

## Application Note

## 提高集成式 FET 驱动器的热性能



Davis Jackson, Yara Al Shami

## 摘要

使用集成式 FET 驱动器来设计系统时，如果用户需要 BLDC 驱动器以最高效率运行，那么热性能可能是一个主要考虑因素。在最基本的层面上，只有在对器件设置和参数进行了优化后，才能从集成式 FET 驱动器驱动大量电流。本应用手册介绍了一些实验室数据，旨在展示德州仪器 (TI) DRV8316 和 DRV8317 的几个可定制参数如何影响器件的热性能。

## 内容

1 引言.....	2
2 功率损耗和性能预期.....	2
3 实验室数据和分析.....	4
3.1 电流输出、 $R_{ds(on)}$ 和 PWM 频率.....	4
3.2 压摆率和器件.....	4
3.3 时间热分析.....	5
3.4 PCB 设计.....	5
4 热设计建议.....	7
5 总结.....	8
6 参考资料.....	8

## 插图清单

图 3-1. 封装温度随时间的变化.....	5
图 3-2. 禁用输出后的封装温度.....	5
图 3-3. DRV8317HEVM 布局.....	6
图 3-4. DRV8317 在 50kHz PWM 频率和 2.99A RMS 条件下的热像图.....	6

## 表格清单

表 3-1. DRV8317 结果：PWM 频率和输出电流.....	4
表 3-2. DRV8316 结果：在提高压摆率时具有固定 PWM.....	4
表 3-3. DRV8317 结果：在提高压摆率时具有固定 PWM.....	4

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

德州仪器 (TI) 的一些集成式 FET 电机驱动器包含热量计算器；在 [Ti.com](http://Ti.com) 上可以找到这些计算器。这些计算器可用于根据系统参数来预测热性能，但实验室数据可为数据表和计算器显示的信息提供额外的背景。本应用手册提供了一些真实数据，旨在说明 PWM 频率、压摆率和电气特性等设置如何影响运行期间的总功率损耗。本文档还分析了 DRV8317 在运行期间如何随着时间的推移而升温。最后，本应用手册提供一些设计建议，帮助创建具有更高热性能的产品。

本应用手册中使用以下两款器件进行实验室测试：

- **DRV8317**  
DRV8317 具有小尺寸和出色的热特性，因此对于低电压和小尺寸应用，DRV8317 是明智的设计选择。集成特性进一步缩减了电路板尺寸和物料清单成本，使设计更加简单。
- **DRV8316**  
DRV8316 与 DRV8317 类似，但 DRV8316 具有更高的功率输出能力，并可能包含一个集成的降压稳压器。

## 2 功率损耗和性能预期

首先详细介绍可用于仿真热性能的功率损耗公式。集成式 FET 驱动器的热耗散取决于多个参数。影响力最大的因素是器件的内部  $R_{ds(on)}$ ，表示内部 FET 的漏源电阻。驱动大电流时，该电阻导致的平均功率损耗（称为导通损耗）是总功率损耗的主要影响因素。下面就梯形控制和 FOC 控制对每种类型的损耗都进行了说明。

### 导通损耗

$$P_{con} = 2 \times I_{pk(trap)}^2 \times R_{ds, (on)(TA)} \quad (1)$$

$$P_{con} = 3 \times I_{rms(foc)}^2 \times R_{ds, (on)(TA)} \quad (2)$$

$R_{ds(on)}$  也随温度变化。例如， $R_{ds(on)}$  会随着驱动器温度的升高而增大，并在达到饱和点之前增加功率损耗。正因为如此，下一节中显示的热数据是在驱动器达到所需的输出电流后几分钟获取的。除了导通损耗外，开关损耗和体二极管损耗也会导致器件的总功率损耗增加。开关损耗是指在 FET 开关时因转换而产生的损耗，而体二极管损耗是指在死区时间内电流流经 FET 体二极管而产生的损耗。这些损耗的计算公式如下：

### 开关损耗

$$P_{sw} = I_{pk(trap)} \times V_{pk(trap)} \times t_{rise/fall} \times f_{PWM} \quad (3)$$

$$P_{sw} = 3 \times I_{RMS(FOC)} \times V_{pk(FOC)} \times t_{rise/fall} \times f_{PWM} \quad (4)$$

