

Application Brief

使用 MODE 功能在 LM51772 中实现反向电流运行



Hassan Jamal

简介

LM51772 是一款四开关降压/升压控制器，旨在通过 MODE 功能支持反向电流运行 (RCO)。这一功能允许转换器在输出端存储多余的能量，因此在需要能量回收或备用电源的应用中非常有用。典型用例包括电机制动期间的再生能量获取、主断电期间的电池备用系统等。

本应用简报介绍了如何在 LM51772 中实现用于启用 RCO 操作的 MODE 引脚控制。在本简报中，MODE 引脚通过简单比较器电路实现的磁滞控制器驱动。当输出电压超过所定义的阈值时，控制器会激活 RCO。具体而言，对于 LM51772，当反馈 (FB) 电压降至器件参考电压 (V_{ref}) 以下时，RCO 会自动被禁用，这意味着无需严格要求磁滞控制也能够正常运行。但是，此实施方案中包含一个磁滞控制器，用来保持与 LM5177 和 LM51770 器件的设计兼容性，这些器件需要磁滞 MODE 控制来确保 RCO 稳定运行。

LM51772 器件允许通过 R2D 接口或 I²C 接口配置 RCO。由于 [使用 LM51772 进行电池或电容器备用操作](#) 中讨论了 RCO 的详细配置选项，本简报将重点介绍如何使用 I²C 接口配置 RCO。

MODE 功能

LM51772 器件可在两种主要模式下运行：节电模式 (PSM) 和强制 PWM (FPWM) 模式。[配备 I²C 接口的 LM51772 55V 4 开关降压/升压控制器](#) 对这些模式进行了详细说明。仅当器件配置为 FPWM 模式时才支持反向电流运行。这些模式的选择由 MODE 引脚控制。当 MODE 引脚电压上升至正向阈值 (V_{T+MODE}) 以上时，该器件会从 PSM 转换到 FPWM 模式，从而启用 RCO。

要启动 RCO，必须正确应用 [表 1](#) 中列出的配置设置，如 [使用 LM51772 进行电池或电容器的备用操作](#) 中所述。相应的引脚连接如 [图 1](#) 所示。当输出电源或能量源增加的反馈 (FB) 电压超过基准阈值 (V_{REF}) 时，MODE 引脚控制会检测到输出电压的上升并将 MODE 引脚驱动为高电平，高于 V_{T+MODE} 阈值。此操作使 LM51772 器件能够将多余的输出能量传输到连接至转换器输入端的存储元件。

表 1. LM51772 器件的引脚配置

MODE 引脚	高于 V_{T+MODE} 阈值
反馈引脚 (FB)	高于 V_{ref} 阈值
nRST 引脚	高于 $V_{T+(nRST)}$ 阈值
UVLO 引脚	连接到输出端或外部电源
BIAS 引脚	连接到输出端或外部电源
VDET	关闭 (如果输入存储元件的电压低于 VDET 正向阈值)

