

使用 STM32F30x/31x PWM 刹车特性 进行电机控制和数字电源转换功率因数校正

前言

本文旨在说明 STM32F30x/31x 定时器刹车特性，并显示其如何与其它 STM32F3 内部资源共同使用，在电机驱动、数字电源转换等应用（照明、开关电源、感应加热）中实现过流和过压保护。

本应用笔记：

- 提供了定时器刹车特性概述，
- 详细说明了定时器刹车输入如何连至不同的刹车源，
- 列举了不同的刹车事件源，
- 提供了 PWM 输出信号响应刹车事件的一些范例。刹车事件来自内部源、外部源或内部及外部刹车信号的组合，
- 显示了如何使用定时器刹车特性和其它内置外设（如比较器、DAC 等）实现过流和过压保护。

本文并不能代替 STM32F30x/STM32F31x 参考手册（RM0316），但应将它看做一个补充材料。

表 1. 适用产品

类型	适用产品
微控制器	STM32F301 系列 STM32F302 系列 STM32F303/313 系列

目录

1	刹车功能概述	5
2	刹车的实现	6
2.1	TIM1/8 刹车实现	6
2.2	TIM15/16/17 刹车实现	8
3	刹车源总结	9
4	示例	10
5	刹车功能与其它 MCU 资源共同使用	13
5.1	刹车功能用于过流保护	13
5.2	刹车功能用于过压保护	13
5.3	外部刹车信号与内部比较器共同使用	15
5.4	过滤刹车输入	17
5.5	锁定所选的配置	18
附录 A	如何用 DAC 定义门限	20
修订历史		21

表格索引

表 1. 适用产品 1

表 2. 刹车输入源 9

表 3. 响应内部 / 外部刹车事件时的 PWM 输出状态场景 10

表 4. 比较器输出内部连至刹车输入 15

表 5. 比较器输出外部连至刹车输入，低刹车极性 15

表 6. 比较器输出外部连至刹车输入，高刹车极性 16

表 7. 寄存器锁定机制 19

表 8. 文档修订历史 21

图片索引

图 1. TIM1 和 TIM8 的刹车特性实现 6

图 2. TIM15、TIM16、TIM17 的刹车特性实现 8

图 3. 使用 STM32F30x/31x 实现的过流保护网络 13

图 4. 使用 STM32F30x/31x 实现的过压保护网络 14

图 5. 外部和内部保护组合概念 17

图 6. 用于锁定的比较器链配置 18

图 7. 反相输入选择 20



1 刹车功能概述

刹车功能可用于 TIM1、TIM8、TIM15、TIM16 和 TIM17 定时器中。这些定时器可生成带有死区时间插入的互补 PWM 信号，用于驱动半桥拓扑中的功率器件。

刹车功能的目的是保护由这些定时器生成的 PWM 信号所驱动的功率器件。当被故障触发时，刹车电路会关闭 PWM 输出，并将其强制设为预定义的安全状态。

TIM1/8 有三个刹车输入（BRK、BRK_ACTH、BRK2），TIM15/16/17 有两个刹车输入（BRK 和 BRK_ACTH）。

在死区时间插入之后，BRK 输入可禁止 PWM 输出（无效状态）或将其强制为预定义的安全状态（有效或无效），这就防止了击穿半桥。BRK2 仅能禁用 PWM 输出（无效状态）。

BRK 优先级高于 BRK2。当两个保护都被触发时，与 BRK 电路相关的预定义安全状态会覆盖与 BRK2 输入相关的无效状态。

典型情况下，永磁 3 相无刷电机驱动将使用如下的保护：

- BRK2 输入作为过流保护，从驱动级打开 6 个开关
- BRK 输入作为过压保护，覆盖过流，关闭 3 个下桥臂开关，以防止发电电流增大母线电压，超过电容耐压值。

例如，对于双电机驱动，比较器 1、2、3 可用于电机 1 三相的过流监测（TIM1 的 BRK2 输入）。比较器 4、5、6 可用于电机 2 三相的过流监测（TIM8 的 BRK2 输入），比较器 7 用于过压监测（驱动 TIM1 和 TIM8 的 BRK 输入）。

