

## 如何用 LM3445 实现 Buck PFC 调光 LED 驱动的设计

Cheney.Hu

Shenzhen OEM Team

### 摘要

目前全球禁售能效较低的传统钨丝灯已成为一种趋势，转而大力推广更高能效的节能灯和 LED 灯。而在原来需用到钨丝灯进行可控硅调光的场合，因节能灯无法实现调光，可调光的 LED 灯反而成为了该市场的唯一替换源。因此可调光的 LED 驱动方案也开始被越来越多的 LED 灯厂商所推崇。

TI 推出的 LM3445 正是一款可完美实现可控硅调光的 LED 驱动方案，特别是在其非隔离应用下，因其拥有体积更小，成本更低，效率更高等优势，故对于目前面临着 LED 驱动产品：成本 / 体积 / 散热等方面压力的厂商，LM3445 恰好能帮助其做出一款更适合市场要求的可控硅调光驱动。

本文正是以 Buck PFC 拓扑为基础，简单阐述如何用 LM3445 实现一款可控硅调光的 LED 驱动的设计。

### 目录

<b>1</b>	<b>LM3445 芯片简介</b>	<b>2</b>
1.1	LM3445 内部架构:	2
1.2	LM3445 可控硅调光原理:	2
1.2.1	相位检测原理 / 波形:	3
1.2.2	调光信号译码器原理 / 波形:	4
<b>2</b>	<b>Buck PFC 拓扑设计指导</b>	<b>4</b>
2.1	典型线路图	4
2.2	主要线路说明与设计指导	5
2.2.1	注入式 BUCK PFC 线路:	5
2.2.2	调光相关线路:	6
2.2.3	输出 OVP 线路:	8
<b>3</b>	<b>LM3445 Buck PFC 参考设计资料</b>	<b>9</b>
3.1	参考设计原理图:	9
3.2	参考设计测试数据:	9
<b>4</b>	<b>结论:</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>参考文献:</b>	<b>11</b>

## 1 LM3445 芯片简介

TI 推出的 LM3445 是一款针对可控硅调光的 LED 驱动芯片，内置了精确的可控硅切相角检测线路，并具有丰富的外置管脚可实现如 Buck PFC 等拓扑的调光 LED 驱动设计，从而使得产品可同时得到高 PF 值，高效率，低成本及良好的调光器兼容性等优点。非常适合于各种需要可控硅调光的 LED 灯应用。

