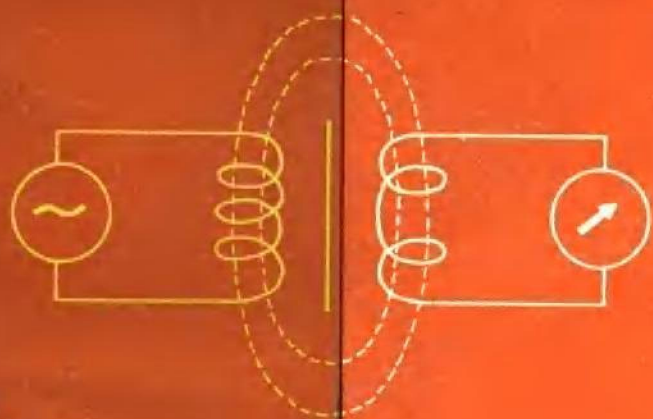


小型变压器设计

李庆樑 编著



人民邮电出版社

内 容 提 要

本书包括电源变压器和音频变压器两大部分，系统地介绍了这两种变压器的经济设计方法，并力求减小其体积、重量。书中有设计实例，便于参考。本书将有助于从事电子变压器设计的同志更好地掌握设计方法，提高设计技能，也将有助于从事电路和整机结构设计的同志更多地了解小型变压器，使其运用得更为适当。

小型变压器设计

Xiaoxing Bianyaqi Sheji

李庆樑 编著

责任编辑 沈成衡 张卫红

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街 27 号

河北邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本 787×1092 1985年12月第一版
印张 11 20/3² 页数: 186 1985年12月河北第一次印刷
字数 264 千字 印数: 1—10,000册
统一书号: 15045 · 总3082—无6343
定价: 2.25 元

前 言

电子变压器在电子设备中应用较广，但它的成本较高，体积较大，重量较重，失效率也较高。为了降低它的成本，减小其体积、重量，国外在五十年代和六十年代期间就对它的经济设计进行了研究。在同一时期，从保证军用电子设备的可靠性出发，对提高电子变压器的可靠性也进行了不少研究工作。国内从六十年代开始，也在电子设备的电源变压器方面进行了大量工作。目前，无论在国外或是国内，电子变压器的设计和生产都已大大改观了。

本书包括电源变压器和音频变压器两大部分。在电源变压器一篇中探讨了电源变压器的经济设计，分析了如何在得到低成本设计的同时，兼顾到体积小、重量轻的要求，并尽可能省铜。本书也对电源变压器的设计原理、磁性材料、变压器的绝缘和电晕，以及结构等方面进行了介绍。

在音频变压器一篇中，本书分析了如何从给出的功率、频率响应和谐波失真来直接确定经济设计所需的铁心尺寸。设计方法是简捷的，设计结果是经济的。

本书力求深入浅出，着重概念性的分析，适于具有大专水平的科技人员阅读。它将有助于从事电子变压器设计的同志较好地了解有关的理论知识，也将有助于从事电路和整机结构设计的同志了解电子变压器。

自六十年代开始，曾与作者在一起工作过的罗祖蔚、吴福运、石桂兰、徐稜、阮文龙、冯学良、陈国荣、顾连根、许瑞隆、刘以礼、王定远、何中伟、李明正、曹振河、陈献美等同志都