BRK_ACTH 输入仅连至内部信号，如 CSS、PVD 输出等。

有关详细信息，请参见 [第 2 章节：刹车的实现](#)。

2 刹车的实现

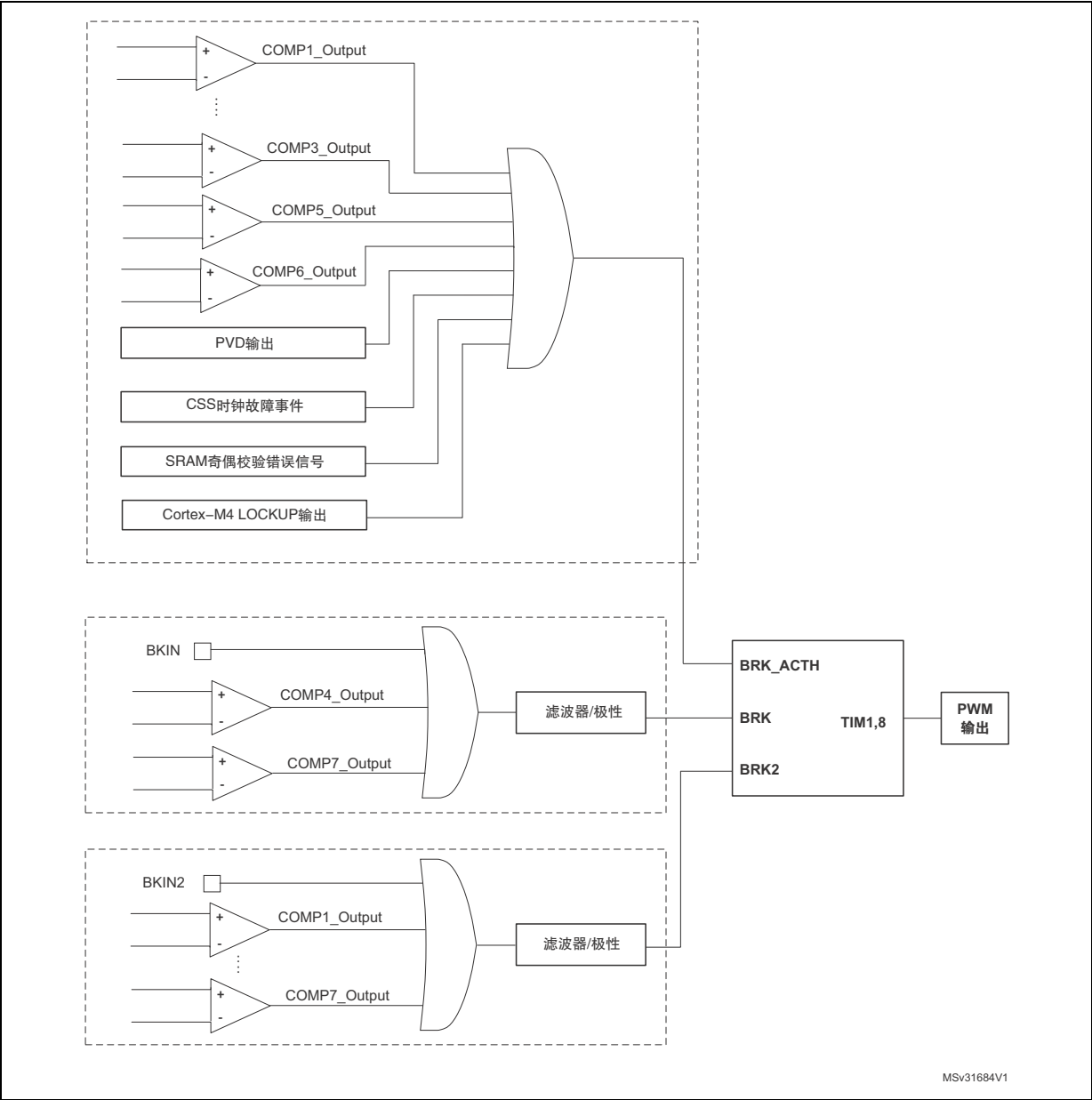
2.1 TIM1/8 刹车实现

TIM1 和 TIM8 有三个刹车输入：

- BRK
- BRK_ACTH
- BRK2

图 1 显示了 TIM1 和 TIM8 的刹车特性实现。

图 1. TIM1 和 TIM8 的刹车特性实现



BRK

若已配置，则 BRK 上的输入信号为 BKIN 引脚上输入信号和所用比较器（4 或 7）输出的逻辑或。

若禁用了 BKIN 复用功能，则刹车信号为比较器（4 或 7）的输出。

当使用 BRK 时，极性选择和滤波特性可用。

BRK_ACTH

此输入仅收集内部信号，它可连至比较器（1、2、3、5、6）输出、CSS、PVD 输出、SRAM 奇偶校验错误和 Hardfault。当使用此输入时，极性选择和滤波特性不可用。它始终为高电平有效。使用与 BRK 相同的位启用 BRK_ACTH（TIMx_BDTR 中的 BKE，x=1，8）。

当使用 BRK_ACTH 作为刹车输入时，极性必须配置为高。否则，不管内部源的刹车信号如何，都不会有 PWM 生成。

若存在多个刹车输入源，则实际输入信号为所有输入信号的或。

在特殊情况下，若内部刹车输入信号连至 BRK_ACTH，外部输入信号通过 BKIN 引脚（启用了 BKIN 复用功能），则实际刹车输入信号为 BKIN 信号和外部刹车信号的或。

BRK2

仅有比较器的输出才可内部连至 BRK2。CSS 和 PVD 等其它输出不可内部连至 BRK2。

BRK2 上的输入信号为 BKIN2 引脚上输入信号和所选比较器输出（COMP1、2、3、4、5、6、7）的逻辑或。若禁用了 BKIN2 复用功能（未使用输入），则实际刹车信号仅与比较器有关。