### 体二极管损耗

$$P_{diode} = 3 \times I_{pk(trap)} \times V_f(diode) \times t_{deadtime} \times f_{PWM} \quad (5)$$

$$P_{diode} = 6 \times I_{RMS(FOC)} \times V_f(diode) \times t_{deadtime} \times f_{PWM} \quad (6)$$

这些功率损耗取决于压摆率和 PWM 频率等其他参数，稍后会在实验数据中对此进行讨论。如需详细了解每一个这些公式，请参阅 [集成式 MOSFET 驱动器的散热注意事项](#) 视频，其中介绍了采用集成式 FET 驱动器的系统中的所有功率损耗来源。

查看数据之前，可以对 DRV8316 和 DRV8317 的性能进行一些预测。由于 DRV8316 具有较低的  $R_{ds(on)}$  值，因此在相同的输出电平下，预计 DRV8316 与 DRV8317 相比具有更低的整体温度。此外，根据前面的公式，可得出以下结论：

- 更高的压摆率意味着  $t_{rise}$  和  $t_{fall}$  将减小，这意味着与更低的压摆率相比，该器件的功率损耗更少，运行温度更低。
- 更高的 PWM 频率会增加开关损耗和二极管损耗，因为 FET 的每秒开关频率更高（所以必须更频繁地穿过功率损耗密集型米勒区域），从而导致器件的运行温度高于 PWM 频率更低时的运行温度。

- FOC 换向算法是 BLDC 电机换向效率最高的方法，因此 FOC 需要产生比梯形控制（效率最低的算法）更好的热性能。

但是，这些设置中的每一个都存在潜在的缺点，稍后的章节将对此进行详细说明。

最后，每个器件都要在一定的结温范围内运行。由于 PCB 设计的性质，结温很难测量。本应用手册中展示的实验室数据是指封装温度。由于多种因素，例如热阻、环境温度以及热量传递到不同介质并最终进入周围环境的可用面积，这两个值可能会有所不同。要关联这两个值，需要进行详细的测试和分析，但如需了解更多信息，请参阅以下应用手册：[半导体和 IC 封装热指标](#)。某些数据表中的“热性能信息”部分旁边也列出了此资源。

根据这些预测和之前讨论的理论，用户需要考虑使用 DRV8316 和 DRV8317 EVM 产生的真实实验室数据。

### 3 实验室数据和分析

#### 3.1 电流输出、 $R_{ds(on)}$ 和 PWM 频率

第一个数据集显示了输出电流和 PWM 频率如何影响器件封装的温度。这些测量是使用 DRV8317 和以下参数进行的：电源电压设置为 17.4V，压摆率设置为最大值 200V/ $\mu$ s，电机在空载时进行特性分析，在器件实现输出电流的 10-60 秒内进行测量。请注意，DRV8317 的内部线性稳压器会导致器件的功率损耗，并且此输出在两次测试之间是一致的。

**表 3-1. DRV8317 结果：PWM 频率和输出电流**

PWM 频率 (kHz)	输出电流 RMS (A)	封装温度 (°C)
20	2.99	112.6
30	3.02	130.6
40	3.00	140
50	2.99	151.9
20	3.45	149.6
30	3.3	141
40	3.24	151.9
50	3.13	157

表 3-1 展示了提高 PWM 频率和电流所产生的实际影响。首先，在将 PWM 频率保持恒定并将封装温度与两个不同的输出电流 RMS 值进行比较时，数据显示更高的电流输出可以显著升高器件的温度。这是预期结果，因为导通损耗在高电流输出下占主导地位，并且由器件的  $R_{ds(on)}$  决定。其次，在将输出电流 RMS 保持恒定并将封装温度与增加的 PWM 频率进行比较时，数据显示高 PWM 频率也会显著升高器件的温度。这是开关和二极管损耗的预期结果，如上一节所述。

请注意，这些数据也显示器件已接近绝对最大温度阈值。虽然根据数据表该阈值通常为 160 摄氏度，但器件差异意味着该阈值可以低至 145 摄氏度，也可以高至 175 摄氏度。在这些高电流输出下运行时，这可能会导致许多器件出现可靠性问题。因此，在实践中，PWM 频率会限制驱动器可产生的电流量，不会造成永久损坏。

