

Hector Hernandez and Shinya Morita

摘要

保护和诊断功能在任何系统电路板中都具有更高优先级。为实现系统稳健可靠的运行，对诊断功能的需求日益增长。开路负载检测 (OLD) 是一个保护诊断功能，决定了负载（电机、螺线管、继电器、LED 和电阻器）与集成式电机驱动器或栅极驱动器的功率级的连接性。本文介绍了 TI 电机驱动器中各种类型的 OLD 诊断、特性和实现。

内容

1 引言	2
1.1 负载连接电源.....	3
1.2 负载连接地 (GND).....	4
1.3 负载连接 H 桥.....	4
2 无源开路负载检测	4
2.1 电路运行和检测.....	7
2.2 DRV824x 中的电路运行和检测.....	9
3 有源开路负载检测	10
3.1 电路运行和检测.....	11
4 低电流有源开路负载检测	14
5 负电流有源开路负载检测	15
6 总结	16
7 参考文献	17
8 修订历史记录	17

插图清单

图 1-1. 负载连接 VM 的无源 OLD.....	3
图 1-2. 负载连接 VM 的有源 OLD.....	3
图 1-3. 负载连接 GND 的无源 OLD.....	4
图 1-4. 负载连接 GND 的有源 OLD.....	4
图 1-5. 负载连接 H 桥配置中的无源 OLD.....	4
图 1-6. 负载连接 H 桥配置中的有源 OLD.....	4
图 2-1. 集成式驱动器中的无源 OLD 电路.....	5
图 2-2. 有刷直流栅极驱动器中的无源 OLD 电路.....	6
图 2-3. 无刷直流栅极驱动器中的无源 OLD 电路.....	6
图 2-4. 无刷直流栅极驱动器不支持无源 OLD 负载配置.....	7
图 2-5. OLP 组合.....	10
图 3-1. 有源 OLD 运行.....	11
图 3-2. 异步整流中的正向驱动和制动.....	11
图 3-3. 有刷直流电机集成式驱动器中的有源 OLD 电路.....	12
图 3-4. DRV8873-Q1 和 DRV8873 器件中有源 OLD 的电路.....	13
图 3-5. DRV824x-Q1 器件中有源 OLD 的电路.....	13
图 3-6. BLDC 栅极驱动器中有源 OLD 的电路.....	14
图 4-1. 低电流有源 OLD 运行.....	14
图 5-1. 同步整流中的正向驱动和制动.....	15
图 5-2. 禁用负电流 OLD 时有假 OLD 标志.....	16
图 5-3. 启用负电流 OLD 时无假 OLD 标志.....	16

表格清单

表 2-1. DRV824x-Q1 关断状态诊断表 PH/EN 或 PWM 模式..... 10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

OLD 诊断检测输出端子 (OUT1 和 OUT2) 是否与负载断开连接, 从而满足更安全、更可靠的系统要求。OLD 可以在不同的诊断中完成。下面是一个列表, 描述了每项 OLD 诊断以及在哪些电机驱动器中实施了 OLD 诊断:

- **无源开路负载检测:** 无源 OLD 也称为离线开路负载诊断, 在 FET 运行之前执行。所有 FET 均处于高阻态, 同时最小的诊断电流会在短时间内流经负载, 以测试负载与 FET 的连接。诊断电流必须非常小, 以避免负载旋转。为了使诊断电流流动, 用户会向电机驱动器发送一条命令, 以启动无源 OLD 并使诊断电流从四个 OLD 电流源流经四个 OLD 电阻器或内部阻断二极管。对于每个半桥中的每个 FET, 都有一个 OLD 电流源和电阻器或内部阻断二极管。有刷直流电机集成式驱动器中的无源 OLD 电路实现与步进电机集成式驱动器中的实现类似。在这两种类型的驱动器中, 驱动器提供执行无源 OLD 诊断所需的硬件。在低侧集成式驱动器中, 要检测是否发生了 OLD 事件, 仅需要低侧 OLD 电流源 (每个输出一个)。请注意, 没有 OLD 电阻器或内部阻断二极管。无源 OLD 集成式驱动器与无刷直流 (BLDC) 电机栅极驱动器的工作方式类似, 因为这两种类型的驱动器都使用 OLD 电阻器, 而不是 BDC 电机栅极驱动器中使用的内部阻断二极管。BLDC 栅极驱动器中的无源 OLD 取决于负载相位引脚与地之间的电容。此外, 并非所有负载连接在 BLDC 栅极驱动器无源 OLD 中都受到支持。有关无源 OLD 集成式驱动器的详细信息, 请参阅节 2。无源 OLD 可用于以下类型的驱动器:
 - **集成式驱动器**
 - 步进电机驱动器
 - 有刷直流电机驱动器
 - 低侧驱动器
 - **栅极驱动器**
 - 有刷直流电机驱动器
 - 无刷直流
- **有源开路负载检测:** 当驱动负载的 FET 导通时, 将执行有源 OLD, 也称为在线 OLD。有源 OLD 可确保负载在运行期间连接到驱动器。当负载运行时, 流经 FET 的电流会受到监测, 以确保连接了负载。有源 OLD 可用于集成式驱动器 (如步进驱动器和 BDC 驱动器) 以及栅极驱动器 (如 BLDC 电机栅极驱动器)。在步进电机集成式驱动器中, 如果任何线圈中的绕组电流降至低于开路负载电流阈值 (IOLD) 和分度器设置的电流调节 (ITRIP) 电平, 则检测到 OLD 事件。在某些 BDC 电机驱动器中, 如果流经负载的电流在连续和 PWM 运行期间降至低于 IOLD, 则检测到 OLD 事件。在 [DRV8873](#)、[DRV8873-Q1](#) 和 [DRV842x-Q1](#) 器件等其他 BDC 电机驱动器中, 有源 OLD 诊断仅通过高侧 FET (异步整流) 监测电流再循环的体二极管电压, 以检测 OLD 事件。在 BLDC 栅极驱动器中, 会对流入高侧或低侧 FET 的体二极管的电流再循环进行监测, 以检查负载与驱动器的连接状态。节 3 介绍了有源 OLD。有源 OLD 可用于以下类型的驱动器:
 - **集成式驱动器**
 - 步进电机驱动器
 - 有刷直流电机驱动器
 - **栅极驱动器**
 - 无刷直流电机驱动器

- **低电流有源开路负载检测**：在低电流有源 OLD 中，当前 OLD 阈值比有源 OLD 诊断低约 10 倍。这一较小的电流阈值使用户能够灵活地检测较小的电机标称电流。有关低电流有源 OLD 的详细信息，请参阅节 4。低电流有源 OLD 可用于以下类型的驱动器：
 - 集成式栅极驱动器
 - 有刷直流电机驱动器
- **负电流有源开路负载检测**：在负电流有源 OLD 中，电流 OLD 阈值为负值。这种有源 OLD 诊断不同，它利用通过再循环 FET (同步整流) 的体二极管的再循环电流来检测 OLD 事件。在此诊断中，将监测流入 FET 的电流再循环，以检查负载与驱动器的连接状态。由于它考虑了流经该 FET 的负电流，因此，它可防止在有源 OLD 中看到假 OLD 标志，因为有源 OLD 不考虑负电流。有关此 OLD 诊断的详细信息，请参阅节 5。负电流有源 OLD 可用于以下类型的驱动器：
 - 集成式栅极驱动器
 - 有刷直流电机驱动器

OLD 诊断取决于负载与输出端子的连接类型。负载连接可分类为三种配置：

1.1 负载连接电源

在此配置中，单向电机或螺线管/继电器负载连接在输出 (例如 OUT1) 和电源 (例如 VM) 之间，如图 1-1 (无源 OLD) 和图 1-2 (有源 OLD) 所示。该配置用于负载的单向控制。在无源 OLD 期间，没有电流流向负载。在有源 OLD 期间，当低侧 FET 导通时，负载电流从 VM 流向 OUT1 至 GND。

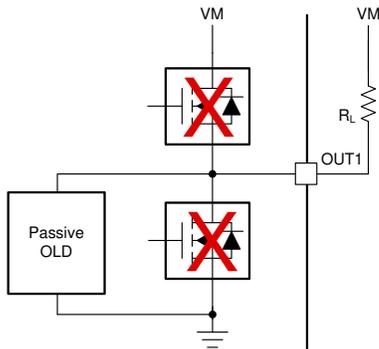


图 1-1. 负载连接 VM 的无源 OLD

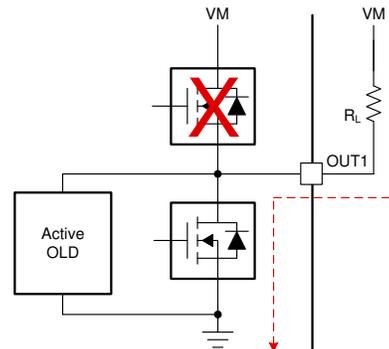


图 1-2. 负载连接 VM 的有源 OLD

1.2 负载连接地 (GND)

