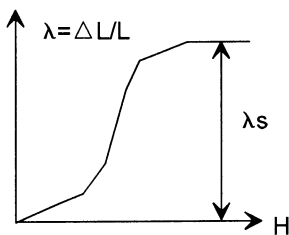
磁晶各向异性的大小，用磁晶各向异性常数K来衡量。

2、磁致伸缩现象

磁性材料在被磁化时，随自身磁化状态改变的弹性形变现象，称为磁致伸缩或磁缩效应。

$$\Delta V/V \text{ 为 } 10^{-10} \quad \Delta L/L \text{ 为 } 10^{-6} \sim 10^{-5}$$

$\lambda_s = \Delta L/L$ ， λ_s 称为磁性材料的饱和磁致伸缩系数。



磁致伸缩 λ_s 与磁场强度H的关系

铁 $\lambda_s > 0$ ，镍 $\lambda_s < 0$ ，产生噪声，应力磁性发生变化。

六、磁畴结构

磁畴是铁磁体内自发磁化平衡分布要满足能量最小原理的必须结果。

七、技术磁化

1、磁化过程

磁性材料受外磁场作用，发生磁畴转动或畴壁伴移。原有磁畴消失，代之以新的磁畴结构，使材料从磁中性状态变到所有磁畴都取外磁场方向的磁饱和状态的一种过程，称为磁化过程。

磁场是准静态的静态磁化，磁场是动态变化的为动态磁化。静态磁化过程包括技术磁化和内禀磁化。技术磁化是指铁磁体在外磁场作用下通过磁畴转动和畴壁位移实现宏观磁化的磁化过程。内禀磁化是指铁磁体被技术磁化到饱和以后，强磁场使磁畴内磁化强度发生变化的过程。

(1) 磁化曲线

抗磁体、顺磁体、反铁磁体的磁化曲线为一直线。

磁化曲线有静态和动态磁化曲线之分。

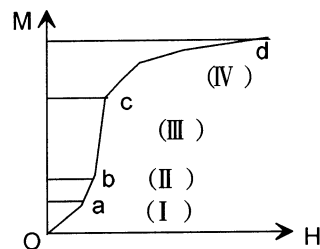
磁体起始为磁中性状态，在磁场作用下，而且磁场强度从零逐渐地增加所得到的磁化曲线为起始磁化曲线。

磁体的磁中性：①交流场退磁法对磁体通过一个其峰值由相应的饱和值减至零的交流场，使磁体处于磁中性状态。

②热致退磁法，即在任何外场情况下，使磁体从高温逐渐降低至居里点以下而得到磁中性状态。

I、起始或可逆部分 (oa)

(主要有畴壁可逆位移作贡献)，磁化曲线基本上为直线。M与H或B与H的关系是线性的。



II、瑞利部分 (ab)

III、非线性陡峻部分 (bc)

磁感强度急剧地增加，主要是不可逆畴壁位移磁化作贡献。

IV、趋近饱和部分 (d)

主要由可逆畴转磁化作贡献。

V、顺磁部分

磁化曲线过 d 后，增强磁场强度将出现顺磁磁化，工程技术很难获得。

(2) 磁化过程的磁化机制

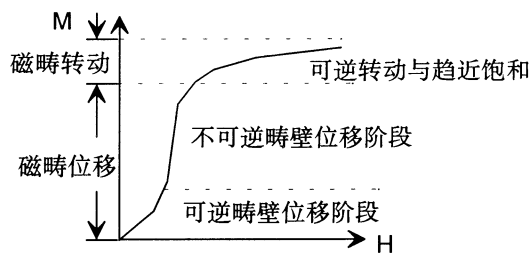
磁化有三个来源：①磁畴体积 V_i 发生变化 ΔV_i ；

②磁畴的自发磁化强度 M_s 与磁场强度 H 方向间的夹角发生变化；

③磁畴内自发磁化强度 M_s 本身的大小改变 ΔM_s 。

技术磁化过程只包括畴壁位移磁化和磁畴转磁化过程。

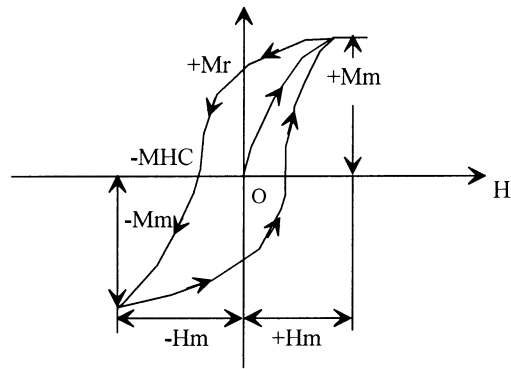
磁化曲线的变化规律分为三个阶段：①弱磁场范围可逆畴壁位移；②中等磁场范围是不可逆畴壁位移，有巴克豪生跳跃发生；③较强磁场范围是可逆的磁畴转动过程。