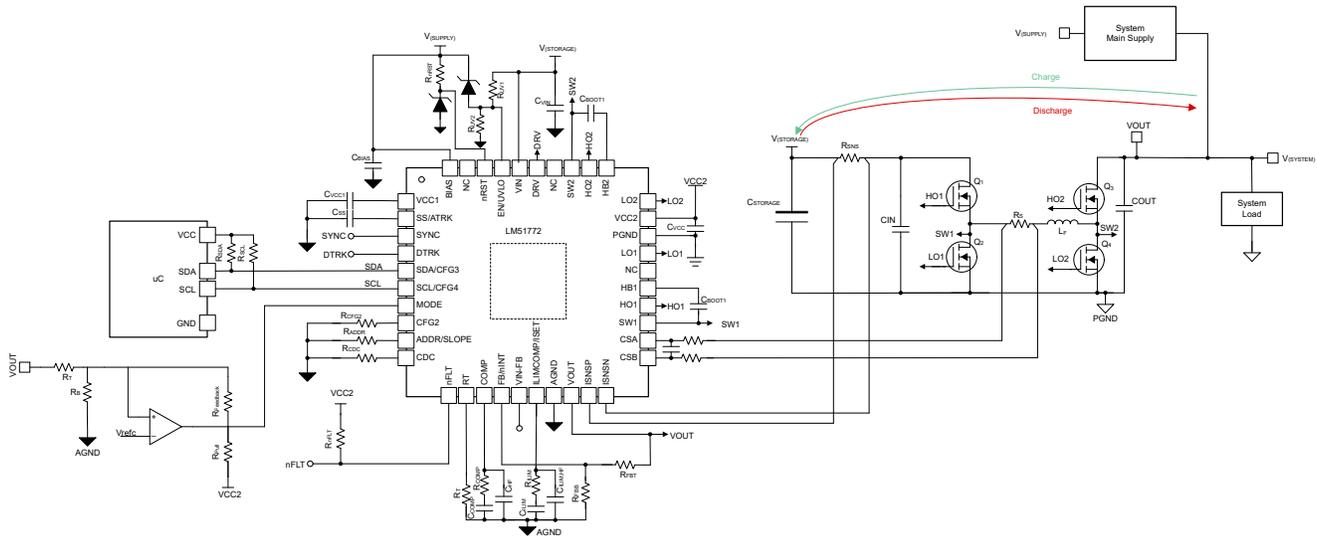


图 1. 通过 I²C 配置实现 RCO 的原理图

一旦满足表 1 中的配置，并且 MODE 引脚上的电压为高电平，LM51772 将启用 RCO 运行，并通过平均电流调节环路来调节恒定的负电流。这一平均负电流的幅度由连接到 ISNSx 输入引脚的电流感应电阻器和通过 I²C 接口进行编程的平均限流器设置决定。

可以通过使用 LM51772 内部 DAC 对 MFR_SPECIFIC_D0 寄存器进行编程（特别是通过 IMON_LIMITER_EN 和 EN_NEG_CL_LIMIT 位）来修改这些设置。此外，需要一个连接到 ILIMCOMP 引脚的补偿网络来验证平均电流限制的运行是否稳定。或者，也可以通过 LM51772 I_{SET} 引脚上的 R2D 接口来配置平均电流限制器。[使用 LM51772 进行电池或电容器备用操作](#) 中详细讨论了本主题。

RCO 启动后，该器件会继续以恒定负电流为存储元件充电，直到存储电压达到输入电压调节 (IVR) 阈值。此时，控制转换到 IVR 环路，该环路将输入电压调整至设定的设定点。有关 IVR 功能的详细配置指南，请参见 [使用 LM51772 进行电池或电容器备用操作](#)。

MODE 引脚控制

为了验证 MODE 引脚触发是否准确，会对输出电压 (V_{OUT}) 施加 ±250mV 的小磁滞。这会生成上限阈值 V_{OUT(H)} = V_{OUT} + 250mV 和下限阈值 V_{OUT(L)} = V_{OUT} - 250mV。当输出电压上升并达到上限阈值 V_{OUT(H)} 时，控制器会驱动 MODE 引脚至高于 V_{T+MODE} 阈值，从而启动 RCO。RCO 启动后，无论 MODE 引脚状态发生任何后续更改，操作都会继续。

要终止 RCO，器件输出电压（使用反馈信号 (FB) 表示）必须低于基准电压 (V_{REF}) 阈值。只有连接到转换器输出的电源耗尽，且 V_{out} 开始降低时，才会发生这种情况。对于 LM51772，这要求 V_{OUT(L)} 阈值等于通过 I²C 接口编程的 V_{out}。如果不满足此条件，MODE 引脚不会降至负向阈值 (V_{T-MODE}) 以下，转换器将保持 FPWM 模式。

相比之下，对于其他 LM5177x 器件，当 MODE 信号降至低于 V_{T-MODE} 阈值时，RCO 会立即终止。在这些器件中，V_{OUT(L)} 电平的选择可独立于反馈信号和 V_{REF} 阈值。]

磁滞控制器

如前文所述，LM51772 不需要 V_{OUT(L)} 阈值来进行 MODE 引脚控制，因为仅当 FB 信号降至低于 V_{REF} 阈值时，RCO 才会终止。因此，可使用不具有磁滞功能的简单比较器电路，搭配 LM51772 进行 MODE 引脚控制。

