

王瑞华 等 编著

电子变压器设计手册

科学出版社

R
TMU02-62
1

电子变压器设计手册

王瑞华等 编著

科学出版社

1993

36

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是一本工具书,书中介绍小功率电源变压器、高压和高电位变压器、音频变压器和超音频输出变压器、变换器中的变压器、变换相数的变压器、变换频率的变压器、磁控变压器、充电变压器、调幅器式变压器、触发器式变压器、参量变压器、磁通可控的铁磁谐振变压器、电感电容联合体、滤波器式变压器、移相与鉴相变压器、低频压电变压器、高频压电变压器、宽频带压电变压器、具有匹配尺寸的压电变压器、多层压电变流器、盒式压电变流器、交流扼流圈、滤波扼流圈、饱和扼流圈、充电扼流圈、转换扼流圈等的工作原理、绕组线路、最佳结构及设计计算方法,详细列出了设计步骤,并以图表的形式提供了设计所必须的大量参考资料。

本书可供无线电设备电源及电子变压器行业的广大工程技术人员使用,也可供雷达、高能物理、自动控制、通讯、广播电视、水声、冶金、电机、电器等部门的科技工作者及高等院校相应专业的师生参考。

电子变压器设计手册

王瑞华 等 编著

责任编辑 魏 玲

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1993 年 8 月 第 一 版

1993 年 8 月 第 一 次 印 刷

印 数:1-3 000

开 本:787×1092 1/16

印 张:29 3/4

字 数:691 000

ISBN 7-03-003433-3/TN·140

定 价:22.00 元

前 言

变压器是用来变换电能，并把它从一个电路传输到另一个电路的静止电磁元件。在交流电路中，变压器可用来变换电压、电流、频率、相数，改变信号极性，变换信号波形，使初次级电路彼此隔离，使电路阻抗匹配，进行函数变换或功率合成等。电子变压器是电子设备中所用的各种变压器的总称。

电子技术是一门发展极其迅速的新技术。从天上的宇航设备到地下的采矿机械，从家用电器到各种尖端科学领域，都离不开电子技术，离不开电子设备。变压器是电子设备中的重要元件，各种电子设备中，或多或少地都要有一些变压器。离开变压器，许多电子设备都无法工作。

电子变压器是应用在电子线路中的，它的一系列特征都是由线路决定的。其主要特征为：输出功率较小，最低的只有微瓦级，最大的也不超过几十千伏安；频率范围极宽，从几赫到数十万赫，有的工作在单一频率，有的工作在一个频带；信号波形复杂，有正弦波、单极性矩形脉冲、方波、三角形波或梯形波，还有包含各次谐波的复杂波形；大部分是单相的，少数是三相的；大部分是干式的，少数是油浸式的；结构类型比较多，常用的有壳式、单线圈心式、双线圈心式、环形、三相(见图 1.1)等，还有许多特殊的结构。线路对电子变压器的要求也是多种多样的。

由于电子变压器的上述特点，它的种类是很多的。按照工作原理、使用线路等主要特征，可以将电子变压器分成以下几类：

1. 小功率电源变压器

用在电子设备的电源线路中，变换正弦波形的电压或电流。这是数量最多、应用最广的一类电子变压器，有高压、低压、单相、三相、稳压等数种。

2. 音频和超音频变压器

用在广播、电视等设备中，有输入、输出、级间、调幅等数种。这类变压器的主要特征是工作在若干赫到数十万赫的频带内。为了满足非线性畸变、频率失真等方面的要求，希望变压器的漏感和分布电容越小越好。

3. 脉冲变压器

这种变压器所传输的是单极性脉冲，常用在雷达、高能物理、量子电子学、自动控制、计算机等线路中。为了在负载上得到良好波形的脉冲，变压器铁心的工作状态、绕组结构等都与其他变压器不同。

4. 变换器中的变压器

这类变压器的主要特征是频率高，绕组线路比较复杂，变换的信号是交流方波。因而，根据正弦波而导出的一系列关系对这种变压器是不适用的。这类变压器主要应用在开关电源中。

5. 变换相数的变压器

这种变压器常用在整流及自动控制线路中，可以把单相变为两相、三相、多相，还能把

三相变成单相、两相、多相等。这类变压器的工作原理和绕组线路都比较复杂。

6. 变换频率的变压器

这类变压器有倍频和分频两种。倍频变压器输出交流电压的频率可以是初级电源频率的任意倍。分频变压器输出电压的频率可以是电源频率的任意分之一。有时一个变压器还可以同时输出几个频率的交流电压。这种变压器的铁心柱多达几十个，绕组线路也很复杂，常用在手动工具、电蚀加工、冶金等行业中。

7. 磁控变压器

在大型电子设备中常用这种变压器来稳定或调节交流电压。这类变压器的磁路比较复杂，结构和设计方法都比较特殊。

8. 充电变压器

充电变压器有用于电容储能器中的和用于脉冲调制器中的两种。由于充放电过程具有一系列复杂的特征，因此，这种变压器的工作原理、设计方法都和其他变压器不同。

9. 多功能变压器

这是最近发展起来的一类具有多种功能的新型变压器。利用这种变压器可以进行电压、电流和功率的合成，还可以进行其他函数变换。一只变压器可以代替一片线路。参量变压器、触发器式变压器、电感电容联合体等都属于这一类。

