



Owen Yan

North West China OEM Team

摘要

BDC 电机 (有刷直流电机) 在家电领域应用广泛, 凭借其结构简单、成本低、易于控制的特点, 成为传统家电的核心驱动部件。常见应用包括: 洗衣机波轮驱动, 通过正反转实现衣物洗涤; 冰箱压缩机辅助风扇, 维持内部温度稳定; 吸尘器电机提供高速气流; 榨汁机、搅拌机的高扭矩动力输出; 微波炉转盘电机实现均匀加热; 洗碗机泵电机驱动水流循环等。BDC 电机在低速高扭矩场景中表现突出, 适合对转速要求不高但需要稳定动力的设备。尽管其噪音和寿命略逊于无刷电机 (BLDC), 但在成本敏感型家电中仍具竞争力, 尤其在中低端市场占据重要地位。随着技术升级, 部分高端家电正逐步转向更高效的无刷电机, 但 BDC 凭借成熟的技术和性价比, 短期内仍将保持应用活力 [1]。

本文主要研究 BDC 电机驱动使用中遇到的误入 TEST Mode 而引起的重启问题, 以 DRV8231 为例, 首先介绍了 BDC 电机驱动的基本原理, 然后详细阐述了进入 TEST mode 的原因, 现象与退出 TEST mode 的方法, 并且进一步对芯片的抗干扰能力提出了一些改进措施从而避免芯片错误进入 TEST mode, 以求为其他 DRV8231 等 BDC 驱动设计者提供借鉴。

内容

1 BDC 驱动 DRV8231 的基本原理.....	2
2 DRV8231 重启现象描述及 Test mode 分析.....	5
3 Test mode 解决办法及实测波形.....	8
4 小结.....	10
5 参考文献.....	10

插图清单

图 1-1. BDC 电机典型原理框图.....	2
图 1-2. DRV8231 内部功能框图.....	3
图 1-3. IN1 与 IN2 驱动逻辑.....	4
图 2-1. DRV8231 重启现象波形.....	5
图 2-2. Itrip 调制运行机制.....	6
图 2-3. OCP 保护运行机制.....	7
图 3-1. 1.8us 10V IN2 未进入 test mode.....	8
图 3-2. 2us 10V IN2 进入 test mode.....	8
图 3-3. 10V IN2 使 DRV8231 进入 test mode.....	9
图 3-4. IN2 从 10V 恢复到 5V 使 DRV8231 退出 test mode.....	9

1 BDC 驱动 DRV8231 的基本原理

图 1-1 为 BDC 电机典型原理框图，BDC 电机的工作原理基于电磁感应定律与机械式换向机制，其核心在于定子 (stator) 与转子 (rotator) 磁场的动态相互作用。电机由定子、转子及换向器 (brush) 三部分构成，定子通过永磁体或励磁绕组产生固定磁场，转子由电枢绕组缠绕在铁芯上形成并通过轴承支撑旋转，换向器为分段铜环结构，电刷作为滑动触点连接外部电源与电枢绕组。当电流通过电刷流入电枢绕组时，绕组导体切割定子磁场，根据左手定则产生电磁力驱动转子旋转，此时电枢绕组产生的磁场与定子磁场保持垂直以获得最大转矩。为维持持续旋转，随转子同步转动的换向器在绕组转过中性面时切换电刷接触位置，强制电枢电流方向反转，确保电枢磁场与定子磁场始终保持 90° 相位差。转速与电枢电压成正比，通过 PWM 脉宽调制可实现无级调速，转矩由电枢电流决定并遵循公式 $T=Kt \times I$ ，负载增加时电枢电流自动上升以维持转矩平衡。电刷与换向器的机械接触导致摩擦损耗和火花现象，限制了电机寿命与最高转速，但也赋予其启动转矩大、过载能力强的优势。

