

Application Note

符合新 **GB42295** 国家标准的电动自行车电源设计

Joyce Chen, Aurora Tie, Bella He

摘要

2024 年 1 月，中国开始针对电动自行车实施新的国家标准 **GB42295**。此标准更改了车辆主电路和辅助电路的最大电压。因此，必须向电动自行车电池包系统中的直流/直流电源电路添加新的电源轨。图 1-1 展示了电动自行车系统电池包部分的方框图。新添加的器件以红色标记。本应用手册结合了新的国家标准和电动自行车应用要求，提供了直流/直流电源电路设计方案。此外，该文档还考虑了电动自行车应用对设计尺寸和性能的要求，并提供了具体的设计。还显示了每种方案的设计过程和实验结果。客户可以从该应用报告中获取数据，例如效率、散热等。

内容

1 简介.....	2
2 TI 建议设计.....	3
2.1 设计 1 : $V_o = 12V$ 、 $I_o = 8-10A$	3
2.2 设计 2 : $V_o = 33V$ 、 $I_o < 1.5A$	3
2.3 设计 3 : $V_o = 33V$ 、 $I_o = 1A$ 和 $V_o = 12V$ 、 $I_o = 6A$	7
3 测试结果和性能曲线.....	7
4 总结.....	10
5 参考资料.....	10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

2022 年 12 月 29 日，中国发布了电动自行车的电气安全要求 (GB42295)。考虑到使用安全，电动自行车的主电路电压不得超过 60V (直流)，次级电路电压不得超过 35V (直流)。通常，电动自行车由电池组、ABS 控制器、仪表盘、电机控制器、前照灯等组成。电池电压通常为 48V，因此可采用旧标准的控制器、仪表盘和电机控制器通过降压产品直接将电压从 48V 转换为 12V/5V。但是，根据新的国家标准，ABS 控制器和仪表板的电源电压不能超过 35V。因此，在设计电池组时，除电机控制器之外的其他器件必须在连接到后续器件之前将 48V 电压转换为低于 35V 的电压 (例如 33V 或 12V)。

现在存在两种常见的设计：第一种方法是直接通过控制器将电池电压转换为 12V。第二种是通过两个降压产品同时从电池组生成 12V 和 33V 电压。根据行业标准，该器件的总功率约为 100W。此外，由于主电源的这一部分集成到电池包中，芯片的温度会上升到室温 (25°C)，且不得超过 55°C，因此整体体积必须尽可能小。其中，第二种设计的 33V 电源轨电流可根据客户要求可在 1A 至 3A 范围内变化。当输出电流低于 1.5A 时，可使用降压转换器来简化设计。当输出电流为 1.5A 或更高时，需要使用降压控制器来确保热需求。

本应用手册通过 TI 降压产品提供了适用于此应用的相应设计。客户可以修改官方 EVM 电路板并直接评估性能。本应用手册提供了实际测试结果，例如效率、热性能和输出电压纹波。

