Technical Article

理解汽车电机驱动器中的 Open-Load Diagnostic：为什么电感负载不同于电阻负载

Frank Qin

在汽车电子应用中，open-load detection，简称 OLD，是马达驱动中常见的诊断功能。它的目标是帮助系统判断负载连接是否异常，例如电机、电磁阀、继电器线圈、LED 或电阻负载是否与驱动输出端保持有效连接。

在实际调试中，工程师通常会先使用电阻负载验证 open-load diagnostic。电阻负载下，诊断结果往往比较直观：接入负载时不报 open-load，断开负载时触发错误，重新接入后通过 CLR_FLT 或其他 fault clear 机制恢复正常。但当负载换成电机、电磁阀或其他电感负载后，诊断结果可能变得不再直观。某些情况下，即使负载物理上已经连接，系统仍可能检测到 open-load，或者在 fault clear 之后，fault bit 又被重新置位。

这类现象通常不能简单理解为芯片误报或寄存器清除失败。要分析 open-load diagnostic，需要先回到诊断本身的电气机制。

Open-load diagnostic 判断的机制

从 TI 关于 motor driver open-load detection 的说明来看，OLD 的本质是判断负载和驱动输出之间是否存在有效电气连接。这个判断通常并不是通过直接检测连接器的机械状态完成，而是通过输出节点 OUTx 的电压、电流或体二极管导通特征来间接判断。

以 passive OLD 为例，在诊断期间，驱动的 MOSFET 通常保持 Hi-Z。器件内部通过电流源向输出节点注入诊断电流，然后使用内部比较器判断 OUTx 电压是否超出或低于设定阈值。如果输出节点的响应符合开路条件，器件会置位对应的 OLD status bit 或拉低 nFAULT。

因此，open-load diagnostic 的判断条件可以概括为：

在特定驱动状态、特定诊断电流路径、特定比较器阈值和特定滤波时间下，OUTx 节点是否表现出有负载连接时应有的电气响应。

这个机制也是很多问题的根源。系统层面上的诊断目标是判断负载是否连接正确，而芯片的判断依据是当前电气状态是否满足诊断标准。两者在电阻负载下通常一致，但在电感负载下未必一致。

电阻负载为什么容易验证 OLD 功能

电阻负载是比较理想的诊断对象。它不储能，电流和电压之间的关系接近静态关系。无论是 passive OLD 中的小诊断电流，还是 active OLD 中的负载电流阈值，电阻负载的响应都比较稳定。

在 passive OLD 中，断开电阻后，OUTx 节点可以被内部上拉或下拉电流源拉到预期状态。接入电阻后，诊断电流通过负载形成路径，比较器结果也比较确定。

在 active OLD 中，如果某个 MOSFET 已经打开，器件可以通过判断 MOSFET 电流是否低于 IOLD，并且持续超过 tOLD，来决定是否存在 open-load condition。对于电阻负载而言，负载电流主要由供电电压、负载阻值和导通路径决定，变化相对可预测。

所以，用电阻负载验证 OLD 功能是有意义的。它可以确认器件配置、fault status、nFAULT、CLR_FLT 和基本硬件连接是否正常。但是，电阻负载测试不能完全代表电机、电磁阀或继电器线圈等汽车实际负载下的诊断行为。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

电感负载会改变 OUTx 节点的初始条件

汽车电机驱动器面对的负载往往不是纯电阻，而是带有显著电感特性的负载。电感负载的关键特点是电流不能突变。当驱动改变开关状态时，电感会通过可用路径维持电流连续。

这个可用路径可能包括：高边 MOSFET 体二极管，低边 MOSFET 体二极管，处于导通状态的 MOSFET，同步整流路径，外部钳位路径，TVS，或者负载和线束的寄生路径。

因此，在驱动关闭、PWM off、brake、coast 或方向切换期间，OUTx 节点并不一定会立即回到 passive OLD 所假设的静态状态。在 DRV824x-Q1 的 datasheet 中 open-load detection 部分中也提到，对于 passive OLD，在执行诊断之前应该确认输出节点初始电压及电容充放电过程不会影像诊断结果。这说明诊断开始前的 OUTx 初始状态会直接影响比较器判断。

对于电感负载，还需要考虑储能释放过程。即使 MCU 已经停止驱动，负载电流可能仍在通过体二极管或 MOSFET 续流路径衰减。此时 OUTx 电压可能被拉到 VM 以上、GND 以下，或停留在某个中间电位。如果此时立即使能 OLD 或立即执行 fault clear 后重新诊断，器件看到的可能仍是一个不符合诊断假设的瞬态状态。