曾对作者的工作给予过热情的支持和帮助，作者在此向这些同志表示感谢。

由于作者水平所限，书中难免有错误和缺点，欢迎广大读者批评指正。

作者

一九八三年四月

目 录

前言

第一篇 电源变压器

第一章 电源变压器的技术要求.....	(2)
1.1 电性能.....	(2)
1.2 体积、重量和成本.....	(13)
1.3 可靠性.....	(18)
第二章 温升计算.....	(20)
2.1 散热的三种方式.....	(21)
2.2 电源变压器的温升.....	(24)
第三章 功率容量计算与经济设计.....	(32)
3.1 功率容量计算与经济设计的关系.....	(32)
3.2 电源变压器的经济设计.....	(33)
第四章 磁化电流和铁耗计算.....	(46)
4.1 空载与满载时磁通密度的差别.....	(47)
4.2 磁化电流的计算.....	(48)
4.3 铁耗的计算.....	(55)
4.4 空载电流和空载损耗.....	(56)
第五章 磁通密度和电流密度的确定.....	(57)
5.1 B_{or} 、 J 的选择与经济设计和 电性能的关系.....	(57)
5.2 按给定电压调整率来设计的电源变压器, B_{or} 、 J 值的确定	(58)

5.3	按一定温升设计时, 50Hz 电源变压器 B_{OT} 和 J 值的确定.....	(64)
第六章	铁心和磁性材料.....	(66)
6.1	磁性材料的选用.....	(66)
6.2	电源变压器用磁性材料的性能.....	(68)
6.3	叠片铁心.....	(75)
6.4	C形铁心.....	(77)
第七章	电源变压器的绝缘.....	(78)
7.1	对电源变压器绝缘性能方面的要求.....	(79)
7.2	工作温度等级和绝缘系统的寿命.....	(79)
7.3	击穿电压.....	(80)
7.4	绝缘电阻.....	(83)
7.5	电晕(局部放电).....	(83)
第八章	电源变压器的结构.....	(90)
8.1	线包结构.....	(90)
8.2	装配.....	(97)
8.3	灌封.....	(98)
8.4	单线包结构的心式变压器.....	(100)
第九章	稳压和限流.....	(101)
9.1	稳压.....	(101)
9.2	限流.....	(129)
第十章	电源变压器设计步骤.....	(132)
10.1	计算变压器功率.....	(132)
10.2	确定铁心尺寸.....	(134)
10.3	计算线圈圈数.....	(135)
10.4	计算电流及导线截面积.....	(135)
10.5	绕线计算及结构设计.....	(137)

10.6	电压比核算	(138)
10.7	温升计算	(139)
10.8	电压调整率及效率	(139)
10.9	例题	(139)
第十一章	滤波阻流圈	(145)
11.1	基本计算公式	(145)
11.2	铁心结构常数	(149)
11.3	直流磁场强度 H_m 与铁心几何尺寸 之间的关系	(151)
11.4	交流磁通密度 B_m	(151)
11.5	用数学式来表示 μ_e	(151)
11.6	能量 LI_m^2 、铜耗 $I_m^2 r_{20^\circ C}$ 与铁 心尺寸之间的关系	(153)
11.7	计算步骤	(153)
11.8	影响计算准确性的因素	(154)
11.9	空气隙的调整	(155)

第二篇 音频变压器

第十二章	音频变压器的特点及其与电路的关系	(156)
12.1	音频变压器的主要特点	(156)
12.2	音频变压器的等效电路	(157)
12.3	音频变压器的效率	(170)
第十三章	音频变压器的电气计算	(171)
13.1	几种基本关系的计算	(172)
13.2	电气计算的基本方法	(174)
13.3	常用的等效电路及其应用范围	(175)
13.4	等效电路Ⅱ的计算	(177)

13.5	等效电路Ⅲ的计算	(180)
13.6	等效电路Ⅳ的计算	(188)
13.7	等效电路Ⅴ的计算	(190)
13.8	等效电路Ⅵ的计算	(194)
13.9	等效电路Ⅶ的计算	(199)
13.10	等效电路Ⅷ的计算	(205)
第十四章	音频变压器的结构计算	(212)
14.1	自感量	(212)
14.2	低频端磁化电流引起的输出 电压波形失真	(220)
14.3	漏感	(225)
14.4	分布电容	(229)
第十五章	音频变压器的线圈结构设计	(235)
15.1	线圈结构与漏感	(236)
15.2	线圈结构与分布电容的关系	(242)
15.3	漏感与分布电容之间的关系	(246)
第十六章	音频变压器铁心功率容量计算	(246)
16.1	几个主要因素	(247)
16.2	铁心的选择	(248)
第十七章	音频变压器的屏蔽	(258)
17.1	磁屏蔽	(259)
17.2	静电屏蔽	(263)
第十八章	几种常用的音频变压器	(267)
18.1	晶体管电路中的音频变压器	(267)
18.2	输入变压器	(271)
18.3	线间变压器	(274)
18.4	选铁心	(275)

