

AN-9744

具有 PFC 功能的智能 LED 灯集成驱动器

引言

FL7701 为 PWM 峰值电流控制器，可用于连续导电模式（CCM）的降压变换器拓扑，具有智能 PFC 功能，采用数字控制算法。FL7701 具有内部自偏压电路，偏压电路为一个采用高压开关器件的电流源。当输入电压施加到 HV 管脚，且位于 25V~450V 之间，FL7701 的 VCC 管脚保持 15.5V_{DC}。FL7701 还具有一个用于稳定工作的 UVLO 电路。当 V_{CC} 电压上升高于 V_{CCST+}，UVLO 电路开始工作。当 V_{CC} 跌落低于 V_{CCST-}，该器件停止工作。

当输入电压处于噪声环境中或出现不稳定时，滞环窗口能够稳定该器件的工作。FL7701 具有一个智能的内部电路，专门处理交流输入条件。如果施加的交流电源为 50Hz 或 60Hz，该器件能够自动改变内部参考电压，在一个内部固定的瞬态响应时间内，适应输入电压条件。当直流电源连接到该器件，内部参考电压立即更新为直流波形。

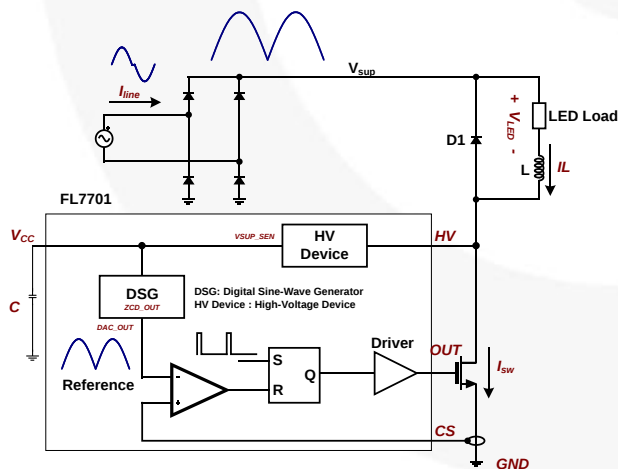


Figure 1. FL7701的基本模块

内部 DAC_OUT 参考信号依赖于 V_{CC} 电压。采用 DAC_OUT 信号和内部时钟 CLK_GEN，FL7701 自动形成一个数字参考信号 DAC_OUT。如果 FL7701 不能检测 ZCD_OUT 信号，其内部参考信号会出现异常。在这种情况下，将会引起灯光闪烁。

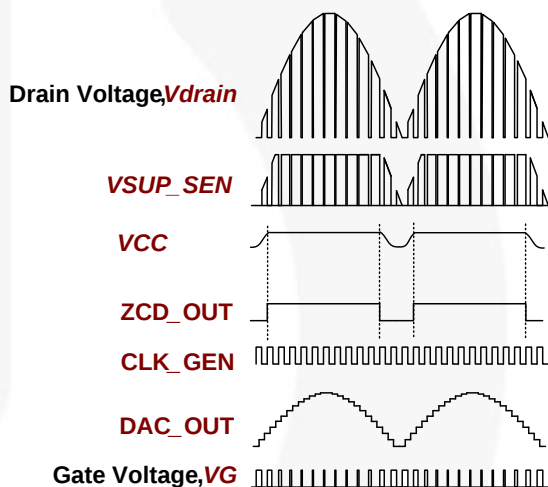


Figure 2. FL7701工作原理

软启动功能

FL7701 具有内部软启动功能，可以降低上电阶段的突波电流。当该器件启动工作时，在大约 7 个周期内，内部参考电压缓慢上升到达一个固定值。在完成该瞬态周期后，内部参考电压固定在一个直流水平。在这段时间内，该器件持续寻找来自 VCC 管脚的输入电压相位信息。如果成功地找到有关相位信息，该器件自动跟随输入电压的参考波形，在瞬态时间内，该过程一般需要 6 个周期。如果不能成功地找到有关相位信息，则该器件保持直流参考电平。

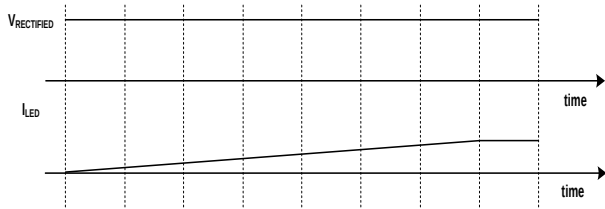


Figure 3. 直流输入条件

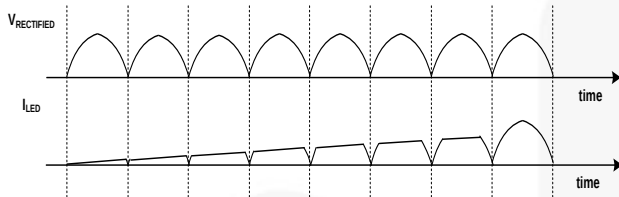


Figure 4. 交流输入条件

内部功率因数(PF)功能

在 FL7701 的应用电路中，二极管整流桥后级电路不采用电解电容，因为该系统设计要求会产生高脉冲波形输入电流。该脉冲波形电流包含多种谐波电流成分，因此整个系统不会获得较高的功率因数。为了获得高功率因数，FL7701 采用了一种不同的方法。

