

照明用 LED 驱动电源设计

LED 的排列方式及 LED 光源的规范决定着基本的驱动器要求。LED 驱动器的主要功能就是在一定的工作条件范围下限制流过 LED 的电流，而无论输入及输出电压如何变化。最常用的是采用变压器来进行电气隔离。文中论述了 LED 照明设计需要考虑的因素。

一、LED 驱动器通用要求

驱动 LED 面临着不少挑战，如正向电压会随着温度、电流的变化而变化，而不同个体、不同批次、不同供应商的 LED 正向电压也会有差异；另外，LED 的“色点”也会随着电流及温度的变化而漂移。

另外，应用中通常会使用多颗 LED，这就涉及到多颗 LED 的排列方式问题。各种排列方式中，首选驱动串联的单串 LED，因为这种方式不论正向电压如何变化、输出电压（ V_{out} ）如何“漂移”，均提供极佳的电流匹配性能。

当然，用户也可以采用并联、串联-并联组合及交叉连接等其它排列方式，用于需要“相互匹配的”LED 正向电压的应用，并获得其它优势。如在交叉连接中，如果其中某个 LED 因故障开路，电路中仅有 1 个 LED 的驱动电流会加倍，从而尽量减少对整个电路的影响。

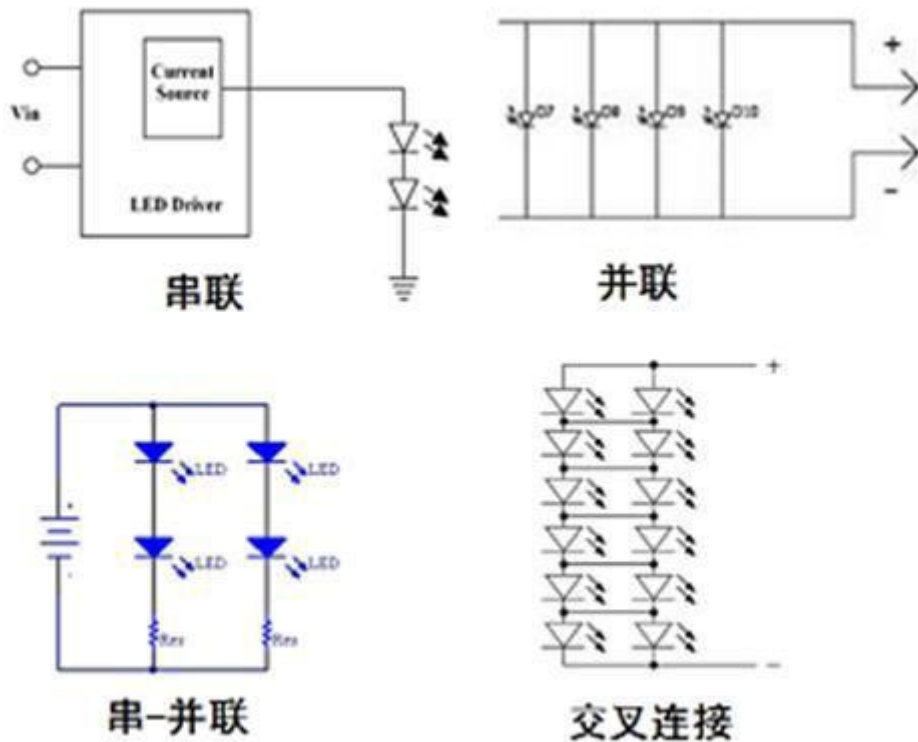


图 1: 常见的 LED 排列方式

LED 的排列方式及 LED 光源的规范决定着基本的驱动器要求。LED 驱动器的主要功能就是在一定的工作条件范围内限制流过 LED 的电流，而无论输入及输出电压如何变化。LED 驱动器基本的工作电路示意图如图 2 所示，其中所谓的“隔离”表示交流线路电压与 LED（即输入与输出）之间没有物理上的电气连接，最常用的是采用变压器来电气隔离，而“非隔离”则没有采用高频变压器来电气隔离。

