

## 前言

STM32L0x 系列基于 ARM Cortex<sup>TM</sup>-M0+ 的产品属于意法半导体超低功耗延续产品，丰富了众所熟知的 8 位 STM8Lx 系列和基于 32 位 ARM Cortex<sup>TM</sup>-M3 的微控制器，提供了新的外设封装尺寸。

两个微控制器系列产品都是基于 ST 获得专利的 110 nm 超低泄漏工艺，具有多种模拟和数字外设，简化了从一种结构到另一种结构的过渡，使得用户可以利用在一个平台所需要的知识。

本应用笔记描述了 STM32L0xx 系列产品关键的低功耗特性，说明了其在主要关注能耗的应用中的优势。

**重要提示：**本文档并不能取代 STM32L0xx 数据手册。本文中给出的所有数值仅作参考。请参考相关的数据手册来获取有效的最新特性数据。

## 目录

1	STM32L0xx 主要特性 .....	5
2	高能效处理 .....	6
3	多种低功耗模式 .....	7
4	一组为低功耗而裁剪的外设 .....	8
5	丰富的时钟管理 .....	11
6	超安全电源监控 .....	13
7	结论 .....	14
8	版本历史 .....	15

## 表格索引

表 1.	STM32L0xx 低功耗模式概览	7
表 2.	功能取决于工作模式（从运行 / 激活到待机）	9
表 3.	STM32L0xx 时钟源特性（初步数据）	11
表 4.	文档版本历史	15
表 5.	中文文档版本历史	15

## 图片索引

图 1. STM32L0xx 性能与 VDD 和 VCORE 范围的关系 ..... 6

## 1 STM32L0xx 主要特性

在备受赞誉的 STM32F0x 和 STM32L1 系列产品的雄厚基础上，STM32L0xx 加入了多种创新，能够使不同配置下的功耗减到最小，同时保留大部分现有外设并保持准引脚兼容。

对于给定的制造工艺和晶片区域，微控制器的功耗主要取决于两个因素（动态可控）：电压和频率。在 STM32L0xx 器件中，内部低压降压器为大部分的逻辑电路提供了一个固定电压：确保无论电源电压是多少（可能随着便携式电池供电的产品寿命而降至 1.65 V），功耗都能保持最小。

如果我们考虑时钟源，则多个级联的时钟预分频器、门控技术和逐个外设时钟管理允许在适当的频率下只激活必要的逻辑门。这是当前针对降低运行模式下功耗通用的设计原则。

STM32L0xx 在此方向上做了更多努力，实现了电压调节，可达到更高的处理效率。

但是，要满足所有的超低功耗要求，不能仅仅关注运行时间：对于大部分应用，挑战是在该模式下花费最少的时间和能量，并寻找合适的低功耗模式。

改进措施不仅仅包括优化深度睡眠模式，可消除其每十 nA 的泄漏。系统也通过具有 7 个低功耗模式和一组能够调整为低功耗的外设得到了完善（例如日历实时钟和玻璃 LCD 控制器）。这些内容在后面有详细描述。

