

SJ/Z

中华人民共和国电子工业部指导性技术文件

SJ/Z2921-88

开关电源变压器计算方法

汪振宇

1988-05-09发布

1988-10-01实施

中华人民共和国电子工业部 发布

目 录

1 主题内容与适用范围	(1)
2 开关稳压电源的高频变换器	(1)
3 开关电源变压器工作状态	(1)
4 开关电源变压器常用磁性材料	(1)
5 漏感和分布电容	(5)
9 趋肤效应	(1)
7 电流有效值的计算	(1)
8 双极性开关电源变压器的计算	(1)
9 单极性——单端反激式开关电源变压器计算	(2)
10 单极性——单端正激式开关电源变压器计算	(2)
附录A 导线规格表	(1)
附录B 磁芯规格表	(1)
附录C 常用磁性材料性能	(1)
附录D EC型磁芯输出功率和频率关系曲线	(1)
附录E 开关电源变压器设计参数表	(1)



开关电源变压器计算方法

1 范围

本标准规定了脉宽调制型开关稳压电源中功率输出变压器（以下简称开关电源变压器）的计算方法。

本标准适用于脉宽调制型开关电源变压器的设计计算。

2 开关稳压电源的高频变换器

开关稳压电源的方框图如图1所示，电网电压通过输入回路中的整流器和滤波器转换成直流电输入高频变换器，高频变换器则把输入的直流电转变为高频脉冲方波电压，该脉冲方波电压通过输出回路中的高频整流器和滤波器变成直流电供给负载。由开关管和开关电源变压器等组成的高频变换器电路是实现变压、变频及完成输出电压调整的执行部件，是开关稳压电源的主要组成部分。

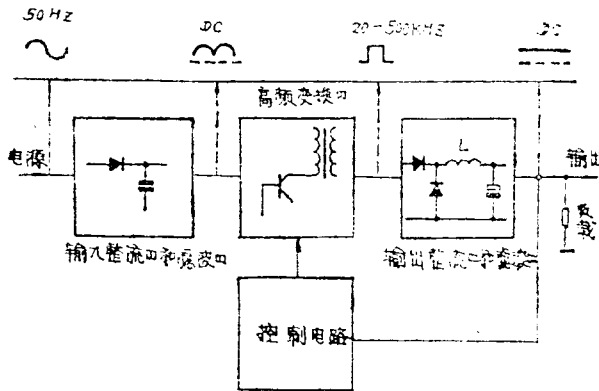


图1 开关稳压电源方框图

开关稳压电源的高频变换器电路形式很多，通常根据负载功率大小，不同使用要求，采取不同形式的高频变换器电路。常用的高频变换器电路有推挽、全桥、半桥、单端正激、单端反激等形式。表1为开关稳压电源常用变换器电路以及电压、电流波形。

3 开关电源变压器工作状态

不同的高频变换器电路，输入开关电源变压器波形不相同，其工作特点也不相同。通常开关电源变压器工作状态可分为两大类。

3.1 双极性开关电源变压器

此类有全桥、半桥、推挽等电路中开关电源变压器。变压器初级绕组在一个周期的正半周和负半周中，加上一个幅值和导通脉宽都相同而方向相反的脉冲方波电压，变压器初级绕

组在正负半周的激磁电流大小相等、方向相反。因此，变压器磁芯中产生的磁通沿交流磁滞回线对称地上、下移动（见图2），磁芯工作于整个磁滞回线。在一个周期中，磁感应强度从正最大值变化到负最大值，磁芯中的直流磁化分量基本抵消。

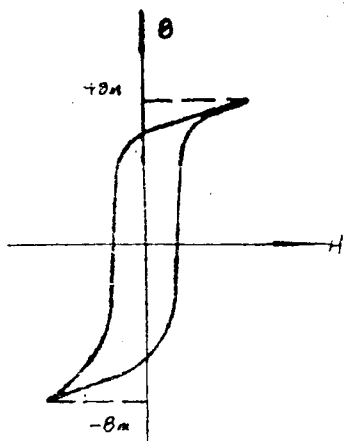


图2 双极性开关电源变压器磁滞回线

3.2 单极性开关电源变压器

此类有单端正激式、单端反激式等电路中开关电源变压器。变压器磁芯的每一个周期内加上一个单向的脉冲方波电压。因此，变压器磁芯中磁通沿着交流磁滞回线的第一象限部分上下移动，变压器磁芯单向激磁，磁感应强度在最大值 B_m 到剩磁磁感应强度 B_r 之间变化，见图3。

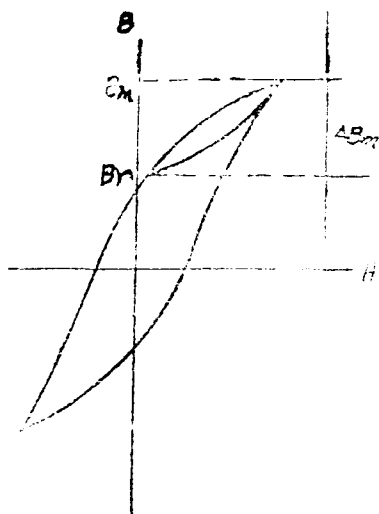


图3 单极性开关电源变压器工作回线

表 1

类型	电 路 图	变压器的电压电流波形
全 桥		
半 桥		
推 比		
全 波 二 级		
倍 压 二 级		

4 开关电源变压器常用磁性材料

4.1 磁性材料的选用

开关电源变压器通常工作在20千赫以及更高的频率，它要求磁性材料在工作频率下功率损耗尽可能小。此外，还要求磁性材料饱和磁感应强度高，温度稳定性好。

铁氧体磁芯由于价格便宜，磁芯形式多样，因此得到了广泛的应用。但是，铁氧体有许多明显缺点，如饱和磁感应强度值低，温度稳定性差，易碎等，在体积重量、环境条件及性

能指标要求高的变压器中可采用坡莫合金和非晶态合金等材料。坡莫合金和非晶态合金通常绕制成环形铁芯，特殊要求也可绕制成矩形或其他形状。

铁氧体磁芯、坡莫合金和非晶态合金材料的主要磁性能见表2。

表 2

材 料	饱和磁感应强度	剩余磁感应强度	矫顽力	居里温度	损耗 20kHz 0.5T	工频作率	工温作度
	T	T	A/m	°C	w/kg	kHz	°C
CO基非晶态合金	0.7	0.47	0.5	350	22	~100	~120
1J85—1 合金	0.7	0.6	1.99	480	30	~50	~200
Mn—Zn 铁氧体	0.4	0.14	24	150		~300	~100

为减少涡流损耗，应根据不同工作频率选择合金带的厚度。当采用坡莫合金时，合金带厚度选择见表3。不同厚度合金带料的磁芯占空系数值见表4。

表 3

频 率	4	10	20	40	70	100
带 厚 mm	0.10	0.05	0.025	0.012	0.006	0.003

表 4

带 厚 kHz	0.10	0.05	0.025	0.012	0.006	0.003
占空系数 K _o	0.9	0.85	0.70	0.55	0.37	0.25

对应不同工作状态的开关电源变压器，由于磁芯工作在磁化曲线不同区域，应选用相应磁特性的磁性材料。

4.1.1 双极性开关电源变压器

此类变压器要求磁性材料具有高的磁感应强度，高的动态磁导率，较低的高频损耗。常用的材料有：

- a. 坡莫合金 1J51; 1J79; 1J86; 1J85—1等。
- b. 铁氧体磁芯 R2KD; R2KS等。
- c. 非晶态合金。

4.1.2 单极性开关电源变压器

此类变压器要求磁性材料具有高的磁感应强度和较低的剩余磁感应强度。也就是要求磁性材料具有大的脉冲磁感应增量。

$$\Delta B_m = B_m - B_r \dots \dots \dots (1)$$

式中：ΔB_m——脉冲磁感应增量，T；

B_m ——最大工作磁感应强度，T；

B_r ——剩余磁感应强度，T。

并且，要求磁性材料在工作的直流磁场下不饱和。通常采用恒导磁材料或在磁芯中加气隙来降低剩余磁感应强度并使磁化曲线倾斜，提高直流工作磁场。常用的磁性材料有：

- a. 坡莫合金 1J512；1J67h；1J34h；1J34h等。
- b. 金属磁粉芯 FeNi50；Fe—Ni81—M02
- c. 铁氧体磁芯 R2KD；R2KS等。
- d. 非晶态合金

4.2 磁芯结构形式

根据开关电源变压器的电路类型、使用要求、功率等级、经济指标等选用合适的磁芯结构形式。结构形式选用应考虑下列因素：

- a. 漏磁要小，以便能获得小的绕组漏感；
- b. 便于绕制，引出线及整个变压器安装方便，这样有利于生产维护；
- c. 有利于散热。

铁氧体磁芯由生产厂家提供标准规格磁芯，如U型、E型、环型、EC型等。如果希望漏感小可采用环型和罐型磁芯，要求低成本则可选用U型或E型磁芯，尤其是EC型磁芯，圆柱形的中心柱绕制方便，漏感比方形要小，两个外腿带有固定用螺钉孔，两个变压器可用压板和螺钉固定在底板或框架上。因此，EC型磁芯优点甚多。

表5列出了各种形式磁芯对成本、漏磁、抽头等因素的比较，可根据不同要求参照表5-1选用不同形式磁芯。

表 5

磁芯形式	磁芯成本	绕组成本	外部磁场	抽头
罐型	3	1	1	4
环型	2	3	1	1
U型	1	1	5	1
E型	2	1	4	1

注：表中数值以1为基准

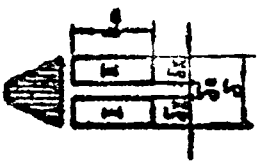
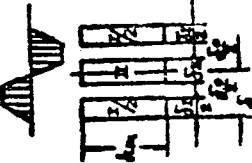
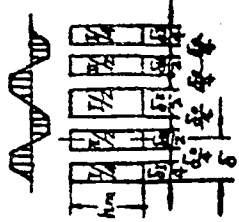
5 漏感和分布电容

开关电源变压器传递的是高频脉冲方波电压，在瞬变过程中，漏感和分布电容会引起浪涌电流和尖峰电压及脉冲顶部振荡，造成损耗增加，严重时会造成开关管损坏。因此，须加以控制。

开关电源变压器设计一般主要考虑漏感影响，在输出为高压，输出绕组匝数多、层数多时则应考虑分布电容带来的危害。同时，降低分布电容有利于抑制高频信号对负载的干扰。

对同一变压器要同时减少分布电容和漏感是困难的，因为两者间是矛盾的，应根据不同工作要求，保证合适的分布电容和漏感。

表 6

绕组匝数	同绕方式(磁芯每柱上)	对 花 式 磁 芯	对 心 式 磁 芯 (双 线 包)
M=1		$L_s = \frac{K_L \cdot 1.26 W^2}{h m} [\delta_0 + 1/3(\delta I + \delta II)] \times 10^{-3}$	$L_s = \frac{K_L \cdot 0.63 W^2}{h m} [\delta_0 + 1/3(\delta I + \delta II)] \times 10^{-3}$
M=2	 <p data-bbox="736 1418 796 1675">注:也可采用 II/2-I-II/2 的同绕方式</p>	$L_s = \frac{K_L \cdot 1.26 W^2}{4 h m} [\delta_0 + 1/3(\delta I + \delta II)] \times 10^{-3}$	$L_s = \frac{K_L \cdot 0.63 W^2}{4 h m} [\delta_0 + 1/3(\delta I + \delta II)] \times 10^{-3}$
M=4	 <p data-bbox="1065 1361 1118 1675">注:也可用 II/4-I/2-II/4 方式</p>	$L_s = \frac{K_L \cdot 1.26 W^2}{16 h m} [\delta_0 + 1/3(\delta I + \delta II)] \times 10^{-3}$	$L_s = \frac{K_L \cdot 0.63 W^2}{16 h m} [\delta_0 + 1/3(\delta I + \delta II)] \times 10^{-3}$

