

# 抗磁场干扰和磁屏蔽材料

## The magnetic anti-interference and it shielding materials

高适 编译

摘 要：文章介绍了磁场干扰的基本概念和磁场屏蔽设计及其选择屏蔽材料的简要原理，介绍几种常用磁屏蔽材料。

关键词：磁场干扰、磁屏蔽设计、磁屏蔽材料

中图分类号：TM27      文献标识码：A      文章编号：1606-7517（2007）12-07-124

### 1 引言

20世纪后期的近30年来，随着电子技术，尤其是电力电子技术的快速发展，其系统、装备和各种元器件向高频化、数字化、集成化、轻小型化、高功率密度和电子线路向低压化方向发展已逐步成为事实。为此，这种现代化电子设备将不可避免地受到比以前的设备更为严重、复杂的杂散磁场的不良影响，即我们常说的电磁干扰（EMI），于是在产品（包括系统与元器件）设计上就出现了解决电磁兼容性（EMC）问题。在此，一个系统需要满足如下三个原则：1）不对其它系统产生干扰；2）对其它系统的辐射不敏感；3）不对自身产生干扰。EMC系统的基本框图如图1所示。

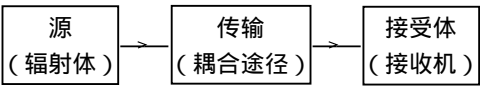


图1 EMC耦合问题的基本分解框图

所以，系统（设备、元器件）防止干扰的三个途径为：1）抑制源的发射；2）尽可能使耦合路径无效；3）使接受体对发射不敏感。磁屏蔽设计是利用后两个原理。

磁场干扰的潜在源头是永久磁铁、电磁铁、载有大电流的电缆、电动机、变压器和其它线圈元件等等。磁场产生的干扰影响可以通过磁屏蔽、磁隔离、转换元件等产生的作用来减至最小或消除。

因为磁场通过导磁材料比它们在空气中或其它媒质材料中更容易被转移，所以，“磁屏蔽”常常用具有高磁导率的磁性材料制作成环状的或密闭的元件来“转移”掉其邻近的磁力线而达到目的。

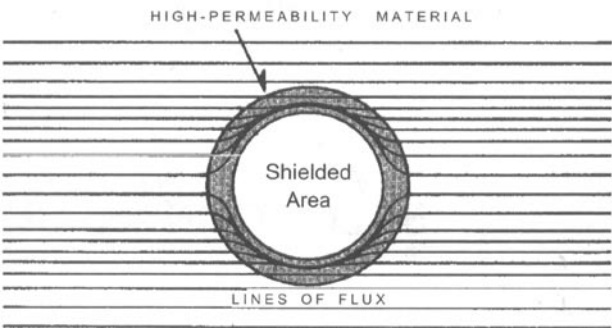


图2 圆柱体内部元件屏蔽示意图

图2所示为怎样使一个圆柱体内部的元件对磁场进行屏蔽保护的示意图。在实际应用中，圆柱体上下部的磁场都是向着屏蔽材料转向的。

在实际设计中,需要进行磁屏蔽的典型元器件有:变压器、电动机、簧片式继电器、电源、放大器、真空管、光电倍增管、磁控管、扩音器、仪表、扬声器、记录磁头、仪器、电缆、晶体管、电波滤波器等。

设备或元器件被屏蔽后的抗电磁干扰效果是根据导致的磁场强度的衰减程度来度量的。在屏蔽前后磁场强度的衰减量或衰减率是材料的磁导率,金属的厚度和屏蔽罩(盒)的几何尺寸的函数。在一般情况下,高磁导率材料是较昂贵的。鉴于这个原因,使用最低磁导率的材料做屏蔽罩而又证明可以达到要求的磁场衰减率就是合适的材料。但由此也可见,用一层或数层较高磁导率的金属做屏蔽罩,将十分可能比用价格较低的低磁导率的、但厚度较厚的材料作屏蔽罩之代价要小一些。

## 2 屏蔽设计

进行屏蔽罩设计时,需要以下一些数据:首先,对其能够衰减多少磁场强度必须测量或估算得出;其次,为了起到良好的屏蔽作用,必须挑选专门的形状,典型的或相对可以预测的几何形状包括长的圆柱体和矩形壳体。当然还有许多其它形状如圆锥体、平板或球体通常都会被采用。由于常用设计程序主要用于圆柱状屏蔽罩的设计,但它被用于其它形状如矩形的屏蔽罩设计时,要用其最长的对角线去替代方程中的直径尺寸“D”。