芯片简介部分将剖析其内部架构，并重点对其调光原理进行详细分析。

### 1.1 LM3445 内部架构：

LM3445 芯片的内部架构如下图：

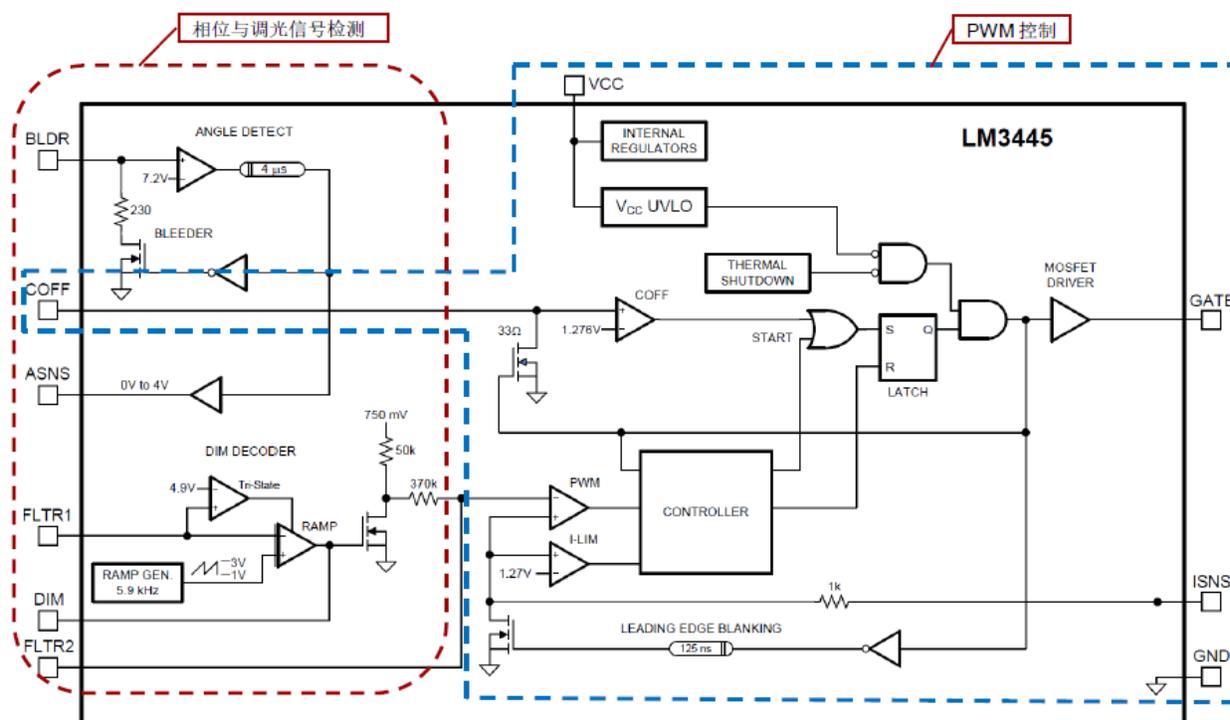


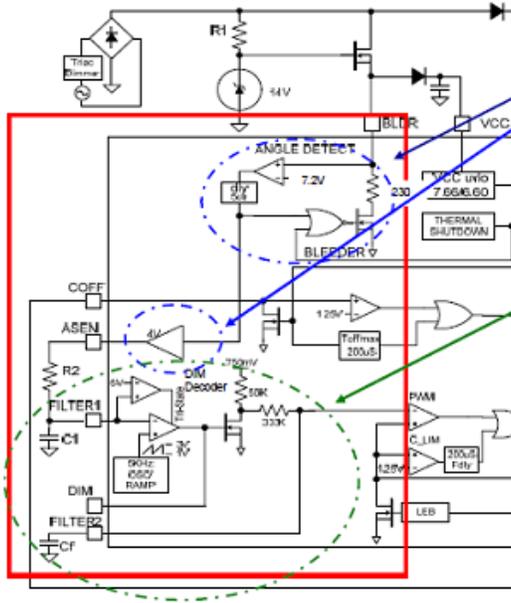
fig.1 LM3445 内部简化框图

概括而言，LM3445 包括两大部分，其一是上图中红框部分：相位与调光信号的检测/转换；而另一部分为图中蓝框部分：传统的 PWM 控制部分。

接下来主要对其调光部分的原理进行详细说明。

### 1.2 LM3445 可控硅调光原理：

下面 fig.2 中将 LM3445 内部相位与调光信号检测线路进一步分解为两大部分，同时其各自功能简要阐述如下。



**相位检测**

• 导通角检测电路及其滤波器可在滤波器1 (FILTER1) 引脚产生直流电平, 而这一电平与 TRIAC 调光器的导通角是相对应的。

**调光信号译码器**

• FILTER1 引脚的直流电压和 5 kHz 的锯齿波比较, 所得到的脉冲宽度和 FILTER1) 引脚的平均电压成反比。

• 由于 MOSFET 翻转比较器的输出, 因此 MOSFET 漏极电压的持续时间与输入 TRIAC 电压的占空比成正比。

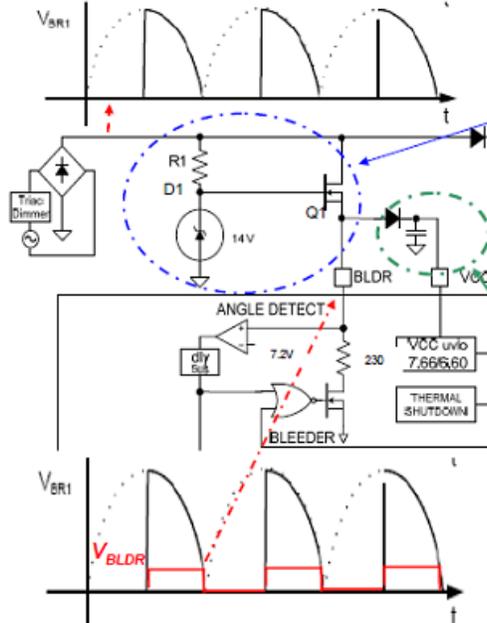
• RC 滤波器将该电压平滑滤波, 得到一个稳定的 FILTER2 电压, 然后将这个平均电压用作 PWM 控制器的参考电压, 来调整 LED 的连续电流。

fig.2 LM3445 调光原理分解图

1. **相位检测:** 即将调光器输出的切相后的波形取样检测为一个占空比随调光器切相角度不同而改变的 PWM 波形;
2. **调光信号译码:** 将上述相位检测线路产生的 PWM 波形, 转变为一个随调光器角度而改变的稳定直流电压, 并最终用其实现调光。

两大部分的详细工作原理及相应波形如下:

