

基于 FAN7711 的电子镇流器原理与设计

马存云, 毛兴武

(1. 临沂师范学院物理系, 山东 临沂 276005; 2. 临沂市电子研究所, 山东 临沂 276004)

1 引言

目前在 20 W 以下的节能灯中, 电子镇流器已全部取代了电感镇流器。但是在 20 W 以上尤其是 32 W 以上的荧光灯中, 电子镇流器并没有完全替代电感镇流器。飞兆(Fairchild)半导体公司推出的 FAN7711 是新型镇流器控制 IC 中的一种代表性器件。FAN7711 为设计简单的高性能荧光灯电子镇流器提供了新的解决方案。

2 FAN7711 的结构及其特点

FAN7711 的工作温度范围为 $-25^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$, 可提供 8 引脚 DIP 封装和 SOP 封装。FAN7711 内部集成了振荡器、预热和死区时间控制电路、自适应零电压开关(ZVS)控制器、上桥与下桥 MOSFET 栅极驱动器等电路, 内部结构框图如图 1 所示。

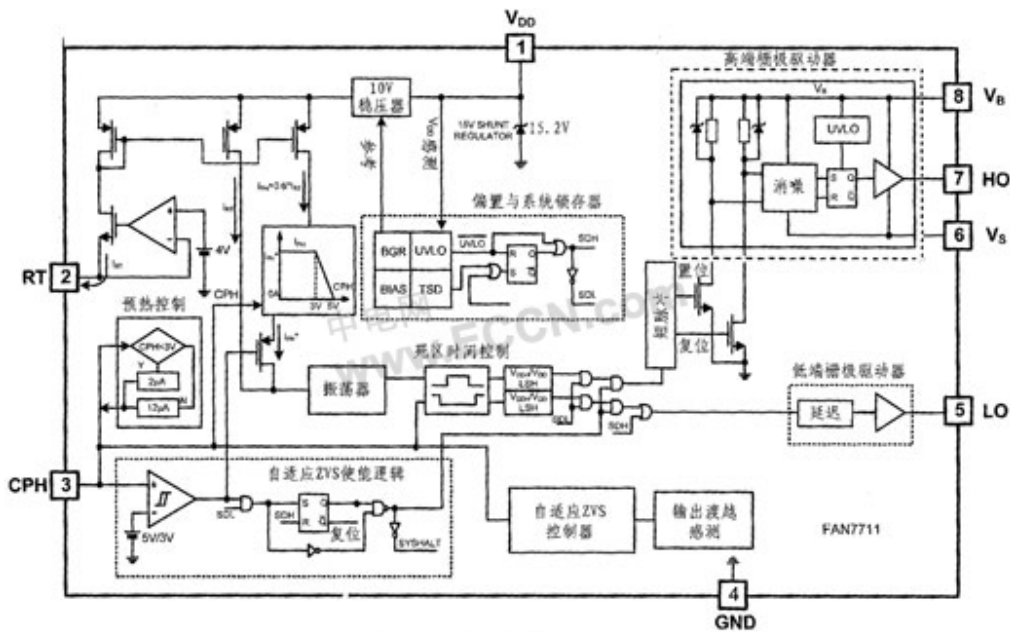


图 1 FAN7711 内部结构框图

FAN7711 的引脚 VDD 为供电电源, RT 引脚连接振荡频率设置电阻(RT), CPH 引脚连接预热时间设置电容(CPH), 引脚 GND 为接地端, 引脚 HO 和 LO 分别为上桥和下桥驱动器输出端, VB 和 VS 分别是上桥浮动电源输入端和返回端。

FAN7711 的主要特性如下:

为自举操作浮动通道电压达 600 V;

低启动电流(仅 120 μ A)和工作电流(仅 3.2 mA);

VDD 欠电压锁定(UVLO)门限电平为 11.6 V, 相对于 13.4 V 的导通门限具有 1.8 V 的滞后;