第十九章 音频变压器用的铁心和磁性材料	(277)
19.1 磁性材料	(277)
19.2 铁心	(283)
第二十章 音频变压器计算步骤、公式、 曲线汇总及例题	(289)
20.1 计算步骤	(289)
20.2 计算公式和曲线	(289)
20.3 例题	(307)

附 录

1. 铁心	(329)
a. XCD型铁心	(329)
b. XED型铁心	(330)
c. 建议在消费电子产品中采用的铁心	(332)
d. 铁心端面间的间隙尺寸 r	(333)
e. 单E形小型铁心	(333)
f. XE形小型铁心	(335)
g. 铁氧体铁心	(337)
2. 线规表	(338)
3. 底筒尺寸	(341)
4. 电源变压器计算参数表	(344)
a. XCD型铁心电源变压器计算参数表	(344)
b. XED型铁心电源变压器计算参数表	(348)
c. “C”型铁心电源变压器计算参数表	(350)
5. 滤波阻流圈及音频变压器计算参数表	(352)
6. 磁化电流对感应电势的影响	(355)
7. 从给出的 $\cos\varphi$ 和 ΔU 值来确定电源变压器 的磁通密度	(358)
参考文献	(361)

第一篇 电源变压器

电子产品根据其用途，大体可分为三类：消费类产品、投资类产品、军用设备。它们对电子变压器提出了不同的要求。虽然由于用途不同，其要求各有所侧重，但也有不少共同点。

目前，由于电子技术愈来愈深入到人们的日常生活中去，无论在国外或国内，消费类电子产品都有着广泛的市场。这类产品必须不断降低成本，才有竞争力。故低成本是设计考虑的一个重要因素。但是，任何产品都必须保证可靠使用，必须在满足必要的质量标准的前提下，通过改进设计、改进生产技术来降低成本。此外，消费类电子产品也一直在向小型化的方向发展，而电子变压器往往是最笨重的器件，如何使它更小、更轻、成本更低，的确是一个重要的问题。

投资类产品如计算机、通信设备、广播设备等，必须经常保持在良好的使用状态，一旦出故障使工作中断，影响很大。这些电子设备中的电子变压器必须具有更高的质量和更高的可靠性。同样，这样的电子变压器也要小型化，并在保证质量指标的前提下力求降低成本。

至于军用电子设备，则可靠性是首要条件。要提高电子变压器的可靠性，就要研究在各种环境条件下电子变压器可能出现的故障及其原因，从而在设计和生产中采取相应的措施。军用电子设备对体积、重量的要求也是严格的，而这一要求与前一要求又存在一定的矛盾。因此，为了设计和生产出可靠性高、体积小、重量轻，而且成本低的电子变压器，就必须对它

的设计进行深入的探讨。

第一章 电源变压器的技术要求

电源变压器与其它各种电子器件一样，有它的主要功能，也有全面的技术要求。如果仅仅满足它的主要功能——变换电压，则设计和生产变压器就十分简单了，但这样的变压器在整机上使用时，往往会产生一些不好的影响，降低电子设备的电指标，甚至影响其可靠性。因此，在设计电子变压器时，应全面了解对它的技术要求，并在设计中采取措施来保证。此外，还要用最经济的方案来满足所提出的各项技术要求。良好的电性能、高可靠性和低成本之间是有矛盾的，要解决好这些矛盾，首先就要对电性能及可靠性的要求和影响成本的因素等方面有较全面的了解，以便于在设计时进行考虑。