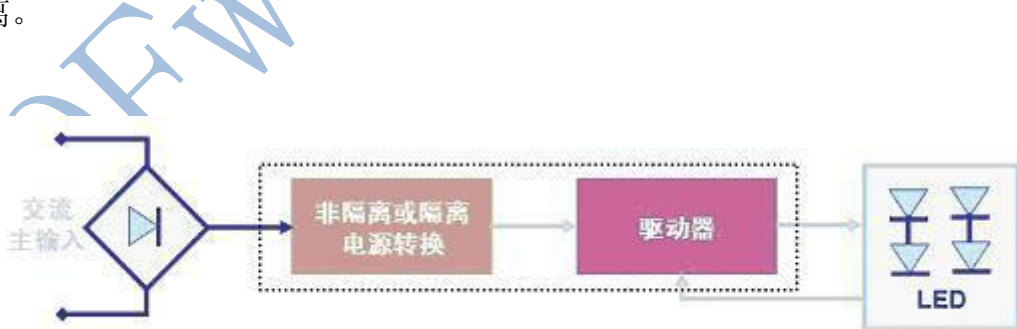


图 2: LED 驱动器的基本工作电路示意图。

值得一提的是，在 LED 照明设计中，AC-DC 电源转换与恒流驱动这两部分电路可以采用不同配置：

1) 整体式 (integral) 配置，即两者融合在一起，均位于照明灯具内，这种配置的优势包括优化能效及简化安装等；

2) 分布式 (distributed) 配置, 即两者单独存在, 这种配置简化安全考虑, 并增加灵活性。

LED 驱动器根据不同的应用要求, 可以采用恒定电压 (CV) 输出工作, 即输出为一定电流范围下钳位的电压; 也可以采用恒定电流 (CC) 输出工作, 输出的设计能严格限定电流; 也可能会采用恒流恒压 (CCCV) 输出工作, 即提供恒定输出功率, 故作为负载的 LED 的正向电压确定其电流。

总的来看, LED 照明设计需要考虑以下几方面的因素:

输出功率: 涉及 LED 正向电压范围、电流及 LED 排列方式等

电源: AC-DC 电源、DC-DC 电源、直接采用 AC 电源驱动

功能要求: 调光要求、调光方式 (模拟、数字或多级)、照明控制

其他要求: 能效、功率因数、尺寸、成本、故障处理 (保护特性)、要遵从的标准及可靠性等

更多考虑因素: 机械连接、安装、维修/替换、寿命周期、物流等

二、LED 驱动电源的拓扑结构

采用 AC-DC 电源的 LED 照明应用中, 电源转换的构建模块包括二极管、开关 (FET)、电感及电容及电阻等分立元件用于执行各自功能, 而脉宽调制 (PWM) 稳压器用于控制电源转换。

电路中通常加入了变压器的隔离型 AC-DC 电源转换包含反激、正激及半桥等拓扑结构, 参见图 3, 其中反激拓扑结构是功率小于 30 W 的中低功率应用的标准选择, 而半桥结构则最适合于提供更高能效/功率密度。就隔离结构中的变压器而言, 其尺寸的大小与开关频率有关, 且多数隔离型 LED 驱动器基本上采用“电子”变压器。

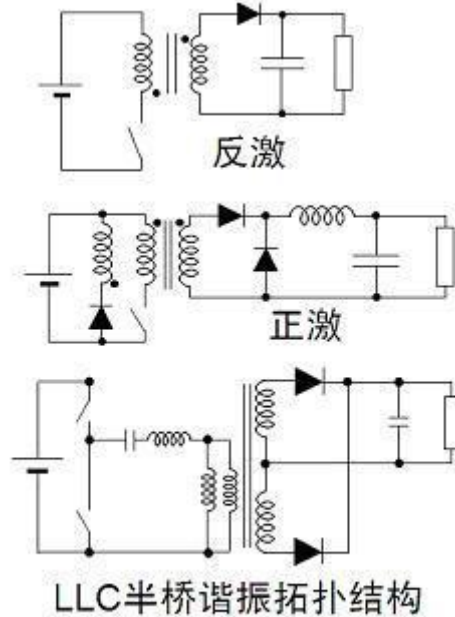


图3: 常见的隔离型拓扑结构。

采用 DC-DC 电源的 LED 照明应用中，可以采用的 LED 驱动方式有电阻型、线性稳压器及开关稳压器等，基本的应用示意图参见图 4。电阻型驱动方式中，调整与 LED 串联的电流检测电阻即可控制 LED 的正向电流，这种驱动方式易于设计、成本低，且没有电磁兼容(EMC)问题，劣势是依赖于电压、需要筛选(bin) LED，且能效较低。

线性稳压器同样易于设计且没有 EMC 问题，还支持电流稳流及过流保护 (fold back)，且提供外部电流设定点，不足在于功率耗散问题，及输入电压要始终高于正向电压，且能效不高。开关稳压器通过 PWM 控制模块不断控制开关 (FET) 的开和关，进而控制电流的流动。

