

小功率电源变压器 实用设计制作和修理

贝冠祺 编著

人民邮电出版社

小功率电源变压器 实用设计制作和修理

贝冠祺 编著

人民邮电出版社

登记证号(京)143号

内 容 提 要

本书专门讲述小功率电源变压器设计制作和修理知识。全书分十章,分别介绍了变压器原理、变压器材料、变压器测量、变压器设计、变压器修理、变压器业余制作、热熔断体和PTC元件应用等内容。书中采用最新的标准、数据和图表,提供了多种计算实例,可供广大读者在实际工作中参考。

本书注重介绍物理概念,实用性强。对变压器专业人员、实验室工作人员、广大无线电爱好者和电器维修者来说是有实用价值的参考书。

小功率电源变压器实用设计制作和修理

贝冠祺 编著

*

人民邮电出版社出版发行
北京朝阳门内南竹杆胡同111号
北京密云春雷印刷厂印刷
新华书店总店科技发行所经销

*

开本: 850×1168 1/32 1995年1月 第一版
印张:11.5 1995年1月 北京第1次印刷
字数:300 千字 插页:5 印数:1—6 000册

ISBN7-115-05410-X/TN·792

定价:15.8元

前 言

小功率电源变压器普遍应用于各类电子仪器和家用电器之中,许多朋友希望系统地了解小功率电源变压器的设计、制作和修理知识。所以本人将多年来收集的有关资料和自己实际工作中的研究成果综合整理,编纂成书以飨读者。

为适应变压器修理和少量制作的需要,本书专门详细介绍了简单易学、设计灵活的变压器新简易设计方法和业余变压器的制作方法,也介绍了变压器修理和废旧变压器的利用,还详细介绍了两种新器件——热熔断体和 PTC 元件的应用。

本书力求深入浅出,讲清物理概念,理论密切联系实际。书中内容丰富、实用,对变压器专业人员,特别是大中专院校实验室工作人员和广大无线电爱好者及电器维修人员很有参考价值。

清华大学的张乃国和冶金工业部钢铁研究总院的陈新华两位高级工程师审阅了全稿,并提出了许多宝贵的建议。另外,在本书撰写过程中,得到了何金茂教授、漆仕速教授和徐士佐高级工程师的指导和鼓励,挚友韩永宁教授、牛东、蓝红同志给予了大力支持,在此表示由衷的感谢。

由于本人水平有限,书中难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编著者

目 录

第一章 变压器原理	1
1.1 变压器原理	1
1.1.1 理想变压器原理	1
1.1.2 铁磁体性质	4
1.1.3 实际变压器.....	12
1.2 铜损和铁损的计算	15
1.2.1 铜损计算.....	15
1.2.2 铁损计算.....	16
1.3 计算中的几个系数	18
1.3.1 电流密度.....	18
1.3.2 导线占空系数.....	20
1.3.3 铁心占空系数.....	21
1.3.4 铁心功率和换算伏安.....	22
1.3.5 交流电路中的功率、电压和电流	24
1.3.6 铁心计算公式.....	27
第二章 变压器材料和变压器绝缘	30
2.1 铁心和铁心材料及铁心型号	30
2.1.1 铁心种类和特点.....	30
2.1.2 铁心材料.....	32
2.1.3 铁心系列.....	37
2.2 导线材料	42
2.3 变压器绝缘和绝缘材料	44
2.3.1 变压器的绝缘系统.....	44
2.3.2 绝缘材料.....	46
2.3.3 线包的绝缘设计.....	50

