

利用耗尽型 MOSFET 实现电流调节器

电流镜型电流调节器

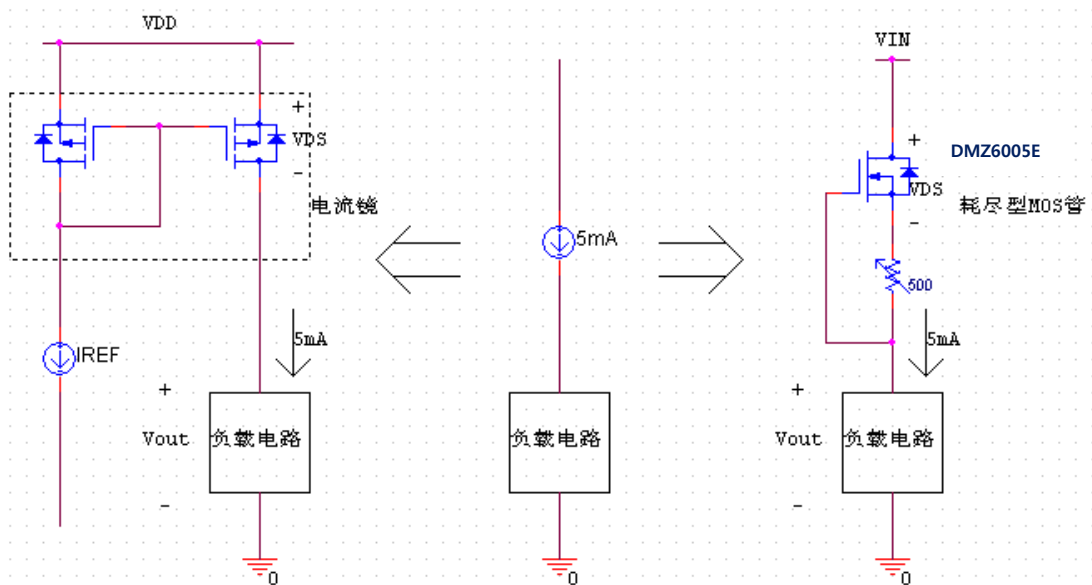
电流调节器（Current Regulator）一般采用电流镜（Current Mirror）等比例地“复制”IC 中的基准电流 I_{REF} ，从而实现恒流输出，如图 1(a)所示。由于需要 IC 来产生基准电流 I_{REF} ，并且 IC 本身又需要稳定的电源电压 V_{DD} ，其电路较为复杂，具有较高的系统成本。电流镜型电流调节器的输出电压范围 V_{OUT} 为

$$0 < V_{OUT} < V_{DD} - V_{DS} \quad (1)$$

其中 V_{DS} 为输出级 MOS 管漏极-源极之间的电压差。由于 V_{DD} 一般不高于 18V，电流镜型电流调节器的输出电压范围较窄，大大限制了其应用。

由此可见，电流镜型电流调节器具有如下优缺点

- (1) 电流精度高；
- (2) 输出电压范围较窄；
- (3) 电路结构复杂，成本较高。



(a) 电流镜型电流调节器 (b) 电流调节器示意图 (c) 耗尽型 MOS 管电流调节器

图 1. 电流调节器的实现

耗尽型 MOS 管电流调节器

采用耗尽型 MOSFET，可以非常简便地实现电流调节器电路，如图 1(c) 所示。在饱和工作区，耗尽型 MOS 管的漏-源电流 I_D 为

$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS(OFF)})^2 \tag{2}$$

其中 k 为跨导系数，为一常数。

栅-源零偏时 ($V_{GS}=0V$) 的漏-源饱和电流 I_{DSS} 为

$$I_{DSS} = k(0 - V_{GS(OFF)})^2 = kV_{GS(OFF)}^2 \tag{3}$$

在图 1(c) 的电流调节器电路中，

$$I_D = k(-I_D * R - V_{GS(OFF)})^2 = k(I_D R + V_{GS(OFF)})^2 \tag{4}$$

由式 (3) 和 (4) 可以得出

$$I_D = I_{DSS} \left(1 + \frac{I_D R}{V_{GS(OFF)}} \right)^2 \tag{5}$$

由式 (5) 可以看出， I_D 由饱和电流 I_{DSS} 、关断电压 $V_{GS(OFF)}$ 和可调电阻 R 共同决定。对于某一给定型号的耗尽型 MOS 器件，饱和电流 I_{DSS} 和关断电压 $V_{GS(OFF)}$ 均是确定的。以 ARK 公司的 DMZ6005E 为例，其饱和电流 I_{DSS} 的最小值为 20mA， $V_{GS(OFF)}$ 位于 -3.3V ~ -1.5V 之间，典型值为 -2.0V。因此，当选定耗尽型 MOS 管后，电流 I_D 由电阻 R 唯一确定。

