

负电压热插拔控制器中 MOSFET 的选型建议

Brian Zhao, Jing Ji

Power Management/Field Application

摘要

热插拔控制器通过控制一个外置的 MOSFET 来限制热插拔时的浪涌电流，从而实现在系统不断电的情况下，安全地在背板上插上或者移除子卡，广泛应用于服务器等领域。本应用报告结合负电压热插拔控制器 LM5067，阐述了由于 MOSFET 选择不当造成的误开通问题及其不良影响，并结合 MOSFET 自身的特性分析了启动时 MOSFET 误导通的原因，通过实验结果的验证给出了负电压热插拔控制器中 MOSFET 的选型建议。

目录

1. 引言.....	2
2. 热插拔系统重启案例.....	2
3. Gate 误开通造成系统重启分析.....	3
4. MOSFET 误开通原因分析.....	4
5. MOSFET 的选型建议.....	5
4. 结论.....	6
参考文献:.....	6

图

Figure 1. 常见热插拔控制器 (LM5067 为例).....	2
Figure 2. -48V 系统示意图.....	2
Figure 3. 背板上子卡 LM5067 掉电重启相关波形.....	3
Figure 4. LM5067 参考设计电路图.....	3
Figure 5. 插入子卡 LM5067 相关波形.....	3
Figure 6. MOSFET 的等效电路.....	4
Figure 7. MOSFET: SUM40N15 测试波形.....	5
Figure 8. MOSFET: CSD19536KTT 测试波形.....	6

1. 引言

热插拔控制器常用于背板和子卡系统中，保证每个子卡在不影响其他子卡正常工作的条件下被移除和替换。如图 1 所示，热插拔控制器通过检测电阻来检测电源线的输入电流，控制 MOSFET 的开关来限制系统的浪涌电流。如果 MOSFET 不能实现有效的开关控制，可能会瞬间产生很大的浪涌电流，导致背板母线电压大幅下降，可能引起系统的重启。所以，MOSFET 的选型对于整个系统的可靠运行至关重要。下面将基于负电压热插拔控制器 LM5067，对 MOSFET 的参数选型进行分析和建议。

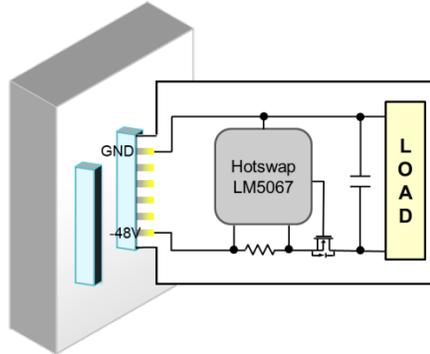


Figure 1. 常见热插拔控制器（LM5067 为例）

2. 热插拔系统重启案例

在如图 2 所示 -48V 通信系统中，背板和子卡的输入侧都没有较大的电容。当插入新的子卡时，可能会造成系统中已插子卡重启。子卡均使用了 LM5067 作为热插拔控制器，配合选用的 MOSFET 型号为 IRL2910，其他电路参数与 LM5067 的 EVM 板一致^[1]。经过测试发现背板上已插子卡掉电然后重启的波形如图 3 所示。可以看出，随着新的子卡插入背板，已插子卡上出现较大的反向电流，造成了输入电源母线电压跌落，并最终导致已插子卡重启。因而，分析反向电流出现的原因和避免反向电流的出现是解决这一问题的关键。

