

AN-18应用指南

TOPSwitch®

反激式变压器结构设计指南



介绍

本应用指南对TOPSwitch应用当中使用挡墙结构和三层绝缘线结构的反激式变压器设计加以说明。附录B中介绍了宽电压输入、12 V输出、输出功率为15 W的次级稳压电源，使用了挡墙结构和三层绝缘线结构的变压器设计，该设计依照应用指南AN-16中所述的设计流程。我们假定读者已经熟悉TOPSwitch以及基本的反激式电源理论。在TOPSwitch数据手册、应用指南AN-14和AN-16中可以得到这方面的信息。更多详细的反激式变压器理论及设计可参考AN-17。

所需要的参考资料

此应用指南、AN-16以及AN-17提供了TOPSwitch应用当中反激变压器设计和构造方面的必要技术。除此之外，还需要如下参考资料以了解磁芯、骨架、线材的尺寸及电气方面的数据。这些参考资料的来源如附录A中所列。

铁氧体磁芯生产商的产品目录

铁氧体磁芯生产商发布的产品目录提供了变压器设计中所用磁芯的尺寸及电气特性参数。一些生产商对特别常用的磁芯还同时提供其它的一些工程上的磁芯信息，比如 A_L 与气隙的关系曲线以及磁芯损耗曲线。附录A中所列的生产商产品目录提供了美国、亚洲及欧洲常用磁芯的基本电特性数据。对于各生产商都生产的尺寸相同的磁芯，某个生产商给出的电特性数据，只要磁芯尺寸相同就可以应用在另一个生产商生产的磁芯上。

骨架生产商的产品目录

骨架生产商的产品目录用于得到变压器设计的机械尺寸。附录A中的骨架生产商给出了各样适合标准铁氧体磁芯尺寸的骨架类型，并且从原料角度来看非常适合大批量生产。很多铁氧体磁芯生产商同时也生产适合其标准磁芯尺寸的骨架。

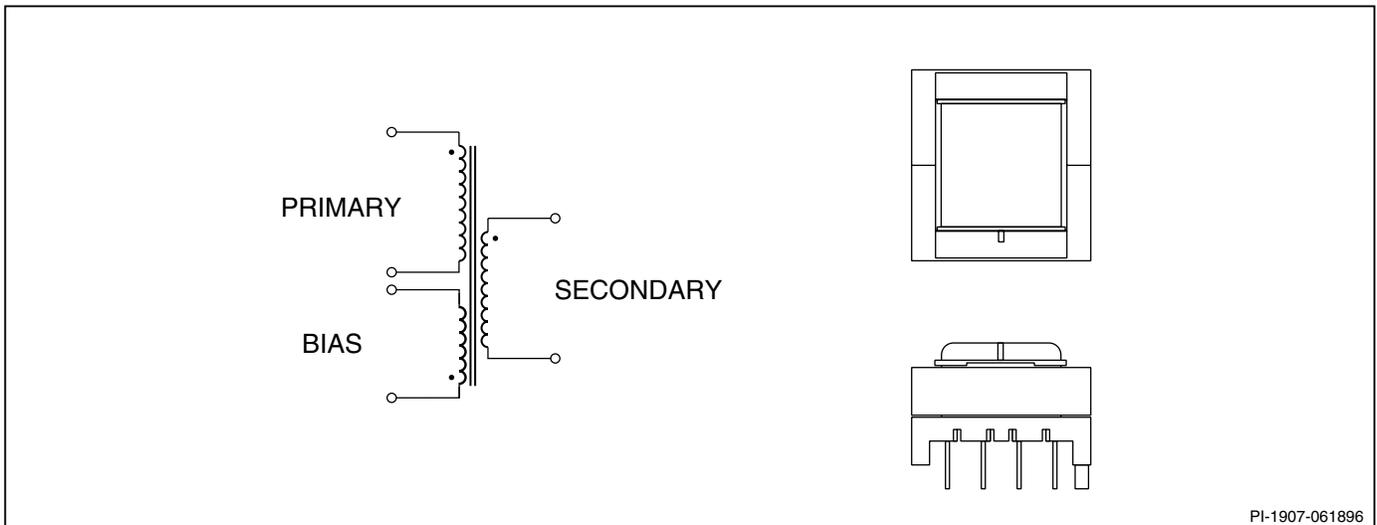


图 1. 使用EE磁芯的典型反激式变压器

线材表

线材表提供了漆包线的尺寸及电气特性，用于选择变压器设计中使用线材的适当规格。有三种主要的线材规格系统：AWG、SWG以及公制。在本应用指南中使用的线材规格为AWG系统。附录A中的线材表格提供了AWG系统中规格为18号至44号线材的数据。同时表中也列出了SWG和公制系统中与AWG系统相对应的线材规格。参考书目5中也有相关的线材表介绍。线材表可以从附录A中所列的漆包线生产商处得到。

变压器制作所需的材料

如下段落描述了制作开关电源变压器时所需的基本材料。

铁氧体磁芯

适合于100 KHz反激式变压器的铁氧体磁芯包括TDK的PC40、Philips的3C85、Siemens的N67、Thomson的B2、Tokin的2500或其它类似的材料。可以采用各种形状的磁芯。变压器的磁芯最好使用E型磁芯，因其成本低、易于得到而且漏感较低。也可采用其它形状和类型的磁芯，比如ETD、EER及EI型。与各种功率水平相适应的铁氧体磁芯类型及变压器结构类型如附录A中的图表所示。

骨架

离线式反激变压器的骨架应根据适用的安全规范所要求的爬电距离来选择。需要特别考虑的地方是从初级引脚经过磁芯至次级引脚之间的总的爬电距离，以及从初级引脚至次级绕组绕线区域之间的总的爬电距离。对某些类型的骨架，需要增加额外的绝缘以满足爬电距离的要求。骨架最好由热硬化性的材料制成，比如酚醛树脂，从而可以承受焊接温度而不变形。聚丁烯或聚乙烯对酞酸盐(PBT、PET)以及聚亚苯基硫化物(PPS)也是可以使用的材料，尽管与酚醛树脂相比它们对高温更加敏感。尽量避免使用尼龙材料，因为在将绕组引线端接至变压器骨架上的引脚时，很高的焊接温度会使骨架熔化。如果使用尼龙材料的骨架，骨架制造时要使用温度额定为130°C的玻璃状加固树脂。

绝缘材料

变压器中常用的绝缘材料为聚酯或Mylar，加工成片状或带状。生产时制作成具有粘性的胶带，方便制作变压器时使用。生产胶带的美国生产商包括3M、Tesa以及CHR。对于变压器当中的爬电间距，最好使用较厚的胶带来绕制，这样层数可以相对减少。有些生产商生产适合此用途的聚酯薄膜胶带。

漆包线

漆包线的主要美国制造商有Belden、Phelps Dodge以及Rea。漆包线的首选绝缘为尼龙或聚氨酯涂层。该涂层在接触到熔化的焊料时会烧掉脱落，可以采用将变压器浸入焊料罐中镀锡的方法将绕组引线端接至变压器引脚。几乎所有的制造商都提供此类绝缘漆包线，品牌有：Solderon、Nyleze、Beldsol等。绝缘涂层应该是“加强型”或“双层”，这样才能更好地承受手工绕线过程中的应力。不要使用普通磁漆或聚酰亚胺线绝缘，因为在将绕组引线连接至变压器引脚时，必须将这些类型的绝缘层以机械的方式剥离或通过化学剥离剂剥离。

三层绝缘线

可以使用三层绝缘线来简化并降低有安全隔离要求的变压器尺寸。变压器制作中使用的三层绝缘线由一条实心的线芯及三个独立分开的绝缘层组成。附录A中列出了三个三层绝缘线的制造商。

套管

绝缘套管用于将挡墙结构变压器中绕组的起始端和结束端引线进行绝缘。套管要经过相应的安规机构验证，其最小厚度为0.4 mm，以满足加强绝缘的厚度要求。同时套管必须是防热的，在变压器引线焊接至骨架引脚所要求的温度下，套管不能熔化。常用的套管材料包括特富龙套管或者聚烯烃热缩套管。

浸漆

很多变压器制造商将其成品变压器浸渍在合适的清漆中。清漆填充变压器内部的空隙，可以改善变压器绕组至周围环境的热量传递，并增加变压器绝缘的电压绝缘强度。同时，浸漆还可以将磁芯和绕组予以固定，从而降低音频噪音，并且使变压器成品免受潮气的侵袭。变压器浸漆的缺点是在变压器生产过程中增加了额外一道耗时的工序。附录A中列出了一些变压器清漆的制造厂商。

变压器制作方法

为了满足国际安全标准，用于离线式电源的变压器在初级和次级绕组之间必须保证足够的绝缘。对于采用标准磁芯和骨架的变压器，有两种基本的变压器绝缘方法：挡墙绕制结构和三层绝缘线结构。

挡墙绕制结构

国际安全规范对于使用漆包线的变压器有如下的要求：

- 初级和次级绕组之间要保证加强绝缘；
- 初级和没有加强绝缘的次级绕组之间要保证足够的爬电距离；

满足如上要求的典型挡墙绕制结构变压器的横截面如图2所示。

对于安全规范要求的初级和次级绕组间的爬电距离，对应115 VAC交流输入的电源一般为2.5至3 mm，230 VAC或通用输入电压范围的电源则为5至6 mm。此爬电距离由称为挡墙的实体障碍物来保证。在很多实际的变压器设计当中，使用胶带绕制在骨架的两端作为挡墙，绕组绕制在挡墙之间，如图2所示。初级和次级绕组间的最小爬电距离等于挡墙宽度M的两倍，如图3所示。因此，最小的挡墙宽度为所要求的爬电距离的一半，对应115 VAC输入时为1.25至1.5 mm，对应230 VAC或通用输入电压范围则为2.5至3 mm。

初级和次级绕组所需的加强绝缘是利用三层电气胶带来实现的。任意两层胶带都可以承受安规要求的测试电压，对应115 VAC输入该测试电压为2000 VRMS，对

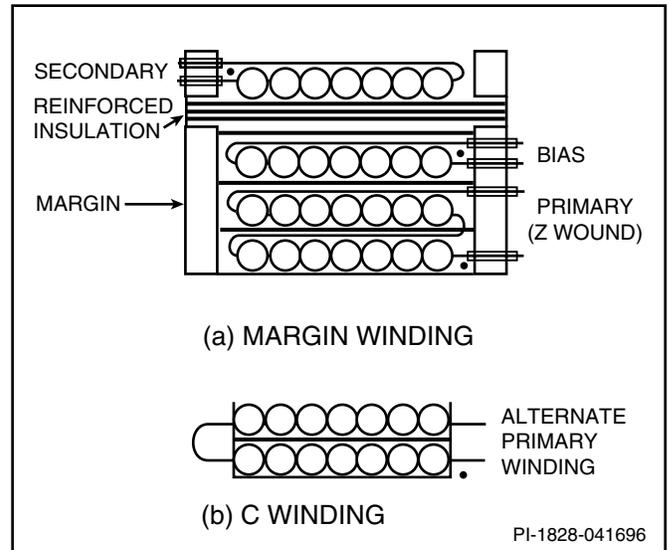


图 2. 挡墙绕制变压器的横截面

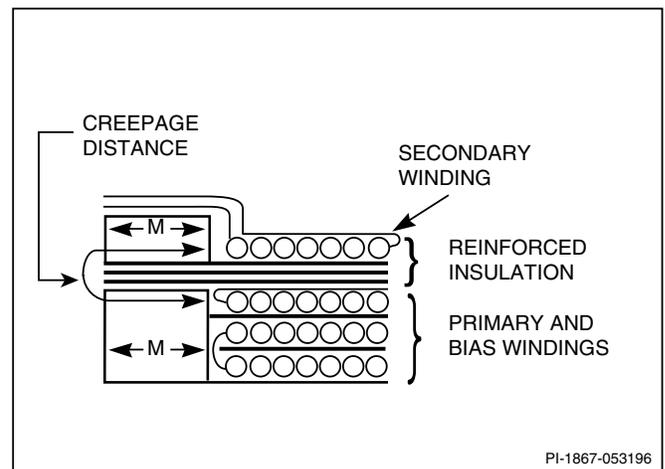


图 3. 挡墙绕制变压器的绕组间爬电距离

应230 VAC输入电压该测试电压为3000 VRMS。如图2所示，每层胶带要覆盖从骨架的一侧边缘至另一侧边缘的整个骨架宽度。在此类应用中使用的聚酯薄膜胶带的厚度要至少为0.025 mm。次级绕组被挡墙和加强绝缘有效地“封在盒子里”，与初级绕组相隔离。由于每个绕组的进出引线都穿过挡墙而连接至变压器引脚，因此要对其进行额外的绝缘处理，以保证挡墙绝缘的完整性。在挡墙绕制结构变压器的进出引线上使用壁厚至少为0.4 mm的绝缘套管可以满足以上要求。如图4所示，该绝缘要从变压器的引脚延伸至挡墙障碍的内部。

采用挡墙绕组技术允许使用普通的漆包线及容易得到的绝缘材料来制作变压器。然而，挡墙的使用、进出线所需的套管及加强绝缘的使用也会增加变压器设计的复杂程度，以及相应的工作强度。挡墙也浪费了变压器内部的空间，相对于无挡墙的变压器而言，要使用更大的磁芯和骨架。另一种替代挡墙绕制结构变压器的方法是采用三层绝缘线来制作变压器。

三层绝缘线结构

三层绝缘线（见图5）具有三层独立的绝缘层，任意两层都可以承受安规要求的3000 VRMS的耐压测试电压。三层绝缘线因而可以满足VDE/IEC规范中关于加强绝缘的要求，可用于变压器的制作，而不需要象传统漆包线设计一样要考虑爬电间距。三层绝缘线变压器设计的横截面如图6所示。三层绝缘线设计当中，初级和偏置绕组仍然使用漆包线，而次级采用三层绝缘线绕制。一般来讲，这样做可以使成本最低，空间利用率最高，同时也利用了三层绝缘线的优点。因为三层绝缘线的直径

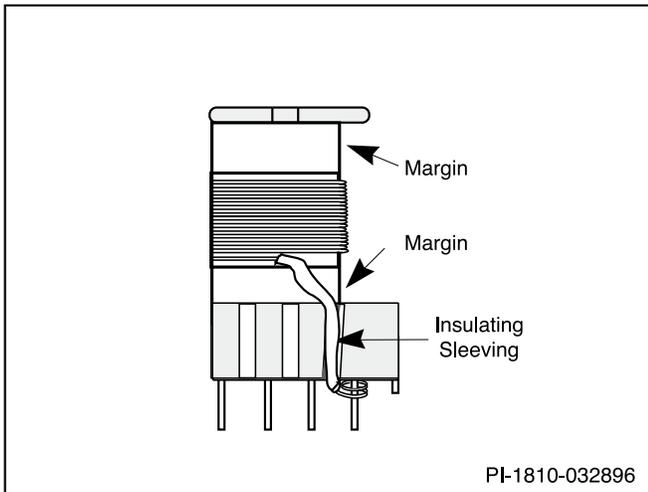


图 4. 使用绝缘套管

较粗，与同等尺寸的漆包线相比其价格较贵。次级绕组与初级绕组相比，通常其圈数较少，线径较粗，因此三层绝缘线成本及空间的影响比较小。在三层绝缘线的设计中，由于三层绝缘线具有的加强绝缘，变压器骨架的整个宽度都被完全利用。一般来讲，同等功率能力的变压器，采用三层绝缘线结构的变压器与采用漆包线的变压器相比，其大小为漆包线结构变压器的1/2至2/3。漏感的变化与变压器绕组的宽度成反比，因此，三层绝缘线绕制的变压器的漏感通常低于同等用漆包线绕制的变压器。因为其更有效地利用了变压器骨架的空间。