当使用 BRK2 时，极性选择和滤波特性可用。

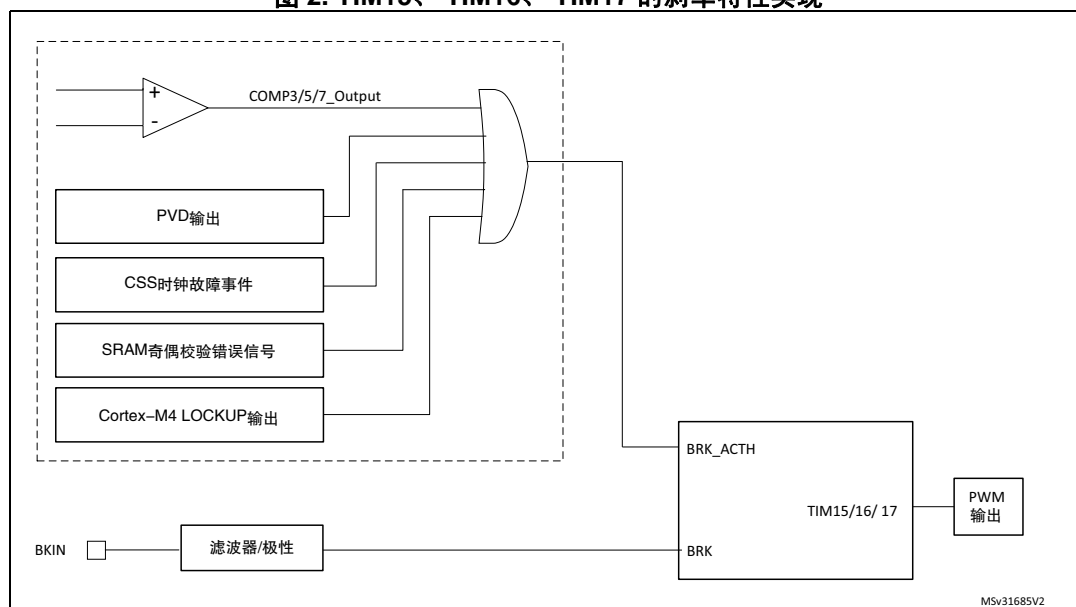
2.2 TIM15/16/17 刹车实现

TIM15、TIM16 和 TIM17 有两个刹车输入：

- BRK
- BRK_ACTH

图 2 显示了 TIM15、TIM16、TIM17 的刹车特性实现。

图 2. TIM15、TIM16、TIM17 的刹车特性实现



BRK

- BRK 上的输入信号为 BKIN 上的输入信号。
- 当使用 BRK 时，极性选择和滤波特性可用。

BRK_ACTH

- 此输入收集内部信号，它可连至比较器 x ($x = 3、5、6$) 输出、CSS、PVD 输出、SRAM 奇偶校验错误和 Hardfault。根据比较器 x 控制寄存器中的 COMPxOUTSEL 位，比较器 x 的输出 ($x = 3、5、7$) 内部连至 TIMy ($y = 15、16、17$) BRK_ACTH 的输入。
- 当使用 BRK_ACTH 作为刹车输入时，极性选择和滤波特性不可用。
- 使用与 BRK 相同的位启用 BRK_ACTH (TIMx_BDTR 中的 BKE, $x = 15、16、17$)。

因此：

- 若仅使用了一个内部刹车源，则在软件中极性必须配置为“高”。
- 若存在多个刹车输入源，则实际输入信号为所有输入信号的或。
- 若既用了内部刹车源又用了 BKIN，则实际刹车信号为 BKIN 引脚信号和内部刹车信号的或。

3 刹车源总结

表 2 总结了可用的刹车源及其到定时器（1、8、15、16、17）刹车输入的外部或内部连接。

表 2. 刹车输入源

	BRK	BRK_ACTH	BRK2
到引脚的外部连接	BKIN	无相应 I/O	BKIN2
内部连接至	对于 TIM1/8 来说，为比较器 4 和 7 TIM15/16/17 NA	<ul style="list-style-type: none"> – CSS 生成的时钟故障事件 – 对于 TIM1/8 来说，为比较器 1、2、3、5、6 – TIM15、16、17 分别为比较器 3、5、7 – PVD 输出 – RAM 奇偶校验错误信号 – Cortex-M4 LOCKUP 输出 (HardFault) 	比较器 1、2、3、4、5、6、7
内部连接情况下的极性特性	可配置：高电平有效或低电平有效	永远为高电平有效	可配置：高电平有效或低电平有效
内部连接情况下的滤波特性	滤波特性可用	滤波特性不可用	滤波特性可用
外部刹车事件情况下的极性特性	可用	NA	可用
外部刹车事件情况下的滤波特性	可用	NA	可用
可用范围	TIM1, 8, 15, 16, 17	TIM1, 8, 15, 16, 17	TIM1, 8
并行外部或 / 和内部刹车源情况下的实际刹车信号	为外部刹车信号和内部信号的或		

4 示例

表 3 显示了响应内部 / 外部刹车事件时，TIMx（其中 x = 1、8、15、16、17）的 PWM 输出状态。

在下面的波形中：

- “PWM” 信号为参考 PWM 波形（在 BRK 保护之前的内部信号）。
- “COMP_OUT” 信号表示 BRK 输入信号，在我们的例子中它是比较器输出。
- “BKIN” 信号为 BKIN 上的输入信号。
- “PWM_BRK” 信号为刹车检测后，定时器输出上的实际 PWM 信号。

表 3. 响应内部 / 外部刹车事件时的 PWM 输出状态场景

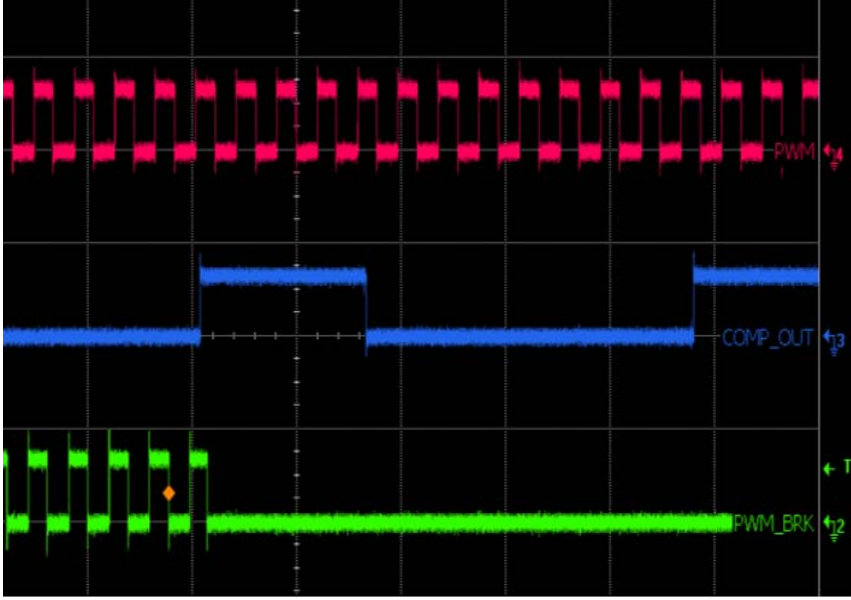
配置	编程的极性	结果
比较器 1 输出内部连至 TIM1 BRK_ACTH, TIM1 BKIN 复用功能禁用。	高	<p>如下面的屏幕截图中所示，当比较器输出为高电平时，PWM 生成停止：</p> 

