

AN-9745

采用FL7730的TRIAC调光LED驱动器设计指南

引言

LED照明是一种理想的照明光源，可以取代传统的照明系统，例如荧光灯和白炽灯。特别是在传统的TRIAC调光灯体系中，已经投入了大量的研究，试图开发一种兼容TRIAC调光器的LED灯泡。因为白炽灯光源消耗功率大，而且寿命短，所以LED灯泡便成为其理想的替代品，具有功耗非常低、寿命非常长等优势。

对于TRIAC调光LED灯泡，目前最大的问题在于调光器的兼容性。传统TRIAC调光器的原始设计是要处理数百瓦白炽灯泡消耗的功率。消耗功率小于20W的LED灯泡，会和采用由大功率开关器件构成的调光器产生相互影响。如果调光器和LED灯泡的相互影响不稳定，会出现可见闪烁。

为了防止闪烁，需要考虑一些特别的要求。TRIAC调光器需要在TRIAC触发后能够擎住电流，且在触发后的导通期间能够维持电流。如果不能满足这两种电流，TRIAC调光器会出现误触发和LED照明闪烁。图1给出了TRIAC调光器和LED灯泡的接线图。图2给出了在电源周期开始时，TRIAC调光器的电路阻断电源，触发后接通输入电源和LED灯泡。如图3所示，如果流过调光器的擎住电流和维持电流不足，TRIAC调光器将会关断。

对于不同的调光器模型，擎住电流和维持电流也会不同。典型的擎住电流和维持电流范围大约为5~50mA。由于消耗较大的功率，采用白炽灯照明时，不会出现这些工作要求。单只LED灯泡的功率输出一般小于20W，因此在整个电源周期中单只LED灯泡不能维持所需电流量。

本应用说明书提供了TRIAC调光LED灯泡电路板设计的实用指南。在描述的无源和有源泄放设计指南中，详细地说明了如何保持擎住电流和维持电流，而不出现闪烁现象。由于减少了外部器件的数量，有源阻尼设计能够改善效率。针对功率因数（PF）、总谐波畸变率（THD）以及EMI等方面，输入滤波器设计一节讲述了滤波元件的滤波效果。

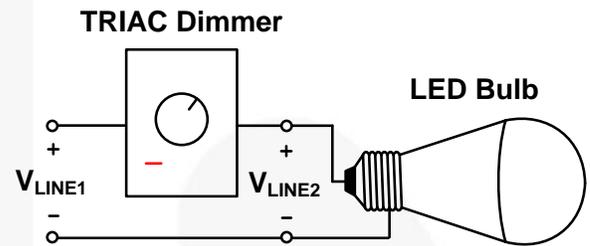


Figure 1. TRIAC 调光器和LED灯泡

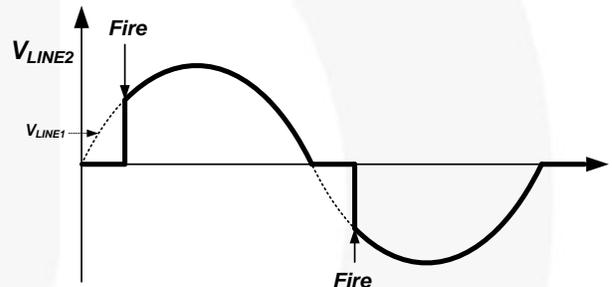


Figure 2. 擎住电流和维持电流足够时调光器工作

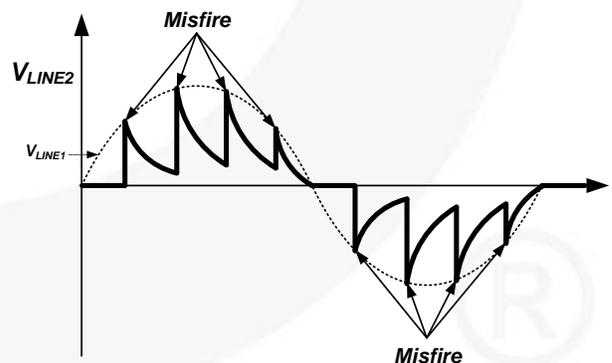


Figure 3. 擎住电流和维持电流不足时调光器工作

1. 无源泄放设计

设计无源泄放电路是为了提供擎住电流和维持电流，消除误触发和闪烁。图4 给出了采用无源泄放电路的电路板原理。

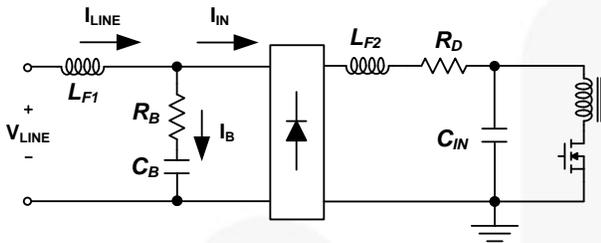


Figure 4. 采用无源泄放电路的LED驱动器原理

所谓无源泄放器是由电阻(R_B) 和电容(C_B)构成。 L_{F1} 和 L_{F2} 为输入滤波电感。 C_{IN} 为输入滤波电容， R_D 为阻尼电阻。

在调光电路板设计中，如果电容并联在电源线之间，电阻(ex. R_B , R_D)需要与电容(ex. C_B , C_{IN})串联。如果不串联电阻，由于调光器触发时电容的快速充电作用，将会出现较高的电压和电流尖峰。电流尖峰将会破坏TRIAC调光器，特别当多个LED灯泡并联时尤为如此，因为来自每个LED灯泡的电流尖峰之和将会超过TRIAC调光器的额定电流。电流尖峰之后会出现电流振荡，由于振荡中会出现低于维持电流的负电流，还会引起调光灯误触发。电压尖峰如果超出额定击穿电压，将会破坏外部器件。

