

组件正确布局 and 选择是电子设备 或系统控制EMI的关键

The correct layout and selection of components is the key
to controlling EMI in electronic equipment or system

叶云燕

摘要: 本文对电子设备或系统中组件(包括电感器、变压器、电压调节器及转换器等)的正确布局 and 选择是控制EMI关键问题作研讨。并以开关调节器与单端主电感转换器(SEPIC)共模噪声中的抑制和磁辐射的降低及如何采用增加气隙的铁氧体磁芯设计制作电感器变压器以实现控制EMI的作用等二大问题为重点作分析说明。

关键词: 开关调节器, 电感转换器, 传导噪声与磁辐射, 铁氧体磁芯

Abstract: in this paper, the correct layout and selection of components in electronic equipment or system (including inductors, transformers, voltage regulators and converters, etc.) is a key issue in EMI control. In addition, the suppression of the common mode noise and the reduction of magnetic radiation between the switch regulator and the single-terminal main inductor converter (SEPIC) are analyzed, and how to use the ferrite core to increase the air gap to design and make the inductor transformer so as to realize the function of controlling EMI is also discussed.

Keywords: switch regulator, inductor conduction, Conducting noise and magnetic, ferrite core

0 前言

如今无论是便携设备或非便携式设备均包含有小尺度光刻技术集成电路的电压调节器或其它类型的电源电路,并且是要求较低的供电电压。由此其电压调节器和电源电路及组件的选择会产生有重大影响问题的存在:即电池寿命、EMI(电磁干扰)/EMC(电磁兼容性)规范的兼容性与产品基本性能能否达到设计要求等二大问题。由此有必要就有关电源电路及组件(包括各类电压调节器及组件等)中电气噪声的产生和传播机制及新理念进行分析讨论。

从而引出在电子设备或系统中组件(包括电感器、变压器、电压调节器及转换器等)的如何正确布局 and 选择是控制EMI关键问题的研讨。据此本文将从以下二大问题作分析说明:其一为分别对对开关调节器与单端主电感转换器(SEPIC)共模噪声中的抑制和磁辐射的降低的问题;其二为如何采用增加气隙的铁氧体磁芯设计制作电感器变压器以实现控制EMI的作用并避免漏感产生的问题。值此先从开关电压调节器噪声抑制述起。

1 开关调节器的选择与共模噪声中的抑制

1.1 传导噪声的存在

如果线性或并联型调节器的性能不能满足应用要求,那么设计者就必须转而考虑开关型调节器的选择。然而,伴随着性能的改进也带来一些不足之处:例如,更大的尺寸和更高的成本,更敏感于电气噪声,以及复杂程度的增加等等。

开关调节器或电源所产生的噪声以传导或辐射的形式出现。传导型噪声表现为电压或电流形式,它们还可进一步分类为共模或差模传播方式。更为复杂的是,连接线上有限的阻抗会将电压传播转换为电流传播,反之亦然,并且差模传播也会产生出共模传播噪声,反之亦然。

1.2 传导型噪声的抑制

一般来讲,可以降低上述一种或多种传播类型的噪声使电路得到优化。传导型噪声对于固定系统的影响往往比对便携式系统更为严重。因为便携式设备依靠电池工作,它的负载和能源没有传播传导型噪声的外部连接。值此用一个MAX1653 DC-DC转换控制器构成的典型同步整流、降压型转换器为例作说明,见图1所示。