开始设计屏蔽罩时,必须确定磁通密度之值(单位,高斯),也必须选择屏蔽材料的厚度。因为屏蔽材料的 $\mu$ 与B的分布图是非线性关系,工作在屏蔽罩的磁通密度必须使材料达到其峰值磁导率,例如坡莫合金和Mumetal的磁通量应在3600高斯左右。

屏蔽材料的厚度可以由下式计算确定

$$t=1.25DH/B \text{ (英寸)}$$

式中,B是衰减率(由屏蔽前的磁场强度除屏蔽后的磁场强度得到)。镍含量高的磁性材料之 $\mu$ 值最小应该达到80,000。通过对工作在2500至3500高斯左右磁通水平的材料进行试验,很容易得到这个数值。根据第一个方程式,B值可以计算出来;同时,如果必须使B值变得更合适,则可以修改屏蔽罩的直径。

设计屏蔽罩时包括的一些其它注意事项是:1)对强度很高的磁场可以使用多层材料做的屏蔽罩,最靠近磁

场的那一层应该是能够削弱较大磁通量的合金材料如48合金,Magnesil;第二层应采用高磁导率的材料如坡莫合金。如果有可能,应该允许磁场发射源和最靠近它的那一层屏蔽材料之间的空隙最小( $-1/2$ )。习惯上,多层屏蔽材料的每层之间是以聚脂薄膜树脂层进行分隔的。

2)如果屏蔽罩对磁场发射源或屏蔽目标封闭其杂散磁场不能实现,则常常可以使用平板插入它们之间。如果平板的高度和宽度比发射源和屏蔽目标之间的距离尺寸大得多,则可以实现封闭杂散磁场。

3)用厚度0.006的金属板“封闭”磁场时,一般是用在样机的屏蔽,因为它们可以用手工成形(即使需用多层)。如果屏蔽罩要用机械成形,那么就可以采用较厚的材料进行屏蔽。应该注意的是任何强力的机械作业(如折弯、冲压、氩弧焊接等)都会使材料产生应力,合理的加工方法是在材料加工以后进行退火。

4)一般来说,在低频(-60HZ)状态,屏蔽罩的长度对直径的比率大于3时,将屏蔽材料的厚度从0.014增加到0.050,屏蔽的效果增强;如果该比率低于3,增加厚度至0.025时,则影响磁场衰减的程度较小。

## 3 磁屏蔽材料

上面已经读到,磁屏蔽的效果是根据设备或元器件被屏蔽后所产生的磁场强度的衰减程度来度量的。从磁屏蔽的要求和成本考虑,由spang特种金属公司推介了多种规格的高效磁屏蔽材料供选用,包括Mumetal、坡莫合金80、48镍铁合金、Magnesil等等。

### 3.1 选择磁屏蔽材料的原则

屏蔽材料的磁导率、屏蔽罩的几何形状、材料的厚度等都影响磁屏蔽的效果,所以,磁屏蔽材料的选择,拟掌握以下原则和因素:

1)要使外部磁场得到最大的衰减,要选用高磁导率 $\mu$ 的材料;

2)屏蔽的效果也是屏蔽罩材料壁厚对屏蔽罩直径(在采用矩形屏蔽罩的情况下则为其对角线)的比率( $t/D$ )的函数;

3)如果外部磁场太高,屏蔽材料中的衰减将减小,这是因为外部磁场太高时,屏蔽材料在其中已开始接近于饱和。

3.2 屏蔽材料的退火

经冷轧或机械加工的高磁导率镍铁合金的磁性能将弱化。它们被用作屏蔽材料时，其磁导率和对磁场的衰减明显地受退火温度及其冷却速度的影响。因此，镍铁合金材料屏蔽磁场的效力可以通过改变热处理的一个操作过程来控制。通常，退火温度高一些其磁导率和衰减率也高一些。通过退火可以减小冷加工产生的应力和再结晶成颗粒状结构。

在加热期间，必须使用保护气体以防止损坏材料。最好的保护气体是露点低于40 的干燥氢气，露点越低越好。干燥氢气能从合金中驱除掉碳（C）、氧（O）和硫（S），使材料有光亮、清洁的表面。如果有低露点的惰性气体也可以使用。建议在1120-1175 的温度退火4小时，以得到最佳的初始磁导率和最大的最高磁导率。退火后的零件必须小心处理，任何应力，特别在其超过了屈服点时，都会招致磁性能的损害。