5.19 漏感

变压器漏感是由于初、次级绕组之间，匝与匝之间磁通没有完全耦合造成的。通常采用初、次级绕组交替分层绕制来降低变压器漏感。但交替分层使线圈结构复杂，绕制困难，分布电容增大。因此，一般取线圈漏磁势组数不超过4。

5.1.1 漏感计算

开关电源变压器通常采用的线圈绕制方法和漏感计算如下：

a. 壳式磁芯和心式磁芯漏感计算见表6。

式中： L_s ——漏感，H；

l_m ——初、次级绕组平均匝长，cm；

h_m ——绕组高度，cm；

δ_c ——初、次级绕组间绝缘厚度，cm；

δ_1 ——每柱上初级线圈总厚，cm；

δ_2 ——每柱上次级线圈总厚，cm；

W_1 ——初级绕组总匝数（对心式磁芯是两磁芯柱总匝数）；

K_L ——漏磁修正系数

$$K_L = 1 - y + 0.35y^2 \dots\dots\dots$$

式中： y ——线圈结构参数，

$$y = \frac{\delta}{\pi h_m} = \frac{\text{线圈总厚（不包括内外绝缘）}}{M \cdot h_m} \dots\dots\dots$$

式中： δ ——每柱漏磁势厚度，cm；

M ——漏磁势组数。

漏磁修正系数可查图4曲线。

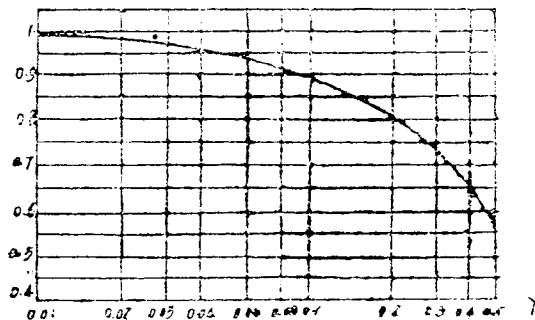


图4 漏磁修正系数曲线

b. 环型磁芯变压器（变压器绕组截面接近矩形）

初级绕组绕至里层，可认为初级漏感为零。

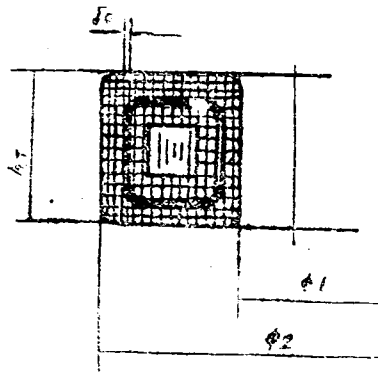


图5 环型变压器

次级绕组漏感:

$$L_{s2} = 0.4 W_2^2 \left(\delta_1 \cdot 1n \frac{\phi_2}{\phi_1} + \frac{h_r}{2} \cdot 1n \frac{1 + \frac{2\delta_1}{\phi_1}}{1 - \frac{2\delta_1}{\phi_2}} \right) \cdot 10^{-9} \dots \dots \dots (4)$$

- 式中: L_{s2} ——次级绕组漏感, H;
 ϕ_1 ——环形变压器内径, cm;
 ϕ_2 ——环形变压器外径, cm;
 h_r ——环形变压器高度, cm;
 δ_1 ——初、次级绕组间绝缘厚度, cm;
 W_2 ——次级绕组匝数。

换算至初级漏感:

$$L'_{s2} = \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 L_{s2} \dots \dots \dots (5)$$

式中: L'_{s2} ——次级绕组换算到初级漏感, H。

5.1.2 减小漏感的措施

- 减少绕组匝数, 选用高饱和磁感应强度、低损耗的磁性材料。
- 减少绕组厚度, 增加绕组高度。
- 尽可能减少绕组间绝缘厚度。
- 初、次级绕组采用分层交叉绕制。
- 对于环形磁芯变压器, 不管初、次级匝数多少均应沿环形圆周均匀分布。当次级绕组匝数很少, 宜采用多个绕组并联的方法。
- 初、次级绕组双线并绕。

5.2 分布电容

任何金属件之间都有电容存在, 如果这两金属之间电位差处处相等, 这样形成的电容为

静电容。

在变压器中：绕组线匝之间。同一绕组上下层之间，不同绕组之间，绕组对屏蔽层之间沿着某一线长度方向的电位分布是变化的，这样形成的电容就不同于静电容，称为分布电容。

5.2.1 分布电容的组成

- a. 绕组对磁芯（或对屏蔽层）分布电容；
- b. 各绕组间分布电容；
- c. 绕组与绕组间分布电容。

变压器各部分分布电容见图6。

注：开关电容变压器通常每层绕组有较多匝数、每层匝间总电容为每匝电容串联、远小于层间电容、故匝间电容可忽略不计。

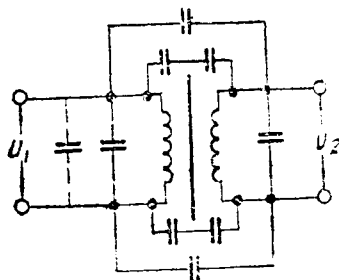


图6 变压器的分布电容

5.2.2 分布电容计算

a. 层间（或绕组间）静态电容

$$C_s = 0.0886 \frac{\epsilon \cdot h_m \cdot l_{mc}}{\delta_c} \dots\dots\dots (6)$$

式中：C_s——静态电容，PF；

ε——绝缘材料相对介电常数；

h_m——绕组高度，cm；

l_{mc}——所计算电容的层间（或绕组间）平均周长，cm；

δ_c——层间（或绕组间）绝缘厚度和导线漆膜厚度之和，cm。

b. 层间（或绕组间）分布电容

$$C_d = \frac{U_{Li}^2 + U_{Li}U_{Hi} + U_{Hi}^2}{3U^2} \cdot C_0 \dots\dots\dots (7)$$

式中：U_{Li}——层间（或绕组间）低压端电位差，V；

U_{Hi}——层间（或绕组间）高压端电位差，V；

U——绕组电压，V；

C_d ——动态电容, PF; 表示反映在绕组电压U两端的分布电容。

c. 绕组对磁芯 (或对屏蔽层) 分布电容

计算步骤同上, 先按式(6)算出相关位置静态电容, 然后按式(7)计算分布电容。

d. 多层绕组分布电容

开关电源变压器每个绕组一般有很多层, 且层间结构相同, 因此, 各层的分布电容也相同。每绕组总分布电容为:

$$C_{d1} = \frac{4}{3} \left(\frac{U_{n1}}{U_1} \right)^2 (N_1 - 1) \cdot C_{01} \dots \dots \dots (8)$$

或

$$C_{d1} = \frac{4}{3} \left(\frac{N_1 - 1}{N_1^2} \right) \cdot C_{01} \dots \dots \dots (9)$$

式中: C_{d1} ——初级绕组分布电容, PF;

C_{01} ——初级绕组每层静态电容, PF;

U_1 ——初级绕组电压, V;

U_{n1} ——初级绕组每层电压, V;

N_1 ——初级绕组层数。

次级绕组总分布电容

$$C_{d2} = \frac{4}{3} \left(\frac{N_2 - 1}{N_2^2} \right) C_{02} \dots \dots \dots (10)$$

式中: C_{d2} ——次级绕组分布电容, PF;

C_{02} ——次级绕组每层静态电容, PF;

N_2 ——次级绕组层数。

次级绕组换算到初级的分布电容为

$$C'_{d2} = \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^2 \cdot C_{d2} \dots \dots \dots (11)$$

式中: C'_{d2} ——次级绕组换算到初级的分布电容, PF;

C_{d2} ——次级绕组分布电容, PF;

W_1 ——初级绕组匝数;

W_2 ——次级绕组匝数。

为减少漏感而采用间绕方式的线圈结构时, 初、次级绕组的分布电容计算公式相应为:

漏磁势组数M为2

$$C_d = \frac{4}{3} \left(\frac{N_1 - 2}{N_1} \right) \cdot C_{01} \dots \dots \dots (12)$$

$$C_{d2} = \frac{4}{3} \left(\frac{N_2 - 2}{N_2} \right) \cdot C_{02} \dots \dots \dots (13)$$

漏磁势组数M为4

$$C_{d1} = \frac{4}{3} \left(\frac{N_1 - 4}{N_1} \right) \cdot C_{01} \dots \dots \dots (14)$$

$$C_{d2} = \frac{4}{3} \left(\frac{N_2 - 4}{N_2} \right) \cdot C_{02} \dots \dots \dots (15)$$

e. 变压器总分布电容

变压器总分布电容为初级绕组层间总电容, 次级绕组层间总电容, 绕组间电容及绕组对磁芯(或绕组对屏蔽层)之间电容并联总和。

$$C_{d1} = C_{dc} + C_{d1} + \sum C_{d2} + \sum C_{dm} \dots \dots \dots (16)$$

式中: C_{d1} —— 变压器总分布电容, P^r;

C_{dc} —— 绕组对磁芯(或绕组对屏蔽层)分布电容, P^r;

C_{d1} —— 初级绕组分布电容, P^r;

$\sum C_{d2}$ —— 次级绕组分布电容总和, P^r;

$\sum C_{dm}$ —— 所有绕组间分布电容总和, P^r。

5.2.3 减小分布电容的措施

- a. 降低静态电容: 采用介电常数小的绝缘材料, 适当增加绝缘材料厚度, 减少对应面积, 尤其应注意减少高压绕组的电容;
- b. 绕组分段绕制;
- c. 正确安排绕组极性, 减少它们之间电位差;
- d. 采用静电屏蔽。

5.2.4 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。

6 趋肤效应

导线中通过交流电时, 因导线内部和边缘部分所交链的磁通量不同, 致使导线截面上的电流产生不均匀分布, 相当于导线有效截面的减少, 这种现象称为趋肤效应。

开关电源变压器工作频率一般在20千赫以上, 随着工作频率的提高, 趋肤效应影响也越大。因此, 在设计绕组选择电流密度和线径时必须考虑趋肤效应引起有效截面的减小。

6.1 穿透深度

穿透深度是: 由于趋肤效应, 交变电流沿导线表面开始能达到的径向深度。导线通有高频交变电流时, 有效截面的减小可用穿透深度来表示。穿透深度与电流的频率, 导线的磁导率及电导率的关系为:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} \cdot 10^{-3} \dots \dots \dots (17)$$

式中：Δ——穿透深度，mm；
 ω——角频率，ω=2πf；
 μ——导线的磁导率，H/m；
 γ——导线的电导率，s/m。

当导线为圆铜导线时，则

$$\Delta = \frac{66.1}{\sqrt{f}} \dots \dots \dots (18)$$

式中：Δ——穿透深度，mm；
 f——电流频率，Hz。

频率从1千赫到50千赫圆铜导线的穿透深度见表7。

表 7

f kHz	1	3	5	7	10
Δ mm	2.089	1.206	0.9436	0.7899	0.6608
f kHz	13	15	18	20	23
Δ mm	0.5796	0.5395	0.4925	0.4473	0.4034
f kHz	25	30	35	40	45
Δ mm	0.4180	0.3815	0.3532	0.3304	0.3115
Δ f kHz	50				
Δ mm	0.2955				

6.2 导线选择原则

在选用开关电源变压器初、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。当导线要求的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。

6.3 交流电阻计算

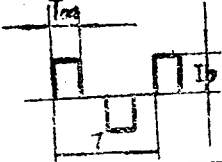
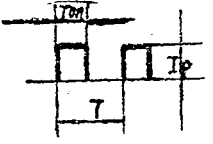
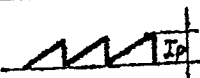
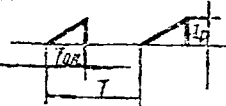