无源泄放电路包括几百nF的电容(C_B)，用于提供擎住电流和维持电流。为了消除上述电压与电流尖峰，有必要采用泄放电阻(R_B)阻尼该尖峰。

1.1 无源泄放电容 (C_B)的选择

电容 C_B 大小决定着保持TRIAC开通的泄放电流。对于TRIAC调光，电容 C_B 越大，泄放电流较大，调光控制的稳定性越高。图5和图6给出了较小与较大泄放电容时的电源电流。输入电流(I_{IN})为来自二极管整流桥后的反激变换器的电流。在FL7730的功率因数校正作用下， I_{IN} 与电源电压同相位。 I_B 为泄放电流，电源电流(I_{LINE})为 I_{IN} 与 I_B 之和。

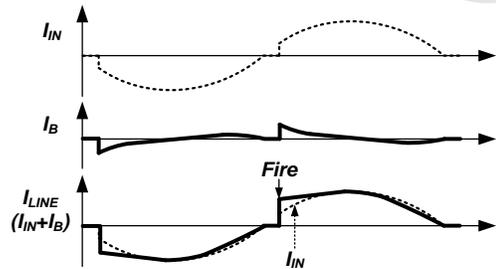


Figure 5. 较小泄放电容(C_B)时的电源电流

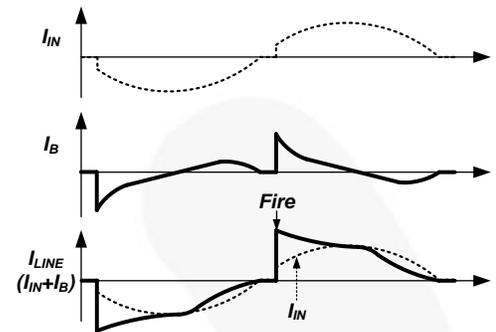


Figure 6. 较大泄放电容(C_B)时的电源电流

I_{LINE} 应该高于擎住电流和维持电流，这是因为 I_{LINE} 直接流过TRIAC调光器。在图5中，触发时的 I_{LINE} 不是足够大，原因是 C_B 较小。TRIAC 调光器将发生误触发，如图3所示。在图6中，在调光器触发时， I_{LINE} 足够高，原因是 C_B 较大，这样可以保持TRIAC正常的导通状态，如图2所示。因此，由于可以提供更高的 I_B ， C_B 较大时的调光器触发效果优于 C_B 较小时。

但是， C_B 较大时也有一个不足，对功率因数 (PF)、总谐波畸变率 (THD) 和效率产生影响。表1 中给出了 C_B 在100nF~200nF之间变化时的性能比较。可见， C_B 对PF和 R_B 功耗的影响较为严重。相比100nF C_B ，220nF C_B 严重地降低了PF，增加了 R_B 功耗，其原因是 C_B 的充电与放电电流过大。

Table 1. C_B 大小对系统性能的影响

测试条件: $V_{IN} = 230V_{AC}$, $P_{OUT} = 8W$, $R_B = 2K\Omega$			
	PF功率因数	THD总谐波 电流畸变率	R_B 的功耗 P_D
C_B [100NF]	0.93	13%	162mW
C_B [220NF]	0.85	11%	684mW

因此，对于无源泄放电路，在选择 C_B 时，应该在TRIAC调光控制和PF大小之间权衡利弊。尤其对于要求高功率因数的高压灯泡应用。权衡这两个因素，确定合理的 C_B 是一个挑战。在选择 C_B 时，第一步是，检查调光器触发

时的 I_B 。通过改变 C_B 大小，校验在调光器触发时是否出现由于 I_B 不足引起的误触发。在调光器触发中没有出现工作异常的 C_B 选择范围内，选择较小的 C_B ，可以获得较高的PF和效率。EMI不受 C_B 的影响，这是由于 R_B 与之串联，阻断了 C_B 对噪声的滤波。

1.2 无源泄放电阻 (R_B) 的选择

R_B 起到阻尼作用，可以抑制由于触发时 C_B 快速充电引起的尖峰电流。图7 给出了 R_B 过大时的电源电流。太大的 R_B 可以显著地阻尼 I_B ，导致 I_B 在触发时低于擎住电流，在受到触发后，TRIAC调光器会出现误触发，出现可见闪烁。

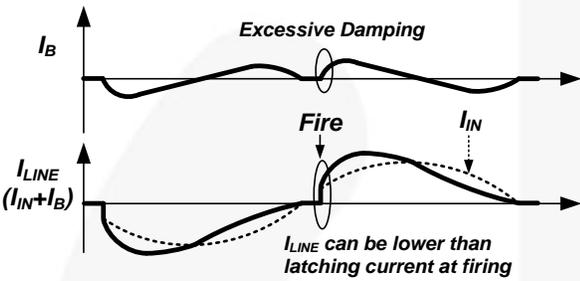


Figure 7. R_B 过大时电源电流

图8 给出了 R_B 过小时的电源电流。 R_B 过小，不能完全阻尼 I_B ，发生电流振荡。振荡电流波动低于负的 I_B ，引起TRIAC调光器的误触发，出现可见闪烁。

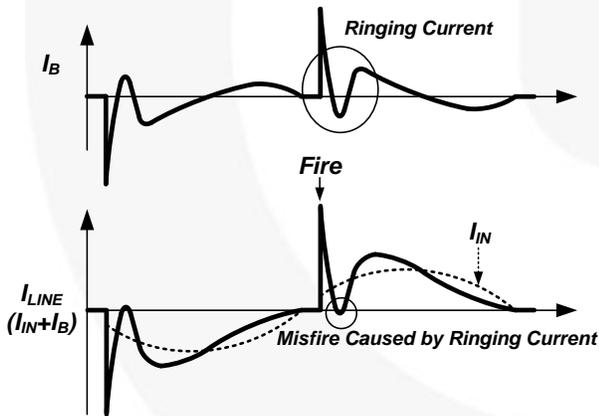


Figure 8. R_B 过小时的电源电流

R_B 关于选择的另外一种考虑是功耗。表2中给出了采用两种不同泄放电阻时的系统性能比较。在系统的指标中， R_B 不影响PF和THD。可见， R_B 越大，引起自身的功耗就越大。