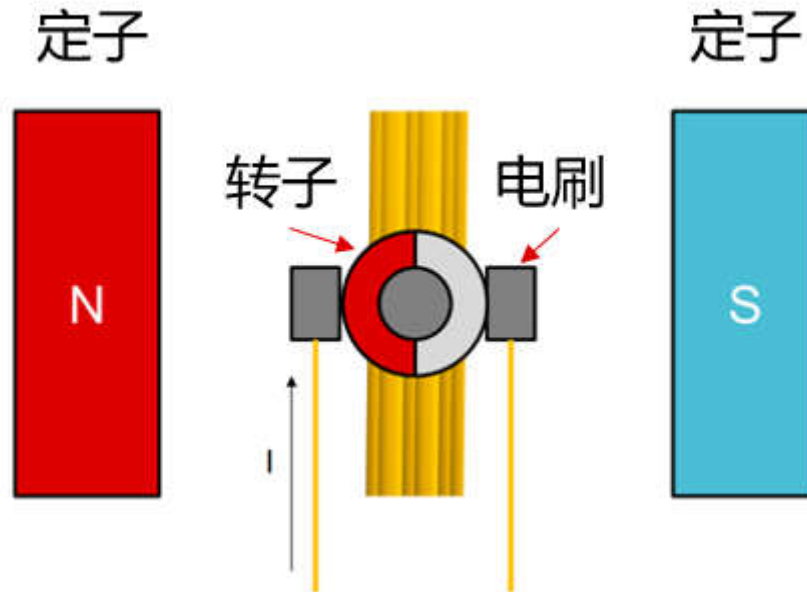


图 1-1. BDC 电机典型原理框图

图 1-2 为 DRV8231 内部功能框图，其内部集成了 H 桥电机驱动，电荷泵，过流保护，欠压保护，过温保护和 H 桥驱动等功能。其中电荷泵提高了效率并提供了了 100% 占空比驱动 N 沟道 MOSFET 半桥的能力，将流过 RSENSE 的电流与 VREF 比较来控制半桥电路，实现恒流驱动 BDC 电机。