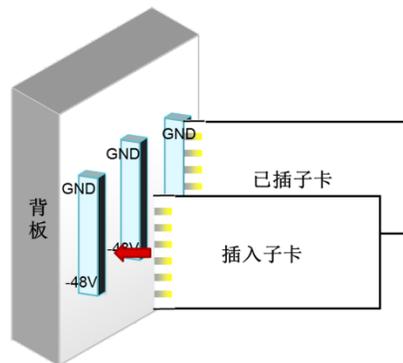


Figure 2. -48V 系统示意图

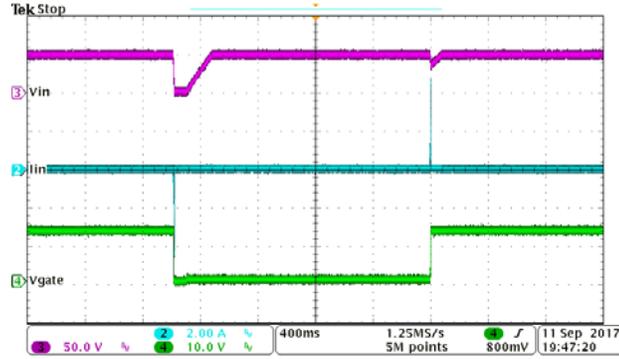


Figure 3. 背板上子卡 LM5067 掉电重启相关波形

3. Gate 误开通造成系统重启分析

以 TI 的 LM5067 参考设计（参考 LM5067EVAL）^[1]为例，电路图如图 4 所示，对上述系统重启问题的原因进行测试和分析。图 5 是插入子卡时 LM5067 电路的相关信号波形。从波形上可以看出，在子卡插入后，MOSFET Q1 的 V_{GS} 电压最高值约为 3.7V，而 IRL2910 的 gate 阈值电压最大值 2V，导致 MOSFET 管误导通。由于插入的子卡输出端有很大的负载电容，MOSFET 开通瞬间近似为短路，瞬间产生约 500A 的浪涌电流流过电源母线。因为背板和子卡的输入端均没有较大的输入电容，该浪涌电流最终造成输入电源母线电压跌落，甚至从已插入子卡反向抽取电流，引起了图 2 所示的背板固定子卡重启问题。

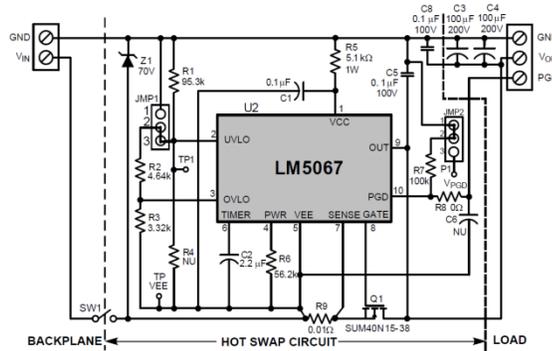


Figure 2. Evaluation Board Schematic

Figure 4. LM5067 参考设计电路图

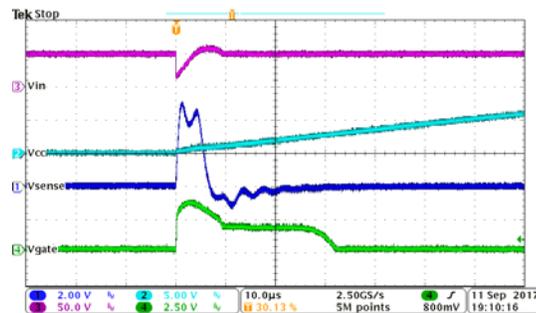


Figure 5. 插入子卡 LM5067 相关波形

从波形图 5 中还可以看出，当 V_{cc} 上升到约 2.5V 以上时，LM5067 的 Gate 引脚电压降低至 0V。参考 LM5067 的数据手册可知^[2]，LM5067 的 Gate 引脚内部有一个 110mA 的下拉电流源，在启动时将 VGS 电压拉低，保持 MOSFET 关断。但是当子卡刚插入时，由于 V_{cc} 电压正在建立，LM5067 内部 110mA 电流源还没有开始工作，MOSFET 出现了误开通的问题。

4. MOSFET 误开通原因分析

要分析 MOSFET 误开通的原因，首先要考虑 MOSFET 的寄生参数模型，如图 6 所示。极间电容用集中参数栅源电容 C_{gs} 、栅漏电容 C_{gd} 和漏源电容 C_{ds} 表示。通常 MOSFET 制造厂商在规格书中不会直接给出这三个寄生电容的参数，而是提供共源输入电容 C_{iss} 、输出电容 C_{oss} 和反馈电容 C_{rss} 的数据，这两组电容有等式的关系^[3,4]，可以互相推导。

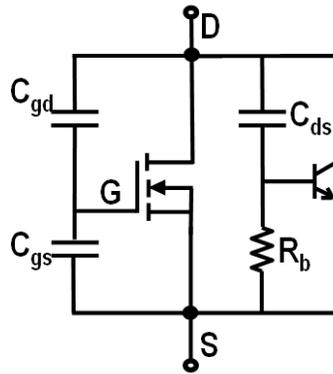


Figure 6. MOSFET 的等效电路

在子卡插入背板之前，MOSFET 的源极和漏极电容 C_{ds} 两端电压为 0V。当插入背板上，MOSFET 的漏极和源极的电压差要增加为 48V，在 MOSFET 的栅漏电容 C_{gd} 上会产生充电电流。该电流同样会流过栅源极电容 C_{gs} ，在栅极产生感应电压 V_{gs} ，如果感应出的电压值较大，高于 MOSFET 的栅极导通阈值电压，就会导致 MOSFET 误导通。