1.1 电性能

1.1.1 电压比

变压器的主要功能就是把来自市电或专用发电机的交流电压变换为所需要的一种或几种电压。电压比主要决定于初、次级线圈的圈数比。小功率电源变压器的电压比与大功率的有一些区别。主要是小功率电源变压器受线圈铜阻的影响较大，所以在变压器满载和空载时，电压会有明显的变化，甚至当环境温度有较大的变化以及当它因工作而发热时，电压比也都会有所变化。它的原因和所产生的影响将在下一节中叙述。

1.1.2 电压调整率

由于满载时电源变压器的线圈铜阻上要产生电压降，当次级开路或负载变化时，变压器的次级输出电压将有所变化。图1-1(a)表示变压器满载时的等效电路，图1-1(b)表示空载时的等效电路，其中

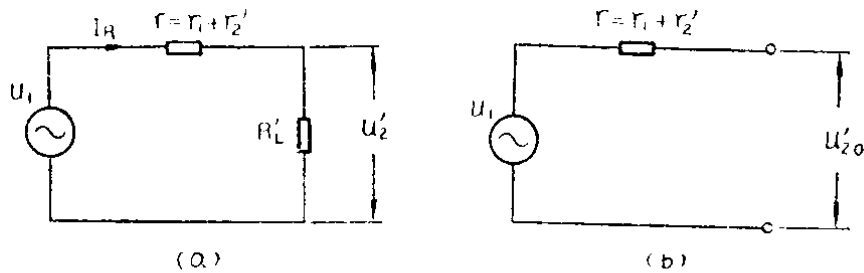


图 1-1 电源变压器空载和满载时的输出电压

u_1	为电源电压	V
r_1	为初级铜阻，热态	Ω
r'_2	为换算到初级的次级铜阻，热态	Ω
r	为铜阻之和	Ω
R'_L	为换算到初级的负载电阻	Ω
u'_2	为换算到初级的次级满载电压	V
u'_{20}	为换算到初级的次级空载电压	V
I_R	为初级有功电流	A

电压调整率的定义，在不同文献中有所不同。本书采用

$$\Delta U = \frac{u'_{20} - u'_2}{u'_{20}} \quad (1-1)$$

其中 ΔU 为电压调整率。也可直接用次级空载电压 U_{20} 和满载电压 U_2 的关系来表示：

$$\Delta U = \frac{u_{2c} - u_2}{u_{20}} \quad (1-1 a)$$

因为 u'_{20} 和 u'_2 之间的差别是由电流在线圈铜阻 $r = r_1 + r_2'$ 上产生的电压降所引起的，所以电压调整率的好坏，是由铜阻的大小决定的。

在设计功率较大的变压器时，往往是使它的温升达到或接近某一预定值。但在设计功率很小的变压器时，如果也使它的温升达到某一给定值，往往使电压调整率指标很差。因为小尺寸的变压器线圈薄，散热条件好，可以采用较高的电流密度，而温升仍不超过规定数值。因此，对小变压器通常不能按照一定的温升来设计，而必须满足一定的电压调整率的要求。

某些电子设备在工作时，其工作电流在一定的动态范围内变化，因而在铜阻 r 上的电压降也不断变化。若电源变压器的电压调整率指标太差，则当工作电流变化时，变压器次级电压变化幅度较大，可能影响电子设备的某些电指标。不同电压调整率时，工作电流变化引起的变压器次级电压的变化情况见表1-1。表中给出了当工作电流分别为额定电流的70%、50%、30%和空载时，与额定电流时相比较，变压器次级电压上升的百分数。

表 1-1

次级电压变化 ΔU	工作电流			
	0.7 I	0.5 I	0.3 I	空 载
0.3	+10%	+17%	+26%	+41%
0.2	+6.1%	+11.1%	+16%	+25%
0.1	+3%	+5.1%	+6.8%	+11%
0.05	+1.1%	+2.5%	+3.2%	+5.2%