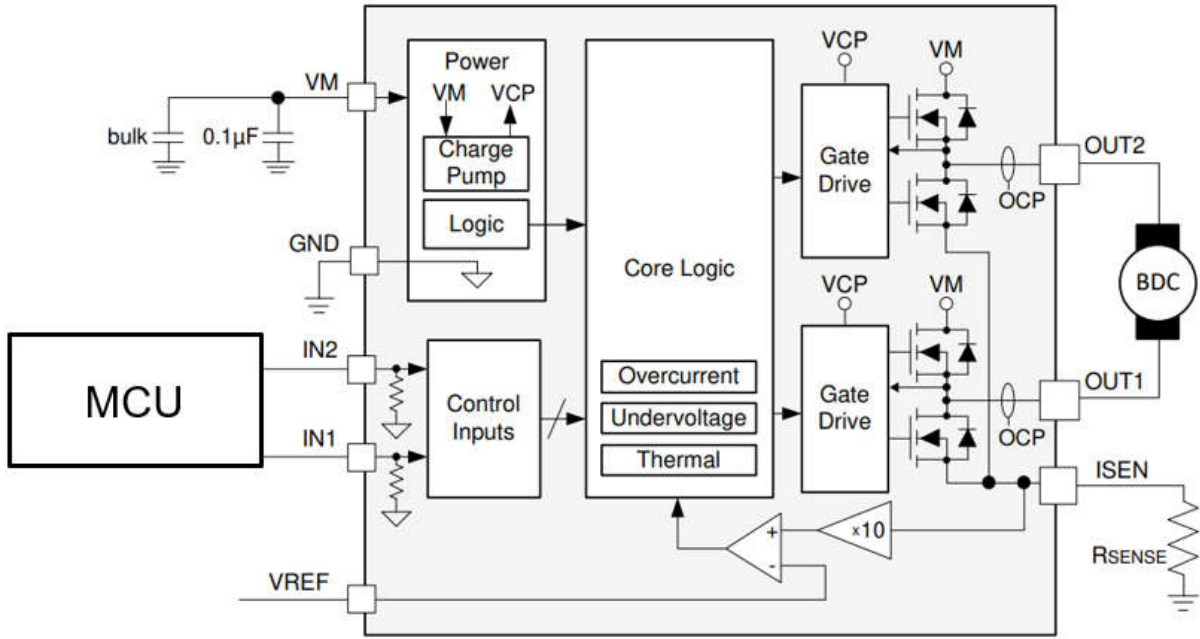


图 1-2. DRV8231 内部功能框图

通过 MCU 给出 IN1 和 IN2 来控制 Coil1 和 Coil2 的驱动，真值表如表 1-1，结合图 1-3 来看，当驱动 Coil1 时，OUT1 为低电平，VOUT1 电平为 GND，此时 VM 电压加载 Coil1 上驱动其转动；OUT2 为高电平，VOUT2 电平为 VM，此时没有电流流过 Coil2，反之同理。

表 1-1. IN1 与 IN2 驱动真值表

IN1	IN2	OUT1	OUT2	描述
0	0	高阻抗	高阻抗	不使能 H 桥
0	1	低	高	驱动 Coil1
1	0	高	低	驱动 Coil2
1	1	低	低	同时驱动