变压器结构技术

图7所示为适用于初级和次级稳压反激电源应用的四种变压器结构，分别采用了挡墙绕制和三层绝缘线绕制技术。这四种变压器结构足以满足所有开关电源的使用要求。下面的内容将对某一应用中如何选择变压器的结构及所应考量的因素加以讨论。同时，也会考量如何降低EMI、分布电容及如何降低漏感。

绕组顺序

图7所示为使用挡墙绕制和三层绝缘线绕制结构、应用于初级和次级稳压方案的最佳变压器绕组顺序。下面将讨论影响最佳绕组顺序及绝缘材料位置的因素。

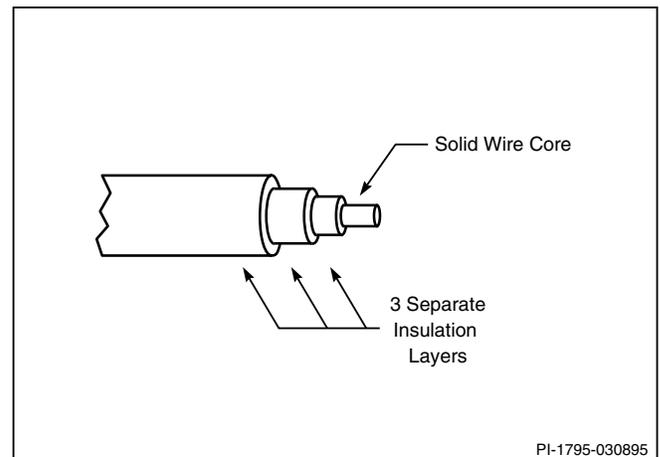


图 5. 三层绝缘线

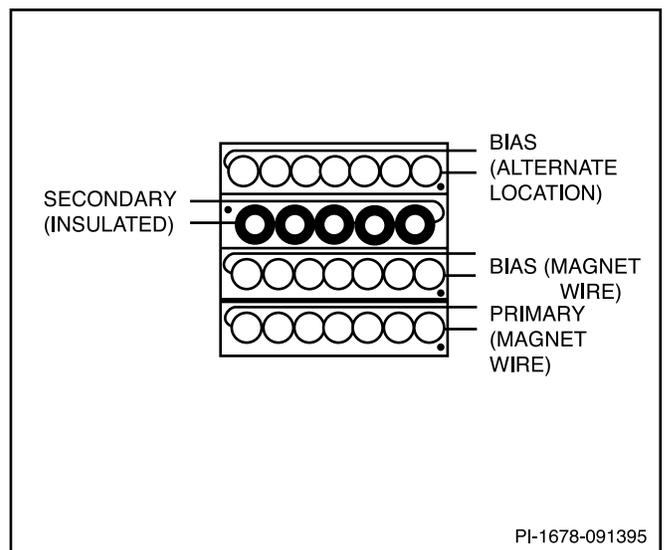


图 6. 三层绝缘线绕制的变压器横截面

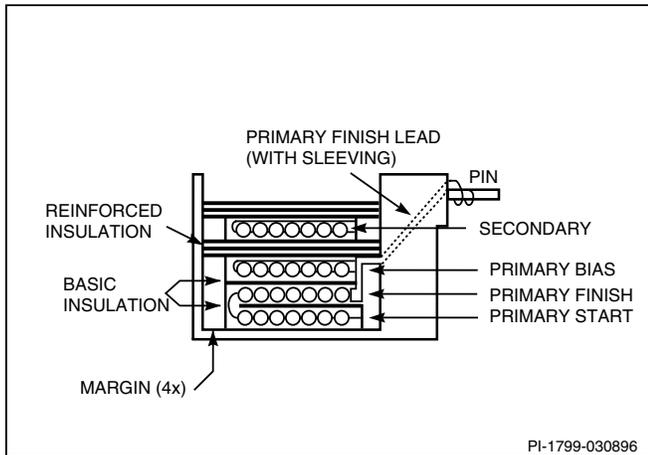


图 7A. 用于次级稳压的挡墙绕制变压器

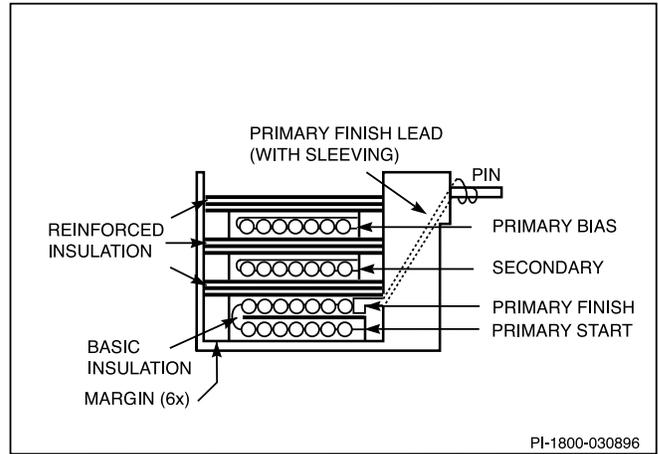


图 7B. 用于初级稳压的挡墙绕制变压器

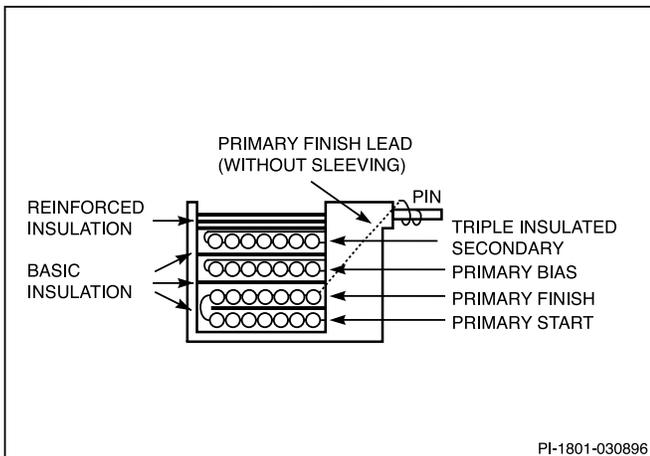


图 7C. 用于次级稳压的三层绝缘线绕制变压器

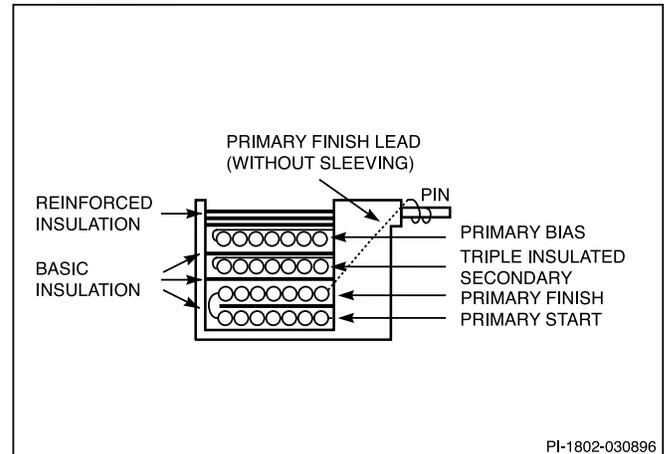


图 7D. 用于初级稳压的三层绝缘线绕制变压器

初级绕组

图7所述的所有的变压器结构类型当中，初级绕组（或初级绕组的一部分）都作为第一个或靠近骨架最里面的绕组。这样可以保证每圈用线的平均长度尽可能短，降低了初级绕组的寄生电容。同时，如果初级绕组作为变压器最里面的绕组，它可以被变压器中其它的绕组屏蔽，从而可以降低初级绕组与其它邻近元件的噪声耦合。绕组的起始端应为初级绕组的驱动端（连接至TOPSwitch漏极的一端）。这样可以保证具有最大电压漂移的一半初级绕组被其它绕组或另一半初级绕组所屏蔽，从而降低变压器初级侧与电源中其它部件之间的EMI耦合。初级绕组采用两层或更低的层数绕制。这样可以减小初级绕组的电容并降低变压器的漏感。在初级绕组的层间增加一层胶带可以将初级绕组电容减小四倍。这一点对于

于使用TOP200和TOP210的低功率应用尤其重要。它可以防止在TOPSwitch开通时变压器绕组电容放电而产生的初始电流尖峰误触发TOPSwitch的限流点。

初级偏置绕组

电源采用初级侧稳压方式还是次级侧的稳压方式决定了初级偏置绕组的最佳位置。如果电源采用次级侧的稳压方式，偏置绕组应位于初级绕组和次级绕组之间，如图7A和7C所示。当偏置绕组位于初级和次级之间时，它相当于一个连接至初级返回端的EMI屏蔽层，降低了电源产生的传导EMI。在使用次级稳压方式且采用挡墙绕制结构变压器的设计当中，将初级偏置绕组放置在初级和次级之间同时可以减少变压器中挡墙和加强绝缘材料的使用。

对于使用初级稳压方式的电源设计，偏置绕组应该作为变压器中最外面的绕组，如图7B和7D所示。这样可以使初级偏置绕组和次级绕组最大限度地耦合，并降低偏置绕组和初级之间的耦合，从而改善电源的输出稳压精度。通过与次级较好的耦合，偏置绕组可以对输出电压的变化做出更精确的反应，进而改善稳压精度。同时，由此产生的偏置绕组和初级之间较差的耦合，降低了初级漏感尖峰对降低对偏置绕组的峰值充电，从而改善稳压精度。如果偏置绕组仅与初级之间进行松散的耦合，可以利用与初级偏置绕组输出相串联的一个小电阻对漏感尖峰进行滤波，改善电源的负载调整率。详情请参见设计指南DN-8中的描述。

初级偏置绕组应完全占满一整层的骨架。如果偏置绕组的圈数比较少，可以适当增加偏置绕组绕线的尺寸，或者使用多股并联的绕线方式。利用此方法来提高偏置绕组的填充系数可以在次级稳压方式的电源当中改善绕组的屏蔽作用，而在初级稳压方式的电源当中可以提高次级绕组和偏置绕组之间的耦合。

次级绕组

如果变压器有多个次级绕组，为了减低漏感，功率最高的次级绕组应离变压器的初级绕组最近。若某个次级绕组的圈数较少，则该绕组要横跨绕线区域的整个宽度，以便改善耦合。使用多股并联的绕线方法可以提高填充系数，改善圈数较少的次级绕组的耦合。对于有多个次级输出、采用次级稳压方式的电源，具有较严格输出稳压精度要求的辅助输出应直接叠加在有稳压反馈的次级绕组之上，以改善耦合。

多路输出的绕组技术

在多路输出的电源设计当中，每个输出不要采用单独的绕组。对于具有相同返回端及同极性的多个输出的次级绕组，常用的技术为如图8所示的绕组叠加的方法。这样的设计可以改善多路输出电源中辅助输出的负载调整率，并降低次级绕组的总圈数。输出电压最低的绕组给其它较高电压的输出提供返回端，同时也作为较高电压输出绕组的一部分。输出电压最低的输出和输出电压较高的输出共同决定了两路输出的总的绕组圈数。对于图8中所示的两路叠加绕组的例子，输出电压 V_1 和 V_2 的关系如下式所示：

$$V_2 = \left((V_1 + V_{D1}) \times \left(\frac{N_1 + N_2}{N_1} \right) \right) - V_{D2}$$

V_{D1} 和 V_{D2} 分别为整流管 D_1 和 D_2 的正向电压降。 N_1 和 N_2 为 V_1 和 V_2 输出的绕组圈数。

在选择每个绕组的线径时，必须保证其能够承受该输出的电流加上叠加在它上面的其它所有输出的电流总和。

绝缘要求

图7中，除了表示最佳绕组顺序以外，还显示了满足安全要求的基本绝缘和加强绝缘的位置，进而可以提高成品变压器的一致性。

对于使用挡墙绕制结构、次级稳压的变压器（图7A），在初级绕组的层与层之间及初级和偏置绕组之间都采用了基本绝缘（一层胶带）。在次级绕组的层与层之间也可以使用一层胶带，这样可以保证第一层次级绕组的表面平整。初级偏置绕组和次级绕组之间使用加强绝缘（三层胶带）。完成绕制时次级最外层的三层胶带提供了加强绝缘。在该变压器中有四个挡墙间距：两个用于初级和偏置绕组，两个用于次级绕组。在所有绕组的起始端和结束端引线上都使用了绝缘套管。为清楚起见，在图7A和7B中仅在初级绕组的结束端引线显示了绝缘套管。在实际绕制时，所有绕组的起始端和结束端引线都要使用套管。如图中所示，套管应从挡墙间距的内侧延伸至变压器的引脚处。

对于使用挡墙绕制结构的初级稳压变压器（图7B），初级绕组的层与层之间使用基本绝缘。与次级稳压的变压器一样，次级绕组之间也可使用基本绝缘，以便使第一层次级绕组的表面能够平整。初级和次级绕组之间、次级和初级偏置绕组之间及最后完成的初级偏置绕组的上面都要求使用加强绝缘。在该变压器当中有三对挡墙间距：一对用于初级绕组，一对用于次级绕组，一对用于偏置绕组。如上所述，每个绕组的起始和结束端都要使用套管。

对于次级使用三层绝缘线绕制的次级稳压的变压器（图7C），在初级绕组的层与层之间、初级绕组和偏置绕组之间、偏置绕组和次级之间都使用了基本绝缘。该绝缘降低了初级绕组的电容并使得各绕组之间的表面平整。变压器完成时最外层的三层胶带更多的是出于装饰的原因而非安全方面的考虑。在此变压器中无需使用任何挡墙和套管。