在此配置中，单向电机或螺线管/继电器负载连接在输出（例如 OUT1）和 GND 之间，如图 1-3（无源 OLD）和图 1-4（有源 OLD）所示。该配置用于负载的单向控制。在无源 OLD 期间，没有电流流向负载。在有源 OLD 期间，当高侧 FET 导通时，负载电流从 OUT1 流向 GND。

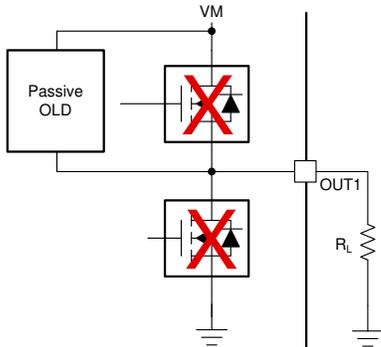


图 1-3. 负载连接 GND 的无源 OLD

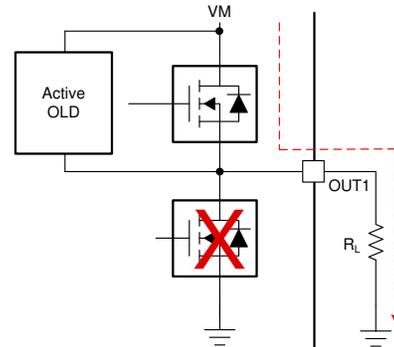


图 1-4. 负载连接 GND 的有源 OLD

1.3 负载连接 H 桥

在此配置中，双向电机或螺线管/继电器负载连接在两个输出（例如 OUT1 和 OUT2）之间，如图 1-5（无源 OLD）和图 1-6（有源 OLD）所示。该配置广泛用于负载的双向控制。这种配置通过使 OUT1 和 OUT2 处的电压极性相反来灵活地改变负载的方向。在无源 OLD 期间，没有电流流向负载。在有源 OLD 期间，当一个半桥的高侧 FET 和另一个驱动半桥的低侧 FET 导通时，负载的电流将从 VM 流到 OUT1 或 OUT2，然后流至另一个输出，最后流至 GND。为了以相反的极性驱动，这些 FET 将关断，而之前关断的 FET 现在将导通。

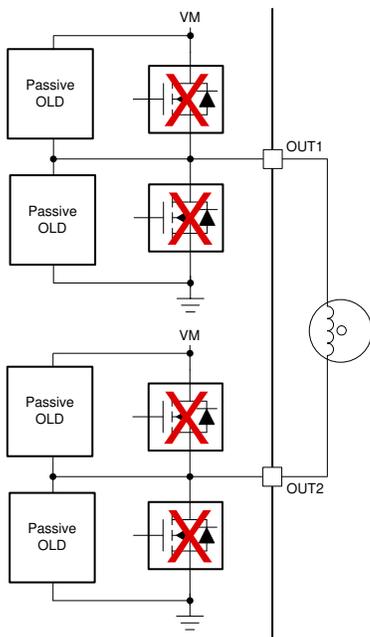


图 1-5. 负载连接 H 桥配置中的无源 OLD

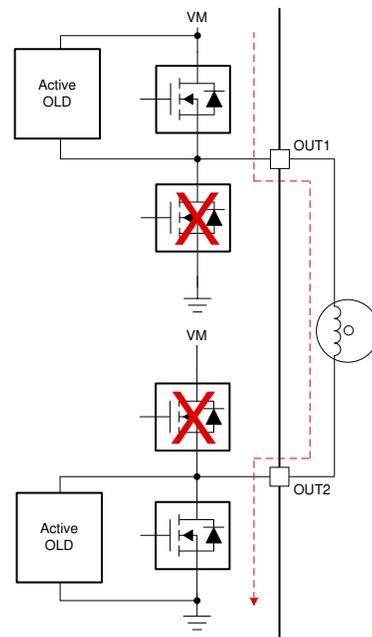


图 1-6. 负载连接 H 桥配置中的有源 OLD

2 无源开路负载检测

无源 OLD 也称为离线 OLD，在 FET 导通之前执行 OLD。此诊断功能可确保在驱动负载之前负载已连接到驱动器。无源 OLD 不能与其他 OLD 诊断同时使用。可以使用无源 OLD 集成式驱动器检测负载与电源的连接、与 GND 的连接以及在 H 桥中的连接。

图 2-1 显示了无源 OLD 在 BDC 和步进电机集成式驱动器中的电路实现。对于栅极驱动器，电路实现方式类似，不同之处在于未集成 FET。FET 必须处于高阻态。内部拉电流/灌电流源在设定的抗尖峰脉冲时间内，将电流驱动到所连接（例如，连接在 OUT1/SH1/DL1 与 OUT2/SH2/DL2 之间）的负载，并受负载电阻的限制。诊断电流非常低（对于 DRV8847，约为 $100\mu\text{A}$ ），这样它就不会旋转负载。如果负载连接在 OUT1/SH1/DL1 和 OUT2/SH2/DL2 之间，则会形成一条低阻抗路径，导致诊断电流很高并在饱和状态下运行。但是，如果负载与 OUT1/SH1/DL1 和 OUT2/SH2/DL2 中的任一者断开连接，则会形成高阻抗路径，导致电流降至零。与电流源共享同一节点的比较器输入端的电压随电流变化而波动。当比较器正极端子的电压大于负极端子电压时，比较器输出为高电平。这些比较器输出是 OLD 标志。如果存在 OCP/OLD 以外的任何其他故障，则不会启用无源 OLD。

对于 BDC 栅极驱动器，电机驱动器提供必要的硬件来对外部 FET 和负载进行无源 OLD 诊断。这种无源 OLD 诊断与集成式和 BLDC 栅极驱动器中的无源 OLD 诊断之间的区别是：BDC 栅极驱动器无源 OLD 建议 VDS 比较器阈值应调整为 1V 或更高，以确保内部阻断二极管正向压降有足够的余量，而内部 OLD 上拉和下拉电路将 OLD 电阻替换为内部阻断二极管，如图 2-2 所示。

图 2-3 显示了 BLDC 栅极驱动器中无源 OLD 的电路实现。在启用无源 OLD 之前，负载相位引脚与接地之间的电容必须放电。BLDC 栅极驱动器不支持单相高侧和低侧负载，如图 2-4 所示。