在另外一些应用场合中，电流是相对恒定的，但是，如果环境温度变化很大，或变压器工作发热后本身的温度升高，线圈的热态铜阻将增大，也将使变压器次级电压降低。温度对电压的影响，也可与电压调整率联系起来。例如，当整机在环境温度为 0°C 时通电，经过一段时间后机内温度逐渐上升到 55°C ，变压器线圈温升为 50°C ，则在此期间，线圈温度将从 0°C 逐渐上升到 105°C 。这样，铜阻将增大，次级电压下降。当变压器的电压调整率不同时， 0°C 时的电压高出于 105°C 时的电压的百分数如表 1-2 所示。

表 1-2

ΔU	0.3	0.2	0.1	0.05
U_2 变化	+10%	+6.5%	+3.2%	+1.5%

通常电源变压器是在热状态下计算其电压比的，因而在冷状态下，电压偏高。对电真空器件来说，电压偏高，将影响灯丝的寿命。

1.1.3 温升

电源变压器的温升应该满足一定的要求，不超过给定数值。因为温升与变压器的寿命和可靠性有关，在某些情况下，还可能在一定程度上影响采用固体电路的整机的工作稳定性。

变压器的绝缘系统按其工作温度可以分为下面几个等级：

A级	E级	B级	H级
105°C	120°C	130°C	180°C

变压器的失效主要由线圈绝缘系统的损坏引起。要保证变压器线圈温升与环境温度之和不超过所使用的绝缘系统允许的工作

温度，即

线圈温升 \leq 绝缘系统允许工作温度—环境温度 当线圈温升偏高，使绝缘系统的工作温度高于其允许值时，绝缘系统并不立即损坏。绝缘系统的允许工作温度是通过寿命试验，按保证合理的寿命来确定的。温升超过允许值，将会导致绝缘系统的寿命缩短。热老化寿命试验的结果说明：对于A级绝缘材料，工作温度每增高 8°C ，其寿命减少一半；对B级绝缘材料，工作温度每增高 10°C ，其寿命约减少一半。图1-2说明了工作温度与绝缘材料寿命的关系。

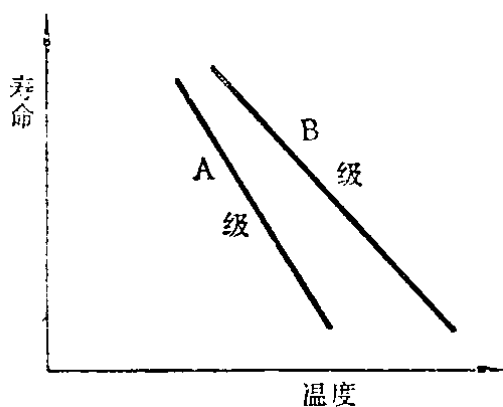


图 1-2 工作温度与绝缘材料寿命之间的关系

与其它各种电子元器件一样，工作温度的增高，将导致电子变压器可靠性下降。国外资料给出的电子变压器最热点温度与失效率之间的关系（MIL-HDBK-217）如图1-3所示。该曲线可提供一定的概念。最热点温度指线圈内部温升最高点的温度，有关它的讨论请参见第二章（2.2.3线圈最热点温升）。按美国MIL标准，R级为 105°C ，相当于A级；S级为 130°C ，相当于B级；T级为 170°C ，接近于H级。目前对可靠性要求较高的电源变压器，一般采用E级或B级绝缘，而其最热点温度往往仅在 $100\sim 110^{\circ}\text{C}$ 左右，因此具有较高的可靠性。

在一般电子设备中，发热量较大、温度较高的多半是大功率晶体管 and 电阻，而不是电源变压器。在这种情况下，若将电源变压器安装位置选择得远离对温度较敏感的元器件，变压器的发热就不致影响电子设备工作的稳定性。在某些精密电子设备中，电源部分往往设计为单独的插件，变压器的温升对电路

