

在电机驱动应用中使用并联 MOSFET 的大电流设计

通过量化参数失配对电流分配和功率耗散的影响选择合适的功率 MOSFET

作者

Medic Urban，电机驱动高级应用工程师，以及
电机驱动首席应用工程师 **Elvir Kahrmanovic**，均供职于英飞凌科技

简介

在[电机驱动](#)等应用中，半桥拓扑（通常为 3 相）用于生成在电机中产生正扭矩或负扭矩的交流电源信号。只有通过并联形成每个功能开关的 MOSFET，才能实现高输出电流。

当多个[功率 MOSFET](#) 并联以增加系统整体电流能力容量时，通常假设电流在并联器件之间均等分配或均等共享。然而，在并联 MOSFET 时，需要考虑并联器件之间的电流分配。PCB 布局的若干特性和特定的 MOSFET 参数会影响这种分配，并在参数不匹配或布局不对称时导致均流不平衡。

本文展示了 MOSFET 参数失配对并联 MOSFET 之间的电流不平衡以及由此导致的相应 MOSFET 的平均损耗不平衡的影响。为了正确量化功率损耗和对系统性能的影响，需要考虑特定的系统属性：从布局和开关属性到负载电流和 PWM 方案。尽管这种分析是针对特定应用的，并且因系统而各异，但仍然可以得出一些一般性结论。

另外，我们强调并联 MOSFET 之间 $V_{GS(th)}$ 匹配的相关性，并结合 $V_{GS(th)}$ 失配强调跨导 (g_{fs}) 对均流的影响。虽然低 g_{fs} 可改善并联电流平衡，但考虑传导性也十分重要，因为低 g_{fs} 可能伴随着更高的 $R_{DS(on)}$ 值。

评估交流电流输出负载下 MOSFET 的 功率损耗

使用两个 MOSFET 并联的 高低侧半桥电路模拟 MOSFET 参数对所产生的总功率损耗的影响。Figure 1 所示的简化电路模型已完美对称。但仍需考虑典型电路的寄生电感和走线电阻。MOSFET Q_1 和 Q_3 代表并联的高侧开关。

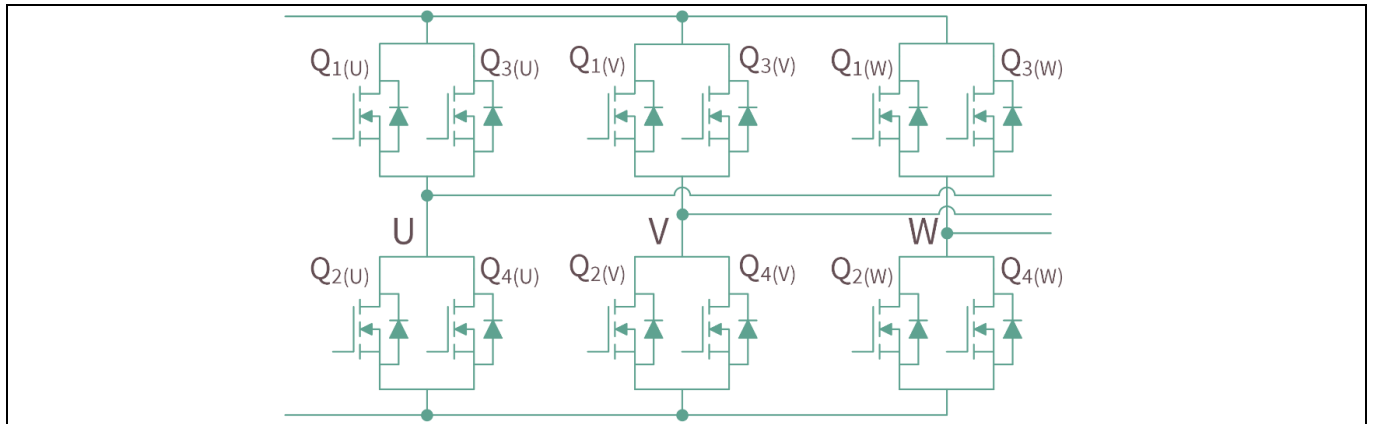


Figure 1 每个开关有两个并联 MOSFET 的三相逆变器

在分析系统损耗时，必须区分瞬时损耗和平均损耗。瞬时功率耗散是一个动态的参数。MOSFET 损耗的主要贡献可以细分为以下瞬时损耗：

- E_{ON} - 导通时的 MOSFET 开关损耗
- E_{OFF} - 关断时的 MOSFET 开关损耗
- P_{CND} - MOSFET 沟道的正向传导损耗
- P_D - 体二极管的传导损耗
- E_{Doff} - 体二极管的反向恢复损耗