在集成式低侧驱动器中，仅需要低侧 OLD 电流源，即可检测是否发生了无源 OLD 事件。

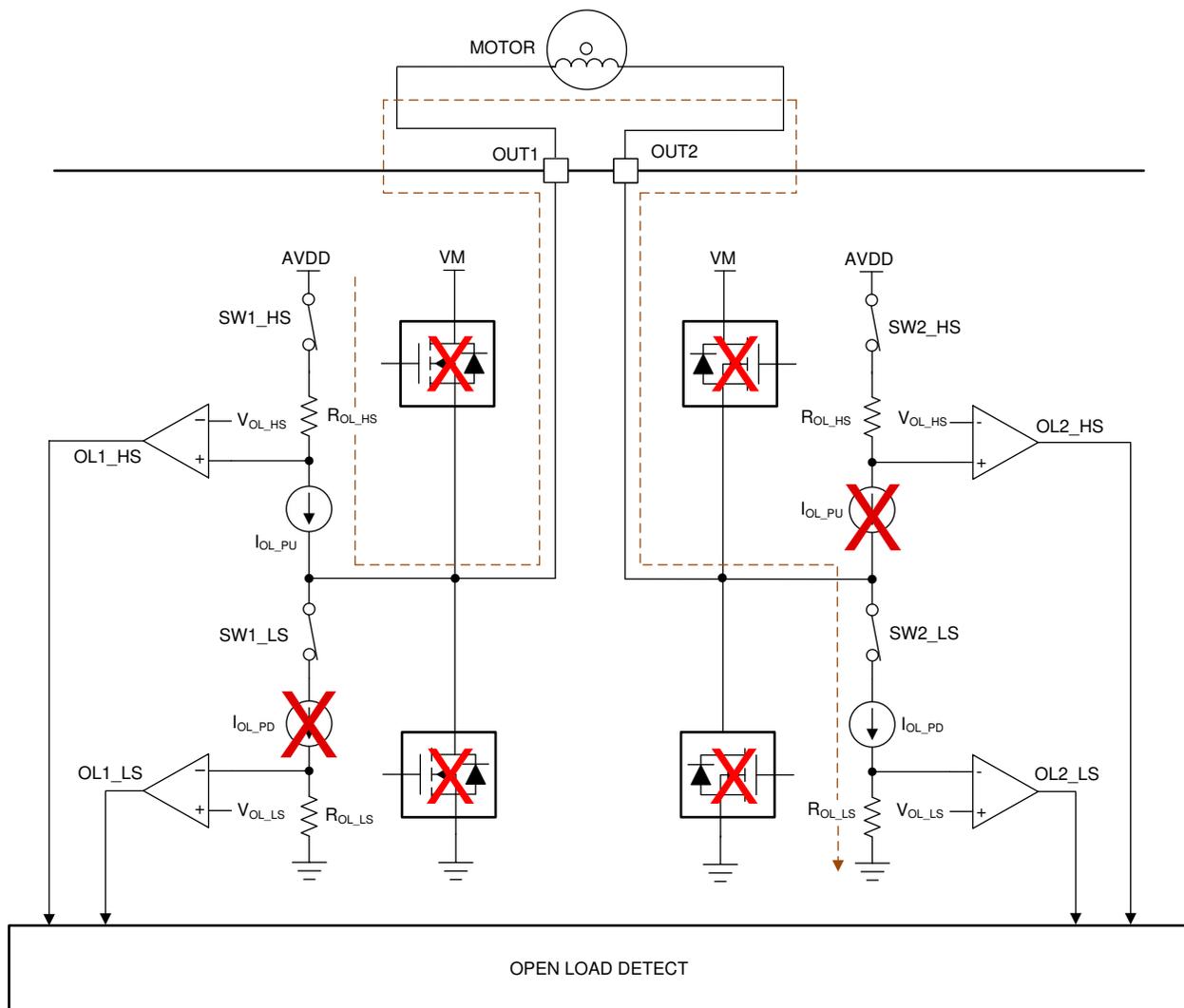


图 2-1. 集成式驱动器中的无源 OLD 电路

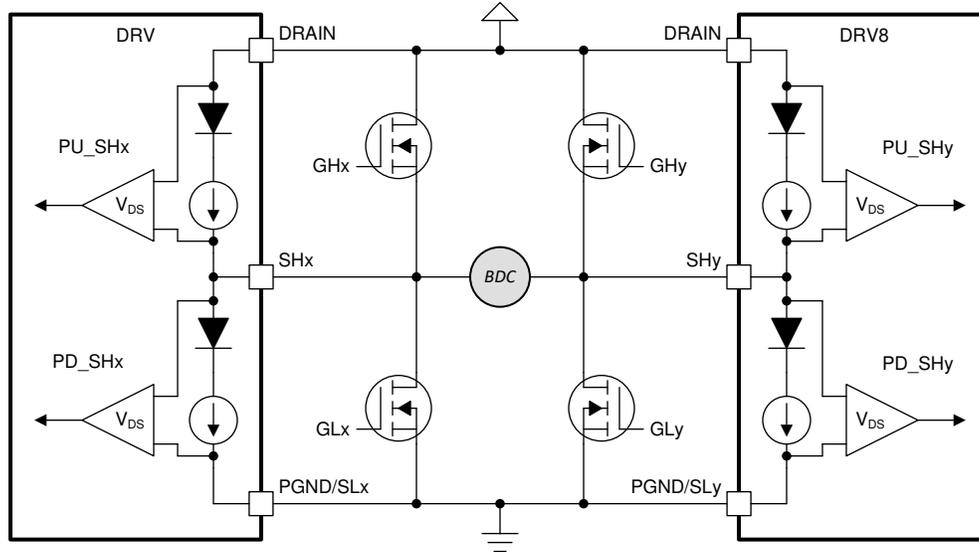


图 2-2. 有刷直流栅极驱动器中的无源 OLD 电路

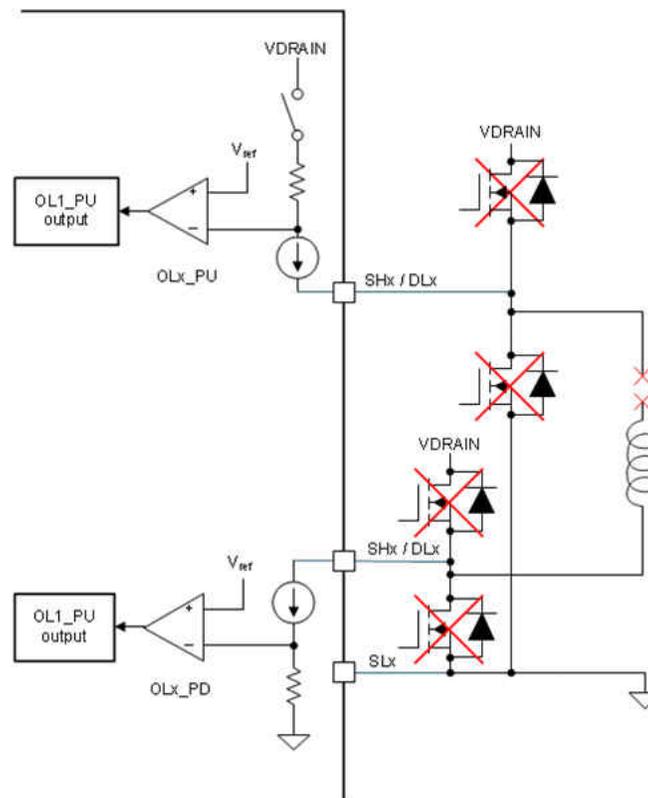


图 2-3. 无刷直流栅极驱动器中的无源 OLD 电路

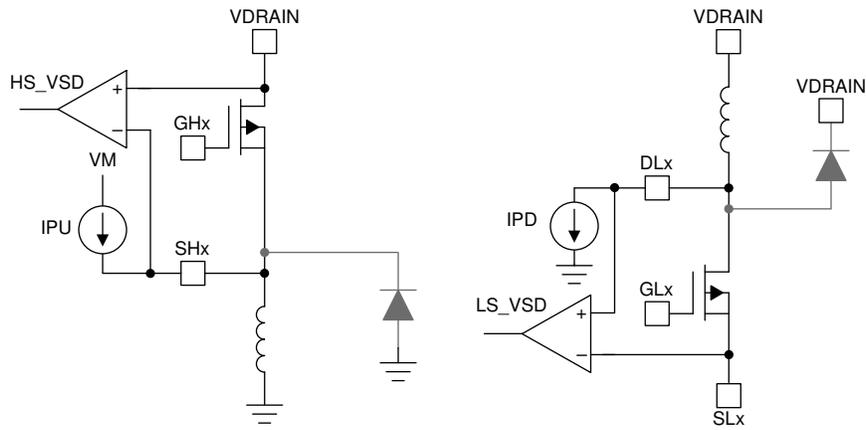


图 2-4. 无刷直流栅极驱动器不支持无源 OLD 负载配置

2.1 电路运行和检测

本节介绍 [DRV8847](#) 器件的无源 OLD 诊断的电路实现。请注意，用作示例的参数值来自器件的数据表。H 桥 OLD 序列包括同时导通 OUT1 的半桥的高侧开关 (SW1_HS) 和 OUT2 的半桥的低侧开关 (SW2_LS)。根据 OUT1 和 OUT2 与负载的连接方式，以下三种情况可能导致至少一个比较器输出设置为“1”：H 桥开路、H 桥短路或 H 桥中连接了负载。请注意，至少有一个无源 OLD 比较器设置为“1”并不表示发生了无源 OLD 事件。只有在 H 桥开路的情况下，才会出现无源 OLD 标志。此情况也适用于具有无源 OLD 诊断且可通过单个半桥驱动与电源或 GND 连接的单向负载的驱动器，例如 [DRV89XX-Q1](#) 器件系列的 [DRV8908-Q1](#)、[DRV8906-Q1](#) 和 [DRV8904-Q1](#) 器件。对于集成式驱动器，将无源 OLD 比较器输出设置为“1”的条件为： $V_{OLx_HS(+)} > V_{OLx_HS}$ 且 $V_{OLy_LS(-)} < V_{OLy_LS}$ （对于 H 桥开路情况），其中 x 表示半桥 x，而 y 表示半桥 y。对于栅极驱动器，将无源 OLD 比较器输出设置为“1”的条件为： $V_{OLx_PU(+)} > V_{REF}$ 且 $V_{OLy_PD(-)} < V_{REF}$ 。

2.1.1 H 桥开路

如果 OUT1 和 OUT2 之间未连接负载，则没有电流从内部稳压器 (AVDD) 流出。此 OLD 示例将说明为什么在 H 桥开路时会出现 OLD 标志。OUT1 半桥的高侧比较器 (OL1_HS) 的正极端子和 OUT2 半桥的低侧比较器 (OL2_LS) 的负极端子上的电压如下所示：

OUT1 的半桥的高侧比较器 (OL1_HS)

由于没有电流从 AVDD 流出，OUT1（也是 OL1_HS 的正极端子）上的电压被钳位至 AVDD（例如 4.2V）。OL1_HS 具有可称为 $V_{OL1_HS(+)}$ 的正输入以及负输入 V_{OL_HS} 。 V_{OL_HS} 也称为 OLD 阈值电压。由于 $V_{OL1_HS(+)}$ (4.2V) 大于 V_{OL_HS} (2.3V)，因此 OL1_HS 输出设置为“1”。

