

Matthew Chen, Holly Hong, Stefan Schauer

摘要

热电冷却器 (TEC) 是一种基于珀耳帖效应的加热和冷却器件。由于具有无噪声、无振动、无制冷剂、小尺寸和重量轻等优点，TEC 广泛用作光学通信和医疗设备等工业领域的精密温度控制系统。在血液气体分析仪、聚合酶链反应 (PCR) 和免疫分析仪等体外诊断 (IVD) 医疗设备中，TEC 可以保持稳定的反应温度或实现快速的温度变化。在这些应用中，需要使用双向电流控制来实现加热和冷却以及更高效的温度控制。本应用手册介绍了一种灵活的 TEC 驱动器策略，用于实现电压和电流控制。为了实现双向电流，可在直流/直流控制器 (例如 LM5176) 的输出 (V_{out}) 和输入 (V_{in}) 之间连接 TEC。 V_{out} 范围为 ($V_{in} - 10V$) 至 ($V_{in} + 10V$)，而 V_{in} 是固定的，最大电流可达 $\pm 4A$ ；因此，可通过改变电流方向来支持加热或冷却。由于电流也受 TEC 温差的影响，因此采用了电流检测放大器来实现精密温度控制。

内容

1 引言.....	3
1.1 TEC 原理.....	3
1.2 设计规格和主要挑战.....	3
2 使用降压/升压控制器的 TEC 驱动器设计.....	4
2.1 系统说明.....	4
2.2 采用 LM5176 的 TEC 设计方框图.....	4
2.3 LM5176 输出电压控制.....	5
3 测试结果.....	6
3.1 TEC 电流与输出电压.....	6
3.2 通过 TEC 元件进行电流纹波测量.....	7
3.3 启动.....	8
3.4 效率.....	8
4 总结.....	8
5 参考文献.....	9

插图清单

图 1-1. TEC 元件结构.....	3
图 2-1. 使用 LM5176 的 TEC 设计方框图.....	4
图 2-2. 使用 MCU 控制 V_{out}	5
图 3-1. 15V 输入，5V 输出.....	6
图 3-2. 15V 输入，9V 输出.....	6
图 3-3. 15V 输入，13V 输出.....	6
图 3-4. 15V 输入，17V 输出.....	6
图 3-5. 15V 输入，21V 输出.....	7
图 3-6. 15V 输入，25V 输出.....	7
图 3-7. 15V 输入，5V 输出.....	7
图 3-8. 15V 输入，13V 输出.....	7
图 3-9. 15V 输入，17V 输出.....	7
图 3-10. 15V 输入，25V 输出.....	7
图 3-11. 15V 输入，5V 输出.....	8
图 3-12. 15V 输入，25V 输出.....	8
图 3-13. 效率 ($V_{in} > V_{out}$).....	8
图 3-14. 效率 ($V_{in} < V_{out}$).....	8

表格清单

表 1-1. 设计规格.....3

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

1.1 TEC 原理

TEC 的原理是珀耳帖效应。当电流通过由不同导体组成的电路时，每个导体的接头处会出现吸热和放热现象。

图 1-1 是 TEC 原理图。在两侧施加电压时，电子通过铜传输到 P 型半导体、N 型半导体，然后返回到铜。由于电子发生能级转换，接头处会出现发热或冷却。当电流方向发生变化时，发热面和冷却面也会交换。吸收和释放的热量与电流强度成正比，而且与两个导体的性质和热端温度有关。