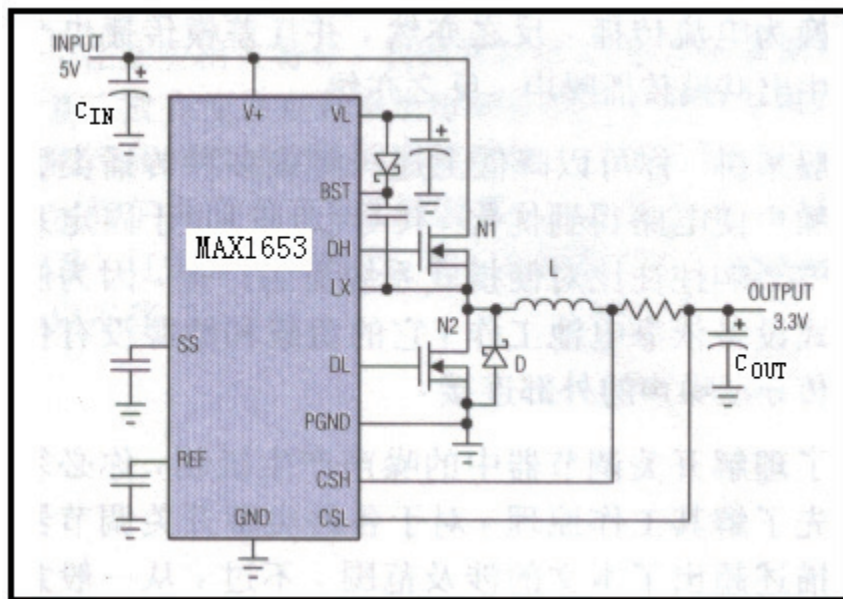


图1 为用 MAX1653 DC-DC 转换控制器构成的典型同步整流、降压型转换器示意图

这种传导型噪声抑制的一种最直接的方法是：在输入端连接低阻抗旁路电容。另外一种灵巧一点的办法更为节省成本和线路板空间：增加电源和转换器之间的阻抗，并确保必要的直流电流能够不受阻碍地通过。最佳的阻抗元件是电感器，但应确保转换器在最高至环路的转折频率都有一个比较低的输入阻抗（大多数 DC-DC 开关转换器的环路转折点位于 10kHz 到 100kHz 间）。输出电容 (C_{OUT}) 上的纹波电流要比 C_{IN} 的低得多，不但幅度较低，并且（不同于输入电容）电流是连续的，因此也就具有比较少的谐波成分。

这种类型转换器的负载常常是对于传导噪声敏感的电子电路，但由于转换器的传导噪声在输出端比起输入端来更容易控制，和输入端一样，输出传导噪声也可以利用低阻抗旁路或第二级滤波来加以控制，需要注意的是，第二级（后端）滤波器的使用应当谨慎。

2 单端主电感转换器 (SEPIC) 共模噪声中的抑制和磁辐射的降低

2.1 噪声与电磁辐射问题的产生

降压转换器中的上述问题同样存在于其它类型的开关转换器中。以升压型转换器为例，此种类型转换器的基本

结构类似于降压型转换器，只不过输入和输出易位。这样，出现于降压转换器输入端的问题也会出现在升压转换器的输出端，反之亦然。

降压转换器的应用具有局限性，因为其输出电压必须低于输入电压。类似地，升压转换器的输出电压必须高于其输入电压。当输出电压落在输入电压范围之间时，就给这两种拓扑的转换器造成一些困难。而反激式转换器拓扑可以解决这个问题，见图 2 所示。