这些组成部分经常被单独观察和比较。然而，每个组成部分对总体损耗定量贡献在很大程度上取决于负载电流的性质和所使用控制方案的类型。因此，要比较特定 MOSFET 参数与总体系统性能的相关性，需要结合特定的应用来量化该参数对性能的影响。

平均功率耗散结合热特性决定了器件的温度，因此是系统性能的直接限制因素。平均损耗可细分为平均开关损耗和平均传导损耗来分别分析开关损耗和传导损耗的贡献：

- $P_{Q1-SW(avg)}$ - MOSFET Q_1 的平均开关损耗
- $P_{Q1-CND(avg)}$ - MOSFET Q_1 的平均传导损耗
- $P_{Q1-TOT(avg)}$ - MOSFET Q_1 的总平均损耗 ($P_{Q1-CND(avg)}$ 和 $P_{Q1-SW(avg)}$ 之和)

在相对简单的直流电流输出情况下，单个 PWM 周期足以提供估算稳态运行平均损耗所需的信息。与此不同的是，计算正弦波输出电流的损耗需要考虑至少一个完整的正弦周期，因为每个 PWM 周期的电流幅值都不同。

在本文中，考虑半桥电路输出为交流电流负载情况下 MOSFET 的损耗，这与电机驱动应用最相关，因此，根据以下等式，输出负载电流是给定幅值的正弦波：

$$i_{\text{Load}}(t) = I_m \cdot \sin(\omega_m \cdot t + \varphi)$$
$$\omega_m = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{el}}$$
$$PF = \cos(\varphi)$$

Equation (1)

应用的开关调制方案是 SPWM（正弦脉冲宽度调制），其条件和设置如 Table 1 中定义。本文提到的所有示例均采用相同的 SPWM 条件。

Table 1 负载条件和 SPWM 参数

Description		Value
I _m	Amplitude of the load current	0 A → 200 A
f _{el}	Electrical frequency of the load/motor (frequency of modulating wave)	100 Hz
φ	Phase shift of the load sine wave with regard to the modulating waveform of the control	0°
PF	Power factor	1
M	Modulation index of PWM (“amplitude” of PWM DC)	0.8
f _{PWM}	Carrier frequency	10 kHz
DT	Dead time applied to the PWM waveforms	1 μs

功率耗散不平衡和 V_{GS(th)} 失配的影响

考虑到与并联 MOSFET 相关的不平衡性，个体的功率耗散对实现可靠的系统设计至关重要。因此，本文中的结果图表显示了与输出负载电流幅值相关的单个 MOSFET 的平均功率耗散。每张图都比较了至少两组不同条件下的结果。

解释这些结果的着重点始终是耗散最大功率的 MOSFET 的功率耗散。该 MOSFET（即“最热 MOSFET”）是系统输出电流的瓶颈。

特定的 MOSFET 参数在失配时会以不同的方式影响均流。R_{DS(on)} 的值在 MOSFET 导通期间会产生影响，而其他一些参数（V_{GS(th)}、R_G、C_{GS}、C_{GD}）会影响开关期间的均流（Table 2 [1] 并阅读相关应用指南（见文章末尾）了解完整的详细信息）。对布局严格对称的电路进行仿真，可以研究各个 MOSFET 参数的影响。

Table 2 在均流中发挥重要作用的参数 [1]