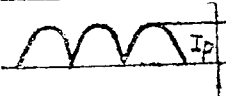
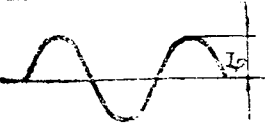
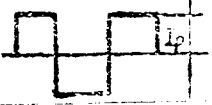
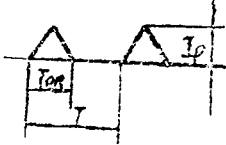
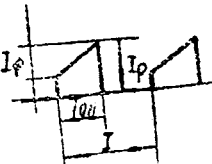
当使用的导线线径大于两倍穿透深度时，由于趋肤效应引起电阻增加，此时应用导线的交流有效电阻来计算线圈压降和损耗。

$$R_a = K_r \cdot R_d \dots \dots \dots (19)$$

式中：R_a——导线交流电阻，Ω；
 R_d——导线直流电阻，Ω；
 K_r——趋表系数。

趋表系数大小不仅与交变电流的频率有关，而且与材料性质、导线形状有关。实心圆铜导线的趋表系数可由下式求得：

变化周期内电流有效值表 8

波形	电流有效值 I
 <p>半桥全桥</p>	$I = I_p \sqrt{2 \frac{T_{on}}{T}}$
 <p>已做反做</p>	$I = I_p \sqrt{\frac{T_{on}}{T}} \quad Z = Z_p \sqrt{\alpha}$
	$I = \sqrt{\frac{1}{3}} I_p$
	$I = I_p \sqrt{\frac{T_{on}}{3T}}$
	$I = I_p \sqrt{\frac{T_{on}}{3T}}$
	$I = \sqrt{\frac{I_p^2}{2}}$
	$I = \sqrt{\frac{I_p^2}{2}}$
	$I = I_p$
	$I = I_p \sqrt{\frac{T_{on}}{3T}}$
	$I = \sqrt{\left(I_p^2 - I_p I \phi + \frac{I \phi^2}{3} \right) \frac{T_{on}}{T}}$

$$K_r = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{(D-\Delta) \cdot \Delta} \dots\dots\dots (20)$$

式中: K_r ——趋表系数;
 D ——圆导线直径, mm;
 Δ ——穿透深度, mm。

7 电流有效值的计算

在开关电源变压器中, 变压器绕组流过的电流一般为矩形波、梯形波或锯齿波, 计算损耗时应用电流的有效值(均方根值)各种电流波形的有效值计算方法见表8。

8 双极性开关电源变压器的计算

此类有全桥、半桥、推挽等电路的开关电源变压器。

8.1 计算时给定的基本条件

电路形式;
 工作频率(或周期);
 开关电源变压器输入电压幅值;
 开关管导通时间;
 输出电压、电流;
 整流电路形式;
 隔离电位;
 要求的漏感或分布电容;
 工作环境条件。

8.2 确定磁芯尺寸

8.2.1 开关电源变压器计算功率的计算

开关电源变压器工作时磁芯所需的功率容量为开关电源变压器计算功率。

计算功率的大小取决于输出功率及整流电路形式。根据变压器工作电路的不同类型,计算功率可在2~2.8倍的输出功率范围内变化。

不同电路的计算功率的计算见表9。

其中: U_{P1} ——输入电压幅值, V;
 U_0 ——输出直流电压, V;
 I_0 ——输出直流电流, A;
 η ——开关电源变压器效率;
 P_t ——变压器计算功率, W;
 P_0 ——直流输出功率, W。

8.2.2 确定工作磁感应强度

工作磁感应强度是开关电源变压器设计中的一个重要磁性参数,与磁芯结构形式、材料性能、工作频率、功率大小等因素有关。确定工作磁感应强度时应满足温升对损耗的限制及

磁芯不饱和的要求。工作磁感应强度太低，则变压器体积重量增加，而且匝数增多造成漏感增加。

工作频率为20千赫时，常用磁性材料的工作磁感应强度可按表10选取。

表 9

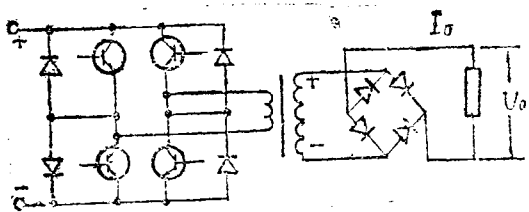
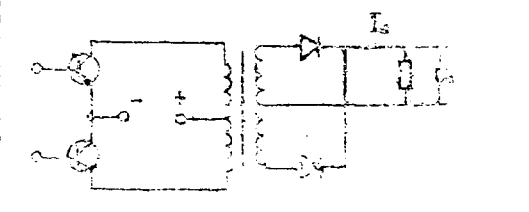
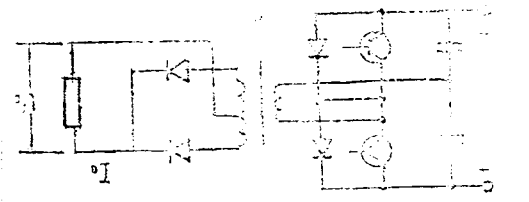
类 型	电 路 图	计算功率的计算公式
全桥电路 桥式整流		$P_o = U_o \cdot I_o$ $P_t = P_o \cdot \left(\frac{1}{\eta} + 1\right)$
半桥电路 全波整流		$P_o = U_o \cdot I_o$ $P_t = P_o \cdot \left(\frac{1}{\eta} + \sqrt{2}\right)$
推挽电路 全波整流		$P_o = U_o \cdot I_o$ $P_t = P_o \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{\eta} + \sqrt{2}\right)$

表 10

磁芯材料	铁氧体	1J85-1合金	Co基非晶态合金
工作磁感应强度T	0.15~0.25	0.4~0.5	0.5~3.6

8.2.3 选择电流密度系数

电流密度的选择取决于铁芯形式。表面积和温升的要求。

开关电源变压器开始计算时，磁芯体积没有确定，电流密度的选取有一定困难，可先选定电流密度系数，不同形式磁芯的电流密度系数见表11。

表 11

磁芯形式	罐型磁芯	E型磁芯	C型磁芯	环型磁芯
温升 °C				
25	433	366	322	250
50	632	534	468	365

8.2.4 确定窗口占空系数

初、次级绕组铜线截面在磁芯窗口面积中所占的比值称为窗口占空系数。窗口占空系数取决于开关电源变压器的工作电压、隔离电位、导线粗细、加工工艺及漏感和分布电容的要求等。计算时应根据不同情况选取适当值。一般低压开关电源变压器窗口占空系数为0.2~0.4。

当采用环形磁芯，并且磁芯外径和内径比为1.6时，窗口占空系数可按下式计算。

$$K_w = 0.569 \left(0.75 - \frac{17.1 (M_0 + 1) \cdot b_t}{d_0} \right) \cdot \left(\frac{D}{D_z} \right)^2 \dots \dots \dots (21)$$

当采用环形磁芯，磁芯外径和内径比为2时，窗口占空系数为：

$$K_w = 0.569 \left(0.75 - \frac{20.9 (M_0 + 1) \cdot b_t}{d_0} \right) \cdot \left(\frac{D}{D_z} \right)^2 \dots \dots \dots (22)$$

- 式中：K_w——窗口占空系数；
- M₀——变压器绕组个数；
- d₀——环形磁芯内径，mm；
- D——导线直径，mm；
- D_z——带绝缘导线直径，mm；
- b_t——绕组间半迭包绝缘材料的厚度，mm。

8.2.5 计算磁芯面积乘积，确定磁芯尺寸

开关电源变压器输出功率与如下因素有关：

- a. 磁性材料及截面积，影响磁芯损耗，工作磁感应强度以及绕组匝数；
- b. 导线截面积，影响电流密度及其铜损；
- c. 变压器表面积，影响变压器温升。

因此，开关电源变压器输出功率的能力与磁芯材料性质、几何尺寸有关，可用磁芯面积乘积反映开关电源变压器输出功率能力。

$$A_p = A_c \cdot A_w \dots \dots \dots (23)$$

- 式中：A_p——磁芯面积乘积，cm⁴；
- A_c——磁芯截面积，cm²；
- A_w——磁芯窗口截面积，cm²。

$$A_P = \left(\frac{P_t \cdot 10^4}{4 \cdot B_m \cdot f \cdot K_w \cdot K_J} \right)^{1.16} \dots \dots \dots (24)$$

式中, A_P ——磁芯面积乘积, cm^4 ;
 P_t ——变压器计算功率, W ;
 B_m ——工作磁感应强度, T ;
 f ——工作频率, Hz ;
 K_w ——窗口占空系数;
 K_J ——电流密度系数;

根据开关电源变压器工作要求决定磁性材料和磁芯结构形式, 选择和 A_P 值相接近的规格磁芯或自行设计与 A_P 值相当的磁芯尺寸。

8.3 计算绕组匝数

a. 初级绕组匝数

$$W_1 = \frac{U_{P1} \cdot T_{on}}{2 \cdot B_m \cdot A_c} \cdot 10^{-2} \dots \dots \dots (25)$$

式中: W_1 ——初级绕组匝数;
 B_m ——工作磁感应强度, T : ~~0.665~~ B_s 增大
 U_{P1} ——初级输入电压幅值, V ;
 A_c ——磁芯截面积, cm^2 ;
 T_{on} ——初级输入脉冲电压宽度, μs ;

磁芯截面积计算时应考虑磁芯占空系数的影响, 不同带厚的钢带叠片系数见表1。

b. 次级绕组匝数

$$W_2 = \frac{U_{P2}}{U_{P1}} \cdot W_1$$

$$W_3 = \frac{U_{P3}}{U_{P1}} \cdot W_1$$

⋮

$$W_i = \frac{U_{Pi}}{U_{P1}} \cdot W_1 \dots \dots \dots (26)$$

式中, W_1 ——初级绕组匝数;
 W_2, W_3, \dots, W_i ——次级绕组匝数;
 U_{P1} ——初级输入电压幅值, V ;
 $U_{P2}, U_{P3}, \dots, U_{Pi}$ ——次级输出电压幅值, V ;

8.4 确定电流密度

$$J = K_J \cdot A_P^{-0.14} \cdot 10^{-2} \dots \dots \dots (27)$$

式中, J ——电流密度, A/mm^2 ;

K_1 ——电流密度系数，见表11，

8.5 选择导线

根据变压器各绕组工作电流和确定的电流密度来选择导线规格。

$$S_{mi} = \frac{I_i}{J} \dots\dots\dots (28)$$

式中： S_{mi} ——各绕组导线所需截面积， mm^2 ；

I_i ——各绕组电流有效值，A；

J ——电流密度， A/mm^2 。

按计算所需截面积选择导线时，应考虑趋肤效应的影响，见第6章。然后从导线规格表中选取适当规格的导线。

8.6 分节参数核算

有漏磁及分布电容要求时，按第5章规定方法进行核算。

8.7 核算窗口尺寸

根据开关器件耐压等级、绝缘条件、安全要求设计变压器绝缘结构。然后，根据绕组结构核算窗口尺寸。

8.8 铜损计算

铜损由绕组铜损和引线铜损两部分组成。

8.8.1 绕组铜损

绕组铜损 P_{m1} 等于各绕组电流有效值的平方乘以绕组电阻。

$$P_{m1} = I_i^2 \cdot R_{a1} \dots\dots\dots (29)$$

式中： P_{m1} ——绕组铜损，W；

I_i ——各绕组电流有效值，A；

R_{a1} ——各绕组交流电阻， Ω 。

变压器各绕组铜损总铜损为：

$$P_m = \sum I_i^2 \cdot R_{a1} \dots\dots\dots (30)$$

式中： P_m ——变压器总铜损，W。

佳
振
宏

8.8.2 磁芯损耗

磁芯损耗取决于工作频率、工作磁感应强度和材料性能。

$$P_c = P_{c0} \cdot G_c \dots\dots\dots (31)$$

式中： P_c ——磁芯损耗，W；

P_{c0} ——在工作频率，工作磁感应强度下单位质量的磁芯损耗， W/kg ；

G_c ——磁芯质量，kg。

8.8.3 开关电源变压器总损耗

$$P_z = P_m + P_c \dots\dots\dots (32)$$

式中： P_z ——变压器总损耗，W；

P_m ——变压器总铜损，W；

P_c ——磁芯损耗, W。

8.9 温升计算

开关电源变压器输入功率的一部分由于损耗而转换成热能使变压器温度上升, 并且通过辐射和对流的共同作用, 从变压器外表面散发。因此, 变压器温升取决于表面积的大小。

温升计算可参照相应变压器结构形式已提供的方法进行。也可按下列公式计算:

$$S_T = K_S \cdot A_P^{0.5} \dots \dots \dots (33)$$

式中: S_T ——变压器表面积, cm^2 ;