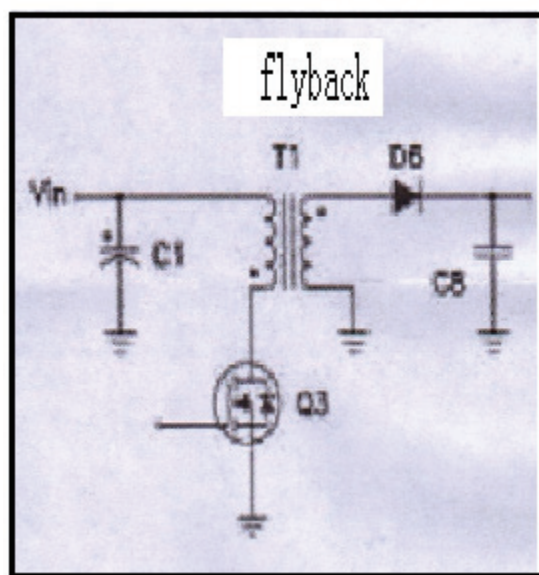


图2 为反激式转换器拓扑

但由于反激式转换器输入、输出端的电流均不连续，这使传导型噪声更加难以控制，因此这种转换类型的噪声特性通常比升压型或降压型更差。存在于这种转换器的另一个问题是，变压器上每个绕组中的电流都不连续。这种不连续电流作用于变压器漏感就会产生高频电压尖刺，它可以传播到其它电路。初、次级线圈之间的空间间隔是造成漏感的主要原因。也就是说，漏感是由空气中的磁场引起的（因为磁芯中的磁场同时耦合至初级和次级线圈）。因此，该漏感所产生的电压尖刺会产生电磁辐射。有其它好办法？回答是，有！则单端主电感转换器拓扑（SEPIC）能够较好地解决输入输出电压交叠的问题。

2.2 单端主电感转换器（SEPIC）是噪声抑制和磁辐射降低的有效选择

SEPIC 转换器非常类似于反激式电路，唯一区别是在变压器初级和次级线圈间连接了一个电容（见图 3），在反激式转换器初、次级线圈中的电流被切断时，这个电容提供了一条续流通路，由于初级和次级线圈中的电流变为连续，因此改善了反激式电路的性能。当然从另一方面讲，增加反激式电路的输入输出电容通常也可以有效改善其噪声性能，使这种反激式拓扑可以被接受。这对于存在传导噪声和辐射噪声成为问题时，则 SEPIC 电路要优于反激式。

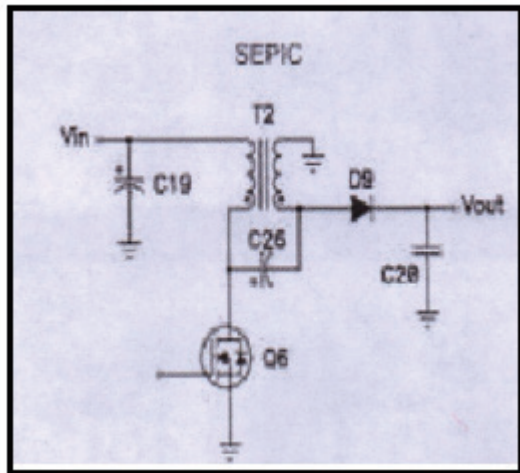


图 3 为 SEPIC 转换器拓扑

3 开关调节器后接线性调节器结构正确布局的应用

有些应用对于输出噪声要求严格，而又无法接受线性

调节器的低效率。这种情况下，采用开关调节器后接线性调节器的结构可能会比较适合。后端调节器可以削弱开关调节器产生的高频噪声，最终的噪声性能可以接近于一个单独的线性调节器。由于大部分电压转换由开关调节器完成，因而效率的损失要比完全采用线性调节器时小得多。

这种方案也可以用于输入输出电压范围有重叠的应用中，替换反激式和 SEPIC 转换器。既可以工作在输入电压低于输出时升压转换器状态，又能当输入高于输出时线性调节器发挥作用。升压转换器和 LDO 线性调节器可以被组合到单片 IC 中。这种器件具有一种跟踪模式，使升压转换器的输出电压总是高出 LDO 输出电压 300mV。这样，在保持高效中的同时，保证 LDO 调节器具有足够的电源抑制比（PSRR）和电压裕量（输入减输出），可以在各种情况下抑制升压转换器的输出噪声。