一般的金属软磁材料和高磁导率软磁铁氧体材料，在弱磁场下，其磁化机制主要是以畴壁位移为主。但是有些磁导率不高软磁铁氧体材料由于存在严重的不均匀性分布，阻碍了畴壁的位移，弱磁场下以磁畴转动为主，畴壁位移被冻结了。

由于制备工艺或热处理及加工处理不够完善，以至给材料带来品格缺陷、掺杂或内应力等造成材料内部不均匀性，从而导致畴壁位移过程有可逆与不可逆之分。畴转也有可逆与不可逆之分，不可逆畴转过程来自各向异性的起伏变化，而与缺陷无关。

不可逆磁化过程是导致磁滞并形成磁滞回线的原因。



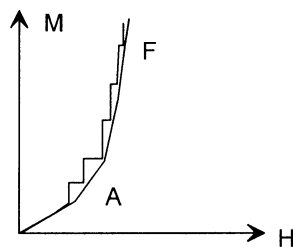
磁滞回线

多数软磁材料元件工作在弱磁场下，一般在 $(0.1 \sim 10^2) \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 。材料内部存在杂质、气泡或内应力分布，都会影响到畴壁能的大小变化，导致对畴壁位移的阻力。铁氧体材料中的这些不均匀性变化一般比金属性材料严重。一般情况下，铁氧体的磁导率较金属磁性材料低原因在于此。

高起始磁化率必须满足的条件：

- ①材料的饱和磁化强度 M_s 要高；不主要；
- ②材料的磁晶各向异性常数 K_1 和磁致伸缩系数 λ_s 要小；
- ③材料的结构要完整、均匀，晶格变形要小，以免造成大的内应力；
- ④材料的成份要纯，杂质浓度要小。

铁磁体内存在应力和杂质以及晶界等结构的起伏变化分布是产生不可逆畴壁位移的根本原因。



不可逆畴壁位移磁化过程

当外加磁场稍为大于这个临界磁场 H_0 时，畴壁就会出现跳跃式的位移。这种跳跃式畴壁位移为巴克豪生跳跃。

铁氧体材料磁晶各向异性较小。

起始磁化率 X_i 与材料①饱和磁化强度 M_s 的平方成正比；

- ② K_1 和 λ_s 成反比；
- ③晶体结构的完整性；

的取值对运放的频率响应有很大的影响。根据实际电路的需求，选取的电容值，应该是既消除了自激，又不致使系统频率特性变坏。

下面是几种常用的无补偿端运放的闭环补偿方法。

图(a)是输入端超前-滞后补偿法，常用于高速集成运放；图(b)是容性负载过大时的补偿方法；图(c)是输入电容和反馈电阻过大引起自激的补偿方法，是超前补偿，C一般只需取几皮法，但在直流应用中，C可取值较大值以消除噪声，它相当于滤波电路的滤波电容。图(d)是集成运放同相端与地之间的平衡电阻过大时的补偿方法。运放的电源旁路不良时也可能引起自激，通常要在运放的紧靠正负电源引脚处对地加接补偿电容，通常是用一只0.01---0.1uF的陶瓷电容和一只10uF钽电容并联。

