

隔离 LED 驱动 Demo Board v2

图 1 所示的是敦泰 FT6610 Demo Board v2，它选用 FT6610 做驱动芯片，工作在断流模式，支持市电 AC220V 直接输入，采用隔离方案，主要用来驱动 3W 左右的 LED 负载（可用于 GU10/E27 灯杯）。使用时，直接驱动 1 颗 1W 的 LED 灯/1 颗 3W 的 LED 灯/3 颗 1W 的 LED 灯。

应用范围（隔离式）	
参数	值
输入电压	220VAC(110VAC), 50Hz/60Hz
LED 驱动电压	<12V
LED 驱动电流	350mA 左右
开关频率	50kHz 左右
应用范围	GU10/E27

FT6610 支持固定频率和固定关断时间的 PWM 工作方式，图 1 选用了前一种调光方式，用户可以参考 FT6610 的 datasheet 了解基本的计算和工作原理。

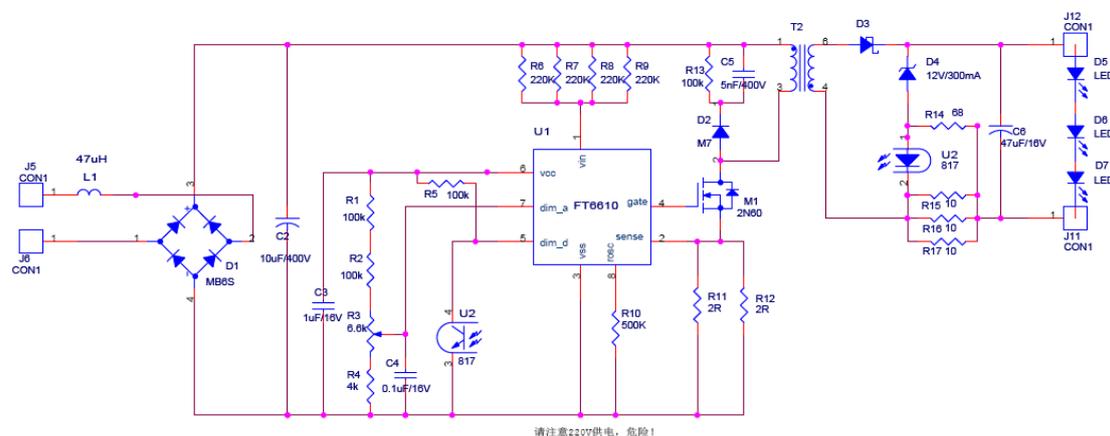


图 1 FT6610DB2 对应电路图

调试步骤:

注意：本设计采用隔离方案，PCB 和 LED 负载均带电。调试时，请严格按照相关安全规定操作，以免发生触电事故。

首先根据 LED 负载连接方式估算器件取值和类型选取。

1: 首先根据负载决定原边线圈需要传递的功耗

如副边 LED 为 3 个，电流为 350mA，则副边功耗为 $3.3*3*0.35=3.5W$ ，假设效率为 90%，则原边传递的功耗为 $3.5/90\%=4W$ 。

2: 确定 R11/R12 电阻

副边线圈续流时间为：

$$T_s = \frac{L_s * \Delta I}{V} = \frac{L_s * I_{s \max}}{V_{led}}$$

原边线圈导通时间为：

$$T_p = \frac{L_p * \Delta I}{V} = \frac{L_p * I_{p \max}}{V_{in}}$$

原副边电流切换时，理论能量完全传递，则：

$$\frac{1}{2} I_{p \max}^2 * L_p = \frac{1}{2} I_{s \max}^2 * L_s$$

$$\text{即 } I_{s \max} = I_{p \max} * \sqrt{\frac{L_p}{L_s}}$$

如果要满足断流条件，则

$$f < \frac{1}{T_s + T_p} = \frac{1}{\frac{L_p * I_{p \max}}{V_{in}} + \frac{I_{p \max} * \sqrt{L_p * L_s}}{V_{led}}}$$