10. 压电变压器

这是一种利用压电陶瓷材料的压电效应工作的新型元件。有压电变压器和压电变流器两种。这类变压器结构简单，工作可靠，不可燃，是一种很有前途的电子器件。

除上述外，扼流圈也是电子变压器的一个品种。

本书属于手册类工具书，内容全面、新颖、实用，着重介绍上述各类电子变压器的典型结构和最佳设计方法，列出设计步骤，提供设计所必须的参考资料，并作一些概念性说明，引用的公式一般不作推导。对于公式中涉及的大量符号，其意义应以对公式的相应说明为准；未作直接说明的，可参考书后所附的本章主要符号说明。

为避免重复，本书不研究脉冲变压器及稳压变压器，需要这方面资料的同志请查阅文献[1,2]。

参加本书编写工作的还有林森、王乔、彭红良、王林、林久明、王芄、叶岭等。

高级工程师邵介竟审阅了本书初稿，提出许多宝贵意见，作者表示衷心感谢！

由于能力所限，书中难免有疏漏与不妥之处，欢迎广大读者批评指正！

作者

1990年11月于蓉

目 录

第一章 小功率电源变压器	1
1.1 设计的主要依据	2
1.2 变压器结构与材料的选择	4
1.3 高压和高电位变压器的绝缘方式及冷却方式的选择	18
1.4 高压和高电位变压器绕组结构的选择及绝缘距离的确定	19
1.5 有关系数及尺寸功率的确定	30
1.6 电磁负荷的确定	41
1.7 铁心主要尺寸的确定	46
1.8 标准铁心的选取	47
1.9 线圈的结构计算及绕组主要参数的确定	48
1.10 变压器的损耗和最热点温升	54
1.11 小功率电源变压器的设计程序	57
1.12 设计计算时应注意的其它问题	61
第二章 音频和超音频变压器	64
2.1 音频变压器的电磁参数	64
2.2 音频变压器的特殊形式及其设计特点	77
2.3 音频变压器的漏感	83
2.4 音频变压器的分布电容	89
2.5 音频变压器的结构计算	96
2.6 超音频输出变压器的结构	105
2.7 超音频输出变压器各主要参数间的基本关系	109
2.8 超音频输出变压器的计算方法	112
第三章 变换器中的变压器	115
3.1 变换器中变压器的基本关系	115
3.2 变换器频率和变压器结构型式的选取	118
3.3 变压器铁心的工作状态及消除单方向磁化的措施	119
3.4 利用变压器系列进行设计	123
3.5 最轻重量变压器的设计	139
3.6 高效率变压器设计	144
3.7 高压大功率开关电源变压器的结构特点	149
第四章 变换相数的变压器	155
4.1 单相变三相的变压器	155
4.2 三相变单相的变压器	159
4.3 三相变两相的变压器	161

4.4	三相变多相的变压器	164
第五章	变换频率的变压器	169
5.1	倍频变压器的结构	169
5.2	倍频变压器的线路	171
5.3	倍频变压器的尺寸功率、利用系数、及最佳电磁状态	193
5.4	倍频变压器电磁负荷的选取	194
5.5	倍频变压器的损耗和补偿电容	196
5.6	倍频变压器设计	198
第六章	磁控变压器	203
6.1	磁控变压器的线路与结构	203
6.2	磁控变压器的最佳几何尺寸	222
6.3	磁控变压器的电压降和尺寸功率	225
6.4	磁感应强度变化倍数及最佳类别的确定	227
6.5	控制系统的选择	232
6.6	电磁负荷的确定	233
6.7	损耗和效率的确定	235
6.8	电流反馈的应用及输出电压极限值的计算	236
6.9	磁控变压器的设计方法	237
第七章	充电变压器	247
7.1	充电过程的一般规律	248
7.2	充电变压器的基本关系	250
7.3	最佳充电状态的选择	252
7.4	各种整流线路特点的考虑	253
7.5	充电变压器的设计方法	255
第八章	多功能变压器	260
8.1	小功率变压器中的集成	260
8.2	多功能电子变压器的线路	269
8.3	调幅器式变压器	274
8.4	触发器式变压器	277
8.5	参量变压器	283
8.6	磁通可控的铁磁谐振变压器	303
8.7	电感电容联合体	304
8.8	滤波器式变压器	306
8.9	倍频与分频变压器	308
8.10	平衡频率变换器式变压器	311
8.11	移相与鉴相变压器	313
第九章	压电变压器	319
9.1	压电变压器的工作原理、等值线路及主要参数	319
9.2	压电变压器的工作状态	331

9.3	压电变压器的结构	338
9.4	压电变流器的结构	346
9.5	压电材料的选择	356
9.6	提高变比的方法	360
9.7	压电变压器结构类型、振动模式及工作状态的选取	365
9.8	变压器主要尺寸的确定	368
9.9	压电变压器的外壳	370
第十章	扼流圈	373
10.1	交流扼流圈	373
10.2	滤波扼流圈	382
10.3	饱和扼流圈	389
10.4	充电扼流圈	405
10.5	转换扼流圈	407
附录	415
主要符号说明	447
主要参考文献	466