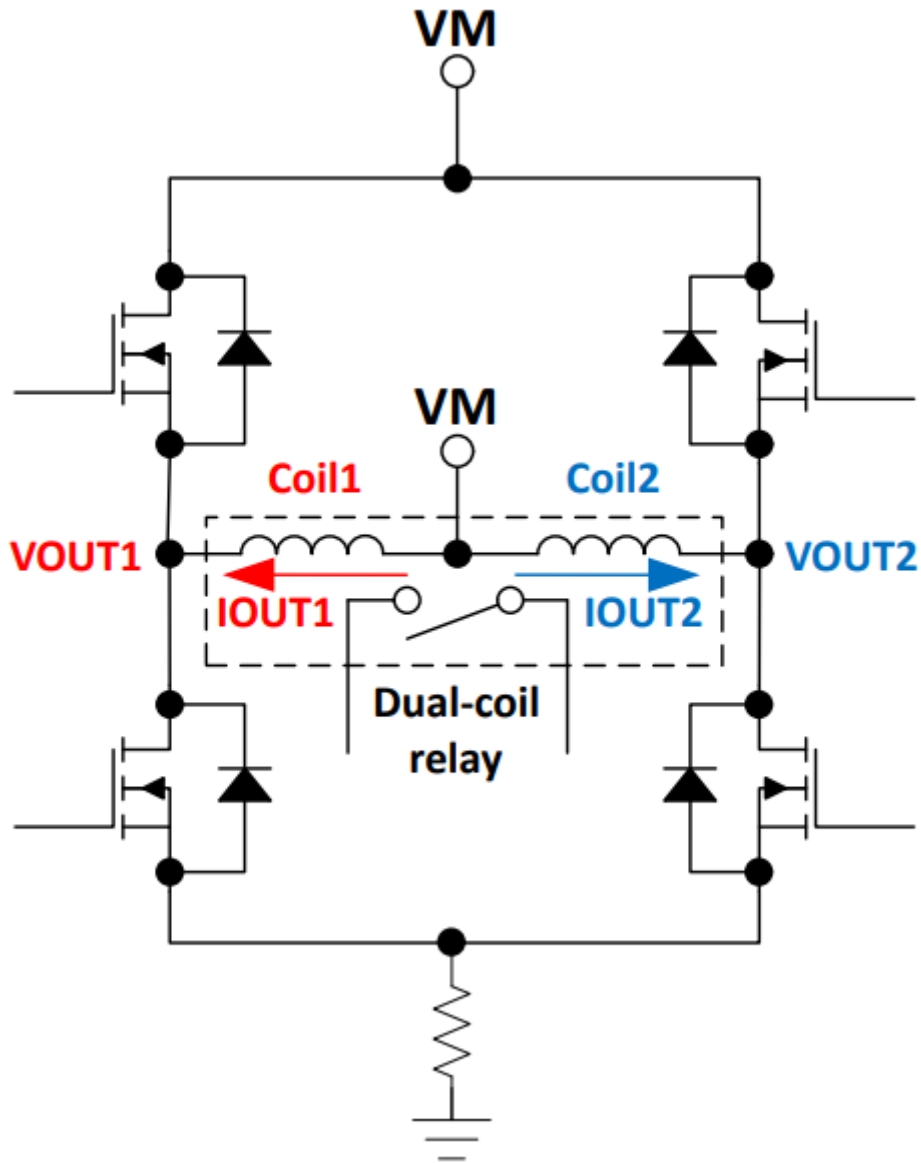


图 1-3. IN1 与 IN2 驱动逻辑

2 DRV8231 重启现象描述及 Test mode 分析

我们得到使用 DRV8231 的客户反馈，在整机设备运行过程中，会出现电机卡死不动的现象，此时若设备重新掉电重启，故障可以恢复。但是在不同客户的应用中，整机掉电重启是很难实现的，如厨房油烟机，终端客户安装后，插头位置很高，不方便重复插拔，因此无论是终端客户还是芯片客户，这种解决方案都是无法接受的，所以我们需要帮助客户找到产生问题的原因并提供解决办法。

以如下案例为例，客户在使用 DRV8231 的过程发现，同一颗芯片的某次上电后，BDC 电机无法被驱动，并伴随低频噪声，整机掉电重启后问题可以被修复。由于电机出现低频噪声，所以首先怀疑 DRV8231 输出电流异常，抓取 OUT 输出电流波形如图 2-2 所示，绿色波形为 VM 电压 15V，黄色波形为 BDC 电机电流波形，蓝色为 REF 波形，可以看到当负载电流达到 200mA 时，DRV8231 输出电流下降到零，3ms 后，DRV8231 重新启动。



图 2-1. DRV8231 重启现象波形

根据电流波形反复重启的现象，怀疑与 DRV8231 的两个与电流相关的特性相关，一是 Itrip 控制特性，二是 OCP 过流保护特性。首先介绍和分析 Itrip 控制特性：

对于 Itrip 控制特性，DRV8231 内部通过固定增益 10 倍的 op-amp 采样 Rsense 电阻，与 Vref 引脚电压进行比较，来维持 ISEN 电压在 Vref 附近。简单来讲，DRV8231 通过控制 Rsense 电阻两侧的电压，来控制流过 BDC 电机的电流 Itrip [2]。

$$I_{trip} = \frac{V_{ref}}{10 * R_{sense}} \quad (1)$$

BDC 电流在 t_{blank} 时间内持续上升， t_{blank} 后，直到电流达到 I_{trip} 才会关断两个上管，导通两个下管，进入慢衰减模式。 I_{trip} 是通过 V_{ref} 与 R_{sense} 外围硬件设置的，通过检查 PCB 板卡与原理图以及 REF 最终波形，发现 REF 电压与 R_{sense} 电阻设置正确。 V_{ref} 通过 5V 以及 62kohm 和 220kohm 电阻分压，被设置为 1.1V， R_{sense} 为 2010 封装的 0.12ohm 电阻， I_{trip} 通过公式计算，应为 0.92A。并且，如果是误触发了 I_{trip} ，则重启时间应为 $t_{off}+t_{blank}=25\mu s+2\mu s=27\mu s$ 。因此该重启现象与规格书描述并不统一。