A_P ——磁芯面积乘积, cm^4 ;

K_S ——表面积系数。

表面积系数值见表12。

表 12

磁芯形式	罐型磁芯	E型磁芯	C型磁芯	环型磁芯
K_S 值	33.3	41.3	39.2	50.9

变压器表面单位面积所耗散的平均功率:

$$q = \frac{P_z}{S_T} \dots \dots \dots$$

式中: q ——变压器表面单位面积所耗散的平均功率, W/cm^2 ;

P_z ——变压器总损耗, W;

S_T ——变压器表面积, cm^2 。

按 q 值大小查图7曲线可得变压器温升。从曲线可得:

$q=0.03W/cm^2$ 时, 温升为 $25^\circ C$;

$q=0.07W/cm^2$ 时, 温升为 $50^\circ C$ 。

图8曲线表示: 当 ΔT 温升为 $25^\circ C$ 和 $50^\circ C$ 时变压器表面积乘积与功率的关系。

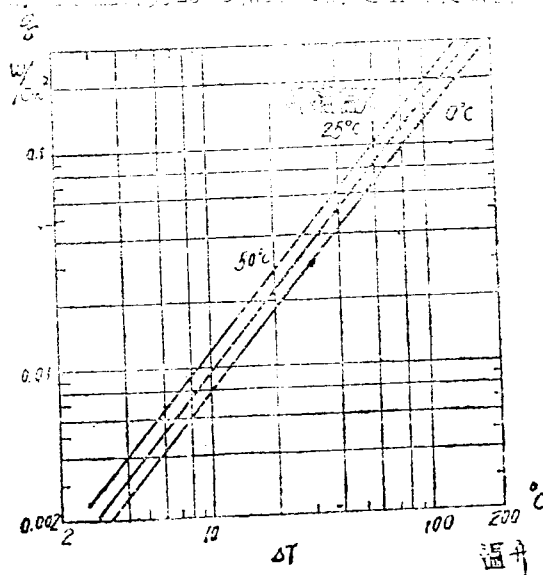


图7 温升和q值关系

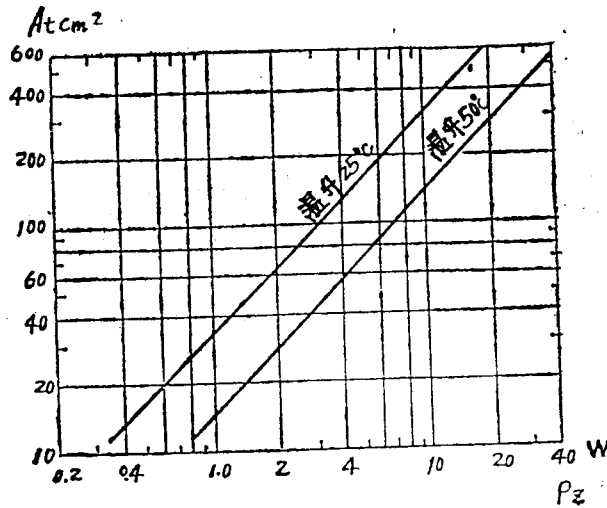


图8 对应温升25°C、50°C表面积和总损耗关系

9 单极性——单端反激式开关电源变压器计算

9.1 基本电路

图9为单端反激式开关稳压电源的基本电路。当开关管被激励导通时，输入电压加到变压器初级绕组，初级绕组流过电流，由于变压器次级整流二极管反接，次级绕组无电流流过，能量在变压器电感中以磁能形式储存起来。当开关管截止时，变压器感应电压与输入电压反向，使整流二极管导通，变压器储存的能量释放出来，供负载及电容器充电。因此，这种电路输出是倒相型的。

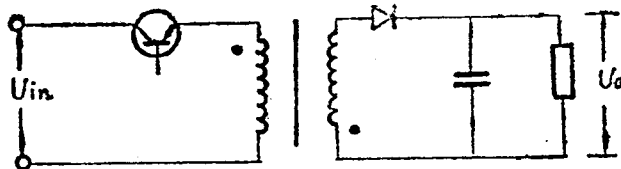


图9 单端反激式开关电源基本电路

单端反激式开关电源变压器输出电压不仅与初、次级绕组的匝数比有关，而且和导通时间有关。

9.2 等效电路

图10为单端反激式变换器忽略变压器绕组漏感的等效电路。

由于在开关管截止期间变压器绕组电感中储存的能量向负载释放。因此，变压器初级绕组电感值不同，将直接影响放电时间常数，并对电路中的电压、电流波形都有很大影响。图11给出了电感为不同值时的电压、电流波形。从图中可以看出：电感愈小，充放电时间常数愈小，峰值电流就大。这不仅对开关管等元件的选择要求高，而且造成输出电压纹波增大。当电感

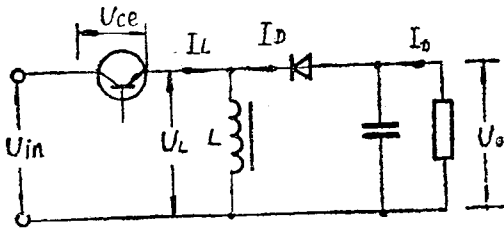


图10 反激变换器等效电路

过小时会造成间断波形，见图11(C)。

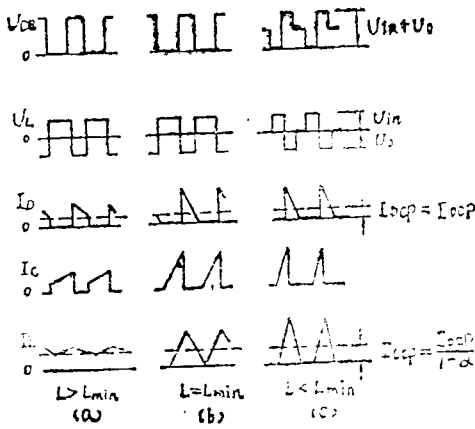


图11 初级电感对电流、电压波形影响

9.3 临界电感

开关管导通时在单端反激式开关电源变压器初级电感中储存的能量，在开关管截止结束（下一周导通开始时），初级电感中储存的能量刚好释放完毕，此时变压器初级绕组所具有的电感称为单端反激式开关电源变压器的临界电感。图11(b)所示为临界电感时的波形。

单端反激式开关电源变压器初级电感大于临界电感时，在开关管截止期间电感中储存的能量并未完全释放，还储存一部分能量，见图11(a)。此时峰值电流小，纹波小。但电感过大造成变压器体积增大，漏感上升和成本增加。因此，应根据负载的不同要求选择合适的变压器初级电感。

9.4 单端反激式开关电源变压器计算

9.4.1 计算时应给定的基本条件

电路形式；

工作频率（或周期）；

变换器输入最高、最低电压；

- 输出电压、电流；
- 开关管最大导通时间；
- 隔离电位；
- 要求的漏感或分布电容；
- 工作环境条件。

9.4.2 输入、输出电压

a. 变压器初级输入电压

$$U_{p1} = U_{in} - \Delta U_1 \dots \dots \dots (35)$$

式中： U_{p1} ——变压器初级输入额定电压幅值，V；

U_{in} ——变换器输入直流电压，V；

ΔU_1 ——开关管及线路压降，V。

b. 变压器次级输出电压

$$U_{p2} = U_{o2} + \Delta U_2$$

$$U_{p3} = U_{o3} + \Delta U_3$$

⋮

$$U_{pi} = U_{oi} + \Delta U_i \dots \dots \dots (36)$$

式中： U_{p2} ， U_{p3} ， U_{pi} ——变压器次级输出电压幅值，V；

U_{o2} ， U_{o3} ， U_{oi} ——变压器次级次级输出电压，V；

ΔU_2 ， ΔU_3 ， ΔU_i ——整流管及线路压降，V。

9.4.3 变压器工作比

开关管导通时间占工作周期的比值称为工作比。

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T} \dots \dots \dots (37)$$

式中： α ——额定工作状态时工作比；

T_{on} ——额定输入电压时开关管导通时间， μs ；

T ——工作周期， μs 。

最大工作比：

$$\alpha_{max} = \frac{T_{onmax}}{T} \dots \dots \dots (38)$$

式中： α_{max} ——最大工作比；

T_{onmax} ——开关管最大导通时间， μs ；

T ——工作周期， μs 。

最小工作比：

$$\alpha_{min} = \frac{\alpha_{max}}{(1 - \alpha_{max}) K_v + \alpha_{max}} \dots \dots \dots (39)$$

式中： α_{min} ——最小工作比；

α_{max} ——最大工作比;
 K_v ——电压变化系数。

$$K_v = \frac{U_{p1max}}{U_{p1min}} \dots\dots\dots (40)$$

式中: K_v ——电压变化系数;
 U_{p1max} ——变压器输入最高电压幅值, V;
 U_{p1min} ——变压器输入最低电压幅值, V。

4.4 匝数比

单端反激式开关电源变压器的匝数比, 不仅和输入输出电压有关, 而且和工作比有关。

$$n = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot \frac{U_{p1}}{U_{p2}} \cdot \frac{V_{inmin}}{V_o + V_{of}} \dots\dots\dots (41)$$

$$n = \frac{T_{on}}{T_{off}} \cdot \frac{U_{p1}}{U_{p2}} \dots\dots\dots (42)$$

式中: n ——单端反激式开关电源变压器匝数比;

α ——额定工作状态时工作比;

U_{p1} ——变压器输入额定电压幅值, V;

U_{p2} ——变压器输出电压幅值, V;

T_{on} ——开关管导通时间, μs ;

T_{off} ——开关管截止时间, μs 。

$$A_{max} \cdot V_{inmax} = a_{ref} \cdot V_{in} \left(\frac{220}{\sqrt{2}} \right)$$

(176 $\times\sqrt{2}$) 220 $\times\sqrt{2}$

$$A_{ref} = 0.42$$

则 $a_{ref} = \dots$

由于单端反激式开关电源变压器初级输入电压和初级导通时间乘积是一个常数, 计算匝数比时, 输入电压和导通时间 (或工作比) 相对应。

$$\begin{aligned} U_{in} &\leftrightarrow D_{max} \\ U_{min} &\leftrightarrow D_{min} \end{aligned}$$

4.5 初级电感

单端反激式开关电源变压器的临界电感:

$$L_{min} = \left(\frac{U_{p1} \cdot n U_{p2}}{U_{p1} + n U_{p2}} \right)^2 \cdot \frac{T}{2P_o} \dots\dots\dots (43)$$

式中: L_{min} ——单端反激式开关电源变压器的临界电感, μH ;

n ——匝数比;

P_o ——变压器输出直流功率, W;

U_{p1} ——变压器输入额定电压幅值, V;

U_{p2} ——变压器输出电压幅值, V;

T ——工作周期, μs 。

当变压器初级电感大于临界电感, 则开关管截止期间变压器储存的能量不完全释放, 当变压器初级电感小于临界电感时, 则开关管截止期间变压器储存的能量完全释放。

通常单端反激式开关电源变压器初级电感为:

$$L_{p1} \geq L_{min} \dots\dots\dots (44)$$

式中: L_{p1} —— 变压器初级电感, H;
 L_{min} —— 单端反激式开关电源变压器的临界电感, H。

9.4.6 初级峰值电流

a. 开关管截止期间变压器储存能量完全释放时:

$$I_{p1} = \frac{2p_o}{U_{p1min} \cdot \alpha_{max}} \dots\dots\dots (45)$$

式中: I_{p1} —— 变压器初级峰值电流, A;
 p_o —— 变压器输出直流功率, W;
 U_{p1min} —— 变压器输入最低电压幅值, V;
 α_{max} —— 最大工作比。

b. 开关管截止期间变压器储存能量不完全释放时:

$$I_{p1} = \frac{U_{p1} + nU_{p2}}{U_{p1} \cdot nU_{p2}} + \frac{T}{2L_{p1}} \cdot \frac{U_{p1} \cdot nU_{p2}}{U_{p1} + nU_{p2}} \dots\dots\dots (46)$$