Table 2. R_B 大小对系统性能的影响

测试条件: $V_{IN} = 230V_{AC}$, $P_{OUT} = 8W$, $C_B = 100NF$			
	PF功率因数	THD总谐波电流畸变率	R_B 的功耗 P_D
$R_B [1K\Omega]$	0.93	13%	100mW

$R_B [2K\Omega]$	0.93	13%	162mW
------------------	------	-----	-------

在选择 R_B 时，应该首先找出过大或过小的 R_B 取值。然后，在可以获得较高效率的合适取值范围内，挑选取值最小的 R_B 。

2. 有源泄放设计

保持TRIAC维持电流的另外一种方法是有源泄放技术。相比无源泄放电路，在电源输入周期中，有源泄放电路可以覆盖更宽范围的TRIAC开通。该推荐有源泄放电路能够通过调节输入电流保持TRIAC的维持电流，能够降低泄放电路的功耗。

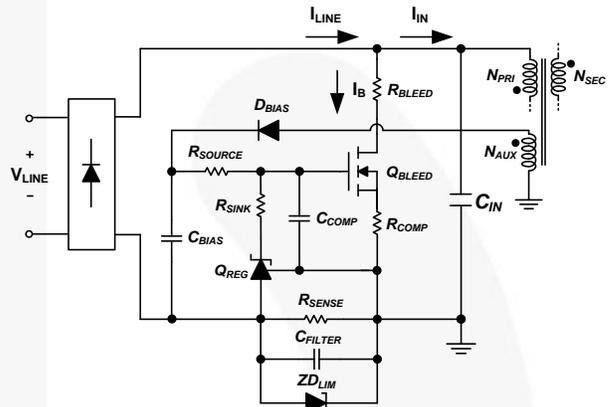


Figure 9. 有源泄放电路原理

图9中， I_{LINE} 为 I_B (有源泄放电流) 和 I_{IN} (反激变换器输入电流)之和。 R_{SENSE} 为检测电阻，负载检测电源电流 I_{LINE} 。 C_{FILTER} 为滤波电容，负责滤除 R_{SENSE} 上电压的开关噪声。 Q_{REG} 为分流调节器，例如KA431。在调光器触发时，较大的电流毛刺将会在 R_{SENSE} 上，引起较大的电压降。 ZD_{LIM} 能够限制 R_{SENSE} 上的电压，进而保护 Q_{REG} 的参考电路。驱动 Q_{BLEED} (泄放MOSFET) 的偏置电流属于线性调节器，由辅助绕组供电。偏置电路由 D_{BIAS} 和 C_{BIAS} 构成。 Q_{BLEED} 的门极受控制于 C_{BIAS} 偏置电压和 Q_{REG} 的阴极。驱动电流总量受限制于 R_{SOURCE} 和 R_{SINK} 。 C_{COMP} 能够减缓调节环的响应。 R_{COMP} 用做负反馈电阻，负责补偿控制环。 R_{BLEED} 为泄放电阻，同 Q_{BLEED} 一起，消耗部分泄放功率。

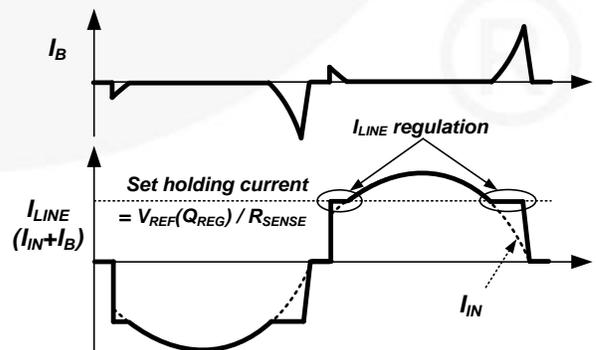


Figure 10. 采用有源泄放电路的电源电流

3. 有源阻尼设计

在调光器触发时，有必要采用与输入滤波电容串联的阻性阻尼。在调光器触发时，引起较大的电流尖峰，通过电源线路，为电容 C_{IN} 快速充电。如果没有阻性阻尼，该电流尖峰将引起电源电流振荡，大电流将引起调光器误触发，破坏TRIAC调光器。采用阻尼电阻可以抑制尖峰电流，阻尼电阻的功耗也会较高。阻尼电阻不仅能够阻尼尖峰电流，而且也能够处理来自反激变换器的输入电流。

鉴于此，飞兆半导体提出了一种有源阻尼电路的专利线路，可以降低功耗，而且所需外围器件最少。在图14中， R_{AD} 为有源阻尼电阻， Q_{AD} 为有源MOSFET，用以降低 R_{AD} 的功耗。 R_D 和 C_D 为延时电路元件。 D_D 为复位二极管，用于泄放 C_D 。