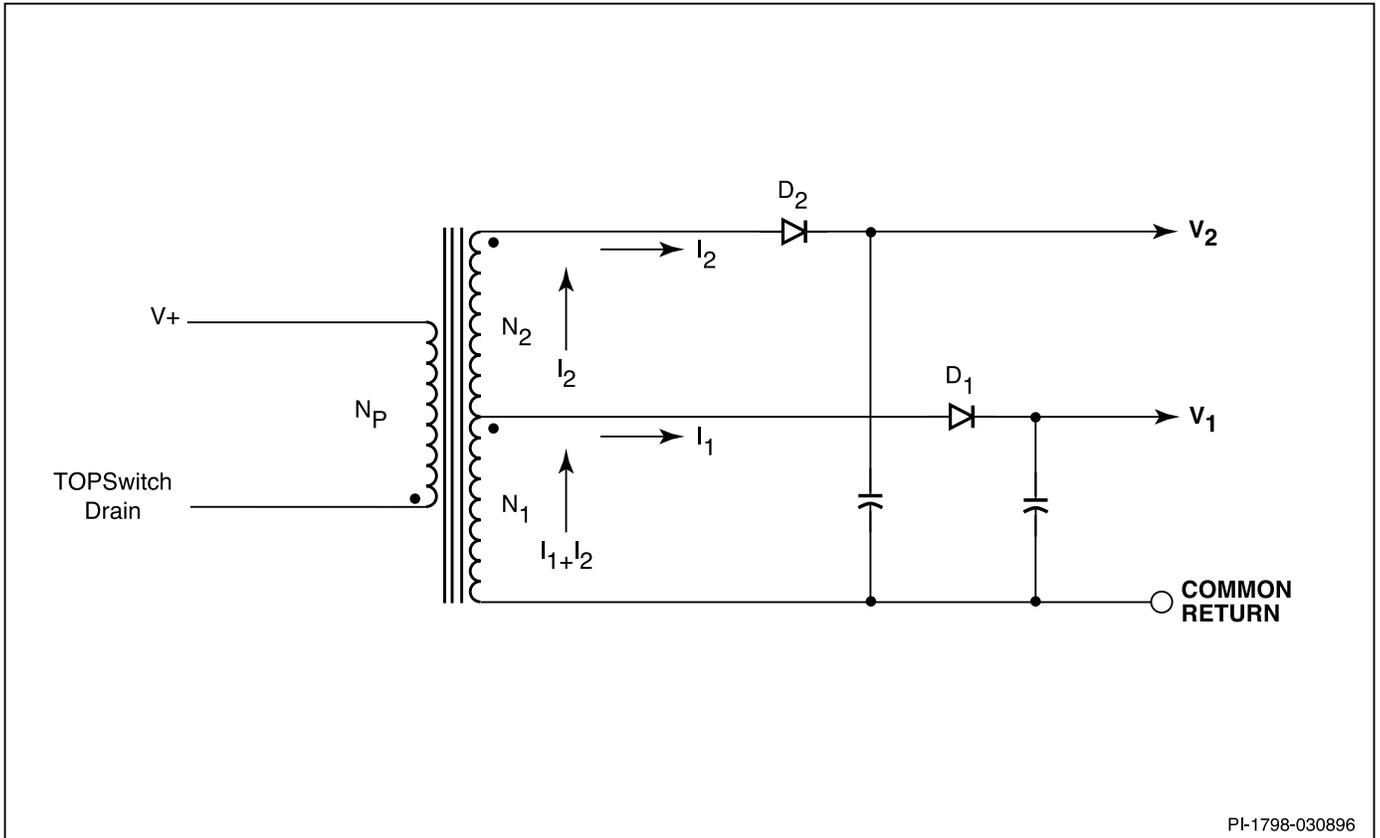


图 8. 多路输出中采用的叠加的次级绕组

对于使用三层绝缘线绕制结构的初级稳压的变压器（图7D），在初级绕组的层与层之间、初级绕组和次级绕组之间、次级和偏置绕组之间都使用基本绝缘。需要在变压器的最外层缠绕三层胶带作为加强绝缘。同样，无需使用任何挡墙和套管。

降低漏感

变压器中绕组的顺序对漏感的大小有很大的影响。变压器绕组的排列要集中，从而降低漏感。应避免使用偏移或分离的骨架结构（如图9所示），因为这些方法会导致很高的漏感，从而在初级箝位电路造成难以接受的损耗。

在多路输出的变压器设计当中，具有最高输出功率的次级绕组要最靠近初级绕组，这样可以加强耦合并使漏感最低。对于较高功率的应用（40瓦或更高），建议使用

初级绕组分开的“三明治”结构来降低漏感。一般说来，与使用单一初级绕组的变压器相比，使用分开初级绕组的变压器的漏感将会减小一半。图10A和10B分别表示了采用挡墙绕制和三层绝缘线绕制的分开初级绕组结构的次级稳压变压器。对于初级稳压方式的设计不建议采用初级绕组分开的结构，因其会导致较差的负载调整率。

高功率的次级绕组仅由很少的圈数构成，为了与初级绕组更好的耦合，次级绕组应横跨骨架的整个宽度而不是聚在一起。使用多股并联绕线技术来绕制圈数较少的绕组可以增大填充系数并改善其耦合程度。在此情况下，线径的选择更多的是取决于得到较好的填充系数，而非导线的RMS电流额定值。如果成本允许，使用铜箔绕组也是一个增强耦合的很好方法。尽管这种方法在实践中往往仅用于低电压高电流的次级绕组。

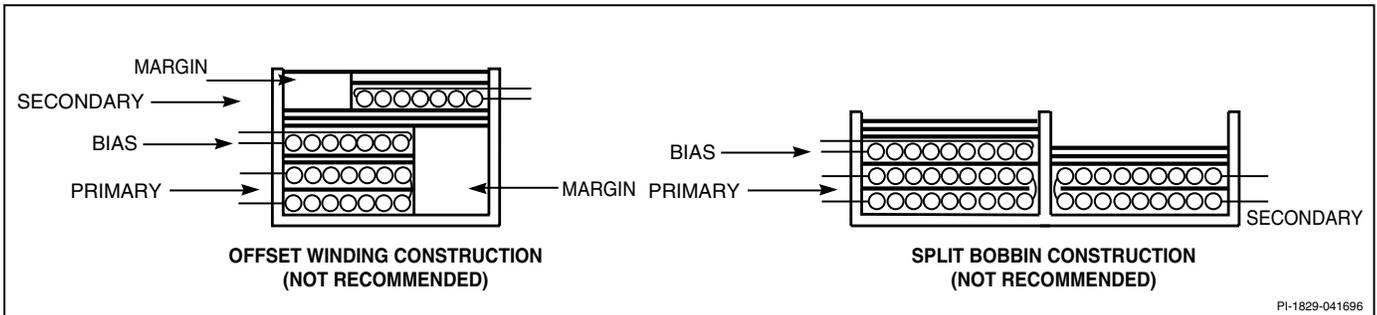


图 9. 绕组偏移及分离骨架结构的技术（不建议）

EMI降低技术

下面所述的变压器结构技术用于降低EMI:

- 使初级绕组作为骨架最里面的绕组。
- 初级绕组的起始端连接至TOPSwitch的漏极。
- 对于使用次级侧稳压的变压器设计，将偏置绕组放置在初级和次级绕组之间，作为一个屏蔽层。

其它的EMI/RFI降低技术包括在初级和次级绕组之间增加屏蔽以及增加用于降低变压器周围杂散场的“磁通量抑制带”。

变压器中位于初级和次级之间的屏蔽层用于降低初级和次级之间的共模噪声的电容耦合。屏蔽层即可以初级高压供电端为参考，也可以初级返回端为参考。图11所示

为典型的具有屏蔽层的变压器结构。最经济的屏蔽形式为采用导线来绕制屏蔽层。变压器中增加屏蔽层时采用这种屏蔽方式的步骤非常简单，只要使一个绕组平铺至骨架的整个宽度就可以了。屏蔽绕组的一端连接至初级返回端或初级V+供电端，而绕组的另一端悬空，并使用胶带绝缘，使其埋藏在变压器内部，不要连接至任何引脚上。绕制屏蔽层时所使用的线径要选择合适的，为减低屏蔽绕组的圈数，可以使用较大尺寸的导线。而使用相对较小尺寸的导线便于将其端接至变压器的引脚上。对于中小尺寸的变压器，合理的导线线径为24-27AWG的导线。

在某些情况下，开关电源变压器周围的杂散磁场会对邻近电路构成干扰，进而产生EMI问题。为降低此类杂散磁场的影响，在变压器的外围可以增加一圈铜制的“磁通屏蔽带”，如图12所示。对于变压器绕组和磁芯形成

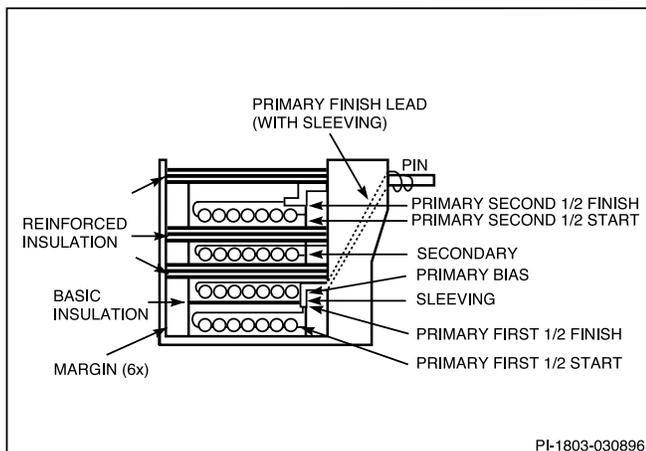


图 10A. 初级绕组分开挡墙绕制结构\次级侧稳压的变压器

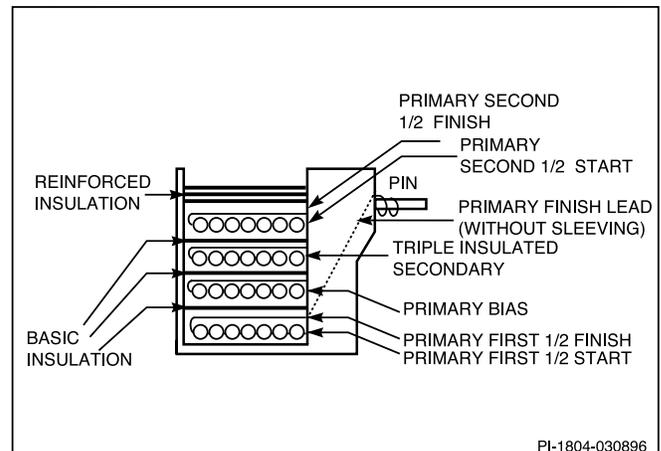


图 10B. 初级绕组分开三层绝缘线绕制结构\次级侧稳压的变压器

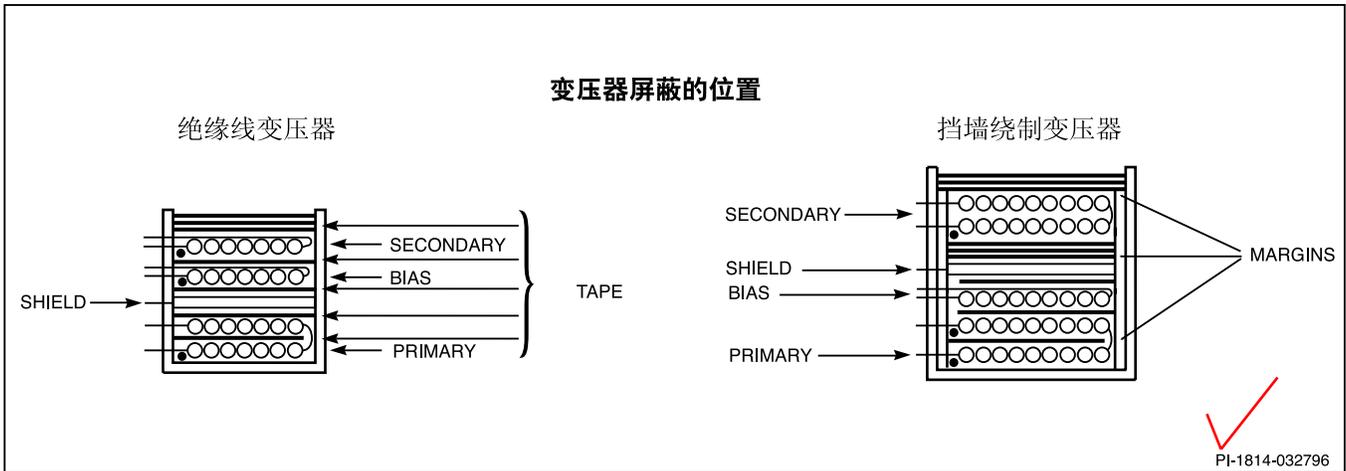


图 11. 变压器屏蔽的位置

的磁路以外的杂散磁通来说，“磁通屏蔽带”的作用相当于对其进行短路。杂散磁场会在磁通屏蔽带内产生相反的电流，可以部分地抵消其影响。如有必要，磁通屏蔽带还可以连接至初级返回端，以降低静电耦合的干扰。如果使用了磁通屏蔽带，必须注意初级引脚通过磁通屏蔽带至次级引脚之间，要保证足够的爬电距离。更多信息请参见AN-15中关于EMI降低技术的描述。

变压器结构

附录B中显示了两个用于TOPSwitch的变压器设计和结构的例子。它们分别采用挡墙绕制结构和三层绝缘线绕制结构。利用AN-16和AN-17中所述的方法，采用计算机数据表单的方法对这两个例子进行设计。使用数据表单设计反激式电源的详细设计步骤如AN-16中所述，同时关于数据表单本身的详细说明请参见AN-17。下面的章节将具体描述怎样将电源设计数据表单产生的相关信息应用于实际的变压器设计当中。这些过程将用于完成附录B中的两个设计例子。在本应用指南中，将介绍两个完成的数据表单设计例子。利用这些表单中所获得的信息来进行实例中变压器的结构设计。

用于变压器规格的设计表单参数

一旦电源设计表单已经完成并进行了优化，表单中得到的信息就可用来确定变压器结构的规格要求。很多确定一个变压器所需的信息都可直接从完成的表单中找到。利用设计表单中得到的数值及诸如线材表之类的其它数据来源所得到的信息可以计算出其它的参数。如下所列

的设计表单中的参数提供了用于规范变压器所需要的信息。括号中的数字表示该参数在设计表单中的单元格位置。

- 磁芯类型(B23)
- 骨架绕线宽度(BW) (B27)
- 安全挡墙宽度(M) (B28)
- 初级绕组层数(L) (B29)
- 次级绕组圈数(N_s) (B30)
- 初级电感量(L_p) (D44)
- 初级绕组圈数(N_p) (D45)
- 偏置绕组圈数(N_B) (D46)

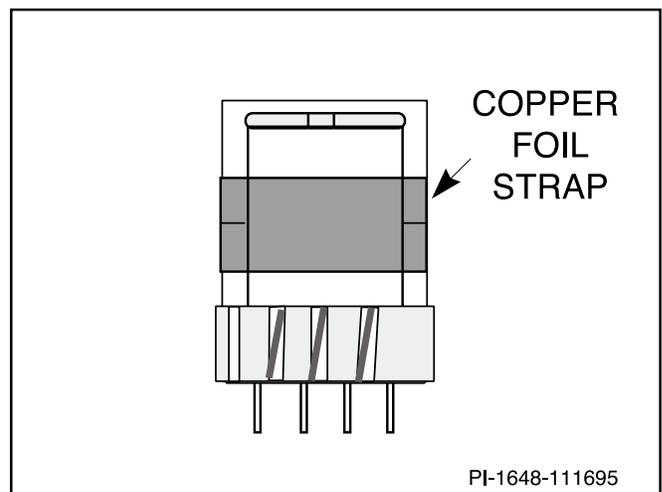


图 12. 变压器磁通屏蔽带

- 开气隙的磁芯电感量系数(A_{LG}) (C47)
- 初级导线规格(AWG) (D56)
- 初级绕组电流容量(CMA) (D58)
- 次级绕组圆密尔(CMS) (C66)
- 次级RMS电流(I_{SRMS}) (D62)
- 次级导线规格(AWG_S) (D67)