第一章 小功率电源变压器

小功率电源变压器是电子变压器中应用最广的一类变压器。由于它主要应用在电子设备的电源线路中,加之它的功率比电力变压器的功率小得多,因而称之为小功率电源变压器。

小功率电源变压器的种类很多。从绕组工作电压来看,有高压和低压两种。绕组工作电压在 1kV 以下的称为低压变压器,超过 1kV 的称为高压变压器。绕组工作电压虽然不高,但所处的直流电位超过 1kV 的变压器称为高电位变压器。高压和高电位变压器的主要特点是绝缘距离大,窗口填充系数小,绕组压降较大,绝缘介质中的损耗比较显著,变压器效率略低。

从绕组个数来看,小功率电源变压器有单绕组和多绕组两种。单绕组变压器也叫自耦变压器,它的初、次级之间既有电的联系,又有磁的联系。绕组个数大于 2 的变压器统称为多绕组变压器。小功率电源变压器多半都是多绕组的。

从输入电压的相数来看,小功率电源变压器有单相和三相两种。从电源频率来看,小功率电源变压器有工频 50Hz, 高频 400Hz, 1000Hz 等。

小功率电源变压器主要由铁心和线圈组成。铁心有冲片式和带绕式两种。绕组可以用铜线或铝线绕制。常用小功率电源变压器的结构如图 1.1 所示。

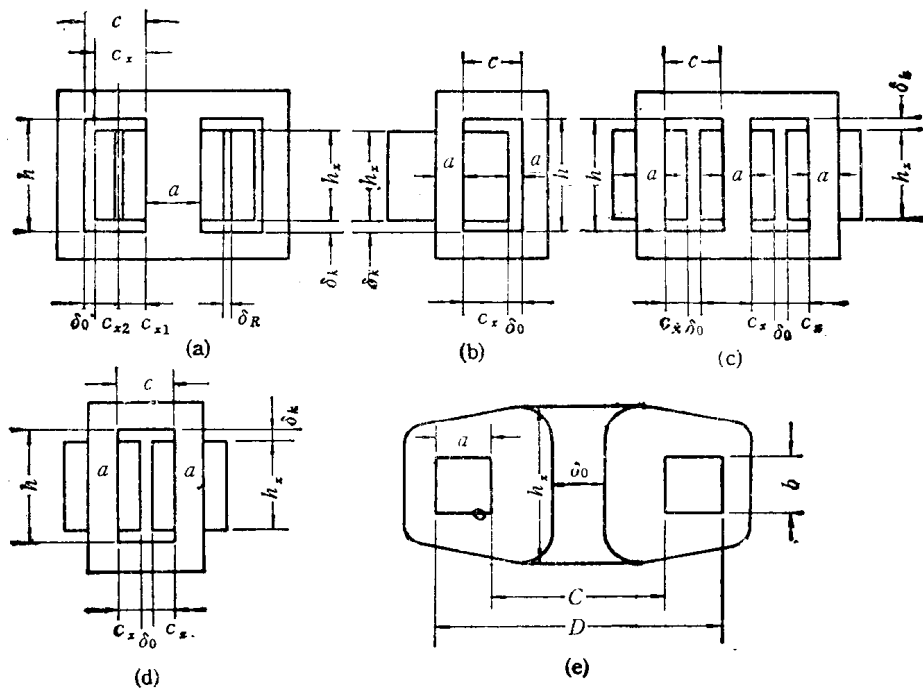


图 1.1 小功率电源变压器的结构
 (a) 壳式 (KB); (b) 单线圈心式 (1XB); (c) 三相 (SB); (d) 双线圈心式 (XB); (e) 环形 (HB)

从整体结构来看,小功率电源变压器有敞开、半密封、全密封三种形式。敞开式变压器的铁心和线圈都裸露在外面。线圈灌注的变压器称为半密封式。油浸及全灌注变压器称为全密封式。

有的小功率电源变压器具有特殊结构,例如,铁心或线圈上带散热器的,利用热电偶堆冷却的,利用硅钢片铁轭宽度的不同形成自然散热器的,对称三相结构的,气体绝缘的,蒸发冷却的,以及超导变压器等^[3]。

小功率电源变压器的经济指标包括体积(V)、重量(G)、价格(J)等。这些物理量与变压器输出功率(P_2)之比称为比经济指标,比如重量 $g = G/P_2$, 比体积 $v_B = V/P_2$, 比价格 $j_B = J/P_2$ 。可以说,用本章介绍的设计方法设计出来的变压器的经济指标是最先进的。

小功率电源变压器的设计主要分三个阶段:确定铁心的主要尺寸,进行电气计算,进行绕组结构计算。开始计算之前,先要选取变压器的设计依据、结构形式、铁心与绕组材料等。

1.1 设计的主要依据

设计依据也就是设计的出发点,选取什么样的设计依据是变压器设计的重要一环。根据不同的依据进行设计,不仅设计方法不同,设计出来的变压器的性能也将大不一样。

变压器的使用条件不同,设计的主要依据也不同。普通电源变压器的设计依据有三个:平均体积温升 τ 、相对电压降 u 、相对空载电流(即相对磁化电流) i_0 。其中哪个设计依据起主导作用要由设计条件决定。变压器的整个设计过程都围绕着主要设计依据进行,其他要求均处于次要地位。