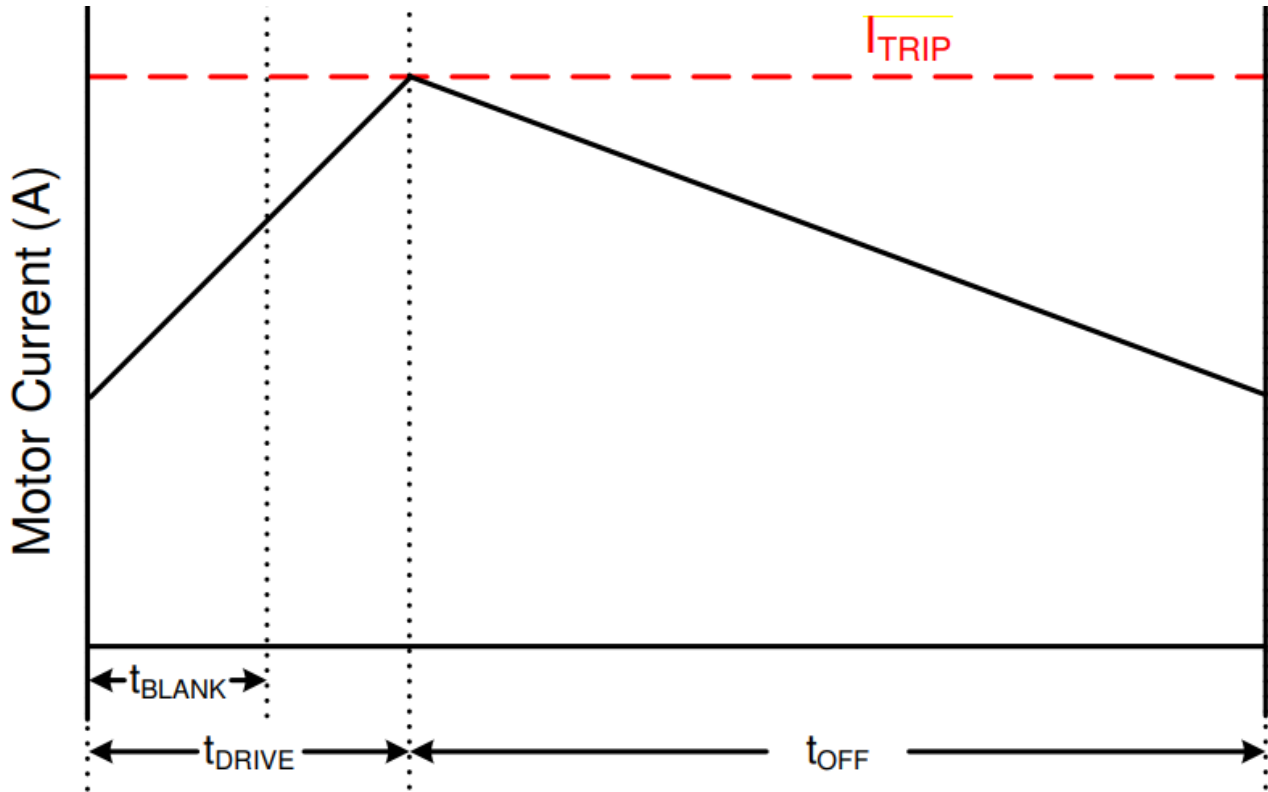


图 2-2. I_{trip} 调制运行机制

对于 OCP 过流保护特性，与 I_{trip} 不同，OCP 直接采样半桥中点电流给到内部控制核，当 BDC 电流的电流大于 $I_{ocp}=3.7A$ 且持续时间超过 $t_{ocp}=1.5\mu s$ ，内部所有 FET 都会关断， $t_{retry}=3ms$ 后，重新驱动 BDC 电机，若过流故障还在则会循环往复如下 图 2-3 所示，与故障波形相似。