Parameter		Imbalance behavior: effect of parameter value reduction to the corresponding MOSFET	Comparison
Total gate resistance	$R_{G(tot)}$	Increase of power dissipation at turn ON Decrease of power dissipation at turn OFF	Imbalance caused by 1 percent resistance tolerance is small compared to other influences compared here Internal $R_{G(int)}$ mismatch dominates at lower external $R_G (< 10 \Omega)$, in this condition datasheet $R_{G(int)}$ value range causes medium imbalance
Gate - source capacitance	C_{GS}	Increase of power dissipation at turn ON Decrease of power dissipation at turn OFF	Datasheet value range causes medium to high imbalance
Gate - drain capacitance	C_{GD}	Increase of power dissipation at turn ON Decrease of power dissipation at turn OFF	Datasheet value range has less effect compared to R_G and C_{GS}
Gate threshold voltage	$V_{GS(th)}$	Increase of power dissipation at turn ON Increase of power dissipation at turn OFF	Datasheet value range causes high imbalance

与其他参数相比， $V_{GS(th)}$ 失配对整体性能（耗散不平衡）的意义部分来自 MOSFET 量化的典型生产差异，主要取决于它们如何影响不平衡。在一组并联 MOSFET 中，具有最低 $V_{GS(th)}$ 的 MOSFET 在导通和关断时均表现出开关损耗增加，而其他参数失配时则不会出现这种情况。另外， $V_{GS(th)}$ 负温度系数特性会进一步增加不平衡；然而，在下例中没有考虑温度相关性。

为了强调并联 MOSFET 之间 $V_{GS(th)}$ 匹配的重要性，Figure 2 对比了两种 $V_{GS(th)}$ 失配情况下 MOSFET 的功率耗散。