4 关于共模噪声的抑制

4.1 共模噪声产生原因

按照定义，共模传导噪声在输入或输出端的两条连接线上相位相同。一般来讲，它仅对那些和大地有连接通路的固定系统造成影响。在一个带有共模滤波器的典型离式电源共模噪声的主要产生源是 MOSFET。MOSFET 通常是电路中的主要耗能元件，很多情况下需要配散热器。TO-220 器件的散热片连接于 MOSFET 漏极，而大多数情况下，散热器会向大地传导电流。由于 MOSFET 与散热器电气隔离，它和大地之间具有一定的分布电容。随着它的打开和关断，迅速变化的漏极电压会通过分布电容（ C_{p1} ）向大地发送电流。由于交流电线和大地之间的低阻抗，这种共模电流会通过交流输入流入大地。变压器也会通过分布于隔离的初、次级绕组间的电容（ C_{p2A} , C_{p2B} ）传导高频电流。这样，噪声会同时推向输出端和输入端。

4.2 共模噪声的抑制

在图 4(a) 中，共模传导噪声被安置在噪声源（电源）和输入或输出之间的共模滤波器所抑制。

共模扼流圈（CML1, CML2）通常是在单一磁芯上按图中所示极性绕制而成。负载电流和驱动电源的入线电流都是差模电流（电流由一条线流入另一条线流出）。在这种由单一磁芯绕制的共模扼流圈中，差模电流产生的磁场互相抵消，因此可以使用较小的磁芯，因为其中的储能很小。

许多为离线式电源设计的共模扼流圈采用空间上分离的线圈绕成，这种结构增加了一定的差模电感，这有助于降低传导型差模噪声。由于磁芯同时穿过两组线圈，所以由差模电流和差模电感产生的磁场主要存在于空气中而非磁芯中，这会导致电磁辐射。

产生于电源所带负载的共模噪声会经由变压器中的分布电容 (C_{p2A}, C_{p2B})，穿过电源向交流电网传播。在变压器中增加法拉第屏蔽 (初、次级之间的接地层) 可以降低这种噪声 (见图 4(b))。

* 变压器绕组间分布电容的共模噪声

屏蔽层的引入在初级和次级线圈与地之间分别形成了分布电容，这些电容将共模电流旁路到地电场或磁场，而不再穿过变压器。

4.3 关于辐射噪声 (电场或磁场噪声形式) 的抑制

需要说明的是，正如传导噪声总是以电压或电流的形式出现，辐射噪声则是表现为电场或磁场的形式。然而，由于电磁场存在于空间而非导体中，因此也就没有差分或共模之别。电场存在于两个电位之间的空间中，磁场围绕通过空间的电流而存在。两种场可存在于一个电路中，例如电容就是以电场的形式储能而电感 / 变压器则以磁场的形式储存 / 耦合能量。那么如何抑制辐射噪声呢？值此先对电场或磁场的理念作分析。

* 电场噪声的抑制离不开设置接地层的布局

由于电场存在于两个具有不同电位的表面或实体之间，因此，只需要用一个接地的防护罩将设备屏蔽起来，就可以相对容易地将设备内部产生的电场噪声限制在屏蔽罩内部。这种屏蔽措施已被广泛用于监视器、示波器、开关电源以及其它具有大幅度电压摆动的设备。另外一种通