构造变压器的步骤

一旦由设计表单确定了变压器的参数，即可通过下面的步骤来决定构造变压器所需的其它信息：

- 利用表单信息和线材表来计算选择导线的尺寸
- 选定变压器结构类型
- 确定绝缘胶带的尺寸
- 确定绝缘套管的尺寸
- 选择磁芯气隙的方式

导线尺寸

根据电源设计表单中给出的信息确定初级、次级和偏置绕组所使用的导线尺寸。对某个给定的绕组，有必要进行其它额外的考量以确定其所用导线的尺寸。下面对选择导线尺寸的过程加以描述。

初级线径尺寸

电源设计表单根据初级绕组的圈数、绕组层数及骨架上可用的绕线空间来计算初级绕组的绝缘线直径。计算出的最大绝缘线直径在表单的D53单元格内加以显示。设计表单使用该值来选取与骨架最相配的AWG导线尺寸。如果导线尺寸介于两个标准的AWG导线规格之间，设计表单会自动将初级导线尺寸降至更细一号的导线规格。所得到的初级AWG导线尺寸在设计表单的D56单元格加以显示。设计表单以每安培电流的圆密耳面积(CMA)来计算初级导线的电流容量，并将结果在D58单元格内加以显示。在实际设计中CMA的数值应位于每安培200至500圆密耳之间。如果CMA没有在此限定范围，则应调整设计使初级绕组的CMA处于该限定范围以内。

线径与频率

在某些情况下，表单所确定的导线尺寸对于100 KHz的工作频率会太大。功率变压器中被有效利用的导线尺寸依赖于工作频率。高频电流总是趋向于在靠近导体表面

而不是导体的内部进行流动。这种现象称为集肤效应。AC电流渗透至导体内部的程度随频率的平方根数值而变化，因而对于较高的频率，电流会靠近导体的表面流动而导体内部的利用率相对较低。这样一来，AC电流与DC电流相比，导体会有较高的等效电阻。为了降低变压器中的AC铜损，所使用的导体厚度应低于电源工作频率点处集肤深度的2倍。与频率成函数关系的可用导线规格的曲线如图13所示。在TOPSwitch的标称工作频率点100 KHz处，26 AWG为最大的导线尺寸，可以对导线的截面积进行充分的利用。工作在100 KHz的输出电流高的绕组要采用多股26 AWG导线或更小的导线并联绕制，而不要使用一根直径很大的导线，这样可以充分利用导体的截面积。通常，相对于初级绕组而言，在选择次级输出绕组的导线尺寸时这一点更加重要。

次级线径

最小的次级裸露导线的截面积由设计表单根据次级的RMS电流来决定。与初级绕组一样，以电流容量(CMA)来对线径加以选择。所得到的最小导线面积（以圆密耳为单位）在表单的C66单元格中加以显示，并用于计算次级绕组所用的导线尺寸。如果次级导线尺寸介于两个标准的AWG导线规格之间，设计表单会自动将导线尺寸降至更细一号的AWG导线规格。所得到的次级AWG导线尺寸在设计表单的D67单元格加以显示。在很多情况下，由设计表单选定的导线尺寸往往太大，而不能满足如上所述的100 KHz工作频率下对导线尺寸的要求。

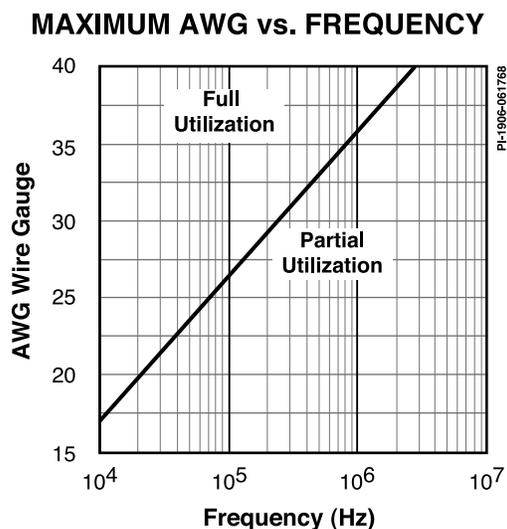


图 13. 集肤深度与频率的关系

此时，有必要采用几股26 AWG或更细的导线并联的方式来绕制次级绕组，使其既满足 CM_S 要求，又满足100 KHz工作频率下对最大线径的要求。总的并联次级导体的裸线截面积应接近表单C66单元格中计算出来的 CM_S 数值。如果裸线总截面积大于或等于计算值，则无需进一步检查即可使用该导线尺寸来并联绕制次级绕组。如果裸线总截面积小于C66单元格中的计算值，则要对电流容量进行检查，确保其在设计限定范围以内。并联导线的电流容量可以通过下式进行计算：

$$CMA_S = \frac{N \times CM}{I_{SRMS}}$$

CMA_S 为并联次级绕组的电流容量，以圆密耳每安培表示；N为次级绕组绕线的股数；CM为单个次级导体的裸线截面积，以圆密耳为单位（附录A中的线材表给出）； I_{SRMS} 为表单D62单元格中给出的次级RMS电流值。

偏置绕组的设计

如前面关于变压器结构章节所述，偏置绕组的导线尺寸主要出于空间填充率的考量，而不考虑其电流容量。选择偏置绕组的导线尺寸时，要使其尽可能地在骨架上铺满一整层。通常，有必要采用双股并联的方法，使用尺寸易于绕制的导线并尽最大可能地填满绕线空间。在附录A的线材表中，给出了应用AWG尺寸的导线每厘米长度上可绕的圈数(TC)。对于给定的圈数及骨架宽度，可利用此数据选择双线并绕的偏置绕组导线尺寸。所需的TC数值可通过下式计算得出：

$$TC = \frac{2 \times N_B \times 10}{BW - (2 \times M)}$$

TC为偏置绕组每厘米长度上可绕制的圈数； N_B 为设计表单D46单元格中偏置绕组的圈数；BW为表单B27单元格中显示的骨架绕线宽度，以毫米表示；M为表单B28单元格中显示的挡墙宽度。一旦计算出所需的TC数值，即可在附录A的线材表中选择TC值大于或等于计算值的导线尺寸。出于容易绕制及引出线端接的考虑，建议导线的最大尺寸为24 AWG。如果所用尺寸的导线没有铺满一整层，则绕组的线圈应沿骨架的绕线宽度均匀地分布于骨架绕线区域上。

选择变压器结构类型

无论是次级还是初级稳压的电源设计，图7和图10中所示的变压器结构类型都针对挡墙绕制结构和三层绝缘线绕制结构的变压器设计进行了优化。这些结构形式适合于绝大多数的TOPSwitch反激电源应用。这些图形结构应作为样板来使用，它们指示了变压器绕组的顺序及挡墙、绝缘套管（如有使用）、绝缘胶带的位置。基于电源的稳压方式（初级或次级）及绝缘类型（挡墙绕制或三层绝缘线绕制）来选择变压器的结构类型。对于要求变压器成本最低但不要求变压器尺寸最小的应用，可以采用挡墙绕制结构的变压器。对于要求变压器尺寸最小的应用，则可以采用三层绝缘线结构的设计。

图10中所示的变压器类型为漏感很低的初级绕组分开的设计。如果电源的输出功率高于40 W，应该使用此变压器结构。这些设计同样可以在低功率电源中使用，以提高效率。但相对于初级绕组一次性绕完的变压器其成本会较高些。

选择绝缘胶带的宽度

对于挡墙绕制的变压器结构，要求使用三种不同宽度的绝缘胶带。用于加强绝缘的宽度等于从骨架一侧到另一侧边缘间距(BW)的胶带。该信息可以直接从设计表单的B27单元格读取。用于基本绝缘的宽度等于骨架宽度减去挡墙宽度的胶带。该胶带用在绕组层间以及相邻的初级或次级绕组之间。其宽度可由如下公式计算：

$$W_{TB} = BW - (2 \times M)$$

W_{TB} 为基本绝缘胶带的宽度；BW为表单B27单元格中骨架的宽度；M为B28单元格中挡墙的宽度。第三种胶带宽度为骨架两侧使用的挡墙层胶带的宽度。选择此胶带的宽度，以便满足相应的安全规范要求并将其输入至B28单元格中。三层绝缘线变压器只要求一种尺寸的胶带，用于基本绝缘，其宽度等于BW。

绝缘套管

在挡墙绕制的变压器设计当中，在绕组的起始端和结束端引出线都要求使用绝缘套管，以便保证由挡墙提供的初级和次级之间的隔离。套管的壁厚必须至少为0.4 mm。可以选用与AWG导线尺寸相当的套管来完成此

作用。通常，对于一个变压器的设计，使用尺寸等于最大导线线径尺寸的套管就足够了。该尺寸的套管可以用在变压器中其它所有尺寸的导线上。对于三层绝缘线的设计，不需要使用套管。

变压器气隙、初级电感量的容差

在具体实践当中，用于反激式变压器应用的磁芯会利用气隙得到所要求的 A_{LG} 数值，但气隙的长度不会很精确。 A_{LG} 的中心数值可以从表单的C47单元格读取。通常规定的 A_{LG} 容差范围为 $\pm 5-6\%$ 。表单D51单元格中所示的气隙长度主要用于检查变压器的峰值磁通密度，确定设计的可行性。该数值不可在变压器的规格中使用。应避免变压器的气隙小于 0.051 mm (0.002 英寸)，因为如此小的气隙，要保证其容差是很困难的。变压器电感量的容差应该在 $\pm 10\%$ 至 $\pm 15\%$ 之间。更加严格的容差不会使性能有太大的改善，但会增加不必要的成本。

在大批量的变压器生产中，常用的变压器磁芯气隙的加工方法是将其中一个铁氧体磁芯的中心柱进行研磨，从而在磁芯的磁通路当中引入一小段空气气隙。在小批量生产中，一个可以代替的方法是在两半磁芯之间使用不导电的隔离片。如果选择隔离片而非使用磁芯中心柱研磨方式来作为气隙，隔离片的厚度应为中心柱气隙长度的一半。因为磁通路被隔离片分割两次：一次在磁芯的中心柱，一次在磁芯的外柱。

变压器规格的完成

一旦确定了上述信息，即可完成一个用于构造变压器所需的规格。此规格包含如下内容：

- 变压器原理图。其中会显示所有的绕组、绕组顺序、指定的引脚、表示绕组起始端的圆点、每个绕组的圈数及导线类型和尺寸。
- 变压器所用部件清单，包括：

磁芯型号及 A_{LG} 数值
骨架型号

所用的所有导线的类型及尺寸
所有绝缘胶带的类型及宽度
绝缘套管类型及尺寸（如使用）
浸漆方式（如使用）

- 变压器规格：
 - 初级电感量及容差
 - 初级漏感及容差范围（由变压器样品来确定）
 - 适用的安全标准或绝缘测试电压及最小爬电距离
- 详细的结构图及绕制说明（可选）

设计总结

- 1) 根据AN-16当中的说明，在设计表单中输入应用变量及TOPSwitch变量。
- 2) 从附录A中选取磁芯，从磁芯和骨架生产商的数据手册中查询表单所需的相关参数。将这些数值输入至表单。
- 3) 经过AN-16所述的设计过程完成设计表单，进行迭代操作，直到所有参数满足建议的设计限定值。
- 4) 根据表单数值及附录A中的线材表，计算初级、次级及偏置绕组的导线尺寸。
- 5) 根据电源的稳压方式（初级或次级）及绝缘类型（挡墙绕制或三层绝缘线绕制）选择变压器结构类型。
- 6) 计算变压器绝缘所需的胶带宽度。
- 7) 选取绝缘套管的尺寸（如有必要）。
- 8) 利用表单中的数值及步骤4-7中所得到的信息完成变压器规格。

附录 A

附录A中所包含的线材表（表1）和反激式变压器设计所建议的磁芯尺寸，用于本文档所叙述的变压器制作过程。同时也列出了变压器生产所需材料的供应商清单。

表2中所列磁芯的电气和机械数据可以从本附录中的铁氧

体磁芯制造商处得到。这些制造商对其常用尺寸磁芯所用的骨架也进行了选择。在本附录中同时也列出了其它变压器骨架的供应商。

AWG 导线 尺寸	SWG 导线 尺寸	公制 尺寸 (mm)	裸线截面积 (CM)		TC	
			cm ² 10 ⁻³	圆-密耳	圈数/厘米	圈数/英寸
18	19	1.00	8.228	1624	9.13	23.2
19	20	0.900	6.531	1289	10.19	25.9
20	21	0.800	5.188	1024	11.37	28.9
21		0.750	4.116	812.3	12.75	32.4
22	22	0.700	3.243	640.1	14.25	36.2
23	23	0.600	2.588	510.8	15.82	40.2
24	24	0.550	2.047	404.0	17.63	44.8
25		0.450	1.623	320.4	19.80	50.3
26	28	0.400	1.280	252.8	22.12	56.2
27	29	0.350	1.021	201.6	24.44	62.1
28	30	0.320	0.8046	158.8	27.32	69.4
29		0.280	0.6470	127.7	30.27	76.9
30	33	0.250	0.5067	100.0	33.93	86.2
31		0.220	0.4013	79.21	37.48	95.2
32		0.200	0.3242	64.00	41.45	105.3
33		0.180	0.2554	50.41	46.33	117.7
34		0.160	0.2011	39.69	52.48	133.3
35		0.140	0.1589	31.36	58.77	149.3
36	39	0.130	0.1266	25.00	65.62	166.7
37	41	0.110	0.1026	20.25	71.57	181.8
38	42	0.100	0.08107	16.00	80.35	204.1
39	43	0.090	0.06207	12.25	91.57	232.6
40	44	0.080	0.04869	9.61	103.6	263.2
41	45	0.070	0.03972	7.84	115.7	294.1
42	46	0.060	0.03166	6.25	131.2	333.3
43			0.02452	4.84	145.8	370.4
44			0.0202	4.00	157.4	400.0