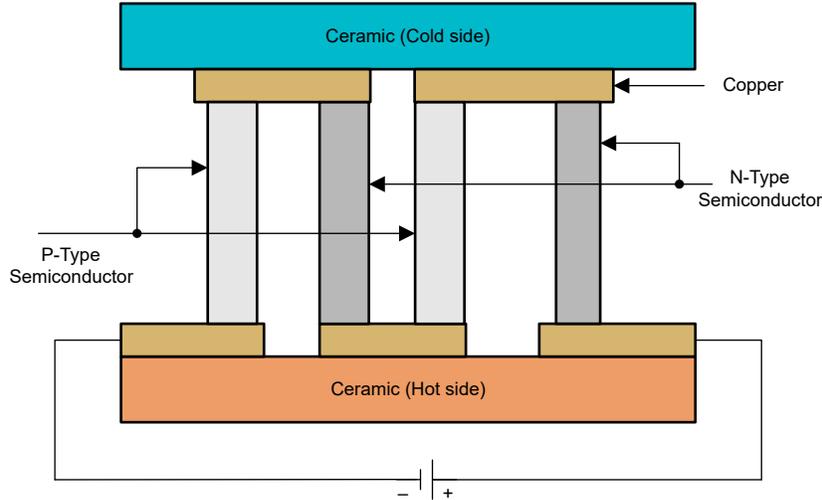


图 1-1. TEC 元件结构

1.2 设计规格和主要挑战

在体外诊断医疗产品中，样本和试剂必须在稳定的温度下进行精密检测。在聚合酶链反应 (PCR) 仪器中，DNA 扩增需要快速的温度变化（例如，在几秒钟内从 50°C 升至 90°C）。在传统 TEC 控制设计中，通常使用具有栅极驱动器和 H 桥的降压稳压器。本手册介绍了使用降压/升压控制器来驱动 TEC 的单芯片设计。鉴于加热和冷却要求，主要设计挑战如下：

- TEC 驱动器需要能够控制双向电流
- 对 TEC 进行可调节电压控制，用于实现灵活快速的温度变化

根据上述应用要求，TEC 双向电流控制的设计规格见表 1-1 所示。

表 1-1. 设计规格

特性	规格
输入电压	15V
TEC 最大电压	±10V
TEC 最大电流	±4A
TEC 可调节电压	是
恒定电压驱动	是

2 使用降压/升压控制器的 TEC 驱动器设计

2.1 系统说明

由于此应用中的电流方向会发生变化，其电源需要具有灌入和拉出电流的能力。在此应用中，降压/升压稳压器是一个不错的选择。大多数降压/升压模块和转换器具有灌电流限制；因此，本手册选择了降压/升压控制器。LM5176 是一款具有集成驱动器（适用于 N 沟道 MOSFET）的宽输入电压四开关降压/升压控制器器件。LM5176 可在降压和升压模式之间自动转换。当 V_{in} 等于 V_{out} 时，该器件还可提供低纹波输出电压。

在此设计中，LM5176 由 15V 稳压电压轨供电。TEC 元件连接在 LM5176 的 V_{in} 和 V_{out} 引脚之间。通过调整微控制器中的 V_{ctrl} ，输出电压可在 5V 至 25V 之间变化。由于 V_{in} 是固定的，因此施加在 TEC 上的电压可以在 -10V 至 10V 之间变化，从而调节 TEC 的电流。

2.2 采用 LM5176 的 TEC 设计方框图

如图 2-1 所示，TEC 连接在四开关降压/升压控制器 LM5176 的 V_{in} 和 V_{out} 之间。输出电压由 FB 引脚设置，该引脚由微控制器和来自输出的反馈电压进行控制。对于温度控制，需要使用温度传感器来感测温度以进行反馈控制。鉴于 TEC 特性，TEC 的电阻会随着温度升高而变化，因此可使用电流检测放大器进行电流监测。MSPM0G3507 执行整个设计的比例积分微分控制，用于保持或改变电压来加热和冷却。