FL7701 具有一个智能的内部 PFC 功能，无需额外检测管脚或附加其它器件。该器件的 VCC 管脚无需采用用来稳定电源电压的大电容。

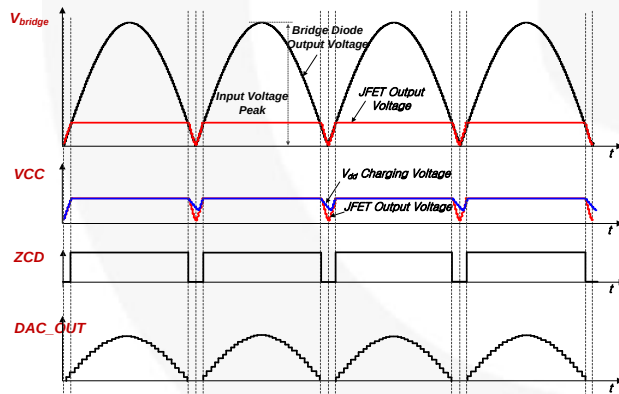
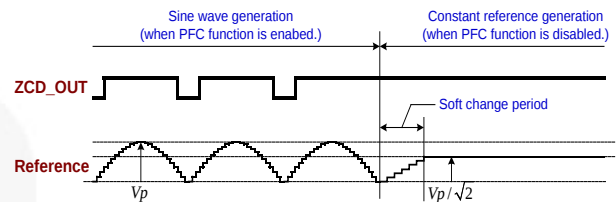


Figure 5. 内部PFC功能

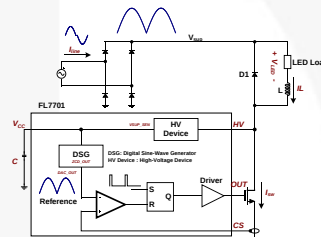
FL7701 检测 V_{CC} 拐点，获得过零检测(ZCD)信号。该信号为内部定时信号，用于产生 DAC_OUT。一般情况下，VCC 管脚上连接一个电容，除了稳定电压，还用做低通滤波器，或用做抑噪滤波器。这样在 VCC 管脚上就增强了获得稳定计时信号的能力，不论其他管脚是否出现噪声。

为了精确和可靠地计算 VCC 管脚上的输入电压相位，FL7701 采用了数字技术 (Σ/Δ 调制/解调)。为了完成该数字技术，FL7701 采用了一种新的、与输入电压相位相同的参考电压，如图 6 所示。



该信号输入到最终比较器，与管脚 1 处来自检测电阻的电流信息进行比较。结果是，在直流输入条件下，FL7701 作为常规峰值电流控制器，产生高功率因数，如图 6 所示。交流输入模式与直流输入模式之间的关系为 $\sqrt{2}$ 。

输出频率编程



通过采用 RT 电阻或在 RT 管脚开路条件下，FL7701 可对输出频率编程。当 RT 管脚开路时，FL7701 具有固定的输出频率，大约为 45kHz。为了提升系统的可靠性，在 RT 开路条件下，推荐采用一只小于 100nF 的低值电容。输出频率与 RT 电阻之间的关系为：

$$f_{osc} = \frac{2.02 \times 10^9}{RT} \text{ [Hz]} \quad (1)$$

输出开率保护

推荐的接线方式如图 7 所示。FL7701 具有一个高压电源电路，采用高压工艺器件，能够自偏压。如果没有 LED 连接到该芯片，该芯片不能启动。

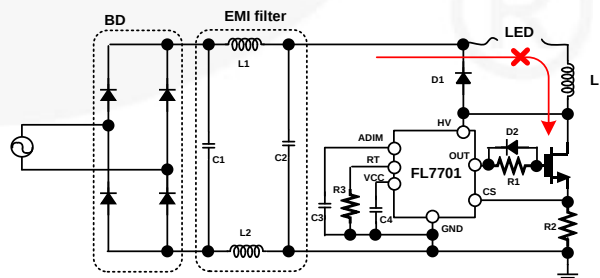


Figure 7. LED开路条件

电感短路保护

FL7701 具有异常过流保护(AOCP)功能。如果 LED 电流检测电阻的电压高于 2.5V, 即使处于前沿消隐时间(LEB) 350ns 内, 该芯片也会停止工作。