OUT2 的半桥的低侧比较器 (OL2_LS)

由于没有电流流经 SW2_LS 开关，因此 OL2_LS 的负极端子 ($V_{OL2_LS(-)}$) 被下拉至 0.0V (GND)。OL2_LS 具有正输入 V_{OL_LS} 。由于 V_{OL_LS} (1.2V) 大于 $V_{OL2_LS(-)}$ (0.0V)，因此 OL2_LS 输出设置为“1”。如果 OL1_HS 和 OL2_LS 都设置为“1”，则指示 OLD。

2.1.2 H 桥短路

如果在 OUT1 和 OUT2 之间发生短路，则短路电流 (I_{SC}) 从 AVDD 流出。H 桥短路中的成功 OLD 标志取决于 I_{SC} 。 I_{SC} 将取决于 AVDD、高侧电阻器 ($R_{OL_HS} = 12k\Omega$) 和低侧电阻器 ($R_{OL_LS} = 15k\Omega$)。 I_{SC} 公式如下所示：

$$I_{SC} = \frac{V_{AVDD}}{15k\Omega + 12k\Omega} = \frac{V_{AVDD}}{27k\Omega} \quad (1)$$

因此，使用 [方程式 1](#) 计算 I_{SC} ，如下所示：

$$I_{SC} = \frac{V_{AVDD}}{27k\Omega} = \frac{4.2V}{27k\Omega} = 155.56\mu A \quad (2)$$

此 OLD 示例将展示当 H 桥上发生短路时如何不会出现 OLD 标志。由于 OL1_HS 的正极端子 OL1_HS (V_{OL1_HS(+)}) 和 OL2_LS 的负极端子 (V_{OL1_HS}) 上的 H 桥短路而导致的电压变化显示如下：

OUT1 的半桥的高侧比较器 (OL1_HS)

I_{SC} (155.56μA) 从 AVDD 流出。因此，OL1_HS 的正极端子上的电压计算公式如下：

$$V_{OL1_HS(+)} = V_{AVDD} - I_{SC} \times 12k\Omega \quad (3)$$

使用方程式 3，V_{OL1_HS(+)} 计算公式如下：

$$V_{OL1_HS(+)} = 4.2V - 155.56\mu A \times 12k\Omega = 2.33V \quad (4)$$

由于 V_{OL1_HS(+)} (2.33V) 大于 V_{OL1_HS} (2.3V)，因此 OL1_HS 的输出设置为“1”。

OUT2 的半桥的低侧比较器 (OL2_LS)

I_{SC} 的下拉电流 (155.56μA) 从 AVDD 流向 SW2_LS 开关。因此，OL2_LS 的负极端子上的电压 (V_{OL2_LS(-)}) 计算公式如下：

$$V_{OL2_LS(-)} > I_{SC} \times 15k\Omega \quad (5)$$

使用方程式 5，V_{OL2_LS(-)} 值为：

$$V_{OL2_LS(-)} = 155.56\mu A \times 15k\Omega = 2.33V \quad (6)$$

由于 V_{OL2_LS(-)} (2.33V) 大于 V_{OL_LS} (1.2V)，因此 OL2_LS 的输出设置为“0”。OL1_HS 的输出设置为“1”，OL2_LS 的输出设置为“0”。因此，这种情况不被视为 OLD。

2.1.3 H 桥中连接的负载

H 桥有负载时的 OLD 监测将取决于负载电阻 (R_L)。OUT1 和 OUT2 之间连接负载的负载电流 (I_L) 的计算公式如下：

$$I_{LOAD} = \frac{V_{AVDD}}{12k\Omega + R_L + 15k\Omega} = \frac{V_{AVDD}}{R_L + 27k\Omega} \quad (7)$$

此 OLD 示例将触发一个 OLD 事件。OL1_HS 的正极端子处的电压 (V_{OL_HS(+)}) 和 OL2_LS 的负极端子处的电压 (V_{OL_HS}) 将如下所示：

OUT1 的半桥的高侧比较器 (OL1_HS)

如果 V_{OL_HS(+)} 大于 V_{OL_HS} (2.3V)，则 OL1_HS 的输出设置为“1”。将 OL1_HS 的输出设置为“1”所需的 V_{OL_HS(+)} 与 V_{OL_HS} 之间的电压比较由以下公式决定：

$$V_{OL_HS} < V_{AVDD} - I_{LOAD} \times 12k\Omega \quad (8)$$

将方程式 7 放入方程式 8 ,

$$V_{OL_{HS}} < V_{AVDD} - \frac{V_{AVDD} \times 12k\Omega}{R_L + 27k\Omega} \quad (9)$$

求解方程式 9 以得出负载电阻 (R_L) , R_L 表示为 :

$$R_L > \frac{V_{AVDD} \times 12k\Omega}{V_{AVDD} - V_{OL_{HS}}} - 27k\Omega \quad (10)$$

通过在方程式 10 中使用 V_{AVDD} 和 $V_{OL_{HS}}$ 的值, 可计算出负载电阻 (R_L) 为 (-)473.7 Ω 。由于电阻值为负, 因此 $V_{OL_{HS}(+)}$ 大于 $V_{OL_{HS}}$ (2.3V), $OL1_{HS}$ 的输出设置为 “1”。

OUT2 的半桥的低侧比较器 (OL2_LS)

如果 $OL2_{LS}$ 的负极端子处的电压 ($V_{OL_{LS}(-)}$) 小于 $V_{OL_{LS}}$ (1.2V), 则 $OL2_{LS}$ 的输出设置为 “1”。因此, 将 $OL2_{LS}$ 的输出设置为 “1” 所需的 $V_{OL_{LS}(-)}$ 与 $V_{OL_{LS}}$ 之间的电压比较的计算公式如下:

$$V_{OL_{LS}} > I_{LOAD} \times 15k\Omega \quad (11)$$

将方程式 7 放到方程式 11 中,

$$V_{OL_{LS}} > \frac{V_{AVDD} \times 15k\Omega}{R_L + 27k\Omega} \quad (12)$$

求解方程式 12 以得出 R_L , R_L 表示为 :

$$R_L > \frac{V_{AVDD} \times 15k\Omega}{V_{OL_{LS}}} - 27k\Omega \quad (13)$$

在方程式 13 中使用 V_{AVDD} 和 $V_{OL_{LS}}$ 的值, R_L 必须大于 25.5k Ω , $OL2_{LS}$ 才能设置为 “1”。由于 $OL1_{HS}$ 的输出始终设置为 “1”, 因此 OLD 状态完全取决于 $OL2_{LS}$ 的输出。如果 R_L 小于 25.5k Ω , 则不会出现 OLD 标志。

2.2 DRV824x 中的电路运行和检测

本节介绍 DRV824x-Q1 器件的无源 OLD 诊断的电路实现。DRV824x 具有用于无源 OLD 的专用比较器, 称为 OLP_{CMP} 。

当功率 FET 关断时, 用户可以在待机状态下通过关断状态诊断来确定 OUT_x 节点上的阻抗。通过这些诊断, 可以通过无源方式检测以下故障状况:

- 输出对 VM 或 GND 短路 < 100 Ω
- 对于全桥负载或低侧负载, 开路负载 > 1K Ω
- 对于高侧负载, 开路负载 > 10K Ω , VM = 13.5V