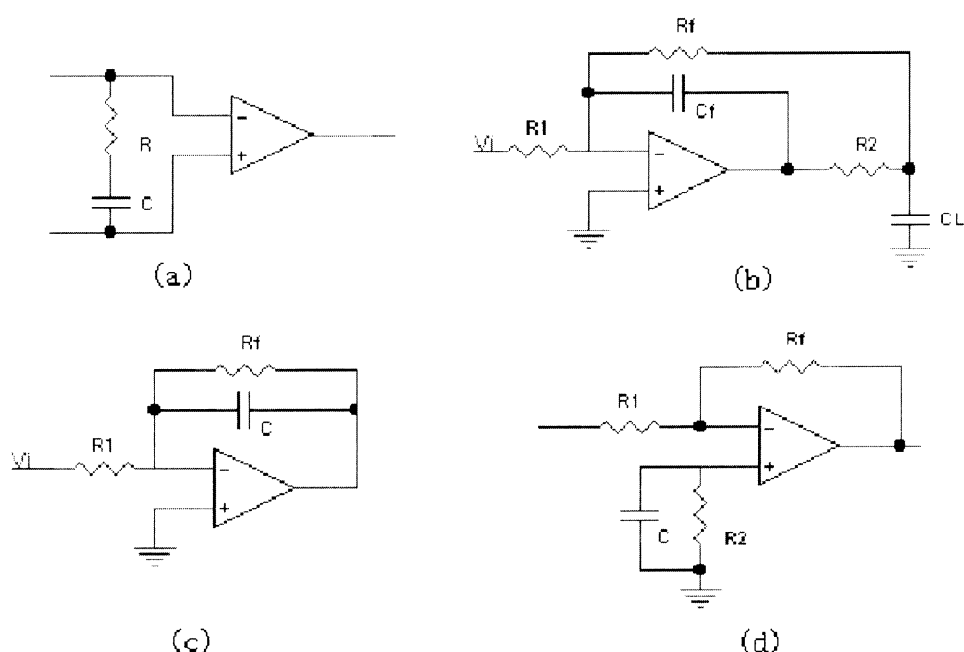


图22：自激的补偿方法

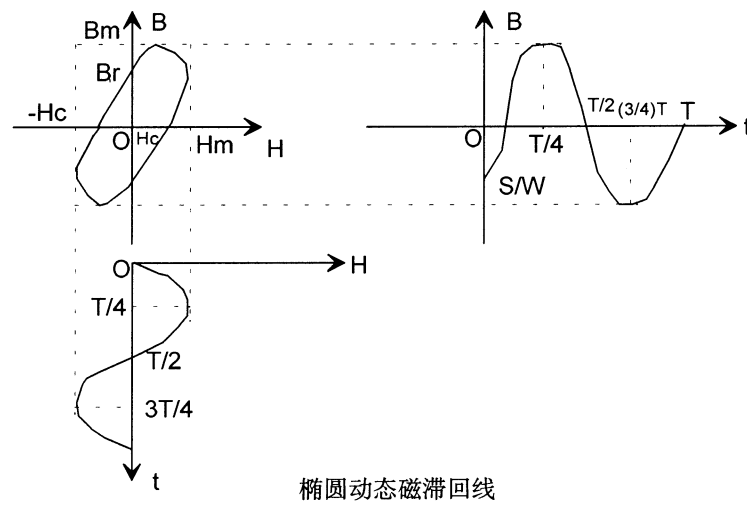
以上只是一些原则，具体的补偿电容和电阻的值，应通过试验来确定。引入补偿网络后，补偿深度是否合适，可用示波器观察集成运放输出波形来判断，在输入正常的工作信号时，看输出波形是否有畸变现象。

3.5 运放的保护问题：

输入保护：

运放的输入差模电压过高或者输入共模电压过高（超出该集成运放的极限参数范围），集成运放会损坏。其保护电路如图23、24所示。

铁磁材料的动态磁滞回线的形状与交变磁场强度的峰值 H_m 和频率有密切关系。动态回线随频率升高趋向椭圆形。



$$H = H_m \sin \omega t$$

$$B = B_m \sin (\omega t - \delta)$$

B 在时间上比 H 滞后 δ ，感应强度 B 跟不上磁场强度变化。

在静态弱磁回线为一直线，但动态弱磁回线满足椭圆形。主要是因为括磁通变化的涡流造成。

动态回线包围的面积不仅包括磁滞损耗，还有涡流损耗、磁化弛豫过程的剩余损耗。

1、复数磁导率

B 、 H 用复数表示，它们的比值就是复数磁导率。

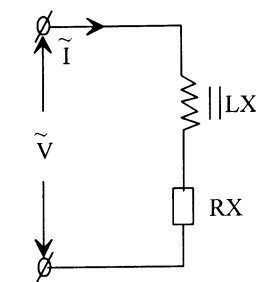
复数磁导率实部 μ' 又叫弹性磁导率，决定于单位体积铁磁体在动态磁化过程中的磁能储存量，大小是。复数磁导率虚部 μ'' 又叫粘滞性磁导率，代表单位