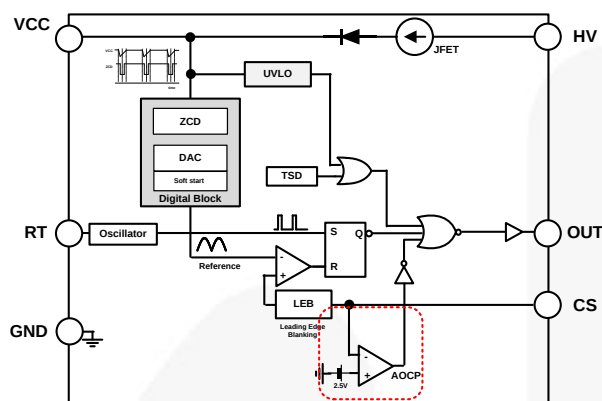


Figure 8. AOCP 功能

模拟调光功能

通过改变 ADIM 管脚的电压值, 模拟调光 (ADIM)功能可以调节输出 LED 电流。

应用信息

FL7701 为新颖的降压变换器控制器, 专门为 LED 应用而设计。工作时可以输入直流电压或交流电压, 不受电压类型限制, 输入电压等级可以达到交流 305V_{AC} 或直流 400V_{DC}。

表 1 给出了一个采用 FL7701 器件的设计目标实例。

Table 1. 目标设计指标

项目	指标	备注
频率	45kHz	
输出电压	35	V _F =3.5V,
输出 LED 电流	0.3	Rms 有效值
输出 LED 电流	0.5	Peak 峰值
输入电压 (最大值)	220	V _{AC(rms)}

第 1 步: 最小占空比

FL7701 具有一个固定的内部占空比范围, 即 2% ~ 50%之间。该范围取决于输入电压和串联 LED 的数量。

$$D_{\min} = \frac{nV_F}{\eta \times V_{in(\max)}} \quad (2)$$

式中, η 表示系统效率; $V_{in(\max)}$ 表示最大输入电压; V_F 表示 LED 的正向电压; n 表示串联 LED 的数目。

例如, 如果 $V_{in(\max)} = 220V$, 串联 LED 的数目为 10, 则最小占空比为:

$$D_{\min} = \frac{10 \times 3.5}{0.85 \times \sqrt{2} \times 220} = 0.132$$

第 2 步: 最大占空比

类似第 1 步, 计算最大占空比为:

$$D_{\max} = \frac{nV_F}{\eta \times V_{in(\min)}} \quad (3)$$

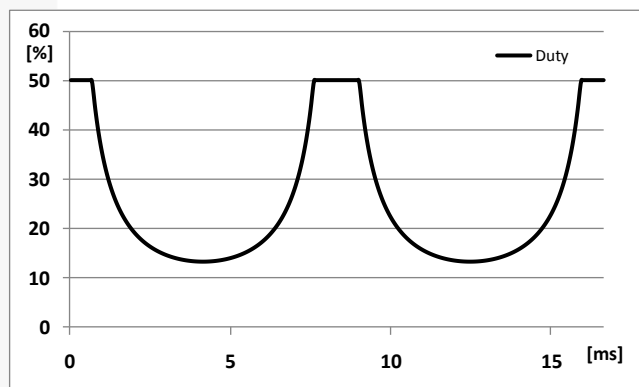


Figure 9. 占空比随时间变化

FL7701 的最大占空比为 50%, 可以防止出现次谐波不稳定性。假定最小输入电压时占空比为 50%。采用式 2, 重新计算可得 CCM 模式下的最小输入电压为:

$$V_{in(\min)} = \frac{nV_F}{\eta \times D} = \frac{35}{0.85 \times 0.5} = 82.35[V] \quad (4)$$

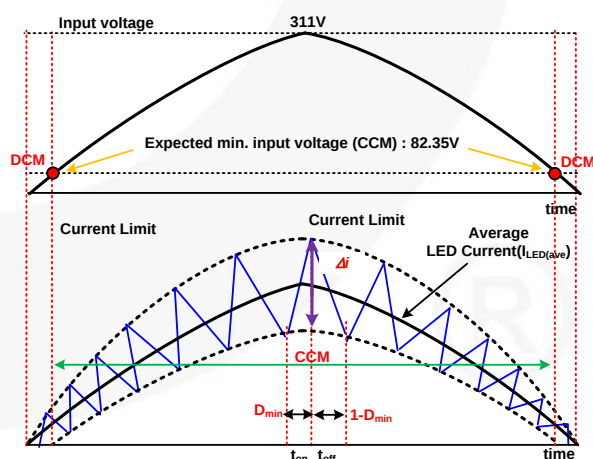


Figure 10. 估计波形

第三步：最大通/断时间

FL7701 具有内部固定的最大占空比，大约为 50%，可以防止次谐波不稳定性。假定最大通/断时间。例如，在 45kHz 工作条件下，最大通/断时间为：

$$t_{on} = t_{off} = \frac{1}{2f_s} = \frac{1}{90000} = 11.11 \text{ } [\mu\text{s}]$$