表 1. 线材表

输出功率	铁氧体磁芯	
	三层绝缘线结构	挡墙绕制结构
0-10W	EPC17 EFD15 EE16 或 EI16 EF16 E187 EE19 或 EI19	EEL16 EF20 EEL19 EPC25 EFD25
10-20W	EE19 或 EI19 EPC19 EF20 EFD20 EE22 或 EI22	EEL19 EPC25 EFD25 EF25
20-30W	EPC25 EFD25 E24/25 EI25 EF25 EI28	EPC30 EFD30 EF30 EI30 ETD29 EER28
30-50W	EI28 EF30 EI30 ETD29 EER28	EI30 ETD29 EER28 EER28L EER35
50-70W	EER28L ETD34 EI35 EER35	EER28L ETD34 EER35 ETD39
70-100W	ETD34 EI35 EER35 E21	EER35 ETD39 EER40 E21

表 2. 变压器磁芯选择表

变压器材料供应商

下面所列的联系方式仅用于提供相关信息。关于价格和订购信息请与当地授权的代理商联系。

铁氧体磁芯

TDK Corporation, of America, 1600 Feehanville Dr. Mount Prospect IL 60056 (847) 803-6100 (847) 803-6296 (FAX)

Siemens Matsushita Components, Special Products Division, 186 Wood Ave, South Iselin, NJ 08830 (908) 906-4300 (908) 632-2830 (FAX)

Philips Components, Discrete Products Division, Magnetic Products, 1033 Kings Highway, Saugerties, NY 12477 (914) 246-2811 (914) 246-0486 (FAX)

Tokin America, Inc., 155 Nicholson Lane, San Jose, CA 95134 (408) 432-8020 (408) 434-0375 (FAX)

Thomson Passive Components Corporation, 2211-H Distribution Center Drive, Charlotte, NC 28269 (704) 597-0766 (704) 597-0553 (FAX)

骨架

上面提供的很多铁氧体磁芯供应商都提供与其磁芯相配的骨架。其它的骨架供应商如下所列:

Yih Hwa Enterprises Co., Ltd., 2 Floor, No. 2, Alley 4, Lane 222 Lien Cheng Rd. Chung Ho City, Taipei, Taiwan, R.O.C. 886-2-2483366 886-2-2406919 (FAX)

Taiwan Shu Lin Enterprise Co., Ltd., 760 Chung Cheng Road, Chung Ho City, Taipei Tsien, Taiwan, R.O.C. 886 2 2231500 886 2 2224646 (FAX)

B&B Products Corp., 2190 Ironwood Crest Dr., Tucson, AZ 85745 (520) 743-3389 (520) 743-8000 (FAX)

Miles-Platts, Inc. 901 Touhy Av., Elk Grove Village, IL 60007 (847) 364-0363 (847) 364-0614 (FAX)

绝缘材料

3M Electrical Specialties Division, Bldg. 130-4N-40, 3M Austin Center, P.O. Box 2963, Austin TX 78769 (800) 364-3577 (800) 713-6329

CHR/Furon, 407 East St., P.O. Box 1911, New Haven, CT 06509 (203) 777-3631 (203) 787-1725 (FAX)

EIS, 41444 Christy Street, Fremont, CA 94538 (510) 490-5855 (510) 490-2956 (FAX)

Tesa Tape Inc. 5825 Carnegie Bl., Charlotte, NC 28209 (704) 554-0707 (800) 852-8831 (FAX)

漆包线

Belden Wire and Cable Company, P.O. Box 1980, Richmond, IN 47375 (317) 983-5200 (317) 983-5656 (FAX)

MWS Wire Industries 31200 Cedar Valley Dr., Westlake Village, CA 90404 (818) 991-8553 (818) 706-0911 (FAX)

Phelps Dodge Magnet Wire, 2131 S. Coliseum Blvd. Fort Wayne, IN 46803 (219) 421-5400 (219) 421-5564 (FAX)

Rea Magnet Wire Co., Inc. 3600 E. Pontiac St. Fort Wayne, IN 46896 (219) 424-4252 (219) 421-7349 (FAX)

三层绝缘线

Furukawa Electric America, Inc. 200 Westpark Drive, Suite 190, Peachtree City, GA 30269 (770) 487-1234 (770) 487-9910 (FAX)

Furukawa Electric Co. Ltd. 6-1, Marunouchi 2-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100, Japan (PH) 81-3-3286-3226 (FAX) 81-3-3286-3747

Rubudue Wire Company 5150 E. La Palma Av., Suite 108 Anaheim Hills, CA 92807 (714) 693-5512 (714) 693-5515 (FAX)

Belden Wire and Cable B.V., Edisonstraat 9, P.O. Box 9, NL 5900 AA Venlo, Netherlands (PH) 31 773 878 442 (FAX) 31 773 878 448

变压器清漆

John C. Dolph, Co. Box 267, Monmouth Junction, NJ 08852 (908) 329-2333 (908) 329-1143 (FAX)

Schenectady Chemicals, Inc. Box 1046, Schenectady, NY 12301 (518) 370-4200 (518) 382-8129 (FAX)

P.D. George, 9 Ohio River Boulevard, Sewickley, PA 15143 (800) 999-5700 (412) 741-8892

Epoxylite Corp., 9400 Toledo Way, P.O. Box 19671, Irvine, CA 92713 (714) 951-3231 (714) 472-0980 (FAX)

附录 B

变压器构造举例

如下变压器设计及构造的例子，介绍两个分别使用挡墙绕制和三层绝缘线绕制结构的变压器。这些设计是基于图1所示的12 V、15 W输出、宽电压输入范围的电源。两个例子的设计过程采用了应用指南AN-16和AN-17中所述的计算机表单的设计方法。使用表单进行反激式电源设计的详细步骤如AN-16中所述。本附录中还显示了两个已经完成的表单设计的例子（表1和表6）。从这些表单中得到的相关信息用于变压器的构造举例。

表单中输入的参数

表1和表6为两个电源设计的变压器设计表单。表1为使用EF25磁芯的挡墙绕制结构变压器的电源设计。表6为相同电源但采用EF20磁芯的三层绝缘线变压器的设计。图1所示的电源用来作为两个变压器设计/构造举例的

起点。该电源设计所要达到的规格要求如表2所示。将表2中的设计规格及所选用的元件数值输入至表单的应用变量部分。表3为TOPSwitch和输出整流管的工作条件，用于表单的TOPSwitch变量部分。由于两个变压器设计都用于同一个电源，输入至应用变量部分及TOPSwitch变量部分的数值是完全相同的。只有输出反射电压（ V_{OR} ，B16单元格）的数值不同。对于表6中所示的三层绝缘线变压器的设计， V_{OR} 的数值略低于AN-16所建议的缺省值，这是为了降低初级绕组的圈数。这一点将在三层绝缘线设计举例的章节中专门加以讨论。

设计表单中的变压器结构变量由磁芯、骨架及变压器结构类型所决定。因此在两个设计中有所不同。两个设计表单由此往下的设计开始不同。下面的章节将对变压器构造的例子加以讨论。先介绍挡墙绕制的设计，再介绍三层绝缘线的设计。

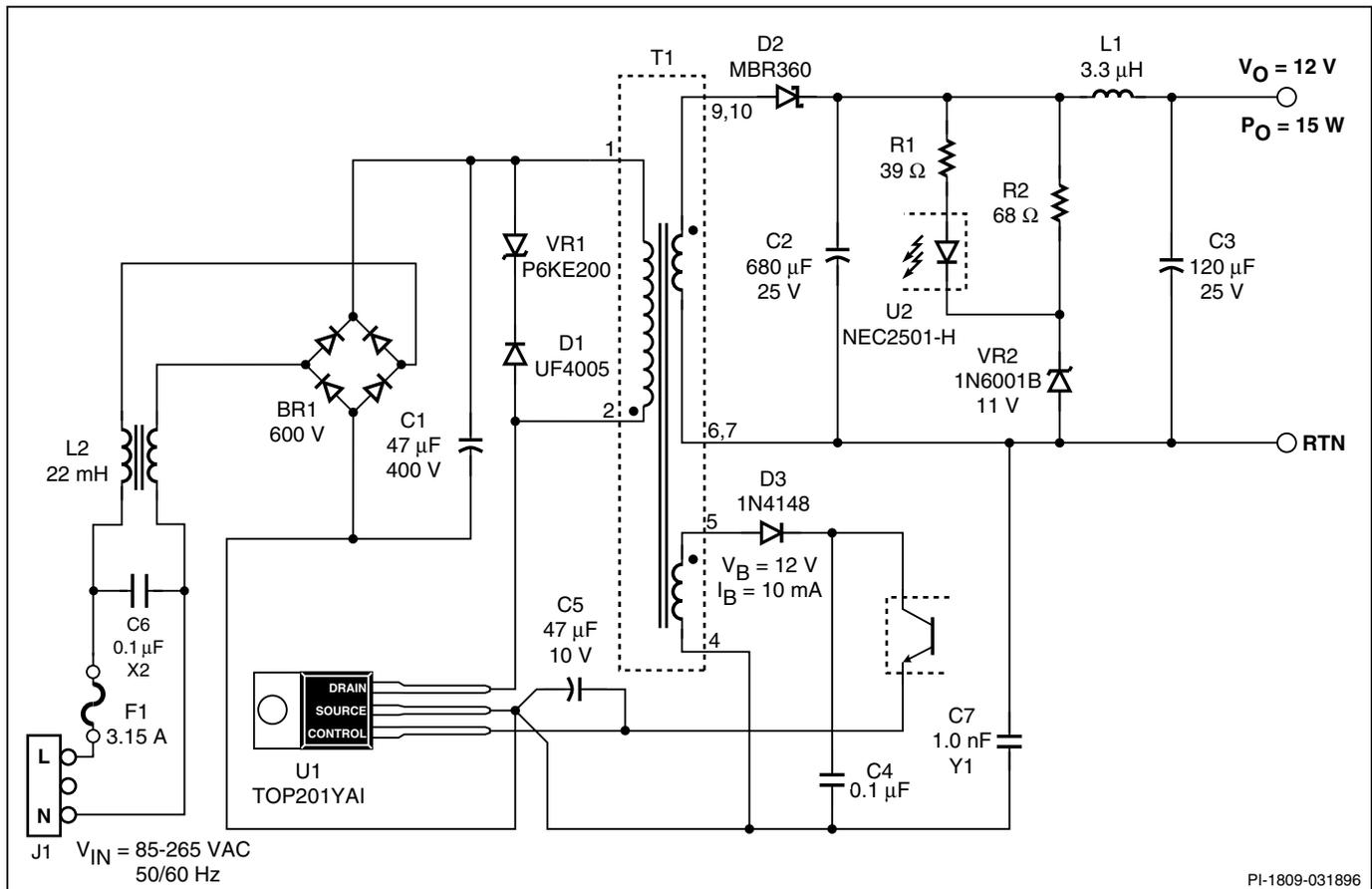


图 1. 12 V 输出、输出功率 15 W 的典型 TOPSwitch 电源

	A	B	C	D	E	F
1	INPUT		OUTPUT			
2	ENTER APPLICATION VARIABLES					
3	VACMIN	85		Volts		Minimum AC Input Voltage
4	VACMAX	265		Volts		Maximum AC Input Voltage
5	fL	50		Hertz		AC Mains Frequency
6	fS	100000		Hertz		TOPSwitch Switching Frequency
7	VO	12		Volts		Output Voltage
8	FO	15		Watts		Output Power
9	n	0.8				Efficiency Estimate
10	Z	0.5				Loss Allocation Factor
11	VB	12		Volts		Bias Voltage
12	tC	3		mSeconds		Bridge Rectifier Conduction Time Estimate
13	CIN	47		uFarads		Input Filter Capacitor
14						
15	ENTER TOPSWITCH VARIABLES					
16	VOR	135		Volts		Reflected Output Voltage
17	VDS	10		Volts		TOPSwitch on-state Drain to Source Voltage
18	VD	0.4		Volts		Output Winding Diode Forward Voltage Drop
19	VDB	0.7		Volts		Bias Winding Diode Forward Voltage Drop
20	KRP	0.60				Ripple to Peak Current Ratio (0.4 < KRP < 1.0)
21						
22	ENTER TRANSFORMER CORE/CONSTRUCTION VARIABLES					
23	EF25					Core Type
24	AE	0.525		cm ²		Core Effective Cross Sectional Area
25	LE	5.75		cm		Core Effective Path Length
26	AL	1800		nH/T ²		Ungapped Core Effective Inductance
27	BW	15.1		mm		Bobbin Physical Winding Width
28	M	3		mm		Safety Margin Width (Half the Primary to Secondary Creepage Distance)
29	L	2				Number of Primary Layers
30	NS	6				Number of Secondary Turns
31						
32	DC INPUT VOLTAGE PARAMETERS					
33	VMIN			94 Volts		Minimum DC Input Voltage
34	VMAX			375 Volts		Maximum DC Input Voltage
35						
36	CURRENT WAVEFORM SHAPE PARAMETERS					
37	DMAX			0.62		Duty Cycle at Minimum DC Input Voltage (VMIN)
38	Iavg			0.20 Amps		Average Primary Current
39	IP			0.46 Amps		Peak Primary Current
40	IR			0.28 Amps		Primary Ripple Current
41	IRMS			0.26 Amps		Primary RMS Current
42						
43	TRANSFORMER PRIMARY DESIGN PARAMETERS					
44	LP			1884 uHenries		Primary Inductance
45	NP			65		Primary Winding Number of Turns
46	NB			6		Bias Winding Number of Turns
47	ALG	441		nH/T ²		Gapped Core Effective Inductance
48	BM			2537 Gauss		Maximum Flux Density (2000 < BM < 3000)
49	BAC	761		Gauss		AC Flux Density for Core Loss Curves (0.5 X Peak to Peak)
50	ur	1569				Relative Permeability of Ungapped Core
51	LG			0.11 mm		Gap Length (Lg >> 0.051 mm)
52	BWE	18.2		mm		Effective Bobbin Width
53	OD			0.28 mm		Maximum Primary Wire Diameter including insulation
54	INS	0.05		mm		Estimated Total Insulation Thickness (= 2 * film thickness)
55	DIA			0.23 mm		Bare conductor diameter
56	AWG			32 AWG		Primary Wire Gauge (Rounded to next smaller standard AWG value)
57	CM	64		Cmils		Bare conductor effective area in circular mils
58	CMA			245 Cmils/Amp		Primary Winding Current Capacity (200 < CMA < 500)
59						
60	TRANSFORMER SECONDARY DESIGN PARAMETERS					
61	ISP			5.03 Amps		Peak Secondary Current
62	ISRMS			2.25 Amps		Secondary RMS Current
63	IO			1.25 Amps		Power Supply Output Current
64	IRIPPLE			1.87 Amps		Output Capacitor RMS Ripple Current
65						
66	CVS	550		Cmils		Secondary Bare Conductor minimum circular mils
67	AWGS			22 AWG		Secondary Wire Gauge (Rounded up to next larger standard AWG value)
68	DIAS			0.65 mm		Secondary Minimum Bare Conductor Diameter
69	ODS			1.52 mm		Secondary Maximum Insulated Wire Outside Diameter
70	INSS	0.44		mm		Maximum Secondary Insulation Wall Thickness
71						
72	VOLTAGE STRESS PARAMETERS					
73	VDRAIN			678 Volts		Maximum Drain Voltage Estimate (Includes Effect of Leakage Inductance)
74	PIVS			46 Volts		Output Rectifier Maximum Peak Inverse Voltage
75	PIVB			47 Volts		Bias Rectifier Maximum Peak Inverse Voltage
76						
77	ADDITIONAL OUTPUTS					
78	VX	12		Volts		Auxiliary Output Voltage
79	VDX	0.7		Volts		Auxiliary Diode Forward Voltage Drop
80	NX			6.15		Auxiliary Number of Turns
81	PIVX			47 Volts		Auxiliary Rectifier Maximum Peak Inverse Voltage
82						