一、平均体积温升 τ

变压器的平均体积温升(简称温升)定义为

$$\tau = \tau_B - \tau_{HJ}$$

式中, τ_B 为变压器的平均体积温度, τ_{HJ} 为环境温度。

变压器的最热点温升定义为

$$\tau_m = \tau_{Bm} - \tau_{HJ}$$

式中, τ_{Bm} 为变压器的最热点温度。

温升是影响变压器可靠性的主要因素。变压器的温升只要不超过允许值就能保证必须的变压器寿命。小功率电源变压器的温升范围很宽,低的只有 $15-20^\circ\text{C}$,高的可达几百度,典型的温升值为 50°C 。以温升为主要设计依据的变压器称为从温升出发设计的变压器,或称为给定温升的变压器。

二、相对电压降 u

变压器的相对电压降定义为

$$u = \frac{\Delta U}{U_1} \approx \frac{\Delta U}{E_1}$$

式中, U_1 为变压器初级额定电压; E_1 为变压器初级电势; ΔU 为变压器初、次级电压降之总和:

$$\Delta U = U_1 - U_2' = U_1 - \frac{U_2 W_1}{W_2}$$

式中, U_2 为变压器次级电压; W_1 为变压器初级绕组的匝数; W_2 为变压器次级绕组的匝数。

相对电压降表示变压器输出电压的稳定性, 可看成是在负载电流从零到额定值的整个变化范围内输出电压的变化。设计小功率电源变压器时, 相对电压降起重要作用。这是因为小功率电源变压器的工作温度范围很宽, 在实际使用条件下变压器的输出电压需要特别稳定。因此, 在许多情况下要把相对电压降作为主要设计依据, 根据相对电压降来进行变压器的设计。有时, 为了使变压器有比较高的效率, 也希望变压器的相对电压降不超过一定范围。变压器的用途不同、工作条件不同, 相对电压降的范围也不同。当对电压稳定性要求比较高时, 要求 $\mu = 0.05 \sim 0.1$, 在个别情况下甚至要求 $\mu = 0.01 \sim 0.02$ 。对于在不太重要的电子设备中使用的变压器来说, μ 值可以高达 0.2, 有时甚至不限。相对电压降的典型值为 0.1。以相对电压降为主要设计依据的变压器称为从相对电压降出发设计的变压器, 或者叫给定相对电压降的变压器。

三、相对磁化电流 i_0

变压器磁化电流的相对值定义为

$$i_0 = \frac{I_0}{I}$$

$$I = \frac{1}{W_1} \sum_{i=1}^N I_{2i} W_{2i}$$

式中, I_0 为变压器的磁化电流; I 为折算的变压器次级电流; W_1 为变压器初级绕组匝数; I_{2i} 和 W_{2i} 分别为变压器第 i 个次级绕组的电流和匝数。

小功率电源变压器的相对磁化电流值较大, 可达 0.1—0.2, 甚至大于 1。相对磁化电流的大小决定于设计和工艺。在其他条件不变时, i_0 随磁感应强度 B 的增长而增长, 随铁心中气隙的增大而增大。

如何选取 i_0 值, 这是小功率电源变压器设计中的一个重要问题。这个问题应从两方面来分析。一方面, i_0 的大小不仅对变压器本身的性能参数有影响, 而且影响电网或电源的性能指标。 i_0 增大意味着电网无功功率增长, 电源的功率因数 $\cos \phi$ 下降, 这是人们所不希望的。另一方面, 从变压器本身来看, i_0 增大, B 值可以提高, 这样可以减小变压器的体积, 因而是有利的。由此可知, 相对磁化电流 i_0 是变压器的一个重要参数。以相对磁化电流为主要设计依据的变压器称为从相对磁化电流出发设计的变压器, 或者叫给定相对磁化电流的变压器。

四、主要设计依据的选取

设计变压器时, 在什么功率范围内选取什么样的设计依据, 不仅取决于规定的 τ , μ 和 i_0 值, 还和电源频率 f 、铁心材料的质量等有关。 i_0 越小, 铁心材料的比损耗 p_0 越高,

以相对磁化电流为依据的功率范围越宽。频率越高，以温升为依据的功率范围越宽。在设计变压器时，可根据变压器的功率 P ，按图 1.2 初步选取设计依据。确定设计依据之后，再选取电流密度 j 及磁感应强度 B 。

设计依据决定着磁感应强度的选取方法，反过来，磁感应强度又影响设计依据的选取。在功率很小的变压器中，因铁心饱和条件所限，磁感应强度也不能无限增大。对于这类变压器来说，在这种情况下不能保证有最佳的损耗比，也不能保证变压器有最佳的温升。这种变压器称为工作在强迫磁化状态的变压器(简称 QZB)。磁感应强度根据温升来选取的变压器存在最佳损耗比，也有最佳的温升。这种变压器称为工作在自然磁化状态的变压器(简称 ZZB)。