式中: I_{p1} —— 变压器初级峰值电流, A;
 U_{p1} —— 变压器输入额定电压幅值, V;
 U_{p2} —— 变压器输出电压幅值, V;
 T —— 工作周期, μs ;
 L_{p1} —— 变压器初级电感, H;
 n —— 匝数比。

9.4.7 绕组有效电流

初级有效电流计算见第7章。

次级绕组有效电流为:

$$I_2 = \frac{I_1 \cdot U_{p1}}{U_{p2}} \dots\dots\dots (47)$$

式中: I_1 —— 初级电流有效值, A;
 I_2 —— 次级电流有效值, A;
 U_{p1} —— 变压器输入额定电压幅值, V;
 U_{p2} —— 变压器输出电压幅值, V。

9.4.8 确定导线规格

导线规格确定见8.5。

9.4.9 确定工作磁感应强度

反激式开关电源变压器的工作磁感应强度取决于所用磁性材料的脉冲磁感应强度增量值。通常在变压器磁路中加气隙来降低剩余磁感应强度和提高磁芯工作的直流磁场强度、铁

磁体磁芯加气隙后剩余磁感应强度很小，其脉冲磁感应强度增量一般取饱和磁感应强度的二分之一。

$$\Delta B_m = \frac{1}{2} B_s \dots\dots\dots (48)$$

式中： ΔB_m ——脉冲磁感应增量，T；
 B_s ——饱和磁感应强度，T。

4.10 计算磁芯面积乘积确定磁芯尺寸

$$A_p = \frac{392 L_{p1} \cdot I_{p1} \cdot D_1^2}{\Delta B_m} \dots\dots\dots (49)$$

式中： A_p ——磁芯面积乘积， Cm^4 ；
 L_{p1} ——变压器初级电感，H；
 I_{p1} ——变压器初级峰值电流，A；
 ΔB_m ——脉冲磁感应增量，T；
 D_1 ——初级绕组导线直径，mm。

根据磁芯面积乘积 A_p 值选择规格磁芯或自行设计磁芯尺寸。

4.11 空气隙

$$L_g = \frac{0.4\pi L_{p1} I_{p1}^2}{A_c \cdot \Delta B_m^2} \dots\dots\dots (50)$$

式中： L_g ——磁芯中气隙长度，cm；
 L_{p1} ——变压器初级电感，H；
 I_{p1} ——变压器初级峰值电流，A；
 ΔB_m ——脉冲磁感应增量，T；
 A_c ——磁芯截面积， cm^2 。

当采用恒导磁材料的磁芯时，磁路中不需要空气隙。

4.12 绕组匝数计算

a. 初级绕组匝数

$$W_1 = \frac{\Delta B_m \cdot l_g}{0.4\pi \cdot I_{p1}} \cdot 10^4 \dots\dots\dots (51)$$

式中： W_1 ——初级绕组匝数；
 ΔB_m ——脉冲磁感应增量，T；
 l_g ——磁芯中气隙长度，cm；
 I_{p1} ——变压器初级峰值电流，A。

当变压器磁芯中不用空气隙时，则

$$W_1 = 8.92 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{L_{p1} \cdot 1c}{\mu_c \cdot A_c}} \dots\dots\dots (52)$$

式中： W_1 ——初级绕组匝数；

L_{1p} ——变压器初级电感, H;

l_c ——磁芯磁路长度, cm;

μ_e ——磁芯有效磁导率;

A_c ——磁芯截面积, cm^2 。

有效磁导率取决于变压器工作状态和材料性能。由工作磁感应强度、直流磁场强度和磁性材料的特性决定。

b. 次级绕组匝数

$$W_2 = \frac{W_1 \cdot U_{p2} \cdot (1 - \alpha_{max})}{U_{p1min} \cdot \alpha_{max}}$$

$$W_3 = \frac{W_1 \cdot U_{p3} \cdot (1 - \alpha_{max})}{U_{p1min} \cdot \alpha_{max}}$$

⋮

$$W_i = \frac{W_1 \cdot U_{pi} \cdot (1 - \alpha_{max})}{U_{p1min} \cdot \alpha_{max}} \dots\dots\dots (53)$$

式中: W_1 ——初级绕组匝数;

W_2, W_3, \dots, W_i ——次级绕组匝数;

U_{p1min} ——变压器输入最低电压幅值, V;

$U_{p2}, U_{p3}, \dots, U_{pi}$ ——次级输出电压幅值, V;

α_{max} ——最大工作比。

9.4.13 分布参数计算、核算窗口尺寸、损耗和温升

变压器在确定磁芯型号、导线规格、线圈匝数后,按8.6; 8.7;

8.8; 8.9规定的方法进行分布参数核算、校核磁芯窗口尺寸、计算损耗和温升。

单相反激式开关电源变压器由于磁芯单向磁化,磁芯损耗尚与双向激励功率损耗的一半。

10 单极性——单端正激式开关电源变压器计算

单端正激式开关电源变压器与反激式开关电源变压器磁芯都是单向激磁,要求磁芯脉冲磁感应强度大。但是变压器初级工作,次级也同时工作,因此,计算方法和步骤又与双极性开关电源变压器接近。

10.1 计算时应给定的基本条件

电路形式;

工作频率(或周期);

变换器输入最高、最低电压;

输出电压、电流;

开关管最大导通时间;

隔离电位;

要求的漏感或分布电容;

工作环境条件。

10.2 次级绕组峰值电流

变压器次级绕组的峰值电流等于开关电源的直流输出电流。

$$I_{p2} = I_{o2} \dots \dots \dots (54)$$

式中： I_{p2} ——变压器次级峰值电流，A；

I_{o2} ——输出直流电流，A。

10.3 次级绕组电压幅值

$$U_{p2} = \frac{U_{o2} + \Delta U_2}{\alpha} \dots \dots \dots (55)$$

式中： U_{p2} ——变压器输出电压幅值，V；

U_{o2} ——变压器次级负载直流电压，V；

ΔU_2 ——整流管及线路压降，V；

α ——工作比

10.4 变压器输出功率计算

$$p_2 = \Sigma (U_{p2} \cdot I_{p2} \cdot \alpha) \dots \dots \dots (56)$$

式中： p_2 ——变压器输出功率，W。

U_{p2} ——变压器输出电压幅值，V；

I_{p2} ——变压器次级峰值电流，A；

α ——工作比。

10.5 确定磁芯尺寸

$$V_e = \frac{12 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot \beta p_2}{f} \dots \dots \dots (57)$$

式中： V_e ——磁芯体积， cm^3 ；

p_2 ——变压器输出功率，W；

f ——工作频率，Hz；

β ——计算系数，在工作频率是25kHz时为0.2，工作频率在30~50kHz时为0.3

根据计算 V_e 直选取相应型号的铁氧体磁芯。

10.6 绕组匝数计算

a. 初级绕组匝数

$$W_1 = \frac{U_{p1} \cdot T_{on}}{\Delta B_m \cdot A_c} i_{0-2} \dots \dots \dots (58)$$

式中： W_1 ——初级绕组匝数；

U_{p1} ——变压器输入额定电压幅值，V，见式(35)；

T_{on} ——开关管导通时间， μs ；

ΔB_m ——脉冲磁感应增量，T； $0.6 B_m$

A_c ——磁芯截面积， cm^2 。

b. 次级绕组匝数:

$$W_2 = \frac{U_{p2}}{U_{p1}} \cdot W_1$$

$$W_3 = \frac{U_{p3}}{U_{p1}} \cdot W_1$$

⋮

$$W_i = \frac{U_{pi}}{U_{p1}} \cdot W_1 \dots\dots\dots (59)$$

式中: W_1 —— 初级绕组匝数;

W_2, W_3, \dots, W_i —— 次级绕组匝数;

U_{p1} —— 变压器输入额定电压幅值, V;

$U_{p2}, U_{p3}, \dots, U_{pi}$ —— 次级输出电压幅值, V。

c. 去磁绕组匝数

去磁绕组匝数和初级绕组匝数相同

$$W_H = W_1 \dots\dots\dots (60)$$

式中: W_H —— 去磁绕组匝数;

W_1 —— 初级绕组匝数。

去磁绕组的作用是为了保证变压器工作点不移到饱和区, 使磁化电流返回到电源, 维持开关管导通周期开始时, 磁场强度为零。绕制时应使初级绕组和去磁绕组保持紧密耦合。

10.7 绕组电流

忽略激磁电流等影响因素, 初、次级电流有效值按单向脉冲方波的波形来计算。

a. 次级电流有效值

$$I_2 = \sqrt{\alpha} \cdot I_{p2} \dots\dots\dots (61)$$

式中: I_2 —— 次级电流有效值, A;

I_{p2} —— 变压器次级峰值电流, A;

α —— 工作比。

b. 初级电流有效值

$$I_1 = \frac{I_2 U_{p2}}{U_{p1}} \dots\dots\dots (62)$$

式中: I_1 —— 初级电流有效值, A;

I_2 —— 次级电流有效值, A;

U_{p1} —— 变压器输入额定电压幅值, V;

U_{p2} —— 变压器输出电压幅值, V。

c. 去磁绕组电流有效值

去磁绕组电流约与磁化电流相同，只有初级电流有效值的5%到10%。

$$I_H = (5 \sim 10) \% \cdot I_1 \dots\dots\dots (63)$$

式中： I_H ——去磁绕组电流有效值，A；

I_1 ——初级绕组电流有效值，A。

10.8 选择导线、核算分布参数、窗口尺寸、损耗和温升

选择导线，核算分布参数和窗口尺寸，计算损耗和温升按 8.5；8.6；8.7；8.8；8.9 规定方法进行。

单端正激式开关电源变压器由于磁芯单向磁化，磁芯损耗约为双向激励功率损耗的一半。

表A1 高强度聚酯(O

标称直径 mm	漆包线最大外径 mm	铜心截面积 mm ²	漆包线直流电阻20°C Ω/m 不大于	漆包线参考重量 g/m	击穿 V不小
0.06	0.090	0.00283	6.851	0.0290	600
0.07	0.100	0.00385	4.958	0.0390	
0.08	0.110	0.00503	3.754	0.0500	
0.09	0.120	0.00636	2.940	0.0630	
0.10	0.130	0.00785	2.466	0.0760	
0.11	0.140	0.00950	2.019	0.0920	
0.12	0.150	0.0113	1.683	0.1083	
0.13	0.160	0.0133	1.424	0.1263	
0.14	0.170	0.0154	1.221	0.1460	
0.15	0.190	0.0177	1.059	0.1670	
0.16	0.200	0.0201	1.9264	0.1890	
0.17	0.210	0.0227	0.8175	0.2130	
0.18	0.220	0.0254	0.7267	0.2380	
0.19	0.230	0.0284	0.6503	0.2640	
0.20	0.240	0.0316	0.5853	0.2920	
0.21	0.250	0.0350	0.5296	0.3220	
0.23	0.280	0.0415	0.4399	0.3850	
0.25	0.300	0.0491	0.3708	0.4540	
0.28	0.330	0.0616	0.3053	0.5660	
0.31	0.360	0.0755	0.2473	0.6930	
0.33	0.390	0.0855	0.2173	0.7840	
0.35	0.410	0.0962	0.1925	0.8840	
0.38	0.440	0.113	0.1626	1.0400	
0.40	0.450	0.126	0.1463	1.1750	
0.42	0.460	0.139	0.1321	1.5100	
0.45	0.510	0.159	0.1150	1.4450	
0.47	0.530	0.173	0.1052	1.6000	
0.50	0.560	0.196	0.09269	1.8550	
0.53	0.600	0.221	0.08231	2.0400	
0.56	0.630	0.245	0.07357	2.2750	
0.60	0.670	0.283	0.05394	2.5890	
0.63	0.700	0.312	0.05790	2.8220	
0.67	0.750	0.353	0.05109	3.2190	
0.71	0.790	0.396	0.04608	3.6160	
0.75	0.840	0.442	0.04120	4.1140	
0.80	0.890	0.503	0.03612	4.6100	
0.85	0.940	0.567	0.03192	5.2350	
0.90	0.090	0.636	0.02842	5.9360	
0.95	1.040	0.709	0.02546	6.7640	
1.00	1.110	0.785	0.02294	7.2400	
1.06	1.170	0.882	0.02058	8.5050	
1.12	1.230	0.985	0.01839	8.9400	
1.18	1.290	1.09	0.01654	9.8900	
1.25	1.360	1.23	0.01471	11.200	
1.30	1.410	1.33	0.01358	12.10	
1.40	1.510	1.54	0.01169	14.00	
1.50	1.610	1.77	0.01016	16.10	
1.6	1.720	2.01	0.008915	18.12	
1.70	1.820	2.27	0.007933	20.46	
1.80	1.920	2.54	0.007064	22.91	
1.90	2.020	2.84	0.006331	25.50	
2.00	2.120	3.14	0.005706	28.21	
2.12	2.240	3.53	0.005095	31.52	
2.24	2.360	3.94	0.004557	36.13	
2.36	2.430	4.37	0.004100	41.35	
2.50	2.620	4.91	0.003648	44.63	
					4200