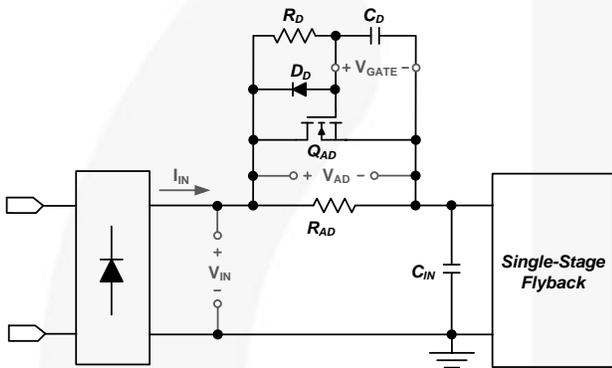


Figure 14. 有源阻尼电路原理

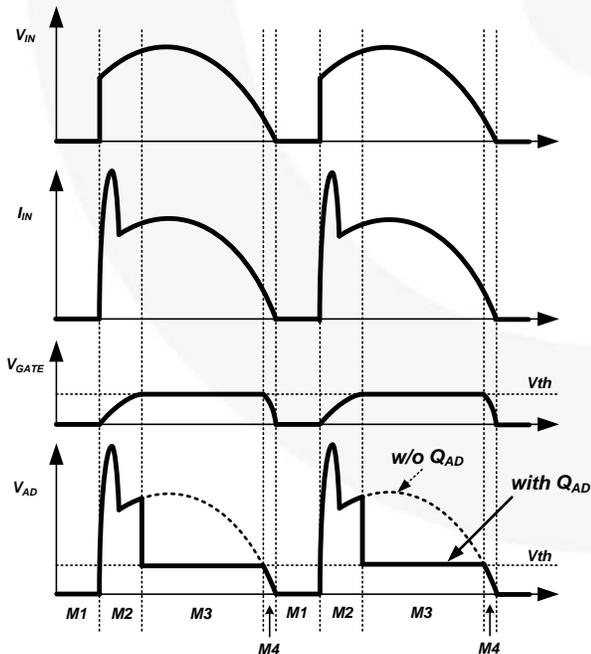


Figure 15. 有源阻尼电路波形

图15给出了有源阻尼的工作波形。按照顺序，给出不同模式分析如下：

M1: 调光器关断时间； Q_{AD} 关断。

M2: 调光器触发，出现尖峰电流。

在延时电路(R_D 和 C_D)作用下， V_{GATE} 逐渐增加。

M3: 在充电 V_{GATE} 作用下， Q_{AD} 开通。

V_{AD} 被调节为 Q_{AD} 的阈值电压 V_{TH}

M4: 在 D_D 作用下， C_D 放电。 V_{GATE} 得到复位，为下一个电源周期做好准备。放电电流的路径为 $D_D - R_{AD} - C_D$ 。

在M3阶段， Q_{AD} 将 V_{AD} 电压调节成为其阈值电压(V_{TH})，由此显著地降低 R_{AD} 的功耗。表3给出了无源和有源阻尼电路的功耗比较。有源阻尼电路的功耗远远低于无源阻尼电路的电阻功耗。在低电源电压(110V_{AC})时，输入电流较高，阻尼电阻需要处理较大的电流。因此，在低电源电压(110V_{AC})时，强烈推荐采用有源阻尼电路。

Table 3. 无源与有源阻尼功耗

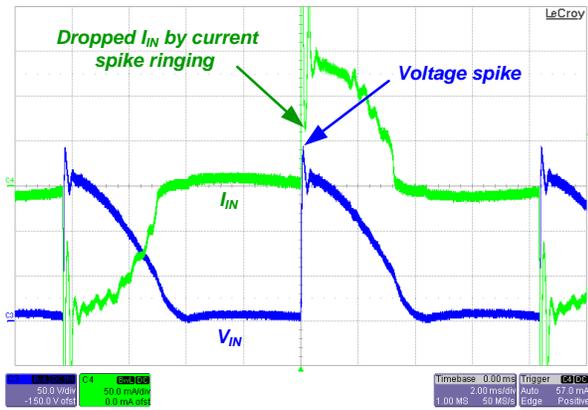
$P_{OUT} = 8W$	阻尼电路功耗[mW]	
	$V_{IN}: 110V_{AC}$	$V_{IN}: 220V_{AC}$
无源阻尼电路, 200 Ω	1200	290
有源阻尼电路, 200 Ω + FQN1N50C ($V_{TH}: 2\sim 4V$)	278	161
有源阻尼电路, 200 Ω + FDD10N20LZ ($V_{TH}: 1\sim 2.5V$)	171	113

3.1 有源阻尼电阻(R_{AD})的选择

应该首先校验电压与电流尖峰。超过额定电压时，电压尖峰能够破坏MOSFET和滤波电容。在调光器触发时，电流尖峰引起电流振荡。如图16所示，在触发时，如果 R_{AD} 较小，出现 I_{IN} 振荡。该振荡电流使 I_{IN} 下降，进而下降的 I_{IN} 导致出现误触发和可见闪烁。另外，采用较小 R_{AD} 时，过大的峰值电流尖峰，将会破坏TRIAC的调光器，尤其当调光LED灯泡并联时更为如此。因此，在选择 R_{AD} 时，应该注意几个要点：

- 电压尖峰（应该低于器件的击穿电压）
- 电流尖峰（应该低于TRIAC调光器的额定电流。如果考虑LED灯泡并联，电流尖峰的降低应与LED灯泡数量成反比）
- 电流振荡（校验触发时 I_{IN} 的降低程度，判定是否足够高于TRIAC的维持电流）

完成上述事项的校验后，为了获得最大效率，选择最小的 R_{AD} 值。

Figure 16. 阻尼电阻(R_{AD})较小时 V_{IN} 和 I_{IN}

3.2 有源阻尼MOSFET (Q_{AD})的选择

最大 V_{AD} 应该低于 Q_{AD} 的击穿电压。选择 R_{AD} 之后,可以在 90° 调光角下校验最大 V_{AD} 。然后,选择击穿电压裕量合适的 Q_{AD} 。对于8W LED灯泡,选择1~2A的额定电流,电流裕量充足。如表3所示,具有较低阈值电压的逻辑电平MOSFET能够额外地降低损耗,原因是 V_{AD} 已经被调节成 Q_{AD} 的阈值电压。