表 1.15 W挡墙绕制变压器的设计表单

应用变量 (输入至表1和表6的设计表单)				
描述	符号	数值	数据源	单元格 #
最低AC输入电压	V_{ACMIN}	85 VAC	电源规格书	B3
最高AC输入电压	V_{ACMAX}	265 VAC	电源规格书	B4
AC电网频率	f_L	50 Hz	电源规格书	B5
TOPSwitch开关频率	f_S	100,000 Hz	AN-16缺省值	B6
输出电压	V_O	12 V	电源规格书	B7
输出功率	P_O	15 W	电源规格书	B8
估计效率	η	0.8	AN-16缺省值	B9
损耗分配因子	Z	0.5	AN-16缺省值	B10
偏置电压	V_B	12 V	电源规格书	B11
估计的整流桥导通时间	t_C	3 msec	AN-16缺省值	B12
输入滤波电容(C1)	C_{IN}	47 μ F	AN-16缺省值	B13

表 2. 图1电源的设计表单中的应用变量

挡墙绕制结构变压器举例

为了进行挡墙绕制结构的变压器举例，必须完成表1的表单输入部分中剩余的设计参数。由表单中得到的信息才能用来完成变压器结构举例。

确定变压器结构变量

为了完成表1所示表单中的输入部分，需要在变压器/磁芯结构变量部分输入相关的信息。表4所示为在此挡墙绕制结构变压器举例中所选择的变压器/磁芯结构变量。由附录A中的变压器磁芯表格，根据输出功率和结构类型选取EF25磁芯。图2和图3显示了该磁芯及相配骨架的尺寸及电气特性。设计表单中所需要的磁芯电气特性包括 A_e 、 L_e 和 A_L ，分别输入至表单的B24、B25和B26单元格。此挡墙绕制的设计选择3 mm (0.118英寸)的挡墙宽度(M)以满足宽电压输入的国际通用安全规范要求。该数值输入B28单元格。初级绕组的层数 (B29单元格)

为2层，这样可以优化磁芯尺寸并降低变压器的漏感及杂散电容。

变压器设计表单中所要求的BW变量（骨架绕线宽度）表示骨架绕组可利用的绕线宽度。此数值可以直接从很多骨架的规格书中得到。然而，在某些情况下，此数值并不会直接给出，需要通过总的骨架宽度及最大的骨架边缘厚度计算得到。图3所示的EF25骨架图纸中就没有显示BW的数值。但是，给出了总的骨架宽度(W_T)和边缘的厚度(W_F)，包括容差。利用这些数值使用如下的公式可以将BW计算出来：

$$BW = W_{T(MIN)} - [2 \times W_{F(MAX)}]$$

TOPSwitch变量 (输入至表1和表6的设计表单)				
描述	符号	数值	数据源	单元格 #
反射的输出电压	V_{OR}	135 V*/130V**	*AN-16缺省值 ** (见说明)	B16
TOPSwitch MOSFET导通时的漏极至源极电压	V_{DS}	10 V	AN-16缺省值	B17
输出二极管(D2)正向电压降	V_D	0.4 V	估算	B18
偏置二极管(D3)正向电压降	V_{DB}	0.7 V	估算	B19
初级电流纹波部分与峰值部分之比	K_{RP}	0.6	通过迭代法优化	B20

表 3. 设计表单中的TOPSwitch变量部分

$W_{T(MIN)}$ 为最小的骨架总宽度, $W_{F(MAX)}$ 为最大的边缘厚度。对于图3中的骨架, $W_{T(MIN)}$ 为16.7 mm, 而 $W_{F(MAX)}$ 为0.8 mm。对应这些数值, BW为:

$$BW = 16.7 - (2 \times 0.8) = 15.1mm$$

将此BW数值输入至表单的B27单元格中。

对于一个变压器设计, 最佳的次级绕组圈数 N_s (B30单元格) 为电源输入电压范围、要求的 K_{RP} 及等效磁芯截面积 A_c 的函数。利用设计表单, 可以很简单地对 N_s 进行迭代操作, 直到设计出适合所选用的变压器磁芯和骨架, 所得到的数值能够满足初级绕组电流容量(CMA)、气隙长度(L_G)及最大磁通密度(B_M)的要求。AN-16给出了 N_s 的建议初始数值, 以伏特/圈作为单位。对于使用EF25磁芯的本例设计, 经过迭代后最佳的 N_s 数值为6圈。至此, 表单设计部分已经完成, 利用完成并经过优化的表单所给出的输出数据, 可以进行变压器构造的举例。

挡墙绕制变压器举例

挡墙绕制变压器规格所需要的参数如表5中所示。表1中得到的表单参数用于确定变压器的导线尺寸、胶带尺寸及套管尺寸。

初级线径

表1中表单的D56单元格给出的导线尺寸为32 AWG。D58单元格中给出的初级绕组电流容量为245圆密耳/安培, 因而满足200-500圆密耳/安培的电流容量要求。此导线尺寸同时也适合于100 KHz的应用, 其直径小于如图13所示的100 KHz时集肤深度的两倍。

次级线径

查看表单的B66单元格, 次级裸线的面积必须达到550圆密耳才能保证次级CMA等于初级CMA数值。表1表单中的D67单元格给出的满足此要求的最接近的单根AWG导线尺寸为22 AWG。该导线尺寸对于100 KHz的工作频率太大了, 为了充分利用导线的截面积, 可以采用多股并联的26 AWG或更细的导线来绕制次级。由附录A中的线材表可知, 双股并联的26 AWG导线(每根导线的CM值为252.8圆密耳)的总裸线面积为505.6圆密耳, 在所要求的550圆密耳CM值的10%范围以内。并联绕组的电流容量可以从下式计算出来:

$$CMA_s = \frac{N \times CM}{I_{SRMS}}$$

CMA_s 为次级绕组电流容量, 以圆密耳/安培为单位。N为次级绕组所用导线的股数。CM为单根次级导体的裸露面

变压器结构变量 (输入至表1的设计表单)				
描述	符号	数值	数据源	单元格 #
磁芯类型	-	EF25	磁芯规格书	B23
磁芯等效截面积	A_e	0.525 cm ²	磁芯规格书	B24
磁芯等效磁路长度	L_e	5.75 cm	磁芯规格书	B25
无气隙磁芯的电感量系数	A_L	1800 nH/T ²	磁芯规格书	B26
骨架绕线宽度	BW	15.1 mm	由骨架规格书计算得到	B27
挡墙宽度	M	3 mm	AN-16中的缺省值	B28
初级绕组层数	L	2	AN-16中的缺省值	B29
次级圈数	N_s	6 t	见文字说明	B30

表 4. EF25挡墙绕制变压器设计中的变压器结构变量

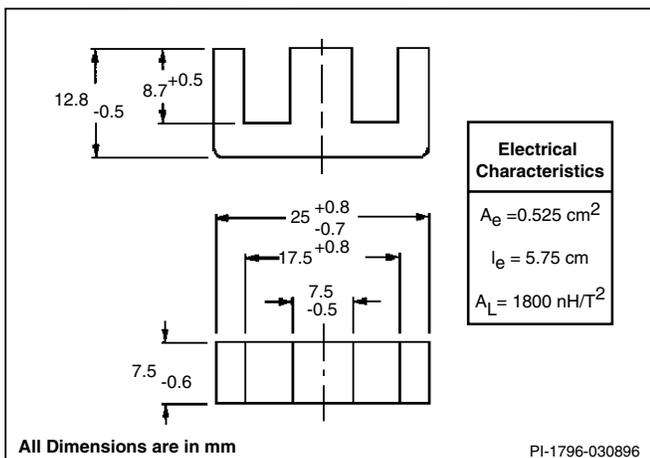


图 2. EF25磁芯

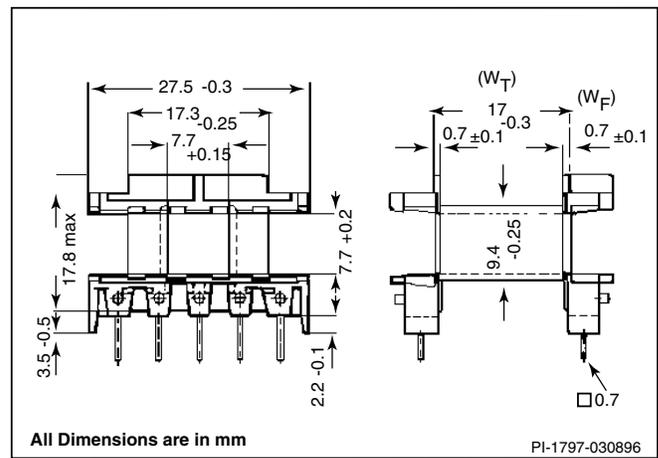


图 3. EF25骨架

挡墙绕制设计的变压器结构 从表1设计表单得到的参数			
描述	符号	数值	单元格 #
磁芯类型、材料	-	EF25, Siemens N67 Part# B66317-G-X130	-
骨架类型	-	EF25, 10 PIN, Siemens PIN B66208-A 1110-T1	-
初级圈数	N_P	65 T	D45
次级圈数	N_S	6 T	B30
偏置绕组圈数	N_B	6 T	D46
初级导线尺寸	AWG	32 AWG	D56
次级导线尺寸	AWG_S	26 AWG	D67 (见文字说明)
偏置绕组导线尺寸	AWG_B	24 AWG	见文字说明
具有气隙的磁芯 电感量系数	A_{LG}	441 nH/T ² ±5%	C47
初级电感量	L_P	1884 μH +/-10%	D44
加强绝缘胶带宽度	BW	15.1 mm	B27
基本绝缘胶带宽度	W_{TB}	9.1 mm	见文字说明
挡墙胶带宽度	M	3 mm	B28
套管尺寸	-	24 AWG	见文字说明

表 5. 挡墙绕制设计举例的结构参数

积（从附录A的线材表得到），以圆密耳为单位。 I_{SRMS} 为表单D62单元格中的次级RMS电流值。26 AWG导线的裸线面积为252.8圆密耳。双股并联的26 AWG导线所具有的电流容量为：

$$CMA_S = \frac{2 \times 252.8}{2.25} = 224.7 \text{ 圆密耳/安培}$$

此数值接近初级电流容量（在10%范围内），且满足CMA设计限定要求。

偏置绕组导线尺寸

选择偏置绕组的导线尺寸时，要使其尽可能地填满骨架绕线宽度。由于初级偏置绕组圈数通常都相对较少，因而最好采用双股并绕的方式绕制，而不要使用一根直径较粗的导线，实际上这样有效地将实际绕线圈数增加了一倍。所需的TC数值可以计算如下：

$$TC = \frac{2 \times N_B \times 10}{BW - (2 \times M)}$$

$$= 13.2 \text{ turns/cm}$$

由附录A的线材表可知，TC数值大于或等于13.2圈/厘米的最接近的导线尺寸为22 AWG导线，其TC数值为14.25圈/厘米。对于所使用的EF25磁芯和骨架来讲，该导线尺寸太大了。折衷起见，使用24 AWG导线作为替代。使用此导线虽然不能完全覆盖整个可利用的骨架绕线宽度，但考虑到可生产性，还是一个可以接受的选择。由于此绕组的输出电流仅为10 mA或更低，因而无需考虑导线的电流容量及高频集肤效应问题。此时导线尺寸的选择仅由空间填充率的要求来决定，而不必考虑其电流容量。

变压器结构类型

此变压器为挡墙绕制设计，用于次级稳压方式的应用。因而与其相配的变压器结构类型为图7A和图10A。由于此设计为15 W的应用，没有必要采用图10A所示的初级绕组分开的方式。使用图7A的单一初级绕组结构就可以了，其成本也更低。

胶带尺寸

对于挡墙绕制设计，要使用三种尺寸的胶带，分别用于加强绝缘、基本绝缘及挡墙绝缘。在这个变压器中，加强绝缘所要求的胶带宽度等于BW。由表1设计表单的B27单元格可知，该数值为15.1 mm。基本绝缘所用胶带的宽度 W_{TB} 可按下式计算：

$$W_{TB} = BW - (2 \times M) = 15.1 - (2 \times 3) = 9.1 \text{ mm}$$

挡墙胶带宽度(M)在设计表单的B28单元格中加以显示，其宽度为3 mm，以满足宽电压输入的国际通用安全规范要求。

绝缘套管尺寸

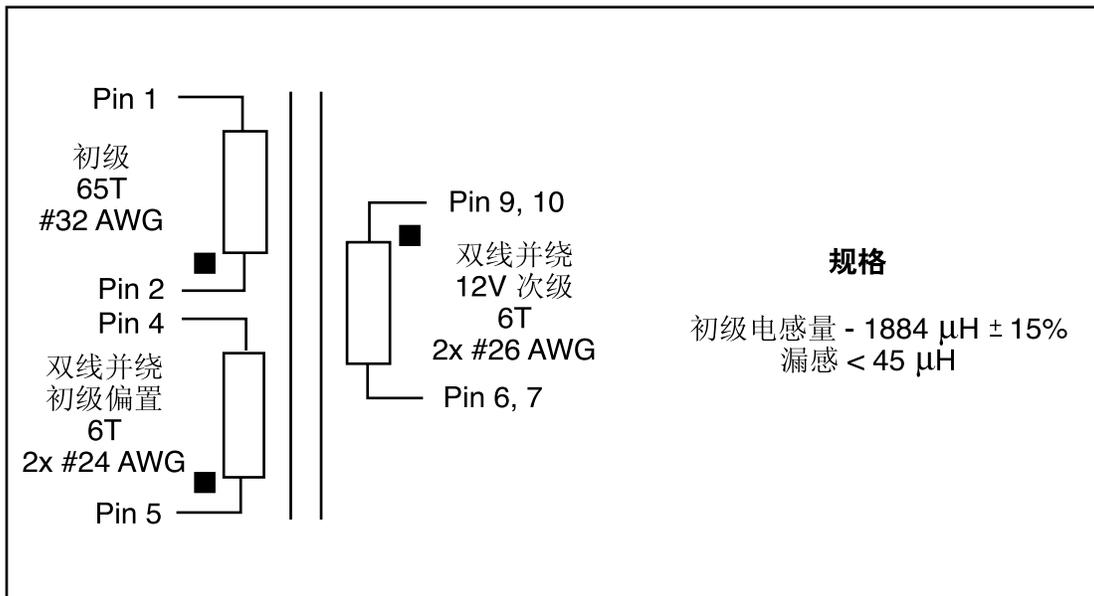
此变压器设计中所需的绝缘套管的尺寸等于变压器中最大尺寸导线的尺寸，即24 AWG。套管的壁厚为0.4 mm，以满足国际通用安全规范要求。