#### 3.2 压摆率和器件

器件输出相位上的电压开关压摆率也会影响开关损耗对系统整体功率损耗的贡献。预期是在给定恒定电流输出和 PWM 频率的情况下，与更慢的压摆率相比，更快的压摆率可以减少开关损耗并降低器件的运行温度。表 3-2 展示了这种情况。请注意，在所有测试中电压大约为 17.414V 至 17.416V，电机在带载时进行特征分析，并在达到大约 3A RMS 的目标输出电流后 2 分钟测量封装温度。

**表 3-2. DRV8316 结果：在提高压摆率时具有固定 PWM**

PWM 频率 (kHz)	输出电流 RMS (A)	压摆率 (V/ $\mu$ s)	封装温度 (°C, DRV8316)
20	3.00	25	108
20	2.95	50	82.4
20	2.98	125	68.6
20	2.95	200	66.2

**表 3-3. DRV8317 结果：在提高压摆率时具有固定 PWM**

PWM 频率 (kHz)	输出电流 RMS (A)	压摆率 (V/ $\mu$ s)	封装温度 (°C, DRV8317)
20	1.98	25	112.3
20	1.98	50	85.5
20	1.98	125	70.4
20	1.98	200	65.5

上述实验中使用了无传感器磁场定向控制 (FOC) 来驱动电机。正如预期的那样，随着压摆率的增加，器件封装的温度降低。然而，虽然更高的压摆率可能会进一步降低开关损耗，但设计人员还必须注意可能会出现其他问题。高压摆率会通过  $dV/dt$  耦合导致不必要的半桥击穿事件，并通过开关期间的节点振铃导致 EMI 性能下降。在选择适合应用的压摆率时，还必须考虑所有这些缺点。

此外，请查看 DRV8316 与 DRV8317 的性能比较。DRV8316 的  $R_{ds(on)}$  值低于 DRV8317，因此我们预计 DRV8316 具有更低的导通损耗。虽然以上实验中显示 DRV8316 在大约 3A RMS 的条件下运行，而 DRV8317 在大约 2A RMS 的条件下运行，但 DRV8316 在每个压摆率下的运行温度都更低，200V/ $\mu s$  除外（不过，该差异可归因于测量误差）。尽管电流输出存在显著的差异，但具有更小  $R_{ds(on)}$  的驱动器的运行温度比替代器件要低，因此体现了导通损耗对器件整体温度的影响程度。但请注意，这两款器件用于不同的应用。在比较两款器件的热性能时，设计人员需要考虑具有相似工作功率和建议最终用途的电机驱动器。因此，DRV8316 被设计用于功率稍高于 8317 的应用。

### 3.3 时间热分析

最后，随着时间的推移，驱动器会发热。根据应用要求电机驱动器输出大电流的时间长度，器件的温度会发生变化。这会影响到器件的不同参数，尤其是  $R_{ds(on)}$  电阻。该电阻随温度升高而增大，从而增加器件的导通功率损耗。这种情况会一直持续到电阻增加和器件温度饱和为止。一旦器件禁用输出，温度便会快速下降。图 3-1 是温度随时间变化的曲线图。趋势上的任何偏差都是由多种因素造成的，例如测量误差或电机参数的变化，这些因素可能会提高或降低系统的效率。

#### 备注

在此实验中使用 DRV8317 的条件如下：17.414V 电源、20kHz PWM 频率、2.5A RMS 输出和 200V/ $\mu s$  压摆率。封装温度随时间变化的曲线图如图 3-1 所示。