**1.2.1 相位检测原理 / 波形:**



• 外置串行稳压器将 TRIAC调光器的整流电压转换为一个 LM3445 芯片的 BLDR 引脚可以检测的电平。

• 由于 Q1 的源极没有电容, 因此 BLDR 引脚的电压就跟随 TRIAC整流电压一同上升或下降。

• 当 TRIAC 处于关态时维持 VCC 引脚的电压 → 为 LM3445 芯片提供正常的工作电压。

fig.3 相位检测线路工作原理

### 1.2.2 调光信号译码器原理 / 波形:

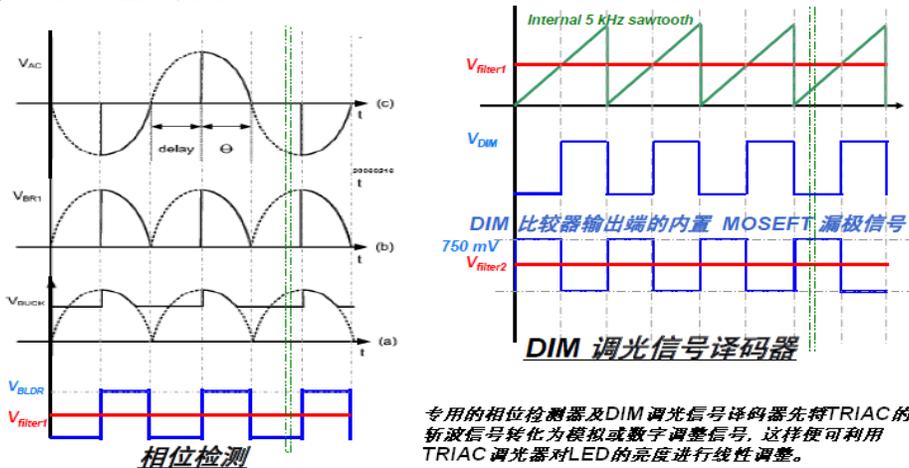


fig.4 调光译码器工作原理

译码/转换过程如下:

1. 由相位检测线路根据调光器切相角度得到一个一定占空比的  $V_{BLDR}$  信号, 该信号经 RC 低通滤波在 Filter1 脚得到一个相应的 DC 电压 (与调光器导通角成正比);
2. 该 DC 电压与 LM3445 内部 5KHz 的锯齿波相比较, 从而得到一个一定占空比的 5KHz PWM 波形 (占空比与导通角成反比);
3. 最后该 PWM 波经 RC 低通滤波在 Filter2 脚得到一个更精确且与导通角成正比的 DC 电压, 送至电流检测比较器基准端从而实现调光。

## 2 Buck PFC 拓扑设计指导

### 2.1 典型线路图

下图为 LM3445 应用于 Buck PFC 调光时的典型线路图, 本文将主要对其中较特殊的 Buck PFC, 相位检测/调光, OVP, 频率设置等线路的工作原理及设计要点做详细说明:

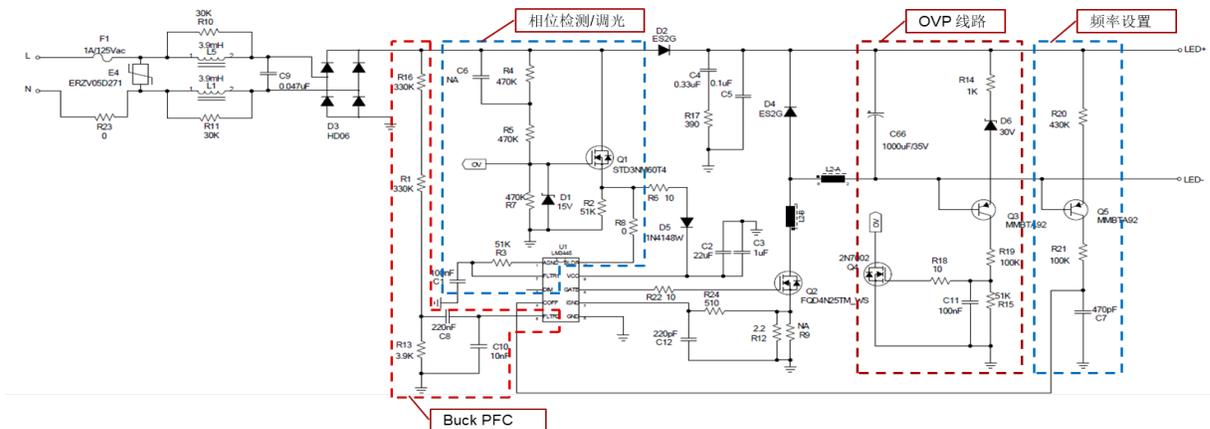
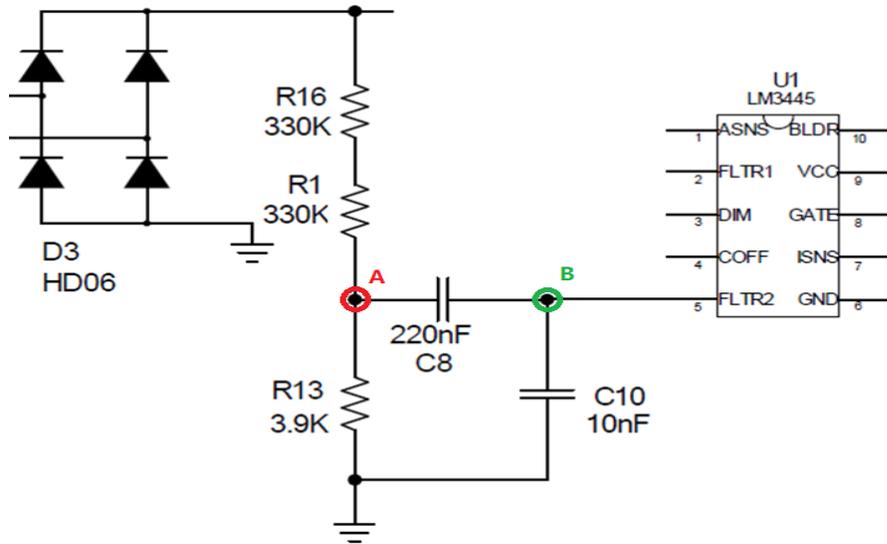


