

Application Brief

汽车智能执行器



Fabian Barth

简介

智能执行器定义为一种将 PCB 直接连接至电机、可实现本地控制的执行器。借助通信接口，ECU 可对电机的转速、位置或转矩进行控制。随着整车架构不断迭代，受线束优化、跨车型平台可扩展性，以及电机本地实时控制需求的推动，智能执行器市场持续增长。在汽车领域，这类智能模块可管控阀门、泵、风扇、车窗、雨刮器和天窗电机等关键部件，助力优化整车设计，同时提升车辆的安全性、驾乘舒适性和运行效率。图 1 所示为智能油泵的分解图，其 PCB 直接嵌入油泵壳体内部。



图 1. A2MAC1 油泵分解图

随着汽车行业向电气化、自动驾驶及网联系统转型，兼具高可靠性、通用性且面向未来的执行器设计，已成为行业刚需。TI 的智能电机设计方案（如图 2 所示）提供了一套完整的生态系统，专为新一代低电压供电网络和接口量身定制，支持 48V、24V 和 12V 供电系统。此类设计方案兼容 CAN FD、LIN 等行业标准，以及新兴的 10BASE-T1S 和 CAN XL 协议，确保能无缝集成到现代汽车电子架构中。借助基于 Arm 架构的微控制器，以及软件开发套件 (SDK) 中提供的梯形波控制和磁场定向控制 (FOC) 算法，TI 为电机控制开发筑牢基础。该方案涵盖了面向所有电机类型的驱动器，包括 1W 至 1kW 范围内的无刷直流 (BLDC) 电机、步进电机和有刷直流 (BDC) 电机，同时集成故障诊断和保护功能，是多样化电机控制应用的通用选择。TI 采用可扩展的设计方法，覆盖多样化应用需求，能有效应对快速变化的汽车市场诸多挑战。

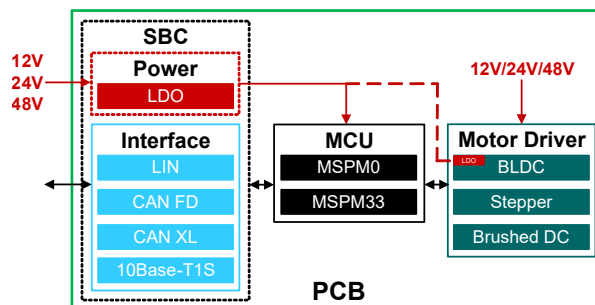


图 2. 智能执行器方框图

智能执行器在现代汽车行业中的应用概览

研发智能电机需要全面评估系统级参数，包括成本优化、外形尺寸限制、性能规格和可靠性。TI 现提供各类系统设计方案，能够满足表 1 和表 2 所列众多应用场景中的各项核心需求。

表 1. 热管理和暖通空调 (HVAC) 系统

	冷却液泵/油泵	鼓风机	冷却风扇	阀门	风门	格栅挡板
电机类型	BLDC	BLDC、BDC	BLDC、BDC	步进电机、BLDC、BDC	步进电机、BDC	步进电机、BLDC
功率范围	50W-500W	50W-350W	200-1000W	< 20W	< 20W	< 20W

表 2. 车身电机应用

	挡风玻璃雨刮器	车窗升降器	天窗电机	座椅风扇
电机类型	BLDC、BDC	BDC	BLDC、BDC	BLDC、单相 BLDC
功率范围	50W-200W	50W-150W	20W-200W	<20W

面向智能执行器的可扩展、安全可靠的 MSPM0 MCU

MSPM0 微控制器系列围绕 32 位 Arm® Cortex®-M0+ 内核，实现了均衡的架构设计。该平台采用 65nm 工艺制程打造，在集成模拟和数字外设的同时，具备出色的性价比。TI 通过 ti.com 提供全套开发资源，包括 [MSPM0 电机控制](#) 和 [MSPM0 MCU 在汽车应用中的优势](#) 等详细指南，帮助工程师快速轻松地上手电机控制软件开发。这些资源提供了分步式的实现指导、最佳实践以及针对具体应用场景的深度解析，有助于缩短开发周期，加快电机控制设计的上市进程。

MSPM0 系列的一个显著特点在于其硬件与软件的可扩展性——通过完整的引脚对引脚 (P2P) 兼容性，实现可扩展且灵活的智能电机架构。这种平台级设计可确保不同闪存容量和运行频率的器件之间，外设映射和封装尺寸保持统一。如下文实现示例所示，该架构支持在统一硬件平台内无缝扩展性能，从而适配多样化的电机配置和通信接口规范。例如，当需要基于 LIN 总线对原有基于 CAN 总线的智能有刷直流执行器进行成本优化型降级设计时，MSPM0C1106-Q1 可直接替代 MSPM0G3507-Q1，在保持功能兼容的前提下大幅降低成本。依托这种可扩展的方法，工程师可基于同一基础设计开发多款衍生产品，既能缩短开发时间，又能保证设计统一，同时还能针对特定的性能和成本目标进行优化。