Active OLD 与续流路径密切相关

除了 passive OLD，汽车马达驱动还常见 active OLD 的诊断需求。Active OLD 通常在负载运行过程中执行，根据负载电流或续流期间的体二极管电压判断是否开路。

以 DRV8873-Q1 和 DRV824x-Q1 这类器件为例，datasheet 中说明 active OLD 与高边 MOSFET 体二极管在电流续流期间的电压有关。当电感负载中存储的能量足以使体二极管产生超过 VOLA over VM 的过冲时，器件不会判断为开路。如果没有观察到足够的 voltage spike，则可能判断为开路。这说明 active OLD 的结果不仅取决于负载是否连接，也取决于续流路径是否符合诊断设计假设。DRV8873-Q1 datasheet 明确说明，在 PH/EN 和 PWM mode 中，驱动电流通过高边续流衰减，但在 independent PWM mode 中，电机可能通过高边或低边续流进入 brake state。如果系统使用低边续流，high-side FET diode 的 VF 可能小于 VOLA，从而导致器件报错开路故障，即使负载实际连接在 OUT1 和 OUT2 之间。Datasheet 因此建议，在这种情况下不应使用 OLA mode。这个例子表明 open-load fault 并不总是由物理开路导致。在特定控制模式和续流路径下，诊断机制本身可能没有观察到它所需要的电气特征，因此将当前状态解释为开路。

Negative-current OLD 是为了处理特定续流场景

在 DRV89xx-Q1 系列中，芯片提供了 negative-current active OLD。Datasheet 说明，在 synchronous rectification 场景下，负载电流可能以 negative current 形式通过高边 MOSFET 或低边 MOSFET 回流。如果默认 OLD 只基于 positive current threshold 判断，器件可能因为 MOSFET 电流低于正向 IOLD threshold 而错误上报 open-load。

DRV8912-Q1 datasheet 中给出了 false open-load detection 的波形示例：当 OLD_NEG_EN = 0 时，negative current recirculation 可能导致 false OLD。而使能 OLD_NEG_EN 后，器件使用 IOLD_NEG 作为 negative-current 判断阈值，从而避免该误判。

这进一步说明，汽车电机驱动器中的 OLD 不能脱离控制模式、PWM 状态和电流方向单独分析。对于感性负载，电流方向和 recirculation path 与负载是否真实开路同样重要。

不同器件的 OLD 机制有哪些共性与差异

前面讨论的 passive OLD、active OLD 和 negative-current OLD，描述了不同的诊断方式，但并不意味着所有汽车电机驱动器都采用相同的实现。即使功能名称相同，器件实际观察的电气量、允许的驱动状态和故障恢复条件也可能不同。因此，比较 DRV824x-Q1、DRV89xx-Q1 和 DRV887x-Q1 时，需要进一步明确具体型号及接口版本，不能仅根据系列名称判断诊断功能。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