fig.5 LM3445 Buck PFC 典型应用线路图

## 2.2 主要线路说明与设计指导

### 2.2.1 注入式 BUCK PFC 线路:



Buck PFC 的相关线路如下

fig.6 Buck PFC 相关线路

基于该线路，对 fig.12 中 A,B 两点在  $100H_z$  正弦交流电压下的波形进行仿真如下：

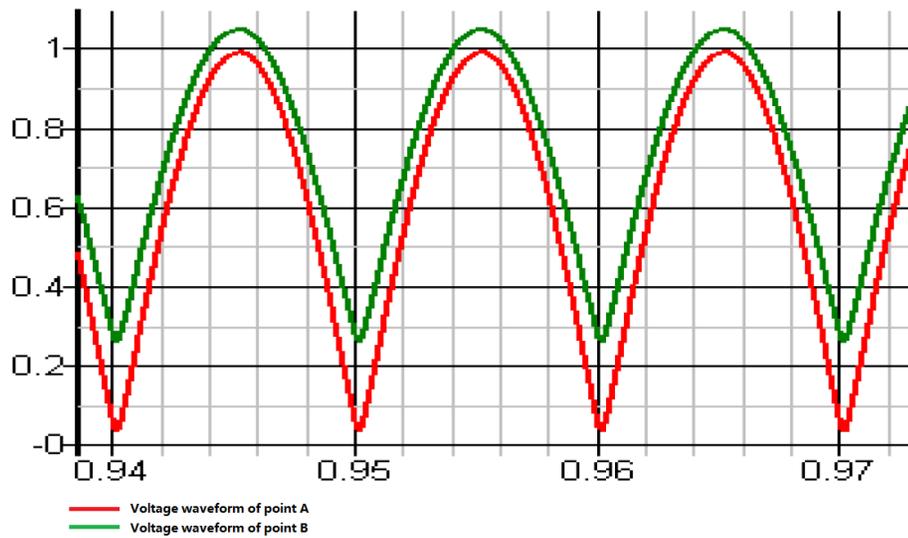


fig.7 AC 采样仿真波形

再结合如下 LM3445 内部 PWM 控制框图：

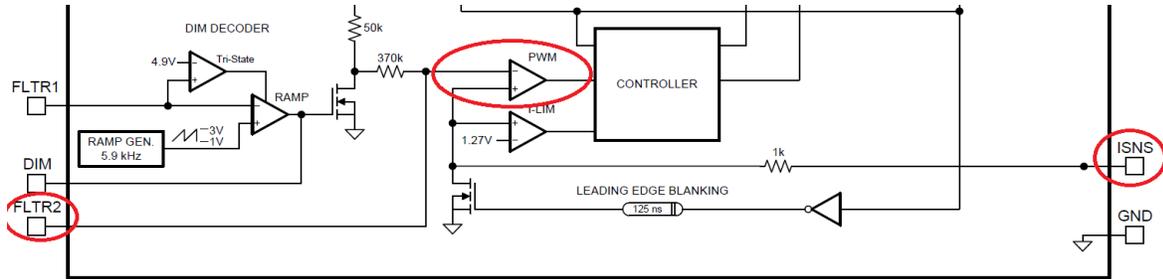


fig.8 LM3445 PWM 控制框图

在 fig.6 中，R1,R13,R16 将整流桥输出电压分压得 A 点电压波形，然后经 C8 滤波后，再与 LM3445 中调光译码所得直流电压叠加，得到 B 点（FLTR2）电压波形。