3.3 有源阻尼二极管(D_D)的选择

有源阻尼二极管对 C_D 放电,用来复位 V_{GATE} 。额定正向电流1A的二极管足够用来对 C_D 放电。对 Q_{AD} 的选择同样如此,在选择 D_D 反向电压时,应该首先在 90° 调光角和最高输入电源电压时检验最大 V_{AD} 。

3.4 有源阻尼延时电路(R_D, C_D)的选择

在 Q_{AD} 开通之前,延时电路(R_D, C_D)应该产生一个足够长的延时时间,用于 R_{AD} 阻尼电流尖峰。对于尖峰电流,最坏的情况是调光角为 90° 。应该首先在调光角为 90° 时,对尖峰电流振荡进行校验,以便确定阻尼尖峰电流需要多长时间。然后,调节 R_D 和 C_D ,保证足够的阻尼时间。推荐的 R_D 和 C_D 值为几百nF和几十k Ω 。如果 C_D 过大和 R_D 非常小,在M4阶段, D_D 不能完全对 C_D 放电,如图15所示。

设计范例

图17给出了一个8W LED灯泡系统有源阻尼的设计范例。如图18和图19所示,80k Ω R_D 与100nF C_D 产生的延时大约为1ms。在延时期间,220 Ω R_{AD} 阻尼电压和电流尖峰时,没有出现电流振荡或调光器误触发。

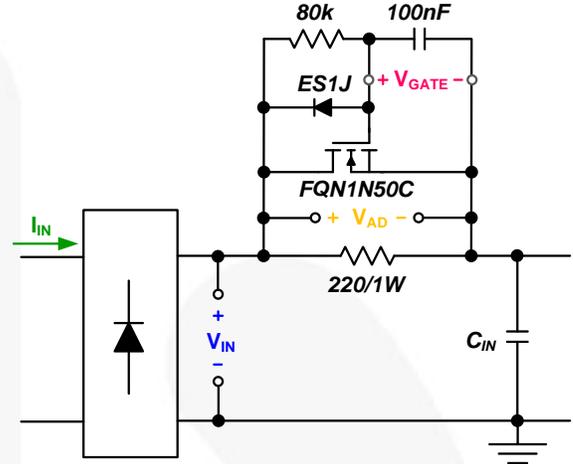


Figure 17. 设计范例: 8W 灯泡的有源阻尼

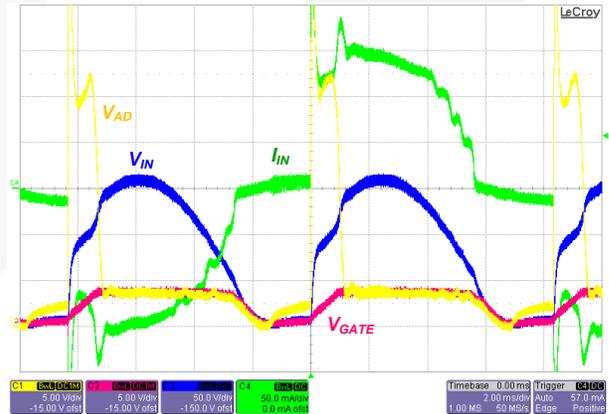


Figure 18. 高调光角时的实测波形

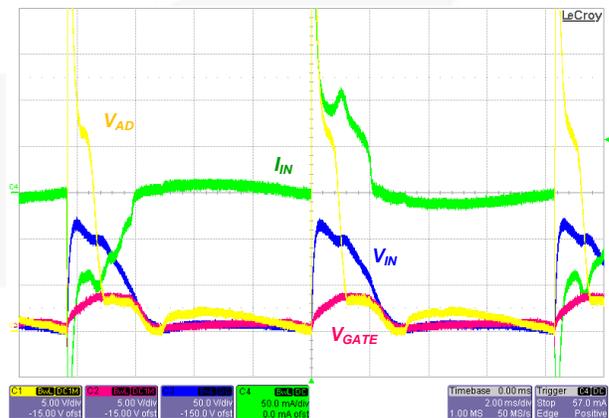


Figure 19. 低调光角时的实测波形

4. FL7730 的特征

FL7730是一种适合采用单级反激拓扑的有源功率因数校正(PFC)控制器。采用模拟检测方式,实现调光控制,没有闪烁。采用的原边调节和单级拓扑减少了外部器件数量,例如输入大电容和反馈电路,由此降低了成本。为了改善功率因数和THD,采用了内部误差放大器和低带宽的补偿器,实现了恒定导通时间。高精度恒流控制能够精确调节输出电流,克服输入电压和输出电压的波动。随着输出电压变化,工作频率成比例地调节,确保工作在DCM模式,由此带来较高的效率和简化的设计。FL7730拥有多种保护,例如,LED开路、LED短路和过温保护。

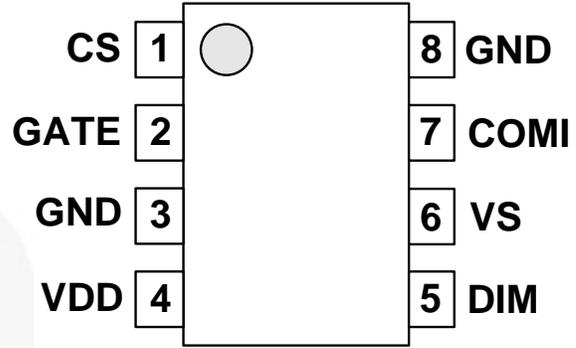


Figure 20. 封装简图

Table 4. 管脚定义

管脚号	名称	说明
1	CS	电流检测 。该管脚需要连接到电流检测电阻,来检测MOSFET电流,在恒流调节中用于调节输出电流。
2	GATE	PWM信号输出 。该管脚采用内部图腾柱输出驱动器,用于驱动功率MOSFET。
3	GND	地
4	VDD	电源 。采用该管脚,提供芯片工作电流和MOSFET驱动电流。
5	DIM	调光 。该管脚用于控制LED照明的调光工作。
6	VS	电压检测 。该管脚用于检测输出电压信息和放电时间,用于线性频率控制和恒流调节。该管脚需要连接到与辅助绕组相连的分压电阻。
7	COMI	恒流环补偿 。该管脚为跨导误差放大器的输出。
8	GND	地