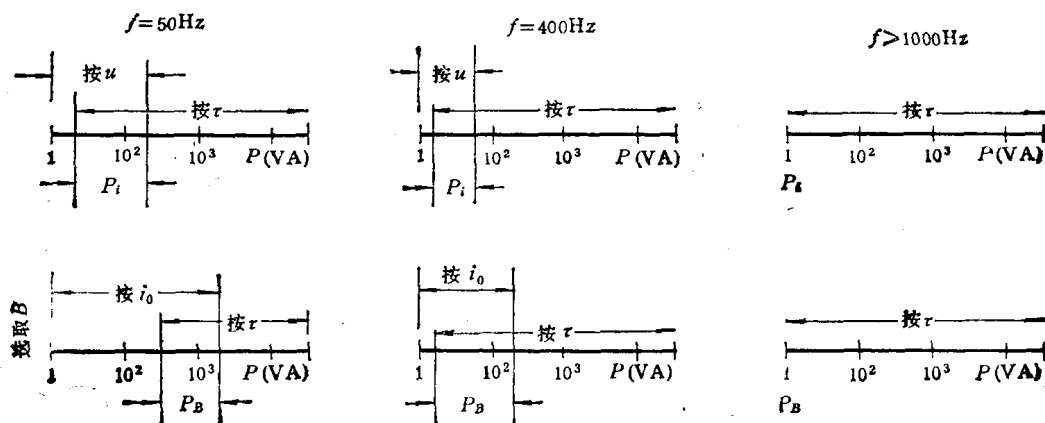


图 1.2 设计依据和变压器功率的关系

从图 1.2 可见，大多数 50Hz 的小功率电源变压器都根据饱和条件选取 B 值，都属于 QZB；高频小功率变压器多半根据温升选取 B 值，属于 ZZB。因此，粗略地讲，也可以把 QZB 称为工频变压器，把 ZZB 称为较高频变压器。

1.2 变压器结构与材料的选择

一、变压器结构形式的选取

从结构形式来看，普通电源变压器有如图 1.1 所示的五种，其经济指标见表 1.1。从该表可见，当以相对电压降为设计依据时，工频下 KB 的体积最小。当用铜线时 HB 的重量最轻(比 KB 轻 6% 左右)。XB 的经济指标接近于 KB (大 2—10%)。1XB 的比经济指标比 KB 高 15—30%。当频率较高时，XB 的重量比 KB 轻，XB 的体积比 KB 大，HB 最轻，KB 的价格略低。当采用铝线时，在任何频率下，XB 的重量都比 KB 轻。从导线消耗来看，KB 最经济，XB 次之。HB 最差(大 30—50%)。

当以相对电压降为依据设计工频变压器时，最好选用 KB。设计重量最轻和体积最小的高频变压器时，最好选用 HB。当对变压器的重量要求较严，而体积无所谓时，可采用铝线，并建议用 XB。

以温升为设计依据时，1XB 最差。当功率超过 30—50W 时，XB 比 KB 好。频率越

表 1.1 各种形式变压器的经济指标

频率 (Hz)	经济指标	q_i 值									
		以相对电压降为设计依据					以温升为设计依据				
		KB	XB	HB	SB	1XB	KB	XB	HB	SB	
50	$v_B(\text{cm}^3/\text{W})$	5.23	5.93	5.5	7.39	7.23	3.14	2.89	4.07	3.51	
	$i_B(\gamma/\text{W})$	1.86	2.18	2.22	2.69	2.63	1.37	1.21	1.4	1.48	
	$\cos\phi$						98	97.9	99.4	95.9	
	η						95.4	95.1	94.9	94.3	
	铜	$g_x(\text{g}/\text{W})$	3	4.99	5.5	6.6	5.69	3.56	3.2	4.01	4.09
		$g(\text{g}/\text{W})$	21.9	21.3	18.6	26.5	24.6	12.1	10.5	15	12.4
	铝	$g(\text{g}/\text{W})$	19.4	18.8		23.9	21.1	10.3	8.9		10.4
400	$v_B(\text{cm}^3/\text{W})$	0.79	0.78	0.68	1.11	0.94	1.22	1.12	1.5	1.34	
	$i_B(\gamma/\text{W})$	0.67	0.72	0.67	0.88	0.78	1.4	1.12	1.61	1.32	
	$\cos\phi$						1	1	1	99.9	
	η						97.4	97.1	97.6	96.5	
	铜	$g_x(\text{g}/\text{W})$	0.46	0.75	0.76	0.85	0.81	1.58	1.36	2.07	1.66
		$g(\text{g}/\text{W})$	2.33	2.26	1.95	2.82	2.55	4.26	3.3	4.39	3.85
	铝	$g(\text{g}/\text{W})$	1.85	1.83		2.4	2.05	3.47	2.63		3.02

注: γ 表示人民币元。

高,尺寸越大,XB的优点越突出。工频时KB比XB重10%左右,高频时KB比XB重25%。XB的效率比KB低。设计高频小功率变压器时最好采用HB,它的 g 和 v_B 都最好。工频时小型HB要比XB轻10%。高频时小型HB的 g 比XB低20%。然而,当功率增长时HB的优点越来越不明显。在大功率情况下,HB不仅不如XB,而且不如KB。在高频并以温升为设计依据的条件下,SB的指标和KB相当,但比XB差15—20%。工频时,SB不仅不如XB,而且不如KB,更不如HB。在以相对电压降为设计依据的条件下,SB的所有指标都不如单相变压器,经济指标比KB差30—40%。

在以相对电压降为设计依据时,三个单相变压器的经济指标要比三倍功率的一个三相变压器差。因此,一个三相变压器比三个单相变压器好(重量、体积、价格都低10%左右)。在以温升为设计依据,而且功率超过30W的情况下,SB的指标比同功率的三个XB差,特别是400Hz时,比经济指标高30%左右。由此可知,对于中功率和大功率的变压器来说,用SB代替单相变压器,重量和体积都将有所增长。