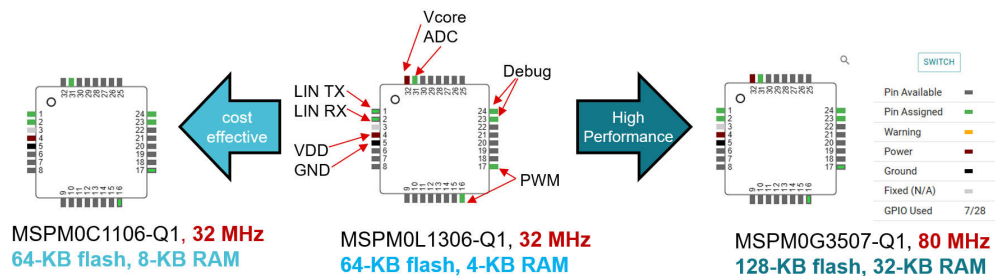


图 3. 可扩展的 MSPM0 平台示例

MSPM0 面向智能执行器的电机控制

面向汽车智能电机应用时，MSPM0 平台可凭借其高性能 CPU 和集成数学加速器 (MATHACL) 实现卓越的计算效率。这款专用硬件单元可分担主 CPU 的复杂数学运算任务，在保障处理带宽充足的前提下，实现高精度磁场定向控制 (FOC) 算法运行。

MATHACL 可借助经过优化的 IQMATH 库支持全可编程配置，为开发人员实现高阶电机控制算法提供了便捷接口。如表 3 的性能对比所示，基准测试数据表明，执行 FOC 例程时 CPU 带宽得到显著优化。

表 3. MSPM0 FOC 性能

FOC 算法	产品	CPU	时钟	PWM 频率	FOC 速率	FOC 时间	CPU 带宽
无传感器	MSPM0G3507*	带 MathACL 的 M0+ 内核	80MHz	20kHz	10kHz	60.8us	60.8%
	MSPM0G3107**	无 MathACL 的 M0+ 内核	80MHz	20kHz	10kHz	79.9us	79.9%
	MSPM0C1106**	无 MathACL 的 M0+ 内核	32MHz	15kHz	5kHz	199us	99.5%
霍尔传感式	MSPM0G3507*	带 MathACL 的 M0+ 内核	80MHz	16kHz	16kHz	43.9us	70.3%

* 该基准测试数据使用 SDK FOC 设计 (MSPM0-SDK) 测试得出

** 该基准测试数据使用 SDK FOC 设计估算得出。

- 高级检测功能：**高精度电流检测是高端电机控制应用实现最优性能的基础。MSPM0 搭载全集成式模拟信号链，在大幅减少外部元件数量的同时，显著提高测量精度，可充分满足这一核心需求。该平台具有以下特性：
 - **高分辨率数据采集：**两路 12 位 SAR ADC，支持高达 4 MSPS 采样率，有效位数 (ENOB) 达 11.2 位，且支持多通道电流同步采样，可实时精准监测各项电机参数
 - **精密信号调节：**两路集成式零漂移运算放大器 (OPA)，共模抑制比 (CMRR) 高、失调电压漂移低，支持可编程增益放大器 (PGA) 模式，确保在宽温度范围内实现稳定、精准的电流检测。借助这类 OPA，即使选用未集成电流检测放大器的成本优化型电机驱动器，也能实现 BLDC 电机的 FOC 运行。集成 OPA 可用于实现电流检测功能，无需额外增加外部元件，从而降低系统成本和设计复杂度。
 - **实时硬件保护：**可配置的高速比较器，搭配可编程参考阈值 (8 位 DAC)，能在无需 CPU 干预的情况下即时对故障作出响应
 - **增强的系统集成：**片内集成基准电压源和信号路由电路，省去外部信号缓冲和调节元件
- 符合 AEC-Q100 标准：**MSPM0 完全符合 AEC-Q100 一级标准，并且严格遵循汽车级 IC 的测试规范，确保 IC 能在恶劣环境中可靠运行。
- 功能安全 — 符合 ISO26262 ASIL-B 标准：**MSPM0 针对中低风险应用场景 (QM 和 ASIL-B) 进行定制，提供全面的报告分析，包括功能安全手册、失效 (FIT) 率报告、诊断库以及失效模式、影响及诊断分析 (FMEDA) 文档，帮助开发人员识别并避免系统故障。
- 网络安全：**为增强汽车车载网络的韧性，并应对欧洲各国逐步推行的《网络弹性法案》(CRA) 框架相关要求，MSPM0 搭载多款增强型安全组件，包括带密钥存储功能的 AES 加速、真随机数发生器 (TRNG) 及 IP 防火墙，助力客户满足 Evita-Light 和 PSA-L1 等级要求。此外还包含调试安全、安全启动、硬件加速和抗攻击防护。