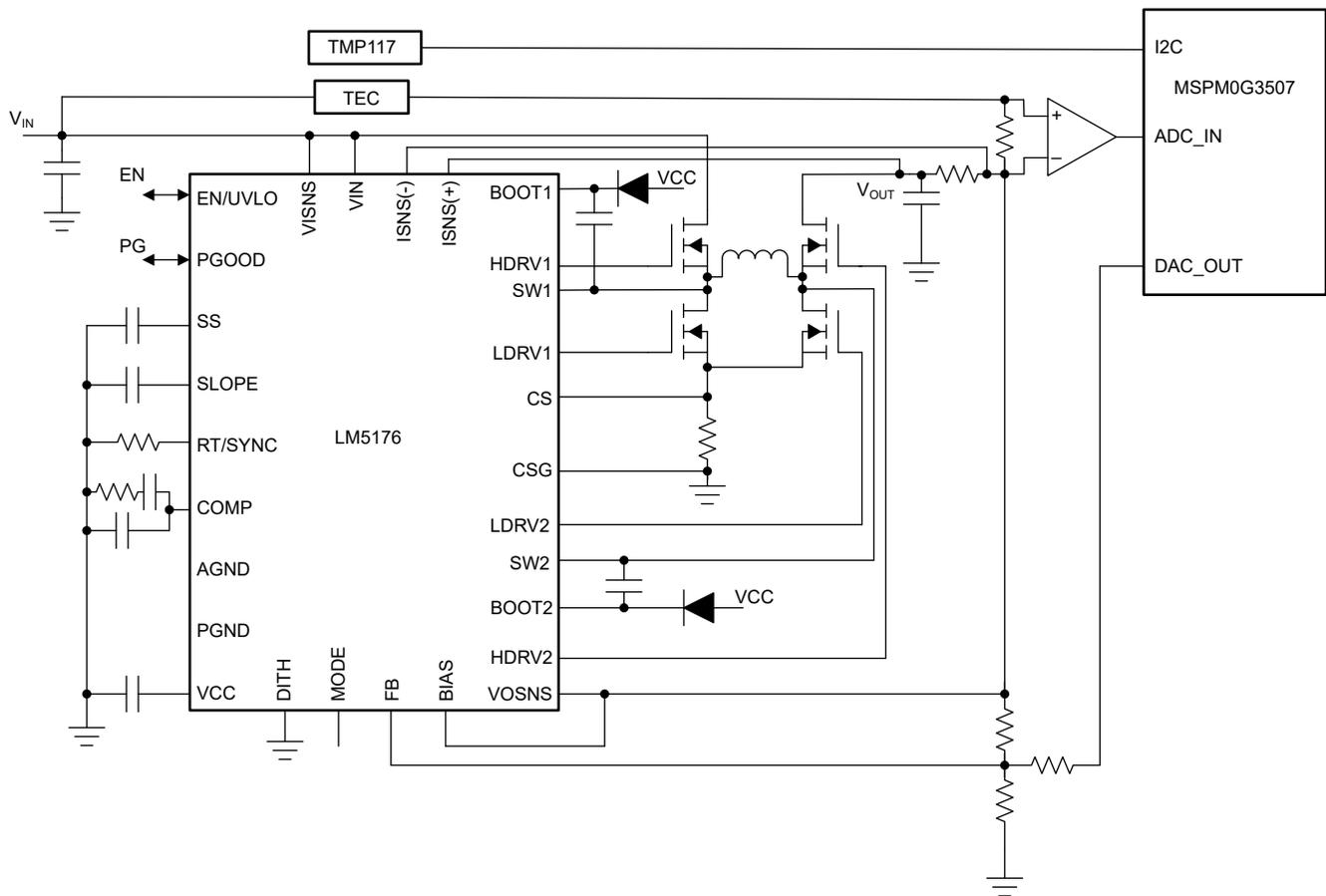


图 2-1. 使用 LM5176 的 TEC 设计方框图

2.3 LM5176 输出电压控制

图 2-2 展示了使用微控制器控制输出电压的拓扑。Vout 通过使用连接到 FB 引脚的电阻分压器 (R1 和 R2) 进行调节。LM5176 的内部基准电压为 0.8V。为了通过 DAC 控制 Vout，电阻器 R3 与反馈分压器相连，并允许电流馈入反馈节点。有关详细说明，请参阅 [PMP9796 5V 低功耗 TEC 驱动器参考设计](#)。

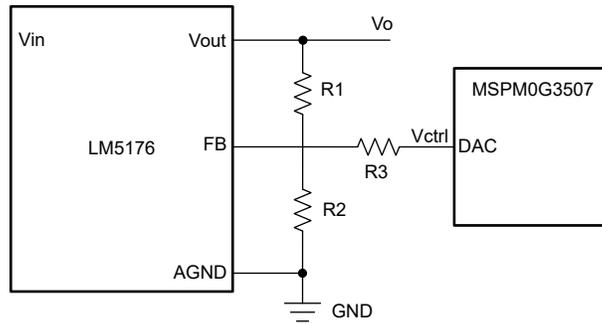


图 2-2. 使用 MCU 控制 Vout

根据数据表，电阻分压器中的底部电阻器 R2 范围为 1kΩ 至 100kΩ。选择 R1 的阻值后，可以使用以下公式计算 R2 和 R3：

$$R_3 = \frac{V_{ctrl_max} - V_{ctrl_min}}{V_{o_max} - V_{o_min}} \times R_1 \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{V_{FB} \times R_1 \times R_3}{V_{o_max} \times R_3 - V_{FB} \times (R_1 + R_3) + V_{ctrl_min} \times R_1} \quad (2)$$