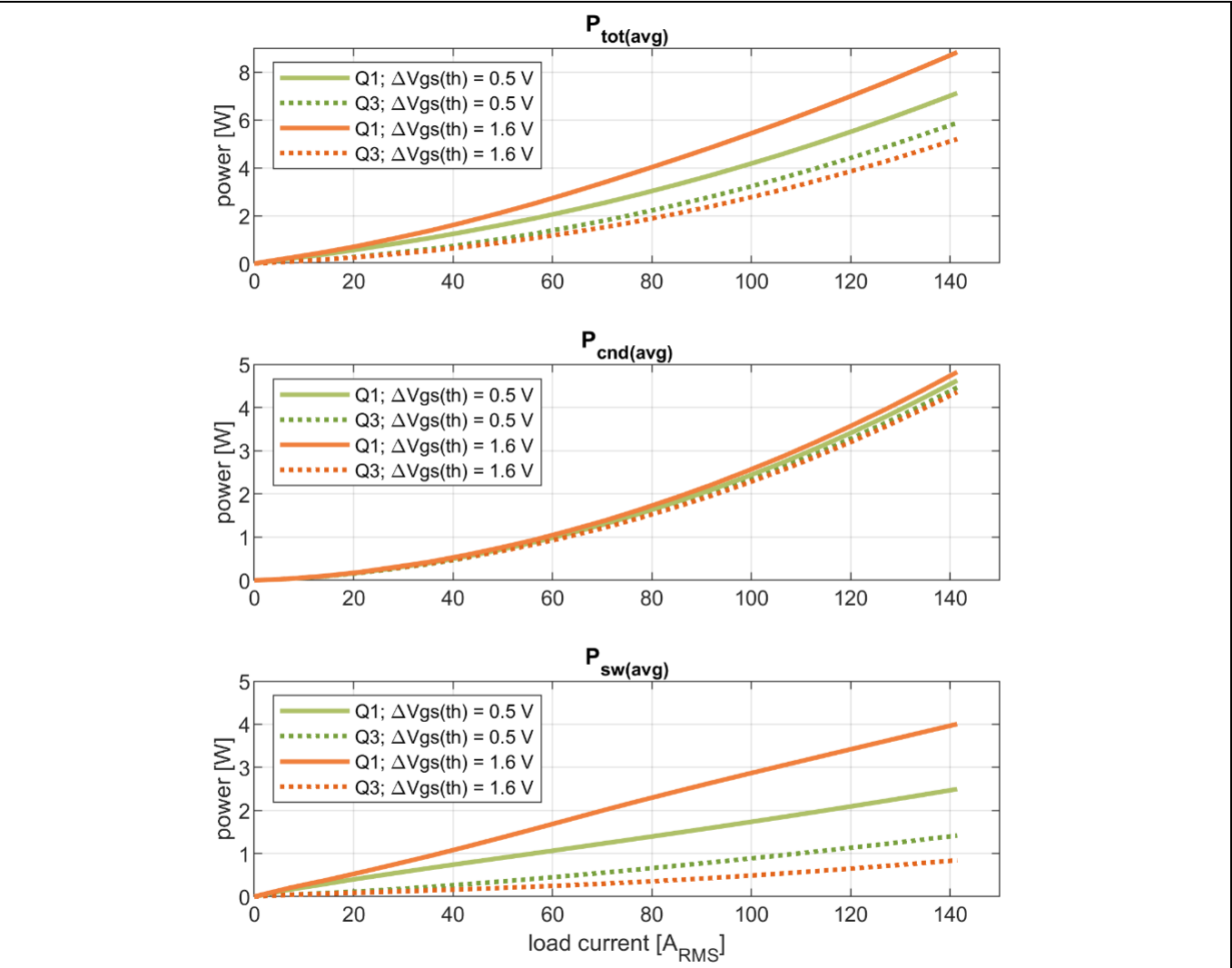


Figure 2 MOSFET Q1 和 Q3（两个并联 MOSFET）中的平均功率耗散

Table 3 显示了仿真中所使用 V_{GS(th)} 值的组合。

Table 3 MOSFET 参数 - V_{GS(th)} 失配

MOSFET	Case 1: Sample lot ΔV _{GS(th)} = 0.5 V	Case 2: Datasheet range ΔV _{GS(th)} = 1.6 V
Q ₁	V _{GS(th)} = 2.8 V g _{fs} = 185 S	V _{GS(th)} = 2.2 V g _{fs} = 185 S
Q ₃	V _{GS(th)} = 3.3 V g _{fs} = 185 S	V _{GS(th)} = 3.8 V g _{fs} = 185 S

考虑到数据手册中的最大值和最小值，Figure 2 中的橙线显示了 V_{GS(th)} 失配最差情况下的结果。对于给定的输出电压，Q₁ 中耗散的功率可能是 Q₃ 中耗散功率的两倍。

从统计上看，不太可能出现这种极端失配情况；因此，考虑一个样本批次内的参数分布，对比结果中显示了更“现实的最差”失配下的情况。**Figure 2** 中的绿线显示了 $\Delta V_{GS(th)} = 0.5\text{ V}$ 的较小 $V_{GS(th)}$ 失配条件下的结果。

功率耗散与 MOSFET 平均温度成正比，因此决定了系统输出电流的极限，因为在任何个体 MOSFET 的温度都不得超过最高器件温度限制。

在并联 MOSFET 时确保低的电流不平衡对于缩小和优化系统尺寸至关重要。若电流不平衡增加，则往往会造成大部分损耗集中在单个器件上，从而削弱并联的优势。

因此，在选择用于并联的 MOSFET 时，考虑 $V_{GS(th)}$ 的低生产差异至关重要。

跨导 (g_{fs}) 对均流的影响

开关期间的电流不平衡受 $\Delta V_{GS(th)}$ 的强烈影响；然而，它本身并未明确定义不平衡。当同时观察在不同跨导值 (g_{fs}) 下 $V_{GS(th)}$ 的影响时，可以看到对均流的有趣影响。 g_{fs} 值在整个 I_D 范围内不是恒定的。**Figure 3** 显示了整个电流情况下 g_{fs} 的特性曲线，在数据手册中的参数（例如 $g_{fs} = 185$ ）通常是在给定 I_D 条件下的值，该值与 **Figure 3** 中所示的特性曲线相对应。必须在模型中考虑全电流特性，以进行准确的仿真。