原边电感传递的能量为：

$$P_{in} = \frac{1}{2} I_{p \max}^2 * L_p * f \quad (\text{从该公式可以看出，传递的能量与电源电压无关})$$

$$\text{则 } P_{in} = \frac{1}{2} I_{p \max}^2 * L_p * f < \frac{1}{2} I_{p \max}^2 * L_p * \frac{1}{\frac{L_p * I_{p \max}}{V_{in}} + \frac{I_{p \max} * \sqrt{L_p * L_s}}{V_{led}}}$$

$$\text{即 } \frac{1}{2} I_{p \max} * \frac{1}{\frac{1}{V_{in}} + \frac{\sqrt{L_s / L_p}}{V_{led}}} > P_{in}$$

故当 $P_{in}=4W$ ， $V_{led}=10V$ ， $v_{in}=300V$ ， $L_p/L_s=100$ 时，故

$$I_{p \max} > 107mA$$

I_{pmax} 可取 2~3 倍的最小值，如 $I_{p \max} = 280mA$ ，则 $R6=1ohm$ ，可以用 2 个 $2ohm$ 的电阻并联。

3: 确定 R10

考虑到传输 delay 的影响, I_{pmax} 一般会大于理论的 250mA, 可以取为 280mA, 故

$$P_{in} = \frac{1}{2} I_{pmax}^2 * L_p * f = \frac{1}{2} * 0.28^2 * L_p * f = 4W$$

故 $L_p * f = 102$, 当 $L_p = 2.1mH$ 时 (对应 L_s 为 $21\mu H$), $f = 48kHz$, 根据 $F_{osc} = \frac{25000}{R_{osc} + 22}$,

可以取 $R_5 = 500k\Omega$ 。此时

$$\frac{1}{\frac{L_p * I_{pmax}}{V_{in}} + \frac{I_{pmax} * \sqrt{L_p * L_s}}{V_{led}}} = 128k\Omega > f = 48k\Omega, \text{ 满足断流的条件。}$$

4: 变压器选择

在上面的分析中, 我们假设 $L_p = 2.1mH$, $L_s = 21\mu H$, 实际选取时, 必须进行如下折中:

A: 如果副边电感过小, 则副边电感导通时, M1 管漏端电压 $V_{led} * L_p / L_s + V_{in}$ 将比较大, 有可能会击穿 M1;

B: 如果副边电感过大, 则副边电感寄生电阻较大, 这会降低系统效率;

C: 从公式 $\frac{1}{2} I_{pmax} * \frac{1}{\frac{1}{V_{in}} + \frac{\sqrt{L_s / L_p}}{V_{led}}} > P_{in}$ 可以看出, 当 v_{in} 和 v_{led} 确定时, L_s / L_p 越小

(即 L_p / L_s 越大), I_{pmax} 越小, 这显然对 M1 的散热有好处, 同时也可以提高系统效率。

选取变压器时, 要注意漏感不能太大, 也要保证可以工作在高压环境。

5: 功率开关管 Q1 选择

为了降低控制功耗, 应选取 C_{gs} 电容小、开关电阻小, V_{ds} 耐压值为 v_{in} 的 1.1 倍以上的功率管。推荐使用 2N60, C_{gs} 电容为 270pF, 开关电阻为 5 欧姆, v_{ds} 耐压值为 600V。

6: R6/R7/R8/R9 选择

为了降低芯片功耗, 在芯片 v_{in} 脚串联了 R6/R7/R8/R9。当芯片流过电流一定时, v_{in} 脚电压越低, 芯片的功率越低, 工作温度越低。

选择 R6/R7/R8/R9 时, 首先要估算芯片的平均电流。如按上述选择 2N60, 系统工作频率为 300kHz, 则 2N60 消耗的电流为 $i = f * v_{cc} * c = 300k * 7.5 * 270p = 600\mu A$ (考虑到开启关闭的过渡区以及 MOS 的馈通效应, 2N60 消耗的电流要大于 600uA), 芯片消耗的电流约为

500uA, R1/R2/R3/R4 消耗的电流约为 35uA, R8 消耗的电流约为 200uA, 则芯片 vin 提供的总电流约为 1335uA。Vin 脚电压最好高于 50V, 如果采用 PFC 电路, 则电阻 R6/R7/R8/R9 压降约为 100V, 按 1.5mA 电流计算, 可以选择 60k 欧姆的分压电阻, 消耗的功耗为 0.135W。考虑到电阻的额定功率为 1/8W, 可以选择多个电阻并联使用。