由式 (5) 可以得出

$$R = \frac{V_{GS(OFF)}}{I_D} * (\sqrt{I_D / I_{DSS}} - 1) \tag{6}$$

由于不可避免的工艺波动，器件参数 I_{DSS} 和 $V_{GS(OFF)}$ 在批次到批次 (Lot to Lot) 之间存在一定的变化。因此，电路设计者需要根据式 (6)，以及 I_{DSS} 和 $V_{GS(OFF)}$ 的取值范围，确定电阻 R 的可调范围。在电路配置完成后，通过微调电阻 R 的值，即可得到所期望的恒定电流。

表 1 耗尽型 MOS 管 DMZ6005E 的参数

符号	参数	最小值	典型值	最大值
$V_{GS(OFF)}$	关断电压	-3.3V	-2.4V	-1.5V
I_{DSS}	饱和电流	15mA	--	25mA

例如，要实现 $I_D=5mA$ ，根据表 1 可以计算出 R 的取值范围。

$$R_{\min} = \frac{-1.5V}{5mA} * \left(\sqrt{5mA / 15mA} - 1 \right) = 128\Omega \quad (7)$$

$$R_{\max} = \frac{-3.3V}{5mA} * \left(\sqrt{5mA / 25mA} - 1 \right) = 365\Omega \quad (8)$$

因此，选取 500Ω 的可调电阻可满足要求。

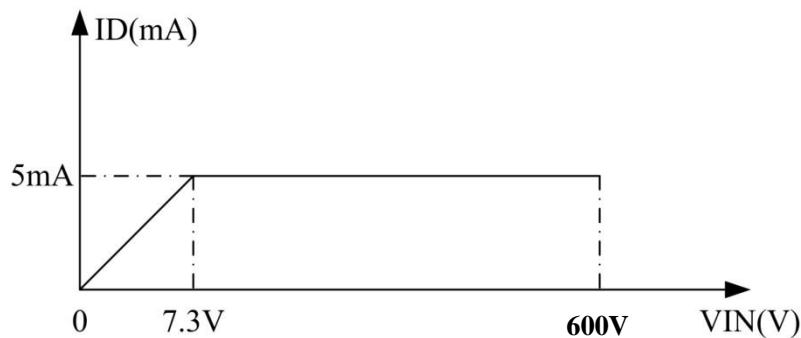


图 2. 耗尽型 MOS 管电流调节器的输入输出特性

由图 2 可以看出，耗尽型 MOS 管电流调节器只要进入了饱和工作区，即可输出稳定的恒流。只要输入电压不超过 MOS 管的击穿电压 BV_{DSX} ，该电路均能够正常地工作。由此可见，耗尽型 MOS 管电流调节器具有极宽的电压输入输出范围