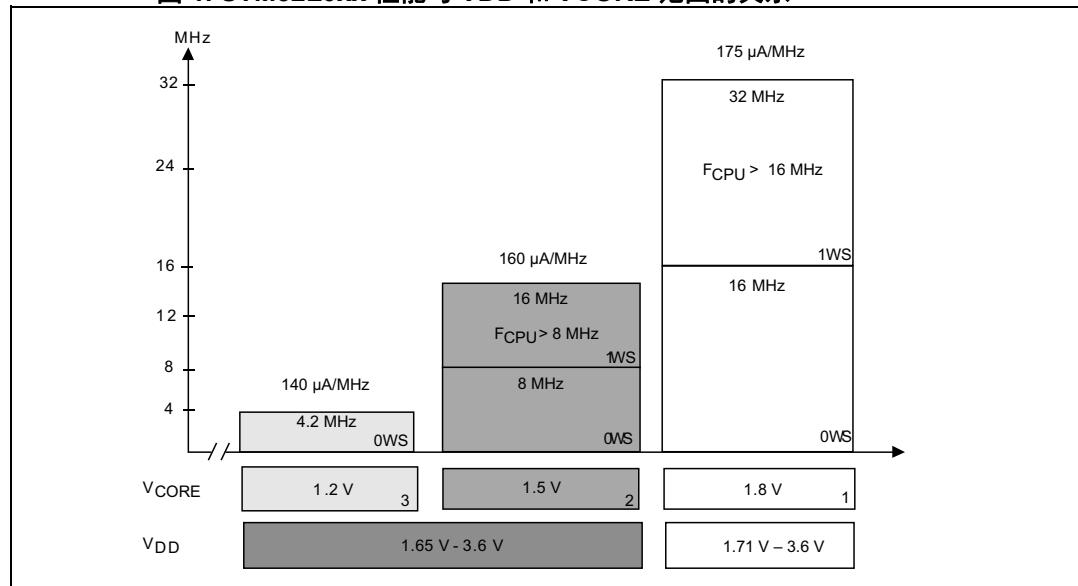
## 2 高能效处理

STM32L0 围绕工业标准 32 位内核 Cortex-M0+ 构建，在众多其他标准中，它针对低功耗应用而设计。

Cortex-M0+ 具有领先的性能和代码密度。虽然性能与低电流消耗无直接关系，但它是大多数低功耗应用（须周期唤醒来执行软件任务）的主要优势。这种情况下，Cortex-M0+ 因其处理性能而在运行模式的时间更少，因此可以使深度睡眠模式的时间达到最长。如果我们仅考虑处理能耗（用 mA/DMIPS 表示，DMIPS 代表 Dhrystone MIPS，采用公共基准 Rev 2.0 测量），Cortex M0+ 的性能明显优于其他架构（尤其是 16 位微控制器）的性能。

由于性能（用 DMIPS/MHz 表示）由内核及其存储器接口给出，则通过电压调节，可使处理能耗（用 mA/DMIPS 表示）达到最大。这种方法（也称为欠压）包括动态调节内部逻辑供电电压与工作频率。STM32L0xx 提供了 3 个动态可选电压范围，如下图所示，从 1.8 V（范围 1）至 1.2 V（范围 3），可在能耗上提供超过 25% 的增益。

图 1. STM32L0xx 性能与 VDD 和 VCORE 范围的关系



一个典型例子是具有 USB 设备功能的便携式医疗设备。

如果它在单机模式下工作，那么 4 MHz 足够用来获取和处理来自模拟前端的数据。这种情况下，内部逻辑可仅用 1.2 V 供电。

但是，当系统连接到 PC 的 USB 接口时，执行 USB 软件堆栈需要更多的处理功率：这种情况下，可将设备置于“高性能模式”，此模式下内部电压为 1.8 V。然后它能够以 32 MHz 执行代码，同时 USB 外设由 48-MHz 时钟驱动。可利用电压调节来处理这两种工作模式的矛盾，而无需妥协动态电流消耗性能。

### 3 多种低功耗模式

在更高的架构级上来看，可进入低功耗模式（7种低功耗模式的某一种）来调节 STM32L0 的功耗。通过逐步禁用与频率无关的电流源（时钟源，非易失性存储器和调压器），直至大部分芯片掉电，可以降低功耗功耗。下表概括了每种模式的特点并显示了电流消耗。

表 1. STM32L0xx 低功耗模式概览

低功耗模式	电流消耗	CPU	Flash / EEPROM	RAM	DMA & 外设	时钟	LCD	RTC
睡眠	41 $\mu$ A/MHz (范围 1)	无	启动	启动	ACTIVE	任意	可用	
	36 $\mu$ A/MHz (范围 2)							
	35 $\mu$ A/MHz (范围 3)							
低功耗运行	8.55 $\mu$ A (闪存 OFF, 32 kHz)	有	ON 或 OFF	启动	ACTIVE	MSI	可用	
低功耗睡眠	4.65 $\mu$ A (外设关)	无	关闭	启动	ACTIVE	MSI	可用	
停止 有 RTC	0.82 $\mu$ A (1.8 V)	无	关闭	启动	冻结	LSE, LSI	关闭	启动
	1.0 $\mu$ A (3 V)							
停止	415 nA	无	关闭	启动	冻结	-	关闭	关闭
待机 有 RTC	655 nA (3 V)	关闭	关闭	关闭	关闭	LSE	关闭	启动
	845 nA (1.8 V)							
待机	290 nA	关闭	关闭	关闭	关闭	-	关闭	关闭