2.4	骨架	69
2.5	各类标准简介	72
第三章	技术要求和有关计算及变压器测量	75
3.1	电性能要求	75
3.1.1	电压调整率和电压比	75
3.1.2	变压器温升和分界功率	82
3.1.3	变压器效率	98
3.1.4	空载电流	98
3.1.5	噪声及其抑制	99
3.1.6	合闸电流	101
3.1.7	杂散磁场(漏磁场)	103
3.1.8	功率因数	103
3.2	经济要求	104
3.3	可靠性	105
3.4	变压器各参数综合分析和测量	105
3.4.1	各主要参数间的关系	105
3.4.2	磁化电流和磁化功率的计算	106
3.4.3	初级电流分析	108
3.4.4	影响磁通量密度的三个因素及有关计算	109
3.4.5	变压器测量	111
第四章	电源变压器结构	117
4.1	低压变压器线包结构	117
4.1.1	壳式铁心线包结构	117
4.1.2	心式铁心线包结构	119
4.2	同名端及其判别	122
第五章	变压器设计的类型和数据运算规则	126
5.1	经济要求和最佳铁心尺寸系列	126
5.2	最佳设计正常设计和简易设计	127
5.2.1	三种设计的特点	127

5.2.2	正常设计介绍	131
5.2.3	简易设计介绍	131
5.3	电参数 J 和磁参数 B_0 的选取	132
5.3.1	小于分界功率时 J 和 B_0 的选取	133
5.3.2	大于分界功率时 J 和 B_0 的选取	135
5.3.3	精确选取 B_0 时还应考虑的因素	136
5.4	数据运算规则	137
5.5	变压器计算中的数字运算	140
第六章	正常设计	143
6.1	设计技术条件	143
6.2	变压器换算伏安	145
6.3	选择铁心确定电磁参量	147
6.4	初次级匝数	148
6.5	空载电流初级电流和功率因数	148
6.6	初次级导线截面积和选择漆包线	150
6.7	各绕组间及绕组对铁心的试验电压	151
6.8	线包结构设计和绕组参数计算	151
6.9	举例	164
6.9.1	举例 1	164
6.9.2	举例 2	172
6.9.3	举例 3	179
6.9.4	举例 4	184
6.10	结合典型表的简易设计	196
6.11	ΔU 或 B_0 与典型表中的值不同时的计算	199
6.11.1	ΔU 与典型表中的值不同时的计算	199
6.11.2	B_0 与典型表中的值不同时的计算	201
第七章	简易设计	204
7.1	$S_c S_0 = KP_2 / B_0$ 与 $P_2 - J, K, \eta, B_0$ 表结合的简易设计 ...	205

7.1.1	方法介绍	205
7.1.2	铁心偏大或偏小时的灵活处理	213
7.1.3	设计步骤	215
7.1.4	举例	218
7.2	其他简易设计方法	222
7.2.1	$S_c = K_3 \sqrt{P_2}$ 与 B_0-K 表及表 7-6 结合的简易设计	222
7.2.2	$S_c = K_4 \sqrt{P_0}$ 与 B_0-K_4 表结合的简易设计	225
7.2.3	$S_c = K_4 \sqrt{P_0}$ 与 P_0-K_4 表结合的简易设计	226
7.2.4	$S = (1/K_c) \sqrt{P_1 D / (10 B_0)}$ 与 $J-D$ 表结合的简易设计	228
第八章 变压器修理		229
8.1	分析故障制订修理方案	229
8.1.1	变压器主要失效类型	229
8.1.2	故障原因	230
8.1.3	寻找故障点决定修理方案	232
8.2	如何拆开铁心	234
8.2.1	拆开前的测量	234
8.2.2	拆开铁心的方法	237
8.2.3	对线包的测量	238
8.3	重绕与改进原设计的选择	239
8.4	修理中的小窍门	241
8.5	旧变压器巧用	243
8.5.1	改装为调压器	243
8.5.2	改造为组合多路输出电源	246
8.5.3	改造为“安全”的电热毯和取暖用电源	246
第九章 变压器业余制作		253