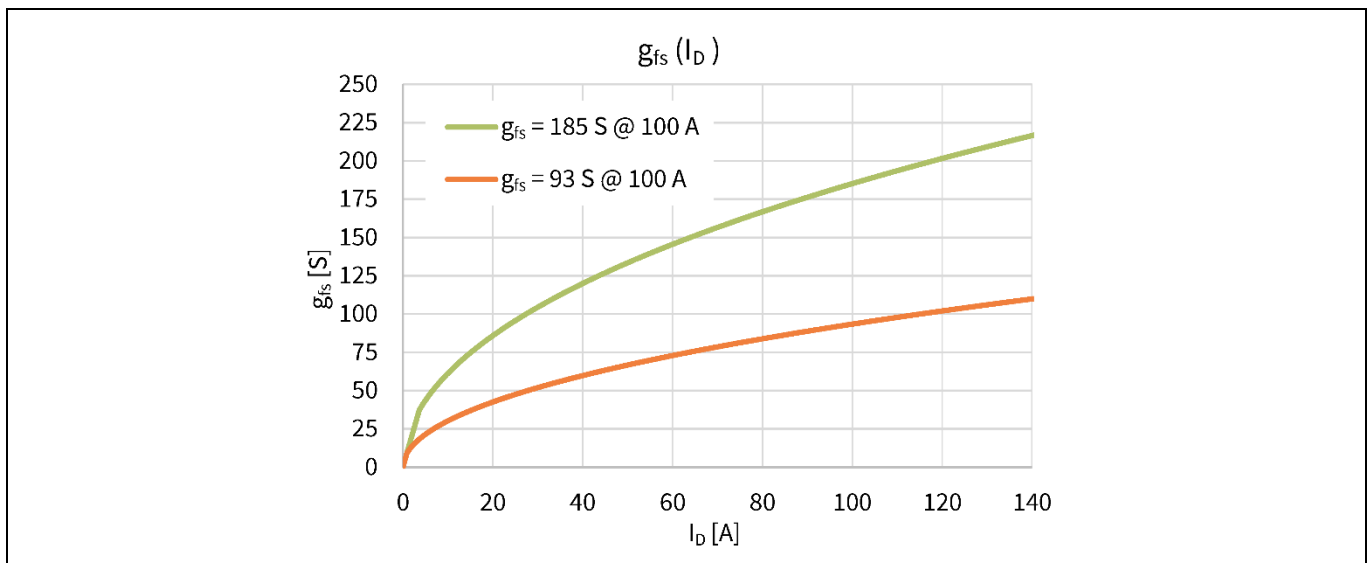


Figure 3 OptiMOS™ 技术的 g_{fs} 与 I_D 的对应关系

g_{fs} 的减小会影响开关损耗和传导损耗。由于 $R_{DS(on)}$ 与 g_{fs} 的隐性关联，选择 g_{fs} 较低的 MOSFET 可能导致传导损耗增加。较低的 g_{fs} 也会减慢开关速度，因而开关损耗会增加。

为进行公平比较，在以下采用不同 g_{fs} 值（**Table 4**）的示例中，开关速度（开关期间的 di_D/dt ）通过 R_G 网络进行匹配。

Table 4 MOSFET 参数 - g_{fs} 减小 @ $\Delta V_{GS(th)} = 0.5\text{ V}$

MOSFET	Case 1: High g_{fs} $\Delta V_{GS(th)} = 0.5\text{ V}$ $g_{fs} = 185\text{ S}$	Case 2: Reduced g_{fs} $\Delta V_{GS(th)} = 0.5\text{ V}$ $g_{fs} = 93\text{ S}$
Q_1	$V_{GS(th)} = 2.8\text{ V}$ $g_{fs} = 185\text{ S}$	$V_{GS(th)} = 2.8\text{ V}$ $g_{fs} = 93\text{ S}$
Q_3	$V_{GS(th)} = 3.3\text{ V}$ $g_{fs} = 185\text{ S}$	$V_{GS(th)} = 3.3\text{ V}$ $g_{fs} = 93\text{ S}$

Figure 4 显示了两个 g_{fs} 值之间的比较，考虑了 Q_1 和 Q_3 之间 $\Delta V_{GS(th)} = 0.5\text{ V}$ 时的 $V_{GS(th)}$ 失配情况。在较低的 g_{fs} 中， R_g 值会减小以匹配开关期间的 di_D/dt 。