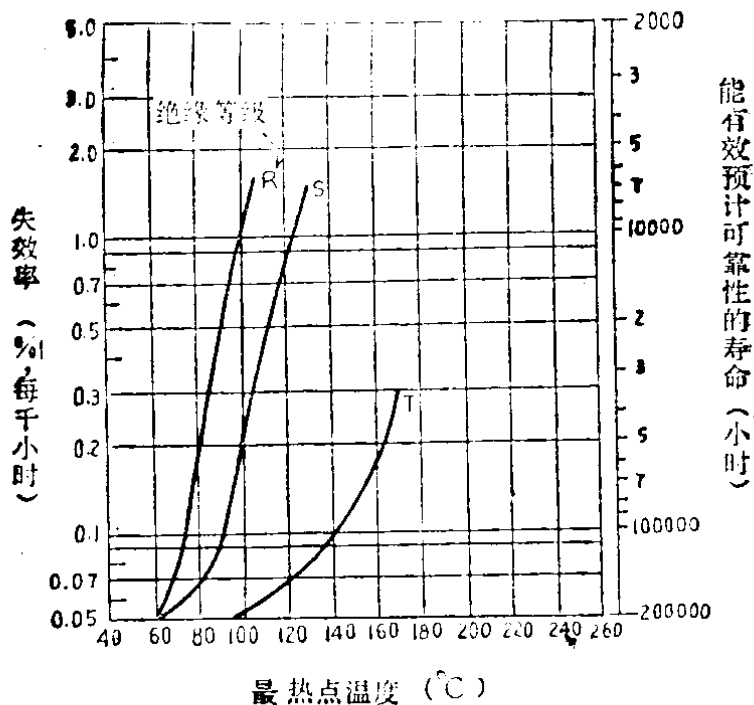


图 1-3 最热点温度与变压器失效率和寿命之间的关系

工作稳定性的影响就很小了。

综上所述，在确定电源变压器的允许温升时，主要是考虑温升对寿命的影响。

1.1.4 效率

变压器的效率用下式来表示，

$$\eta_T = \frac{P_2}{P_2 + P_C + P_W} \quad (1-2)$$

式中 η_T 为变压器效率

P_2 为变压器输出功率

W

P_C 为变压器铁耗

W

P_W 为变压器铜耗，热态

W

在中小功率电源变压器的设计中，往往不把效率作为一个必须满足的指标，而是在设计完成后验算一下而已。

由式(1-2)可看出, 当输出功率 P_2 已给定时, 效率 η_T 由铜耗 P_w 与铁耗 P_c 之和决定。而铜耗和电压调整率又都是由线圈铜阻决定的, 因而如果规定了某一电源变压器的电压调整率, 则它的铜耗也就确定了。铁耗 P_c 是由磁通密度决定的, 在以后讨论磁通密度选用时将说明, 磁通密度的选用, 要考虑好多因素, 而磁通密度确定之后, 铁耗也就确定了。此外, 有些电源变压器的设计往往是按一定的温升来考虑, 而温升是由总损耗 $P_w + P_c$ 确定的。由于干式变压器散热条件并不好, 除了尺寸很小的变压器以外, 一般情况下, 当温升符合要求时, P_c 和 P_w 之和并不大, 效率也并不低。输出功率为100W的电源变压器, 其效率约0.85, 而输出功率为250W的电源变压器, 其效率已达0.9。

在设计小功率变压器时, 常常要求它满足一定的电压调整率, 或要求其温升不超过某一数值, 而不是预先给出一个必须满足的效率。如果提出一个必须满足的效率指标, 而该指标又提得不够合理, 则很难使设计成为经济设计。例如, 若要求电源变压器的效率由0.9提高到0.95, 则变压器的体积重量大约要增加一倍。

1.1.5 功率因数

功率因数的定义为

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{P_s} \quad (1-3)$$

其中 $\cos\varphi$ 为功率因数

P_1 为变压器满载时初级的有功功率 W

P_s 为满载时变压器初级视在功率 VA

$$P_s = \sqrt{P_2^2 + P_1^2} \quad (1-4)$$