增加气隙后的磁芯电感量系数

表单的C47单元格给出了此变压器设计中的 A_{LG} 数值。在变压器规格中应使用指定磁芯的 A_{LG} 中心值。

完成的挡墙绕制变压器设计

表5对于挡墙绕制变压器规格所需要的信息进行了总结。图4所示为已经完成的变压器原理图及部件清单。图5为变压器的结构图。



EF25 变压器设计举例部件清单

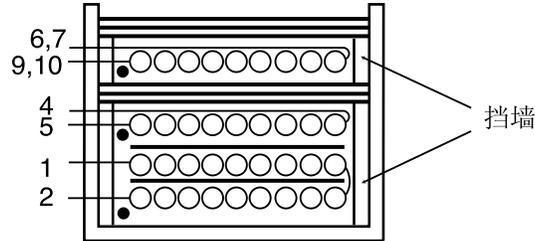
项	Amt.	描述	型号 #	生产商
1	1pr.	磁芯, EF25 N67 Mat'l	B66317-G-X167*	Siemens
2	1ea.	骨架, EF25, 10 pin	B66208-A1110-T1	Siemens
3	A/R	导线, 32 AWG Heavy Nyleze		
4	A/R	导线, 24 AWG Heavy Nyleze		
5	A/R	导线, 26 AWG Heavy Nyleze		
6	A/R	胶带, 聚酯 3.0 mm 宽	#44	3M
7	A/R	胶带, 聚酯 9.1 mm 宽	#1296	3M
8	A/R	胶带, 聚酯 15.1 mm 宽	#1296	3M
9	A/R	套管, Teflon, 24 AWG, 0.4 mm 最小壁厚		

*磁芯加气隙, 使得 A_{LG} 为 $441 \text{ nH/T}^2 \pm 5\%$

PI-1805-031196

图 4. EF25变压器设计举例部件清单

挡墙绕制变压器的构造



绕制说明	
挡墙 两层“C”型绕制的初级	如图所示加3 mm胶带挡墙。 从引脚2起绕。从左至右使用32 AWG导线绕33圈。加一层聚酯薄膜胶带。胶带宽度为9.1 mm，作为基本绝缘。从右至左继续绕32圈。结束端为引脚1。起始和结束引脚上加套管。
基本绝缘	加一层9.1 mm宽度胶带作为基本绝缘。
初级偏置 (双线并绕)	从引脚5起绕。从左至右，使用24 AWG导线，在一层上双线并绕6圈。结束端为引脚4。起始和结束引脚上加套管。
加强绝缘	加三层15.1 mm宽度胶带作为加强绝缘。
挡墙 双线并绕次级	如图所示加3 mm胶带挡墙。 从引脚9和10起绕。从左至右，使用26 AWG漆包线在一层上双线并绕6圈。结束端为引脚6和7。起始和结束引脚上加套管。
外层绝缘	加三层15.1 mm宽度胶带作为外层绝缘。
最后装配	将两半磁芯安装固定好，用清漆均匀的浸渍。

PI-1806-030896

图 5. EF25挡墙绕制结构举例

三层绝缘线结构举例

如下章节将介绍完成表6设计表单的输入部分所需要的一些设计参数。利用表单所得到的信息，再对三层绝缘线变压器的构造进行举例。

确定变压器结构变量

为完成表6所示表单中的输入部分，需要在变压器/磁芯结构变量部分输入相关的信息。表7所示为在此三层绝缘线绕制结构变压器举例中所选择的变压器/磁芯结构变量。由附录A中的磁芯表格，选取EF20磁芯。图6和图7显示了该磁芯及相配骨架的尺寸及电气特性。设计表单中所需要的磁芯电气特性包括 A_c 、 L_c 和 A_L ，分别输入至表单的B24、B25和B26单元格。对于三层绝缘线的设计，在单元格B28中将挡墙宽度(M)设定为零。初级绕组的层数(B29单元格)为2层，这样可以优化磁芯尺寸并降低变压器的漏感及杂散电容。如挡墙绕制的例子一样，BW(骨架绕线宽度)是计算出来的，因为图7的骨架图中没有直接给出相应的参数。 $W_{T(MIN)}$ 为13.4 mm，而 $W_{F(MAX)}$ 为0.7 mm，因此EF20骨架的BW数值为：

$$\begin{aligned} BW &= W_{T(MIN)} - [2 \times W_{F(MAX)}] \\ &= 13.45 - (2 \times 0.7) \cong 12.0\text{mm} \end{aligned}$$

将此BW数值输入至表6设计表单的B27单元格。经过迭代设计后，最佳次级绕组圈数 N_s (B30单元格)确定为9圈。初级绕组的层数(B29单元格)设定为2层，这样可以优化磁芯尺寸并降低变压器的漏感及杂散电容。

三层绝缘线变压器举例

确定三层绝缘线变压器规格所需要信息如表8所示。表8的内容是直接来自表6设计表单中的数值摘录或计算出来的。与表1使用EF25变压器磁芯的设计表单不同，表6的设计表单需要进行额外的一个迭代过程，用于优化初级绕组导线尺寸。下面对此迭代过程及变压器设计的其它相关步骤加以讨论。

调整初级线径及CMA

设计表单对初级导线尺寸加以调整，使其采用最接近的AWG导线，并适合于骨架的可用绕线宽度。在某些情况下，由表单给出的AWG导线尺寸会导致CMA数值处于所要求的200-500圆密耳/安培范围以外。表单中的CMA

数值和所得到的AWG数值是相互依存的变量，不可以直接进行调整。表单中的初级圈数也不可以直接进行改变，因为它是次级圈数的函数。通过改变次级绕组圈数(N_s)或磁芯尺寸(见AN-16)可以对初级CMA数值进行间接的调整。调整次级绕组的圈数会改变初级绕组的圈数，这样才能同比例地维持反射的输出电压 V_{OR} ，使其在规定的数值上。改变磁芯尺寸会改变骨架可用的绕线宽度(BW)。表单将改变初级导线尺寸，以便使用规定的初级绕组层数填充可用的骨架宽度。

在某些情况下，改变次级绕组圈数，要么会引起初级导线尺寸过大的变化，要么会对其它一些参数产生不利影响，比如最大磁通密度或变压器气隙长度。同时，出于成本、实用性或体积限制的原因，改变磁芯尺寸的大小也不是所希望得到的结果。下面所介绍的技术有助于在不改变磁芯/骨架尺寸或次级圈数的情况下，精确调整AWG和初级绕组的CMA数值。

- 为了将初级导线尺寸减小至较小的数值，以0.1层为增量调整初级层数，使其低于2层的缺省数值。(比如，尝试1.9层及1.8层等等)。
- 为了将初级导线尺寸增大至较大的数值，以1-2伏特的增量调低反射输出电压 V_{OR} 。这将会稍稍降低初级绕组的圈数。最大占空比(D_{MAX})也会略微降低。 L_G 会变小而 B_M 会略微增加。不要使反射的初级电压低于AN-16的最大建议值的10%。如果需要更大的调整，可降低次级绕组的圈数或使用较大的磁芯尺寸。

起初，表6设计表单的B16单元格使用135 V的 V_{OR} 缺省数值。当 $N_s=9$ 圈时，得到的 $N_p=96$ 圈，初级导线尺寸为33 AWG。对于此设计来讲，初级导线太细(CMA数值为196圆密耳/安培)，不能满足200-500圆密耳/安培的CMA要求。利用降低次级圈数的方法来降低初级圈数会引起变压器的最大磁通密度高于3000高斯的设计限定值。为避免这种情况出现，将 V_{OR} 从135 V稍稍降低至130 V，初级绕组圈数相应地从98圈减低至94圈。这使得初级导线的AWG尺寸(D56单元格)从33 AWG变到32 AWG，将初级绕组的CMA(D58单元格)提高到243圆密耳/安培。最大占空比和最大磁通密度受此改变的影响很小。

	A	B	C	D	E	F
1	INPUT		OUTPUT			
2	ENTER APPLICATION VARIABLES					
3	VACMIN	85		Volts		Minimum AC Input Voltage
4	VACMAX	265		Volts		Maximum AC Input Voltage
5	fL	50		Hertz		AC Mains Frequency
6	fS	100000		Hertz		TOPSwitch Switching Frequency
7	VO	12		Volts		Output Voltage
8	PO	15		Watts		Output Power
9	n	0.8				Efficiency Estimate
10	Z	0.5				Loss Allocation Factor
11	VB	12		Volts		Bias Voltage
12	tC	3		mSeconds		Bridge Rectifier Conduction Time Estimate
13	CIN	47		uFarads		Input Filter Capacitor
14						
15	ENTER TOPSWITCH VARIABLES					
16	VOR	130		Volts		Reflected Output Voltage
17	VDS	10		Volts		TOPSwitch on-state Drain to Source Voltage
18	VD	0.4		Volts		Output Winding Diode Forward Voltage Drop
19	VDB	0.7		Volts		Bias Winding Diode Forward Voltage Drop
20	KRP	0.60				Ripple to Peak Current Ratio (0.4 < KRP < 1.0)
21						
22	ENTER TRANSFORMER CORE/CONSTRUCTION VARIABLES					
23	EF20					Core Type
24	AE	0.335		cm^2		Core Effective Cross Sectional Area
25	LE	4.49		cm		Core Effective Path Length
26	AL	1470		nH/T^2		Ungapped Core Effective Inductance
27	BW	12		mm		Bobbin Physical Winding Width
28	M	0		mm		Safety Margin Width (Half the Primary to Secondary Creepage Distance)
29	L	2				Number of Primary Layers
30	NS	9				Number of Secondary Turns
31						
32	DC INPUT VOLTAGE PARAMETERS					
33	VMIN			94 Volts		Minimum DC Input Voltage
34	VMAX			375 Volts		Maximum DC Input Voltage
35						
36	CURRENT WAVEFORM SHAPE PARAMETERS					
37	DMAX			0.61		Duty Cycle at Minimum DC Input Voltage (VMIN)
38	IAVG			0.20 Amps		Average Primary Current
39	IP			0.47 Amps		Peak Primary Current
40	R			0.28 Amps		Primary Ripple Current
41	IRMS			0.26 Amps		Primary RMS Current
42						
43	TRANSFORMER PRIMARY DESIGN PARAMETERS					
44	LP			1829 uHenries		Primary Inductance
45	NP			94		Primary Winding Number of Turns
46	NB			9		Bias Winding Number of Turns
47	ALG	205		nH/T^2		Gapped Core Effective Inductance
48	BM			2712 Gauss		Maximum Flux Density (2000 < BM < 3000)
49	BAC	814		Gauss		AC Flux Density for Core Loss Curves (0.5 X Peak to Peak)
50	ur	1568				Relative Permeability of Ungapped Core
51	LG			0.18 mm		Gap Length (Lg >> 0.051 mm)
52	BWE	24		mm		Effective Bobbin Width
53	OD			0.25 mm		Maximum Primary Wire Diameter including insulation
54	INS	0.05		mm		Estimated Total Insulation Thickness (= 2 * film thickness)
55	DIA			0.21 mm		Bare conductor diameter
56	AWG			32 AWG		Primary Wire Gauge (Rounded to next smaller standard AWG value)
57	CM	64		Cmils		Bare conductor effective area in circular mils
58	CMA			243 Cmils/Amp		Primary Winding Current Capacity (200 < CMA < 500)
59						
60	TRANSFORMER SECONDARY DESIGN PARAMETERS					
61	ISP			4.91 Amps		Peak Secondary Current
62	ISRMS			2.22 Amps		Secondary RMS Current
63	IO			1.25 Amps		Power Supply Output Current
64	IRIPPLE			1.84 Amps		Output Capacitor RMS Ripple Current
65						
66	CMS	540		Cmils		Secondary Bare Conductor minimum circular mils
67	AWGS			22 AWG		Secondary Wire Gauge (Rounded up to next larger standard AWG value)
68	DIAS			0.65 mm		Secondary Minimum Bare Conductor Diameter
69	ODS			1.33 mm		Secondary Maximum Insulated Wire Outside Diameter
70	INSS	0.34		mm		Maximum Secondary Insulation Wall Thickness
71						
72	VOLTAGE STRESS PARAMETERS					
73	VDRAIN			668 Volts		Maximum Drain Voltage Estimate (Includes Effect of Leakage Inductance)
74	PIVS			48 Volts		Output Rectifier Maximum Peak Inverse Voltage
75	PIVB			49 Volts		Bias Rectifier Maximum Peak Inverse Voltage
76						
77	ADDITIONAL OUTPUTS					
78	VX	12		Volts		Auxiliary Output Voltage
79	VDX	0.7		Volts		Auxiliary Diode Forward Voltage Drop
80	NX			9.22		Auxiliary Number of Turns
81	PIVX			49 Volts		Auxiliary Rectifier Maximum Peak Inverse Voltage
82						

表 6. 15 W三层绝缘线变压器的设计表单

变压器结构变量 (输入至表6的设计表单)				
描述	符号	数值	数据源	单元格 #
磁芯类型	-	EF20	磁芯规格书	B23
磁芯等效截面积	A_e	0.335 cm ²	磁芯规格书	B24
磁芯等效磁路长度	L_e	4.49 cm	磁芯规格书	B25
无气隙磁芯的电感量系数	A_L	1470 nH/T ²	磁芯规格书	B26
骨架绕线宽度	BW	12.0 mm	由骨架规格书计算得到	B27
挡墙宽度	M	0	AN-16中的缺省值	B28
初级绕组层数	L	2	AN-16中的缺省值	B29
次级圈数	N_s	9 t	见文字说明	B30