除了 STM32F 模式，STM32L0xx 上还实现了两种新的模式：低功耗运行和低功耗睡眠模式。它们为应用提供了具有极低电流消耗的运行和睡眠模式功能，这种情形下一些外设不能关闭，或者 CPU 持续低速工作以使电流变化最小。可使用几种功能模块实现极低电流：

- 调压器处于低功耗（LP）模式以降低其静态电流。
- 可关闭非易失性存储器，在 8-KB RAM 上工作
- 主时钟源来自于 MSI 内部 RC 振荡器，它能够降低至 1.5  $\mu$ A。

调压器能够在 LP 模式下实现的最大电流仅限制了工作频率和它能够激活的外设数量。

## 4 一组为低功耗而裁剪的外设

需要特别注意多个外设，因为它们的本征高能耗，或因为它们始终上电。

STM32L0xx 内嵌有一个 12-bit / 1.14 MSps 的 ADC。这个快速而精确的转换器速率最大时具有  $300 \mu\text{A}$  的典型功耗，如果保持连续上电的话，可能会损坏电池寿命。由于 ADC 功耗与采样频率近似成比例，从功耗角度看，应用可以在两种解决方案之中进行选择，要么进行低速采样以限制最大电流，要么最高速率采样以便能够快速进入超低功耗模式。

当进行慢速采样时，ADC 自身功耗可能降至几十  $\mu\text{A}$ ，大大限制了最大电流。当电源提供有限的电流时，这可能是强制的。如果这段时间内 CPU 没有其他任务要执行，那么坏处可能是相比处于超低功耗模式（停止或待机）的时间，处于运行或睡眠模式（或者是低功耗运行或低功耗睡眠模式）的时间增加了。

当进行高速采样时，由于有自动关机模式，ADC 能够很快进入低功耗模式，而只要进行采样处理，微控制器就能进入超低功耗模式。

开发的 7 种外设即便在停止模式下（此模式下系统时钟停止，主振荡器和存储器掉电）也能持续工作。

- 可用一对超低功耗比较器来监测模拟电压此时比较器电流消耗最低  $3\mu\text{A}$ 。一旦外部电压达到所选阈值，这两个比较器就能唤醒 MCU，并且它们可以一起组成一个窗口比较器。其中一个比较器具有轨到轨输入能力，并且其输出可重新输送到通用的计时器中。
- RTC 外设提供了具有两个报警（闹铃）的时钟 / 日历，包括一个周期性唤醒单元和多个特殊应用功能（时间戳、篡改检测 .....）。它能够在最低功耗模式（待机，该模式下大部分芯片是断电的）下保持使能，并能在发生报警或检测到篡改（举例）时唤醒全部 MCU 电路。它还包含了 80 字节的备份寄存器，用来存储退出待机模式时的上下文信息。该外设采用异步设计技术来设计，可以最小化其功耗（低于  $1 \mu\text{A}$ ）。
- 由于具有低电流消耗、价格低廉且易于定制，玻璃 LCD 是低功耗应用中最常见的显示设备之一。STM32L0xx 包含了一个通用的 LCD 控制器，能够驱动具有多达 8 条公用线和 32 个区段的显示设备，具有单独选择 I/O 端口（为了最大化利用芯片可选功能而被分配给 LCD）的能力。它还控制着可选内部升压转换器，以在大范围的  $V_{DD}$  值下维持 LCD 对比度，并且功耗低至  $5 \mu\text{A}$ （不包括 LCD 消耗）。
- 低功耗定时器（LPTIM）是一个 16 位定时器，可从降低功耗的最新发展中受益。由于 LPTIM 的时钟源具有多样性，因此无论选择哪种功耗模式，都能够保持运行。即使没有内部时钟源，LPTIM 也能运行，鉴于这一点，可将其用作“脉冲计数器”，这种脉冲计数器在某些应用中十分有用。此外，LPTIM 还能将系统从低功耗模式唤醒，因此非常适合实现“超时功能”，而且功耗极低。LPTIM 引入了一个灵活的时钟方案，该方案能够提供所需的功能和性能，同时还能最大程度地降低功耗。