第四步：计算 LED 电流纹波 ΔI

图 11 给出了一种 FL7701 应用的典型 LED 电流波形。为了获得稳定或线性 LED 电流，该器件应该工作在 CCM 模式。

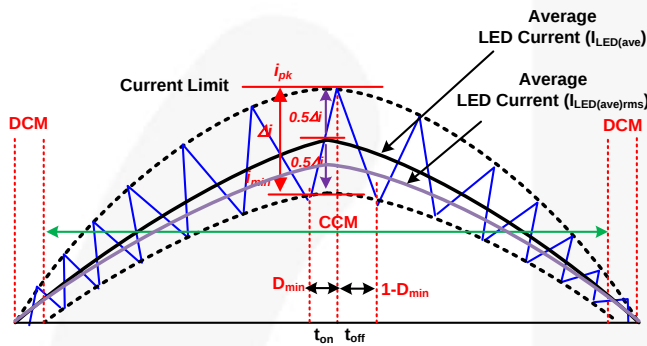


Figure 11. LED 电流的目标波形

采用图 11 所示的典型 LED 电流波形，可推导如下公式：

$$I_{pk} = I_{LED(ave)} + \frac{\Delta I}{2} \text{ or } I_{min} = I_{LED(ave)} - \frac{\Delta I}{2} \quad (5)$$

则 LED 纹波电流定义为：

$$\Delta I = 2(I_{pk} - \sqrt{2}I_{LED(ave)}) \text{ or } \Delta I = 2(\sqrt{2}I_{LED(ave)} - I_{min}) \quad (6)$$

式中， $I_{LED(ave)}$ 等于 I_{LEDrms} 。

参见表 1，LED 目标电流均值定义为 0.3A，LED 峰值电流设定为 0.5A，则 LED 电流纹波为：

$$\Delta I = 2(I_{pk} - \sqrt{2}I_{LED(ave)}) = 2(0.5 - 0.4242) = 0.1516 \text{ [A]}$$

第五步：电感量

采用第 4 步，推导电感的最小感值为：

$$L = \frac{(V_{in(max)} \times D_{min})(1 - D_{min})}{f_s \times \Delta I} \quad (7)$$

在式 10 中，期望的 LED 电流均值始终处于 LED 峰值 500mA 与 LED 最小电流之间，LED 电流峰值受限制于

该器件本身。采用该特性，可得期望输出电流纹波范围 (ΔI) 时的电感取值为：

$$L = \frac{(V_{IN(max)} \times D_{min})(1 - D_{min})}{f_s \times \Delta I} = \frac{\sqrt{2} \times 220 \times 0.132 \times (1 - 0.132)}{45000 \times 0.1516} = 5.22 \text{ [mH]}$$

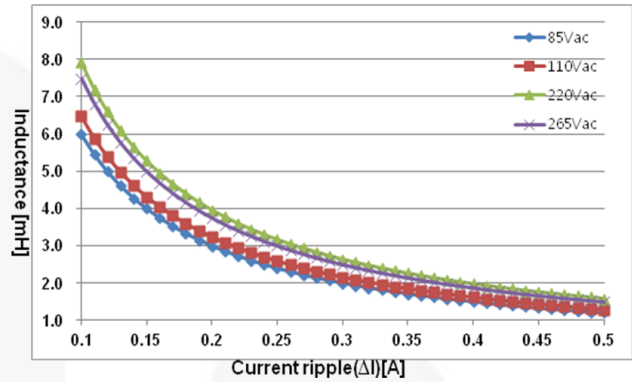


Figure 12. 电流纹波(ΔI)相对电感量的关系曲线

因此，最小电流为 0.19A。

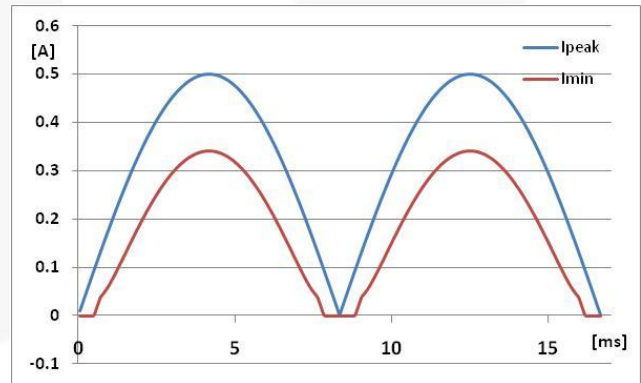


Figure 13. 期望的波形

结果，假定期望的输出和输入功率分别为：

$$P_{LED} = V_{LED} \times I_{LED(ave)} = 10.15 \text{ [W]}$$

$$P_{INPUT} = \frac{P_{LED}}{\eta} = 11.94 \text{ [W]}$$

第六步：检测用电阻

FL7701 逐脉冲限流功能可以保护该器件和整个系统。计算检测电阻的阻值为：

$$R = \frac{0.5}{I_{pk}} = 1 \text{ } [\Omega] \quad (8)$$

即使考虑峰值电流时的功耗，额定功率低于 0.25W。

第七步：计算能量处理能力(w-s)：

$$Energy = \frac{LI_{pk}^2}{2} = \frac{(4.66 \times 10^{-3})(0.5^2)}{2} = 0.000583 [w-s] \quad (9)$$