在 PH/EN 或 PWM 模式下, 全桥负载的无故障场景与故障场景的 OLP 组合和真值表如表 2-1 所示。

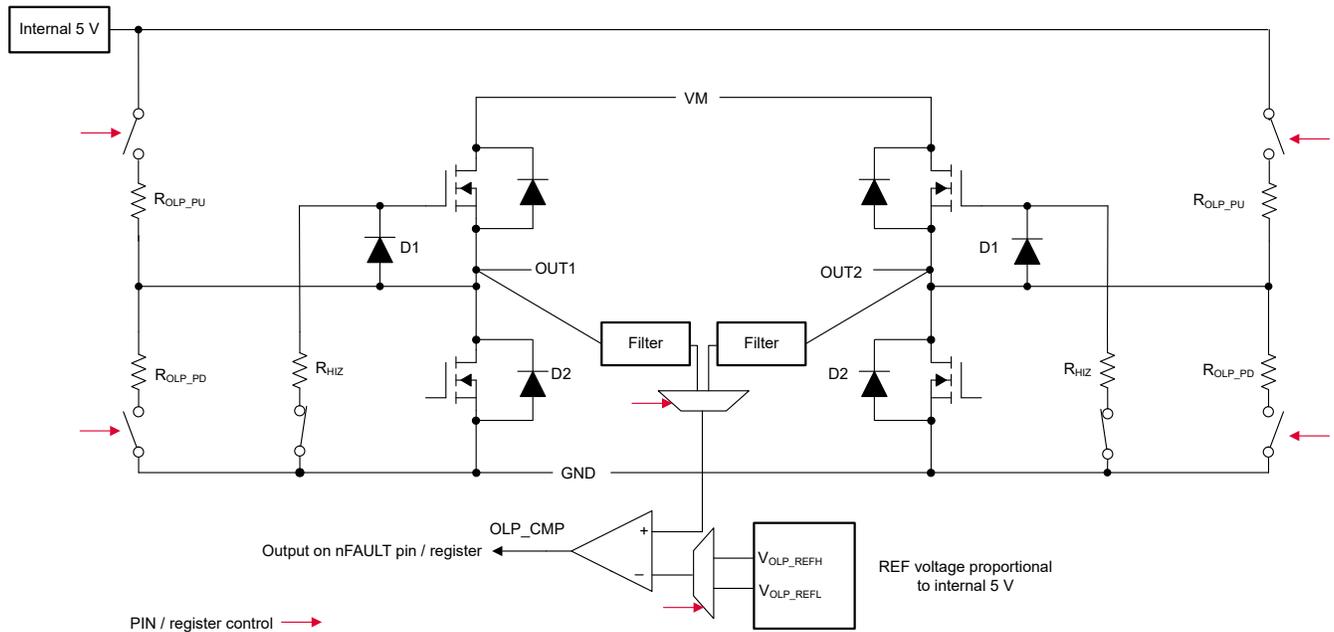


图 2-5. OLP 组合

表 2-1. DRV824x-Q1 关断状态诊断表 PH/EN 或 PWM 模式

用户输入				OLP 设置				OLP CMP 输出			
nSleep	DRVOFF	EN/IN1	PH/IN2	OUT1	OUT2	CMP REF	所选输出	正常	开路	GND 短路	VM 短路
1	1	1	0	R _{OLP_PU}	R _{OLP_PD}	V _{OLP_REFH}	OUT1	L	H	L	H
1	1	0	1	R _{OLP_PU}	R _{OLP_PD}	V _{OLP_REFL}	OUT2	H	L	L	H
1	1	1	1	R _{OLP_PD}	R _{OLP_PU}	V _{OLP_REFL}	OUT2	H	H	L	高电平

下面是测试过程示例。首先使用第一行执行测试。nSLEEP=1、DRVOFF=1、EN/IN1=1 和 PH/IN2=0。如果 OLP CMP 输出为低电平，则预期输出条件为正常或 GND 短路。然后，尝试下一行：nSLEEP=1、DRVOFF=1、EN/IN1=0 和 PH/IN2=1。如果 OLP CMP 输出为高电平，则预期输出正常。如果 OLP CMP 输出为低电平，则预计输出为 GND 短路。

3 有源开路负载检测

有源 OLD 是在负载运行期间执行的诊断（流经负载的电流不为零）。此诊断功能可确保负载在运行期间与驱动器相连。但是，它无法在负载运行开始之前检测负载的端子是否与功率级断开。

图 3-1 显示了有源 OLD 诊断的运行。（有关更多详细信息，请参阅 DRV89XX-Q1 器件系列）。如果任一 FET 导通，并且流入特定 FET 的电流小于 OLD 的电流阈值 (I_{OLD}) 的时间量级大于 OLD 抗尖峰脉冲时间 (t_{OLD})，则检测到 OLD。

在步进电机集成式驱动器中，有源 OLD 取决于任何线圈中的绕组电流。如果任何线圈中的绕组电流降至开路负载电流阈值 (I_{OLD}) 以下，且也降至由分度器设置的 I_{TRIP} 电平，则会检测到开路负载情况。

在 DRV8873、DRV8873-Q1 和 DRV824x-Q1 器件中，有源 OLD 基于在电流再循环期间高侧 FET 的体二极管中的电压。在异步整流中，电流再循环通过高侧 FET 的体二极管发生。在栅极驱动器中，有源 OLD 基于在电流再循环期间高侧或低侧 FET 的体二极管中的电压。

图 3-2 显示了正向驱动和电流再循环期间的电流流动。OUT1 的高侧 FET 处于运行状态。将电流再循环高侧 FET 的体二极管两端的电压与固定基准 OLD 阈值电压 (V_{OL_HS}) 进行比较，以检测 OLD 事件。

在栅极驱动器中，每个半桥（相）的有源 OLD 均可单独启用。要让 OLD 发生，需要通过 H 桥配置连接负载。当电流再循环 FET 的体二极管两端的压降在电流再循环时间内没有通过 VM 表现出大于 V_{OLA} 的过冲时，就会发生 OLD。如果存储在负载中的能量足够高，导致通过 VM 表现出的过冲大于 V_{OLA} ，则不会发生 OLD。过冲是由流经电流再循环 FET 的体二极管的负电流引起的。

DRV8873-Q1、DRV8873 和 BLDC 栅极驱动器中的有源 OLD 与负电流 OLD 诊断相比，两者是不同的，因为前者将在异步整流中标记 OLD，而后者将在同步整流中标记 OLD。

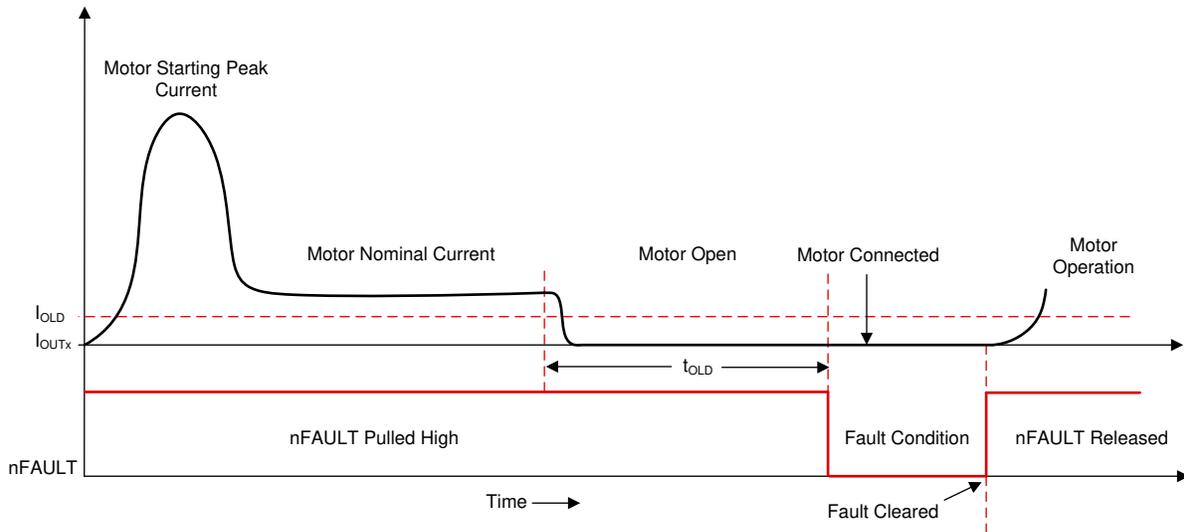


图 3-1. 有源 OLD 运行

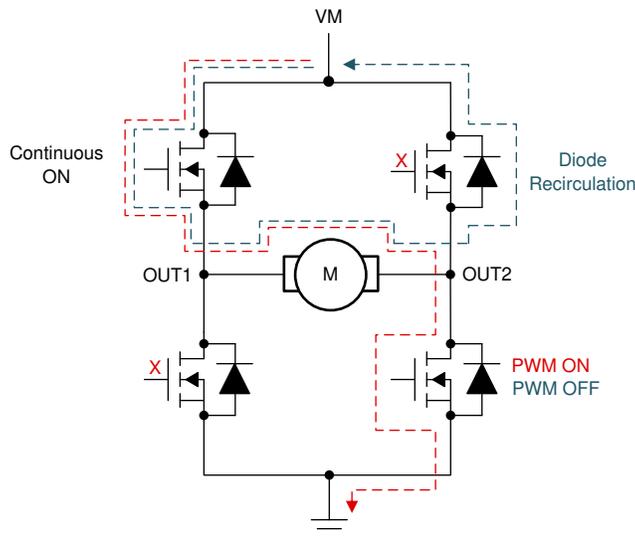


图 3-2. 异步整流中的正向驱动和制动

3.1 电路运行和检测

图 3-3 显示了集成式驱动器中有源 OLD 的电路实现。OUT1 通道的高侧 FET 和 OUT2 的低侧 FET 处于运行状态。基准电压发生器为 OLD 比较器的负极输入端子生成等效的基准电压，而正极端子反映 FET 中的实际电压。如图 3-3 所示，当输出电压 (V_{OUT1_HS} 和 V_{OUT2_LS}) 变得大于比较器的基准电压 (V_{OL_REF}) 时，OL1_HS 和 OL2_LS 的输出设置为“1”，

$$\begin{aligned} V_{OL_REF} &< V_{OUT1_HS} \\ V_{OL_REF} &< V_{OUT2_LS} \end{aligned} \tag{14}$$