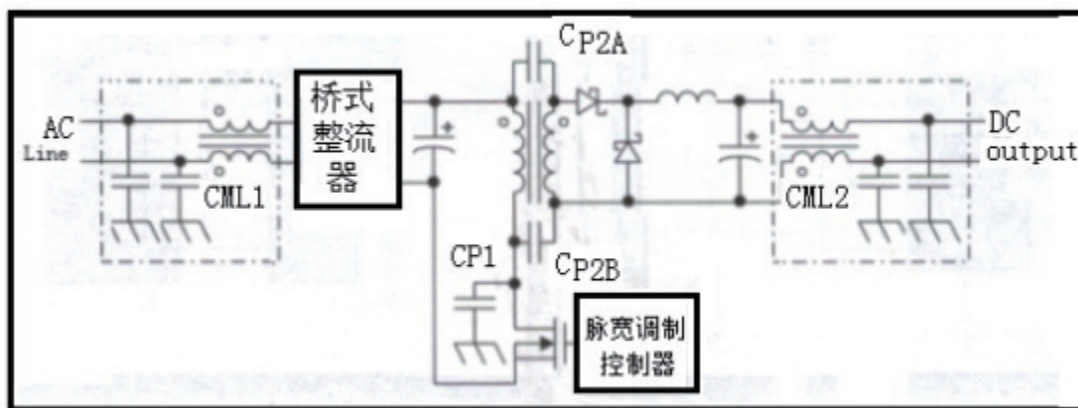


图 4 (a) 在这个典型的离线式电源中，共模滤波器可降低输入和输出两侧的噪声

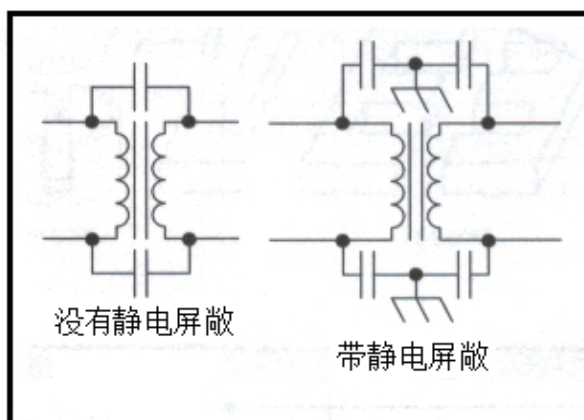


图 4 (b) 初级和次级之间的法拉第屏蔽可以阻断通过

行的做法是在线路板上设置接地层。电场强度正比于表面之间的电位差，并反比于它们之间的距离。举例来讲，电场可存在于源和附近的接地层之间。这样，利用多层线路板，在电路或线条与高电位之间设置一个接地层，就可以对电场起到屏蔽作用。

不过，在采用接地层时还应注意高压线路中的容性负载。电容器储能于电场中，这样，当靠近一个电容器设置接地层时就在导体和地之间形成一个电容，导体 L 的 dv/dt 信号会产生大传导电流到地，这样，在控制辐射噪声的同时却降低了传导噪声性能。

如果出现电场散射，来源最有可能于系统中电位最高的地方，在电源和开关调节器中，应该注意开关晶体管和整流器，因为它们通常具有高电位，而且由于带有散热器，也具有比较大的面积。表面安装器件同样存在这个问题，因为它们常常要求大面积线路板覆铜来帮助散热，这种情况下，还应注意大面积散热面和接地层或电源层之间的分布电容。

*** 降低磁辐射的正确布局与有效举措**

电场相对比较容易控制，但磁场就完全不同了。采用高导磁率的物质将电路封闭起来可以起到类似的屏蔽作用，但是这种方法实现起来非常困难而且昂贵。通常来讲，控

制磁场散射最好的办法就是在源头将其减至最小。一般情况下，这就要求选择那些磁辐射小的电感和变压器。同样重要的还有，在进行电路板布局和连接线配置时要注意最大限度减小电流网络的尺寸，尤其是那些载有大电流的回路。因大电流回路不仅向外辐射磁场，它们还增加了导线的电感，这会在载有高频电流的线上引起电压尖刺。

据此采用增加气隙的铁氧体磁芯制作电感器是降低磁辐射的有效举措。

对电路设计者来说往往倾向于选择商品化的变压器和电感。但无论是设计或选择商品化的变压器和电感，应用磁性材料有关技术将有助于设计者对具体应用做出最适当的选择。

降低电感散射的关键是选用高磁导率的材料，以便使磁场局限于磁芯中而不向周围空间散射。所以，为了缩小电感尺寸，常常采用带有气隙的高磁导率磁芯。

根据有关实验资料可知，铁氧体磁芯（或其他类型的高磁导率磁芯）增加气隙后会迫使磁通透出磁芯，使电感或变压器储能于器件用周围的磁场中。为这个铁氧体磁芯增加气隙将使斜率降低，同时降低了等效磁导率和相关的电感。电感因斜率的变化而降低，而最大电流因斜率的变化而增加，同时饱和磁感应强度 B 保持不变。所以，储存