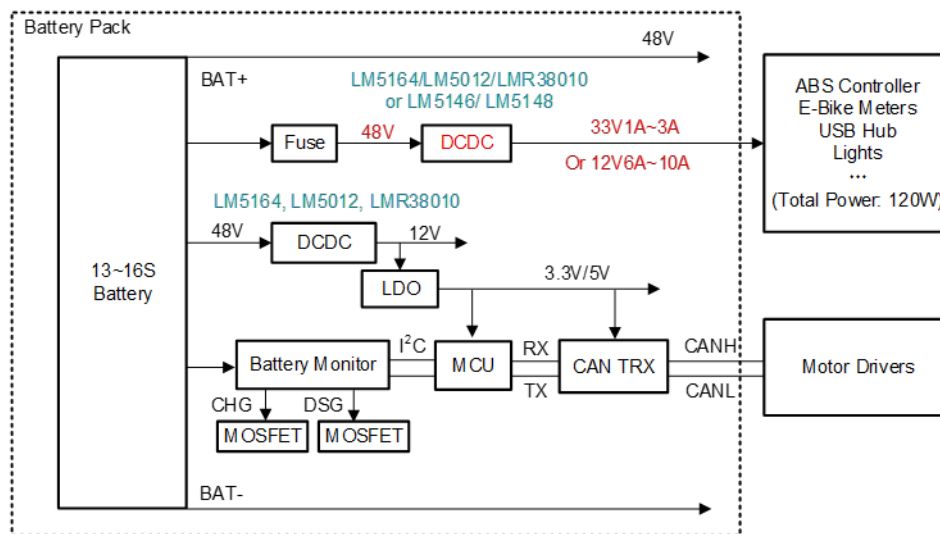


图 1-1. 电动自行车方框图

2 TI 建议设计

2.1 设计 1 : $V_o = 12V$ 、 $I_o = 8-10A$

由于输入电压为 48V，考虑到裕度，客户必须选择可承受大约 80-100V 电压的降压控制器。LM5148 (最大输入电压为 80V) 和 LM5146 (最大输入电压为 100V) 都是选项。

由于 LM5148 和 LM5149 是引脚对引脚产品，因此 LM5149EVM 可用于评估 12V/8A 输出设计、而无需修改 EVM 板。请注意，在测试期间，通过跳线帽将 CNFG 引脚短接至 GND，以禁用 LM5149 的 AEF 功能并仿真 LM5148 的性能。如果需要，将 LM5149 直接替换为 EVM 板上的 LM5148 以进行评估。对于 100V 耐受电压产品，客户可以直接使用 LM5146EVM 评估 12V/8A 输出设计。有关详细的测试结果和 EVM 板设计、请参阅 [LM5149-Q1 降压控制器评估模块用户指南](#)和 [LM5146-Q1EVM 用户指南](#)。

2.2 设计 2 : $V_o = 33V$ 、 $I_o < 1.5A$

对于 33V 输出电压，输出电流越大，产品在室温下的温升越大。通常，考虑到实际应用中的热性能要求，同步和异步转换器 ($I_o < 1.5A$) 或控制器 ($I_o \geq 1.5A$) 有几种不同的直流/直流电源设计。

2.2.1 $V_o = 33V$ 、 $I_o = 1A$ (LMR38010)、 $I_o = 0.8A$ (LM5164)

LMR38010 是一款 80V 峰值电流模式同步降压转换器，LM5164 是一款 100V 恒定导通时间 (COT) 模式同步降压转换器。考虑到小尺寸要求，LMR38010 和 LM5164 几乎是引脚对引脚的，设计一个双层 PCB 板 (1.7cm × 1.9cm)，对 LMR38020 和 LM5164 都具有高温性能。原理图和 PCB 3D 图如 [图 2-2](#) 和 [图 2-1](#) 所示。[表 2-1](#) 中列出了 LMR38010 和 LM5164 的设计参数。

表 2-1. LM5164 和 LMR38010 的设计参数

条目	LM5164	LMR38010
R7	274kohm	88.7kohm
L1	Würth-7447709680 68uH (3.2A , 89mohm)	Würth-7447709680 68uH (3.2A , 89mohm)
R9	30.9kohm	25.5kohm
R4	523kohm	NC
C4	3.3nF , 100V	NC
C16	56pF , 50V	NC