第八步：计算电气条件 K_e

例如，如果 10eas, 1W LED，产生 12.2W 输出功率 ($V_F=3.5V$, $I_{LED(rms)}=0.35A$)，可以建立公式为：

$$K_e = 0.145 \times P_o \times B_m^2 \times 10^{-4}$$

$$= 0.145 \times 12.2 \times 0.4^2 \times 10^{-4} = 0.0000283$$

式中 P_o 表示目标输出功率， B_m 表示工作磁通密度[T]。

第九步：计算调节电感 α

调整率可以表示为电感铜耗的函数：

$$\alpha = \frac{P_{loss@copper}}{P_o} \times 100 [\%] \quad (10)$$

假定该调整率，在第 1 步 α 已经得到指定，这是因为系统损耗与系统效率之间密切相关。

$$P_{loss@copper} \leq (1-\eta)P_{in} = \eta(1-\eta)P_o = 1.55 [W] \quad (11)$$

因此，计算调整率为：

$$\alpha \leq \frac{P_{loss@copper}}{P_o} \times 100 = \frac{1.55}{12.2} \times 100 = 12.7 [\%] \quad (12)$$

在本设计中，选择 10%，而不用 12.7%，原因是，本应用中存在另一个功耗因素，即 P_{FRD} 或 $P_{switching}$ 。

第十步：计算磁芯几何尺寸, K_g

计算磁性的几何尺寸：

$$K_g = \frac{(Energy)^2}{K_e \alpha} = \frac{0.000583^2}{0.0000283 \times 10} = 0.000012 [cm^5] \quad (13)$$

第十一步：选择磁芯

登录磁芯制造商网站，关注磁芯信息，选择一个几何尺寸 K_g 匹配的磁芯，(参见表 2)。

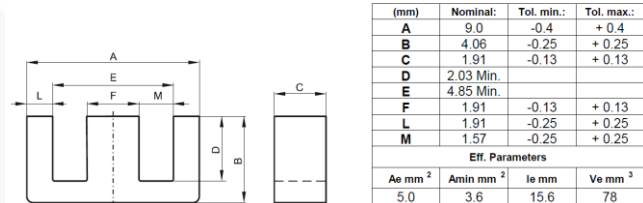
Table 2. 可选磁芯信息

磁件型号	MLT[cm]	Ac[cm ²]	Wa[cm ²]	Ap[cm ⁴]	Kg[cm ⁵]
EFD-10	1.82	0.0650	0.1163	0.007556	0.000108
EPC-40506	1.085	0.0410	0.0198	0.0008131	0.000123
EE-40904 (Mag)	1.664	0.036	0.064	0.002304	0.000020
EE0908S (Samhwa)		0.0253	0.0253	0.0027	
EE-41205 (Mag)		0.202	0.148	0.03	
EE1312S (Samhwa)		0.153	0.349	0.0253	

说明：

1. Mag(magnetic): www.mag-inc.com
2. Samhwa: www.samwha.co.kr/electronics/

根据表 2，选择大于 EFD-10 的磁芯，防止磁芯饱和。在众多磁芯类型中，由于成本低和外形常用，EE 型磁芯最受青睐。本设计中选择 EE 型磁芯。

**Figure 14. 可用最小磁芯尺寸(EE-40904(Mag))****第十二步：计算匝数, N**

对于确定匝数条件且没有气隙条件，如果具有熟知的 AL 估计值，则选择磁芯匝数为：

$$N = \sqrt{\frac{L}{AL}} \quad [T] \quad \text{或} \quad AL = \frac{L}{N^2} \quad (14)$$

增加磁芯之间气隙，可以防止磁芯饱和。采用一定的气隙条件，得到真正的 AL 值。从表 2 中找出一种可行的磁芯。但是相比第 11 步的计算值，所选磁芯应该具有一个较大的 K_g 值。在本设计步骤中，选择磁芯 EE1312S，这是因为该磁件便于在市场上选购。采用 EE1312S，三层绝缘胶带构成气隙，缠绕 10 匝，测得感值 8.3μH。因此，当采用三层绝缘胶带时，计算新的 AL 值为：

$$AL_{new} = \frac{L}{N^2} = 0.83 \times 10^{-6}$$

采用新的 AL 值，计算电感所需匝数为：

$$N = \sqrt{\frac{L}{AL}} = \sqrt{\frac{4.66 \times 10^{-3}}{0.83 \times 10^{-6}}} = 74.92 [T]$$