从上面的分析可以看出, 如果不选择分压电阻, 则芯片的功耗约为 $(300*2/3+150*1/3)*1.5m=375mW$ 。按照 $160^{\circ}C/W$ 的热阻计算, 芯片温度将达到 $27+0.375*160=87^{\circ}C$ (如果选择 Cgs 更大的功率管, 芯片将消耗更多的功耗, 温度更高), 而选用分压电阻后, 芯片温度降低到 $(0.375-0.135)*160+27=65^{\circ}C$ 。分压电阻越大, 芯片温度将越低。但也要考虑电源电压的波动, 如果分压电阻过大, 将可能使 vin 脚电压低于 50V。

选用 R6/R7/R8/R9 还有另外一个好处: 降低了 vin 和 sense 之间的电压差, 避免了在潮湿环境这两个相邻引脚之间火花放电。

7: C6 选择

C6 起储能和续流的目的, 可以假设 LED 电流不变, 负载电压变化 200mV, 根据 $c*\Delta u=i*\Delta t$, 则 $C6min=i*\Delta t/\Delta u=0.35/(48k*0.2)=36uF$, 建议取 $C6=47uF$, 可以用钽电容。用户可以根据 LED 的特性, 确定在可以接受电流变化范围内的电压变化, 从上面的推导可以看出, 如果负载电压变化 400mV, 则 C6 可以取 22uF 的电容。

如果用户使用过压保护电路 (如 U2/D4), 则 C6 耐压值为 16V 即可。

8: 保护电路

使用断流方式, 变压器传递的是能量 $P_{in}=\frac{1}{2}I_{pmax}^2*Lp*f$, 该能量与负载无关, 即使负载开路或者短路, 该能量都被传递, 所以必须增加保护电路以检测负载变化 (如果用户可以保证负载正常, 可以去掉保护电路以提高效率)。

过压保护:

D4 和 U2 起过压保护, 当电压超过 12V, D4 导通, 电流流过 R14。当 R14 压降高于 1.2V 时, U2 导通, 下拉 dim_d 电压直至芯片关断。用户也可以将 U2 的 4 脚接到 R1 和 R2 之间。

过流保护:

U2 和电阻 R15/R16/R17 起过压保护, 当 LED 电流过大时, R15/R16/R17 上的压降将会使 U2 导通, 从而关断芯片。用户要注意 R15/R16/R17 会严重影响效率, 同时也要选择功率比较大的电阻。

9: R1/R2/R3/R4

为了保持驱动电流的一致性, 需要通过电阻 R1/R2/R3/R4 调节 dim_a 电压大小, 建议 dim_a 电压调节范围为 $250\text{mV} \pm 100\text{mV}$ 。按照图 2 所示的电阻比例, dim_a 调节范围为 $142\text{mV} \sim 377\text{mV}$ 。由于 VCC 的驱动能力比较弱, R1/R2/R3/R4 的电阻值不能选取太小。

R1/R2/R3/R4 及 C4 也可以达到软启动的目的。

10: C4

C4 主要起两个作用, 一个是稳定 dim_a 电压, 一个是作驱动电路的软启动控制。当 dim_a 的抽头连接在 R2 和 R3 之间时, 电容 C8 充电时间常数为 $\tau = (R1 + R2) // (R3 + R4) * C4$ 。按照图示选取 R5/R6/R7 和 C8 时, C8 充电至 250mV 的时间为 1080us。如果需要更长的软启动时间, 可以按比例增加 R1/R2/R3/R4 或者 C4。

11: R5

R5 主要配合保护电路一起工作, dim_d 内置 100kohm 的电阻, 如果 R5 = 100kohm, 则保护电路不起作用时, dim_d 电压为 vcc/2。当保护电路起作用时, R5 可以起限流目的 (vcc 驱动电流能力较弱)。