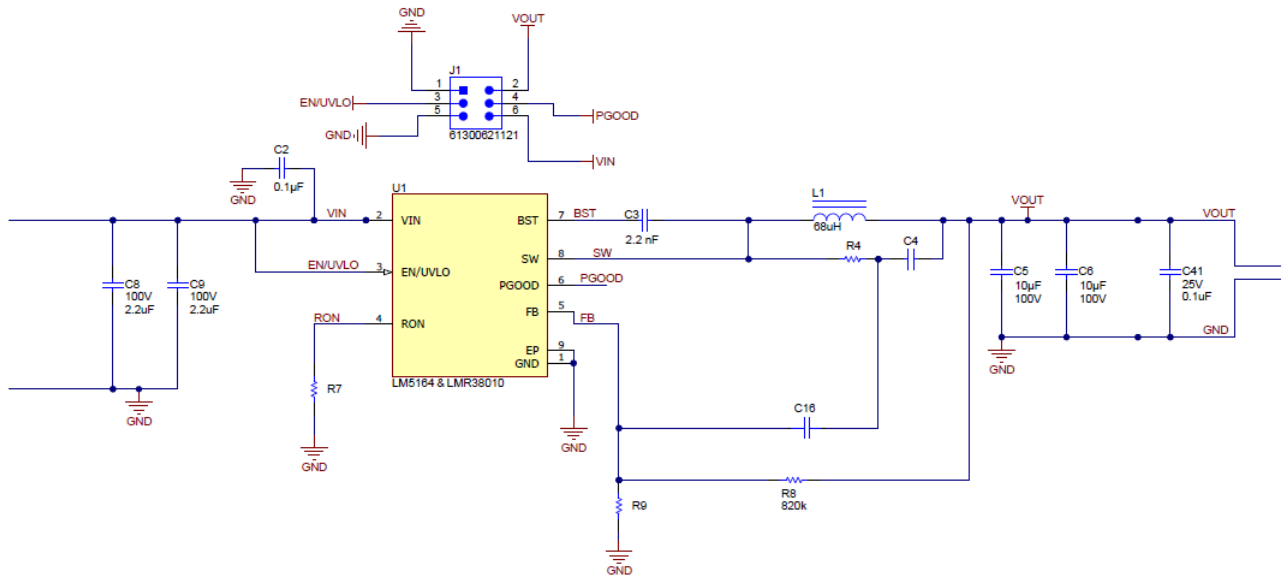


图 2-1. LMR38010 和 LM5164 的原理图

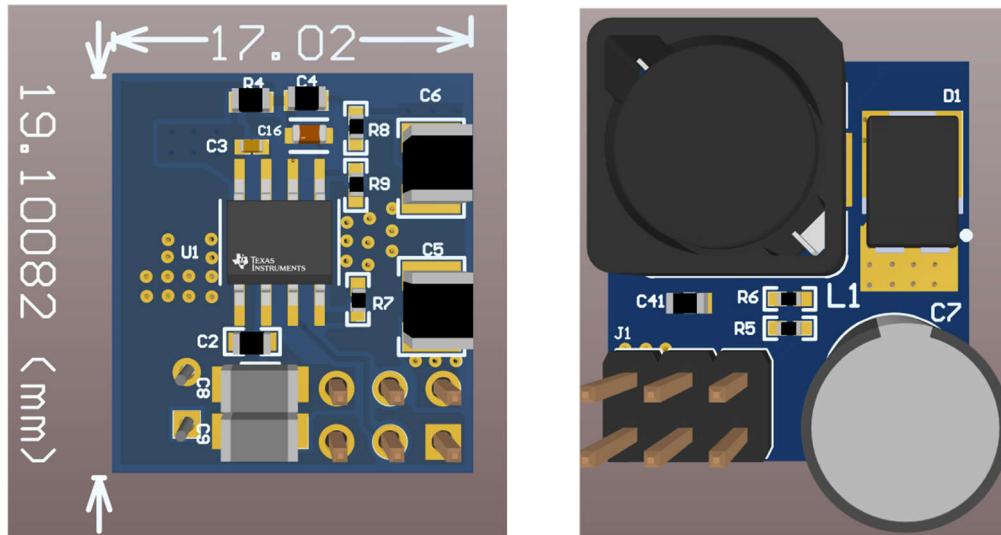


图 2-2. 3D PCB 电路板

以下各部分展示了详细的设计方法。

2.2.1.1 开关频率 (RON)

可通过电阻器 R_T 从 RT/SYNC 引脚和 GND 引脚对 LMR38020 的开关频率进行编程。RT/SYNC 引脚不能悬空或短接至地。对于给定的开关频率，若要确定计时电阻，请使用 [方程式 1](#)。

$$R_T(\text{k}\Omega) = 30970 \times f_{SW}(\text{kHz})^{-1.027} = 30970 \times 300^{-1.027} = 88.49\text{k}\Omega \quad (1)$$

选择 R_T 为 88.7k Ω 。

2.2.1.2 实现可调节输出的 FB

LMR38020 的输出电压通过一个外部电阻分压器网络从外部调节。LMR38020 的 V_{REF} 的标称值为 1V。选择 R_{FBB} 为 10k Ω 后，选择 R_{FBT} 。

$$R_{FBT}(\text{k}\Omega) = R_{FBB}(\text{k}\Omega) \times \left[\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1 \right] = 10 \times \left[\frac{33}{1} - 1 \right] = 320\text{k}\Omega \quad (2)$$