在本设计中，选择 75 匝。

第十三步：计算电流密度

采用窗口利用系数 $k_u=0.4$ ，计算电流密度 J 为：

$$J = \frac{NI_{LED(AVE)rms}}{W_a K_u} = \frac{75 \times 0.29}{0.0253 \times 0.4} = 2149.20$$

第 14 步：计算所需裸线截面 $A_{w(B)}$

$$A_{w(B)} = \frac{I_{LED(AVE)rms}}{J} = \frac{0.29}{2149.20} = 0.000134 [cm^2]$$

第 15 步：计算趋肤深度 γ

趋肤深度即导线半径为：

$$\gamma = \frac{6.62}{\sqrt{f_s}} = 0.031 \text{ [cm]}$$

第 16 步：计算导线截面

$$wire_A = \pi \times r^2 = 3.14 \times 0.031 = 0.0030 \text{ [cm}^2\text{]}$$

第 17 步：选择导线

比较第 14 步与第 16 步的结果，如果第 16 步的结果大于第 14 步的结果，无需采用多股线。

第 18 步：选择线型

选择具有所需截面的导线，采用表 3 所示的 AWG 35，本例中采用单股线。

Table 3. 线规表

	裸线截面 [cm ²]	强化绝缘[cm ²]	线径[mm]
34	0.00002011	0.0002863	0.16
35	0.0001589	0.0002268	0.14
36	0.0001266	0.001813	0.127