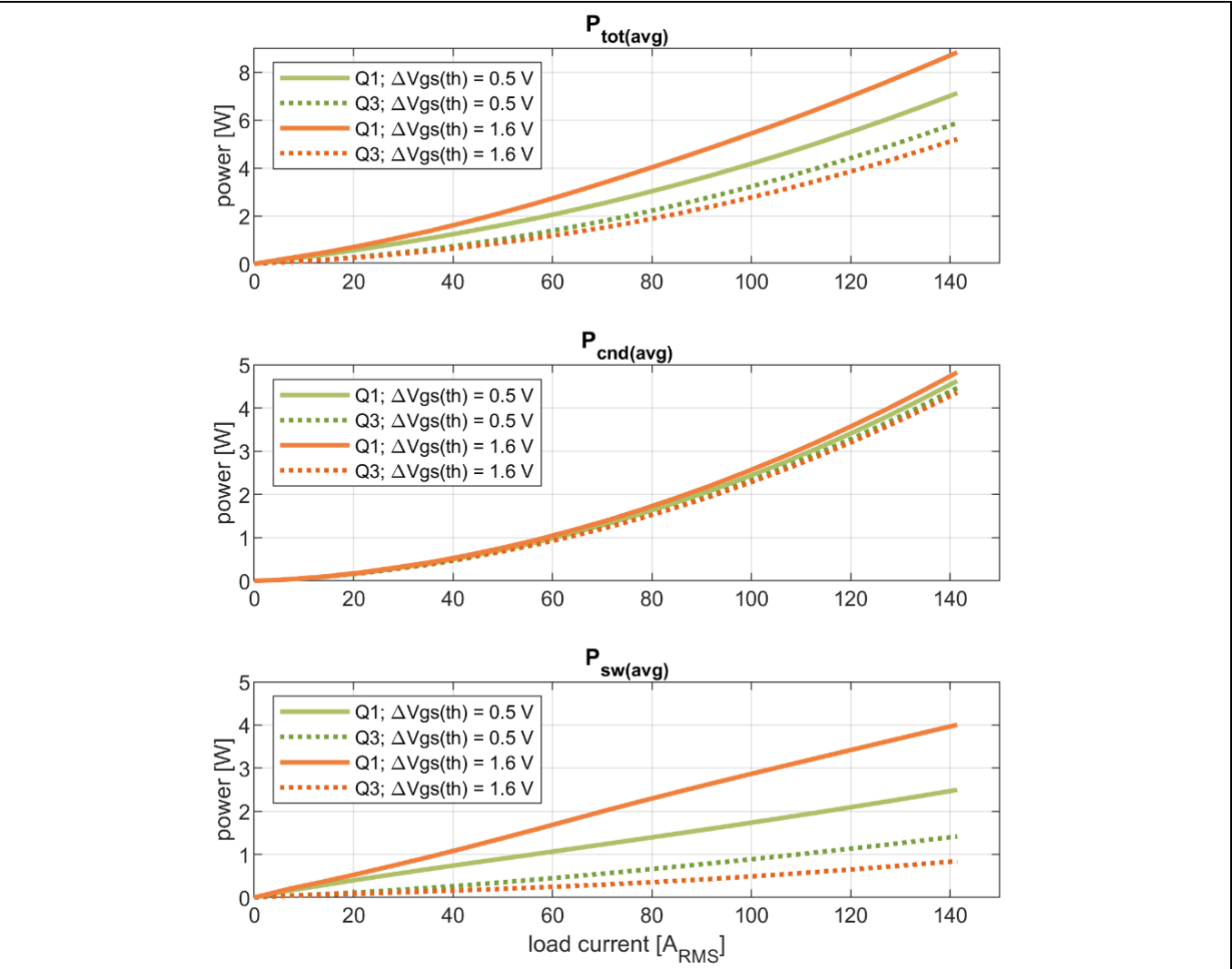


Figure 4 不同 g_{fs} 值之间的比较: $g_{fs} = 185\text{ S}$ 与 $g_{fs} = 93\text{ S}$ @ $\Delta V_{GS(th)} = 0.5\text{ V}$ (通过 R_g 匹配 di_D/dt)