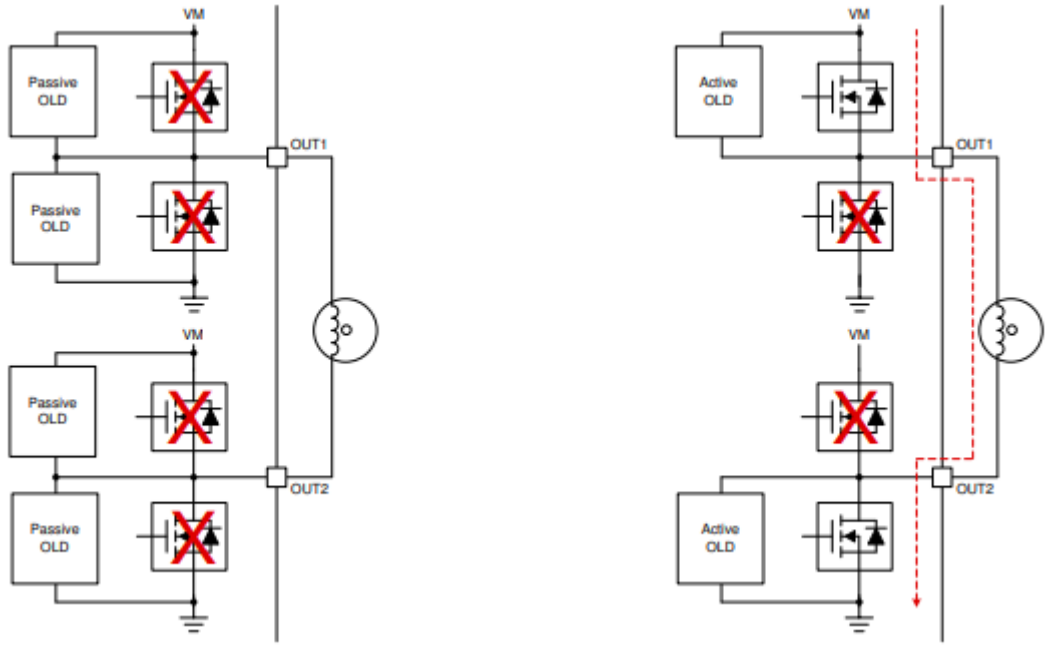


图 1. Passive and Active OLD for Load Connected in H-Bridge Configuration

这些器件的共性在于，OLD 都是通过负载连接所产生的电气响应进行间接判断。Passive OLD 通常在功率 MOSFET 关闭时，通过内部偏置网络观察输出电压；active OLD 则在运行过程中观察电流或续流特征。负载虽然物理连接正常，但如果当前状态不能产生诊断所要求的响应，仍可能出现 open-load indication。

它们的主要区别如下。其中 DRV887x-Q1 以 DRV8873-Q1 为例，不能将其功能直接推广至整个系列。[1 – 3]

器件举例	Online OLD 的主要依据	Offline OLD 的支持情况	应用中需要关注的差异
DRV8245-Q1	OLA 检测 PWM 切换死区内，高边 body diode 续流产生的 OUTx 高于 VM 的电压特征	在 STANDBY 状态下，通过输出偏置组合及 OLP_CMP 判断连接状态	OLA 仅适用于 SPI 版本，并要求有效的高边续流窗口
DRV8904/06/08/10/12-Q1	Active OLD 检测导通 MOSFET 的电流是否低于阈值，并持续超过 deglitch time	DRV8904/06/08-Q1 支持 Passive OLD；DRV8910/12-Q1 不支持	支持 Low-current OLD 和 Negative-current OLD，但各自有适用条件
DRV8873-Q1	OLA 检测高边 body diode 续流产生的电压特征	支持 OLP，但硬件版本和 SPI 版本的触发方式不同	需要核对续流路径、输出电容及 OLP 检测延时

这里最容易混淆的是 active OLD 的含义。DRV89xx-Q1 的普通 Active OLD 以导通电流为判断依据，而 DRV824x-Q1 和 DRV8873-Q1 的 OLA 以特定续流期间的电压特征为判断依据。因此，电阻负载可以用于前一种机制的基本验证，却不能替代电机来验证后一种机制；没有电感储能，就不能保证形成检测所要求的续流特征。[4]

另外，DRV89xx-Q1 的 Low-current OLD 与 Negative-current OLD 也不能混为一谈。前者用于较小的正常工作电流，且仅适用于低边 MOSFET，同时会改变其导通电阻和过流阈值；后者用于同步整流时的反向续流判断，避免正常的负向电流被正向电流阈值误判。两者分别解决电流幅值和电流方向的问题。[2]

因此，将 OLD 配置从一个器件迁移到另一个器件时，需要重新核对检测依据、有效驱动状态、时序和恢复规则，不能只对应功能名称或寄存器名称。

Fault clear 不等于外部条件已经恢复

很多马达驱动的 OLD fault 都是 latched fault。也就是说，一旦检测到 open-load，nFAULT 或 status bit 会保持在 fault 状态，直到系统执行 CLR_FLT、nSLEEP reset pulse 或其他 datasheet 指定的清除动作。但是，fault clear 只是清除器件内部锁存状态，并允许器件重新评估当前条件。它并不改变外部负载状态，也不会主动消除电感电

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

流、线束电容电压或输出节点残余电压。因此，若 fault clear 后立即重新使能诊断，而 OUTx 节点仍处于异常电气状态，或者续流路径仍不满足 OLD 判断假设，fault bit 仍可能再次被置位。

DRV89xx-Q1 datasheet 中也说明，开路故障的错误被消除之后，通过写 CLR_FLT 指令才能恢复正常运行并复位 OLD bit。这里的顺序很重要：不是只写 CLR_FLT 就能保证恢复，而是 open-load condition 必须先消失，之后 clear fault 才有意义。

在工程实践中，对于电感负载，判断 open-load condition 是否已经消失，不能只看连接器或负载是否接回，还需要观察 OUTx 波形和负载电流是否已经回到适合重新诊断的状态。