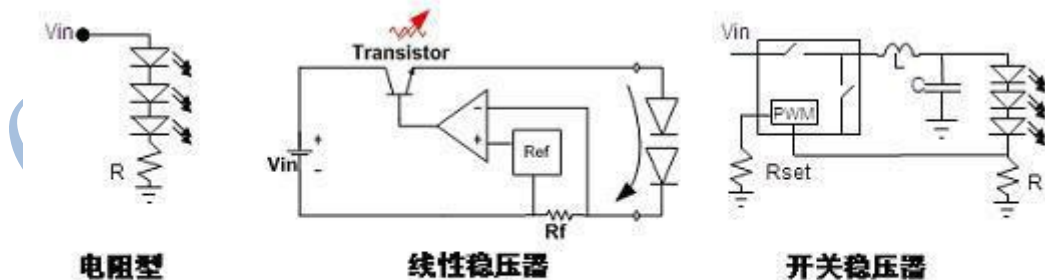


图4: 常见的 DC-DC LED 驱动方式。

开关稳压器具有更高的能效，与电压无关，且能控制亮度，不足则是成本相对较高，复杂度也更高，且存在电磁干扰 (EMI) 问题。LED DC-DC 开关稳压器常见的拓扑结构包括降压 (Buck)、升压 (Boost)、降压-升压 (Buck-Boost) 或单端初级电感转换器 (SEPIC) 等不同类型。

其中，所有工作条件下最低输入电压都大于 LED 串最大电压时采用降压结构，如采用 24 Vdc 驱动 6 颗串联的 LED；与之相反，所有工作条件下最大输入电压都小于最低输出电压时采用升压结构，如采用 12 Vdc 驱动 6 颗串联的 LED；而输入电压与输出电压范围有交迭时可以采用降压-升压或 SEPIC 结构，如采用 12 Vdc 或 12 Vac 驱动 4 颗串联的 LED，但这种结构的成本及能效最不理想。

采用交流电源直接驱动 LED 的方式近年来也获得了一定的发展，其应用示意图参见图 5。这种结构中 LED 串以相反方向排列，工作在半周期，且 LED 在线路电压大于正向电压时才导通。这种结构具有其优势，如避免 AC-DC 转换所带来的功率损耗等。但是，这种结构中 LED 在低频开关，故人眼可能会察觉到闪烁现象。此外，在这种设计中还需要加入 LED 保护措施，使其免受线路浪涌或瞬态的影响。

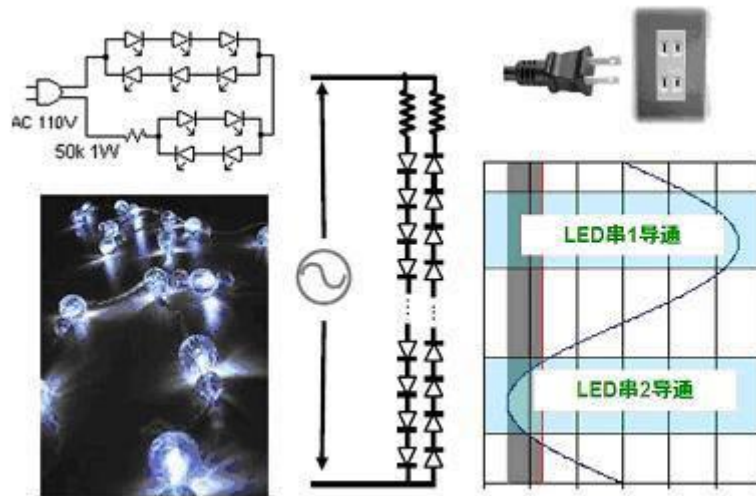


图 5: 直接采用交流驱动 LED 的示意图。

三、功率因数校正

美国能源部 (DOE) “能源之星” (ENERGYSTAR) 固态照明 (SSL) 规范中规定任何功率等级皆须强制提供功率因数校正 (PFC)。这标准适用于一系列特定产品，如嵌灯、橱柜灯及台灯，其中，住宅应用的 LED 驱动器功率因数须大于 0.7，而商业应用中则须大于 0.9；但是，这标准属于自愿性标准。欧盟的 IEC61000-3-2 谐波含量标准中则规定了功率大于 25 W 的照明应用的总谐波失真性能，其最大限制相当于总谐波失真 (THD) 《 35%，而功率因数 (PF) 》 0.94。

虽然不是所有国家都绝对强制要求照明应用中改善功率因数，但某些应用可能有这方面的要求，如公用事业机构大力推动拥有高功率因数的产品在公用设施中的商业应用，此外，公用事业机构购入/维护街灯时，也可以根据他们的意愿来决定是否要求拥有高功率因数 (通常《 0.95+) 。

