

开关电源中光耦隔离的几种典型接法对比

在一般的隔离电源中，光耦隔离反馈是一种简单、低成本的方式。但对于光耦反馈的各种连接方式及其区别，目前尚未见到比较深入的研究。而且在很多场合下，由于对光耦的工作原理理解不够深入，光耦接法混乱，往往导致电路不能正常工作。本研究将详细分析光耦工作原理，并针对光耦反馈的几种典型接法加以对比研究。

1 常见的几种连接方式及其工作原理

常用于反馈的光耦型号有 TLP521、PC817 等。这里以 TLP521 为例，介绍这类光耦的特性。

TLP521 的原边相当于一个发光二极管，原边电流 I_f 越大，光强越强，副边三极管的电流 I_c 越大。副边三极管电流 I_c 与原边二极管电流 I_f 的比值称为光耦的电流放大系数，该系数随温度变化而变化，且受温度影响较大。作反馈用的光耦正是利用“原边电流变化将导致副边电流变化”来实现反馈，因此在环境温度变化剧烈的场合，由于放大系数的温漂比较大，应尽量不通过光耦实现反馈。此外，使用这类光耦必须注意设计外围参数，使其工作在比较宽的线性带内，否则电路对运行参数的敏感度太强，不利于电路的稳定工作。

通常选择 TL431 结合 TLP521 进行反馈。这时，TL431 的工作原理相当于一个内部基准为 2.5V 的电压误差放大器，所以在其 1 脚与 3 脚之间，要接补偿网络。

常见的光耦反馈第 1 种接法，如图 1 所示。图中， V_o 为输出电压， V_d 为芯片的供电电压。com 信号接芯片的误差放大器输出脚，或者把 PWM 芯片（如 UC3525）的内部电压误差放大器接成同相放大器形式，com 信号则接到其对应的同相端引脚。注意左边的地为输出电压地，右边的地为芯片供电电压地，两者之间用光耦隔离。

图 1 所示接法的工作原理如下：当输出电压升高时，TL431 的 1 脚（相当于电压误差放大器的反向输入端）电压上升，3 脚（相当于电压误差放大器的输出脚）电压下降，光耦 TLP521 的原边电流 I_f 增大，光耦的另一端输出电流 I_c 增大，电阻 R4 上的电压降增大，com 引脚电压下降，占空比减小，输出电压减小；反之，当输出电压降低时，调节过程类似。

常见的第 2 种接法，如图 2 所示。与第 1 种接法不同的是，该接法中光耦的第 4 脚直接接到芯片的误差放大器输出端，而芯片内部的电压误差放大器必须接成同相端电位高于反相端电位的形式，利用运放的一种特性——当运放输出电流过大（超过运放电流输出能力）时，运放的输出电压值将下降，输出电流越大，输出电压下降越多。因此，采用这种接法的电路，一定要把 PWM 芯片的误差放

大器的两个输入引脚接到固定电位上，且必须是同向端电位高于反向端电位，使误差放大器初始输出电压为高。

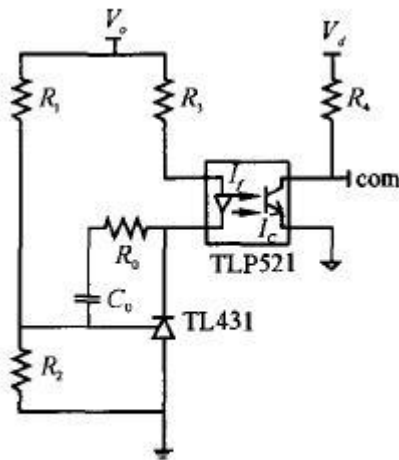


图1 光耦反馈第1种接法

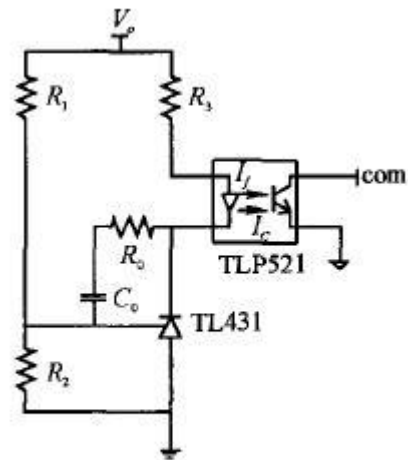


图2 光耦反馈的第2种接法

图2所示接法的工作原理是：当输出电压升高时，原边电流 I_f 增大，输出电流 I_c 增大，由于 I_c 已经超过了电压误差放大器的电流输出能力，com 脚电压下降，占空比减小，输出电压减小；反之，当输出电压下降时，调节过程类似。

