



Volker Rzehak

Texas Instruments Deutschland

摘要

德州仪器 (TI) 最近宣布推出一个全新微控制器系列，该系列将 **FRAM** 作为非易失性存储器来实现，而非当今极其常见的可编程非易失性存储器技术 - 闪存。本应用手册介绍了 **FRAM** 技术以及嵌入式应用如何从中受益。

简要介绍了 **FRAM** 技术背后的物理知识。展示了 **FRAM** 与闪存之类的其他非易失性存储器技术的区别和相对优势，例如低电流消耗、较快写入速度和高写入寿命。还介绍了“通用存储器”的概念。

本应用手册说明了嵌入式应用如何从 **FRAM** 技术特性中受益，例如超低功耗数据记录器和无电池能量收集应用。

内容

1 什么是 FRAM ?	2
2 为什么使用 FRAM ? - 应用示例	4
2.1 FRAM : 通用存储器	4
2.2 写入寿命	5
2.3 快速写入	6
3 另一个应用示例：照明开关	7
4 其它应用	7
5 MSP430FR57xx 系列	8
6 结论	8
7 参考	9
8 修订历史记录	9

1 什么是 FRAM ?

FRAM 是指铁电随机存取存储器。(请注意, 其他公司使用其他缩写来表示 FRAM, 例如 F-RAM 或 FeRAM。) 名称中的“RAM”部分已经表明, FRAM 的行为类似于 DRAM。对于读写操作, 它允许随机存取每个单独的位。与 EEPROM 或闪存技术不同, FRAM 不需要特别序列来写入数据, 也不需要较高的编程电压。但 FRAM 是非易失的, 也就是说, 它断电后, 其内容不会“丢失”。