12: RCD 箝位电路

RCD 箝位电路设计比较复杂, 一般依据经验, 也可参考下列公式进行选择:

$$R13 = \frac{2(V_{clamp} - V_{or}) * V_{clamp}}{L_{leak} * I_{pmax}^2 * f}$$

其中, $V_{clamp} = 0.9V_{(BR)M1} - V_{inmax}$, 也为 C5 电压, V_{or} 为副边到原边的耦合电压,

L_{leak} 为初级线圈的漏感, 一般比例为 1~5%, I_{pmax} 为原边最大电流。

$$C5 > \frac{V_{clamp}}{\Delta V_{clamp} * R13 * f}$$

其中 ΔV_{clamp} 一般取 V_{clamp} 的 5~10%。

注意箝位电阻的功率选择应考虑 1/3 降额使用，箝位电容应选择具有低的串联等效电阻和低的等效电感的电容，箝位二极管应选择反向击穿电压高于开关管的漏源击穿电压且反向恢复时间尽可能短的超快恢复二极管（摘自《反激式变换器中 RCD 箝位电路的设计》，电子工程专辑，2004 年 09 月 03 日）。

完成上面的步骤后，下面可以进行带电调试。完成测试需要示波器和万用表。

1: 空载测试

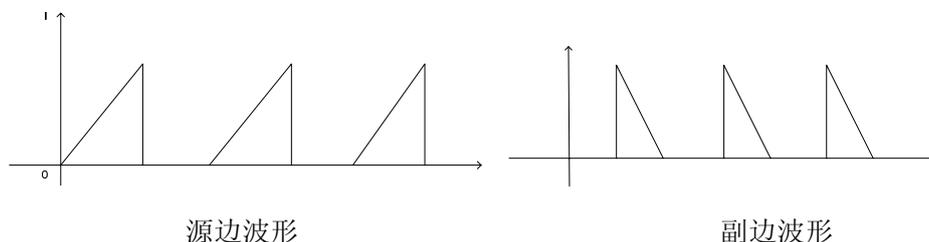
不带负载，去掉变压器，在图 1 的 J5 和 J6 加 220Vac 电源。首先测试 FT6610 vcc 脚电压，如果电压低于 7.5V，则说明芯片没有正常工作，需要检查电源和电路连接。

接着测试系统的静态功耗，如果可能，直接测量功率，应该在 0.2W 左右，如果偏大，则说明电路连接有问题，需要检查 PCB 板连接。如果不能直接测量功率，也可以测试电源电流，电流应该不高于 1mA。

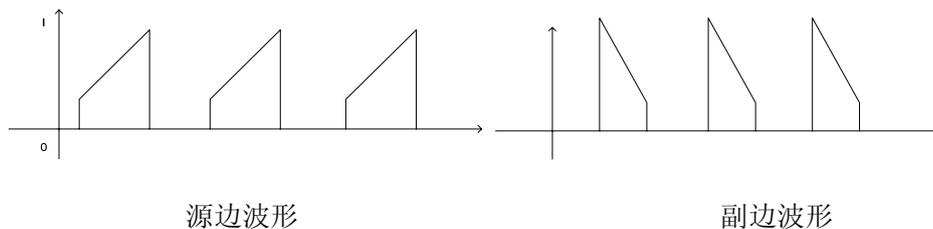
2: 带负载测试

A: 测试 vcc 电压和 vin 电压，vcc 电压应为 7.5V，且 vin 电压高于 50V。

B: 用示波器测量变压器源边或者副边的电流波形，如果电流波形如下图所示的锯齿波，则说明 Iled 没有断流；



如果源边和副边的电流波形如下图所示，则说明源边电感没有从 0 开始充电，而副边电感的电流也没有完全释放，需要修改 R10/R11/R12，否则电源电压改变时，负载电流将出现较大的波动。



D: 用肉眼观测 LED, 以不闪烁为标准, 如果闪烁, 可以调节 R10/R11/R12。

3: 保护电路调试

过压保护:

可增加 LED 个数或者空载, 测试 dim_d 电压是否降低到 1V 以下;

过流保护:

可降低 sense 电阻或者减小 LED 个数, 测试 dim_d 电压是否降低到 1V 以下;