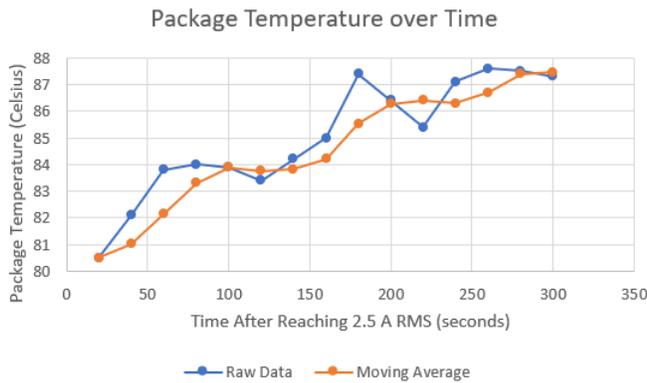


图 3-1. 封装温度随时间的变化

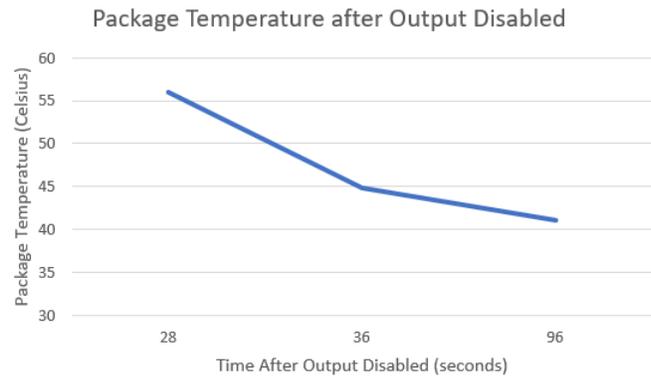


图 3-2. 禁用输出后的封装温度

器件迅速降温，部分原因是通过连接的铜平面进行散热。由于输出被禁用，主要的导通功率损耗不再是总功率损耗的主要影响因素，因此温度迅速降低。

### 3.4 PCB 设计

此测试期间捕获的热像图也显示了器件运行期间通过 PCB 散发的热量。如下图所示，最靠近电机输出端的器件封装部分（封装顶部）是最热的，对应于相位半桥 MOSFET 的内部漏源电阻。此外，还可从热像图中观察器件封装和 PCB 的热梯度。最大的梯度出现在器件和电路板之间。这是因为器件底部的散热焊盘是主要的散热途径。因此，TI 建议采用热效率较高的电路板设计，更大限度地扩大到器件散热接地焊盘的铜面积。尽管热像仪只能显示电路板表面的散热情况，但热像图显示了有效的 PCB 设计对于热性能的重要性。如果将热像图与下图所示的布局设计进行比较，在器件封装后，具有最高温度的电路板的下一个区域位于器件的底部和左侧。该区域对应于从驱动器到电路其余部分的大多数布线。这些布线非常细，而且周围没有铜，这意味着从驱动器向电路板散热以及从电路板向环境散热的面积不大。与此同时，电路板温度最低的区域位于器件封装的顶部和右侧。这些区域对应于相位输出、VM 电源和接地，所有这些区域都由较大的铜平面组成。这些平面有助于在较大的区域内快速散热。

由于大部分热量通过接地平面散发，因此请注意器件封装下方的所有层都要有一个面积较大且不受阻碍的接地覆铜区域，这一点很重要。布线使得导热面积减小。从热像图中可以看出这一点，其中显示热量通过布线积聚在该区域，而不是流入温度较低的铜平面。因此，这些数据显示了大型铜平面的作用效果，如图 3-3 所示。