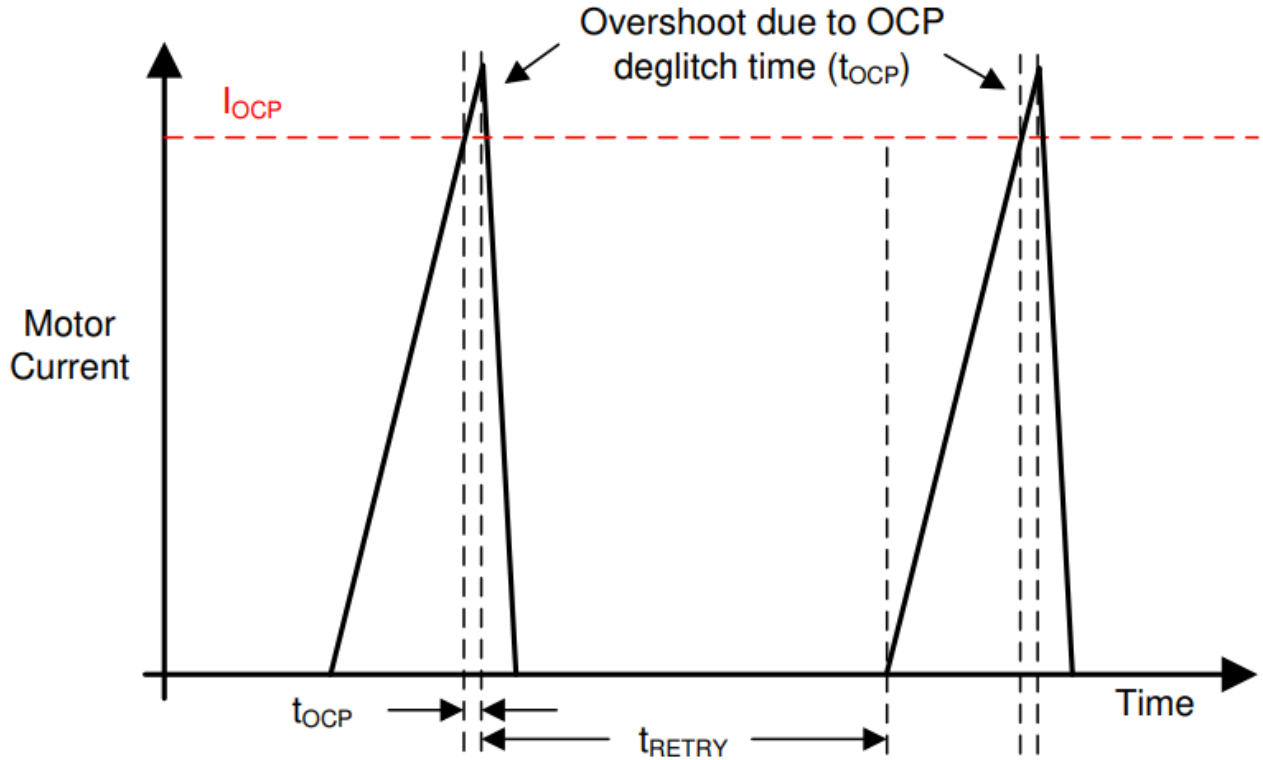


图 2-3. OCP 保护运行机制

根据以上对 I_{trip} 以及 OCP 的分析，排除了 I_{trip} 导致的重启，但是故障波形与 OCP 波形相似，在时间尺度上，示波器抓到的重启时间与 OCP 重启时间 t_{retry} 均为 3ms，但是在过流保护电流点上， I_{ocp} 为 3.7A，示波器抓到的故障波形仅为 200mA。经过内部与 BU 确认，DRV8231 是进入了 test mode，test mode 的目的是让芯片在出厂前或故障排查时，跳过正常工作流程，直接保护内部电路逻辑，方便检测是否存在制造缺陷或功能故障。而 DRV8231 的 test mode 会 OCP 保护点从 3.7A 降低到 200mA，与示波器抓到的现象相符。

与产品线讨论确认，DRV8231 有两种会影响输出的 test mode，如下表 2-1 所示。在进入方法上，ns 级别的对 IN1 与 IN2 的扰动即可进入 test mode，当 IN1 大于 7.5V 而 IN2 小于 7.5V 时，进入 TM_OCPLS 模式，此时 I_{ocp} 会从 3.7A 降低到 200mA 左右；当 IN1 小于 7.5V 而 IN2 大于 7.5V 时，进入 TM_OTS 模式，此时输出电压均为高电平。在退出方法上，TM_OCPLS 可以通过修改软件，让 DRV8231 强制进入 sleep mode 从而退出 test mode，也可以通过重新上电来退出 test mode；但是 TM_OTS 模式只能通过重新上电来退出。