体积的铁氧体在交变磁场中每个磁化一周的磁能损耗，大小为 H 是由于损耗引出起的，所以 δ 又称损耗角。

； B 落后于

2、品质因数Q值

软磁材料要求具有高磁导率和低损耗，引入品质因数Q值。



环状样品等效模拟电路

Q表示软磁材料在被交流磁化时，能量的储存和能量的损耗之比。

3、磁损耗角正切 $\tan \delta$

因为相位角的大小可以代表材料的磁损耗大小， δ 称为损耗角。

4、磁损耗

$$W = W_e + W_n + W_c$$

W_e 涡流， W_n 磁滞， W_c 剩余。

动态磁滞回线包围的面积大小等于磁材料的总磁损耗 W 。

在50Hz及以下，主要是磁滞损耗。

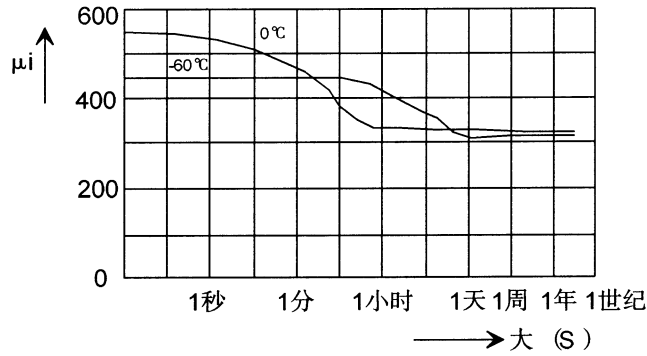
音频（20Hz~200KHz）以涡流损耗为主。

5、磁导率的减落

磁导率随时间而下降的现象称为磁导率减落，称简为减落。

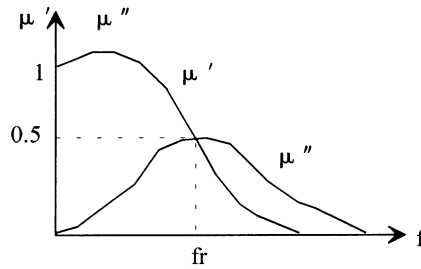
工厂生产单位：交流退磁后10分钟，和100分钟进行测量， $t_1=10$ 分钟， $t_2=100$ 分钟。

通常要求 $DF < 30 \times 10^{-6}$ 。



MnZn铁氧体减落曲线

6、磁谱与截止频率 f_r



磁谱和截止频率 f_r

$f < f_r$ 。

九、常用软磁芯的特性及选择

1、软磁材料分类

合金：硅钢片

坡莫合金

非晶及微晶合金

粉芯：铁粉芯

铁硅铝

高磁通粉芯 (HighFlax)

坡莫合金粉芯 (MPP)

铁氧体：Mntn：功率铁氧体、高导铁氧体

NiZn

2、常用软磁磁芯特点

(1) 铁粉芯:

价格最低

饱和磁感应强度值在14000GS

磁导率从22~100

高频损耗高

初始磁导率 μ_i 随频率的变化稳定性好

(2) 坡莫合金粉芯:

饱和磁感应强度值7500GS

磁导率范围大 (14~550)

粉末磁芯中具有最低的损耗

温度稳定性极佳

磁致伸缩系数接近零

粉芯中价格最贵

(3) 高磁通粉芯 (HighFlax) :

饱和磁感应强度值在15000GS

磁导率从14~160

粉末磁芯中有最高的磁感强度

价格低于MPP

(4) 铁硅铝粉芯:

饱和磁感应强度值在10500GS

导磁率从26~125

磁致伸缩系数接近零

损耗比铁粉芯低80%

具有最佳的性能价格比

(5) 软磁铁氧体:

磁导率随频率的变化特性稳定, 150KHz以前基本不变

磁导率随温度有较大的上升

对应力不敏感

损耗随温度变化, 在80~110℃有最低损耗

形状多

MnZn产量用量最大, 成本低, 电阻率 (1~10 Ω 米), 一般用在100KHz以下

CuZn电阻率高 ($10^2-10^4 \Omega \cdot m$)

(Ni-Zn) 在100KHz~10MHz的无线电频段的损耗小

(6) 硅钢片:

高饱和磁感应强度 (20000GS)

可以冲片、切割, 有叠片式及卷绕式

价格便宜, 产量大

使用频率不超400Hz

工作温度可超过200°C

(7) 坡莫合金:

有十万的初始磁导率

有接近1或接近零的矩形系数

工作温度可超过200°C

价格高

(8) 非晶及超微晶合金:

初始磁导率 $\mu_0=14 \times 10^4$ 钴基非晶

矩形比 $B_r/B_s=0.995$ 钴基非晶

饱和磁化强度18300GS 铁基非晶

高饱和磁感应强度 (1.54T) 铁基非晶合金

铁损低 (取向硅钢片1/3~1/5) 铁基非晶合金