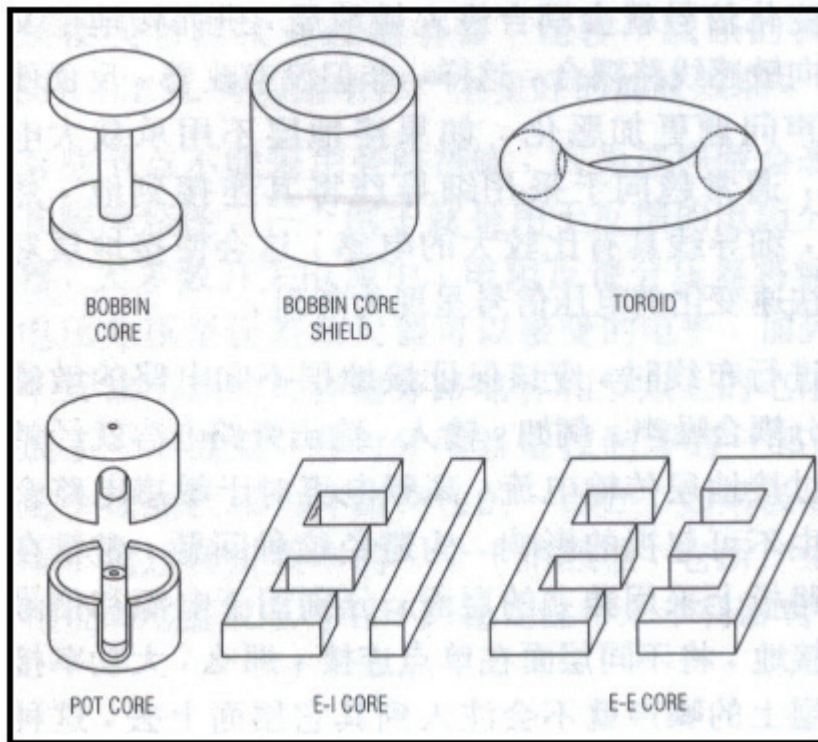


图 5 不同几何形状的磁芯具有不同的储能能力、磁辐射和组装难易程度，它们均可增加气隙

于电感的最大能量($1/2Li^2$)增加了。这种增加也可以通过给电感施加一个电压,然后观察达到饱和 B_{sat} 所需的时间来得到印证。储存于磁芯的能量是 $(V \times i)dt$ 的积分。因为对于带有气隙的磁芯,同样的电压和时间下总是具有更高的电流,所以相应的储能也更高。

有些制造商在轴状磁芯外部套装了一个铁氧体屏蔽罩来降低辐射。这种办法是有效的,但同时也减小了气隙,因而也就降低了磁芯储能。由于铁氧体自身储能不多,通常在磁芯和屏蔽罩之间保留了一个小的气隙,这将使这种类型的电感辐射一部分磁场。不过,在某种可以接受的散射水平下,轴状磁芯在成本和 EMI 之间是一个比较好的折衷。

其它不同形状的磁芯也可以根据应用要求增加气隙(或不加)。例如罐状磁芯、E-I 磁芯和 E-E 磁芯等都具有一个中心柱或轴(见图 5 所示),可以在上面开出一个空气间隙。在磁芯的中心开气隙并用线圈将其完全包围起来,有助于减少气隙向外部空间的磁辐射。这种电感通常更贵一些,因为线圈必须独立于磁芯绕制,磁芯环绕线圈组装。为便于设计和组装,可以购买中轴上预留气隙的磁芯。