但是，LM5177 和 LM51770 等其他器件需要在 MODE 引脚上实现磁滞，从而验证 RCO 是否在正常运行。为了支持这些器件，此设计中配置了一个磁滞控制器。控制器使用配备正反馈电阻器网络的开漏比较器 (TLV3401) 来产生所需的磁滞。图 2 展示了所实现的磁滞控制器的原理图。

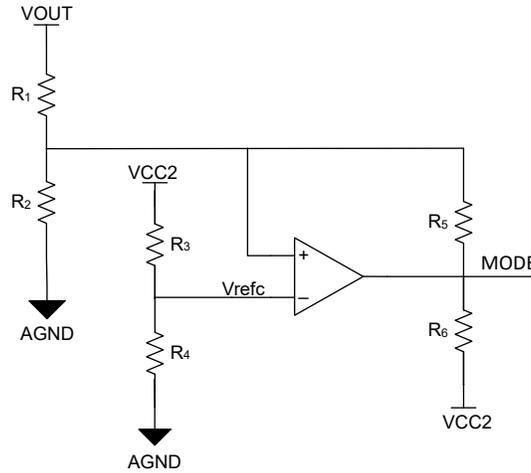


图 2. 磁滞控制器

控制器会将非反相输入端的信号与施加到比较器反相输入端的参考电压 (V_{refc}) 进行比较。当非反相输入电压超过反相输入电压时，比较器输出会转换为高电平；否则，输入电压会保持低电平。施加到非反相输入端的信号由两个部分组成：由电阻器 R_5 定义的正反馈信号（用于设置磁滞幅度），以及由 R_1 和 R_2 组成的电阻分压器确定的输出电压调节版本。[方程式 1](#) 用于计算所需的 V_{refc} 值，而 [方程式 2](#) 和 [方程式 3](#) 分别确定相对于 V_{OUT} 的磁滞阈值上限 $V_{OUT(H)}$ 和下限 $V_{OUT(L)}$ 。

$$V_{refc} = \frac{R_4}{R_4 + R_3} * V_{CC2} \quad (1)$$

$$V_{out(H)} = \frac{V_{refc} * (R_2 R_5 + R_1 * (R_5 + R_2))}{R_2 R_5} \quad (2)$$

$$V_{out(L)} = \frac{R_1 * (V_{refc} * (R_6 + R_5) - R_2 * (V_{CC2} - V_{refc}))}{R_2 * (R_6 + R_5)} + V_{refc} \quad (3)$$

在此设计中， V_{OUT} 设置为 21.75V，并施加 250mV 的磁滞来定义上限和下限阈值。这样做的结果是 $V_{OUT(H)} = 22.25V$ ， $V_{OUT(L)} = 21.75V$ 。参考电压 V_{refc} 设置为 2.5V，电源电压 V_{CC} 设置为 5V。根据这些参数，电阻器 R_1 至 R_6 的计算值如下： $R_1 = 102k\Omega$ 、 $R_2 = 13k\Omega$ 、 $R_3 = 102k\Omega$ 、 $R_4 = 102k\Omega$ 、 $R_5 = 1.07M\Omega$ ，且 $R_6 = 20k\Omega$ 。

结果

图 3 显示，当输出电压超过 $V_{OUT(H)}$ 阈值时 RCO 会启动。此时，比较器将 MODE 引脚驱动至高于 V_{T+MODE} 阈值，从而启用 RCO。使用恒定电流，为使用电容器配置的存储元件充电，直到电压达到输入电压调节 (IVR) 阈值，然后调节至 12V。图 4 显示，即使 MODE 引脚降至低于 V_{T-MODE} 阈值，RCO 操作也保持不变。图 5 显示，当反馈信号降至 V_{ref} 阈值以下，而 MODE 引脚保持高于 V_{T+MODE} 阈值时，RCO 被禁用。图 6 表明，反馈信号降至 V_{ref} 阈值以下会导致 MODE 引脚降至 V_{T-MODE} 阈值以下，因为 $V_{out(L)}$ 与设定的输出电压相等。