根据

$$C_{gd} \frac{du_{gd}}{dt} = C_{gs} \frac{du_{gs}}{dt} \quad (1)$$

可得

$$C_{gd} u_{gd} = C_{gs} u_{gs} \quad (2)$$

$$u_{gs} = \frac{C_{gd}}{C_{gd} + C_{gs}} v_{in} \quad (3)$$

根据 IRL2910 的规格书中参数计算可以得出 C_{gs} 为 3250pF， C_{ds} 为 250pF。带入公式 (3) 可得， V_{gs} 为 3.42V。与图 2 中测量的 V_{gs} 电压基本符合。而该电压高于 IRL2910 的栅极导通电压阈值 (1~2V)，因为会出现 MOSFET 误开通的现象，如图 5 所示。

综上所述，因为子卡插入背板的瞬间，由于 MOSFET 漏源极电压差的突然变化，会在栅源电容 C_{gs} 产生感应电压，如果该电压高于 MOSFET 的栅极导通阈值电压 V_{th} 则会造成 MOSFET 的误开通。

5. MOSFET 的选型建议

针对负电压热插拔控制器在使用过程中可能存在 MOSFET 误导通的现象，在 MOSFET 选型时不仅要注意电压电流以及 SOA 上的限制，还要考虑栅源电容 C_{gs} 和栅漏电容 C_{gd} 的比值，满足公式 (4) 所示条件，从而保证在启动时不会出现误导通的问题。

$$v_{gs} = \frac{C_{gd}}{C_{gd} + C_{gs}} v_{in} < v_{th} v_{in} \quad (4)$$

对不同参数的 MOSFET SUM40N15 和 CSD19536 进行了实验测试，实验波形分别如图 7 和图 8 所示。SUM40N15 的相关参数如公式 (5) 和 (6) 所示。从图 7 波形图中可以看出感应电压 V_{gs} 约为 1.35V，但是因为低于其栅极导通电压，所以并没有造成 MOSFET 的误导通。

$$\frac{C_{gs_SUM}}{C_{gd_SUM}} = 14 v_{in} \quad (5)$$

$$v_{th_SUM} = 2 \sim 4 v_{in} \quad (6)$$

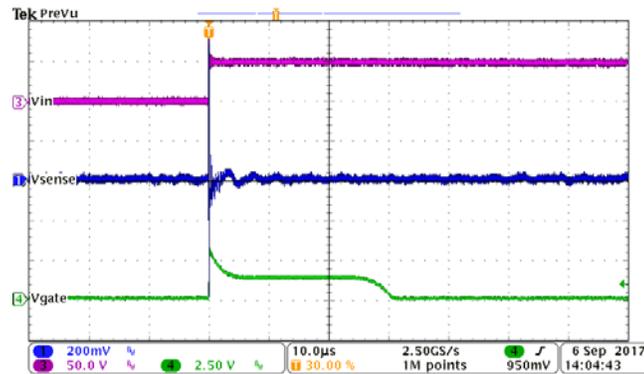


Figure 7. MOSFET: SUM40N15 测试波形

CSD19536 的相关参数^[5]如公式 (7) 和 (8) 所示。从图 8 中可以看出感应电压 V_{gs} 约为 0.5V，远低于 IRL2910 和 SUM40N15 的感应电压值。这是由于 CSD19536 的栅源电容 C_{gs} 和栅漏电容 C_{gd} 的比值远大于其它两款 MOSFET，使得感应电压 V_{gs} 很低，没有 MOSFET 误导通的危险，使得系统工作更加安全可靠。因而 CSD19536 更适合用于类似的 -48V 热插拔控制电路中。