常见的第3种接法，如图3所示。与图1基本相似，不同之处在于图3中多了一个电阻 R_6 ，该电阻的作用是对 TL431 额外注入一个电流，避免 TL431 因注入电流过小而不能正常工作。实际上如适当选取电阻值 R_3 ，电阻 R_6 可以省略。调节过程基本上同图1接法一致。

常见的第4种接法，如图4所示。该接法与第2种接法类似，区别在于 com 端与光耦第4脚之间多接了一个电阻 R_4 ，其作用与第3种接法中的 R_6 一致，其工作原理基本同接法2。

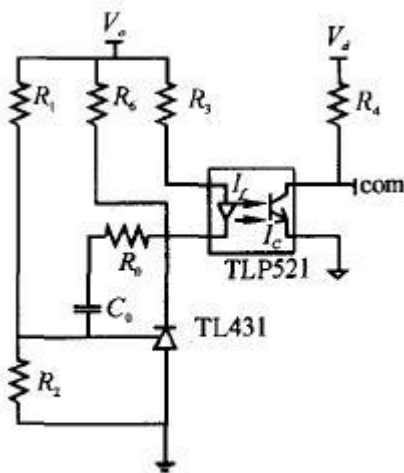


图3 光耦反馈的第3种接法

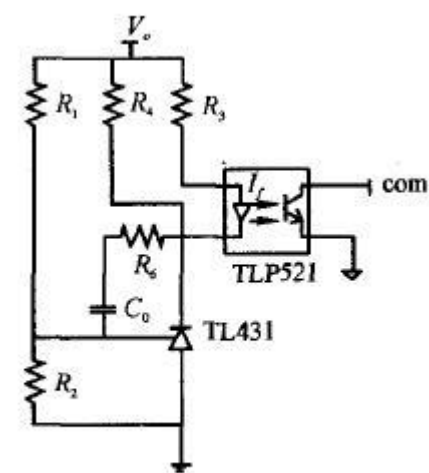


图4 光耦反馈的第4种接法

2 各种接法的比较

在比较之前，需要对实际的光耦 TLP521 的几个特性曲线作一下分析。首先是 I_c-V_{ce} 曲线，如图 5，图 6 所示。

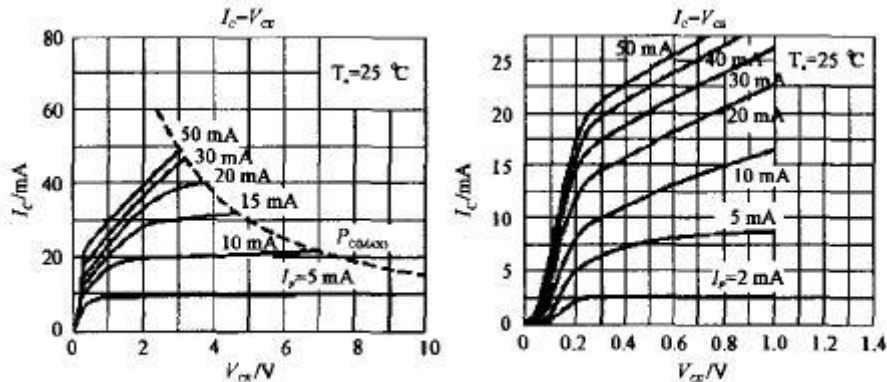


图 5 TLP521 的 $I_c - V_{ce}$ 曲线 图 6 TLP521 的 $I_c - V_{ce}$ 曲线

由图 5、图 6 可知，当 I_f 小于 5 mA 时， I_f 的微小变化都将引起 I_c 与 V_{ce} 的剧烈变化，光耦的输出特性曲线平缓。这时如果将光耦作为电源反馈网络的一部分，其传递函数增益非常大。对于整个系统来说，一个非常高的增益容易引起系统不稳定，所以将光耦的静态工作点设置在电流 I_f 小于 5 mA 是不恰当的，设置为 5~10 mA 较恰当。