正常工作频率和预热时间均由外部电阻和电容设置;

内置有源自适应 ZVS 控制电路;

灯开路检测无需外部电路;

VDD 内部并联一只 15.2 V 的齐纳箝位二极管;

当引脚 CPH 上的电压被拉低至 2.6 V 以下或 IC 结温超过 160 $^{\circ}$ C 时, FAN7711 进入关闭模式。

3 工作原理与设计

基于 FAN7711 的荧光灯镇流器谐振逆变器电路如图 2 所示。在图 2 中, VDC 为经桥式整流滤波的 DC 电压(约 300 V)或有源 PFC 升压变换器输出电压(约 400 V), RST 为启动电阻, DB 和 CB 分别为半桥高端驱动器自举二极管和自举电容, CSNUB 和 DCP1、DCP2 组成电荷泵(辅助电源)电路, L、CS、CP 及灯等效电阻 RL 组成 LCC 谐振槽路。

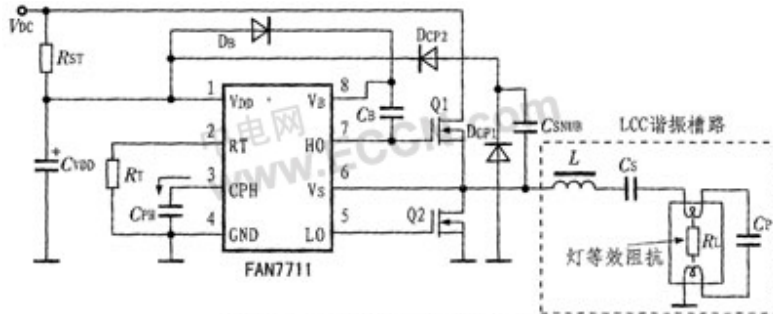


图 2 基于 FAN7711 的谐振逆变器电路

3.1 电路工作原理

3.1.1 启动电路

系统加电后, VDC 通过 RST 给 CVDD 充电。当 IC 引脚 VDD 上的电压达到 13.4 V 的门限, FAN7711 启动, 振荡器开始工作。半桥一旦产生高频输出, 由 CSNUB、DCP1 和 DCP2 组成的电荷泵为 VDD 引脚提供工作电流, 因而在 IC 启动后, RST 的功耗很小, 因此 RST 采用低成本 0.25 W 的电阻。

3.1.2 预热模式

FAN7711 开始工作, 引脚 CPH 内部 2 μ A 电流源对电容 CPH 充电, CPH 上的电压从零开始线性增加。当 VCPH 达到 3 V 时,

预热结束。预热时间 t_{PH} 为

$$t_{PH}=3C_{PH} / I_{PH}=3C_{PH} / 2 \times 10^{-6} \quad (1)$$

在预热模式，振荡器频率最高，是正常工作频率 f_{RUN} 的 1.6 倍，即

$$f_{PH}=1.6f_{RUN} \quad (2)$$

在预热期间，HO 和 LO 端输出信号的死区时间(即非交迭时间) t_{DT} 最长(3.1 μ s)。

3.1.3 能发启动(即点火)模式

预热时间结束，FAN7711 进入点火模式。在点火模式下，CPH 引脚上的电流源变为 $I_{IGN}(12\mu A)$ ，CPH 上的电压上升速率增加。如图 3 所示。当 V_{CPH} 达到 5 V 时(即 t_2 时刻)，点火模式结束。在点火模式时，频率从 f_{PH} 线性降低至工作频率 f_{RUN} ，死区时间从最大值逐步缩短。在频率扫描通过 LCC 谐振槽路的固有频率时，与灯管并联的启动电容 CP 产生一个 800 V~1 500 V 的高压脉冲使灯管内气体电离而点亮。灯一旦被点亮，可等效为电阻 R_L 。点火时间 t_{IGN} (即 t_2-t_1)为：

$$t_{IGN}=[(5 V-3 V)C_{PH}] / I_{IGN}=2 V \times C_{PH} / 12 \times 10^{-6} A \quad (3)$$