9.1	木心制作	253
9.2	骨架制作	254
9.2.1	青壳纸做骨架	254
9.2.2	纤维板做骨架	256
9.2.3	非标准铁心骨架制作	258
9.3	绕制线包	259
9.3.1	对绕制质量的要求	259
9.3.2	绕制工具	260
9.3.3	如何引出线	262
9.3.4	经常遇到的几个问题及处理	263
9.3.5	线包检测	264
9.3.6	线包浸渍	264
9.4	铁心装配和变压器安装	265
9.5	变压器测试	266
第十章	热熔断体和 PTC 元件应用	267
10.1	热熔断体(限温熔断器)	267
10.1.1	简单介绍	267
10.1.2	主要技术指标	273
10.1.3	标准和产品介绍	276
10.1.4	热熔断体选用	283
10.2	PTC 元件	286
10.2.1	PTC 元件过流保护原理	286
10.2.2	PTC 元件选择	288
附图	附表	293
附图 1.2.2-1	50Hz GE 型铁心磁化曲线	293
附图 1.2.2-2	50Hz GE 型铁心铁损曲线	294
附图 1.2.2-3	50Hz C 型铁心磁化曲线	295
附图 1.2.2-4	50Hz C 型铁心铁损曲线	296
附图 1.2.2-5	50Hz YEI ₁ 型铁心磁化曲线	297

附图 1.2.2-6	50Hz YEI ₁ 型铁心铁损曲线	298
附图 2.1.3-1	插片式铁心和底筒尺寸	298
对附表 2.1.3-1 的说明		299
附表 2.1.3-1	GE 型铁心尺寸系列和底筒尺寸	300
对附图 2.1.3-2	卷绕铁心的说明	303
附图 2.1.3-2	各类卷绕铁心和底筒尺寸	304
对附表 2.1.3-2 的说明		305
附表 2.1.3-2	MC 型铁心尺寸系列和底筒尺寸	305
附表 2.2-1	常用导线一览表	306
附表 2.2-2	漆包线、单丝漆包线规格	310
附表 2.2-3	最新标准漆包线	314
对附表 2.2-2、3 的说明		319
附表 2.2-4	漆包线的特点、用途及选用注意事项	320
附表 5.2.1-1	GE 型铁心 50Hz 电源变压器计算参数表 ...	
		324
附表 5.2.1-2	GE 型铁心 50Hz 电源变压器计算参数表 ...	
		326
对附表 5.2.1-3 ^[9] 的说明		328
附表 5.2.1-3	YEI ₁ 型铁心 50Hz 电源变压器计算参数表 ...	
		329
附表 5.2.1-4(a)	CD 型铁心 50Hz 电源变压器计算参数表	
(I 级品铁心)		插页
附表 5.2.1-4(b)	CD 型铁心 50Hz 电源变压器计算参数表	
(II、III 级品铁心)		331
附表 5.2.1-5(a)	ED 型铁心 50Hz 电源变压器计算参数表	
(I 级品铁心)		插页
附表 5.2.1-5(b)	ED 型铁心 50Hz 电源变压器计算参数表	
(II、III 级品铁心)		335
附表 5.2.1-6(a)	XCD 型铁心 50Hz 电源变压器计算参数表	

(I 级品铁心)	插页
附表 5.2.1—6(b) XCD 型铁心 50Hz 电源变压器计算参数表	
(II、III 级品铁心)	339
附表 5.2.1—7(a) XED 型铁心 50Hz 电源变压器计算参数表	
(I 级品铁心)	插页
附表 5.2.1—7(b) XED 型铁心 50Hz 电源变压器计算参数表	
(II、III 级品铁心)	343
对附表 5.2.1—8 的说明	347
附表 5.2.1—8 MC 型铁心电源变压器计算参数表	348
本书主要参数符号与单位	350
参考文献	355

第一章 变压器原理

1.1 变压器原理

1.1.1 理想变压器原理

变压器是以互感现象为基础的电磁装置。其原理性结构如图 1—1 所示。它由绕在同一个铁心上的两个绕组(又称线圈)组成,与交流电源联接的绕组称初级绕组(又称原绕组) N_1 ,接负载的绕组称次级绕组(又称副绕组) N_2 。