此外，还需要分析光耦的 I_c-I_f 曲线，如图 7 所示。

由图 7 可以看出，在电流 I_f 小于 10 mA 时， I_c-I_f 基本不变，而在电流 I_f 大于 10 mA 之后，光耦开始趋向饱和， I_c-I_f 的值随着 I_f 的增大而减小。对于一个电源系统来说，如果环路的增益是变化的，则将可能导致不稳定，所以将静态工作点设置在 I_f 过大处（从而输出特性容易饱和），也是不合理的。需要说明的是， I_c-I_f 曲线是随温度变化的，但是温度变化所影响的是在某一固定 I_f 值下的 I_c 值，对 I_c-I_f 比值基本无影响，曲线形状仍然同图 7，只是温度升高，曲线整体下移，这个特性从 I_c-T_a 曲线（如图 8 所示）中可以看出。

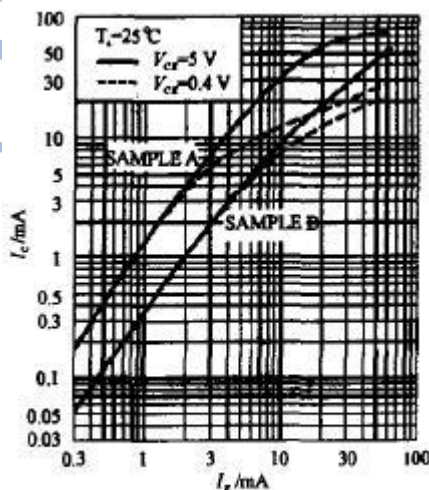


图 7 TLP521 的 $I_c - I_f$ 曲线

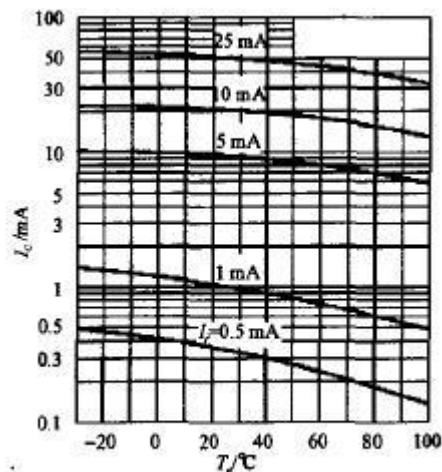


图 8 TLP521 的 $I_c - T_a$ 曲线

由图 8 可以看出, 在 I_f 大于 5 mA 时, I_c - T_a 曲线基本上是互相平行的。

根据上述分析, 以下针对不同的典型接法, 对比其特性以及适用范围。本研究以实际的隔离半桥辅助电源及反激式电源为例说明。

第 1 种接法中, 接到电压误差放大器输出端的电压是外部电压经电阻 R_4 降压之后得到, 不受电压误差放大器电流输出能力影响, 光耦的工作点选取可以通过其外接电阻随意调节。

按照前面的分析, 令电流 I_f 的静态工作点值大约为 10 mA, 对应的光耦工作温度在 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 变化, 值在 20~15 mA 之间。一般 PWM 芯片的三角波幅值大小不超过 3 V, 由此选定电阻 R_4 的大小为 670Ω , 并同时确定 TL431 的 3 脚电压的静态工作点值为 12 V, 那么可以选定电阻 R_3 的值为 560Ω 。电阻 R_1 与 R_2 的值容易选取, 这里取为 27 k 与 4.7 k。电阻 R_5 与电容 C_1 为 PI 补偿, 这里取为 3 k 与 10 nF。

实验中, 半桥辅助电源输出负载为控制板上的各类控制芯片, 加上多路输出中各路的死负载, 最后的实际功率大约为 30 W。实际测得的光耦 4 脚电压 (此电压与芯片三角波相比较, 从而决定驱动占空比) 波形, 如图 9 所示。对应的驱动信号波形, 如图 10 所示。