在此示例中，基准 FET 是连接到电流基准源 (I_{OL_REF}) 的四个 FET 中的任何一个。 V_{OL_REF} 由 I_{OL_REF} 和基准 FET 的导通状态电阻 ($R_{DS(ON)_REF}$) 决定。现在， V_{OUT1_HS} 和 V_{OUT2_LS} 由通过 FET (用于驱动负载) 的电流和导

通态电阻 ($R_{DS(ON)}$) 决定。当发生 OLD 事件时，通过 FET 的电流必须大于 OLD 电流阈值。对于这些公式，通过 FET 的电流称为 I_{OL} 。因此，通过将所有这些参数放入 [方程式 14](#) 中，可以将公式 V_{OL_REF} 修改为：

$$I_{OL_REF} \times R_{DS(ON)_REF} < I_{OUTx} \times R_{DS(ON)} \quad (15)$$

因此，可以通过以下公式计算 I_{OLD} ：

$$I_{OUTx} > I_{OL_REF} \times \left(\frac{R_{DS(ON)_REF}}{R_{DS(ON)}} \right) = I_{OLD} \quad (16)$$

[方程式 16](#) 显示了 OLD 取决于基准 FET 与用于驱动负载的 FET 的导通状态电阻比。

通过代入导通状态电阻比 (450:1) 和基准发生器下拉电流 (20 μ A) 的值，可以通过以下公式计算 OLD 电流阈值：

$$I_{OUTx} > (20 \times 10^{-6}) \times \left(\frac{450}{1} \right) = I_{OLD} = 9\text{mA} \quad (17)$$

这样，如果进行 OLD 时通过负载的电流大于 9mA，则会登记一个 OLD 事件。

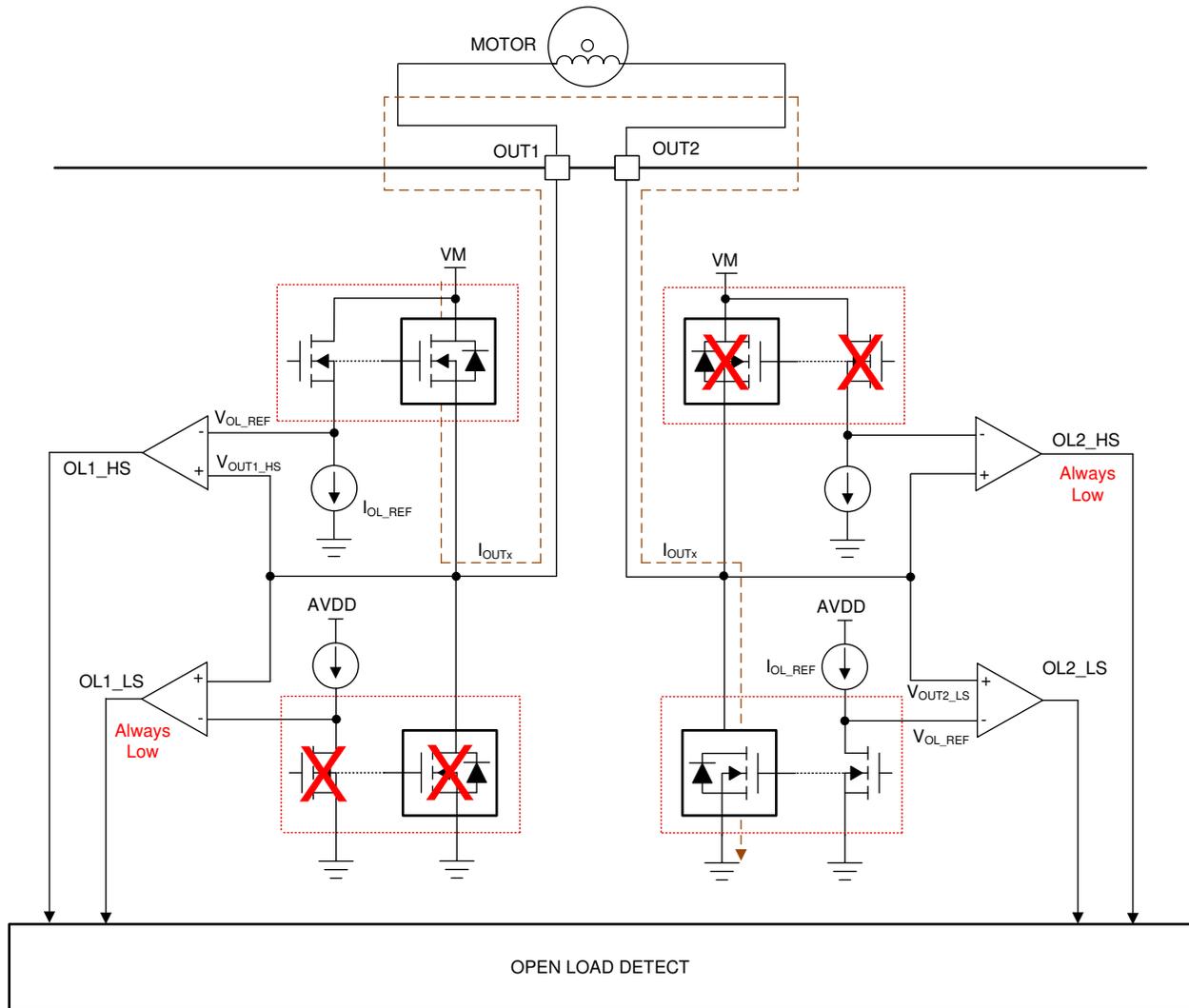


图 3-3. 有刷直流电机集成式驱动器中的有源 OLD 电路

对于 DRV8873、DRV8873-Q1 和 DRV824x-Q1 器件中的电路实现，图 3-4 显示了 DRV8873/DRV8873-Q1 的有源 OLD 的电路实现。对于 OL1_HS 比较器，如果高侧驱动 FET 两端的漏源电压小于 V_{OL_HS} OLD 阈值，则 OLD1_HS 输出设置为“1”并检测到 OLD。对于 OL2_HS 比较器，如果体二极管电压 (V_D) 小于 V_{OL_HS} OLD 阈值，则 OLD2_HS 输出设置为“1”并检测到 OLD。由于电流通过体二极管再循环 (I_{OL})，因此体二极管电压 (V_D) 将取决于 I_{OUTx} 以发生 OLD。

这也依赖于运行条件和外部电路（如输出电容器），对于这种情况，即使存在负载，也可能导致报告 OLD。这种情况可能在方向改变期间，或分别在小负载电流和小 PWM 占空比条件下发生。

图 3-5 显示了 DRV824x-Q1 的有源 OLD 的电路实现。器件可以在高侧再循环期间检测有源状态下的开路负载。这包括直接连接到 VM 或通过另一个半桥上的高侧 FET 进行连接的高侧负载。在 PWM 开关转换期间，当 LS FET 关闭时，电感负载电流通过 HS 体二极管再循环到 VM。该器件在 HS FET 开启之前的短暂死区时间内在 OUTx 上寻找高于 VM 的电压尖峰。为了观察电压尖峰，此负载电流需要高于由 FET 驱动器置位的输出上的下拉电流 (I_{PD_OLA})。如果连续“3”个再循环开关周期没有出现此电压尖峰，则表明负载电感损失或负载电阻增加，并被检测为有源开路检测故障。

最后，当在栅极驱动器中使用有源 OLD 时，电容器必须放置在负载相位节点和 GND 之间。BLDC 电机以及相位节点处的双向和单向 BDC 电机需要使用这些电容器。如果连接了螺线管负载，则不需要电容器。电容器的大小必须为：