- 低功耗通用异步收发器 (LPUART) 是一种 UART，允许有限功耗下双向 UART 通信。仅需 32.768 kHz LSE 时钟即可进行高达 9600 baud/s 的 UART 通信。当 LPUART 由与 LSE 时钟不同的时钟源计时，可以达到更高的波特率。即使当微控制器处于深度停止模式，能耗极低时，LPUART 也会等待 UART 帧的到来。LPUART 包含所有必要的硬件支持，使在最小功耗下可以进行异步串行通信。
- 被寻址时，I2C 能够从停止模式中唤醒 MCU (APB 时钟关断)。支持所有寻址模式。对于 I2CCLK，必须选择 HSI16 振荡器作为时钟源，以便从 STOP 中唤醒。在停止模式中，HSI16 关闭。当检测到 START 时，I2C 接口将 HSI16 接通，并延长 SCL 使其处于低电平直到唤醒 HSI16。HSI16 随后用来接收地址。地址匹配的情况下，MCU 唤醒时间内，I2C 延长 SCL 使其处于低电平。当软件声明 ADDR 标志时，此延长被释放，传输正常进行。如果地址不匹配，HSI16 再次关断，MCU 不被唤醒。
- 当 USART 时钟为 HSI16 或 LSE 时，USART 能够将 MCU 从停止模式中唤醒。有多种 (将 MCU) 从停止模式中唤醒的源可供选择：
  - 地址匹配时唤醒
  - 检测到 Start 位时唤醒
  - RXNE 时唤醒。

表 2. 功能取决于工作模式 (从运行 / 激活到待机)

IP	Run/Active	睡眠	低功耗运行	低功耗睡眠	停止		待机	
						唤醒能力		唤醒能力
CPU	是	-	是	-	-	-	-	-
Flash 存储器	是	是	是	N	-	-	-	-
RAM	是	是	是	是	是	-	-	-
备份寄存器	是	是	是	是	是	-	是	-
EEPROM	是	-	是	是	是	-	-	-
欠压复位 (BOR)	是	是	是	是	是	是	是	-
DMA	是	是	是	是	-	-	-	-
可编程电压检测器 (PVD)	是	是	是	是	是	是	是	-
上电复位 (POR)	是	是	是	是	是	是	是	-
上电复位 (POR)	是	是	是	是	是	是	是	-
掉电复位 (PDR)	是	是	是	是	是	-	是	-
高速内部时钟 (HSI16)	是	是	-	-	-	-	-	-
高速外部时钟 (HSE)	是	是	-	-	-	-	-	-
低速内部时钟 (LSI)	是	是	是	是	是	-	-	-
低速外部时钟 (LSE)	是	是	是	是	是	-	-	-
多种速率内部时钟 (MSI)	是	是	是	是	-	-	-	-

表 2. 功能取决于工作模式（从运行 / 激活到待机）（续）

IP	Run/Active	睡眠	低功耗运行	低功耗睡眠	停止		待机	
						唤醒能力		唤醒能力
Inter-Connect 控制器	是	是	是	是	-	-	-	-
RTC	是	是	是	是	是	是	是	-
RTC 入侵	是	是	是	是	是	是	是	是
自动唤醒 (AWU)	是	是	是	是	是	是	是	是
USART	是	是	是	是	是	是	-	-
LPUART	是	是	是	是	是	是	-	-
SPI	是	是	是	是	-	-	-	-
I2C	是	是	是	是	-	是	-	-
ADC	是	是	-	-	-	-	-	-
DAC	是	是	是	是	是	-	-	-
温度传感器	是	是	是	是	是	-	-	-
比较器	是	是	是	是	是	是	-	-
16 位和 32 位定 时器	是	是	是	是	-	-	-	-
LPTIMER	是	是	是	是	是	是	-	-
IWDG	是	是	是	是	是	是	是	是
WWDG	是	是	是	是	-	-	-	-
触摸感应控制器 (TSC)	是	是	-	-	-	-	-	-
SysTick 定时器	是	是	是	是	-	-	-	-
GPIO	是	是	是	是	是	是	-	2 个引脚
运行模式唤醒时 间	0 $\mu$ s	0.36 $\mu$ s	3 $\mu$ s	32 $\mu$ s	3.5 $\mu$ s		50 $\mu$ s	
功耗 $V_{DD}$ =1.8 至 3.6 V (典型 值)	低至 140 $\mu$ A/MHz (从 闪存)	低至 37 $\mu$ A/MHz (从 闪存)	低至 8 $\mu$ A	低至 4.5 $\mu$ A	0.4 $\mu$ A (无 RTC) $V_{DD}$ =1.8 V		0.28 $\mu$ A (无 RTC) $V_{DD}$ =1.8 V	
					0.8 $\mu$ A (有 RTC) $V_{DD}$ =1.8 V		0.65 $\mu$ A (有 RTC) $V_{DD}$ =1.8 V	
					0.4 $\mu$ A (无 RTC) $V_{DD}$ =3.0 V		0.29 $\mu$ A (无 RTC) $V_{DD}$ =3.0 V	
					1 $\mu$ A (有 RTC) $V_{DD}$ =3.0 V		0.85 $\mu$ A (有 RTC) $V_{DD}$ =3.0 V	