退火的冷却速率对于磁性能的影响也是重要因素。对于每种合金等级，其最佳冷却速率是不同的。

48镍铁合金需以每小时100-200 冷却速率冷却，直到低于425 。坡莫合金80和Mumetal软磁材料对冷却的速率更敏感些。通常情况是在100-300 的温度范围内，要以每小时175-450 的速度冷却。

Spang特种金属公司将在每一批材料的装箱单上推荐具体的热处理方法。

3.3 屏蔽用金属箔

在通常情况下，用金属材料制造屏蔽罩是不现实，不经济或不必要的。可以用薄型金属箔很简单地缠绕包围住受磁场影响的元件来替代屏蔽罩。为了这一目的，Spang特种金属公司提供有箔型坡莫合金80、Mumetal、48镍铁合金和Magesil软磁材料。

通常，用退火消除了应力的金属箔已呈现出足够的屏蔽效力。如果要求其具有最佳磁性能，则接着要做的工作就是热处理。为适合做成被屏蔽元器外形的屏蔽物，所提供的金属箔是很容易切割，机械加工或手工成型的。

3.4 试验屏蔽效力

a. 大规格材料（ 0.014 ）

ASTM技术标准346-64《磁屏蔽试验的标准方法》，

包括了标准的屏蔽试验程序。通常，这种试验是采用制作的或成型的屏蔽罩。简言之，其试验装置由两个直径为4英尺的Helmholts线圈组成，它们以等于线圈半径的距离同轴地分开放置。此线圈用第14 # 漆色线制成48匝以串联连接成圆柱状。

耦合线圈绕制成面积为50,000平方厘米的环形，其包含了连接地线的铜质或铝质非磁性薄片。耦合线圈直径小于试验样品线圈直径的一半并小于Helmholtz线圈半径的1/10。

为了获得最高精度，大多试验在60HZ情况下进行。伏特表被用来测量屏蔽物放入前后的耦合线圈上产生的电压。衰减量“g”直接读出， $g=E_1/E_2$ ，其中E1是屏蔽物不在其位置上时测得的电压值；E2是屏蔽物放在合适的位置上时测得的电压值。

屏蔽试验应在杂散磁场最小的地方进行，而且与试验电压比较，杂散耦合应很小（至少为1 100）。真空管电压表应与发生磁场的装置如示波器等隔离。屏蔽试验只要提供磁性材料——金属平板工作台、手推车、工具等，且不应该放置在试验线圈附近。

屏蔽罩应在试验之前与每次试验之间去磁，即消除屏蔽罩中剩余的磁场。因为所有高磁导率材料都是力敏材料，所以在处理屏蔽罩时必须进行练习。

在试验期间，屏蔽罩应完全保持在相同的磁场之内。来自凸出部分的磁场将会导致错误的结果。

b. 轻规格材料（ 0.007 ）

轻规格材料用于屏蔽的磁特性是由试验环状叠片的磁导率检验的。磁导率数据可以供给以上的要求。

3.5 性能汇总表

a. 物理性能

	Mumetal®	坡莫合金80	48合金	Magesil®
密度：g/cm³	8.60	8.74	8.20	7.65
1b/in³	0.305	0.316	0.294	0.276
电阻率：microhm	55	58	48	48
ohms/cirmilft	331	349	290	289
比热：Cal/g/	0.105	0.12	0.12	0.12
热膨胀系数：in/in/(-70 - +200 )	12.5 × 10 <sup>-6</sup>	12.0 × 10 <sup>-6</sup>	5.8 × 10 <sup>-6</sup>	12.0 × 10 <sup>-6</sup>
居里温度：	400 752°F	450 842°F	500 932°F	732 1350°F

## b. 典型的交流磁性能

下列镍铁合金材料的交流磁性能是典型值，是经过合适的热处理获得的。

材料名称	厚度		磁导率 (在40高斯、60HZ)
	(in)	(mm)	
坡莫合金80	0.014	0.020	0.025
	0.35	0.51	0.64
	50,000	30,000	30,000
48合金	0.014	0.020	0.025
	0.35	0.51	0.64
	11,500	8,000	8,000

## c. 典型的直流磁性能

以下直流磁性能指标同样是经过合适的退火得到的。

材料名称	初始磁 导率 (B=40)	磁导率 (B=200)	最大 磁导率	磁感应强 度 ( $\mu$ max)	饱和磁 感应强度	矫顽力HC
坡莫合金80, 厚0.014	80,000	110,000	250,000	3,600	7,500	1008-.02
Mumetal®, 厚0.020	50,000	75,000	130,000	3,600	8,000	1008-.02
48合金, 厚0.014	11,500	19,000	100,000	5,000	14,000	0.05-0.15
Magnesil®, 厚0.007	300	1,100	7,000	8,000	16,500	0.4-0.6