自耦变压器的尺寸功率 P_c 由下式确定:

$$P_c = \frac{P_2}{2}(1 - k'_B)\left(1 + \frac{1}{\eta}\right)$$

式中 k'_B 为自耦变压器的变比,等于低压绕组与高压绕组匝数之比; η 为变压器的效率。

在功率相同的情况下,自耦变压器的 P_c 随 k'_B 的增长而减小,经济指标因此得到改

表 1.2 不同使用条件下建议采用的变压器结构形式

变压器类别			叠片铁心	带绕铁心
低压	小功率 (10W 以下)		KB	KB 及 1XB, XB
	大中功率 (10W 以上)	f(Hz)	50	KB
			400	KB
>400			KB, HB	
高压的			50	1XB 及 XB, KB
			≥400	KB, HB
高电位的			50	XB, HB
			≥400	HB, KB
在必须有可靠的屏蔽时			HB, XB	HB, XB

善。对于功率一定的变压器来说,变压比接近于 1 时自耦变压器的体积最小、重量最轻。

当要求变压器漏磁最小或抗干扰能力较强时,最好采用绕组沿铁心均匀分布的 HB。XB 比 HB 稍差,KB 最差。从绕组分布电容来看,普通 HB 最差,分段交替分布的 HB 性能最好。

从工艺方面看,HB 最差,主要缺点是:铁心和线圈无法同时生产,因而延长了生产周期;线圈绕制时的生产率低;粗线和极细线的绕制都困难。冲片铁心变压器中,KB 的工艺性最好。XB 有两个线圈,工艺性比 KB 差。当利用带绕铁心时,XB 有两个线圈、一个铁心。KB 有一个线圈、两个铁心。由于制造铁心比制造线圈困难,所以 KB 的制造费用要比等功率的 XB 高。对于中功率和大功率变压器来说,制造费用高于材料价格,因而,XB 比 KB 经济。

初步设计时可根据变压器的功率、频率、电压等,利用表 1.2 选取适宜的结构形式。

二、主要材料的选取

1. 磁性材料

变压器的导磁体由软磁材料制成。常用的软磁材料有:电工钢、软磁合金、软磁铁氧体、非晶态合金等。

电工钢的主要成分是铁和硅,因此,也称为硅钢片(带)。按照生产工艺的不同,电工钢可分为热轧和冷轧两种。根据在磁场强度为 2500A/m 时,顺轧制方向与横轧制方向的磁感应强度 B_{2500} 之差 ΔB_{2500} 的大小,又可以把电工钢分成如下几种:

晶粒取向的冷轧硅钢片(带)的各向异性较大,通常 $\Delta B_{2500} > 0.25T$ 。常用型号有 DQ1-DQ6, DG1-DG4, DQ133-30-DQ230-35 等。

晶粒取向度小的硅钢片(带)的各向异性较小,一般 $\Delta B_{2500} \approx 0.16T < 0.25T$,常用型号有 DW270-35-DW1550-35。

热轧硅钢片。这种硅钢片的各向异性不强,当磁场强度 H 为几百安每米时, ΔB 为 20—30%;当 $H = 1000-2500 A/m$ 时, ΔB 为 4—5%;当 $H > 3000A/m$ 时,无各向异性。常用型号有 DR360-50-DR265-50, DR320-35-DR225-35, DR1750G-35, DR-

1250G-20, DR1100G-10 等。

常用电工钢的电磁性能如表 1.3 和表 1.4 所示。

表 1.3 常用电工钢的电磁性能

材 料		密度 γ_T (g/cm ³)	μ_{CD} (10 ⁻³ H/m)	p_i (W/kg), H (A/m)					
型 号	厚度 (mm)			$B = 1T$		$B = 1.5T$		$B = 1.7T$	
				H_1	p_1	$H_{1.5}$	$p_{1.5}$	$H_{1.7}$	$p_{1.7}$
DR280-35	0.35	7.55	0.35	1.7	1.15	11	2.8		
DR225-35			0.40	1.7	1.05	11	2.55		
DQ1	0.35	7.65	0.40	0.8	0.9	2.6	2.0	7	2.9
DQ2			0.50	0.7	0.8	2.5	1.8	6	2.6
DQ3			0.60	0.6	0.7	2.2	1.6	5	2.3
DQ4			0.70	0.5	0.6	1.8	1.4	4	2.0
DQ6			0.80	0.4	0.5	1.7	1.15	3	1.66
DR1250G-20	0.2	7.55	0.30	5	12.5	18	30		
DR1100G-10	0.1		0.35	5	11.0	18			
DG1	0.08	7.65	0.60	0.7	10	2.7	22		
	0.05		0.50	0.7	10	2.7	21		
DG2	0.08		0.70	0.6	8.5	2.6	19		
	0.05		0.60	0.6	8.5	2.6	19		
DG3	0.08		0.80	0.5	7.5	2.5	17		
	0.05		0.70	0.5	7.5	2.5	16		
DG4	0.08		0.90	0.4	7	2.4	16		
	0.05		0.80	0.4	7	2.4	15		