表 3. 响应内部 / 外部刹车事件时的 PWM 输出状态场景（续）

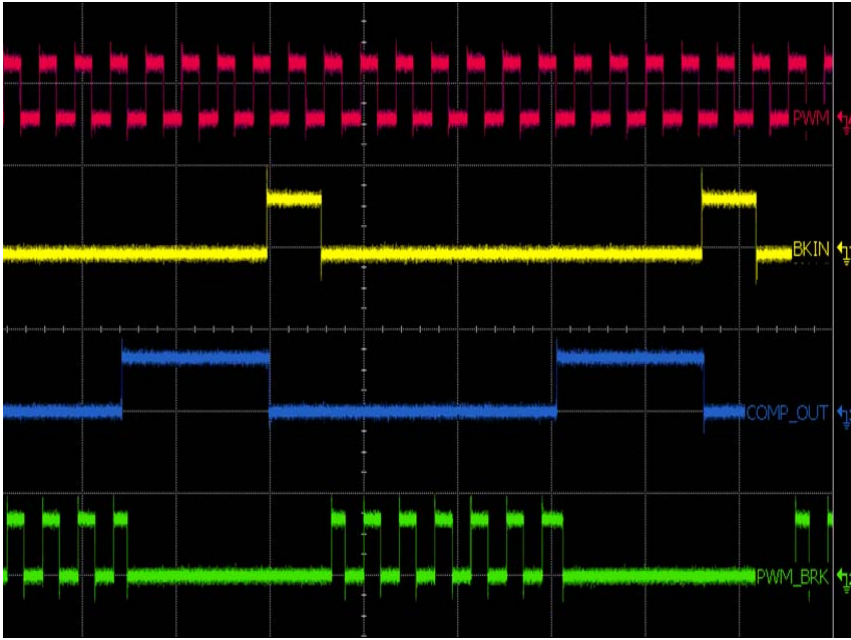
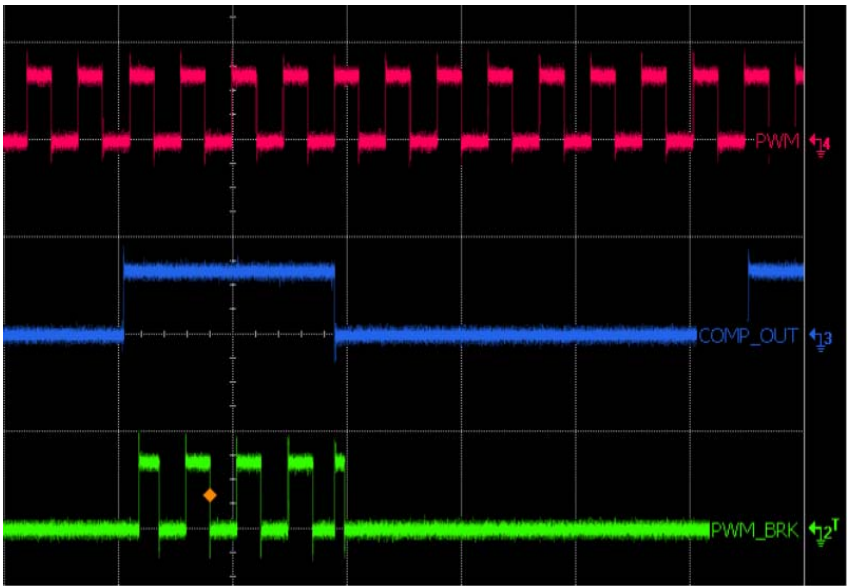
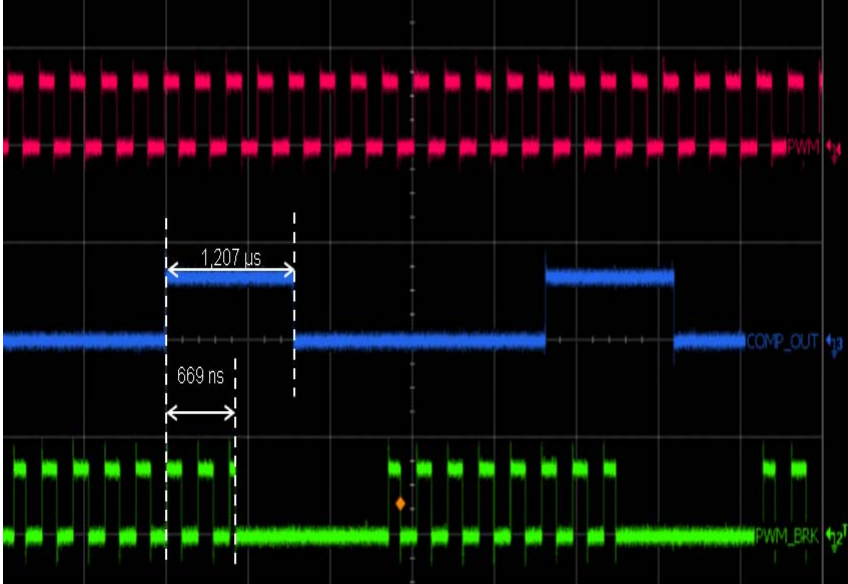
配置	编程的极性	结果
比较器 1 输出内部连至 TIM1 BRK_ACTH, TIM1 BKIN 复用 功能启用。	高 / 低	<p>刹车输入信号为 BKIN 信号和比较器输出的或。下面的屏幕截图显示了一个例子（极性 = 高）：</p>  <p>注：为显示两个刹车源的效果，BDTR 寄存器中的 AOE 位置位，以在下一个更新事件重启 PWM。</p>