## d. 典型的机械性能

这些性能将影响深拉质量和弯曲/成型等级。

	坡莫合金80	48合金
抗张强度, psi	90,000	85,000
延伸率 %in2	40	25
硬度RB	68-78	65-75

## e. 标称化学成份

材料名称	成份
坡莫合金80	镍 80% 钼 4.4% 铁 平衡量
48合金	镍 48% 铁 平衡量
Mumetal®	镍 77% 铁、铬、铜添加物
Magnesil®	硅 3% 铁 平衡量

## 4 几种常用磁屏蔽材料介绍

## 4.1 48镍铁合金

48镍铁合金是采用真空冶炼的具有高磁导率，高磁感应强度，低损耗的含48%镍的镍铁合金软磁材料。在诸如音频变压器、仪表变压器、仪表继电器和其它多种电子设备的器件设计中要求采用高效磁性材料时，48镍铁合金是理想的软磁材料。48合金用于电动机的转子和定子叠片具有极佳的性能，用于磁屏蔽也有很好的效力。

48合金制作成变压器的叠片磁心或带绕磁心，在被用于直流状态或1600HZ及以下频率时，通常轧制成0.004英寸(0.1mm)或略厚一些的板材或带材。对于有特殊使用要求如用于2000KHZ以上频率时，48合金将制作成0.0005英寸

(0.01mm)厚度的极薄材料。

48合金具有高于500高斯的相对稳定的磁导率，这一性能指标可以通过低温(1300°F-1400°F, 700-750)退火获得。

## 4.1.1 48镍铁合金是优质软磁材料

48合金是在严格控制下采用真空冶炼技术并经成批热处理生产的，故保证了产品性能的一致性和可重复性。技术成熟的窄带成型机、氢气退火炉等成套设备与技术推进了48合金材料的发展。48合金可以用于多种有特殊性能要求的磁性器件中。

48合金的高质量指标保证它通过了MIL—1—45208质量标准的检验。Spang com公司为优化产品的性能和最终取得优质产品，结合其30多年以来生产高磁导率磁性材料的经验开发出了48合金。

48合金满足并超过了ASTMAT53—85 型合金的所有指标要求，与MIL—N—14411C合成材料同样优良。

## 4.1.2 48镍铁合金的现有类型、规格、性能

为了应用的需要，48镍铁合金被加工成如下三种应用类型：

a. 用作电感磁心：用于带绕电感磁心，制作高级的带绕磁心和变压器叠片磁心；这类48合金保留了优良的特性。

b. 用于电机的转子、定子，属于非定向型材料。这是一类特殊要求的磁性材料。

c. 用于磁屏蔽的材料：为了形成磁屏蔽结构，需要对

材料进行拉伸、成型和弯曲等深加工操作处理。

d．现有材料尺寸和规格

现有材料尺寸				货源规格	
厚度		宽度		厚度	
英寸	mm	英寸	cm	英寸	mm
0.0005, 0.001	0.01, 0.025	8	20	/	/
0.002, 0.004, 0.006	0.051, 0.101, 0.152	1/4-16	0.635-40	0.004	0.101
0.014	0.36	1/2-16	1.3-40	0.014, 0.020, 0.025, 0.030, 0.062	0.36, 0.51, 0.64, 0.76, 1.57

e．典型的磁性能（1）

类别	厚度		典型磁导率60HZ ( ASTM A-34 ) ( 2 )			恒电流磁通转换 ( 400HZ ) ( 3 )			
	英寸	mm	B40	B200	B2000	BM ( 高斯 )	BM-BR ( 高斯 )	H1 ( 奥 )	H ( 奥 )
用于电感 磁心	0.001	0.025	—	—	—	14500	700	0.22	0.024
	0.002	0.05	—	—	—	14500	700	0.24	0.034
	0.004	0.10	—	—	—	14500	700	0.26	0.035
用于电机 转子、定子	0.006	0.15	7500	12000	32000	—	—	—	—
	0.014	0.36	6500	11000	28000	—	—	—	—