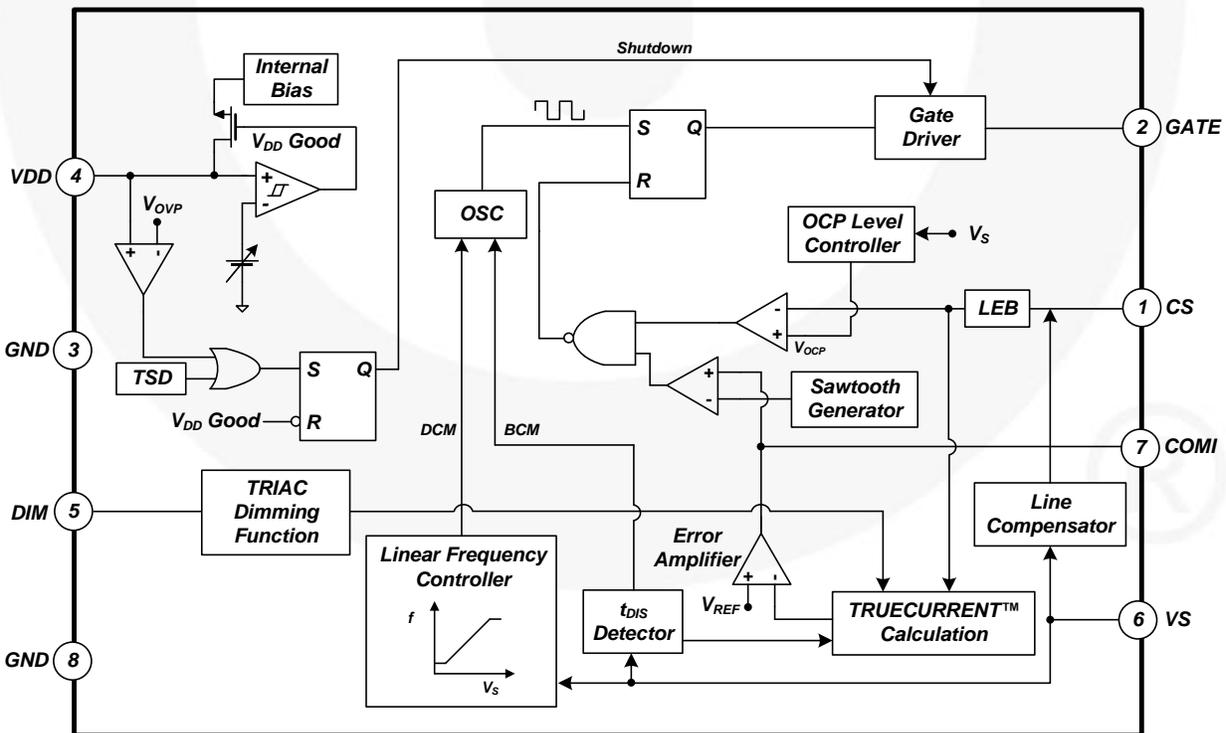


Figure 21. 功能框图

设计总结

图22给出了采用FL7730的TRIAC调光LED驱动器原理图。该原理图专用于较低电源电压供电情况(90~140V_{AC})。

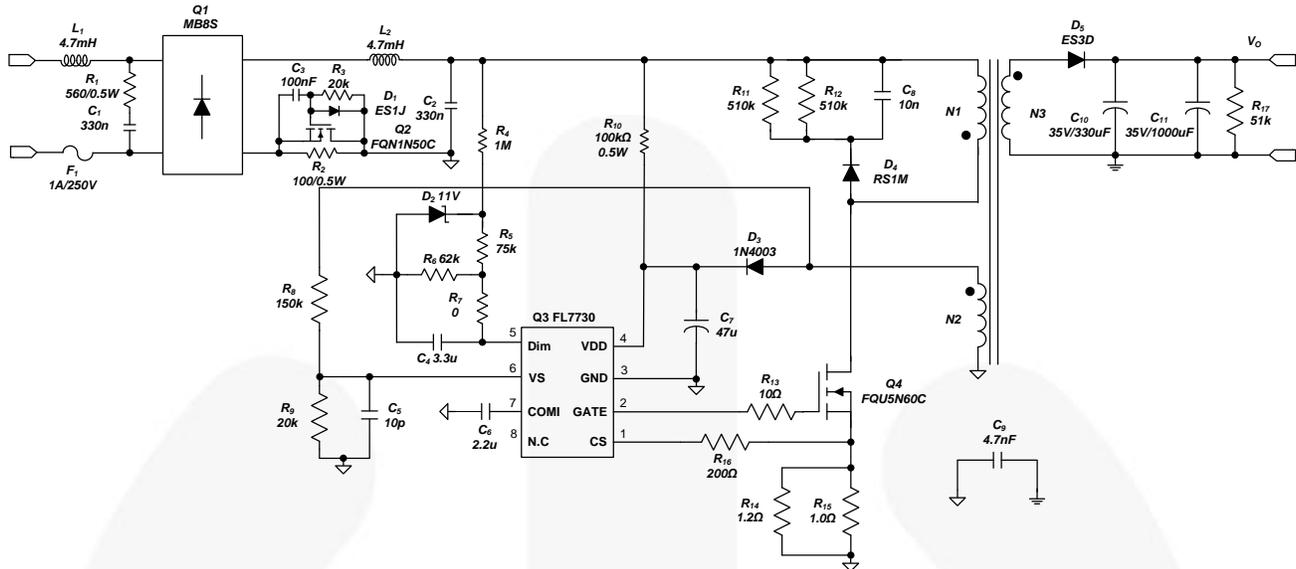


Figure 22. 采用FL7730的TRIAC调光LED驱动器原理(低电源电压: 90~140VAC)