点火频率 f_{IGN} 是 V_{CPH} 的函数，可表示为：

$$f_{IGN}=[0.3(5 V-V_{CPH})+1]f_{RUN} \quad (4)$$

很显然， $f_{PH} > f_{IGN} > f_{RUN}$ 。

3.1.4 工作模式和有源 ZVS 模式

当 CPH 上的电压 V_{CPH} 超过 5 V，仍持续升高，工作频率由 R_T 固定为 f_{RUN} 。 f_{RUN} 计算公式为：

$$f_{RUN}=(4 \times 10^9) / R_T \quad (5)$$

当 V_{CPH} 达到 6 V 时(即在 t_3 时刻)，有源自适应 ZVS 被激活。为满足 ZVS 工作条件，FAN7711 检测引脚 VS 上的输出渡越信息。如果满足 ZVS，FAN7711 将缓慢增加 CPH 引脚上的电压，缩短死区时间。选择最佳值，以提高逆变器效率、减小热损耗和 EMI；如果 ZVS 失效，FAN7711 降低引脚 CPH 的电压，延长死区时间，实现 ZVS 工作最优化。

3.1.5 灯开路自动检测

FAN7711 无需外部电路，可自动检测灯开路故障。当灯开路时，输出谐振槽路异常，不能满足 ZVS 条件，可使引脚 VS 的(半桥输出)电流充电，电荷泵电容 C_{SNUB} 放电。在电容性负载驱动条件下，FAN7711 的功耗 P_D 为：

$$P_D=(V_{DC}^2 C_{SNUB} f_{SW}) / 2 \quad (6)$$

若 $V_{DC}=310\text{ V}$, $CS_{NUB}=1\text{ nF}$, 开关频率 $f_{SW}=50\text{ kHz}$, FAN7711 的功耗达 2.4 W , 致使结温急剧升高。如果温度超过 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, 热关闭电路将使 IC 停止工作。在脱离 ZVS 时, V_{CPH} 低于 2 V , FAN7711 进入关闭模式(参见图 3)。

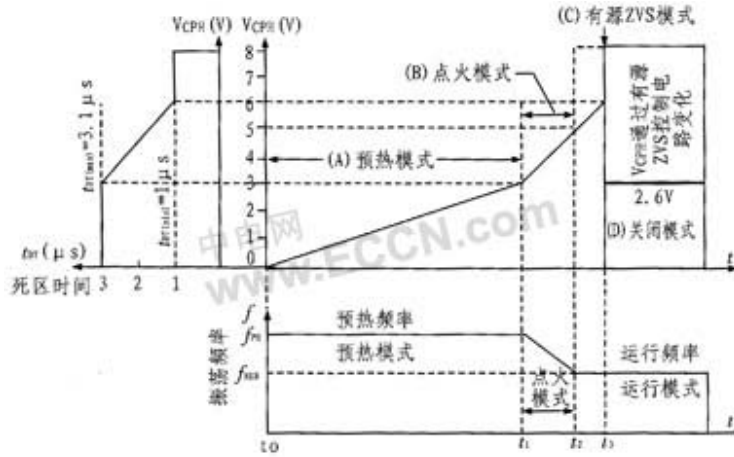


图 3 不同工作模式 FAN7711 引脚 C_{PH} 上的电压、频率及死区时间

3.2 设计举例

如果电子镇流器 AC 输入电压 $V_{AC}=220\text{ V}$, 采用全波整流电容滤波电路, 灯丝预热时间 $t_{pH}=1\text{ s}$, 正常工作频率 $f_{RUN}=53\text{ kHz}$, 根据这些条件可以确定电路中的主要元件。