表 3. 响应内部 / 外部刹车事件时的 PWM 输出状态场景（续）

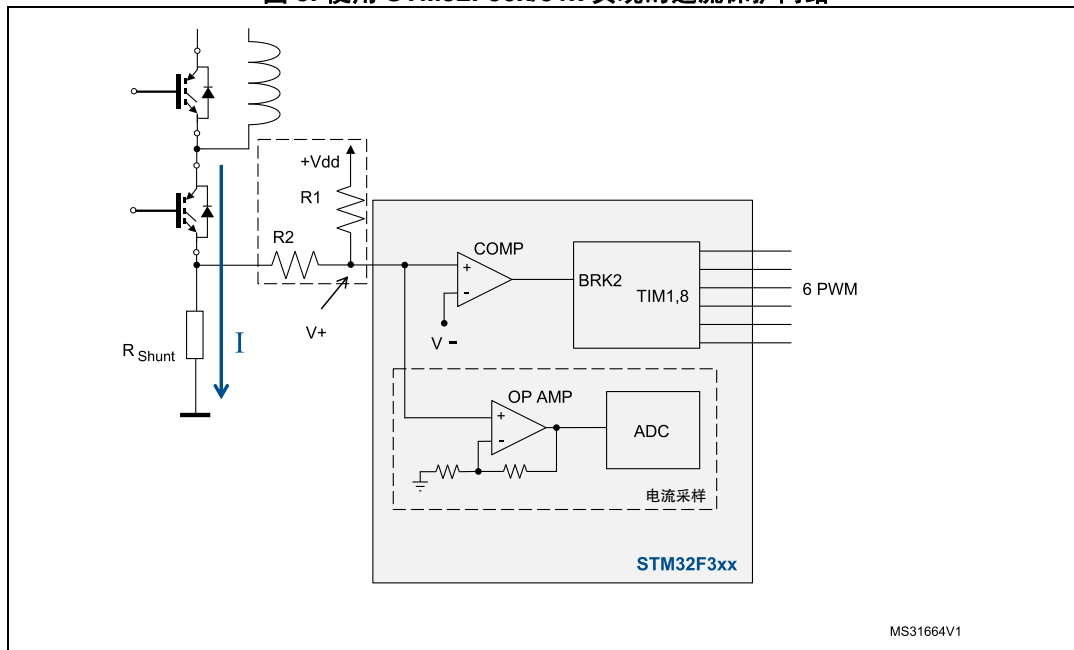
配置	编程的极性	结果
比较器 4 的输出内部连至 TIM1 BRK，未配置滤波。	低	<p>刹车信号低电平期间，PWM 信号停止。</p> 
比较器 4 的输出内部连至 TIM1 BRK，配置了滤波。	高	<p>在滤波持续时间窗口内，即使满足刹车条件，刹车事件也不会影响 PWM 生成。 下例就是这个情况：滤波定义的窗口期间，当刹车信号为高电平时，PWM 信号正常生成。</p> <ul style="list-style-type: none">– 滤波持续时间为 666 ns（BKF = 1000b，滤波持续时间为 $(6 \times 8 / fDTS)$，$fDTS = 72 \text{ MHz}$）。– 比较器输出高电平持续时间为 1.207 μs。 

5 刹车功能与其它 MCU 资源共同使用

5.1 刹车功能用于过流保护

STM32F30x/31x 微控制器内置有一组外设，它们的设计减少了需要的外部元件数目，解决了一般的电机控制问题。本节说明了如何使用这些外设实现过流保护。图 3 显示了可使用 STM32F30x/31x 内部资源实现的过流保护网络。

图 3. 使用 STM32F30x/31x 实现的过流保护网络



此过流保护机制的原理可总结如下：

- 电机的相电流流入逆变器桥的功率晶体管，流过采样电阻 (R_{Shunt})，产生压降 ($V+$)。
- 此压降与表示最大容许电流的门限 ($V-$) 相比较。
- 若超过门限，则刹车信号停止 PWM 生成，将系统置于安全状态。

所有这些行为都可使用 STM32F30x/31x 的内部资源做到，具体资源为内置的比较器和高级定时器刹车功能 (BRK2)。在基本实现中，仅需的外部元件为采样电阻，其电阻值必须依据要监控的电流和采样电阻额定功率而定。

图 3 中的两个虚线框显示了测量电流所需的元件：

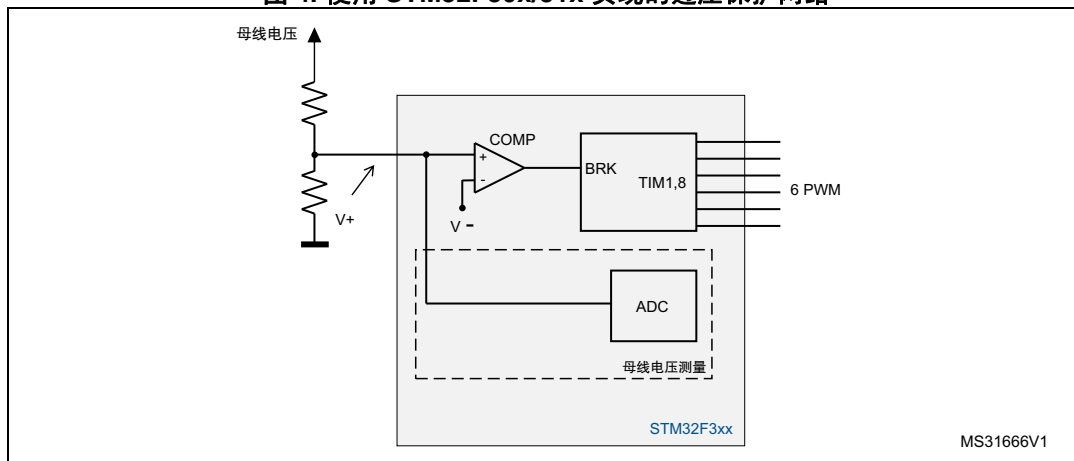
- $R1/R2$ 电阻网络为测量交流电流增加了必要的偏置
- 运算放大器具有内置的增益设置网络

在内置增益设置不够的特殊情况下，可外部实现放大网络。

5.2 刹车功能用于过压保护

图 4 显示了可使用 STM32F30x/31x 内部资源实现的过压保护网络。

图 4. 使用 STM32F30x/31x 实现的过压保护网络



此情况的原理与 [第 5.1 章节](#) 中类似：

- 电阻式分压器提供的信号与母线电压成正比。
- 此读数与过压门限相比较，生成故障信号。
另见： [附录 A: 如何用 DAC 定义门限](#)。
- 若超过门限，则刹车信号停止 PWM 生成，将系统置于安全状态。

如前所述，可使用 STM32F30x/31x 的内部比较器自动执行这些行为。在此情况下，可以使用高级定时器的第二个刹车功能（BRK）以在过流时区分 PWM 信号上执行的行为。

在基本实现中，仅需的外部元件为分压器，其值必须依据目标应用所需的总线电压范围而定，以使它永远不会超过 MCU 的输入最大容许电平。

[图 4](#) 中的虚线框显示了母线电压测量所需的元件。在此情况下，通常不需要放大信号 V+（电阻分压器已调节为全范围读取），因此该信号直接输入到模数转换器。

5.3 外部刹车信号与内部比较器共同使用

通常，在电机控制应用中，门驱动 IC——例如 ST 的 L639x 系列——或智能功率模块（IPM）——例如 ST 的“SLLIMM”（小型低损耗智能功率模块）系列——具有集成的比较器，它可在向微控制器发送刹车信号期间保护逆变器（ST 的“智能关断”功能）。