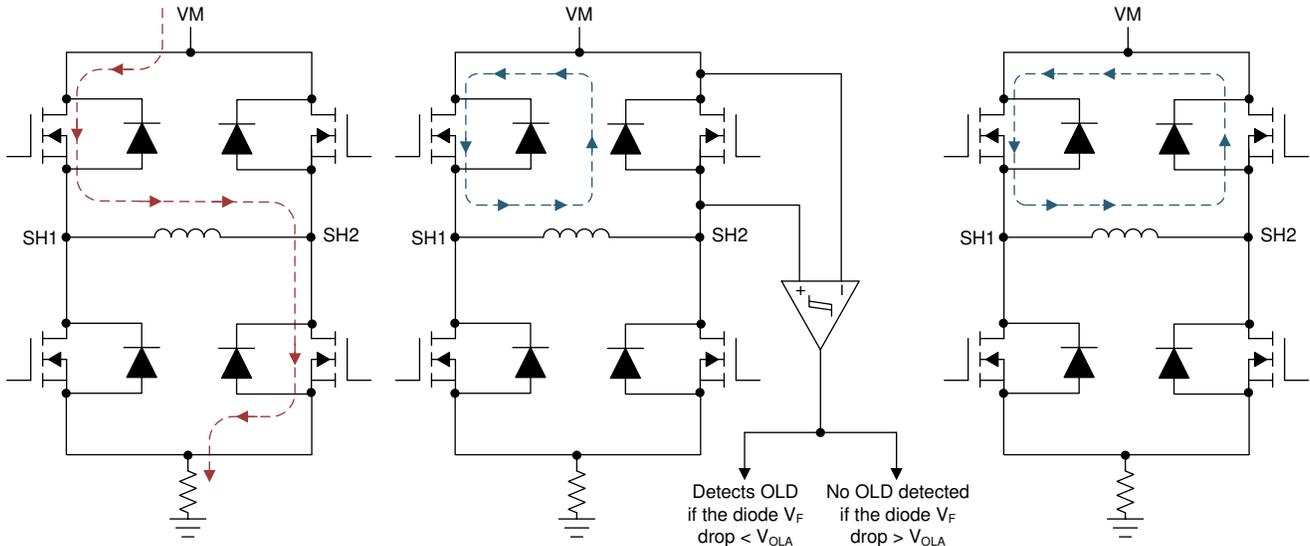


图 3-4. DRV8873-Q1 和 DRV8873 器件中有源 OLD 的电路

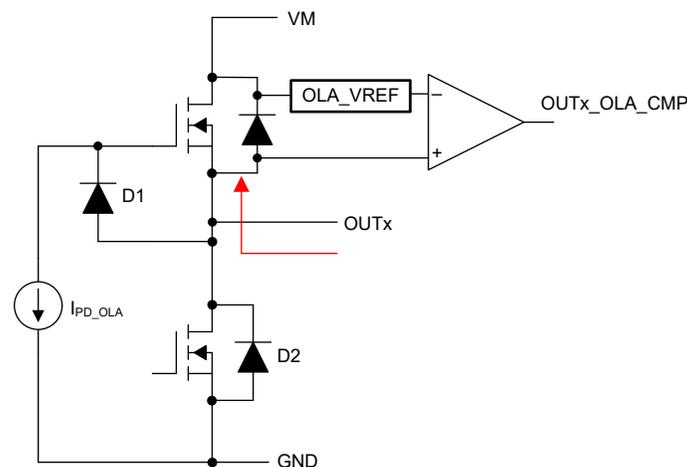


图 3-5. DRV824x-Q1 器件中有源 OLD 的电路

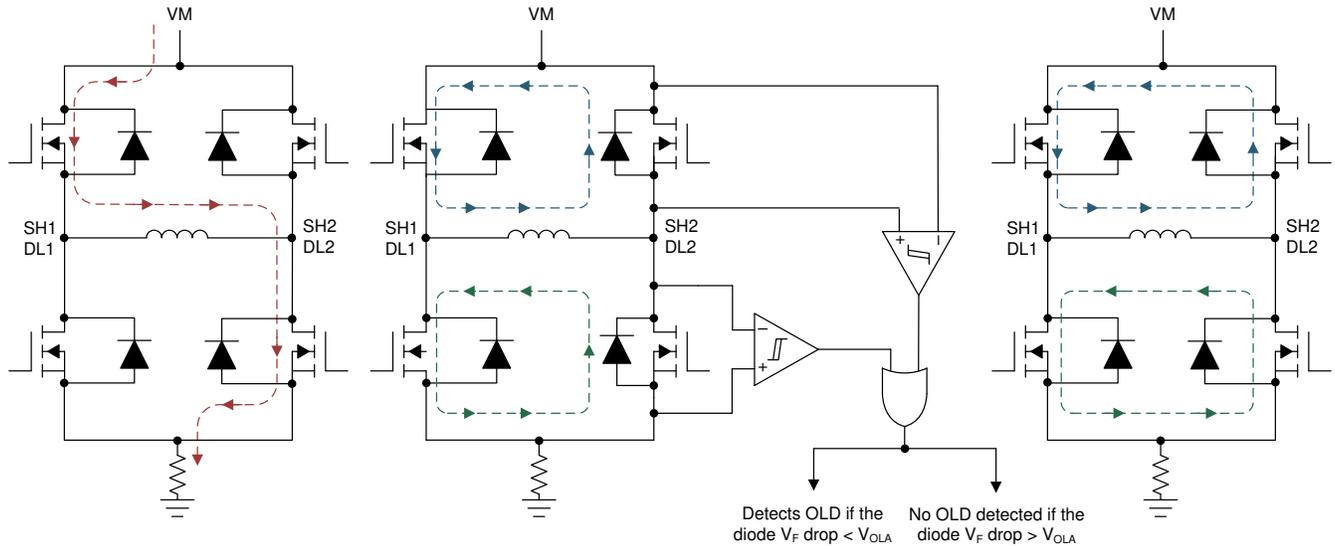


图 3-6. BLDC 栅极驱动器中有源 OLD 的电路

$$C_{\text{phase}} \geq \frac{V_{\text{TH}} \times C_{\text{rss}}}{V_{\text{OLA}(\text{min})}} - C_{\text{oss}} \quad (18)$$

其中， V_{TH} 是 FET 的阈值电压，**DRV8343-Q1** 和 **DRV8340-Q1** 中的 $V_{\text{OLA}(\text{min})}$ 为 150mV。FET 的值 C_{rss} 和 C_{oss} 应该用于 0V V_{DS} 。选择电容时，必须考虑 C_{phase} 的降额。

4 低电流有源开路负载检测

DRV89xx-Q1 器件中使用的低电流有源 OLD 专为电机标称电流小于有源 OLD 的 I_{OLD} 的负载而设计。图 4-1 显示低电流有源 OLD 阈值 ($I_{\text{OLD_LOW}}$) 取代了有源 OLD 中的 I_{OLD} 。在低电流有源 OLD 中， $I_{\text{OLD_LOW}}$ 比有源 OLD 的电流 OLD 阈值低约 10 倍。如果 $I_{\text{OLD_LOW}}$ 比 I_{OLD} 低 10 倍，则当利用需要较小标称电流来触发 OLD 事件的负载时，允许 OLD 具有更大的灵活性。如果低侧 FET 导通，并且在低侧 FET 中流动的电流小于 $I_{\text{OLD_LOW}}$ 的时间至少达到 OLD 抗尖峰时间 (t_{OLD})，则发生了 OLD 事件。

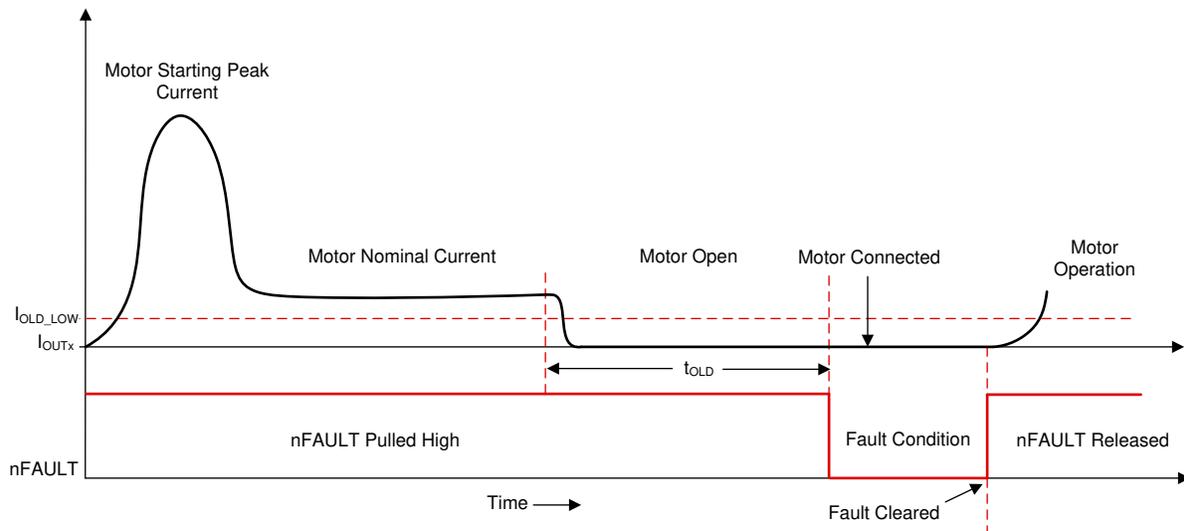


图 4-1. 低电流有源 OLD 运行

低电流有源 OLD 必须考虑进行以下权衡：

- 在 **DRV89xx-Q1** 器件中，此 OLD 仅适用于低侧 FET 中流动的电流，这意味着无法使用高侧 FET 检测到它。

- 如果使用低电流有源 OLD，则低侧 FET 的过流保护阈值也会降低 11 倍。
- 低侧 FET 的 $R_{DS(ON)}$ 将增加 11 倍，因此必须监测热性能。然而，鉴于低侧 FET 两端的电流预期较低，预计低侧 FET 的热耗散将受到限制。