选择 R_{FBT} 为 324k Ω 。

2.2.1.3 电感器选型

[方程式 3](#) 可用于确定电感值。常数 K 是电感器电流纹波的百分比。在本例中，选择 $K = 0.35$ ，得出电感 $L = 98\mu\text{H}$ 。选择下一个标准值 $L = 100\mu\text{H}$ 。

$$L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT})}{f_{SW} \times K \times I_{OUTMAX}} \cdot \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{(48 - 33)}{300 \times 0.3 \times 1} \times \frac{33}{48} = 98\mu\text{H} \quad (3)$$

所选电感器的饱和和额定电流为 2.4A，大于高侧开关电流限值 I_{SC} 。

2.2.1.4 输出电容器选型

对于电动自行车应用的更多设计，68 μf 电解电容器和 1 μf 陶瓷电容器用于 33V 输出设计。电容器的电压速率必须达到或超过 50V。

2.2.1.5 输入电容器选型

除了提供纹波电流并将开关噪声与其他电路隔离，陶瓷输入电容器还为稳压器提供低阻抗源。

必须至少为应用所需的最大输入电压设置输入电容器，该值最好为最大输入电压的两倍。

此必须在输入端尽可能靠近稳压器的位置放置一个 100nF 至 220nF 的小外壳尺寸陶瓷电容器。这为器件内部的控制电路提供了高频旁路。

另外，输入端与陶瓷电容器并联的电解电容器的中等 ESR 有助于抑制由长电源引线引起的输入电源上的任何振铃。使用这个额外的电容器还有助于处理由具有异常高阻抗的输入电源引起的电压骤降。

对于电动自行车应用，选择两个并联 2.2 μF 、100V、X7R 陶瓷电容器和 33 μF 、100V、0.7 Ω 、X7R 电解电容器。100nF 电容器必须也具有 100V 的额定电压，并且具有 X7R 电介质。

2.2.1.6 CBOOT 选择

LMR38020 需要一个自举电容器连接在 BOOT 引脚与 SW 引脚之间。此电容器存储的能量用于为功率 MOSFET 的栅极驱动器供电。选择一个 100nF 的优质陶瓷电容器，电压为 50V。

2.2.2 Vo = 33V、Io = 2.5A (LM5148)

LM5148 和 LM5149 是 80V 电流模式同步降压控制器。LM5149 具有一个板载有源 EMI 滤波器 (AEF)。AEF 的价值在于，AEF 可以减小通常用于降低 EMI 的差模滤波器的尺寸。这两个器件除了 AEF 功能之外是相同的。因此，客户可以使用图 2-3 在 LM5149EVM 上进行更改来进行评估。