那么, FRAM 为什么是非易失的? 这是因为储能电容器中使用了特殊的电介质材料: 一种陶瓷, 可以利用所谓的铁电效应。

术语“铁电”并不表示存储器中含有铁(化学元素 Fe), 也不表示存储器可能会受磁场影响。实际上, 它不受磁场影响。

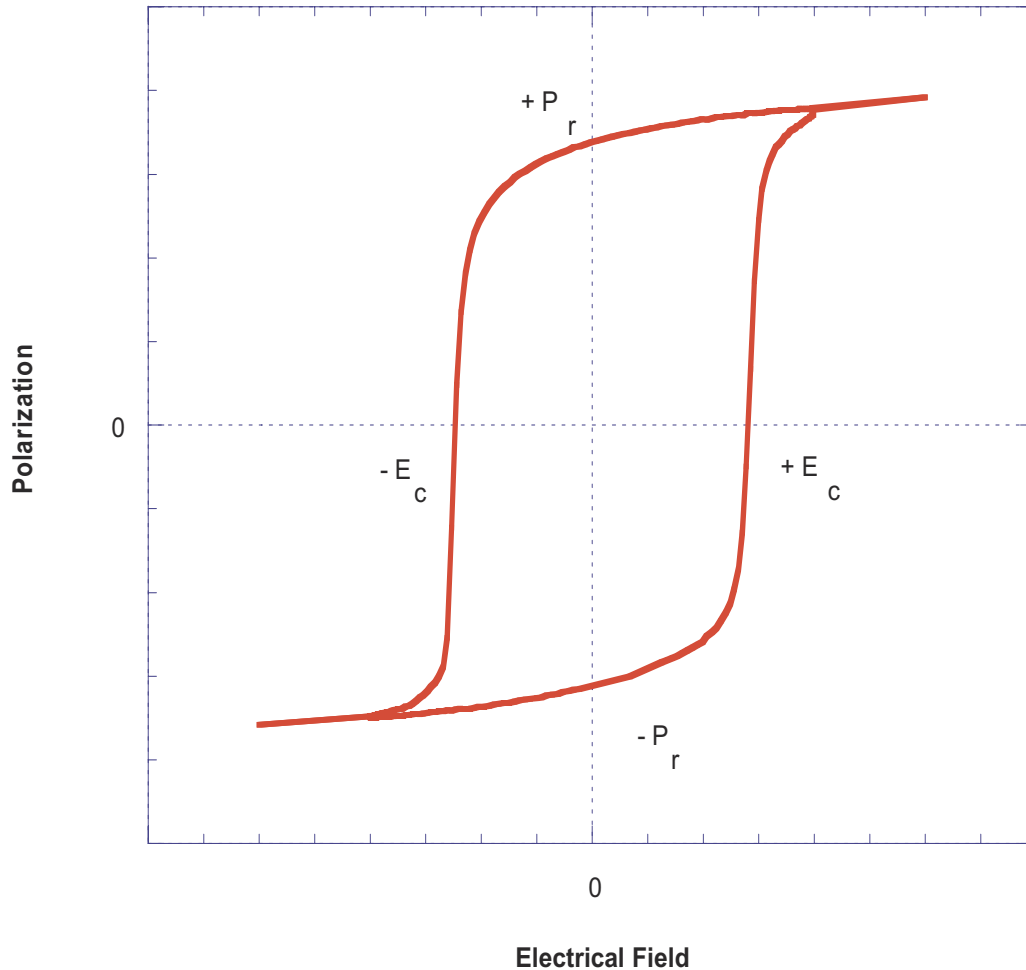


图 1-1. 极化迟滞环路

该术语是因迟滞环路(如图 1-1 中所示)类似于铁(Fe)的磁滞环路而得名。与磁滞环路相比, FRAM 中的迟滞环路是由用于实现 FRAM 的锆钛酸铅陶瓷晶体(PZT)中的锆(Zr)和氧(O)原子形成的电偶极子所产生的(如图 1-2 中所示)。

$Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$
(Lead-Zirkonate-Titanate, PZT)

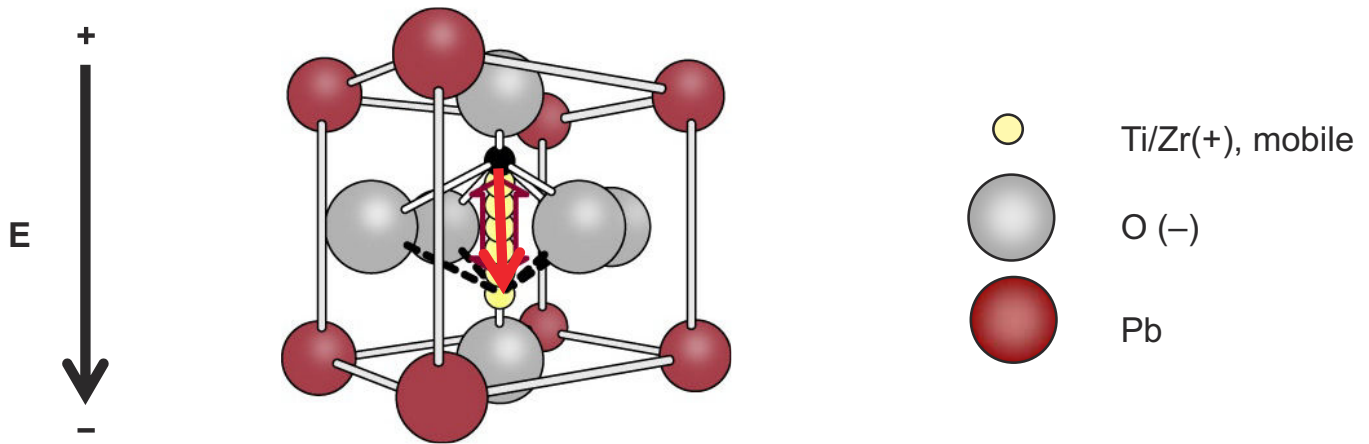


图 1-2. 锆钛酸铅结构

施加电场 (E) 可以通过“移动”结构中的 Zr 原子来极化材料。但是，要将 Zr 原子从 O 原子的一侧 (图 1-2 中的上部) 移动到另一侧 (图 1-2 中的下部)，它必须穿过 O 原子形成的屏障。随着场强度的增加，Zr 原子在一定场强度下逐渐接近 O 原子，然后突然翻转到另一侧。如果从相反的方向施加一个场，Zr 原子将再次逐渐改变其位置，然后再翻转到另一侧。这种情况将在与之前相同的场强下发生，但符号相反。这种行为会导致电场与极化迟滞环路，如图 1-1 中所示。