如需快速选型，请参阅表 4 中的 MSPM0 产品特性对比。

表 4. MSPM0 功能比较

	MSPM0C1106	MSPM0G3107	MSPM0G3507	MSPM0G3519
推荐电机控制方案	步进电机、BDC、基于 MCF 的 BLDC、梯形波控制	BDC、梯形波控制和低速 FOC 控制	FOC 控制	FOC 控制
频率	32MHz	80MHz	80MHz	80MHz
MATHACL	否	否	是	是
闪存	64KB	128KB	128KB	512KB (双存储区)
CAN-FD	-	1	1	2
LIN	1	1	1	2
模拟外设	一路 12 位 SAR ADC (至多 27 通道)	两路 12 位 SAR ADC (至多 17 通道)	两路 12 位 SAR ADC (至多 17 通道)	两路 12 位 SAR ADC (至多 27 通道)
运算放大器	-	-	2	-
通用放大器	-	-	1	-
高级计时器	1	2	2	2
计时器总数	5	7	7	9
功能安全	FS-QM	ASIL-B	ASIL-B	ASIL-B

智能执行器的通信与供电要求：总线故障电压和接地丢失保护

由于 12V、24V 和 48V 汽车供电系统存在固有短路故障风险，LIN 和 CAN 总线的故障电压保护至关重要。这类故障会引入杂散信号，严重时还会形成直接对地或对电源轨的路径，进而可能损坏 ECU 并扰乱通信。表 5 列出了 TI 品类丰富、性能可靠的收发器和系统基础芯片 (SBC) 产品组合。借助这些器件，智能电机应用可在 LIN 和 CAN 总线网络中实现高性能、高可靠性的通信，尤其适用于严苛的车载工况。

表 5. TI 接口选项概览

	12V	24V	48V
LIN	TLIN102x-Q1 系列 (±45V 总线故障保护)	TLIN202x-Q1 系列 (±60V 总线故障保护)	TLIN402x-Q1 系列 (±70V 总线故障保护)
CAN FD	TCAN1473A-Q1 (±58V 总线故障保护)	TCAN1473A-Q1 (±58V 总线故障保护)	TCAN1043HG-Q1 (±70V 总线故障保护)
LIN SBC (一路 LDO，125mA 时为 3.3V/5V) CAN SBC (一路 LDO，100mA 时为 5V)	TLIN1028-Q1 (±58V 总线故障保护) TCAN11625-Q1 (±58V 总线故障保护)	TLIN1028-Q1 (±58V 总线故障保护) TCAN11625-Q1 (±58V 总线故障保护)	-

适用于智能执行器的高级电机驱动器

TI 的电机驱动器产品组合包含完善的产品系列，可覆盖 12V 至 48V 汽车供电系统，全面适配各类智能执行器应用。对于 BLDC 应用，相关设计涵盖适用于 12V 系统的 DRV8311-Q1 等成本优化型栅极驱动器，到适用于 24V/48V 系统的 DRV8363-Q1 等高级驱动器。DRV8316-Q1 和 MCx8316-Q1 系列等集成 FET 电机驱动器无需外部 MOSFET，且支持高达 8A 的电流，因而非常适合空间受限的应用场景。

DRV8263-Q1 和 DRV8163-Q1 等 BDC 电机驱动器支持所有三种电压域，并集成新一代安全功能，便于跨整车架构实现平台扩展。在精确定位应用场景中，DRV8899-Q1 和 DRV8434-Q1 等步进电机驱动器具备精确的电流控制和微步进能力，适用于阀门定位和 HVAC 风门控制。

此外还融合多项关键集成特性，包括可直接为 MSPM0 微控制器供电的 3.3V LDO 功能，在降低系统成本和复杂度的同时，还能符合汽车级可靠性标准。具备 ASIL-B 等级的型号可满足功能安全规范，适用于各类安全关键型应用。这些设计可与 MSPM0 平台无缝集成，搭建高性价比的完整控制系统。