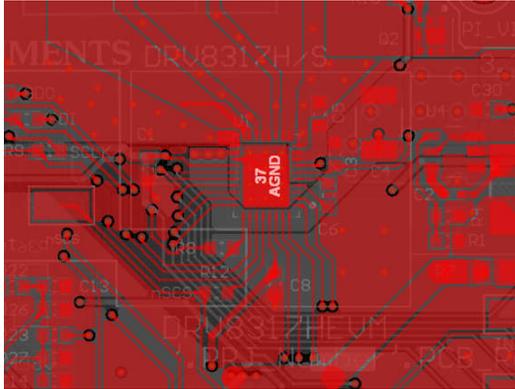


图 3-3. DRV8317HEVM 布局



图 3-4. DRV8317 在 50kHz PWM 频率和 2.99A RMS 条件下的热像图

## 4 热设计建议

根据上一节提供的数据，本应用手册为需要最大限度提高集成式 FET 驱动器热性能和效率的设计人员提供了几项建议。首先，在几组同等功率级电机驱动器中，具有最低  $R_{ds(on)}$  值的集成式 FET 驱动器可以减少导通损耗，而这种损耗在大电流输出下是总功率损耗的主要成分。其次，为了促使电流输出接近器件的最大电流，TI 建议基于电机类型使用合理的开关频率，确保具有尽可能高的压摆率但不会引起 EMI 问题。最后，根据二极管损耗公式，在防止跨导事件的前提下，尽可能缩短死区时间。这些设置可以降低器件在给定电流下的整体温度，这意味着器件在触发过热关断之前能够达到更高的电流输出（请注意，这些器件仍受到过流阈值的限制）。然而，由于高压摆率引起的节点振铃，某些系统可能易受 EMI 的影响，因此设计人员必须始终注意各种权衡因素，以确保系统稳健可靠。内部稳压器的电流输出也会通过增加功率损耗产生热量，但本应用手册中未介绍这一点。为了减少这种功率损耗，应避免在电路的其余部分从这些稳压器中消耗大量电流。降低这些稳压器的输入电压也可以减少稳压输出所需的压降，从而降低功率损耗；但是，并非每个器件都具备双电源功能。更多相关信息，请参阅数据表。用户还可以参考另一本应用手册以了解[布局最佳实践](#)。

此外，经过热优化的 PCB 设计可以显著帮助改善散热。器件封装底部的接地焊盘需要在多个层上尽可能多地连接到不受阻碍的覆铜区域。根据 [ti.com](#) 上提供的集成式 FET 驱动器热量计算器的仿真计算结果，双层 PCB 上小覆铜区域产生的结温高于四层 PCB 上大覆铜区域产生的结温。覆铜区域需要在器件周围尽可能延伸，并且布线、过孔或其他元件造成的中断极少。必须使用散热过孔将一层上的接地平面缝合到另一层，并且需要在器件封装的接地焊盘上广泛使用过孔。

增加器件周围铜接地平面尺寸的另一种策略是将 PGND 和 AGND 统一为一个实心接地平面，而不是通过网带连接多个单独平面。用户需要确保大电流返回路径不会穿过布局中的器件正下方。但是，这可能会在电流检测放大器中产生噪声（如果电流检测放大器集成在驱动器中，例如集成在 DRV8316 和 DRV8317 中），并可能导致采用电流监测的无传感器换向算法出现低效率问题。最终，电机驱动器和每个相位输出端口之间的铜连接需要尽可能宽，以便用于传输大电流并提供额外的散热途径。

最后，在测试系统的热性能时，请注意在使用集成式 FET 驱动器时牢记以下事项：

- 高 PWM 频率不仅会导致更高的开关损耗，还会缩短 CSA 输出的稳定时间。这样会将噪声引入电流检测测量中，从而导致软件电流限制误关断或无传感器换向无效。
- 输出电流中的噪声也会影响使用示波器进行的最大值测量。在实验室中测量电流输出的一种更简单的方法是使用 RMS 值。
- 为了观察驱动器的高电流输出，电机需要有负载。这是因为电流与电机提供的扭矩成正比。
- 确保电机的电压电源要求处于与电机驱动器建议运行条件相同的范围内。超出这些额定值运行时，可能会导致器件损坏或低效率，从而在器件封装中产生热量。
- 在评估应用中的电机驱动器时，使用德州仪器 (TI) 某一款评估板和可用的 GUI 是一个很好的起点。本应用手册使用 [DRV8316EVM](#) 和 [DRV8317EVM](#) 以及相应的无传感器 FOC GUI 进行测试。请参阅每款电机驱动器的产品页面，以了解更多信息。

## 5 总结

集成式 FET 驱动器采用小型封装，具有出色的特性和功耗能力，并且这些驱动器还可降低 PCB 成本和复杂性。同时，器件的集成特性要求设计人员考虑系统的热性能，以便驱动器能够提供更高效的性能。本应用手册说明了集成式 FET 电机驱动器的各种功率损耗来源，展示了实验室实验中捕获的数据，并根据这些数据提供了建议。有关德州仪器 (TI) 集成式 FET 驱动器产品系列的更多信息，请参阅[无刷直流 \(BLDC\) 电机驱动器](#)。有关热性能的更多内容，请参阅 [ti.com](#) 上的视频和其他设计指南。

## 6 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[半导体和 IC 封装热指标](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[集成式 MOSFET 驱动器的散热注意事项](#) 视频。
- 德州仪器 (TI)，[电机驱动器电路板布局布线最佳实践](#) 应用手册。

## 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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司