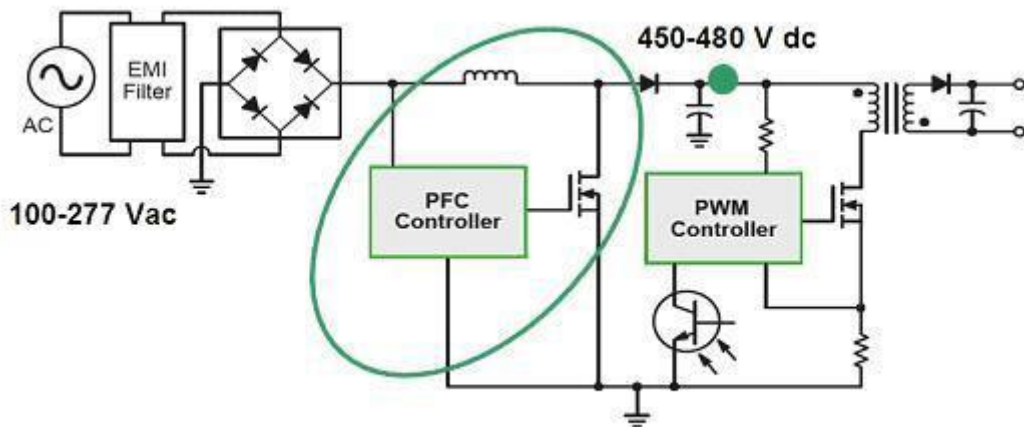


图6: 有源PFC的应用电路示意图。

PFC 技术包括无源 PFC 及有源 PFC 两种。无源 PFC 方案的体积较大, 需要增加额外的元件来更好地改变电流波形, 能够达到约 0.8 或更高的功率因数。其中, 在小于 5 W 至 40 W 的较低功率应用中, 几乎是标准选择的反激式拓扑结构只需要采用无源元件及稍作电路改动, 即可实现高于 0.7 的功率因数。

有源 PFC (见图 6) 通常是作为一个专门的电源转换段增加到电路中来改变输入电流波形。有源 PFC 通常提供升压, 交流 100 至 277 Vac 的宽输入范围下, PFC 输出电压范围达直流 450 至 480 Vdc。如果恰当地设计 PFC 段, 可以提供 91%到 95%的高能效。但增加了有源 PFC, 仍然需要专门的 DC-DC 转换来提供电流稳流。

四、能效问题

LED 照明应用的能效需要结合功率输出来考虑。美国“能源之星”固态照明规范规定了照明器具级的能效, 但并不涉及单独 LED 驱动器的能效要求。如前所述, 采用 AC-DC 电源的 LED 应用可以采用两段式分布拓扑结构, 故可能采用外部 AC-DC 适配器供电。

而“能源之星”的确包含有关单输出外部电源的规范, 其 2.0 版外部电源规范于 2008 年 11 月开始生效, 要求标准工作模式下最低能效达 87%, 而低压工作模式下最低能效达 86%; 在此规范中, 功率大于 100 W 时才要求 PFC。

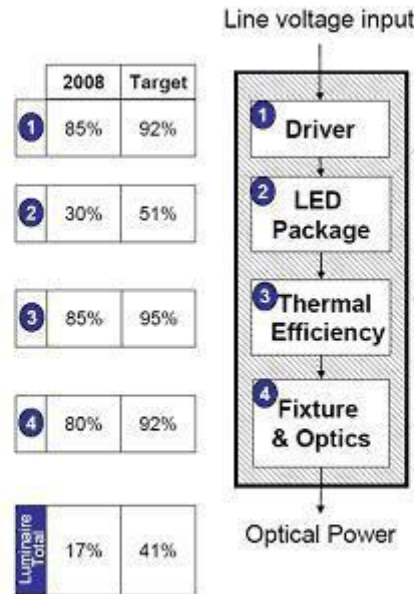


图 7: 美国能源部 2008 年秋季提出的 LED 照明灯具能效研发目标。

而在采用 AC-DC 电源的 LED 应用中，要提供更高的 AC-DC 转换能效，就涉及到成本、尺寸、性能规范及能效等因素之间的折衷问题。例如，若使用更高质量的元件、更低导通阻抗（RDSon），就可降低损耗及改善能效；降低开关频率一般会改善能效，但却会增加系统尺寸。诸如谐振这样新的拓扑结构提供更高能效，却也增加设计及元件的复杂度。如果我们将设计限定在较窄的功率及电压范围，则可以帮助优化能效。

五、驱动器标准

LED 驱动器本身也在不断演进，着重于进一步提高能效、增加功能及功率密度。美国“能源之星”的固态照明规范提出的是照明器具级的能效限制，涉及包括功率因数在内的特定产品要求。而欧盟的 IEC 61347-2-13（5/2006）标准针对采用直流或交流供电的 LED 模块的要求包括：

最大安全特低电压（SELV）工作输出电压 $\leq 25 \text{ V}_{\text{rms}}$ （35.3V Vdc）

不同故障条件下“恰当”/安全的工作

故障时不冒烟或易燃

此外，ANSI C82. xxx LED 驱动器规范仍在制定之中。而在安全性方面，需要遵从 UL、CSA 等标准，如 UL1310（Class 2）、UL 60950、UL1012。此外，LED 照明设计还涉及到产品寿命周期及可靠性问题。