其中

- R₃ 是控制电压与 FB 引脚之间的电阻器
- V_{ctrl_max} 是控制电压的最大值
- V_{ctrl_min} 是控制电压的最小值
- V_{o_max} 是输出电压的最大值
- V_{o_min} 是输出电压的最小值

例如，如果 R1 选择为 280kΩ 且 Vout 为 5V 至 25V，则 Vctrl 应为 0.5V 至 2V。根据以上公式，R2 需选择为 11kΩ，R3 需选择为 21kΩ。

3 测试结果

在本应用手册中，LM5176EVM-HP 和 MSPM0G3507 Launchpad 用于执行测试。由于要求输出电压可调节，R22 替换为 11kΩ 电阻器。在 LM5176EVM-HP 上，C13 和 C14 替换为 330uF 100V 电容器；其他元件保持不变。测试使用的 TEC 元件是 MCTE1-19913L-S ($V_{max} : 24.1V$, $I_{max} : 13A$)。

3.1 TEC 电流与输出电压

图 3-1、图 3-2 和图 3-3 展示了当 $V_{out} < V_{in}$ 时 V_{out} 、SW1、SW2 和 I_{TEC} 的波形。向 TEC 元件施加的最大电压约为 +10V，测试的 I_{TEC} 高达 4.34A。图 3-4、图 3-5 和图 3-6 展示了当 $V_{out} > V_{in}$ 时 LM5176 的波形。与上述情况相比，最大电压大概为 -10V， I_{TEC} 高达 -4.42A。