5 负电流有源开路负载检测

在 DRV89xx-Q1 器件的负电流有源 OLD 中，电流 OLD 阈值为负值 (I_{OLD_NEG})。负电流再循环通过同步整流中的电流再循环 FET 发生。图 5-1 显示了 H 桥在正向驱动和使用同步整流时的运行情况。如果未使用负电流有源 OLD，器件可能会显示假 OLD，因为通过电流再循环 FET 进行再循环的电流为负值，并且小于另一个有源 OLD 诊断使用的正电流 OLD 阈值。当启用负电流有源 OLD 时，流经电流再循环 FET 的负电流不会显示假 OLD 事件，因为现在使用了负电流有源 OLD 电流设置 (I_{OLD_NEG})。

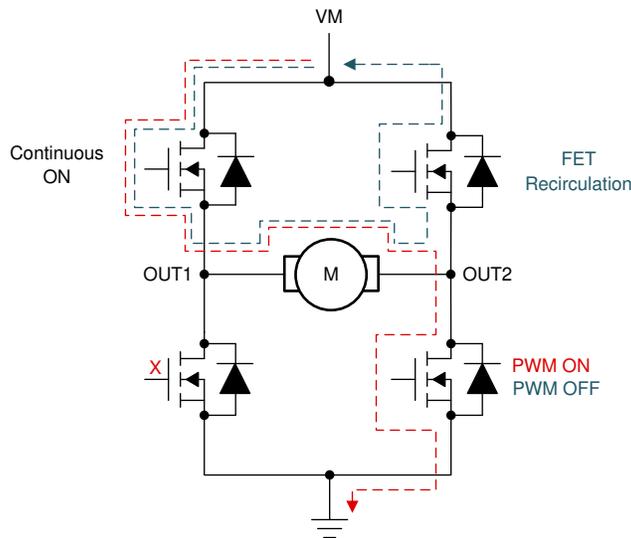


图 5-1. 同步整流中的正向驱动和制动

图 5-2 显示了在 H 桥配置中，当负电流有源 OLD 未激活时假 OLD 的波形。在具有高侧电流再循环的同步整流中，其中一个驱动 FET 始终处于导通状态，而另一个驱动半桥的低侧和高侧 FET 以互补方式运行。最初，对于第一个 PWM 周期，所有 OLD 诊断都禁用，以显示负载运行期间不同 FET 中的电流。如果在第二个 PWM 周期中启用了有源 OLD 诊断，则器件会在因负电流而导致的高侧 FET 电流再循环期间注册假 OLD 标志。这一假标志将导致开关高侧和低侧 FET 均关断。由于故障导致 OUT2_HS 关断，因此，高侧 FET 的体二极管（而非高侧 FET）会导通，以完成返回电源的电流再循环路径。

可通过启用负电流 OLD 消除这一假 OLD 标志。图 5-3 显示了为开关半桥的电流再循环 FET 启用了负电流有源 OLD 电流设置 (I_{OLD_NEG})。由于电流阈值为负值，并且大于通过电流再循环 FET 进行再循环的电流，因此防止了假 OLD 标志，并且开关半桥的 FET 在第二个 PWM 周期中未被禁用。通过将电流阈值设置为负值，可以检测负载在同步整流期间断开时的 OLD 标志。启用负电流有源 OLD 不需要权衡。

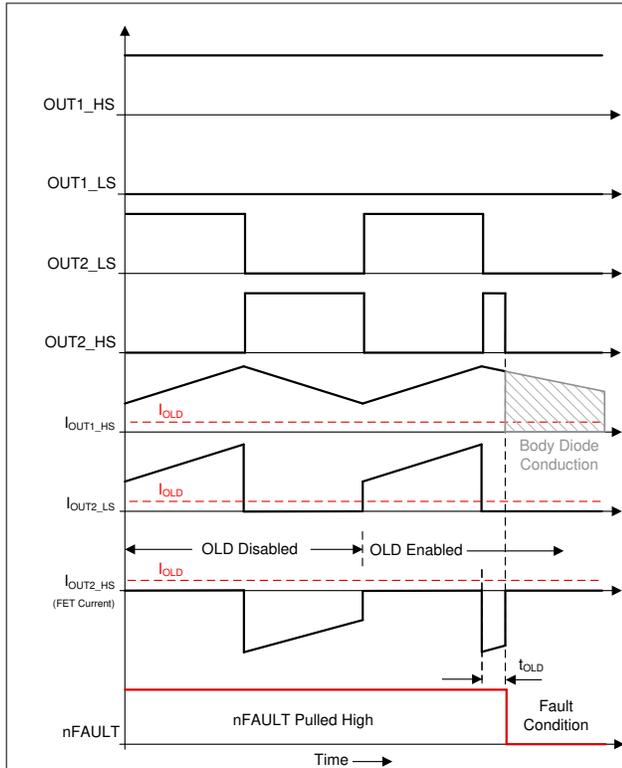


图 5-2. 禁用负电流 OLD 时有假 OLD 标志

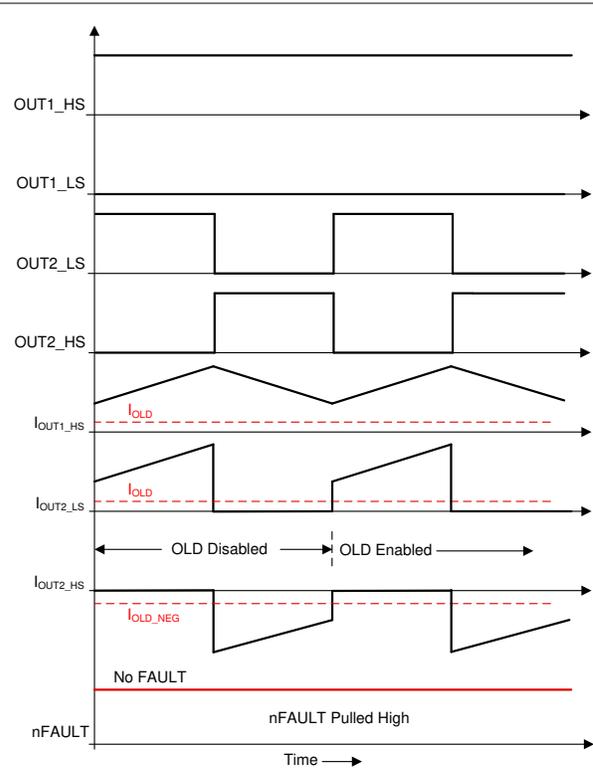


图 5-3. 启用负电流 OLD 时无假 OLD 标志

6 总结

本应用报告介绍了 OLD 诊断中的不同负载连接，例如连接电源的半桥负载、接地半桥负载和 H 桥负载，以及五种类型的 OLD 诊断：无源 OLD、有源 OLD、低电流有源 OLD 和负电流有源 OLD。

无源 OLD 诊断适用于需要在为驱动器供电之前检查驱动器与负载之间连接情况的应用。在此类应用中，可能存在与其他低压电路相连的线路发生开路的危险，这可能会对该电路或电源线造成潜在损坏，从而导致过流事件。低侧集成式驱动器中的无源 OLD 仅需要低侧 OLD 电流源即可检测无源 OLD 事件。在启用无源 OLD 之前，BLDC 栅极驱动器需要对负载相位引脚与地之间的电容进行放电。

有源、低电流有源和负电流有源 OLD 诊断适用于在负载运行时要监测驱动器电流的应用。有源 OLD 可以在连续模式和 PWM 模式下运行。DRV8873、DRV8873-Q1 和 DRV824x-Q1 器件只能在高侧异步整流期间检测有源 OLD。BLDC 栅极驱动器要求在 H 桥配置中连接有源负载。低电流有源 OLD 设置 10 倍电流 OLD 阈值，以便更灵活地检测标称电流比 I_{OLD} 更小的负载。负电流有源 OLD 将 I_{OLD} 更改为 I_{OLD_NEG} ，以考虑同步整流中的高侧或低侧 FET 负电流再循环，并防止出现假的有源 OLD 标志。

7 参考文献

- 德州仪器 (TI), [DRV8847 双路 H 桥电机驱动器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [DRV8889-Q1 汽车类 H 桥电机驱动器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [DRV8899-Q1 汽车类 H 桥电机驱动器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [DRV8860 八通道串行接口低侧驱动器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [DRV8806 四通道串行接口低侧驱动器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [DRV89xx-Q1 汽车类多通道半桥电机驱动器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [DRV8873-Q1 汽车类 H 桥电机驱动器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [DRV8873 汽车类 H 桥电机驱动器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [DRV8343-Q1 汽车类 H 桥电机驱动器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [DRV8340-Q1 汽车类 H 桥电机驱动器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [DRV824x-Q1 汽车类 H 桥电机驱动器](#) 数据表

8 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision B (January 2020) to Revision C (April 2022)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	2
• 添加了新的 节 2.2 。.....	9
• 更新了 节 3 。.....	10
• 更新了 节 3.1 。.....	11
• 更新了 节 6	16

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司