综上，该案例由于 OCP 电流从 3.7A 降低到了 200mA 左右，并且在实验室通过 ESD 实验复现了该现象，可以确认 DRV8231 是在应用现场受到了外部干扰，进入了第一种 test mode，客户通过重新上电也成功退出了 test mode。但是对于第二种 test mode，仍有收到干扰进入，而无法通过软件退出的风险。

表 2-1. Test mode 进入及退出方式

IN1>7.5	IN2>7.5V	Test Mode	现象	退出方法
Yes	No	TM_OCPLS	I_{ocp} 从 3.7A 降低到 200mA，其他逻辑正常。	IN1:IN2=0:0 进入 sleep mode 后，再正常驱动，即可退出 test mode；或 DRV8231 重新上电退出 test mode。
No	Yes	TM_OTS	OUT 输出始终为高。	仅可通过 DRV8231 重新上电退出 test mode。

3 Test mode 解决办法及实测波形

从上文对 test mode 的分析中，如果是进入了第一种 test mode，可以通过修改控制逻辑来规避，即在 IN1 和 IN2 插入 6ms 的 0:0 来实现退出 test mode 从而避免重启；如果是进入了第二种 test mode，则只能通过掉电重启来退出，这是在很多实际应用场景中无法接受的。最终 TI 决定在 DRV8231 以及衍生产品如 DRV8251/DRV8870 的路线图规划上，针对 test mode 进行了如下优化。

1. 在进入方式上，由于之前 ns 级别的大于 7.5V 的干扰就会让 DRV8231 进入 test mode，为了提高抗干扰能力，TI 在 IN1 和 IN2 内部增加了 deglitch 电路，当干扰时间 < 1.9us 时，DRV8231 不会进入 test mode。对比测试如下，如 图 3-1 所示，在内部增加了 deglitch 电路以后，持续 1.8us 在 IN2 上施加 10V，没有让芯片进入 test mode；如 图 3-2 所示，持续 2us 在 IN2 上施加 10V，DRV8231 进入了第二种 test mode，OUT1 以及 OUT2 同时输出高电平。