CH1 : SW1 , CH2 : SW2 , CH3 : V_{OUT} , CH4 : I_{TEC}

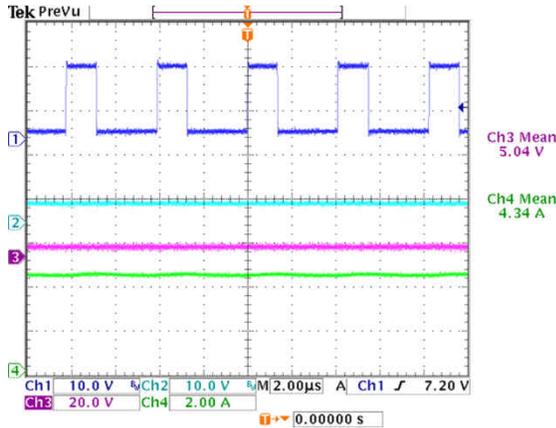


图 3-1. 15V 输入，5V 输出

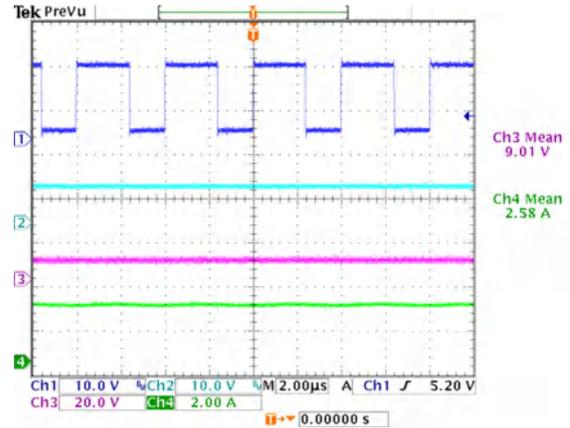


图 3-2. 15V 输入，9V 输出

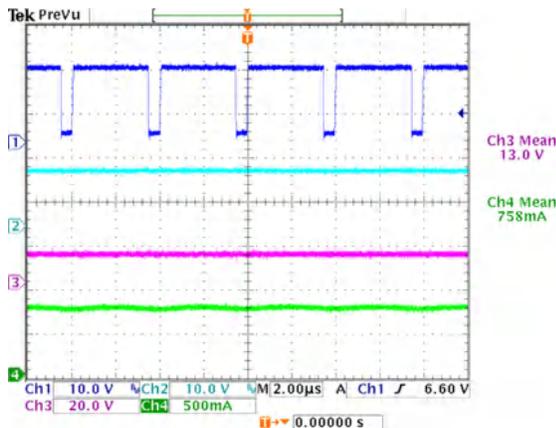


图 3-3. 15V 输入，13V 输出

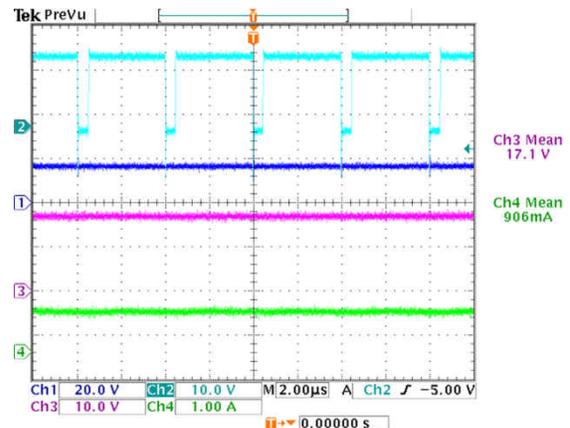


图 3-4. 15V 输入，17V 输出

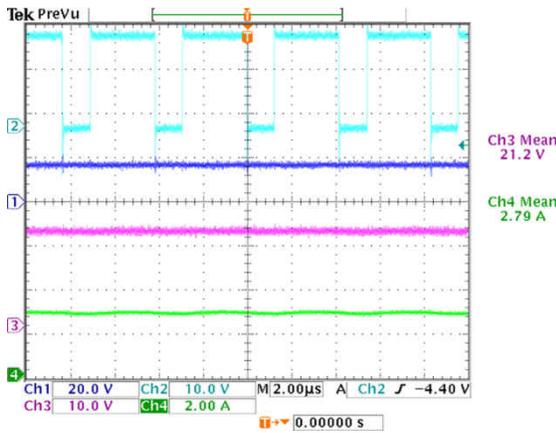


图 3-5. 15V 输入，21V 输出

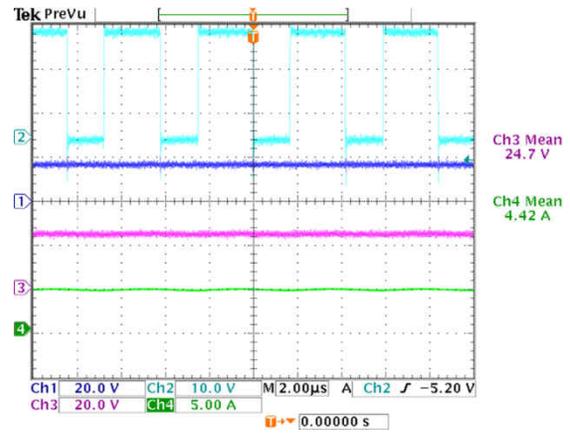


图 3-6. 15V 输入，25V 输出

3.2 通过 TEC 元件进行电流纹波测量

如果纹波电流增加，元件两端的最大温差将减小。因此，建议最大纹波电流小于 10%，从而实现出色的性能。图 3-7、图 3-8、图 3-9 和图 3-10 展示了不同输出电压下的纹波电流。所有测试均满足纹波要求。