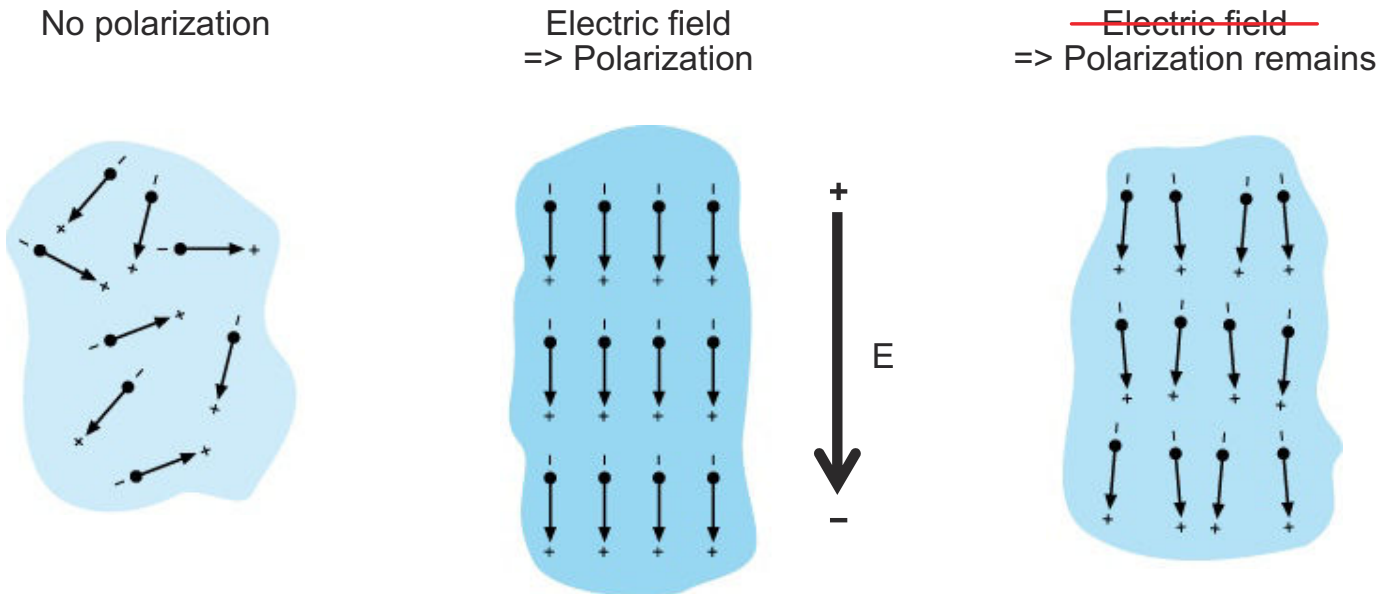


图 1-3. 极化

制造后，由锆和氧化物原子形成的偶极被随机极化，导致净极化为零 (无极化)。施加电场会使偶极对齐，并导致在电场定义的方向上出现极化。由于锆原子在晶体结构中的位置是稳定的，因此即使去除电场后，极化仍然存在。

2 为什么使用 FRAM ? - 应用示例

在以下示例中，使用数据记录器作为应用示例说明了基于 FRAM 的微控制器的优势。数据记录器通常是传感器节点，用于收集各种物理或环境条件，如温度、湿度、振动、压力、运动或污染物（见图 2-1）。



图 2-1. 数据记录器

2.1 FRAM: 通用存储器

在数据记录器应用中，测量和收集数据所需的程序代码大小相对于用于存储数据的内存量可以非常小。假设不能使用外部存储器，并且数据将存储在“传统”的基于闪存的微控制器的 RAM 中，那么就需要购买程序存储器远超应用所需的其他器件。借助基于 FRAM 的微控制器，可根据应用的需求对可用存储器进行分区，便于将很大一部分用于数据以满足应用要求。