3.2.1 启动元件的选择

由于 $V_{AC}=220\text{ V}$, V_{DC} 为桥式整流滤波输出电压, 其值为 $V_{DC}=220\text{ V}\times\sqrt{2}\approx 311\text{ V}$ 。FAN7711 的启动门限 $V_{DDTH}(ST+)=13.4\text{ V}$, 启动电流 $I_{ST}=120\mu\text{A}$, 启动电阻 R_{ST} 值必须满足下式:

$$[V_{DC}-V_{DDTH}(ST+)] / R_{ST} > I_{ST} \quad (7)$$

由式(7)可得:

$R_{ST} < [V_{DC}-V_{DDTH}(ST+)] / I_{ST} = (311\text{ V}-13.4\text{ V}) / 120\mu\text{A} = 2480\text{ k}\Omega$ 若 R_{ST} 选用低成本的 0.25 W 电阻, 引脚 V_{DD} 的箝位电压 $V_{CL}=15.2\text{ V}$, 因此:

$$(V_{DC}-V_{CL})^2 / R_{ST} < 0.25\text{ W} \quad (8)$$

$$R_{ST} > 4(V_{DC}-V_{CL})^2 = 4 \times (311\text{ V}-15.2\text{ V})^2 \approx 350\text{ k}\Omega$$

由于 FAN7711 具有热保护、灯开路保护或半桥硬开关保护功能, 当 FAN7711 进入关闭模式时, FAN7711 将消耗 $250\mu\text{A}$ 的关闭电流 I_{SD} 。为阻止 FAN7711 重新启动, R_{ST} 的选择必须覆盖 I_{SD} 的消耗, 因此要求:

$$R_{SI} < [V_{DC} - V_{DDTH(ST+)}] / I_{SD} = (311 \text{ V} - 13.4 \text{ V}) / 250 \mu\text{A} = 1190 \text{ k}\Omega$$

根据以上分析计算，RST 值选取在 510 kΩ 与 680 kΩ 之间是适宜的。

启动时间 tST 由式(9)计算：

$$t_{ST} \approx (R_{ST} C_{VDD} V_{DDTH(ST+)}) / (V_{DC} - R_{ST} I_{ST} - V_{DDTH(ST+)})$$
$$= (R_{ST} C_{VDD} \times 13.4) / (311 - R_{ST} I_{ST} - 13.4) \quad (9)$$

若要求 tST=0.33 s，在选取 RST=560 kΩ 条件下，由于 IST=120μA，根据式(9)可得：CVDD=10μA。CVDD 含有引脚 VDD 上旁路电容，即为引脚 VDD 上的总电容值。

3.2.2 电荷泵电容 CSNUB 的选择

半桥输出死区时间为 tDT，CSNUB 的充电电流通过 DCP2，充电电流为 ICHG=CSNUB(dv / dt)=CSNUB(VDC / tDT)。CSNUB 放电电流通过 DCP1，在下一开关周期内为 FAN7711 提供的总电流为 ITOTAL=CSNUBVDC。施加到 FAN7711 的平均电流为：

$$I_{AVG} = I_{TOTAL} / t_{SW} = C_{SNUB} V_{DC} f_{SW} \quad (10)$$

为保证 FAN7711 正常工作，并且不产生过多的热量，可选择 IAVG=8 mA。根据式(10)得：

$$C_{SNUB} = I_{AVG} / V_{DC} f_{SW} = 8 \times 10^{-3} / 311 \times 53 \times 10^3 \approx 485 \text{ pF}$$

可选取 CSNUB=470 pF。

3.2.3 确定 RT 和 CPH

由式(5)得：

$$R_T = 4 \times 10^9 / f_{RUN} = 4 \times 10^9 / 53 \times 10^3 \approx 75.5 \text{ k}\Omega$$

由式(1)得：

$$C_{PH} = (2 \times 10^{-6} t_{PH}) / 3 = (2 \times 10^{-6} \times 1) / 3 \approx 0.67 \mu\text{F}$$