FLTR2 电压作为 fig.8 红框中电流检测比较器的负端基准电压，随之使得输入电流包络基本跟随输入正弦电压而最终得到高的 PF 值。

上述方法提高 PF 值后不仅能满足不同认证标准要求，且能让线路在整个输入电压周期内均有输入电流，而该输入电流可直接做为调光器所需的保持电流（保持电流对于调光的重要性将于后文阐述），最终有助于 LED 灯的调光稳定（不闪烁）。

该部分线路设计时以下两点需特别注意：

a. B 点峰值电压：因 LM3445 在电流检测处还内置了一个 1.27V 基准的比较器做为过流保护，这样若 B 点峰值电压 > 1.27V，会导致线路触发过流保护而不能正常工作。

b. C8 的选取：C<sub>8</sub> 与 R<sub>1</sub>, R<sub>16</sub> 组成一阶 RC 高通滤波器，从而确保仅整流桥后电压中的交流分量通过，而避免直流分量对 PF 值的影响。

但因该交流频率多为 100Hz 或 120Hz 并不高，故为避免对所需交流分量影响，建议将其谐振点设定在 1~10Hz，典型值可选 C<sub>8</sub>=220nF~330nF。

### 2.2.2 调光相关线路：

该部分线路主要用于提高 LED 灯调光匹配性，包括避免闪烁，增大调光范围及优化调光线性度等。

在分析调光线路之前，我们首先看一下可控硅调光器的基本工作原理以加深理解，可控硅调光器简化原理图如下：

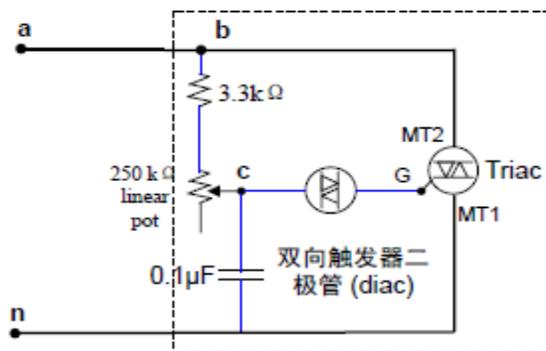


fig.9 可控硅调光器简化原理图

工作原理为：

1. RC 充电回路给 0.1uF 电容充电，当该电容上电压达到 diac 导通电压阈值时可控硅开始导通；
2. 可控硅导通后，只要流过它的电流大于其保持电流则可控硅会一直工作（此时无论 0.1uF 电容上电压大于或小于 diac 导通电压），直到 Triac 上电流小于保持电流后，且 0.1uF 电容上电压低于 diac 导通电压后，可控硅关断并进入下一周期。
3. 调光器的导通角由 RC 充放电时间决定，改变 R 值（旋钮）即可改变导通角。

这样，要让可控硅调光器正常工作就须满足以下两方面条件：

- a. 可控硅导通时，流经调光器的电流须大于其最小保持电流；
- b. 可控硅关断时，须给 RC 充放电电路提供一个泄放回路，用以保证 0.1uF 电容能正常放电，从而让该 RC 充放电定时/定导通角线路正常工作。

下面我们再开始看 LM3445 中跟调光相关一些线路的设计步骤：

导通角检测/译码线路：

该部分线图如下：

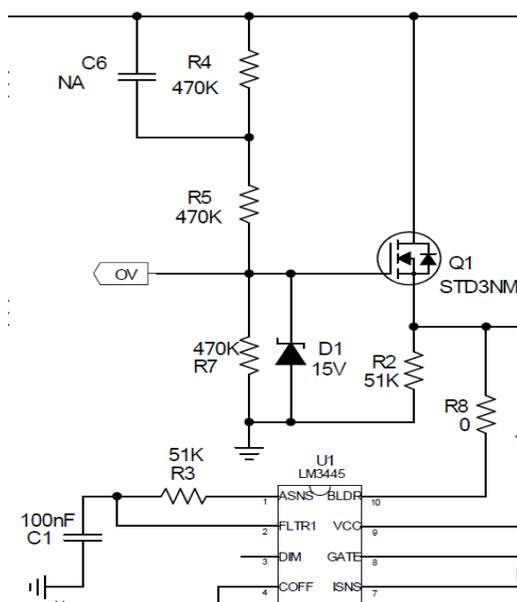


fig.10 导通角检测/译码线路

导通角检测主要由  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $D_1$  及  $Q_1$  组成，且与 Vcc 线路相结合，故其元件取值方面，主要留意  $D_1$  稳压值不超过  $V_{cc,max}$ ， $R_4$ ,  $R_5$  均衡考虑系统启动时间与待机功耗即可（典型可取 470K）。