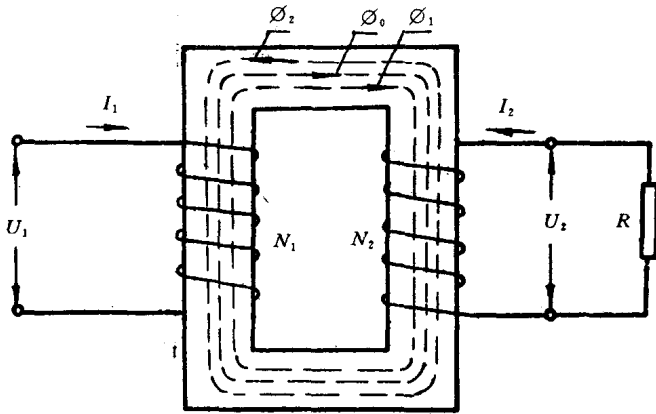


图 1—1 变压器原理图

对变压器原理的讨论先从理想变压器入手,然后讨论非理想情况中的一些主要问题,并在设计时予以考虑,这样就会概念清楚,层次分明。

理想变压器的条件是：通过两个绕组的磁通量 φ 每匝都相同，即没有漏磁；两个绕组导线电阻（铜阻）等于零，没有铜阻产生的损耗（简称铜损、铜耗），即忽略绕组中导线的焦耳损耗；没有铁心产生的损耗（简称铁损、铁耗），即忽略铁心中的磁滞损耗和涡流损耗；初级绕组为一个有近于无限大自感系数的电感线圈，即交流阻抗无限大，故空载（不接负载）电流 i_0 可以忽略。

当次级绕组开路，在初级绕组上加交变电压 u_1 时，铁心中就有交变磁通量 φ_0 （称主磁通量）产生。

根据电磁感应原理，线圈内的磁通量发生变化时，会在线圈两端产生感应电势 e ， e 的大小与线圈匝数及磁通量变化速率的负值成正比，即 $e = -N(d\varphi/dt)$ 。对初级绕组，磁通量 φ_0 在自身的绕组内产生自感电势 e_1 ，于是有

$$e_1 = -N_1 \frac{d\varphi_0}{dt} \quad (1-1)$$

假设初级绕组是一个没有电阻的纯电感，则其上的自感电势 e_1 与外加电压 u_1 大小相等方向相反，并保持平衡状态，即

$$u_1 = -e_1 = N_1 \frac{d\varphi_0}{dt} \quad (1-2)$$

假设初级绕组是一个具有近于无限大自感系数的电感，其上的电流为零。根据楞次定律，由 e_1 引起的电流也为零。实际上这是不可能的，无论如何，在初级绕组中还是有励磁电流 i_φ ，因为它与满载（即负载加够）时的电流相比小得很多，在理想变压器中可以忽略。 i_φ 是空载电流 i_0 的主要成分，所以往往将 i_0 称为励磁电流，但在计算时应将两者区分开来。

假设无漏磁，初级产生的磁通量通过铁心全部耦合于次级绕组上，在次级绕组两端就产生感应电势 e_2 ，于是有

$$e_2 = -N_2 \frac{d\varphi_0}{dt} \quad (1-3)$$

当次级绕组接通负载时，在 e_2 作用下产生的感生电流 i_2 就流过负载，在负载上产生电压降 u_2 。因假设次级绕组导线电阻为零，故有

$u_2 = e_2$, 即

$$u_2 = e_2 = -N_2 \frac{d\varphi_0}{dt} \quad (1-4)$$

根据楞次定律, 感生电流产生的磁通对抗主磁通 φ_0 的变化, 因此由 i_2 产生的磁通量 φ_2 与 φ_0 方向相反, 使 φ_0 减小, 初级自感电势 e_1 下降, 导致 $u_1 > e_1$ 。因 u_1 不变, 为保持 $u_1 = -e_1$ 的平衡状态, 必须保持 φ_0 值不变, 电源必须加大电流, 加大部分设为 i'_2 , 此时的初级电流 $i_1 = i_0 + i'_2$, 使得由 i'_2 新产生的磁通量 φ_1 (与 φ_0 同相) 刚好抵消 φ_2 。此时初次级绕组的磁势相等, 即