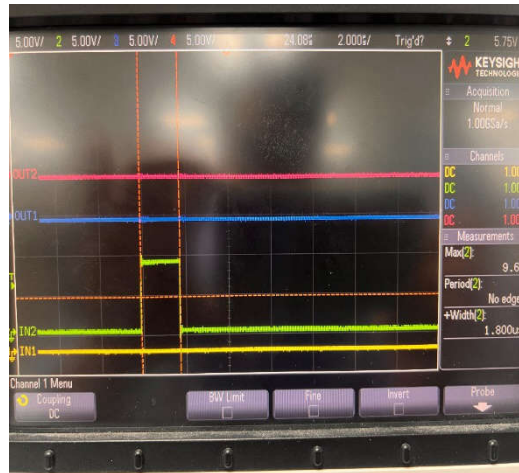


图 3-1. 1.8us 10V IN2 未进入 test mode

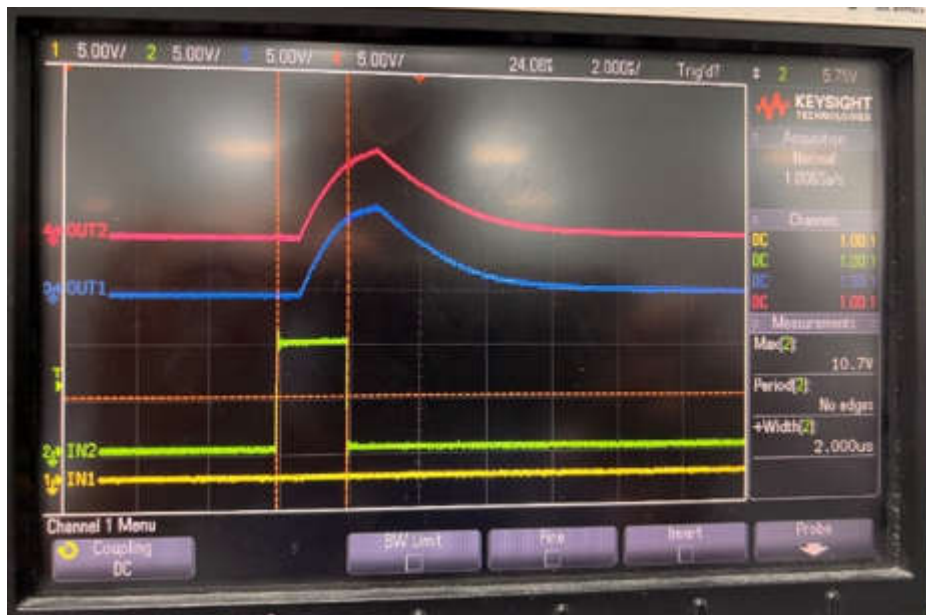


图 3-2. 2us 10V IN2 进入 test mode

2. 在退出方式上，即使 DRV8231 受到 > 1.9us 的干扰，进入第二种 test mode，只要把 IN1 与 IN2 恢复至正常 5V 电平，DRV8231 就可以从 test mode 退出。如 图 3-3，IN2 从 5V 增加到 10V，DRV8231 成功进入第二种 test mode，OUT1 与 OUT2 同时输出高电平；如 图 3-4，当 IN2 从 10V 恢复到 5V，DRV8231 成功退出 test mode，OUT1 输出高，OUT2 输出低，BDC 电机正常工作。

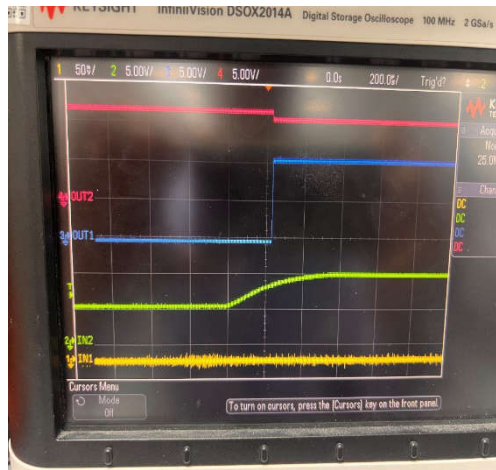


图 3-3. 10V IN2 使 DRV8231 进入 test mode

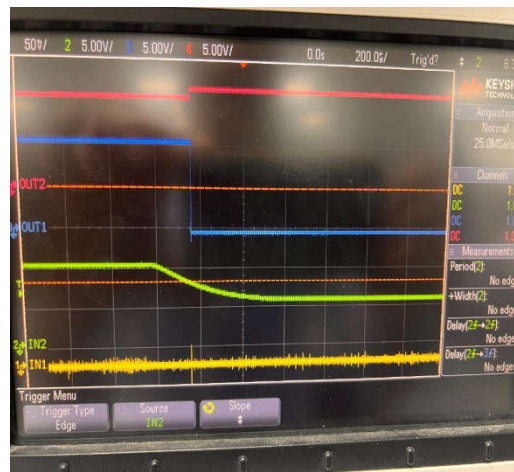


图 3-4. IN2 从 10V 恢复到 5V 使 DRV8231 退出 test mode

4 小结

本文通过分析 DRV8231 的异常重启问题，发现 DRV8231 的 test mode 的运行逻辑以及不合理的进入和退出机制，针对 DRV8231 的内部 deglitch 电路做了修改，增加了 1.9us 的 deglitch 逻辑，大大提高了可靠性，同时为第二种 test mode 增加了退出机制，无需掉电重启即可退出，降低了后续设计者的使用门槛，也为后续设计人员提供了明确的 debug 思路。

5 参考文献

1. Brushless DC Motor Market Size and Future Outlook. [Brushless DC Motor Market Size Boosts 10.88% CAGR by 2034](#)
2. DRV8231 Datasheet. [SLVSFZ7](#)

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月