CH1 : SW1, CH2 : SW2, CH3 : V_{OUT}, CH4 : I_{Ripple}

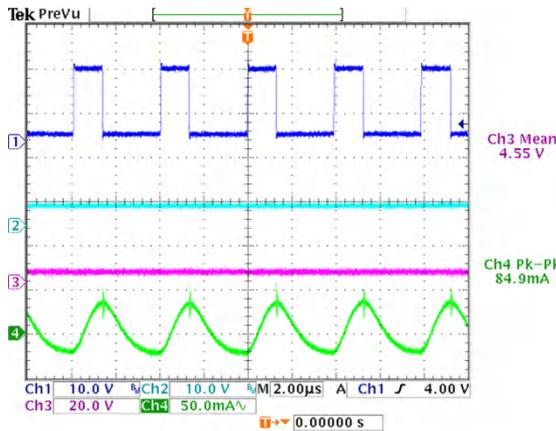


图 3-7. 15V 输入，5V 输出

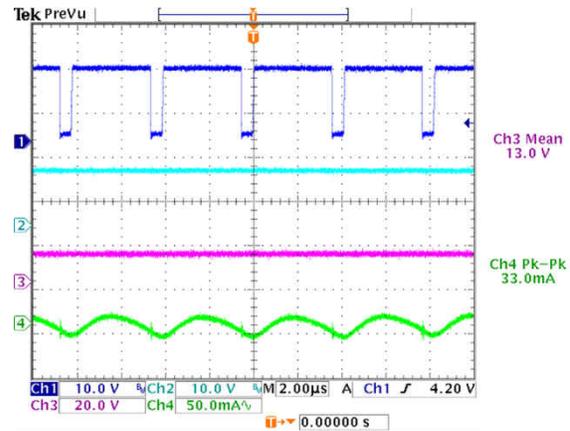


图 3-8. 15V 输入，13V 输出

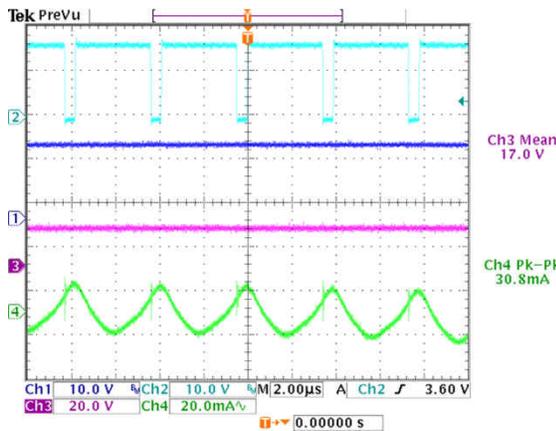


图 3-9. 15V 输入，17V 输出

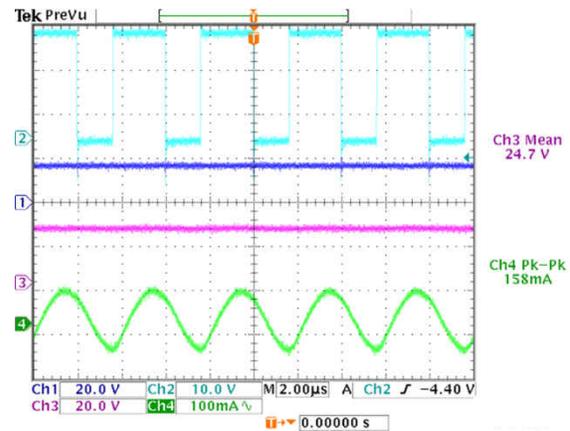


图 3-10. 15V 输入，25V 输出

3.3 启动

图 3-11 和图 3-12 展示了 LM5176 在不同输出电压下的启动波形。在本应用手册中，该设计在 TEC 元件两端压差不超过 10V 时启动良好。当 TEC 元件连接在 LM5176 的 V_{in} 和 V_{out} 之间时，TEC 元件会偏置 V_{out} 。因此，TI 建议将初始 V_{out} 设置为接近 V_{in} ，以便实现更稳定的启动，然后将 V_{out} 调节为所需的电压。