注：（1）为适合的退火后的磁性能；（2）环状叠片磁心；  
（3）1.25 （外径）×1 （内径）×0.25 （高度）环形磁心

f．热处理

为了获得所要求的磁性能和电性能，用48镍铁合金制造元件需要在保护气体的氛围中进行退火，最佳的气体是游离氧气，具有-40 以下露点的干燥氢气。建议在2050°F-2150°F（1120 -1175 ）的温度下进行2-4小时的退火处理，并以每小时180°F-360°F（100 -200 ）的速度随炉冷却，直到800°F（427 ）取出。

g．48镍铁合金的物理特性

比重 (g/cm³) 8.2  
密度 (lb/in³) 0.294  
电阻率 ohm/cir mil-ft 290  
microhm-cm 48  
电阻温度系数 /°F ( 0-930°F ) 0.002  
/ ( -20-500 ) 0.0036  
比热 0.12  
热导率 BTU/in/ft²/hr/°F 90  
cal/cm³/sec/ 0.03  
居里温度 932°F ( 500 )  
熔点 2600°F ( 1427 )

h．典型的机械性能

	冷轧	退火
抗张强度：ksi	130	85
kg/mm²	91	60
延伸率%，in2	5	25
弹性模量，张力：		
Psi × 106	24.0	24.0
Kg/cm²	1.7	1.7
硬度，R <sub>B</sub>	100	68

i．标称化学成份

镍 48%  
炭 0.02%  
锰 0.25%  
硫 0.001%  
铁 平衡量

j．用于电感磁心的48镍铁合金矩形回线磁心材料

与应用于电机转子、定子和磁屏蔽的48镍铁合金材料

比较，这种经特殊加工过的电感磁心材料呈现出更高的磁导率，提高了矩形比，有不平常的饱和磁通密度和更小的磁心损耗。其成熟的产品有7.5-8英寸宽的0.0005，0.001，0.002和0.004英寸厚度的材料。

人们发现，用于电感磁心的48合金材料可用来制作电流互感器，脉冲变压器及诸如非接触式电磁抗器等很多特种器件领域。

这类材料具有高于标准变压器钢（3%硅钢）的许多实质性优点，完全保持了80%镍铁合金高级材料的成本优势。事实上，电感磁心的性能指标可以做出一些轻微让步。与80%镍合金磁心比较，因电感磁心用的48合金有较高的磁通密度，故其尺寸减小了1/2。这种材料可以使用于有更高性能要求的元器件中。

4.2 Mumetal—软磁合金

Mumetal是有着很高磁导率的软磁合金，其组成成份包括76%的镍以及铬、铁和铜等添加物。这种合金材料满足ANSI/ASTM A753—85 3#合成材料和AMS7701，MIL spec MIL-N-14411C 2#合成材料等技术规范的要求。

4.2.1 Mumetal的应用领域

典型的应用如下：

a．磁屏蔽

b. 变压器磁心叠片

c. 继电器

d. 滤波器

#### 4.2.2 典型的性能

a. 直流磁性能 (经过用推荐的方法退火以后)

饱和磁通密度 8000高斯

1奥施特的矫顽力 0.01奥斯特

40高斯时的磁导率 8000

最大磁导率 >250000

居里温度 400

b. 物理性能

密度  $8.6\text{g/cm}^3$

$0.305\text{lb/in}^3$

电阻率 55 microhm cm

331 ohm circ mil/ft

热膨胀系数 (20 -100 )  $12.5 \times 10^{-6}/$

热导率  $0.34\text{W/cm/}$

c. 机械性能

冷轧 弯曲成型 (回火) 完全退火

抗张强度 (K.S.I) 130 85 75

延伸率 (% in2 ) 2 30 40

硬度RB 100 74 55

e. 承诺的性能

经正确的退火后,在100高斯磁通密度,直流状态下试验时,用于屏蔽规格之材料的最小直流磁导率是70000。

#### 4.2.3 热处理

Mumetal的磁性能是确定的退火状态的函数。因此,在产品制成之后,为了得到最佳磁性能,元件必须经过热处理。在纯净干燥氢气氛围中(其露点<-40),以1100 -1180 的温度退火4小时,之后建议在700-300 温度范围内以3-5 /分的速率冷却,此时,所得到的磁性能是最好的。

#### 4.3 坡莫合金80

坡莫合金80是镍铁的合金,它呈现很高的初始的和最大的磁导率,以及在低磁场强度下最小的磁心损耗。这种用真空冶炼的产品在应用于以下列举的磁心和屏蔽材料时,也具有尺寸小和重量轻等优点。坡莫合金80符合ASTM A753-85 4#合金和MIL-N14411C 1#合金的指标。