Table 4. 设计结果

选定磁芯	EE1312S
匝数	75
气隙	3 层
导线	AWG35/0.14mm

系统校验

图 15 给出了 FL7701 系统的推荐电路, 仅包含少量器件。

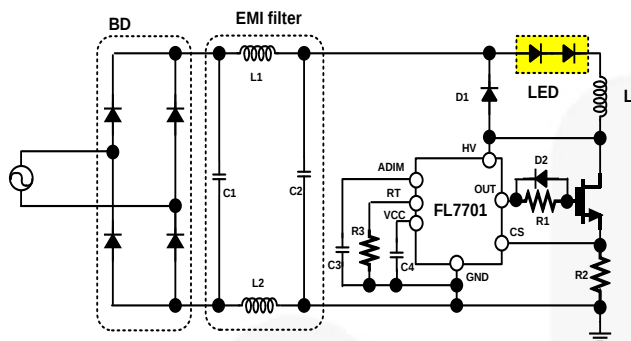


Figure 15. 测试电路

图 16 和图 17 给出了在直流和交流输入条件下 220V 且带 10 只 LED 时 FL7701 应用的启动波形

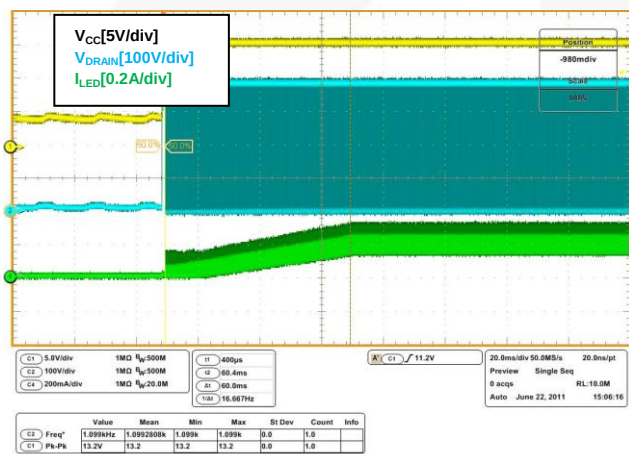


Figure 16. 直流输入条件下的软启动性能

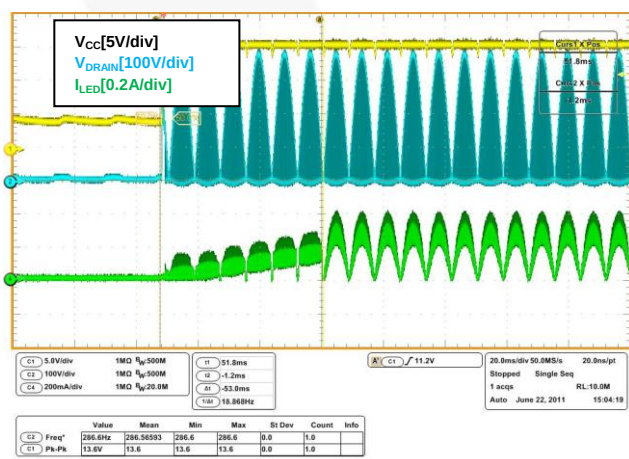


Figure 17. 交流输入条件下的软启动性能

图 18 和图 19 给出了随着输入电压频率由高频到低频, 再到高频变化的 FL7701 性能。

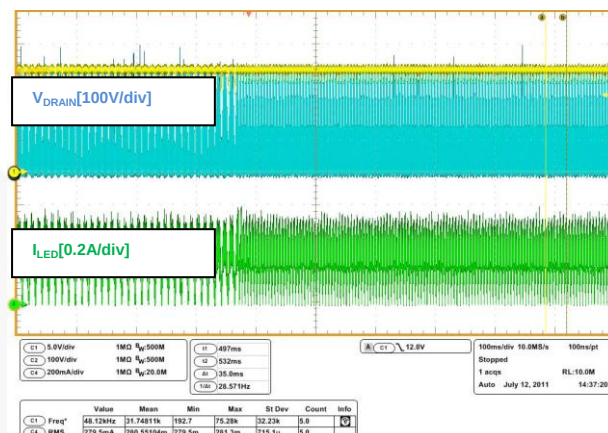


Figure 18. 输入电源变化: 45Hz 至 100Hz

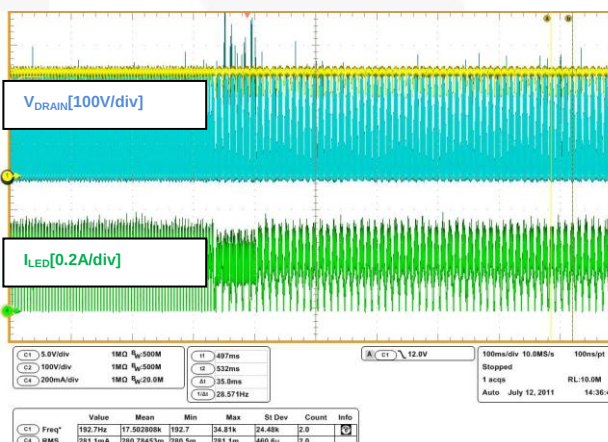


Figure 19. 输入电源变化: 100Hz 至 45Hz

图 20 给出了通过改变 V_{ADIM} 的模拟调光性能。随着控制电压的改变, 输出 LED 电流相应变化。

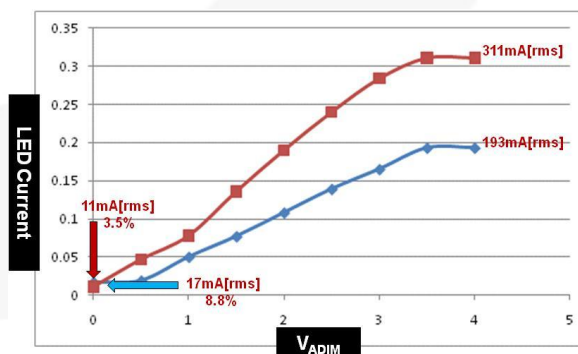


Figure 20. V_{ADIM} 相对LED电流的关系

图 21 给出了 AOCP 性能的典型功能。FL7701 能够逐脉冲地限制输出 LED 电流，为排除电流噪声影响，采用了前沿消隐（LEB）技术。虽然该集成电路能够逐脉冲地限制输出 LED 电流，也不能够防止由电感短路引起的突波电流。为了杜绝这类异常工况，该集成电路设计了 AOCP 功能，实现了系统保护。