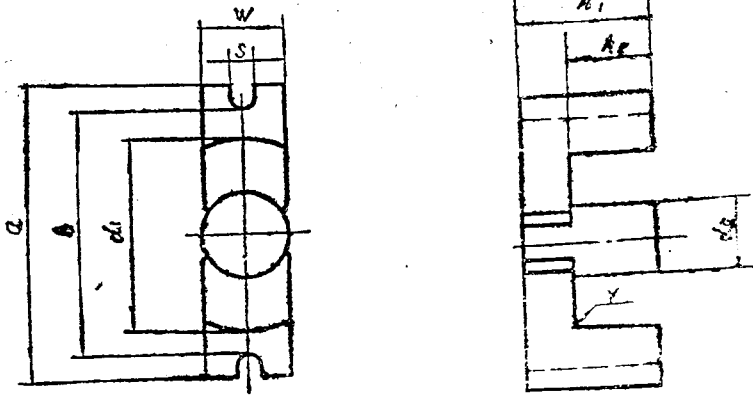
SJ/22921

附录
导线规格
(参考件)

(2型) 漆包圆铜线规格与载流量一览表

电压	载 流 量											
	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	7	8
	A/mm ²	A/mm ²	A/mm ²	A/mm ²	A/mm ²	A/mm ²	A/mm ²	A/mm ²	A/mm ²	A/mm ²	A/mm ²	A/mm ²
0.00452	0.00566	0.00708	0.00849	0.00991	0.0113	0.0127	0.0142	0.0156	0.0170	0.0198	0.0226	0.0254
0.00578	0.00770	0.00963	0.0116	0.0135	0.0154	0.0173	0.0193	0.0212	0.0231	0.0270	0.0302	0.0338
0.00755	0.0101	0.0126	0.0151	0.0176	0.0201	0.0226	0.0252	0.0277	0.0302	0.0352	0.0388	0.0428
0.00954	0.0127	0.0159	0.0191	0.0223	0.0254	0.0286	0.0318	0.0359	0.0382	0.0445	0.0482	0.0524
0.0118	0.0157	0.0196	0.0236	0.0275	0.0314	0.0353	0.0392	0.0432	0.0471	0.0550	0.0588	0.0628
0.0143	0.0190	0.0238	0.0285	0.0333	0.0380	0.0428	0.0475	0.0523	0.0570	0.0665	0.0702	0.0740
0.0170	0.0226	0.0283	0.0339	0.0395	0.0452	0.0509	0.0565	0.0622	0.0678	0.0791	0.0828	0.0868
0.0200	0.0266	0.0333	0.0399	0.0465	0.0532	0.0599	0.0665	0.0732	0.0798	0.0931	0.0968	0.1008
0.0231	0.0308	0.0385	0.0462	0.0539	0.0616	0.0693	0.0770	0.0847	0.0924	0.108	0.112	0.116
0.0266	0.0354	0.0443	0.0531	0.0620	0.0708	0.0797	0.0885	0.0974	0.106	0.124	0.128	0.132
0.0302	0.0402	0.0503	0.0603	0.0704	0.0804	0.0905	0.101	0.111	0.121	0.141	0.145	0.149
0.0341	0.0454	0.0568	0.0681	0.0795	0.0908	0.102	0.114	0.125	0.136	0.159	0.163	0.167
0.0381	0.0508	0.0635	0.0762	0.0889	0.102	0.114	0.127	0.140	0.152	0.178	0.182	0.186
0.0426	0.0568	0.0710	0.0852	0.0994	0.114	0.128	0.142	0.156	0.170	0.199	0.203	0.207
0.0471	0.0628	0.0785	0.0942	0.110	0.126	0.141	0.157	0.173	0.189	0.220	0.224	0.228
0.0519	0.0692	0.0865	0.104	0.121	0.138	0.155	0.173	0.190	0.208	0.242	0.246	0.250
0.0623	0.0830	0.104	0.125	0.145	0.166	0.187	0.208	0.228	0.249	0.291	0.295	0.299
0.0737	0.0982	0.123	0.147	0.172	0.196	0.221	0.246	0.271	0.295	0.344	0.348	0.352
0.0824	0.123	0.154	0.185	0.216	0.246	0.277	0.308	0.339	0.370	0.431	0.435	0.439
0.113	0.151	0.189	0.227	0.264	0.302	0.34	0.378	0.415	0.453	0.529	0.533	0.537
0.128	0.171	0.214	0.257	0.299	0.340	0.385	0.428	0.470	0.513	0.599	0.603	0.607
0.141	0.192	0.241	0.289	0.337	0.385	0.433	0.481	0.529	0.577	0.673	0.677	0.681
0.170	0.226	0.283	0.339	0.395	0.452	0.509	0.565	0.622	0.678	0.791	0.795	0.799
0.189	0.252	0.315	0.378	0.44	0.504	0.567	0.630	0.693	0.755	0.882	0.886	0.890
0.209	0.278	0.348	0.417	0.487	0.556	0.625	0.694	0.763	0.832	0.973	0.977	0.981
0.229	0.318	0.393	0.477	0.557	0.636	0.716	0.795	0.874	0.954	1.11	1.11	1.11
0.240	0.346	0.433	0.519	0.607	0.692	0.779	0.865	0.952	1.04	1.23	1.23	1.23
0.284	0.382	0.490	0.588	0.686	0.784	0.882	0.980	1.078	1.176	1.37	1.37	1.37
0.312	0.442	0.553	0.663	0.774	0.884	0.995	1.11	1.22	1.33	1.55	1.55	1.55
0.319	0.492	0.615	0.738	0.861	0.984	1.11	1.23	1.35	1.48	1.72	1.72	1.72
0.425	0.565	0.702	0.849	0.991	1.13	1.27	1.42	1.56	1.70	2.02	2.02	2.02
0.448	0.624	0.780	0.935	1.09	1.25	1.40	1.56	1.72	1.87	2.18	2.18	2.18
0.530	0.706	0.883	1.06	1.24	1.41	1.59	1.77	1.94	2.12	2.47	2.47	2.47
0.504	0.792	0.990	1.19	1.39	1.58	1.78	1.98	2.18	2.38	2.77	2.77	2.77
0.603	0.884	1.11	1.33	1.55	1.77	1.99	2.21	2.43	2.65	3.09	3.09	3.09
0.717	1.01	1.26	1.51	1.76	2.01	2.26	2.52	2.77	3.02	3.52	3.52	3.52
0.81	1.13	1.42	1.70	1.98	2.27	2.55	2.84	3.12	3.40	3.97	3.97	3.97
0.934	1.27	1.59	1.91	2.23	2.54	2.86	3.18	3.50	3.82	4.45	4.45	4.45
1.0	1.42	1.77	2.13	2.48	2.81	3.19	3.55	3.90	4.25	4.95	4.95	4.95
1.18	1.57	1.95	2.36	2.75	3.14	3.53	3.92	4.32	4.71	5.50	5.50	5.50
1.3	1.75	2.21	2.65	3.00	3.53	3.97	4.41	4.85	5.29	6.17	6.17	6.17
1.4	1.97	2.46	2.96	3.45	3.94	4.43	4.93	5.42	5.91	6.90	6.90	6.90
1.6	2.18	2.73	3.27	3.82	4.36	4.91	5.45	6.00	6.54	7.63	7.63	7.63
1.8	2.46	3.09	3.69	4.31	4.92	5.54	6.15	6.77	7.35	8.61	8.61	8.61
2.0	2.66	3.33	3.99	4.66	5.32	5.99	6.65	7.32	7.98	9.31	9.31	9.31
2.3	3.08	3.85	4.52	5.29	6.13	6.91	7.70	8.47	9.24	10.8	10.8	10.8
2.6	3.54	4.43	5.31	6.20	7.06	7.97	8.85	9.74	10.6	12.4	12.4	12.4
3.0	4.02	5.03	6.03	7.04	8.11	9.25	10.1	11.1	12.1	14.1	14.1	14.1
3.4	4.54	5.62	6.81	7.95	9.08	10.2	11.4	12.5	13.6	15.9	15.9	15.9
3.8	5.08	6.35	7.62	8.89	10.2	11.4	12.7	14.0	15.2	17.8	17.8	17.8
4.2	5.63	7.10	8.52	9.94	11.4	12.6	14.0	15.6	17.0	19.9	19.9	19.9
4.7	6.23	7.85	9.42	11.0	12.6	14.1	15.7	17.3	18.8	22.6	22.6	22.6
5.30	7.05	8.83	10.6	12.4	14.1	15.9	17.7	19.4	21.2	24.7	24.7	24.7
5.91	7.88	9.85	11.8	13.2	15.8	17.7	19.7	21.7	23.6	27.6	27.6	27.6
6.56	8.74	10.9	13.1	15.3	17.8	19.9	21.9	24.0	26.2	30.6	30.6	30.6
7.37	9.52	12.3	14.7	17.2	19.9	22.1	24.6	27.1	29.5	34.4	34.4	34.4

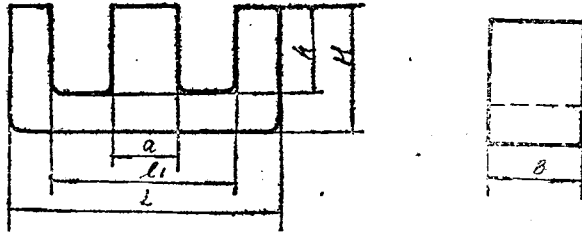
附录 B
磁心规格表
(参考件)



图B1 EC型磁芯

表B1 EC型磁芯尺寸

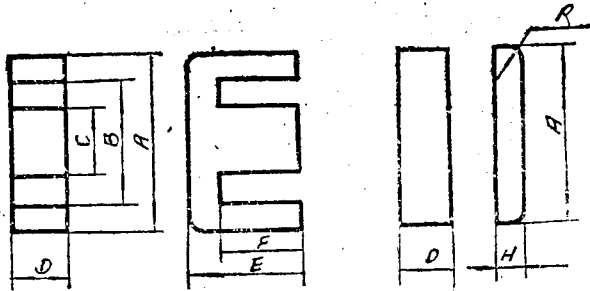
型 号		EC35	EC41	EC52	EC70
磁芯尺寸 mm	a	34.5 ± 0.8	40.6 ± 1.0	52.2 ± 1.3	70 ± 1.7
	b	28.5 ± 0.8	33.6 ± 1.0	44.2 ± 1.5	59.6 ± 1.7
	d1	22.75 ± 0.55	27.05 ± 0.75	33 ± 0.9	44.5 ± 1.2
	d2	9.5 ± 0.3	11.6 ± 0.3	13.4 ± 0.35	16.4 ± 0.4
	h1	17.3 ± 0.15	19.5 ± 0.5	24.2 ± 0.15	34.5 ± 0.15
	h2	11.9 ^{+0.7} ₀	13.5 ^{+0.3} ₀	15.5 ^{+0.3} ₀	22.3 ^{+0.9} ₀
	w	9.5 ± 0.3	11.6 ± 0.3	13.4 ± 0.25	16 ± 0.4
	s	2.75 ± 0.25	3.25 ± 0.25	3.75 ± 0.25	4.75 ± 0.25
	Y	0.5	0.7	0.8	1.0
有效参数	Ac cm	0.665	1	1.34	2.01
	lc cm ²	7.74	8.93	12.5	14.4
	Ve cm ³	7.76	12.6	24.3	55.6