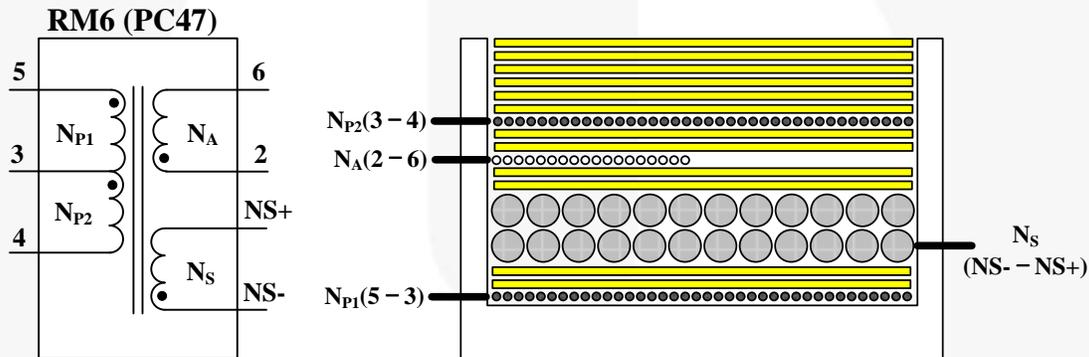


Figure 23. 变压器的结构

Table 5. 绕组指标

序号	绕组	引脚(S → F)	导线	匝数	绕制方式
1	NP1	5 → 3	0.13Φ	38 TS	螺线绕制
2			绝缘: 聚脂胶带, 厚度T = 0.025MM, 2层		
3	NS	NS- → NS+	0.3Φ (TIW)	24 TS	螺线绕制
4			绝缘: 聚脂胶带, 厚度T = 0.025MM, 2层		
5	NA	2 → 6	0.13Φ	18 TS	螺线绕制
6			绝缘: 聚脂胶带, 厚度T = 0.025MM, 2层		
7	NP2	3 → 4	0.13Φ	38 TS	螺线绕制
8			绝缘: 聚脂胶带, 厚度T = 0.025MM, 2层		

Table 6. 电气特性

	引脚	指标	备注
电感	1 - 2	1MH ±10%	50KHZ, 1V
漏感	1 - 2	8μH	50kHz, 1V, 短路全部输出管脚

实验验证

针对8W LED照明系统，给出了采用无源泻放电路和有源阻尼电路的设计实例。

图24给出了在输入电压和输出电压变化时的恒流调节。在较宽输出电压范围10V到28V内，对于每种电源输入电压，恒流偏差率低于2.1%。在额定输出电压(22V)时，电源调整率低于3.9%。

工作波形如图25、图26、图27所示。在该调光电路板中，TRIAC的调光触发非常稳定，没有任何误触发。FL7730保持 t_{ON} 恒定，使得 V_{CS} 与 V_{IN} 同相。 I_{IN} 的最大尖峰电流仅为1.2A。图28给出了调光曲线。输入电压有效值指示了TRIAC调光角大小。FL7730的调光功能和外部电路能够平滑控制LED电流，其中外部电路包括无源泻放电路和有源阻尼电路。表7表明了该设计与常规调光器设计的兼容性，没有可见闪烁。最大与最小电流有所变化，这是因为调光器的每次最大与最小角度有所不同。

在较低输入电压(90 ~ 140V_{AC})时，系统效率范围为80.7% ~ 82.9%。有源阻尼有助于提升效率，而且设计紧凑，成本低廉。在较低电源范围90~140V_{AC}内，表8中给出了PF和THD。在FL7730的恒定 t_{ON} 和线性频率控制下，PF大于0.9，THD低于30%，

本设计范例中得到了许多优异性能，充分显示出这是一种功能强大的LED照明解决方案，具有高精度的恒流调节、稳定的调光控制、高的效率、高的功率因数、低的THD和低的BOM成本等特征。