CH1 : SW1, CH2 : SW2, CH3 : V_{OUT} , CH4 : I_{TEC}

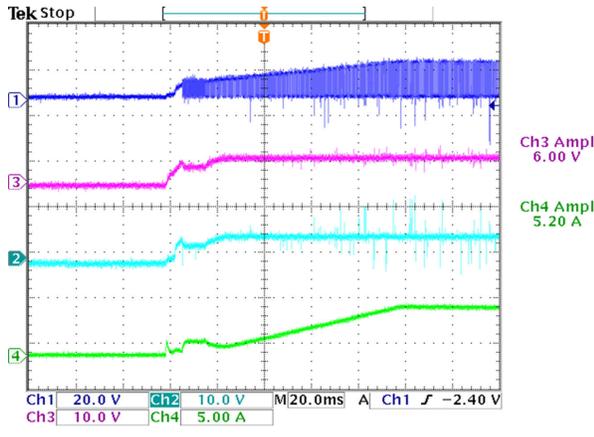


图 3-11. 15V 输入，5V 输出

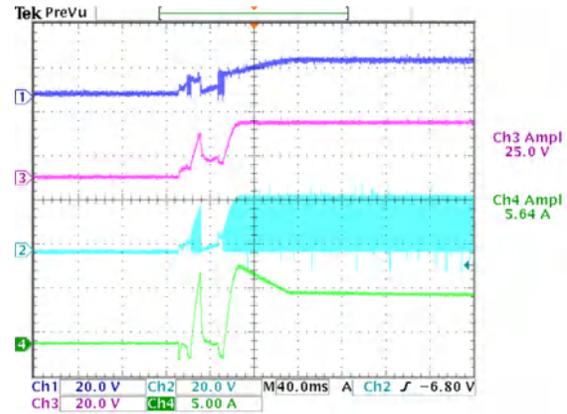


图 3-12. 15V 输入，25V 输出

3.4 效率

图 3-13 和图 3-14 展示了设计在 $V_{in} > V_{out}$ 和 $V_{in} < V_{out}$ 时的效率。效率随着电压的增加而提高。测试期间，最大效率达 99.13%。

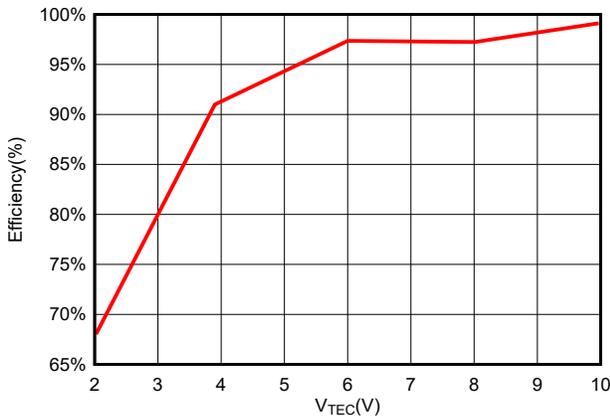


图 3-13. 效率 ($V_{in} > V_{out}$)

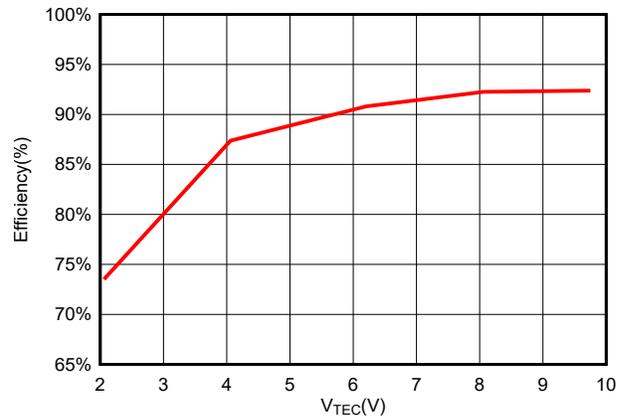


图 3-14. 效率 ($V_{in} < V_{out}$)

4 总结

TEC 元件通常用于需要加热和冷却的应用。通过结合使用 LM5176 和 MCU，客户可以通过 TEC 元件控制电流方向，并调节电压来满足 TEC 元件的要求。由于 TEC 电流受到外部电感器和 MOSFET 的限制，因此可调节为高电流 TEC 元件。

5 参考文献

1. 德州仪器 (TI), [PMP9796 5V 低功耗 TEC 驱动器参考设计](#)。
2. 德州仪器 (TI), [面向 3.3V 输入的 TEC 驱动器参考设计](#)。
3. 德州仪器 (TI), [LM5176 宽 VIN 降压/升压控制器 EVM 用户指南](#)

重要声明和免责声明

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司