调试时应关注的信号

对于汽车电机、电磁阀或其他电感负载应用，调试 OLD 不建议只读取 fault bit。建议至少同步观察以下信号：

1. VM 或 PVDD 供电电压；
2. OUTx 对 GND 的波形；
3. 负载两端电压；
4. 负载电流方向和衰减过程；
5. IN、EN、PWM 或 PH/EN 控制信号；
6. nFAULT；
7. SPI fault status；
8. CLR_FLT 或其他 fault clear 命令时刻；
9. OLD enable 时刻；
10. driver 当前处于 Hi-Z、brake、coast、PWM on-time 还是 PWM off-time。

如果 fault 只在某些控制模式下出现，应优先比较不同模式下的续流路径，而不是直接假设 fault clear 失败。如果 fault 只在小电流、小占空比或方向切换附近出现，也需要参考 datasheet 中关于工作模式、外围电路和输出电容可能影响 OLD 判断的说明。

应用实例 汽车风门电机的运行与停止诊断

以汽车 HVAC 风门执行器为例，考虑采用 DRV8245-Q1 的 SPI 版本驱动有刷直流电机，电机连接在 OUT1 与 OUT2 之间，通过 PH/EN 控制方向和 PWM。电机端和驱动板端存在 EMI 抑制电容，系统希望在运行过程中监测连接异常，并在停止后执行离线检查。以下为基于器件机制的应用设计示例。

在正常 PWM 驱动期间，OLA 需要观察高边续流时的输出电压特征。对于该器件，连续三个续流切换周期未检测到所需电压特征，会触发 OLA。因而，诊断结果既与电机是否连接有关，也与切换时刻的电流和续流路径有关。

在低占空比启动、轻载运行或方向切换附近，即使电机连接正常，切换时刻的电流也可能不足以形成有效诊断特征。这是需要通过实测确认的边界条件，而不能仅根据电机额定电流判断。类似地，在没有有效 PWM 切换窗口的持续导通阶段，不能将没有新增 OLA 故障作为已经完成连接检查的证据。

当电机到达目标位置后，系统停止驱动，但电流和反电动势不会立即消失。如果随即进行离线诊断，输出节点可能仍受续流或电容充放电影响。因此，软件应先按照设计的停止策略处理电机能量，再在满足器件要求的 STANDBY 状态下执行 off-state diagnostics，并在每组偏置条件建立、输出稳定之后读取 OLP_CMP。

对于 DRV8245-Q1，离线诊断应按照 datasheet 的输入组合和真值表综合判断，不能将某一次 OLP_CMP 的高低电平直接等同于"开路"或"正常"。

如果运行期间已出现 OLA，建议先保存故障状态和对应工况，再执行停止、离线检查与恢复流程。清除历史故障位与确认电机连接正常应当作为两个独立步骤：前者解决状态记录，后者需要一次满足前提条件的有效诊断。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

设计建议 checklist

面向汽车级 motor driver 应用，建议在设计和验证 OLD 功能时确认以下事项：

- 确认器件使用的是 passive OLD、active OLD、low-current active OLD，还是 negative-current active OLD；
- 确认 OLD 适用的 driver state，例如 Hi-Z、driver disabled、PWM operation 或 high-side recirculation；
- 确认当前控制模式下的续流路径是否满足 datasheet 对 OLD 的前提条件；
- 对电感负载，在 fault clear 或重新诊断前预留足够时间，使负载电流和 OUTx 节点稳定；
- 不要只用电阻负载验证最终应用，应使用真实电机、电磁阀或线圈负载进行应用级验证；
- 对小电流、小占空比、方向切换、brake/coast 切换等工况，应单独验证 OLD 是否可能误触发；
- 若器件支持 negative-current OLD，应根据同步整流和电流方向评估是否需要使能；
- 若器件 datasheet 指出某种续流路径下不建议使用 OLA，应避免在该工况下评估 OLD；
- fault clear 软件流程中应区分"清除锁存状态"和"外部条件已恢复"；
- 量产测试可以使用电阻负载验证基础功能，但系统验证必须覆盖真实汽车负载和控制模式。

结论

在汽车电机驱动器中，open-load diagnostic 是一个基于电气状态的诊断机制。它依赖 driver state、内部诊断电流、比较器阈值、滤波时间、负载电流方向和续流路径。对于电阻负载，诊断结果通常比较直观。但对于电机、电磁阀等电感负载，续流路径、残余能量和输出节点瞬态可能改变诊断条件。

因此，在分析 open-load fault 时，应避免只从寄存器清除逻辑出发，而应结合 OUTx 波形、负载电流、控制模式和 datasheet 中定义的 OLD 前提条件进行判断。这样才能区分真实开路、诊断条件不满足，以及特定续流路径下可能出现的 false OLD。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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出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