图B2 EE型磁芯

表B2 EE型磁芯尺寸

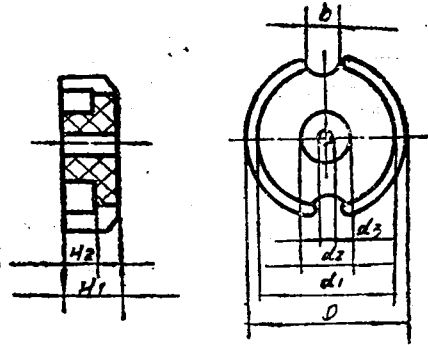
型号	尺寸/mm						有效面积		
	a	B	L ₁	L	M	H	W ₀ cm ²	A ₀ cm ²	W ₀ cm ²
E-3	3 ⁰ -0.5	3 ⁰ -0.5	12 ^{+0.8} 0	12 ⁰ -1.0	4 ⁰ 0	5	2.25	2.03	3.204
E-4	4 ⁰ -0.5	4 ⁰ -0.5	15 ^{+1.0} 0	15 ⁰ -1.2	5 ⁰ 0	6	2.64	2.15	3.77
E-5	5 ⁰ -0.5	5 ⁰ -0.5	18 ^{+1.0} 0	18 ⁰ -1.2	6.5 ^{+1.5} 0	10	3.53	2.25	4.80
E-6	6 ⁰ -0.8	6 ⁰ -0.8	20 ^{+1.2} 0	20 ⁰ -1.6	8 ^{+3.0} 0	12	4.40	2.35	5.55
E-7	7 ⁰ -0.8	7 ⁰ -0.8	22 ^{+1.0} 0	22 ⁰ -1.3	9 ^{+0.9} 0	13	5.43	2.49	6.17
E-12	12 ⁰ -1.0	12 ⁰ -1.0	28 ^{+1.4} 0	28 ⁰ -2.4	14 ^{+0.9} 0	21.5	3.39	1.44	15.7
E-17	17 ⁰ -1.2	17 ⁰ -1.2	37 ^{+2.2} 1	37 ⁰ -2.3	18.5 ^{+1.1} 0	27.5	11.60	2.89	25.0
E-23	20 ⁰ -1.4	20 ⁰ -1.4	43 ^{+2.4} 0	43 ⁰ -3.0	23.5 ^{+1.2} 0	32.5	14.00	4.00	34.5
E-28	28 ⁰ -1.6	28 ⁰ -1.6	55 ^{+2.4} 0	55 ⁰ -3.4	29 ^{+1.2} 0	42	13.70	7.84	165
E-36	36 ⁰ -1.8	36 ⁰ -1.8	72 ^{+3.0} 0	72 ⁰ -4.2	37 ^{+1.2} 0	55	24.10	13.00	317



图B3 EI型磁芯

表B3 EI型磁芯尺寸

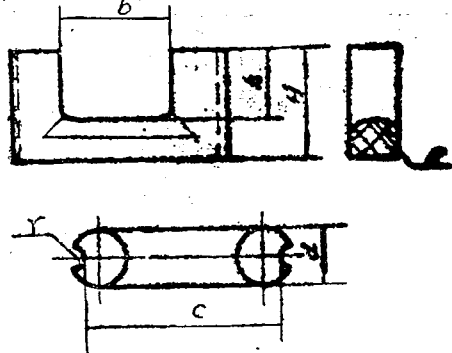
型 号	EI25	EI40	EI50	
直 径 寸 寸	A	25.4 ± 0.6	40 ± 0.7	50 ± 0.8
	B	18min	23.2min	33.5min
	C	$6.5 \begin{matrix} +0.6 \\ 0 \end{matrix}$	$12 \begin{matrix} 0 \\ -0.6 \end{matrix}$	$15 \begin{matrix} 0 \\ -0.3 \end{matrix}$
	D	$7 \begin{matrix} 0 \\ -0.5 \end{matrix}$	$12 \begin{matrix} 0 \\ -0.6 \end{matrix}$	$15 \begin{matrix} 0 \\ -0.3 \end{matrix}$
	E	17 ± 0.5	$27 \begin{matrix} +0.8 \\ 0 \end{matrix}$	$33 \begin{matrix} +0.8 \\ 0 \end{matrix}$
	F	$13 \begin{matrix} +0.6 \\ 0 \end{matrix}$	$21 \begin{matrix} +0.7 \\ 0 \end{matrix}$	$24.5 \begin{matrix} +0.8 \\ 0 \end{matrix}$
	H	3.5 ± 0.3	6.5 ± 0.3	9 ± 0.3
	R	1.0	2.0	2.5
有 效 参 数	IC cm	5.01	8.31	10.30
	AC cm ²	0.42	1.28	2.26
	Ve cm ³	2.1	10.6	23.3



图B4 罐型磁芯

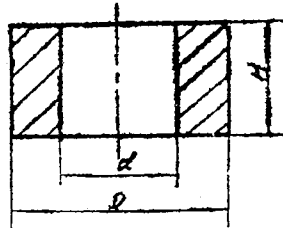
表B4 罐型磁芯尺寸

型号	尺 寸 mm						有效参数			
	D	d ₁	d ₂	d ₃	H ₁	H ₂	b	I _c cm	A _c cm ²	Vecm ³
GU-9×6	9.4 ⁻⁰	7.4 ^{+0.4}	3.9 ⁻⁰	2.0 ^{+0.2}	2.9 ^{+0.2}	1.8 ^{+0.3}	1.5	1.23	0.102	0.26
	0.5	0	0.3	0	0	0				
GU-11×7	11.4 ⁻⁰	8.9 ^{+0.6}	4.7 ⁻⁰	2.0 ^{+0.2}	3.5 ^{+0.3}	2.2 ^{+0.3}	1.5	1.53	0.165	0.252
	0.6	0	0.3	0	0	0				
GU-14×9	14.4 ⁻⁰	11.4 ^{+0.8}	6.1 ⁻⁰	2.9 ^{+0.3}	4.2 ^{+0.3}	2.8 ^{+0.4}	2.0	1.91	0.258	0.462
	0.9	0	0.6	0	0	0				
GU-18×11	18.6 ⁻⁰	14.6 ^{+0.9}	7.8 ⁻⁰	2.9 ^{+0.3}	5.2 ^{+0.3}	3.6 ^{+0.4}	2.0	2.48	0.411	1.100
	1.2	0	0.6	0	0	0				
GU-22×13	22.2 ⁻⁰	17.9 ^{+1.2}	9.5 ⁻⁰	1.2 ^{+0.3}	6.6 ^{+0.3}	4.6 ^{+0.4}	3.0	3.20	0.668	2.122
	1.2	0	0.6	0	0	0				
GU-26×15	26.2 ⁻⁰	21.0 ^{+1.2}	11.7 ⁻⁰	5.2 ^{+0.3}	7.9 ^{+0.4}	5.5 ^{+0.5}	3.0	3.93	0.973	3.319
	1.6	0	0.8	0	0	0				
GU-30×19	30.8 ⁻⁰	24.6 ^{+1.5}	13.7 ⁻⁰	5.2 ^{+0.3}	9.3 ^{+0.4}	6.5 ^{+0.5}	3.5	4.66	1.415	6.593
	2.6	0	0.9	0	0	0				
GU-36×22	36.5 ⁻⁰	29.1 ^{+1.8}	16.3 ⁻⁰	5.2 ^{+0.3}	10.7 ^{+0.4}	7.3 ^{+0.6}	3.5	5.83	2.221	12.50
	1.9	0	0.9	0	0	0				
GU-42×26	43.5 ⁻⁰	35.2 ^{+2.2}	17.9 ⁻⁰	5.2 ^{+0.5}	13.1 ^{+0.4}	8.7 ^{+0.6}	3.5	6.31	2.518	15.88
	2.2	0	1.0	0	0	0				
GU-48×30	48.5 ⁻⁰	39.6 ^{+2.2}	20.2 ⁻⁰	5.2 ^{+0.3}	14.6 ^{+0.4}	10.2 ^{+0.6}	4.9	7.32	3.378	24.73
	2.4	0	1.0	0	0	0				



图B5 U型磁芯
表B5 U型磁芯尺寸

型 号	磁 芯 规 格			
	U-7	U-12	u-16	U-18
a	7±0.3	12±0.5	16±0.5	18 ⁰ _{-1.0}
b	18	22	26	55
H	16.5 ^{+0.5} ₀	28.5 ^{+0.7} ₀	23.5 ^{+0.7} ₀	43 ^{+1.0} ₀
h	11 ^{+0.8} ₀	13 ^{+1.0} ₀	15 ^{+1.0} ₀	28 ^{+1.0} ₀
c	30±0.8	41±1	51±1.2	84
R	3.5	6	8	6
r	1	2	2.4	2.4

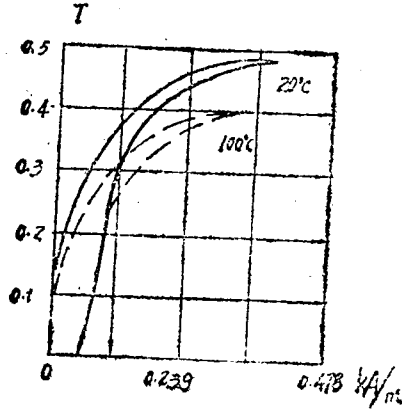


图B6 环型磁芯
表B6 环型磁芯尺寸

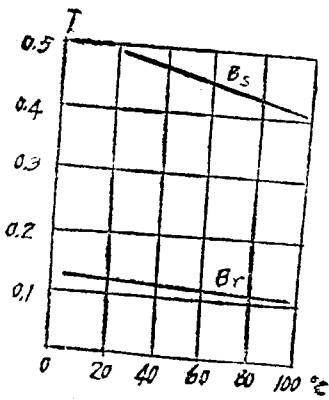
规 格	尺 寸 mm			有 效 参 数		
	D	d	H	IC cm	AC cm ²	Ve cm ³
φ18×8×5	18±0.6	8±0.5	5±0.4	4.08	0.250	1.02
φ22×11×5	22±0.8	11±0.5	5±0.4	5.18	0.275	1.42
φ31×18×7	31±1.0	18±0.6	7±0.5	7.7	0.455	3.50
φ37×23×7	37±1.1	23±0.8	7±0.5	9.42	0.490	4.62
φ45×26×8	45±1.2	26±0.8	8±0.5	11.15	0.760	8.47

附录 C
常用磁芯材料性能
(参考件)

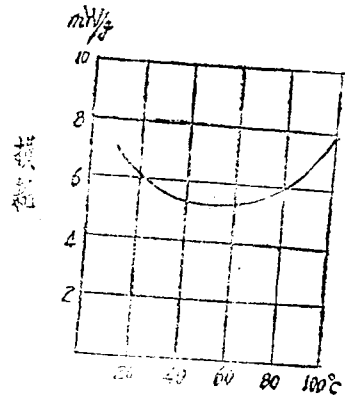
C.1 铁氧体磁性能



图C1 铁氧体R2KD磁化曲线



图C2 铁氧体R2KD B_s 和 B_r 和温度关系



图C3 铁氧体R2KD损耗和温度关系

表C1 1J85-1主要磁性能

材料牌号	饱和磁感应强度	剩余磁感应强度	矫顽力	损耗	
	T		A/m	0.5T, 20kHz	0.6T, 20kHz
1J85-1	0.6~0.75	0.5~0.6	1.99	30	
1J85-1A	0.7~0.76	0.54	1.23	25	31~33