LM5148 计算工具中显示了 LM5148 的效率。

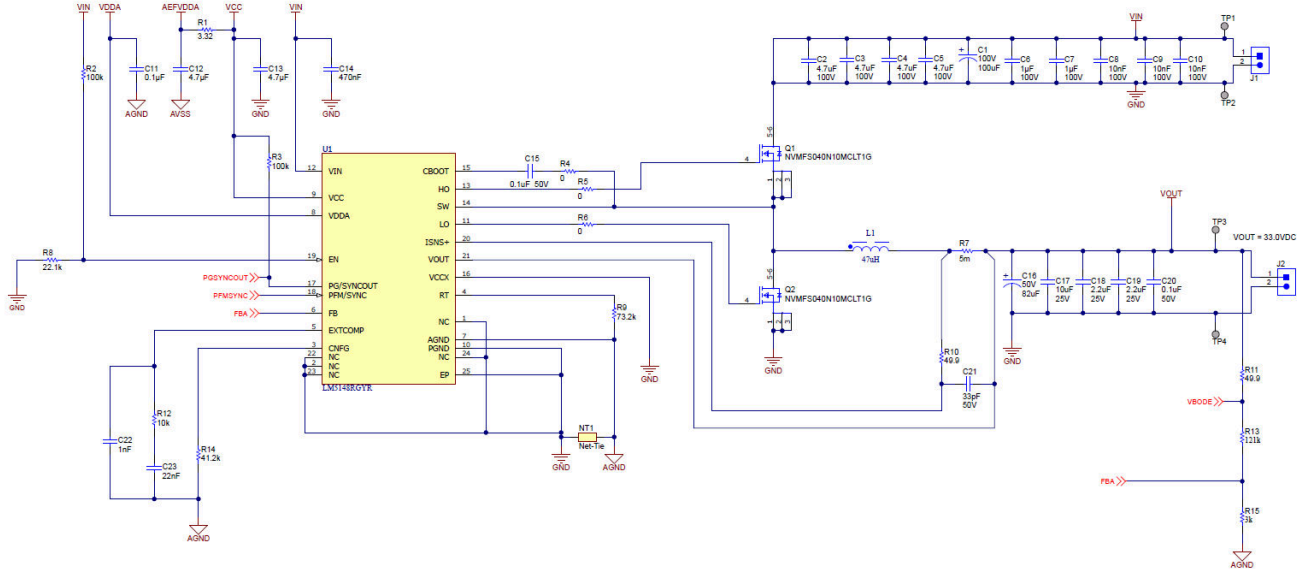


图 2-3. LM5148 原理图

以下各部分展示了详细的设计方法。

2.2.2.1 电感器选型

对于大多数应用，选择降压电感时应确保电感器纹波电流 ΔI_L 在标称输入电压下为最大直流输出电流的 30% 至 50%。请使用根据方程式 4 和方程式 5 给出的电感器峰值电流来选择电感。

$$L_O = \frac{V_{OUT}}{\Delta I_L F_{SW}} \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right) \quad (4)$$

$$I_{L(PEAK)} = I_{OUT} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (5)$$

请查看电感器数据表，以确保电感器的饱和电流远远超过具体设计的电感器峰值电流。

2.2.2.2 PCM 特殊斜率补偿

LM5149-Q1 利用峰值电流模式控制和大于 50% 的占空比来提供内部斜率补偿，从而维持稳定运行。可以使用方程式 6 计算降压电感，从而提供等于电感器下降斜率的斜率补偿。

$$L_o - IDEAL(uH) = \frac{V_{OUT}(V)R_S(mohm)}{24F_{SW}(MHz)} \quad (6)$$

2.2.2.3 MOSFET 选择

对于大多数应用

1. 根据应用要求选择具有适当耐受电压和电流的 MOSFET。例如，LM5148 是 80V 产品，也可将 MOSFET 的 $V_{(BR)DSS}$ 选择为 80V。可以根据要求选择 $I_{D(MAX)}$ 。
2. 根据芯片的驱动电压，检查所选 MOSFET 的 V_{GS} 和 Q_G 曲线。还需要检查 MOSFET 在不同 V_{GS} 下的典型输出特性 (I_D 与 V_{DS} 之间的关系)。这验证了 MOSFET 可以在控制器提供的驱动电压下导通。
3. 对于同一个 MOSFET， Q_G 、 Q_{OSS} 、 Q_{RR} 和 $R_{DS(on)}$ 成反比。这些参数会影响功率损耗。表 2-2 中所示的公式总结了一个通道的 MOSFET 相关功率损耗，其中后缀 1 和 2 分别表示高侧和低侧 MOSFET 参数。

表 2-2. 降压稳压器 MOSFET 功率损耗

功率损耗模式	高侧 MOSFET	低侧 MOSFET
MOSFET 导通 ⁽²⁾ (3)	$P_{cond1} = D \cdot \left(I_{OUT}^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12} \right) \cdot R_{DS(on)1}$	$P_{cond2} = D' \cdot \left(I_{OUT}^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12} \right) \cdot R_{DS(on)2}$
MOSFET 开关	$P_{sw1} = \frac{V_{IN} \cdot F_{SW}}{2} \left[\left(I_{OUT} - \frac{\Delta I_L}{2} \right) \cdot t_R + \left(I_{OUT} + \frac{\Delta I_L}{2} \right) \cdot t_F \right]$	可忽略
MOSFET 栅极驱动 ⁽¹⁾	$P_{Gate1} = V_{CC} \cdot F_{SW} \cdot Q_{G1}$	$P_{Gate2} = V_{CC} \cdot F_{SW} \cdot Q_{G2}$
MOSFET 输出电荷 ⁽⁴⁾	$P_{Coss} = F_{SW} \cdot (V_{IN} \cdot Q_{Oss2} + E_{Oss1} - E_{Oss2})$	
体二极管导通	不适用	$P_{condbo} = V_F \cdot F_{SW} \left[\left(I_{OUT} + \frac{\Delta I_L}{2} \right) \cdot t_{dt1} + \left(I_{OUT} - \frac{\Delta I_L}{2} \right) \cdot t_{dt2} \right]$
体二极管反向恢复 ⁽⁵⁾	$P_{RR} = V_{IN} \cdot F_{SW} \cdot Q_{RR2}$	