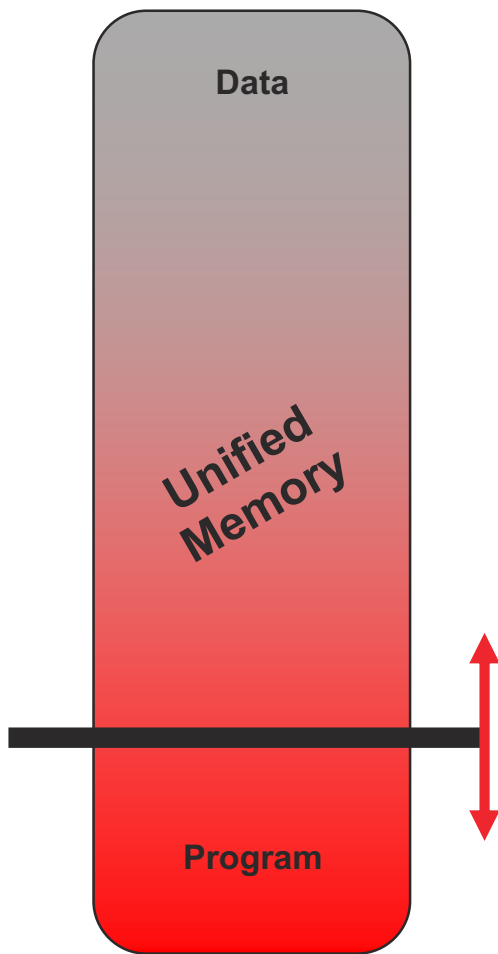


图 2-2. 统一存储器

其背后的概念称为“通用存储器”。通用存储器支持对存储器进行灵活分区以用于存储代码和数据。相同类型的存储器可用于“传统上”保存在单独存储器中的数据 and 程序存储 - RAM 用于数据和闪存，ROM 用于程序存储。

为了支持“通用存储器”概念，德州仪器 (TI) 在基于 FRAM 的 MSP430 器件中实现了存储器保护单元 (MPU)。MPU 可保护存储器中用于程序存储的部分不被意外覆盖。