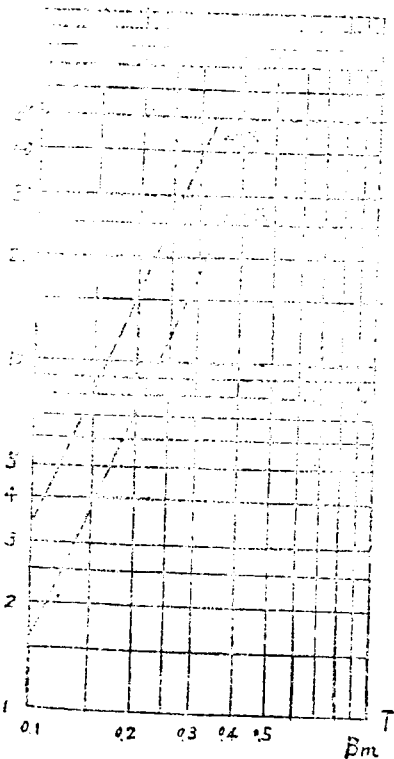
表C2 常用恒导材料磁性能

材料牌号	饱和磁感应强度	剩余磁感应强度	矫顽力	磁导率	恒磁场范围
	T	T	A/m	mH/m	A/m
1J67h	13	0.05	15.92	4.38	0~238
1J34h	15	0.03	19.90	1.25	0~796
1J34kh	16	0.05	23.98	0.63~1.13	0~1591
1J53h	15	0.1	31.84	0.13	0~7.96 × 10 ³

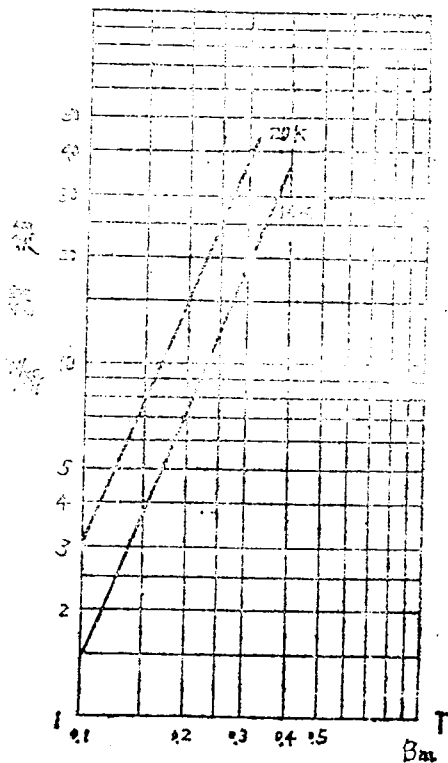
C.3 非晶态合金磁性能

表C3 非晶态合金磁性能

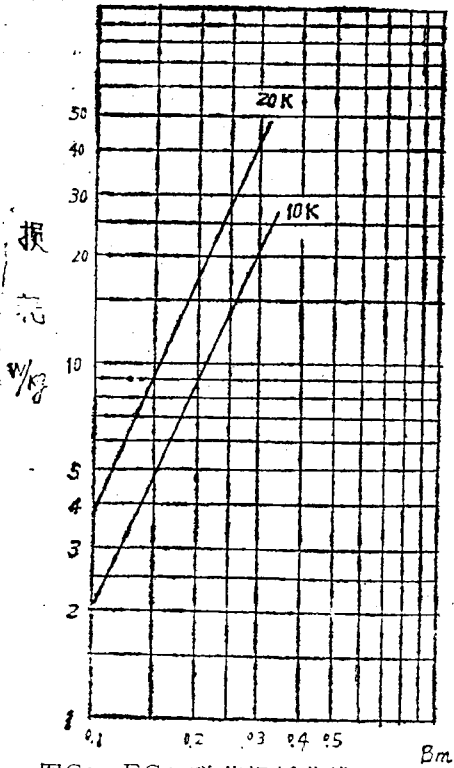
材料	饱和磁感应强度	矫顽力	电阻率	损耗 W/kg	
	T	A/m	$\mu\Omega\text{-Cm}$	0.6T, 20kHz	0.2T, 20kHz
Cu基非晶态合金	0.57~0.7	0.318~0.796	125~150	40	
Fe-Ni非晶态合金	1.0~1.2	0.796~1.99	125~150		7.5
Fe基非晶态合金	1.5~1.7	1.99~3.19	125~150		19



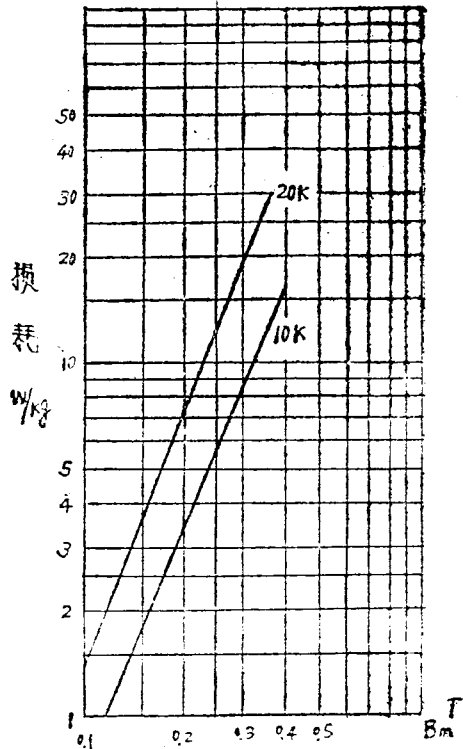
图C4 EC35 磁芯损耗曲线



图C5 EC41磁芯损耗曲线

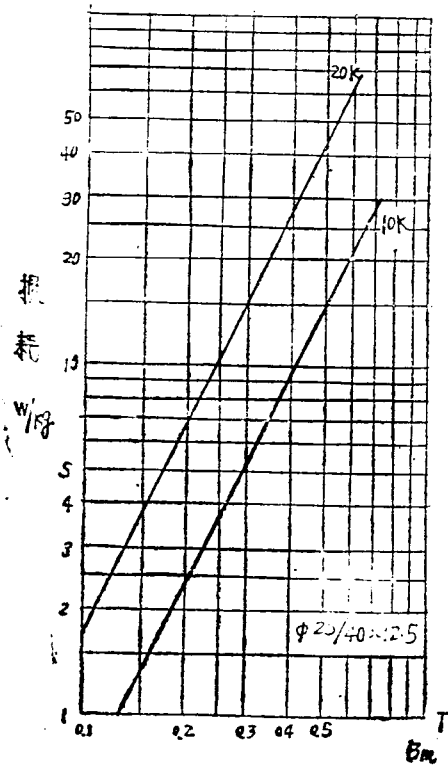


图C6 EC52磁芯损耗曲线

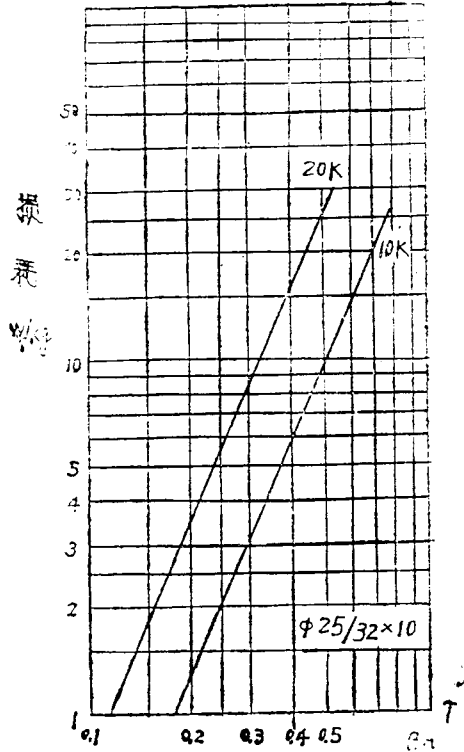


图C7 EC70磁芯损耗曲线

C.2 坡莫合金磁性能



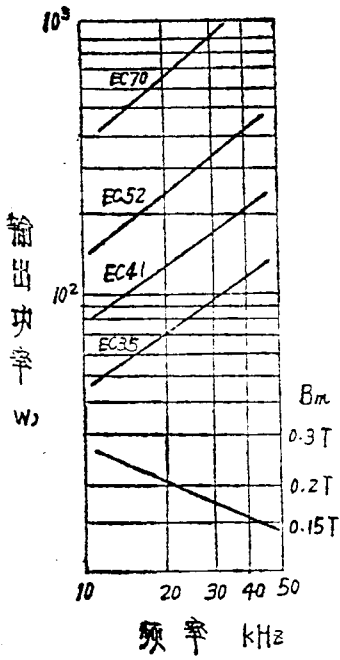
图C8 1J85-1合金损耗曲线



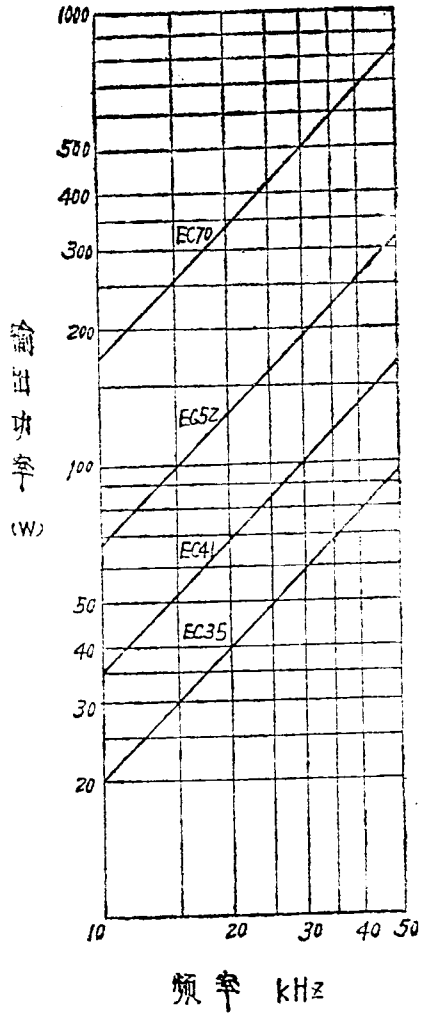
图C9 Co基非晶态合金损耗曲线

附录 D

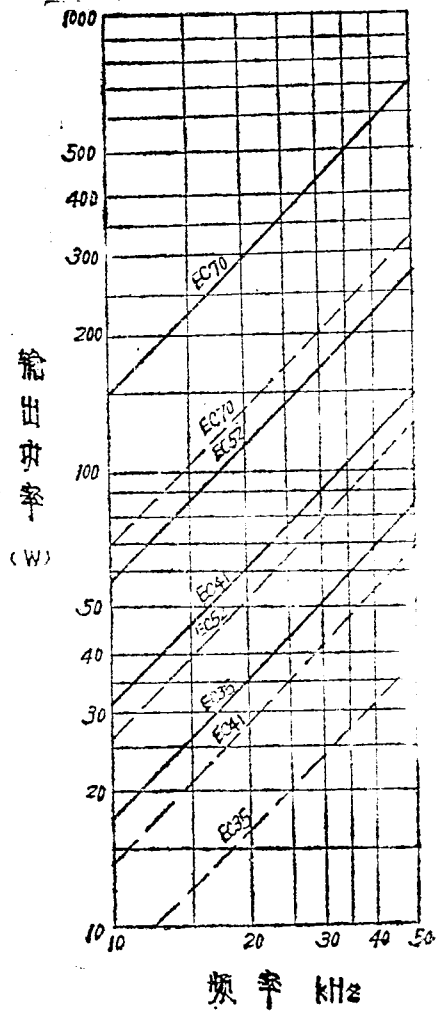
EC型磁芯输出功率和频率关系曲线
(参考件)



图D1 推挽电路开关电源变压器输出功率
工作磁感应强度和频率关系曲线



图D2 单端正激式开关电源变压器
输出功率和频率关系曲线



—— 开关管截止期间能量完全释放
 - - - - 开关管截止期间能量不完全释放

图D3 单端反激式开关电源变压器输出功率和频率关系曲线