调光信号译码部分主要由  $R_3$ ,  $C_1$  组成的低通滤波器完成，因 FLTR1 脚理想状态为 DC 电压信号，所以建议  $R_3$  与  $C_1$  组成的低通滤波器之谐振频率尽量低（典型约 1Hz），可得：

$$\frac{1}{2\pi \times R_3 \times C_1} = 1H_z$$

例如可取  $R_3=51Kohm$ ,  $C_1=100nF$ 。

Bleeder（泄放）线路：

Bleeder 线路图由如下  $Q_1$ ,  $R_8$  和 LM3445 内部相关线路组成。

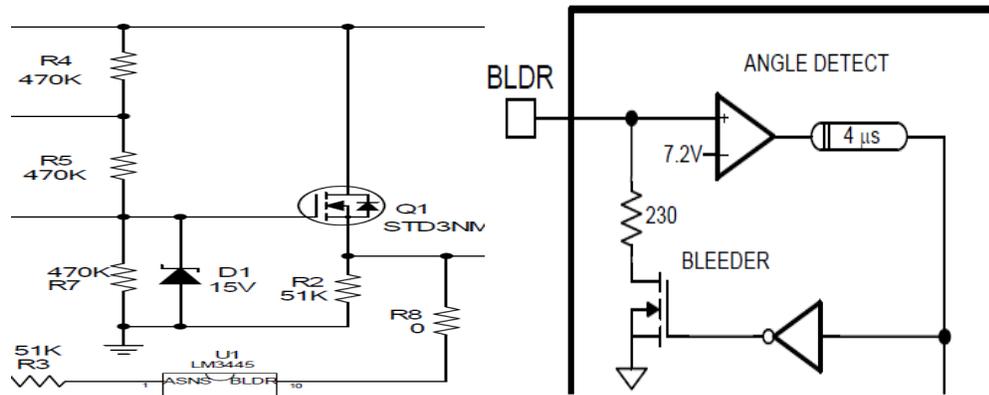


fig.11 Bleeder 线路

该线路主要作用为：当调光器关断时，为调光器内部 RC 线路提供一个必要的电流泄放回路，从而让该 RC 线路正常充放电，避免导通角设定失常。

其工作原理为，当 BLDR 脚检测到输入电压低于 7.2V 时，芯片内部会将 230ohm 的 Bleeder 电阻打通接地为调光器 RC 线路提供泄放回路。

故此时在上图中， $R_8$ 取值不宜过大，否则会因加大了 Bleeder 电阻而影响泄放效果（建议取值为 0~22ohm）。

另外， $R_2$ 为驱动提供一个常期存在的假负载，既能提供 Bleeder，也能提供调光器所需保持电流，其提供的电流值为： $\frac{V_{D1}-V_{GS,Q1}}{R_2}$ ，但因其同时也是一个常期存在的损耗会影响效率故取值不宜过小，典型值可取 10Kohm~51Kohm。

并联在 $D_1$ 上的电阻 $R_7$ 为 Bleeder 线路的扩展应用，此时当  $V_{in}$  使得

$$V_{in} \times \left( \frac{R_{17}}{R_5+R_6+R_{17}} \right) < 7.2 + V_{GS,Q1} \text{ 时,}$$

Bleeder 线路同样会开始工作。这样就不仅提供了泄放回路，还给调光器在低端时加上了一个动态假负载，增大了保持电流并减少闪烁可能，不过该电阻同时会改变导通角检测信号，故需综合设计中调光范围与调光兼容性来取值。

### 2.2.3 输出 OVP 线路:

输出 OVP 线路图如下:

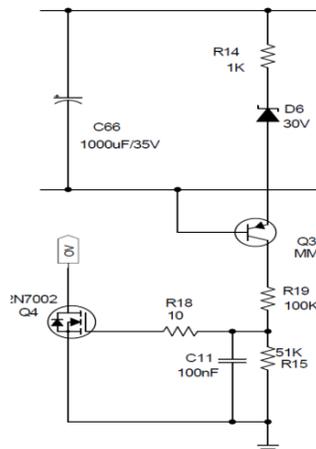


fig.12 输出 OVP 线路

其基本工作原理为：当 $V_o > V_{D6} + V_{be\_Q3}$ 时，PNP三极管 $Q_3$ 导通，此时 $Q_3$ 的e极电流

$$I_e = \frac{V_o - V_{D6} - V_{be\_Q3}}{R_{14}}$$

由三极管电流 $I_c = I_e$ ，得C极 $R_{15}$ 上电压为 $V_{R15} = R_{15} \times I_e$ ，而当 $V_{R15} > V_{Q4\_GS}$ 时， $Q_4$ 会被打通并将芯片Vcc拉到0V从而使得驱动停止工作而实现OVP保护。

### 3 LM3445 Buck PFC 参考设计资料

基于LM3445 Buck PFC参考设计PMP4327，对该应用下的LED驱动PF值，效率，调光性能等进行测试，并记录数据以供参考。

#### 3.1 参考设计原理图：

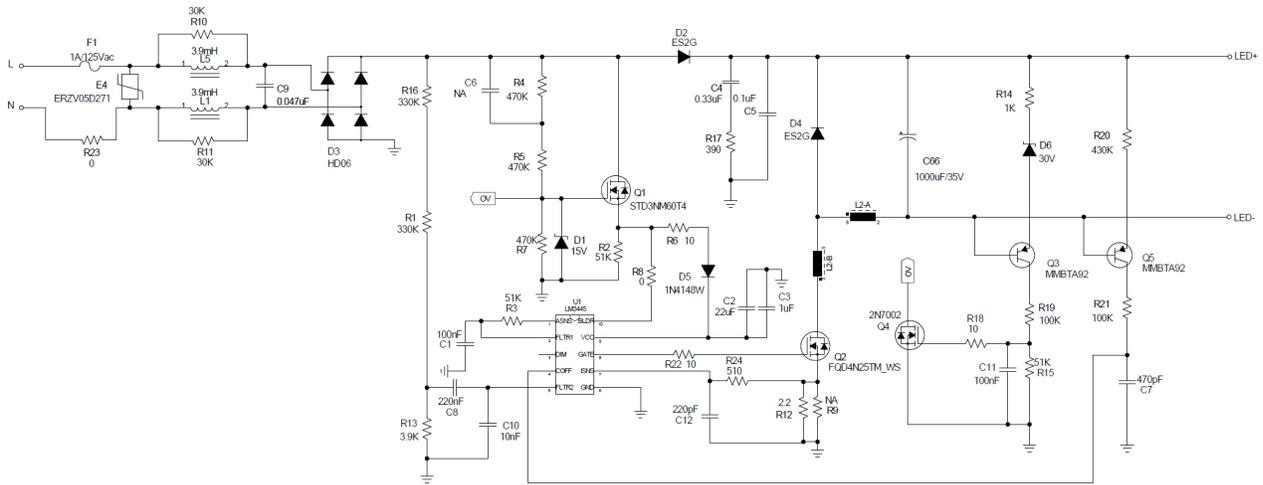


fig.13 PMP4327 参考设计原理图

#### 3.2 参考设计测试数据：

基本电气参数：

Vin(Vac)	Freq(Hz)	Pin(W)	PF	Vo(V)	Io(A)	Eff(%)
90	60	9.5	0.928	27.6	0.298	86.6
110	60	10.6	0.939	27.8	0.331	86.8
132	60	11.4	0.947	28	0.352	86.5