2.2 写入寿命

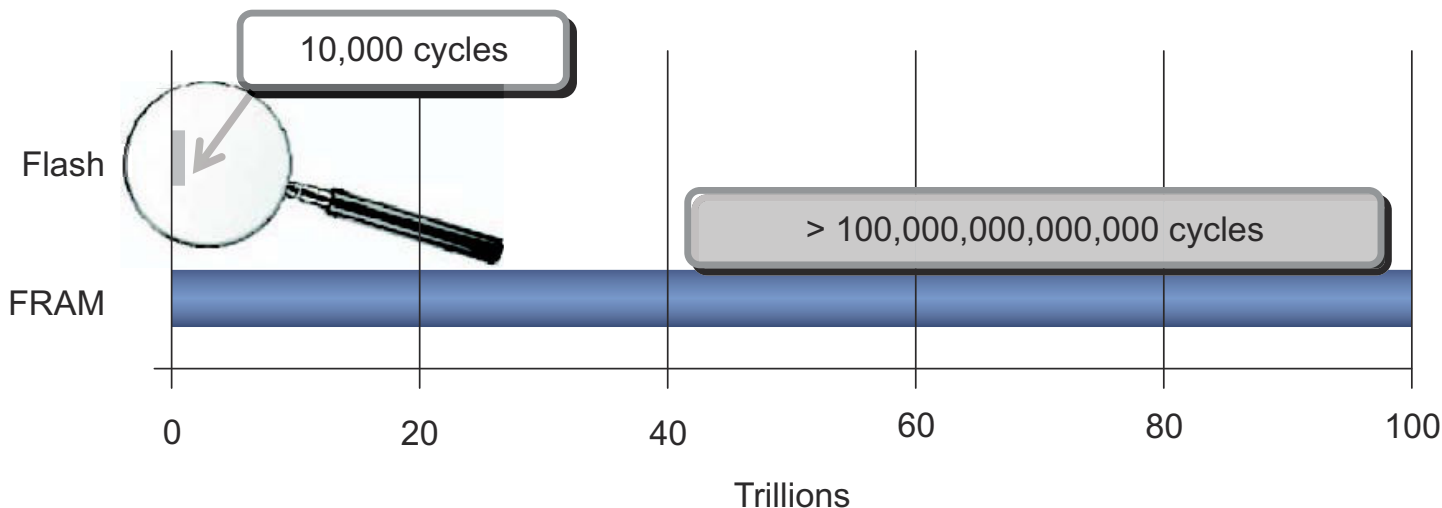


图 2-3. 写入寿命

FRAM 技术提供的写入寿命优于其他非易失性存储器技术，如图 2-3 中所示。对于数据记录器应用，这意味着更长的使用寿命和更低的复杂性；假设数据记录器每秒必须存储一组数据，并且始终使用相同的地址，这意味着使用闪存存储器的数据记录器的使用寿命少于三小时（假设闪存提供 10^4 个周期，用该数字除以每秒 1 个周期）。使用 FRAM 的相同数据记录器将利用 FRAM 提供的 10^{14} 多个写入周期实现超过 300 万年的理论寿命。为了延长基于闪存的数据记录器的使用寿命，需要复杂的磨损均衡算法以及额外的闪存存储器空间。磨损均衡算法会尝试使用多个闪存单元，并大致平均地使用它们。对于 FRAM，不需要磨损均衡，这会显著降低复杂性以及所需的存储器空间。

2.3 快速写入

FRAM 技术的另一项优势是其快速写入功能。要写入闪存，对一个数据字进行编程需要几十微秒到几毫秒（例如，MSP430F5438A 数据表指出，对一个字进行编程需要 $37\mu\text{s}$ 至 $85\mu\text{s}$ ，具体取决于编程模式和工艺条件；对于其他微控制器，有时额定编程时间在 3ms 到 5ms 之间）。这不包括对要重新编程的段进行预擦除。预擦除将需要几毫秒。此外，编程时通常无法执行任何程序。

相比之下，FRAM 只需 $\sim 100\text{ns}$ 即可对一个数据字进行编程。此外，无需预擦除，而且由于写入速度快，程序执行几乎不会发生中断。

3 另一个应用示例：照明开关

以下应用是一个照明开关，它通过射频链路切换照明并从切换中收集能量。这意味着微控制器和收发器大部分时间都不加电。因此，需要保留的所有数据必须存储在非易失性存储器中。例如，必须保留射频网络参数。在具有调光功能的智能照明开关中，可能会存储额外的状态信息。

在基于闪存的微控制器中，一个字的编程将需要几百纳库仑 (nC) 的电荷 (例如： $\sim 100\mu\text{s} \times 2\text{mA} = 200\text{nC}$)，而在基于 FRAM 的微控制器中，对相同数量的位进行编程所需的电荷要小两到三个数量级 (超过 100 倍) (例如： $\sim 100\text{ns} \times 4\text{mA} = 400\text{pC}$)。因此，在从切换中收集相同电荷的情况下，与基于闪存的微控制器相比，基于 FRAM 的微控制器永久存储的数据量是其 100 倍以上。或者，可以确定能量收集电路的尺寸以提供和存储更少的能量。

当然，该示例适用于在特定时间内未通电但仍需要保留可变数据的所有能量收集应用。

备注

编程所需的电荷可能因器件和制造商而异。此处显示的数字只是示例，用于展示差异幅度。

4 其它应用

基于 FRAM 的微控制器可用于当前使用采用闪存或 EEPROM 等不同非易失性存储器技术的微控制器的任何应用。但是，某些应用可以特别受益于 FRAM 技术，而另一些应用可能只能使用 FRAM 作为存储器。

下面列出了一些其他应用或应用场景，这些应用或场景会特别受益于基于 FRAM 的微控制器提供的特性：

- 数据记录器应用
- 能量采集应用
- 具有“无线更新”的应用
- 更换外部 EEPROM

5 MSP430FR57xx 系列

除了将 FRAM 集成为其主要存储器技术之外，MSP430FR57xx 系列器件还具有其他独特的特性，例如 ~100 μ A/MHz 的极低运行模式电流消耗。它们还提供丰富的外设组合，包括通信端口、计时器和带集成基准电压源的 10 位 ADC (见图 5-1 中的框图)。

MSP430FR57xx 系列包含 20 种不同的器件，FRAM 存储器高达 16kB。这些器件提供四种封装，包括小型 24 引脚 QFN、40 引脚 QFN、28 引脚 TSSOP 和 38 引脚 TSSOP 封装。更多信息请查阅 [MSP430FR57xx 数据表](#)。