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \quad (1-5)$$

这时 e_1 又恢复到与 u_1 大小相等方向相反的新平衡状态, 铁心内部只有 φ_0 存在。由此可见, 不论次级绕组是开路还是接通负载, 在铁心内的磁通量始终是 φ_0 。这就是主磁通量不变原理。另外, i_1 中的 i'_2 分量, 随 i_2 的存在而存在, 随 i_2 的消失而消失, 尤如镜面上反射光与入射光的关系, 故称 i'_2 为 i_2 的反射电流。实际应用中, i'_2 是由 i_2 通过折算得到的, 又称为折换电流。

比较式(1-2)和式(1-4)得 $u_1/u_2 = N_1/N_2$, 工程上只取有效值计算, 故有

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-6)$$

式(1-6)说明初次级电压比等于初次级匝数比, 当 $N_1 > N_2$ 时就是降压变压器; $N_1 < N_2$ 时为升压变压器; $N_1 = N_2$ 时为隔离变压器。式(1-6)只能作为近似计算使用。在实用中, 人们关心的是电流有效值, 故式(1-5)又可写为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1-7)$$

根据这个公式就可以折算次级电流。因 i'_2 远大于 i_0 , 所以有 $i_1 \approx i'_2$, 取其有效值有 $I_1 \approx I'_2$, 代入式(1-7)得

$$\frac{I'_2}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} \quad (1-7a)$$

上式仅在负载为纯电阻、桥式整流和倍压整流电路时才是正确的,在负载为半波或全波整流电路时误差很大。

一般情况下,变压器负载为一阻抗 z_2 ,称变压器输出阻抗,于是有

$$u_2 = i_2 z_2 \quad (1-8)$$

对交流电源而言,变压器初级是它的负载,称变压器输入阻抗 z_1 ,于是有

$$u_1 = i_1 z_1 \quad (1-9)$$

用式(1-8)除式(1-9)并取其有效值得

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_1}{I_2} \times \frac{z_1}{z_2} \quad (1-10)$$

将式(1-6)和式(1-7)代入式(1-10)有

$$\frac{z_1}{z_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (1-11)$$

变压器初次级绕组上的电阻 r_1 和 r_2 就可通过式(1-11)进行折换。

式(1-6)、式(1-7)和式(1-11)就是变压器的变压、变流和变阻(或变阻抗)公式,利用这三个公式就可将变压器初次级的电压、电流和电阻(或阻抗)互相折换;还可按照需要,将变压器等效为各种电路,以简化分析和计算。

1.1.2 铁磁体性质

在讨论实际变压器以前,需先简要介绍铁磁体的一些知识,并分析磁滞损耗、居里温度、磁致伸缩和压磁效应的机理。

一、磁化曲线、磁滞回线和磁滞损耗 变压器所用的铁心属铁磁体中的软磁材料。设铁心有效截面积为 $S_c(\text{cm}^2)$,磁通量密度(磁感应强度,有时简称磁感)为 B ,则有 $B = \Phi/S_c$;设铁心的磁导率为 μ ,磁场强度为 $H(\text{A/cm})$,则有 $B = \mu H$;设铁心平均磁路长度为 $l_c(\text{cm})$,则称 Hl_c 为磁势,它等于初级绕组匝数 N_1 和流过初级绕组的

磁化电流 I_4 的乘积, I_4 是初级电流中的无功分量, 于是有 $HL_c = N_1 I_4$ 。铁心中的磁通量 Φ 由 I_φ 产生。因铁心仅是磁良导体, 对磁通量 Φ 存在阻力, 称 HL_c/Φ 为磁阻。由前面的关系可以得到 $HL_c/\Phi = l_c/\mu S_c$ 。铁心是由硅钢片叠积或卷绕而成的, 故铁心各处的磁导率 μ 不同, 即磁阻不同, 特别是在空气间隙中的 μ 很小而不能忽视。

描述铁心导磁能力的磁导率 μ 是磁场强度 H 的函数。由于铁心磁性的非线性, 它们的关系如图 1-2 所示。图中的 μ_i 称起始磁导率, μ_m 是 μ 的最大值, 出现在比值 B/H 的最大处。