在本节中我们将看到，可以如 [图 5](#) 中所合合并这两个概念，以便增加冗余，增强“刹车功能”提供的功能安全。

第一种选择是仅由内部比较器触发刹车功能：IC 或 IPM 的刹车信号不连至微控制器，因此节省了引脚。此情况中要设置的配置总结于下表：

表 4. 比较器输出内部连至刹车输入

说明	寄存器	位	配置
TIM1/8 BRK_ACTH/BRK/BRK2 极性	TIMx_BDTR	BKP 或 BK2P	1（高电平有效）
比较器输出极性	COMPx_CSR	COMPxPOL	0（不反相），比较器输入如前面章节中所示连接
TIM1/8 BKIN 和 BKIN2 AF	GPIOxAFRL 或 GPIOxAFRH		BKIN1/2 相关的引脚上不启用 AF
TIM1/8 BRK 和 BRK2 启用	TIMx_BDTR	BKE 或 BK2E	1
COMPx 输出选择	COMPx_CSR	COMPxOUTSEL	0001: TIM1 BRK 或 TIM1 BRK_ACTH ⁽¹⁾ 0010: TIM1 BRK2 0011: TIM8 BRK 或 TIM8 BRK_ACTH ⁽²⁾ 0100: TIM8 BRK2 0101: TIM1 BRK2 + TIM8 BRK2

1. 在 COMP4 和 COMP7 情况下为 TIM1 BRK，在 COMPx，x = 1、2、3、5、6 情况下为 TIM1 BRK_ACTH。

2. 在 COMP4 和 COMP7 情况下为 TIM8 BRK，在 COMPx，x = 1、2、3、5、6 情况下为 TIM8 BRK_ACTH。

与之对应，用户可能更想共同使用外部刹车信号和内部信号：结果为两者的或。根据外部比较器逻辑，可写入的配置总结于下表中：

表 5. 比较器输出外部连至刹车输入，低刹车极性

说明	寄存器	位	配置
TIM1/8 BRK 极性	TIMx_BDTR	BKP	0（低电平有效），它意味着故障期间外部信号为低电平
比较器输出极性	COMPx_CSR	COMPxPOL	0（不反相），比较器输入如前面章节中所示连接
TIM1/8 BKIN AF	GPIOxAFRL 或 GPIOxAFRH		在可用引脚中选择的 BKIN 引脚上启用 AF
TIM1/8 BRK 启用	TIMx_BDTR	BKE	1
COMPx 输出选择	COMPx_CSR	COMPxOUTSEL	0001: TIM1 BRK 0011: TIM8 BRK

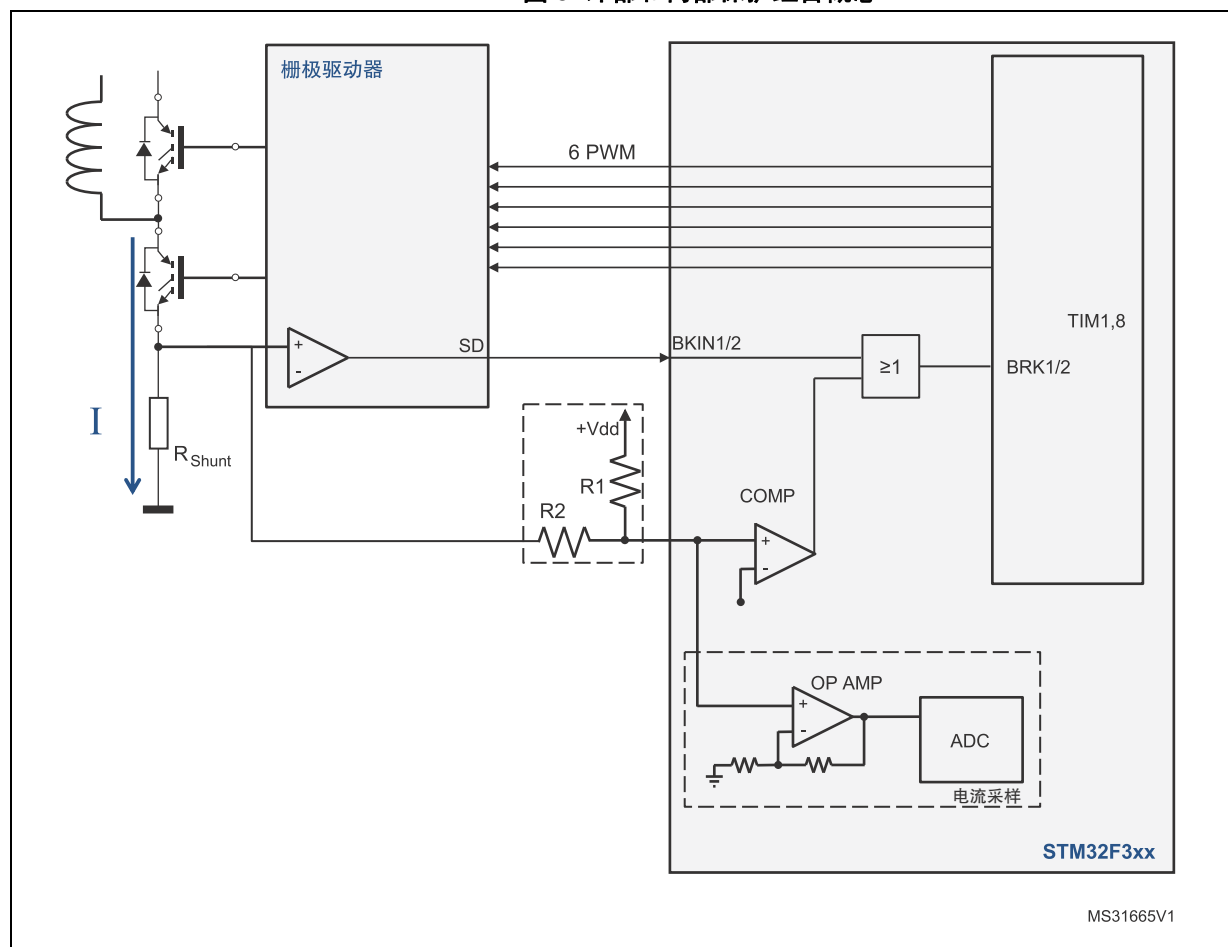
表 6. 比较器输出外部连至刹车输入，高刹车极性

说明	寄存器	位	配置
TIM1/8 BRK/BRK2 极性	TIMx_BDTR	BKP 或 BK2P	1（高电平有效），它意味着故障期间外部信号为高电平
比较器输出极性	COMPx_CSR	COMPxPOL	0（不反相），比较器输入如前面章节中所示连接
TIM1/8 BKIN/BKIN2 AF	GPIOxAFRL 或 GPIOxAFRH		在可用引脚中选择的 BKIN/BKIN2 引脚上启用 AF
TIM1/8 BRK/BRK2 启用	TIMx_BDTR	BKE 或 BK2E	1
COMPx 输出选择	COMPx_CSR	COMPxOUTSEL	0001: TIM1 BRK 0010: TIM1 BRK2 0011: TIM8 BRK 0100: TIM8 BRK2 0101: TIM1 BRK2 + TIM8 BRK2