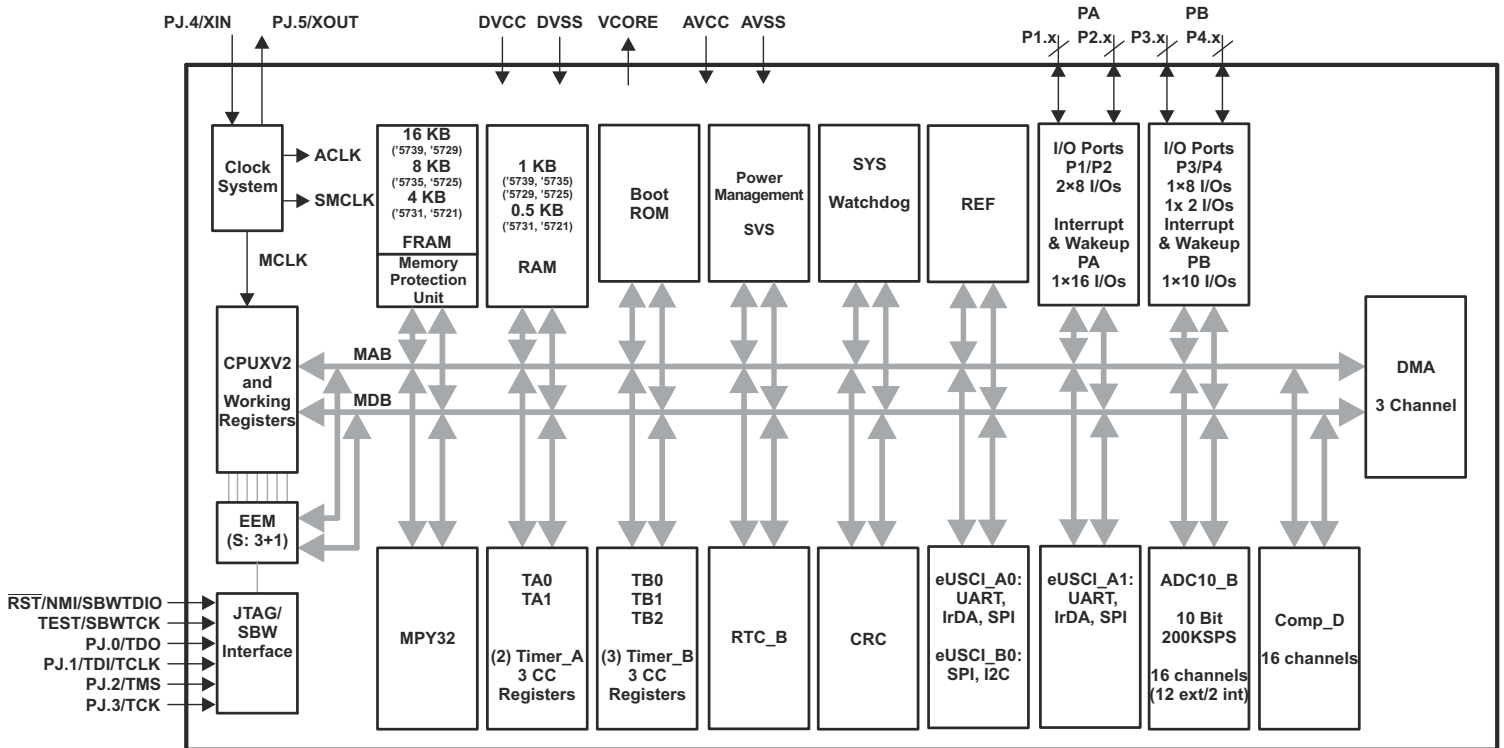


图 5-1. MSP430FR57xx 系列框图

6 结论

具有集成 FRAM 的微控制器提供可用于数据和代码存储的非易失性存储器（通用存储器），该存储器具有低功耗、快速写入速度以及近乎无限次的写入寿命等特性。

基于 FRAM 的微控制器几乎可用于所有基于 MCU 的应用，其独特的特性可能会在未来实现新的应用。

7 参考

- 德州仪器 (TI), [MSP430 微控制器](#)
- 德州仪器 (TI), [MSP430FR57xx 数据表](#)
- 德州仪器 (TI), [MSP430F5438A 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 * (July 2011) to Revision A (September 2023)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式。.....	1
• 删除了在线压电教程.....	9

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司