在匹配的开关特性下减小 g_{fs} 可改善开关损耗不平衡。然而，由于较高的 $R_{DS(on)}$ 会增加传导损耗，从而增加总损耗，总体性能会更差。

换言之，传导损耗的增加掩盖了均流改善所带来的好处。

另一方面，如果开关损耗因任何原因增加并占总损耗的主要部分，则平衡开关损耗的益处也会显而易见。在改善均流和由此导致传导损耗增加之间有一个平衡点。

底线是一般准则只能指导我们到此为止——只有在考虑所有系统具体情况时才能实现优化。

结论

MOSFET 参数在均流中起着至关重要的作用。设计工程师不仅需要考虑“典型”（即理想）性能，还需要考虑不可避免的器件参数变化的现实情况，从而适当地进行系统设计。在这方面，电流不平衡对功率耗散分布的影响需要一种整体方法来量化和解释单个参数作用。

本文展示了工程师如何通过评估承载更多电流的 MOSFET 中产生的额外功率损耗来评估并联 MOSFET 设计所需的输出电流能力余量。如果平衡损耗导致损耗整体增加，则实际结果可能不会改善。无论不平衡的原因是什么，并联 MOSFET 中最热的那颗决定了系统性能的极限，是系统的“最薄弱环节”。较高的电流不平衡会导致在单个 MOSFET 中累积较高的损耗。因此，很明显，只需降低最热 MOSFET 的功率耗散，就可改善均流并提高系统性能，。

这种优化策略因应用而异，而精确的系统和控制特性也会有助于实现这一结果。因此，强烈建议始终考虑大局，以确定哪种器件在给定系统中效果最佳。

英飞凌的最新一代[功率 MOSFET](#) 面向使用并联 MOSFET 的应用，在保持低 $R_{DS(on)}$ 值的同时实现均流改进。英飞凌服务于电源转换器技术的最新和未来趋势，提供独特的产品组合并支持设计人员构建高效且具有成本效益的解决方案。

要获得更多见解，请阅读内容丰富的[应用指南](#)“在大电流应用中并联功率 MOSFET”，其中介绍了更多示例和测试结果。或者，也可考虑参加提供的[在线培训](#)“并联 MOSFET 的平衡：参数分布的重要性”。此外，请访问英飞凌 [N 沟道低压/高压功率 MOSFET](#) 相关网页，查看可用的设计支持文档、参考设计和仿真模型。

参考文献

- [1] [应用指南: AN_2009_PL18_2010_105641](#)，“在大电流应用中并联功率 MOSFET”，英飞凌科技，2021 年 5 月
- [2] [应用指南: AN_1803_PL11_1804_092613](#)，“在大电流低压驱动应用中并联 MOSFET”，英飞凌科技，2018 年 4 月。
- [3] Forsythe B. James，“并联功率 MOSFET 以获得更高功率输出”，[文章](#)，International Rectifier，2006 年 3 月

Published by
Infineon Technologies AG
85579 Neubiberg, Germany

© 2021 Infineon Technologies AG.
All Rights Reserved.

Please note!

This Document is for information purposes only and any information given herein shall in no event be regarded as a warranty, guarantee or description of any functionality, conditions and/or quality of our products or any suitability for a particular purpose. With regard to the technical specifications of our products, we kindly ask you to refer to the relevant product data sheets provided by us. Our customers and their technical departments are required to evaluate the suitability of our products for the intended application.

We reserve the right to change this document and/or the information given herein at any time.

Additional information

For further information on technologies, our products, the application of our products, delivery terms and conditions and/or prices please contact your nearest Infineon Technologies office (www.infineon.com).

Warnings

Due to technical requirements, our products may contain dangerous substances. For information on the types in question please contact your nearest Infineon Technologies office.

Except as otherwise explicitly approved by us in a written document signed by authorized representatives of Infineon Technologies, our products may not be used in any life endangering applications, including but not limited to medical, nuclear, military, life critical or any other applications where a failure of the product or any consequences of the use thereof can result in personal injury.