$$\frac{C_{gs_CSD}}{C_{gd_CSD}} = 200 v_{in} \quad (7)$$

$$v_{th_CSD} = 2 \sim 3 v_{in} \quad (8)$$

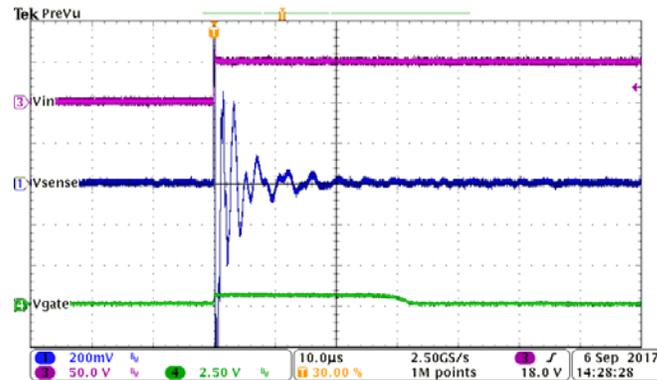


Figure 8. MOSFET: CSD19536KTT 测试波形

4. 结论

热插拔控制器可以保证系统在不断电的情况下，实现子卡的移除和替换。在子卡插入系统瞬间，如果 MOSFET 的参数选型不合适会存在 MOSFET 栅极感应电压造成误开通的风险，可能导致系统重启而影响正常工作。通过分析和实验得出在热插拔 MOSFET 选型时不仅要注意电压电流和 SOA 上的限制，还要考虑栅源电容 C_{gs} 和栅漏电容 C_{gd} 的比值，以及栅极导通电压阈值等这些参数，以保证 MOSFET 不会出现误开通问题，提高设计的可靠性。

参考文献:

- [1] TI. AN-1723 LM5067 Evaluation Board [J].
- [2] TI. LM5067 Negative Hot Swap / Inrush Current Controller with Power Limiting [J].
- [3] 马鹤亭. 电力电子器件[M]. 浙江大学出版社, 1987.
- [4] 林渭勋. 现代电力电子技术[M]. 机械工业出版社, 2005.
- [5] TI. CSD19536KTT 100 V N-Channel NexFET™ Power MOSFET [J].

有关 TI 设计信息和资源的重要通知

德州仪器 (TI) 公司提供的技术、应用或其他设计建议、服务或信息，包括但不限于与评估模块有关的参考设计和材料（总称“TI 资源”），旨在帮助设计人员开发整合了 TI 产品的应用；如果您（个人，或如果是代表贵公司，则为贵公司）以任何方式下载、访问或使用了任何特定的 TI 资源，即表示贵方同意仅为该等目标，按照本通知的条款进行使用。

TI 所提供的 TI 资源，并未扩大或以其他方式修改 TI 对 TI 产品的公开适用的质保及质保免责声明；也未导致 TI 承担任何额外的义务或责任。TI 有权对其 TI 资源进行纠正、增强、改进和其他修改。

您理解并同意，在设计应用时应自行实施独立的分析、评价和判断，且应全权负责并确保应用的安全性，以及您的应用（包括应用中使用的 TI 产品）应符合所有适用的法律法规及其他相关要求。您就您的应用声明，您具备制订和实施下列保障措施所需的一切必要专业知识，能够 (1) 预见故障的危险后果，(2) 监视故障及其后果，以及 (3) 降低可能导致危险的故障几率并采取适当措施。您同意，在使用或分发包含 TI 产品的任何应用前，您将彻底测试该等应用和该等应用所用 TI 产品的功能。除特定 TI 资源的公开文档中明确列出的测试外，TI 未进行任何其他测试。

您只有在为开发包含该等 TI 资源所列 TI 产品的应用时，才被授权使用、复制和修改任何相关单项 TI 资源。但并未依据禁止反言原则或其他法律授予您任何 TI 知识产权的任何其他明示或默示的许可，也未授予您 TI 或第三方的任何技术或知识产权的许可，该等产权包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何整合、机器制作、流程相关的其他知识产权。涉及或参考了第三方产品或服务的信息不构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用 TI 资源可能需要您向第三方获得对该等第三方专利或其他知识产权的许可。

TI 资源系“按原样”提供。TI 兹免除对 TI 资源及其使用作出所有其他明确或默认的保证或陈述，包括但不限于对准确性或完整性、产权保证、无复发故障保证，以及适销性、适合特定用途和不侵犯任何第三方知识产权的任何默认保证。

TI 不负责任何申索，包括但不限于因组合产品所致或与之有关的申索，也不为您辩护或赔偿，即使该等产品组合已列于 TI 资源或其他地方。对因 TI 资源或其使用引起或与之有关的任何实际的、直接的、特殊的、附带的、间接的、惩罚性的、偶发的、从属或惩戒性损害赔偿，不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿，TI 概不负责。

您同意向 TI 及其代表全额赔偿因您不遵守本通知条款和条件而引起的任何损害、费用、损失和/或责任。

本通知适用于 TI 资源。另有其他条款适用于某些类型的材料、TI 产品和服务的使用和采购。这些条款包括但不限于适用于 TI 的半导体产品 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、[评估模块](http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm)和样品 (<http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm>) 的标准条款。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2017 德州仪器半导体技术（上海）有限公司