## 5 丰富的时钟管理

复位和时钟控制器（RCC）外设管理 STM32L0 的 5 个可用时钟源。

两个外部振荡器使应用能获得高精度：

- HSE 时钟（4-24 MHz 的高速外部时钟），通常用于馈送 PLL，并产生 32 MHz 的 CPU 时钟频率和用于 USB 控制器的 48-MHz 频率。
- LSE（典型的 32.768 kHz 低速外部时钟）一般用于为实时时钟提供低功耗时钟源，不过也能用作 LCD 时钟。

对于多种不同的任务，有 4 个内部振荡器可供选择：

- LSI 时钟（37 kHz 低速内部时钟）是低精度超低功耗源，能够馈送实时时钟（精度有限）、LCD 控制器和独立看门狗
- HSI16 时钟（16 MHz 高速内部时钟）是高速电压补偿振荡器
- HSI48 时钟（48 MHz 高速内部时钟）是高速电压可控振荡器，因为有 LSE 或 USB 帧信号起始因此能够自动调整。它用于实现无晶振 USB 功能
- MSI 时钟（64 kHz 至 4.2 MHz 多种速率内部时钟）是中等精度振荡器，具有可调的频率和低电流消耗。它的工作电流与频率成比例，以便最小化内部振荡器在低 CPU 频率下的功耗开销。

下表总结了各种振荡器的特性和用途。

表 3. STM32L0xx 时钟源特性（初步数据<sup>(1)</sup>）

时钟源	用途	频率	电流消耗 (典型值)	精度	工厂 修调	用户 可修调
HSE	主时钟 (+ RTC & LCD)	1-24 MHz	0.5 到 0.7 mA	取决于晶振，低至几 十 ppm	不适用	
LSE	RTC 和 LCD	32.768 kHz (典型值)	0.45 $\mu$ A (1.8 V) 0.6 $\mu$ A (3 V)	取决于晶振，低至数 ppm		
HSI16	主时钟	16 MHz	100 $\mu$ A	典型值 0.4% <sup>(2)</sup>	有	有
HSI48	USB, 随机数发生器	48 MHz	300 $\mu$ A	适应 USB 需要	$\pm$ 1.7%	$\pm$ 0.1%
MSI	主时钟	65.5 kHz 131 kHz 262 kHz 524 kHz 1.05 MHz 2.1 MHz 4.2 MHz	0.75 $\mu$ A 1.0 $\mu$ A 1.5 $\mu$ A 2.5 $\mu$ A 4.5 $\mu$ A 8.0 $\mu$ A 15 $\mu$ A	典型值 0.5% <sup>(2)</sup>	有	有
LSI	RTC, LCD & 独立 WDG	38 kHz	0.4 $\mu$ A (3 V)	-30% 至 +50% <sup>(3)</sup>	无	无, 但是可测量 $f_{LSI}$

1. 根据初步特征分析或设计仿真。有关详细的电气特性，请参考产品数据手册

2. 修调后所达到的精度。有关低电压和温度漂移的详细内容，请参考产品数据手册

3. 初始测量后，有 -10% 至 +4% 的漂移

在成本敏感的应用中，晶体振荡器的价格可能无法忽略。出于这个原因，STM32L0xx 提供了多种选择来测量内部振荡器。

尽管 HSI16 和 MSI 是工厂修调的，但它们能在运行时间内进一步修调 0.5% 个单位，以补偿因温度和电压变化引起的频率偏移。同样地，利用更高精度的时钟参考，能够估计和补偿 LSI 的制造过程偏差，不管是内部（HSI16）还是外部（LSE 或 HSE）。

例如，在 RTC 使用 32.768 kHz 晶振的应用中，使用低功耗 MSI 振荡器，它能为 CPU 提供高达 4 MHz 的时钟频率，典型功耗为 20  $\mu$ A。利用 LSE 晶振高精度（通常为几十 ppm）的优势，能够确定具有同样精度的 MSI 频率，并对它进行实时修调。