选择 CPH=0.68μF。

因篇幅所限，其他元件的选择不再逐一给出。

3.3 采用 FAN7711 的高功率因数 32 W 双灯管电子镇流器电路

采用 FAN7711 带有源 PFC 的 32 W 双灯管电子镇流器电路如图 4 所示。在半桥逆变器前端的有源 PFC 升压预变器，采用 FAN7529 作为控制器。镇流器的正常工作频率为：

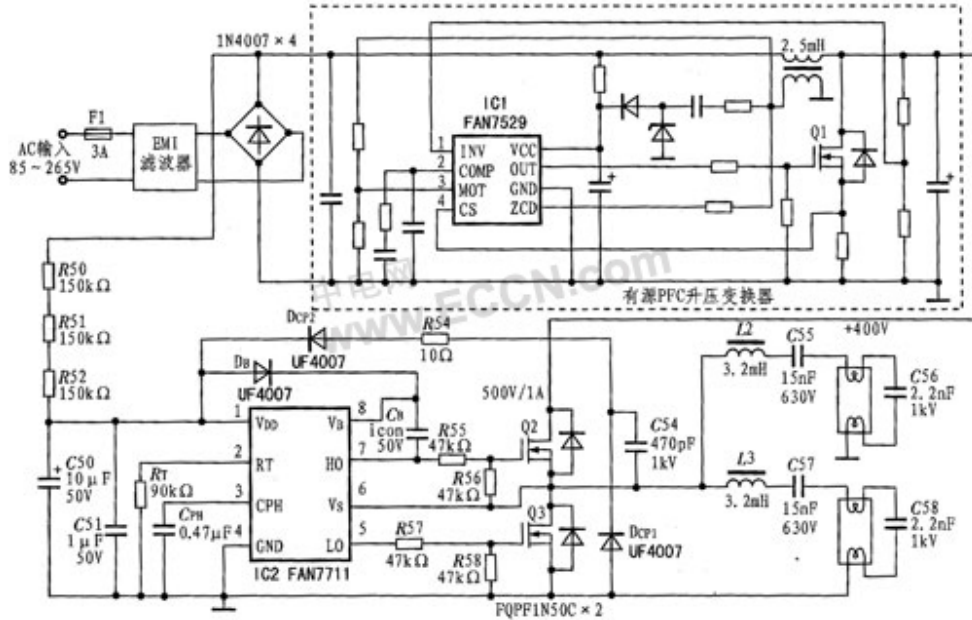


图 4 采用 FAN7711 的 32W 双灯管电子镇流器电路

$$f_{RUN} = 4 \times 10^9 / R_T = 4 \times 10^9 / 90 \times 10^3 \approx 44.4 \text{ kHz}$$

预热频率为：

$$f_{PH} \approx 1.6 f_{RUN} = 1.6 \times 44.4 \text{ kHz} = 71 \text{ kHz}$$

预热时间为：

$$t_{PH} = 3 C_{PH} / I_{PH} = 3 \times 0.47 \times 10^{-6} / 2 \times 10^{-6} = 0.7 \text{ s}$$

点火时间为：

$$t_{IGN} = 2 C_{PH} / I_{IGN} = 2 \times 0.47 \times 10^{-6} / 12 \times 10^{-6} \approx 0.08 \text{ s}$$

L2 和 L3 采用 EI 2820 磁心，线圈共 130 匝，电感为 3.2 mH。Q2 和 Q3 均应采用 FQPFI50C(1 A / 500 V)。

4 结束语

飞兆半导体公司采用高压工艺的 FAN7711 镇流器控制 IC，仅用电阻 RT 就可以编程设置预热和工作频率。预热和点火时间则由

电容(CPH)设定。**FAN7711** 利用有源自适应 ZVS 控制电路检测开关工作状态，无需外部电路就可执行灯开路检测，提供过热关闭。**FAN7711** 为设计简单、高性能和低成本电子镇流器提供了一种新的解决方案。