也可选择性地启用比较器输出，作为相关 GPIO 引脚上的复用功能。它使用推挽或开漏模式，用到其它器件的信号或调试目的。



图 5. 外部和内部保护组合概念



5.4 过滤刹车输入

可编程滤波可用于防止高级定时器的刹车功能被意外事件（例如开关噪声）触发。

数字滤波特性在 BRK 和 BRK2 上可用，在 BRK ACTH 上不可用。

这意味着数字滤波:

- 当刹车源为外部，且来自外部输入 BKIN/BKIN2 时可用，
- 当刹车源为内部，且连至 BRK 或 BRK2 时可用，
- 当刹车源为内部，且连至 BRK_ACTH 时不可用。

5.5 锁定所选的配置

由于故障可能导致损害，需要电机驱动有高水平的可靠性和健壮性。

为增加健壮性，防止软件失控，STM32F3 的一系列外设实现了锁定特性，包括用于比较器感应的 GPIO 引脚模式、运算放大器（opamp）、高级定时器、用于驱动的 GPIO 引脚，如图 6 中所示。

特别是可使用 TIMx_BDTR 寄存器中的 LOCK 位锁定 BRK 和 BRK2 配置。至少建议 LOCK 等级 1，在下次复位前冻结 TIMx_BDTR 寄存器中的 DTG/BKE/BKP/AOE/BKF/BK2F/BK2E/BK2P 位，以及 TIMx_CR2 寄存器中的 OISx/OISxN 位。

图 6. 用于锁定的比较器链配置

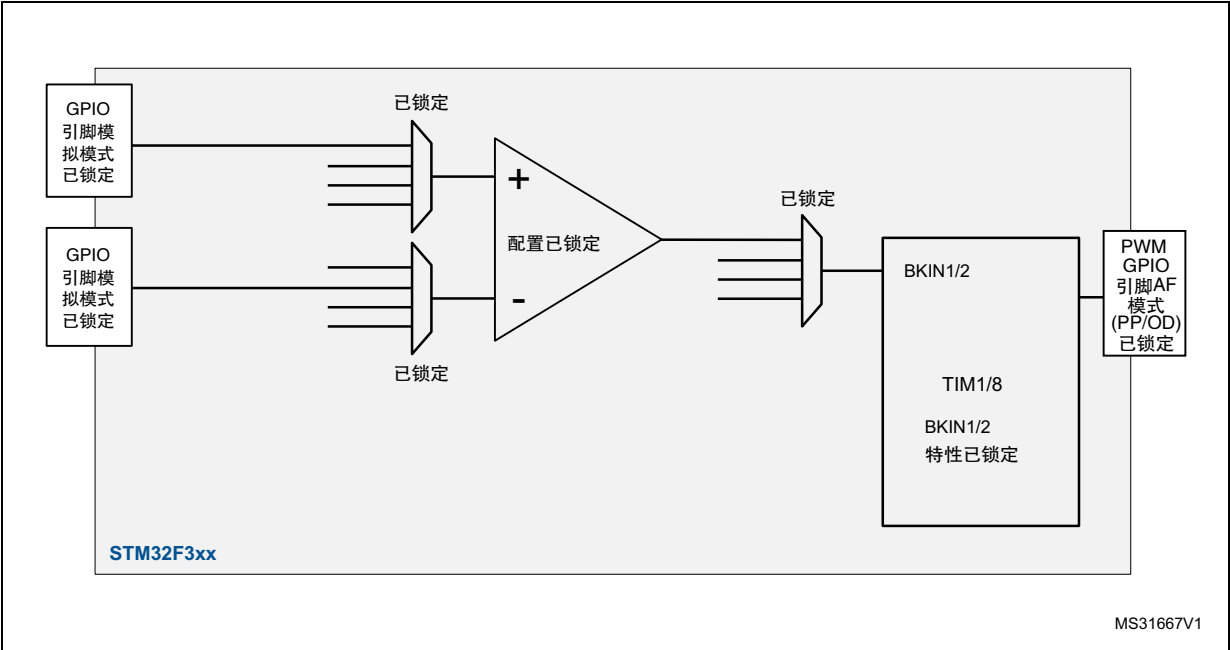


表 7 总结了比较器的建议设置。

表 7. 寄存器锁定机制

外设	特性	寄存器	备注
GPIO 端口 x, 引脚 y	反相输入, 引脚模式选择	GPIOx_MODER 寄存器, MODERy 位配置为“模拟模式”	
GPIO 端口 x, 引脚 y x= A、B、D	反相输入, 引脚配置锁定	GPIOx_LCKR 寄存器, LCKy 位专用于写序列编码	MODERy 位（在 GPIOx_MODER 寄存器中）在下次复位前冻结
GPIO 端口 w, 引脚 z	非反相输入, 引脚模式选择	GPIOw_MODER 寄存器, MODERz 位配置为“模拟模式”	若选择内部参考则不需要
GPIO 端口 w, 引脚 z w= A、B、D	非反相输入, 引脚配置锁定	GPIOw_LCKR 寄存器, LCKz 位专用于写序列编码	MODERz 位（在 GPIOw_MODER 寄存器中）在下次复位前冻结
TIMER 1/8	BKIN / BKIN2 配置锁定	TIMx_BDTR 寄存器, LOCK 位	建议（至少）为 LOCK 级别 1, 在下次复位之前冻结 TIMx_BDTR 寄存器中的 DTG 位、TIMx_CR2 寄存器中的 OISx 和 OISxN 位以及 TIMx_BDTR 寄存器中的 BKE/BKP/AOE 位