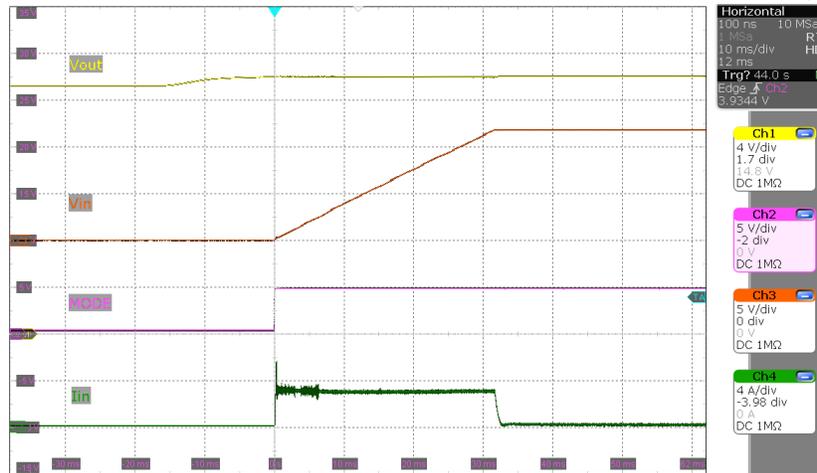


图 3. MODE 引脚高于 V_{T+MODE} 阈值

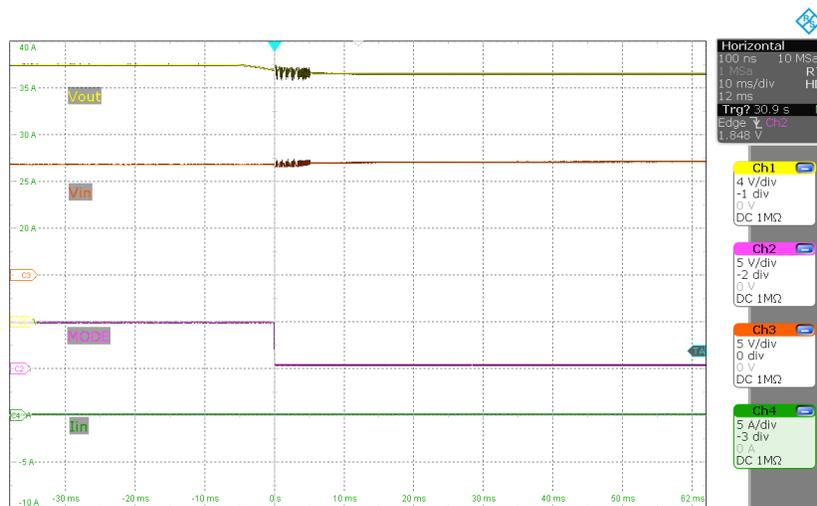


图 4. RCO 期间，MODE 引脚低于 V_{T-MODE} 阈值

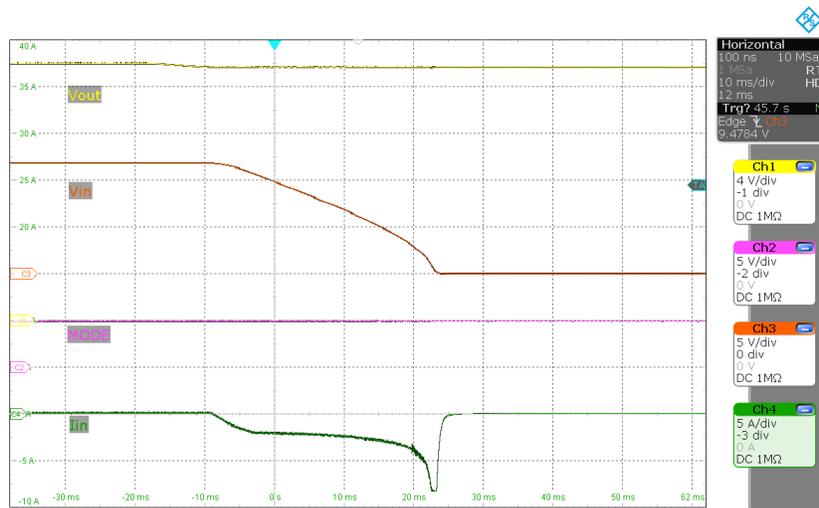


图 5. 反馈信号低于 V_{ref} 信号 ($V_{out} < V_{out(L)}$)



图 6. MODE 引脚低于 V_{T-MODE} 阈值, V_{out} 信号低于 $V_{out(L)}$ 阈值

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（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，不保证没有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、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(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、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月