图 10 的驱动波形有负电压部分, 是由于上、下管的驱动绕在一个驱动磁环上的缘故。可以看出, 驱动信号的占空比较大, 大约为 0.7。

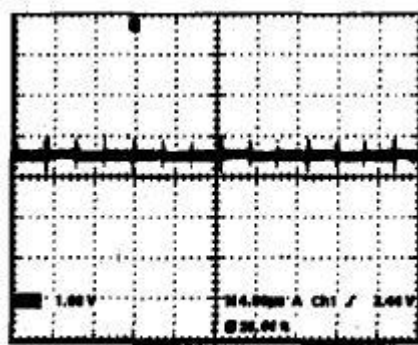


图 9 光耦 4 脚电压波形

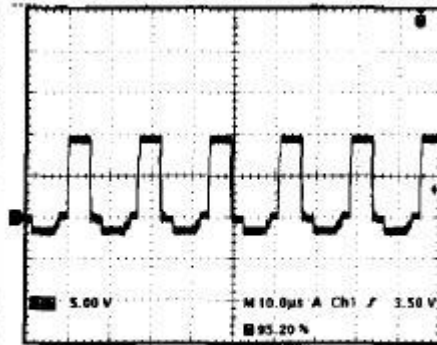


图 10 半桥下管的驱动波形

对于第 2 种接法, 一般芯片内部的电压误差放大器, 其最大电流输出能力为 3 mA 左右, 超过这个电流值, 误差放大器输出的最高电压将下降。所以, 该接法中, 如果电源稳态占空比较大, 那么电流 I_c 比较小, 其值可能仅略大于 3 mA, 对应图 7, I_b 为 2 mA 左右。由图 6 可知, I_b 值较小时, 微小的 I_b 变化将引起 I_c 剧烈变化, 光耦的增益非常大, 这将导致闭环网络不容易稳定。而如果电源稳态占空比较小, 光耦的 4 脚电压比较小, 对应电压误差放大器的输出电流较大, 也就是 I_c 比较大 (远大于 3 mA), 则对应的 I_b 也比较大, 同样对应于图 6, 当 I_b 值较大时, 对应的光耦增益比较适中, 闭环网络比较容易稳定。

同样，对于上面的半桥辅助电源电路，用接法 2 代替接法 1，闭环不稳定，用示波器观察光耦 4 脚电压波形，有明显的振荡。光耦的 4 脚输出电压（对应于 UC3525 的误差放大器输出脚电压），波形如图 11 所示，可发现明显的振荡。这是由于这个半桥电源稳态占空比较大，按接法 2 则光耦增益大，系统不稳定而出现振荡。

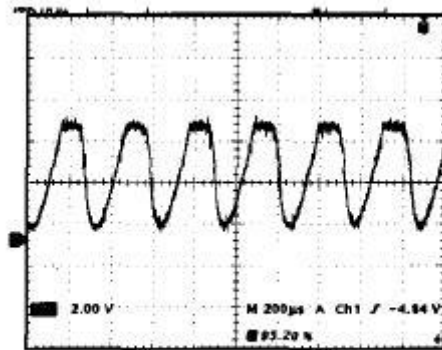


图 11 光耦的 4 脚输出电压

实际上，第 2 种接法在反激电路中比较常见，这是由于反激电路一般都出于效率考虑，电路通常工作于断续模式，驱动占空比较小，对应光耦电流 I_c 比较大，参考以上分析可知，闭环环路也比较容易稳定。

以下是另外一个实验反激电路，工作在断续模式，实际测得其光耦 4 脚电压波形，如图 12 所示。实际测得的驱动信号波形，如图 13 所示，占空比约为 0.2。

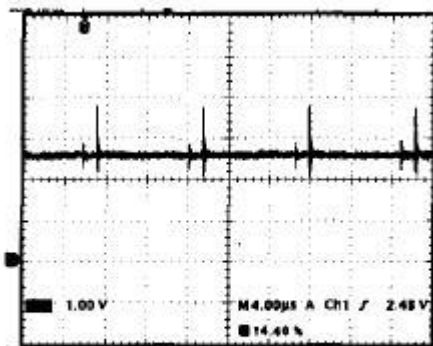


图 12 反激电路光耦 4 脚电压波形

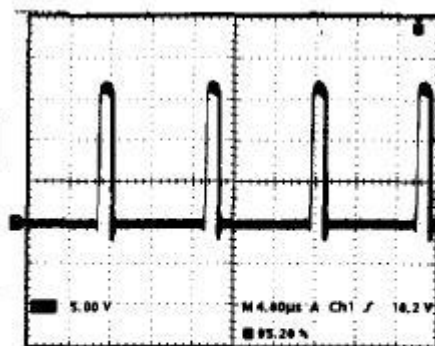


图 13 反激电路驱动信号波形

因此，在光耦反馈设计中，除了要根据光耦的特性参数来设置其外围参数外，还应该知道，不同占空比下对反馈方式的选取也是有限制的。反馈方式 1、3 适用于任何占空比情况，而反馈方式 2、4 比较适合于在占空比较小的场合使用。

3 结束语

本研究列举了 4 种典型光耦反馈接法,分析了各种接法下光耦反馈的原理以及各种限制因素,对比了各种接法的不同点。通过实际半桥和反激电路测试,验证了电路工作的占空比对反馈方式选取的限制。最后对光耦反馈进行总结,对今后的光耦反馈设计具有一定的参考价值。

OFweek 电源网