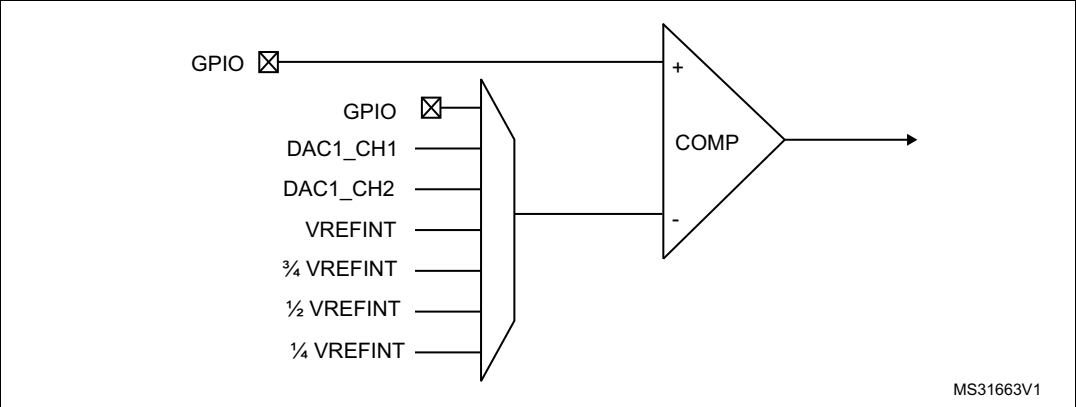
附录 A 如何用 DAC 定义门限

关于图 3 和图 4 中所示的网络，适当设置比较器反相输入电压（V-）以定义过流保护和过压保护门限电平至关重要。

如下面的图 7 中所示，在 STM32F30x/31x 微控制器中可将三个不同的源设置为比较器的反相输入：

- 外部参考（GPIO）
- 固定的内部参考（Vref、3/4 Vref、1/2 Vref、1/4 Vref）
- 可编程的内部参考（DAC）

图 7. 反相输入选择



实例：使用偏置网络的过流保护

这是图 3 中存在虚线框内元件的情况。在此情况下，计算过流门限的公式如下：

公式 1

$$I_{th} = \frac{V^- - \left(V_{dd} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)}{R_{shunt} \times \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)}$$

通常 R_1 和 R_2 的值用于满足电流测量的需要。很明显，为 V^- 使用内部参考会导致门限值 I_{th} 与所需的值不完全相符。此实例说明，仅当不需要精细调节过流门限时，才可使用内部参考。否则，需要使用外部参考或可变内部参考。建议使用后者，因为它不需要任何外部元件。

STM32F30x/31x 微控制器包含两个 12 位 DAC 通道，可用于此目的。对于三相电机驱动，可对三个逆变器输入都设置相同的 DAC 通道，以对三个比较器分组，保护逆变器桥的每个腿都免受过流。

对于双电机控制可使用同样的方法，也可分别为每个电机单独定义保护电平。



修订历史

表 8. 文档修订历史

日期	修订	变更
2013 年 11 月 25 日	1	初始版本。

请仔细阅读：

中文翻译仅为方便阅读之目的。该翻译也许不是对本文档最新版本的翻译，如有任何不同，以最新版本的英文原版文档为准。

本文档中信息的提供仅与 ST 产品有关。意法半导体公司及其子公司（“ST”）保留随时对本文档及本文所述产品与服务进行变更、更正、修改或改进的权利，恕不另行通知。

所有 ST 产品均根据 ST 的销售条款出售。

买方自行负责对本文所述 ST 产品和服务的选择和使用，ST 概不承担与选择或使用本文所述 ST 产品和服务相关的任何责任。

无论之前是否有任何形式的表示，本文档不以任何方式对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。如果本文档任何部分涉及任何第三方产品或服务，不应被视为 ST 授权使用此类第三方产品或服务，或许可其中的任何知识产权，或者被视为涉及以任何方式使用任何此类第三方产品或服务或其中任何知识产权的保证。

除非在 ST 的销售条款中另有说明，否则，ST 对 ST 产品的使用和 / 或销售不做任何明示或默示的保证，包括但不限于有关适销性、适合特定用途（及其依据任何司法管辖区的法律的对应情况），或侵犯任何专利、版权或其他知识产权的默示保证。

意法半导体的产品不得应用于武器。此外，意法半导体产品也不是为下列用途而设计并不得应用于下列用途：（A）对安全性有特别要求的应用，例如，生命支持、主动植入设备或对产品功能安全有要求的系统；（B）航空应用；（C）汽车应用或汽车环境，且 / 或（D）航天应用或航天环境。如果意法半导体产品不是为前述应用设计的，而采购商擅自将其用于前述应用，即使采购商向意法半导体发出了书面通知，采购商仍将独自承担因此而导致的任何风险，意法半导体的产品规格明确指定的汽车、汽车安全或医疗工业领域专用产品除外。根据相关政府主管部门的规定，ESCC、QML 或 JAN 正式认证产品适用于航天应用。

经销的 ST 产品如有不同于本文档中提出的声明和 / 或技术特点的规定，将立即导致 ST 针对本文所述 ST 产品或服务授予的任何保证失效，并且不应以任何形式造成或扩大 ST 的任何责任。

ST 和 ST 徽标是 ST 在各个国家或地区的商标或注册商标。

本文档中的信息取代之前提供的所有信息。

ST 徽标是意法半导体公司的注册商标。其他所有名称是其各自所有者的财产。

© 2015 STMicroelectronics 保留所有权利

意法半导体集团公司

澳大利亚 - 比利时 - 巴西 - 加拿大 - 中国 - 捷克共和国 - 芬兰 - 法国 - 德国 - 中国香港 - 印度 - 以色列 - 意大利 - 日本 - 马来西亚 - 马耳他 - 摩洛哥 - 菲律宾 - 新加坡 - 西班牙 - 瑞典 - 瑞士 - 英国 - 美国

www.st.com