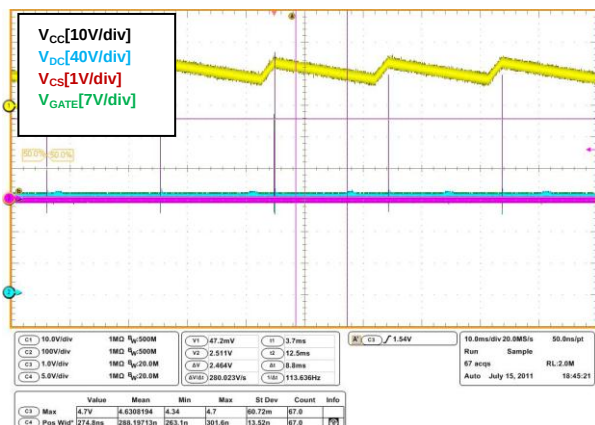


Figure 21. AOCP 功能

图 22 给出了 FL7701 系统的典型波形。LED 电流的相位与输入电压源、整流后正弦波形相同，

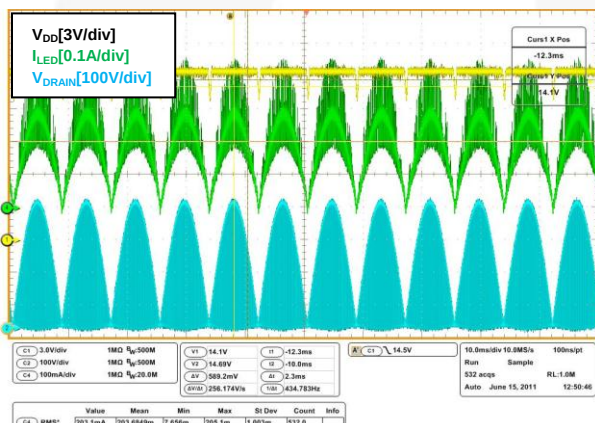


Figure 22. 典型的工作波形

设计提示

LED 电流变化

图 23 给出了推荐的、可获得高功率因数的电路波形。在这种条件下，每隔半个周期，LED 电流为零一次。

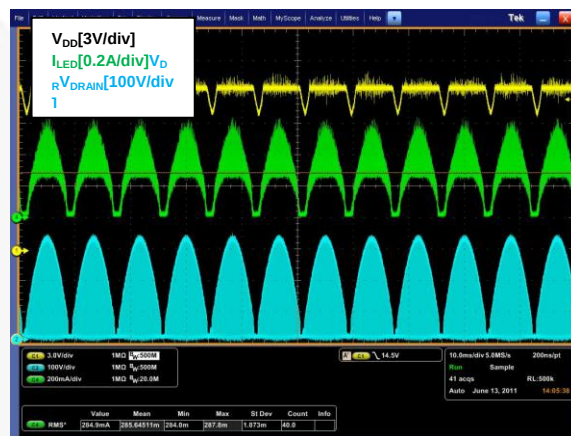


Figure 23. 典型波形

为解决该问题，增加一只电解电容且与 LED 负载并联，如图 24 所示。该电容提供了一个真实的直流 LED 电流。

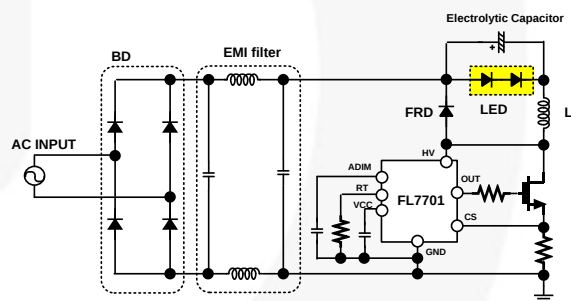


Figure 24. 采用电解电容的电路

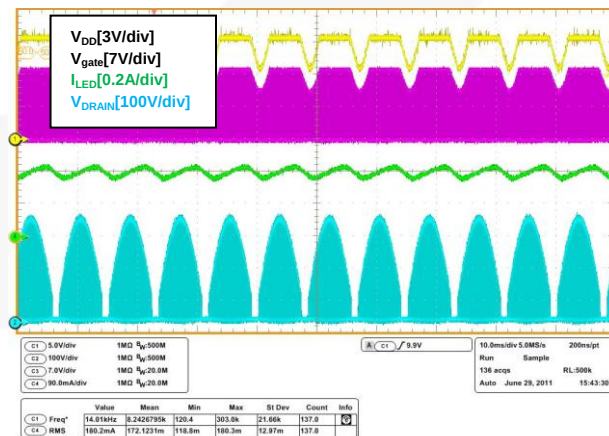


Figure 25. 带有大电容时的典型波形

增强系统可靠性

在噪声条件下，为增强系统的可靠性，在 RT 和 ADIM 管脚处增加一只低于 100pF 的小电容。在正常条件下，没有必要采用这些器件。

PCB 布局指南

PCB 布局相当重要，这是因为该集成电路一般用于**改装灯具应用**，要求非常小的产品尺寸。该集成电路可能受到噪声影响，因此必须谨慎地遵循 PCB 布局指南。

- 在外部供电路径上确定 IC 位置。
- 分离功率地与信号地
- V_{CC} 电容尽可能靠近 VCC 管脚布置。

相关数据表

[*FL7701 — Smart LED Lamp Driver IC with PFC Function*](#)

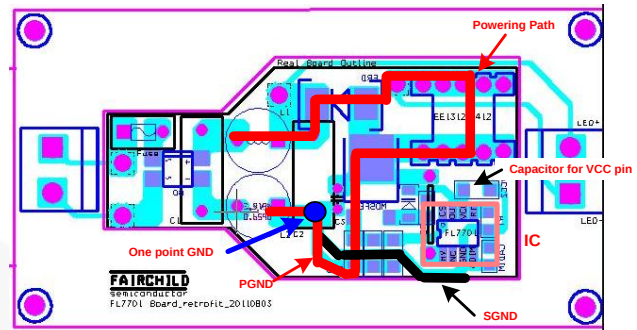


Figure 26. LED布局范例

DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION, OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION.

As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, or (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in significant injury 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.