注：厚度为 0.35 mm 的是 50 Hz 时参数；厚度小于 0.35 mm 的是 400 Hz 时的参数。

表 1.4 某些磁性材料的高频参数

材 料		μ_{CD} 和不同 B (T) 时的比损耗 p_i (W/kg)														
型号	厚度 (mm)	$f = 400\text{Hz}$			$f = 1\text{kHz}$			$f = 2.4\text{kHz}$			$f = 10\text{kHz}$			$f = 50\text{kHz}$		
		μ_{CD} ($\times 10^{-3}$)	$p_{0.3}$	p_1	μ_{CD} ($\times 10^{-3}$)	$p_{0.3}$	p_1	μ_{CD} ($\times 10^{-3}$)	$p_{0.3}$	p_1	μ_{CD} ($\times 10^{-3}$)	$p_{0.3}$	p_1	μ_{CD} ($\times 10^{-3}$)	$p_{0.3}$	$p_{0.5}$
DR1100G-10	0.1	0.35	3	11	0.35	11	38	0.35	41	145	0.35	300	1000	0.22		
DR1250G-20	0.2	0.8	2.3	12.5	0.60	9.5	38		37	150		370	1500			
DGZ	0.08	0.6	2.1	8.5	0.50	7.5	30	0.45	30	120	0.4	250	1000			
	0.05	0.5	2.1	8.5	0.45	6.5	26	0.42	24	95	0.4	190	750		1000	2400
1J50	0.15	3.5	1.5	5.5	3.1	5	20	2.5	20	81	1	220	860	0.5		
	0.05	2.5	1.3	5.0	2.4	4	14	2.3	11	45	2	85	300	1.2	350	750
1J79	0.10	20	0.5		15	2		8	9.5		3	100		1.0		
	0.05	20	0.45		19	1.6		16	6		8	42		2.8	160	600
1J85	0.02	13	0.55		12	1.3		12	4		11	30		7.0	90	270

注： $p_{0.3}$ 为 $B = 0.3T$ 时的比损耗； $p_{0.5}$ 为 $B = 0.5T$ 时的比损耗； p_1 为 $B = 1T$ 时的比损耗。

软磁合金包括铁镍合金、铁铝合金、铁钴钒合金、恒导磁合金、磁温度补偿合金五大类。每一类中又有很多型号。电子变压器中比较常用的有：1J34, 1J50, 1J51, 1J52, 1J54, 1J79, 1J80, 1J85 等, 其高频参数见表 1.4。

对于小功率电源变压器来说, 饱和磁感应强度 B_s 越高, 在一定的频率 f 和一定的磁感应强度 B 时的磁导率 μ 越高, 铁心材料的比损耗 P_0 和磁场强度 H 越小, 材料就越好。然而, 优质材料的价格通常也较高。

冷轧电工钢的方向性较强。在和轧制纹向成 60° 角的方向磁性最差。优质冷轧电工钢的 μ, B 和 p_0 的各向异性如图 1.3 所示。

图 1.4 中示出了几种常用磁性材料的比损耗和磁感应强度的关系, 图 1.5 给出了几种常用电工钢的磁化曲线。

电源频率对磁性材料性能影响极大。由于涡流的存在, 当频率提高时铁心的比损耗增长, 有效磁导率下降。常用磁性材料的比损耗和频率的关系如图 1.6 所示。

材料的片(带)厚对铁心的磁性能也有很大影响。对于一定的频率来说, 存在一个最佳的钢带厚度(表 1.5)。在最佳厚度下材料的比损耗最小。当钢带过厚时, 由于涡流的影响, 比损耗增长。当钢带过薄时, 由于磁滞的影响, 比损耗同样增长。极薄电工钢带的磁化曲线如图 1.7 所示, 比损耗曲线如图 1.8 所示。

非晶态合金的直流磁化曲线如图 1.9 所示。磁介质的直流磁化曲线如图 1.10 所示。

表 1.5 磁性材料型号与带(片)厚(mm)的选择建议

使用建议	材料型号	频率 f (kHz)							
		0.05	0.4—0.5	1—2	2—6	6—10	10—20	20—50	50—100
最低价格	DR360-50— DR225-35	0.35	—	—	—	—	—	—	—
最轻重量	DQ1—DQ6	0.35	—	—	—	—	—	—	—
最低价格	DR1750G— 35—DR1100 G-10	—	0.1—0.2	0.1	0.1	—	—	—	—
音频、高 频、脉冲 变压器	1J34	0.35	0.1—0.2	0.1	0.05	0.05—0.02	0.02	—	—
	1J50	0.35	0.1—0.2	0.08—0.05	0.05—0.02	0.02	—	—	—
	1J51	0.35	0.1—0.2	0.1	0.05—0.02	0.02	—	—	—
	1J79	0.35	0.1—0.2	0.1	0.05	0.05	0.02	0.02	—
	1J80	0.35	0.1—0.2	0.05	0.05	0.05	0.02	0.02	—
	40HKMΠ	—	—	0.1—0.05	0.05	0.05—0.02	—	—	—
	68HMΠ	—	—	0.1—0.05	0.05	0.02	—	—	—
	47HK	—	—	0.1	0.02	0.02	0.02	0.02—0.01	0.01
	40HKM	—	—	0.1	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02—0.01
	DG3	—	0.2	0.08	0.05	0.05	—	—	—
	DG4	—	0.2	0.08	0.05	0.05	—	—	—
1K5X	—	—	—	—	+	+	+	—	
R2KX	—	—	—	—	+	+	+	+	