$$V_{DS,\min} < V_{IN} < BV_{DSX} - V_{DS,\min} \approx 600V \quad (9)$$

$$0 < V_{OUT} < BV_{DSX} \approx 600V \quad (10)$$

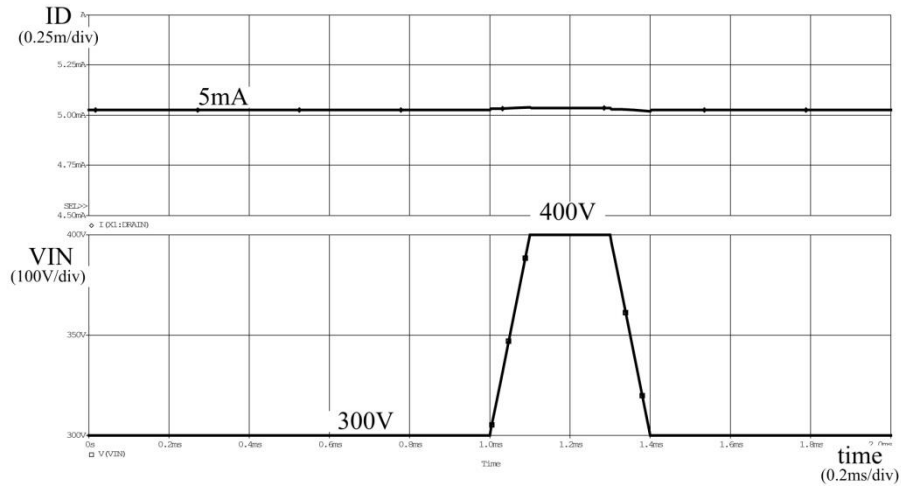


图 3. 耗尽型电流调节器的瞬态响应

耗尽型 MOS 管电流调节器具有极好的瞬态特性。由于耗尽型 MOS 管的漏-源电容 C_{DS} 较小（ \sim pF 量级），该电路具有极快的响应速度。MOS 管栅-源之间跨接的电阻 R 起到了负反馈作用，有效地抑制了输入电压变化对输出电流的影响。假设 V_{IN} 突然增大导致 I_D 增大，则 $V_{GS} = -I_D * R$ 将变得更负，产生负反馈，迫使 I_D 变小，最终 I_D 维持不变。如图 3 所示，输入电压 V_{IN} 存在较大幅度的波动，但输出电流却能保持稳定的 5mA 输出。

综上所述，耗尽型 MOS 管电流调节器具有如下优缺点

- (1) 电流精度高；
- (2) 输出电压范围极宽，拓展了其应用范围；
- (3) 输入电压范围极宽，可以直接联接到整流后的市电；
- (4) 不需要参考电流 I_{REF} ，省去了 IC，电路结构简单，系统成本低；
- (5) 需要调节电阻 R 以得到所期望的恒定电流。

典型应用

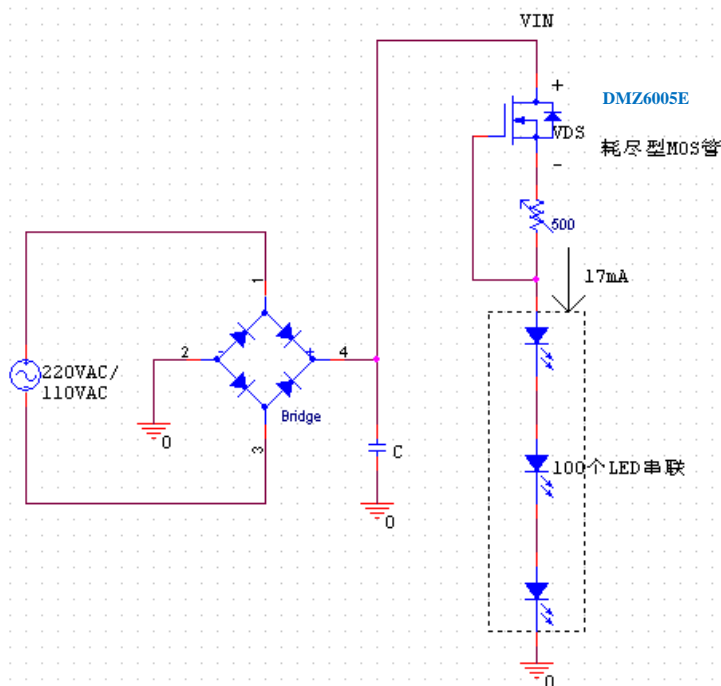


图 4. 利用耗尽型 MOS 管电流调节器驱动 LED

采用 ARK 公司的耗尽型 MOS 管 DMZ6005E，可以构建 17mA 的电流调节器，用于驱动串联式 LED 电路，如图 4 所示。220V 的市电通过桥堆整流和电容 C 滤波后，得到约 200 ~ 300V 的电压 V_{IN} 。 V_{IN} 具有较大的纹波，但这并不影响恒定的 17mA 电流输出，因为耗尽型 MOS 管电流调节器具有极好的瞬态响应特性。

此外，耗尽型 MOS 管电流调节器还可以广泛应用于电流基准、电压基准、偏置电路以及电流驱动电路。关于耗尽型 MOS 管的更多应用，请参阅成都方舟微电子有限公司 (ARK Microelectronics Co., Ltd.) 的产品应用手册。