铁心被外磁场磁化程度常用图 1-3 的磁化曲线来描述。图中的 B_m 表示与 H_m 相对应的磁通量密度处于饱和值, 此时即使继续增加 H (亦即增加 I_4), B 增加非常缓慢。从图 1-2 的 μ - H 曲线上也可看到, 该曲线的尾段值较小, 因此 B 的变化也较小。在变压器计算中, 通过对典型试样的实测来得到磁化曲线。

铁心被磁化后另一个重要特性是具有图 1-4 示出的磁滞回线。由 $H = N_1 I_\varphi / l_c$ 可知, 对于确定的铁心, N_1 和 l_c 一定, H 正比于 I_φ , 当 I_φ 为交流时, H 亦是交变的。随着 H 的增大, 磁化曲线开始由 0 上升到达 M 点, 而后则按图中箭头方向变化。当 H 等于 $-H_c$ 或 H_c 时, 铁心才完全去磁 ($B=0$), $-H_c$ 和 H_c 称为矫顽力; 当 $H=0$ 时, 铁心内尚有剩磁 B_{H0} 或 $-B_{H0}$, 这个现象反映出铁心内部的 B 总是滞后于 H , 称为铁心的磁性滞后, 简称磁滞。文献[13]对磁滞的定义是: 只与磁场强度的改变有关而与改变速率无关的磁通密度〔磁化强度〕的不可逆变化。由曲线 1 和 2 围成的封闭曲线称为磁滞回线。

需要指出的是由于铁心是一个非线性元件, μ - H 曲线呈非线性, 因而 $B = \mu H$ 不是简单的线性关系, 磁化电流 I_φ 是个失真的正弦波, 包含 I_φ 的初级电流或空载电流亦为失真的正弦波, 测量初级电流不能用三用表。另外, 磁化曲线在直流和交流状态时稍有不同, 本书只涉及交流磁化曲线。

磁化曲线和磁滞回线反映了铁心的磁特性, 在宏观上代表了铁磁体在外磁场作用下的基本特征。

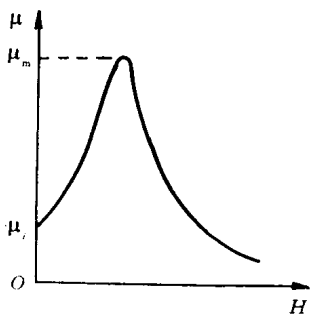


图 1-2 μ -H 曲线

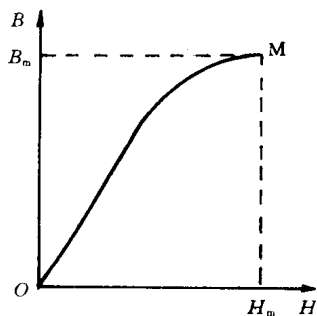


图 1-3 磁化曲线

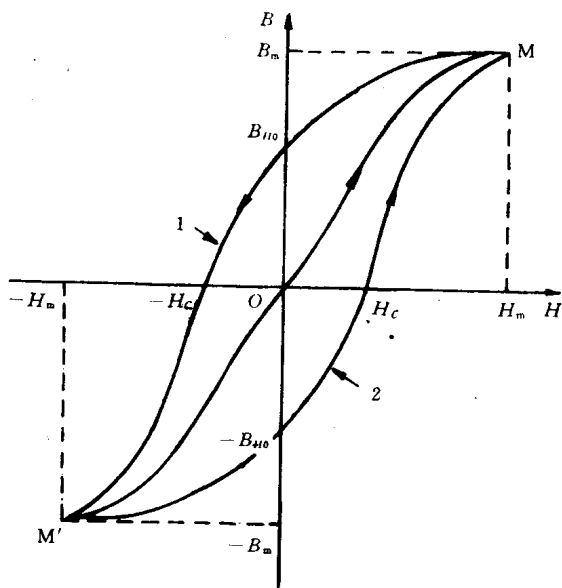


图 1-4 磁滞回线

构成铁心的硅钢片是一种铁磁体,具有自发磁化性质而产生磁