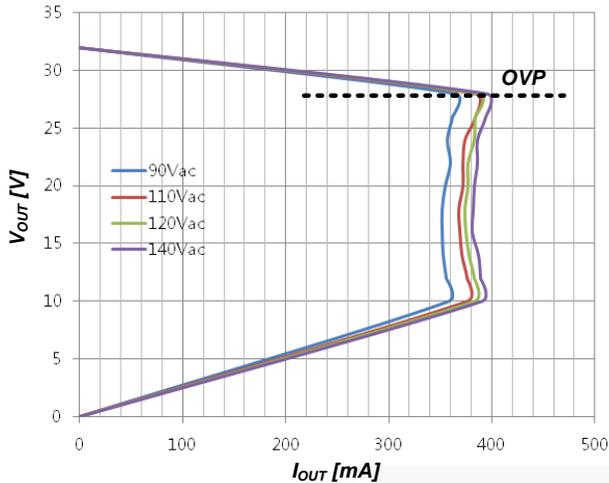


Figure 24. 恒流调节，CR-负载下实测波形

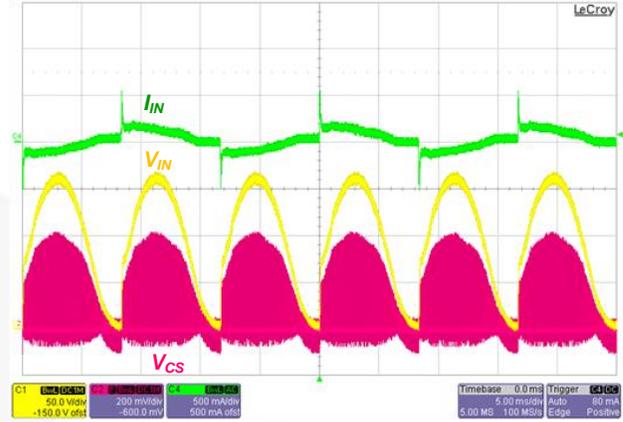


Figure 25. 最大调光角时的波形

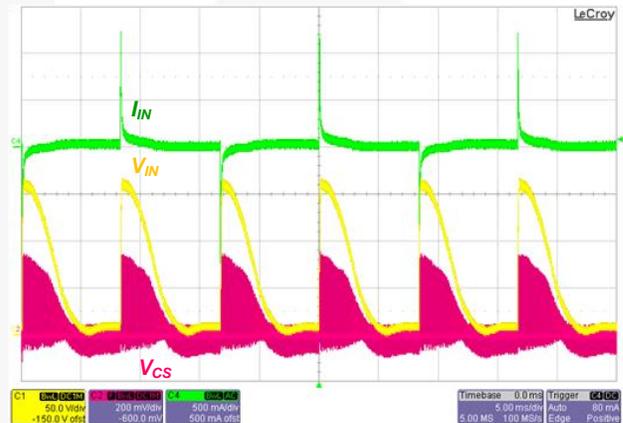


Figure 26. 半调光角时的波形

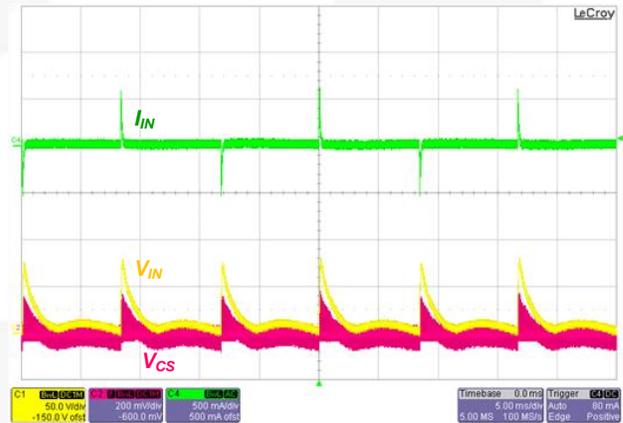
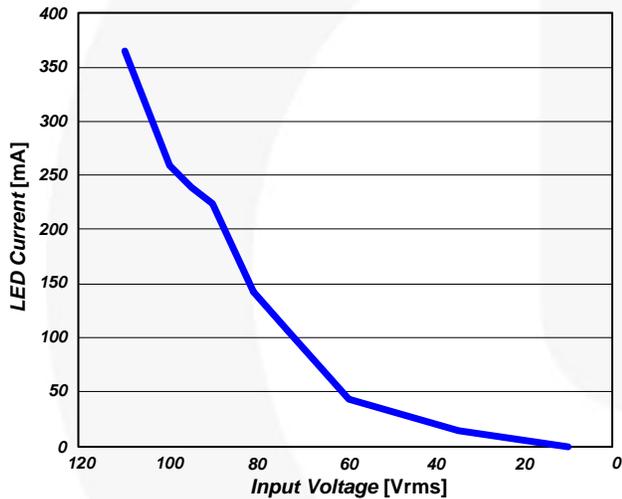
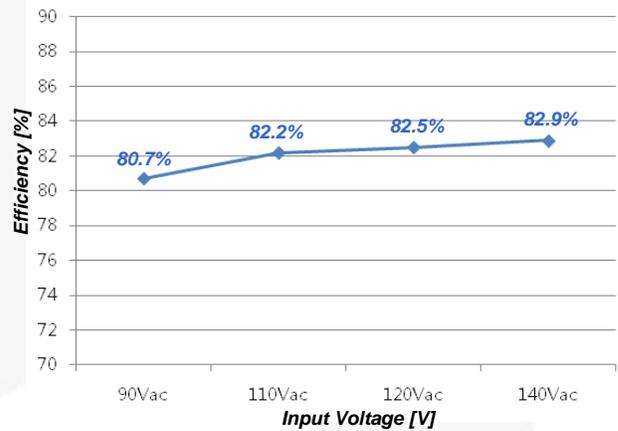


Figure 27. 最小调光角时的波形

Table 7. 调光器兼容性

制造商	调光器	最大电流	最小电流	闪烁
LUTRON	S-600P-WH	330MA	40MA (12%)	NO
LUTRON	CN-600P-WH	328MA	11MA (3.4%)	NO
LUTRON	GL-600H	365MA	8MA (2.2%)	NO
LUTRON	TG-603PGH-WH	252MA	12MA (4.8%)	NO
LUTRON	TG-600PH-WH	333MA	14MA (4.2%)	NO
LUTRON	LG-600P	327MA	3MA (0.9%)	NO
LUTRON	CTCL-153PD	320MA	58MA (18%)	NO
LEVITON	IP106	380MA	36MA (9.5%)	NO
LEVITON	1C4005	344MA	0MA (0%)	NO
LEVITON	6631-LW	340MA	0MA (0%)	NO
LEGRAND	F 165H	344MA	3MA (0.9%)	NO

**Figure 28. 调光曲线 (输入电压相对LED电流)****Figure 29. 效率****Table 8. 功率因数 (PF) 和总谐波畸变率 (THD)**

输入电压	输出电流	输出电压	PF功率因数	THD总谐波畸变率
90V _{AC}	360MA	21.70V	0.98	7.4%
110V _{AC}	376MA	21.77V	0.96	9.5%
120V _{AC}	380MA	21.77V	0.95	10.4%
140V _{AC}	386MA	21.79V	0.91	12.4%

相关数据表

[FL7730MY — Single-Stage Primary-Side-Regulation PWM Controller for PFC and LED Dimmable Driving](#)

[KA431 — Programmable Shunt Regulator](#)

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.