附 1: 典型应用 BOM 表

Item	Quantity	Reference	Part	封装
1	1	C2	10uF/400V 铝电解电容	DIP
2	1	C3	1uF/16V 陶瓷贴片电容	SMD0603
3	1	C4	1uF/16V 陶瓷贴片电容	SMD0603
4	1	C5	5nF/400V 陶瓷贴片电容	SMD0603
5	2	D2/D3	1.0A 快恢复二极管 ES1J	SMA/DO-214AC
6	1	D4	齐纳二极管 12V/300mA	DIP
7	1	T4	2.1mH/21uH 变压器	E14
8	1	M1	600V, 2A NMOSFET	T0-252
9	3	R1/R2/R5	100k, 1/8W, 1%电阻	SMD0603
10	1	R3	6.6k 可变电阻	SMD3*3mm
11	1	R4	4, 1/8W, 1%电阻	SMD0603
12	4	R6, R7, R8, R9	220k, 1/8W, 1%电阻	SMD0805
13	1	R10	500k, 1/8W, 1%电阻	SMD0603
14	2	R11/R12	2, 1/8W, 1%电阻	SMD0603
15	1	R13	100k, 1/8W, 1%电阻	SMD0805
16	1	R14	68, 1/8W, 1%电阻	SMD0805
17	3	R15/R16/R17	10ohm, 1/4W, 1%电阻	SMD1206
18	1	U1	FT6610	SOP8
19	1	U2	EverLight 817	DIP4

附 2：图 2 典型应用测试结果

测试条件：220V AC 输入，负载为 3 个 350mA 高亮度 LED 灯串联。测试时，在 LED 串联了 2 欧姆的电阻。测试温度为室温。

测试仪器：PF9800 智能电量测量仪（远方光电），MSO6054A 示波器（Agilent），FLUKE 111 示波器（FLUKE，测电压用），VC97（Victor，测电流用），DC-500VA 隔离变压器（柳迪），TDGC2J-05 变压器（三正电器）。

测试结果：

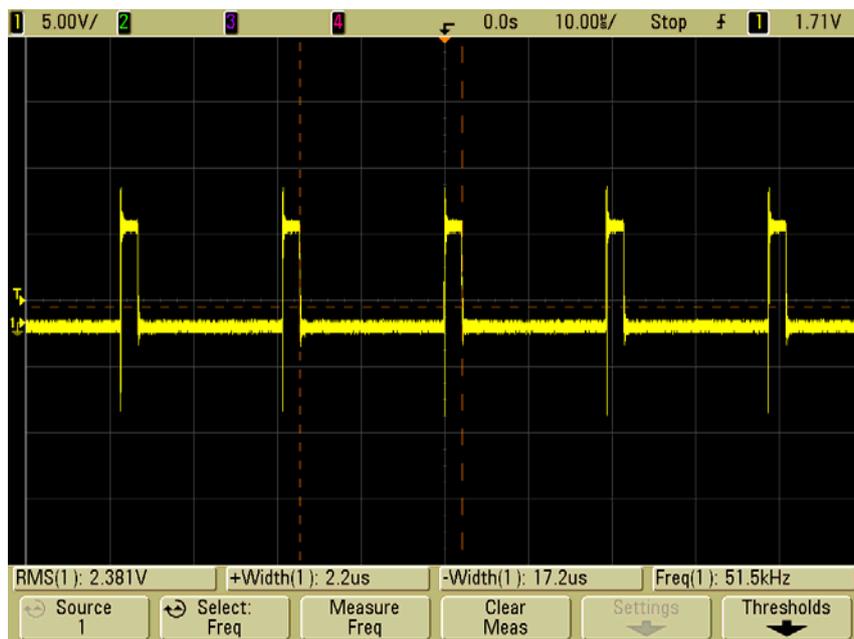
空载静态功耗	0.21W
输出平均电流	350mA
LED 电压	9.7V
电流 ripple	±30%
效率	60%
工作频率	48kHz 左右

注 1：电压范围为 190VAC~250VAC

测试波形:



LED 串联 2ohm 电阻的电压波形



gate 电压波形

本方案为敦泰实验室调试方案，敦泰将不会对任何参考该方案的产品负责（包括但不限于产品寿命以及使用过程中发生的任何安全问题），敦泰也将不会通知用户在其方案上所作的修改。如果用户想了解最新的应用，请访问公司网站

www.focaltech-systems.com