#### 4.3.1 坡莫合金80的应用领域

坡莫合金80在呈现低矫顽力的情况下,存在初始的和最大的磁导率、低磁滞损耗、低涡流损耗和低磁致伸缩。以下所列的这种材料的典型应用:变压器叠层磁心、滤波器、继电器、录音(像)磁头,偏转线圈和聚焦线圈磁轭、磁放大器、扬声器、磁屏蔽。

#### 4.3.2 为什么说坡莫合金80是优质材料

a. 真空感应冶炼技术保证了成批量产品的纯度和可重复性。材料的特性可以被还原并得到保证。

b. 来自多年生产高级磁性合金的经验与技术窍门被应用于生产最优性能的坡莫合金80。

c. 从原材料到最终产品,spang公司在其生产全过程中的每一步骤都稳定地控制着质量。这项唯一的源职责保证了优质的终端产品。

#### 4.3.3 坡莫合金80的性能

a. 磁性能

典型的直流磁性能		最小磁导率 (B=40高斯@60HZ)	
		厚度	$\mu$
饱和磁通密度	7,500高斯		
矫顽力 (H=1奥斯特)	0.015奥斯特	0.001	50,000
剩余磁感应强度	3,700高斯	0.002	55,000
饱和磁滞损耗	9尔格/ $\text{cm}^3/\text{cycle}$	0.004	65,000
磁导率 (B=100)	75,000	0.006	55,000
最大磁导率	30,000	0.014	50,000
以上为合适的退火后的性能指标		所有样品为环状叠片	

b. 物理性能

密度  $\text{g/cm}^3$  8.74

$\text{lb/in}^3$  0.316

电阻率 ohm/cir mil-ft 349

microhm-cm 58

比热 cal/g/ 0.12

热导率 BTU/in/ft<sup>2</sup>/hr/°F 136

cal/ $\text{cm}^3/\text{sec/}$  0.047

热膨胀系数 in/in/  $12.0 \times 10^{-6}$

(-70 -+200 )

居里温度 450

845°F

c . 典型的化学成分

镍	80%
钼	4.4%
硅	0.3%
锰	0.5%
铁	平衡量

d . 典型的机械性能

	冷轧	工厂退火	为保证磁性能的退火
抗张强度	150ksi	90ksi	80ksi
屈服强度	135ksi	35ksi	30ksi
延伸率%in2	2	40	40
强度	32R <sub>C</sub>	70R <sub>B</sub>	55R <sub>B</sub>

e . 为保证磁性能的退火处理条件

坡莫合金80经退火冷却后的最终磁性能是退火温度和冷却速率的函数。材料在纯净干燥的氢气氛围中于1120 -1160 的温度范围加热4小时，然后在700 -300 的温度范围内以每分钟3 -7 的温度冷却。在这种退火条件下，坡莫合金80所得到的磁性能是最好的。

参考文献(略)

( 上接P123 )

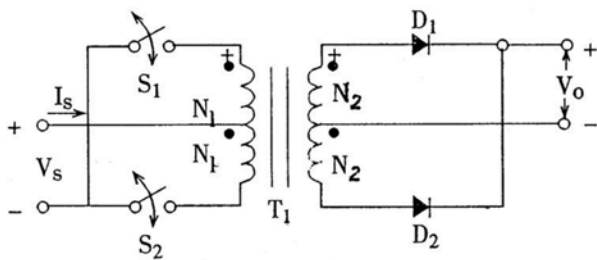


图 6 推挽变换器套原理图

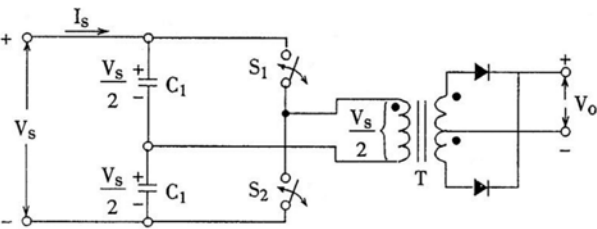


图 7 半桥变换器原理图

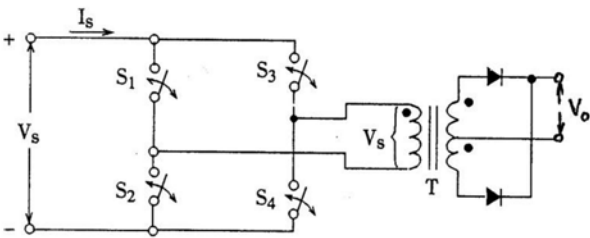


图 8 全桥变换器原理图