注：“+”表示在该频率下采用；“—”表示在该频率下不采用。

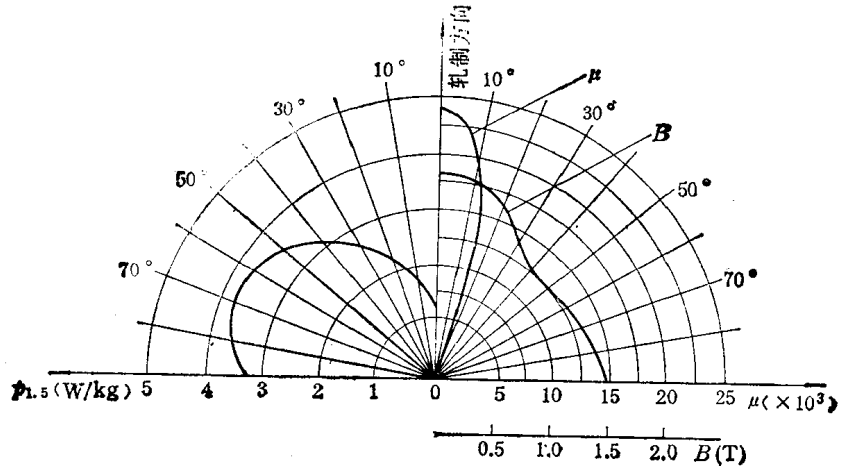


图 1.3 冷轧电工钢的各向异性

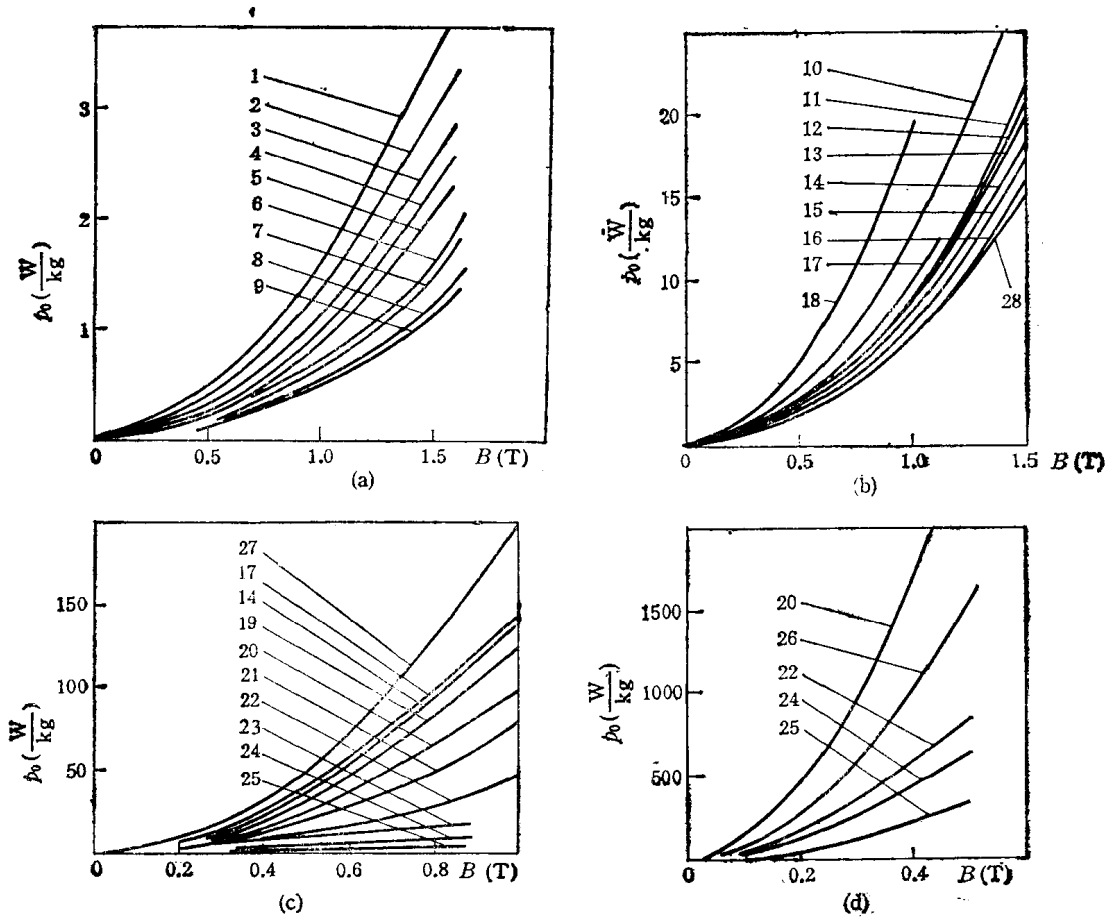


图 1.4 常用磁性材料的比损耗和磁感应强度的关系

(a) $f = 50\text{Hz}$; (b) $f = 400\text{Hz}$; (c) $f = 2.4\text{kHz}$; (d) $f = 5\text{kHz}$ (材料型号: 1. DR360-50; 2. DR320-35; 3. DR265-50; 4. DQ2-0.5; 5. DR225-35; 6. DQ2-0.35; 7. DQ2-0.2; 8. DQ4-0.35; 9. DQ4-0.2; 10. DR1250G20; 11. DG1-0.2; 12. DG1-0.08; 13. DG1-0.05; 14. DG2-0.15; 15. DG3-0.15; 16. DG3-0.08; 17. DR1100G-10; 18. DR1750G-35; 19. DG2-0.08; 20. DG2-0.05; 21. 1J50-0.15; 22. 1J50-0.05; 23. 1J80-0.1; 24. 1J80-0.05; 25. 1J80-0.02; 26. DG2-0.02; 27. DG2-0.2; 28. DG3-0.05)