分布气隙式磁环的能损有时会比开有气隙的铁氧体磁芯更高一些,这是由于组成芯体的金属颗粒中容易形成涡流,导致磁芯发热而使电源效率降低。由于线圈必须穿过磁环中心,绕制比较困难,所以这种类型的电感也比较贵,线圈绕制可由机器完成,但比起传统类型的绕线机,这种类型的机器更贵而且操作更慢。

有些铁氧体磁环具有非连续的气隙,这种磁芯所产生的磁辐射高于上述分布气隙式磁芯,但典型的带气隙磁环具有比较低的能损,因为它们封闭磁场的能力要优于其它类型的具有非连续气隙的铁氧体磁芯。用线圈包围气隙可以降低磁辐射,而环状磁芯更有助于将磁场封闭于芯体内部。

5 变压器设计应考虑避免漏感产生

变压器具有许多和电感器共有的局限,因为它们采用同样的磁芯绕制而成。除此之外,变比器还有一些独有的特性。实际变压器的特性接近于理想变压器,以正比于绕组匝比的电压比率从初级向次级耦合电压,在变压器等效电路中(见图 6),绕组间的分布电容等效为电容器 C_{WA} 和 C_{WB} 。

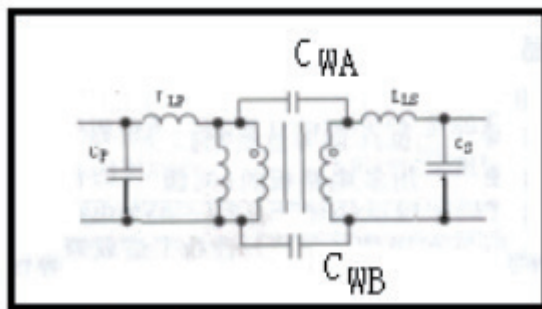


图 6 变压器等效模型中的分布元件使其理想工作特性发生变化

这些因素带来的主要问题是隔离电源中的共模散射问题。绕组电容 C_P 和 C_S 很小,在开关型电源和调节器的工作频率下通常可以忽略。励磁电感 L_M 的作用很重要,因为过高的励磁电流会造成变压器饱和。和电感一样,饱和状态下变压器的磁辐射将会增加。饱和还会造成更高的磁芯能损,更高的温升(有可能引起热失控),以及降低绕组间的耦合度。

漏感是由仅匝链一个绕组而未匝链其它绕组的磁场产生的,虽然在有些耦合式电感器和变压器(就像前面讨论的共模扼流圈)中有意将这个参数设计得比较大,但对于开关电源来讲,漏感 L_{LP} 和 L_{LS} 常常是最令人头痛的寄生元件、同时匝链两个绕组的磁通将两个绕组耦合为一体。所有变压器绕组都环绕磁芯,因此任何漏感都存在于磁芯外部,在空气中,会向外界产生磁辐射。

漏感带来的另外一个问题是,当电流迅速变化时会产生大电压,这在大多数开关电源变压器中有所表现。这种大电压会使开关晶体管或整流器过压而损坏。吸收缓冲器(通常是一只串联的电阻和电容)常被用来耗散这种电压尖峰的能量,而使电压得到控制。另一方面,有些开关器件被设计为可以承受一定的重复性雪崩击穿,能够耗散一定功率,可以不用外部缓冲器。

对于变压器的具体要求和不同的电源拓扑有关。有些拓扑通过变压器直接耦合能量——例如半桥、全桥、推挽式或正激式转换器——要求非常高的励磁电感以防止饱和。这些电路中变压器的初级和次级线圈同时传输电流,直接通过变压器耦合能量。由于只有很少的能量储存于磁芯中,变压器可以做得比较小。这种变压器通常采用没有气隙的铁氧体或其它高磁导率材料的磁芯绕制而成。

下转 168 页