fig.14 基本电气参数数据

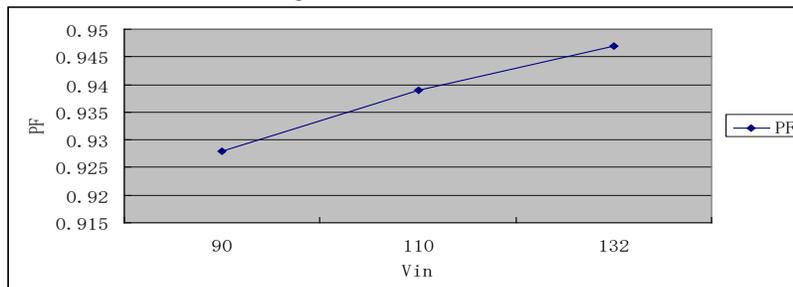


fig.15 PF 值曲线

调光测试数据。

Dimmer No.	Supplier	Leading or trailing	Io (mA) under different percent of dimmer's knob						Flicker?	Flicker Range	Io Range
			100%	80%	60%	40%	20%	0%			
#1	PANASONIC(WN575149)	L	347.6	272.9	182.6	105.7	8.7	1.6	NO		0.4%~97.4%
#2	LEVITON(057)	L	353	212.3	82.4	40.6	25.1	23.3	NO		6.5%~98.9%
#3	LUTRON(S23)	T	250.1	232.4	200.5	165.9	80.4	16.4	NO		4.6%~70.1%
#4	LUTRON(S27)	T	323.7	257.1	223.9	148.6	97.8	24	NO		6.7%~90.7%
#5	LUTRON(S37)	L	349.8	316.9	171.5	125.1	82	32.6	NO		9.1%~98.0%
#6	LUTRON(S46)	L	354.7	261.4	168.5	120.1	64.1	23.8	NO		6.7%~99.4%
#7	Panasonic(WN575159)	L	324.3	308.4	221.6	132.4	19.1	9.3	NO		2.6%~90.9%
#8	Panasonic(WN576159)	L	329.7	302.3	219.7	123.4	18.9	8.4	NO		2.4%~92.4%
#9	TOSHIBA(DG9081N)	T	361.5	325.7	167.5	36.5	10	7.6	NO		2.1%~101.3%
#10	LUTRON(S18)	L	238.3	165.7	103	58	37.9	25.6	NO		7.2%~66.8%
#11	LUTRON(6B38)	L	343.1	161.7	111.1	78.2	50.1	38.3	NO		10.7%~96.1%
#12	LEVITON(898F)	L	359.3	313.7	156.1	83	40.1	21.4	NO		6.0%~100.7%
#13	LUTRON(6B38)	L	347.2	157.9	98.9	62.2	43.1	34.2	NO		9.6%~97.3%

fig.16 调光器调光测试数据

调光曲线：

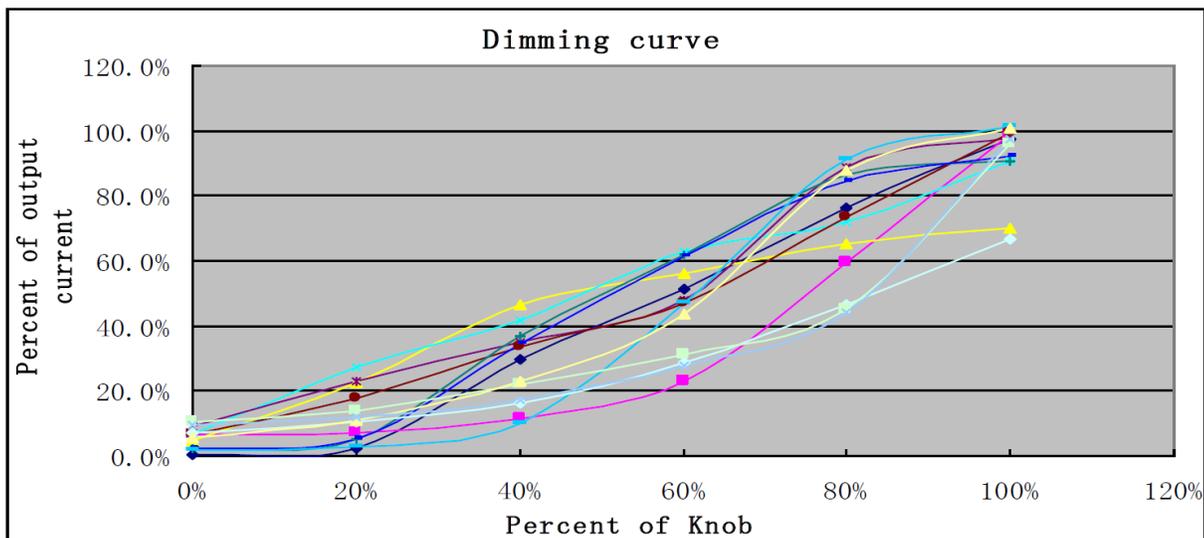


fig.17 调光曲线

#### 4 结论：

本文提出了一种适用于可控硅调光 LED 驱动的方案，基于 LM3445 并采用 Buck PFC 拓扑，能得到好的效率，PF，调光性及 BOM 成本等，TI 的参考设计 PMP4327 中同样实际验证了其性能与可行性。

同时，TI 应用报告-“An Improved Line Regulation Solution Used In LM3444/LM3445 Non-isolated Application”中有详细介绍一种改善其线性调整率的方案，读者可一并参考。

**5 参考文献:**

1. LM3445 数据表                      Texas Instruments
2. PMP4327 TI design                  Linda. Ye
3. LM3445 dimming theory            Yunlong. Li

## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品；(2) 设计、验证并测试您的应用；(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122  
Copyright © 2018 德州仪器半导体技术（上海）有限公司