## 6 超安全电源监控

STM32L0xx 含有一个精细的电源监控模块，具有多个可编程选项。该模块在上电 / 掉电过程和运行时间阶段中都是激活的。

上电是个临界阶段，这种情况下内部电路各部分必须顺序启动，关键参数（如工厂修调值或选项字）必须（甚至要在用户复位阶段之前）从非易失性存储器中恢复出来，进行 MCU 初始化。这期间  $V_{DD}$  可能被来自电池接入点或因弱电源产生的故障而改变。

超安全上电复位电路能够确保只要  $V_{DD}$  超过 1.8 V 就释放复位，而不论  $V_{DD}$  上升阶段的斜率是多少，因此程序运行开始时该电路处于其正常工作状态中。

当上电过程完成，用户就能够选择激活或不激活欠压复位（BOR）检测器来进行连续电池监测，并从 5 个阈值中进行选择。此选项存储在非易失性存储器中，使得此电源监管完全独立于软件。可通过一个 7 级可编程电压检测器（PVD）完成，（该检测器）由软件使能，在发生压降时生成预先中断。

连续供电时 BOR 和 PVD 模块的电流消耗都低于 3  $\mu$ A，但是处于深度睡眠模式时仍有明显的消耗。如果需要，可对电压监管模块进行编程，使深度睡眠模式中 BOR 和 PVD 禁用，并在发生唤醒事件时再次自动使能。这可使应用在空闲模式时电流消耗达到最小（因为存在极轻负载，通常具有一个略高且极稳定的供电）。但是，这无损再次开始执行时的安全性。

STM32L0 是市场上几种标准 MCU 之一，工作范围低至 1.65 V，且只有很少的限制（ADC 和 DAC 需要 1.8 V 来达到所定义的精度，USB 需要  $V_{DD}$  高于 1.71 V 来运行且其收发器要求  $V_{DD\_USB}$  高于 3.0 V 来实现 USB 兼容）。提供了 BOR 永久禁用的专用 STM32L0xx 器件，可用于电压容差为  $1.8 V \pm 8\%$  的应用。

这种情况下，“零电流”上电 / 掉电复位（POR/PDR）模块仍然是激活的，并在硬件编码持续时间后释放复位。然后用户需要确保获取复位向量时，启动过程中  $V_{DD}$  斜率足够大，可达到至少 1.65 V。

## 7 结论

本应用笔记中展示了 STM32L0xx 器件的主要特点。它们显示了此微控制器系列在嵌入式系统中降低 MCU 电流消耗方面所具有的优势。

STM32L0 系列产品扩展了 ST 由 STM8L 和 STM32L1 所建立的超低功耗系列，为处理 8/16 位应用提供了更广泛的 MCU 选择。它完善了 STM32 产品组合，保持了与其他 STM32 器件的兼容性。

利用其 Cortex-M0+ 内核和其高能效架构系统，此微控制器系列能够支持低功耗模式，而无须降低处理性能。

其丰富的外设组合能够覆盖广泛的应用，同时多种低功耗模式为即时调整任意任务的功耗提供了更大的灵活性。

这为现在和未来一直发展的绿色应用带来了更长的工作寿命。

## 8 版本历史

表 4. 文档版本历史

日期	版本	变更
2014 年 2 月 28 日	1	初始版本。

表 5. 中文文档版本历史

日期	版本	变更
2015 年 11 月 30 日	1	中文初始版本。

**重要通知 - 请仔细阅读**

意法半导体公司及其子公司（“ST”）保留随时对 ST 产品和 / 或本文档进行变更、更正、增强、修改和改进的权利，恕不另行通知。买方在订货之前应获取关于 ST 产品的最新信息。ST 产品的销售依照订单确认时的相关 ST 销售条款。

买方自行负责对 ST 产品的选择和使用， ST 概不承担与应用协助或买方产品设计相关的任何责任。

ST 不对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。

转售的 ST 产品如有不同于此处提供的信息的规定，将导致 ST 针对该产品授予的任何保证失效。

ST 和 ST 徽标是 ST 的商标。所有其他产品或服务名称均为其各自所有者的财产。

本文档中的信息取代本文档所有早期版本中提供的信息。

© 2015 STMicroelectronics - 保留所有权利 2015