表 7. EF20三层绝缘线设计中所用的变压器结构变量

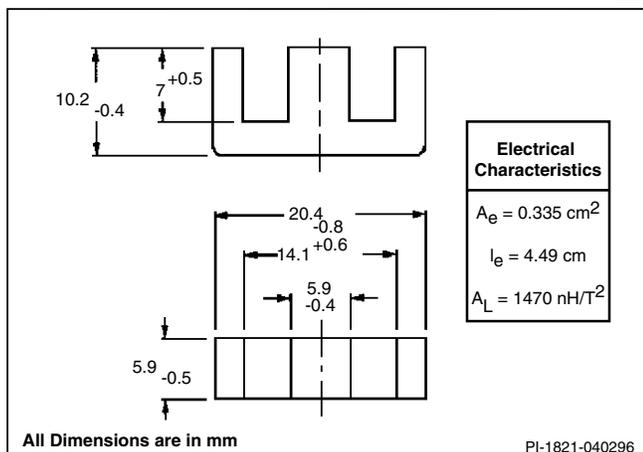


图 6. EF20磁芯

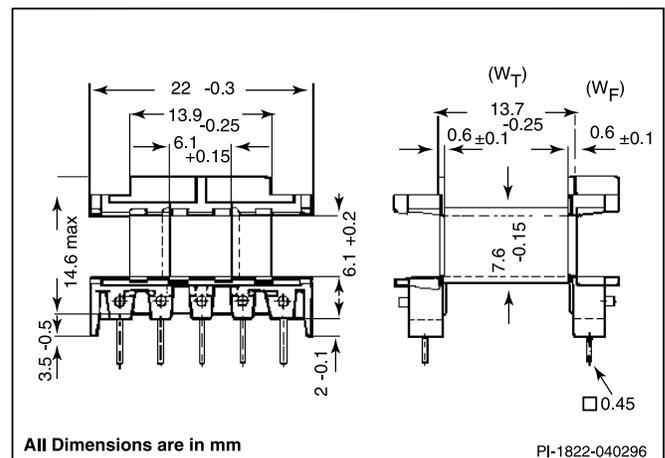


图 7. EF20骨架

三层绝缘线变压器结构 从表6设计表单得到的参数			
描述	符号	数值	单元格 #
磁芯类型、 材料型号 #	-	EF20, Siemens N67 Part# B66311-G-X130	-
骨架类型 型号 #	-	EF20, 10 PIN, Siemens PIN B66206-A 1110-T1	-
初级圈数	N_p	94 圈	D45
次级圈数	N_s	9 圈	B30
偏置绕组圈数	N_B	9 圈	D46
初级导线尺寸	AWG	32 AWG	D56
次级导线尺寸	AWG _S	26 AWG 三层绝缘线	D67 (见文字说明)
偏置绕组导线尺寸	AWG _B	24 AWG	见文字说明
具有气隙的磁芯 电感量系数	A_{LG}	205 nH/T ² ±5%	C47
初级电感量	L_p	1829 μH +/-10%	D44
加强绝缘胶带宽度	BW	N/A	B27
基本绝缘胶带宽度		12.0 cm	见文字说明
挡墙胶带宽度	M	N/A	B28
套管尺寸	-	N/A	N/A

表 8. 三层绝缘线设计举例中使用的结构参数

次级线径

根据表6设计表单的B66单元格，次级裸线的面积必须达到550圆密耳才能保证次级CMA等于初级CMA数值。由D67单元格可知，满足此要求的最接近的单股AWG导线尺寸为22 AWG。此导线尺寸对于100 KHz的工作频率太大了，应采用多股较细的导线并联的方式来绕制，以便充分利用导线的截面积。由附录A中的线材表可知，双股并联的26 AWG三层绝缘线（每根导线的CM值为252.8圆密耳）的总裸线面积为505.6圆密耳，在所要求的

540圆密耳CM值的10%范围以内。并联绕组的电流容量可以从下式计算出来：

$$CMA_s = \frac{N \times CM}{I_{SRMS}}$$

CMA_s为次级绕组电流容量，以圆密耳/安培为单位。N为次级绕组所用导线的股数。CM为单根次级导体的裸露面积（从附录A的线材表得到），以圆密耳为单位。I_{SRMS}为表单D62单元格中的次级RMS电流值。26 AWG导线的

裸线面积为252.8圆密耳。双股并联的26 AWG三层绝缘线所具有的电流容量为：

$$CMA_s = \frac{2 \times 252.8}{2.25} = 224.7 \text{ 圆密耳/安培}$$

该数值在初级243圆密耳/安培CMA的10%范围以内，满足CMA200-500圆密耳/安培的限定范围。

偏置绕组导线尺寸

选择偏置绕组的导线尺寸时，要使其尽可能地填满骨架绕线宽度。由于初级偏置绕组圈数通常都相对较少，因而最好采用双股并绕的方式绕制，而不要使用一根直径较粗的导线，实际上这样有效地将实际绕线圈数增加了一倍。所需的TC数值可以计算如下：

$$TC = \frac{2 \times N_B \times 10}{BW - (2 \times M)} = \frac{2 \times 9 \times 10}{12 - (2 \times 0)} \\ = 15 \text{ turns/cm}$$

由线材表可知，TC数值大于或等于该数值的最接近的导线尺寸为23 AWG导线，其TC数值为15.82圈/厘米。此导线太粗而不能使用较小的骨架。折衷的办法是使用下一号较小尺寸的导线，即24 AWG导线。虽然此导线不能完全覆盖骨架宽度，但更加容易端接至骨架引脚。由于此绕组的输出电流为10 mA或更低，因而无需考虑导线的

电流容量问题。此时导线尺寸的选择仅由空间填充率的要求来决定，而不必考虑其电流容量。

变压器结构类型

由于该变压器为三层绝缘线设计，且用于次级稳压的应用。因而与其相配的变压器结构类型为图7B和图10B。由于此设计为15 W的应用，没有必要采用图10B所示的初级绕组分开的方式。使用图7B的单一初级绕组结构就可以了，其成本也更低。

胶带尺寸

该设计为三层绝缘线设计，因而只要求使用一种尺寸的胶带作为基本绝缘。其宽度等于BW。由表6设计表单的B27单元格可知，此数值为12.0 mm。

绝缘套管尺寸

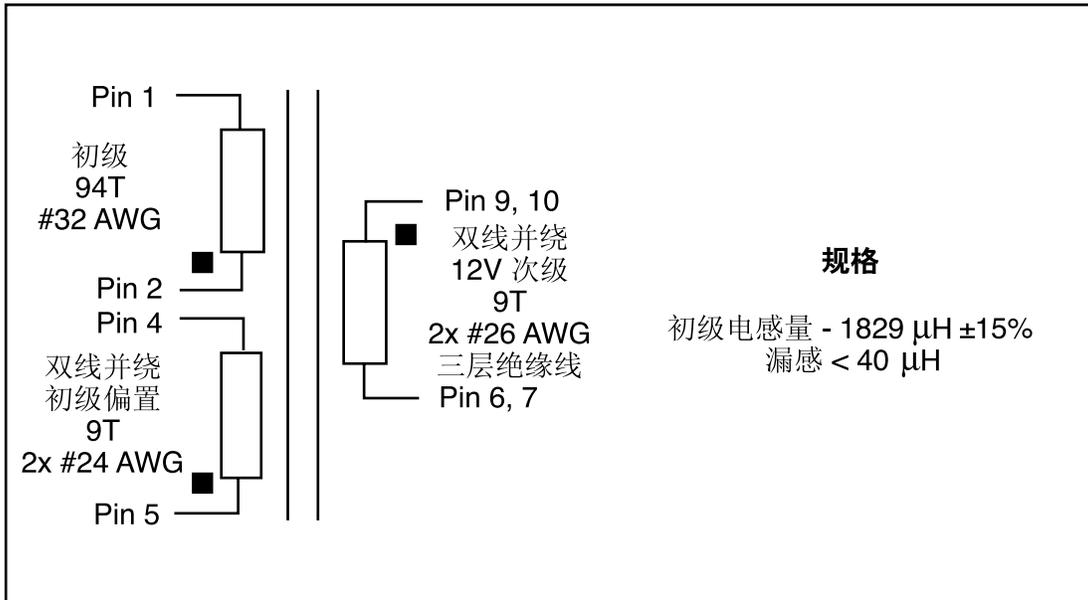
此设计为三层绝缘线设计，因而无需使用套管。

增加气隙后的磁芯电感量系数

表单的C47单元格给出了此变压器设计中的 A_{LG} 数值。在变压器规格中应使用指定磁芯的 A_{LG} 中心值。

完成的三层绝缘线变压器设计

表8对于三层绝缘线变压器规格所需要的信息进行了总结。图8所示为已经完成的变压器原理图及部件清单。图9为变压器的结构图。



EF20变压器设计举例部件清单

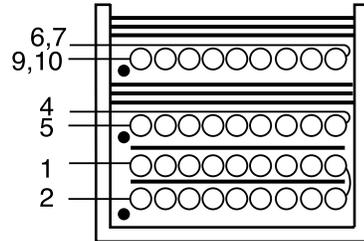
项	Amt.	描述	型号 #	生产商
1	1pr.	磁芯, EF20 N67 Mat'l	B66311-G-X167	Siemens*
2	1ea.	骨架, EF20, 10 pin	B66206-A1110-T1	Siemens
3	A/R	导线, 32 AWG Heavy Nyleze		
4	A/R	导线, 24 AWG Heavy Nyleze		
5	A/R	导线, 26 AWG 三层绝缘		
6	A/R	胶带, 聚酯 12.0 mm 宽	#1296	3M

*磁芯加气隙, 使得 A_{LG} 为 $205 \text{ nH/T}^2 \pm 5\%$

PI-1815-040896

图 8. EF20变压器设计举例的部件清单

三层绝缘线变压器结构



绕制说明	
两层“C”型绕制的初级	从引脚2起绕。从左至右使用32 AWG导线绕47圈。加一层聚酯薄膜胶带。胶带宽度为12.0 mm，作为基本绝缘。从右至左继续绕47圈。结束端为引脚1。
基本绝缘	加一层12.0 mm宽度胶带作为基本绝缘。
初级偏置 (双线并绕)	从引脚5起绕。从左至右，使用24 AWG导线，在一层上双线并绕9圈。结束端为引脚4。
基本绝缘	加一层12.0 mm宽度胶带作为基本绝缘。
双线并绕的 三层绝缘线次级	从引脚9和10起绕。从左至右，使用26 AWG三层绝缘线在一层上双线并绕9圈。结束端为引脚6和7。
外层绝缘	加三层12.0 mm宽度胶带作为外层绝缘。
最后装配	将两半磁芯安装固定好，用清漆均匀的浸渍。

PI-1816-032896

图 9. EF20三层绝缘线设计举例

参考资料

- 1) Power Integrations, Inc., AN-15, “Power Supply Design Techniques for EMI and Safety”
- 2) Power Integrations, Inc., AN-16, “*TOPSwitch* Flyback Fundamentals”
- 3) Power Integrations, Inc., AN-17, “Flyback Transformer Design for *TOPSwitch* Power Supplies”
- 4) Power Integrations, Inc. DN-8, “Simple Bias Supplies Using the TOP200”
- 5) Col. William McLyman, Transformer and Inductor Design Handbook, New York, Marcel Dekker, Inc., 1978
- 6) Col. William McLyman, Magnetic Core Selection for Transformers and Inductors, New York, Marcel Dekker, Inc., 1982
- 7) Abraham I. Pressman, Switching Power Supply Design (2nd ed.), New York, McGraw-Hill, Inc., 1991
- 8) Ferdinand C. Geerlings, “SMPS Power Inductor and Transformer Design, Part 1”, Powerconversion International, November/December 1979, pp. 45-52
- 9) Ferdinand C. Geerlings, “SMPS Power Inductor Design and Transformer Design, Part 2”, Powerconversion International, January/February 1980, pp. 33-40
- 10) Coilcraft, Inc., Technical Note Number 8110, “V.D.E. Transformer Safety Requirements”

有关最新的产品信息，请访问 www.powerint.com

Power Integrations reserves the right to make changes to its products at any time to improve reliability or manufacturability. Power Integrations does not assume any liability arising from the use of any device or circuit described herein. POWER INTEGRATIONS MAKES NO WARRANTY HEREIN AND SPECIFICALLY DISCLAIMS ALL WARRANTIES INCLUDING, WITHOUT LIMITATION, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, AND NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY RIGHTS.

PATENT INFORMATION

The products and applications illustrated herein (including transformer construction and circuits external to the products) may be covered by one or more U.S. and foreign patents, or potentially by pending U.S. and foreign patent applications assigned to Power Integrations. A complete list of Power Integrations' patents may be found at www.powerint.com. Power Integrations grants its customers a license under certain patent rights as set forth at <http://www.powerint.com/ip.htm>.

LIFE SUPPORT POLICY

POWER INTEGRATIONS' PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF POWER INTEGRATIONS. As used herein:

1. A Life support device or system is one which, (i) is intended for surgical implant into the body, or (ii) supports or sustains life, and (iii) whose failure to perform, when properly used in accordance with instructions for use, can be reasonably expected to result in significant injury or death to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

The PI logo, **TOPSwitch**, **TinySwitch**, **LinkSwitch**, **DPA-Switch**, **EcoSmart**, **Clampless**, **E-Shield**, **Filterfuse**, **PI Expert** and **PI FACTS** are trademarks of Power Integrations, Inc. Other trademarks are property of their respective companies.
©Copyright 2005, Power Integrations, Inc.

全球销售支持网络

全球总部

5245 Hellyer Avenue
San Jose, CA 95138, USA.
Main: +1-408-414-9200
Customer Service:
Phone: +1-408-414-9665
Fax: +1-408-414-9765
e-mail: usasales@powerint.com

德国

Rueckertstrasse 3
D-80336, Munich
Germany
Phone: +49-89-5527-3910
Fax: +49-89-5527-3920
e-mail: eurossales@powerint.com

日本

Keihin Tatemono 1st Bldg 2-12-20
Shin-Yokohama, Kohoku-ku,
Yokohama-shi, Kanagawa ken,
Japan 222-0033
Phone: +81-45-471-1021
Fax: +81-45-471-3717
e-mail: japansales@powerint.com

台湾

5F, No. 318, Nei Hu Rd., Sec. 1
Nei Hu Dist.
Taipei, Taiwan 114, R.O.C.
Phone: +886-2-2659-4570
Fax: +886-2-2659-4550
e-mail: taiwansales@powerint.com

中国(上海)

Rm 807-808A,
Pacheer Commercial Centre,
555 Nanjing Rd. West
Shanghai, P.R.C. 200041
Phone: +86-21-6215-5548
Fax: +86-21-6215-2468
e-mail: chinasales@powerint.com

印度

261/A, Ground Floor
7th Main, 17th Cross,
Sadashivanagar
Bangalore, India 560080
Phone: +91-80-4113-8020
Fax: +91-80-4113-8023
e-mail: indiasales@powerint.com

韩国

RM 602, 6FL
Korea City Air Terminal B/D, 159-6
Samsung-Dong, Kangnam-Gu,
Seoul, 135-728, Korea
Phone: +82-2-2016-6610
Fax: +82-2-2016-6630
e-mail: koreasales@powerint.com

欧洲总部

1st Floor, St. James's House
East Street, Farnham
Surrey, GU9 7TJ
UNITED KINGDOM
Phone: +44(0)1252-730-140
Fax: +44(0)1252-727-689
e-mail: eurossales@powerint.com

中国(深圳)

Rm 2206-2207, Block A,
Electronics Science & Technology Bldg.
2070 Shennan Zhong Rd.
Shenzhen, Guangdong,
China, 518031
Phone: +86-755-8379-3243
Fax: +86-755-8379-5828
e-mail: chinasales@powerint.com

意大利

Via De Amicis 2
20091 Bresso MI - Italy
Phone: +39-028-928-6000
Fax: +39-028-928-6009
e-mail: eurossales@powerint.com

新加坡

51 Newton Road,
#15-08/10 Goldhill Plaza,
Singapore, 308900
Phone: +65-6358-2160
Fax: +65-6358-2015
e-mail: singaporesales@powerint.com

技术支持热线

全球 +1-408-414-9660

技术支持传真

全球 +1-408-414-9760