- (1) 栅极驱动损耗会根据 MOSFET 的内部栅极电阻、外部添加的串联栅极电阻以及器件的相关驱动器电阻进行分摊。
- (2) MOSFET $R_{DS(on)}$ 具有约 4500ppm/°C 的正温度系数。MOSFET 结温 T_J 及其随环境温度的上升情况取决于器件的总功率损耗和热阻。在最小输入电压下或接近的电压下工作时，确保 MOSFET $R_{DS(on)}$ 的额定值为 $V_{GS} = 4.5V$ 。
- (3) $D' = 1 - D$ 为占空比补码。
- (4) MOSFET 输出电容 C_{oss1} 和 C_{oss2} 与电压之间的关系呈现高度非线性特征。这些电容都能在 MOSFET 关断时通过电感器电流进行无损充电。不过，在导通期间，来自输入的电流为低侧 MOSFET 的 C_{oss2} 充电。 E_{oss1} (即 C_{oss1} 的能量) 会在导通时消耗，但这会被 C_{oss2} 上储存的能量 E_{oss2} 抵消。
- (5) MOSFET 体二极管反向恢复电荷 Q_{RR} 取决于很多参数，尤其是正向电流、电流转换速度以及温度。

客户必须根据实际工作条件选择合适的 MOSFET，以降低 MOSFET 功率损耗。它还可以提高 MOSFET 散热和系统效率。

对于本应用手册的两个应用条件，当输入电压为 48V、输出电压为 12V、输出电流约为 6-10A 时，低侧 MOSFET 的导通时间远大于高侧 MOSFET 的导通时间，低侧 MOSFET 的导通损耗更大。此外，考虑到低侧 MOSFET 的反向恢复损耗，MOSFET 的 Q_{rr} 不能过大。因此，可以在 $10m\Omega$ 附近选择低侧 MOSFET 的 $R_{DS(on)}$ ，在 Q_G 附近选择大约 30nC。高侧 MOSFET 的 $R_{DS(on)}$ 约为 $20m\Omega$ ， Q_G 约为 15nC。有关详细信息，请参阅 LM5149EVM 选择。

当输入电压为 48V、输出电压为 33V、输出电流为 2.5A 时，高侧 MOSFET 的导通时间比低侧 MOSFET 的导通时间长得多，但由于输出电流不大，导通损耗占比很小。因此，可以选择具有大 $R_{DS(on)}$ ($50m\Omega$) 以及小 Q_{rr} (10nC) 和 Q_G (5nC) 的 MOSFET。此实际应用选择了 NVMFS040N10MCLT1G。

2.3 设计 3 : $V_o = 33V$ 、 $I_o = 1A$ 和 $V_o = 12V$ 、 $I_o = 6A$

根据不同的输出电流要求，可参考设计一和设计二来选择不同的设计。

3 测试结果和性能曲线

除非另有说明，否则以下条件适用： $T_a = 25^\circ C$ 、 $V_{in} = 48V$ 、 $V_o = 33V$ 、 $f_{sw} = 300kHz$ 。

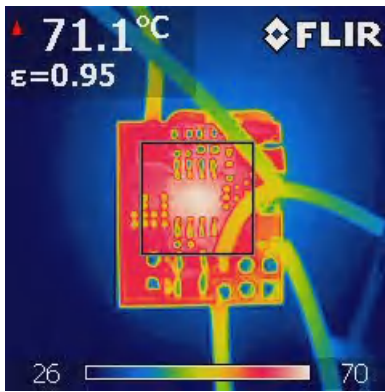


图 3-1. LMR38010 二极管在 1A 直流负载下的热性能

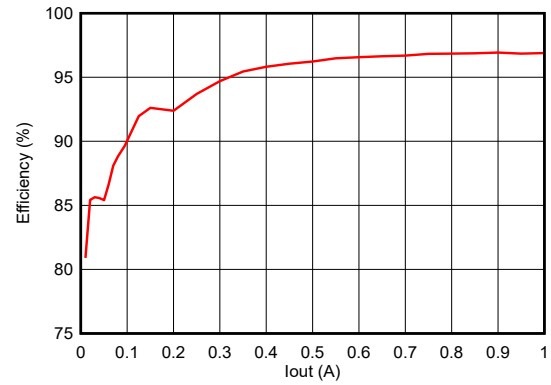


图 3-2. LMR38010 效率与负载电流间的关系

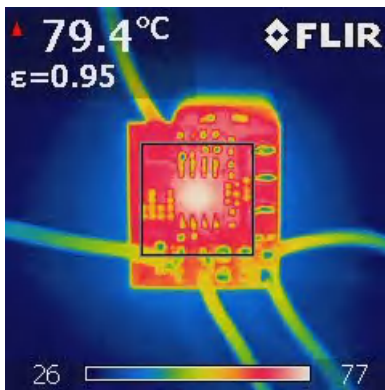


图 3-3. LM5164 二极管在 1A 直流负载下的热性能

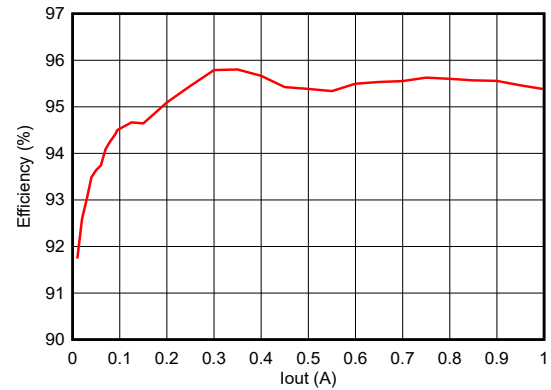


图 3-4. LM5164 效率与负载电流间的关系

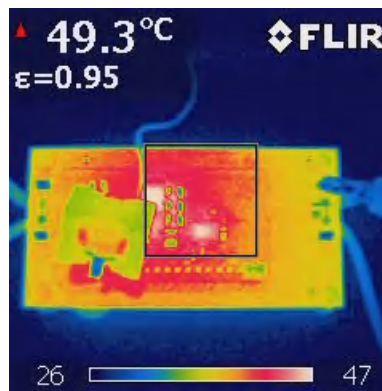


图 3-5. LM5148 热性能

提供了符合新标准的完整设计，表 3-1 列出了 TI 推荐的器件，这些器件旨在满足 25°C、 $V_{in} = 48V$ 条件下 55°C 以下的温升要求。客户可以使用此选择表来满足不同的要求。

表 3-1. 基于不同 V_{out} 和 I_{out} 要求的选择指南

Vout 设计	电动自行车应用中的 I_{outmax}	TI 推荐器件	VIN 范围	类型	控制方法
12V	10A	LM5148	3.5V 至 80V	同步控制器	峰值电流模式
12V	10A	LM5146	5.5V 至 100V	同步控制器	电压模式
33V	3A	LM5145	6V 至 75V	同步控制器	电压模式
33V	3A	LM5146	5.5V 至 100V	同步控制器	电压模式
33V	2.5A	LM5148	3.5V 至 80V	同步控制器	峰值电流模式
33V	1.3A	LM5012	6V 至 100V	非同步控制器	恒定导通时间 (COT)
33V	1A	LMR38010	4.2V 至 100V	同步控制器	峰值电流模式
33V	0.8A	LM5164	6V 至 100V	同步控制器	恒定导通时间 (COT)

4 总结

为了满足 GB42295 国家电动自行车标准，需要额外的 48V 降压设计。电动自行车应用中的关键点主要关注尺寸，热性能和效率。本应用报告重点介绍了三种传统输出电压设计，包括原理图和 PCB 设计以及测试结果。

5 参考资料

- 德州仪器 (TI), [LM5149-Q1 降压转换器评估模块用户指南](#), EVM 用户指南
- 德州仪器 (TI), [LM5146-Q1 EVM 用户指南](#), EVM 用户指南
- 德州仪器 (TI), [LM5148-LM25148DESIGN-CALC](#), 计算工具

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、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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司