表 6 汇总并概述了 TI 针对各种电机类型、面向智能执行器的电机驱动器设计方案。

表 6. TI 电机驱动器概览

	BLDC	BDC	步进
栅极驱动器	DRV8311-Q1 (12V) DRV8329-Q1 (12V/24V) MCF8329HS-Q1 (12V/24V) DRV8343-Q1 (12V/24V) DRV8300-Q1 (12V/24V/48V) DRV8363-Q1 (24V/48V)	DRV8705-Q1 (12V) DRV8706-Q1 (12V) DRV8714-Q1 (12V)	-
内置 FET 电机驱动器	DRV8316-Q1 (12V) MCx8316-Q1 (12V) MCx8315-Q1 (12V) DRV8376-Q1 (12V/24V/48V) MCT8376Z-Q1 (12V/24V/48V)	DRV824x-Q1 (12V) DRV814x-Q1 (12V) DRV8263-Q1 (12V、24V、48V) DRV8163-Q1 (12V、24V、48V)	DRV8889-Q1 (12V) DRV8899-Q1 (12V) DRV8434-Q1 (12V)
集成 3.3V LDO	DRV8311-Q1 (12V) DRV8316-Q1 (12V) MCx8316-Q1 (12V) MCx8315-Q1 (12V) DRV8329-Q1 (12V/24V) DRV8376-Q1 (12V/24V/48V) MCT8376Z-Q1 (12V/24V/48V) DRV8363-Q1 (24V/48V)	DRV8163-Q1 (12V、24V、48V)	-
ASIL B	DRV8334-Q1 (12V/24V) DRV8363-Q1 (24V/48V)	DRV8263-Q1 (ASIL B)	-

智能执行器的通信与供电要求：低功耗模式

许多汽车应用设备并非持续运行，而是采用周期性或间歇式工作模式。为优化功耗、大幅提升电动汽车的续航里程，行业普遍采用低功耗管理策略。目前主流架构方案主要分为两类：

- 图 4 展示了在上层 ECU 中集成高侧开关 (HSS) 或电子保险丝 (eFuse) 以实现低功耗模式的实现方案。该配置可将边缘节点的功耗降至零，这得益于 TI 完善的高侧开关产品组合，部分型号还可选配 I²T 线缆保护功能，进一步提升系统可靠性。
- 图 5 所示为智能执行器持续供电方案，具备通信接口唤醒功能，支持休眠模式和通过总线远程唤醒。该架构休眠电流低于 100 μA，运行性能稳定，且可脱离上层 ECU 独立工作。

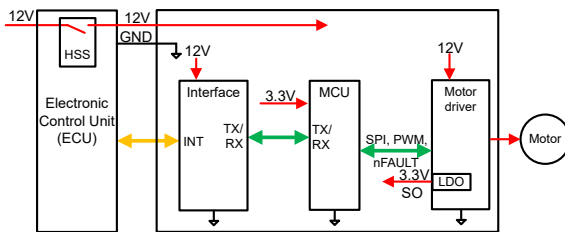


图 4. 基于上层高侧开关的低功耗模式

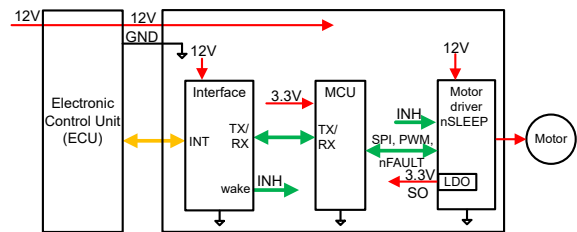


图 5. 基于通信接口唤醒的低功耗模式

智能执行器的 BLDC 应用方框图示例

针对基于 BLDC 的应用，TI 在两种不同的技术方案上进行了战略性投入：

- 外部控制驱动器（基于 DRV）：控制算法在主机 MCU 上运行
- 集成控制驱动器（基于 MCF、MCT）：控制算法在电机驱动器内部运行

栅极驱动器和集成 FET 电机驱动器方案可对电机控制算法 (图 6) 实现深度自主控制, 而集成控制驱动器方案由于预置 FOC 算法 (MCF) 和梯形波控制算法 (MCT) 这两种电机控制算法, 且这两种算法均可通过一颗低成本主机 MCU (图 7) 进行配置, 因此能实现系统的快速上电启动。两种方案均利用栅极驱动器内部集成的 LDO 来为 MSPM0 微控制器供电, 从而节省系统成本并缩小设计尺寸。在电流小于 8A 的应用场景中, 可使用集成 FET 的 MCx8316x-Q1 或 DRV8316-Q1 来简化系统设计。

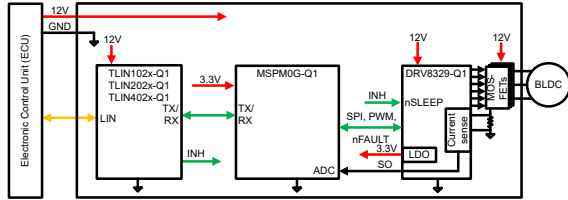


图 6. 基于 DRV 的 BLDC 电机方框图

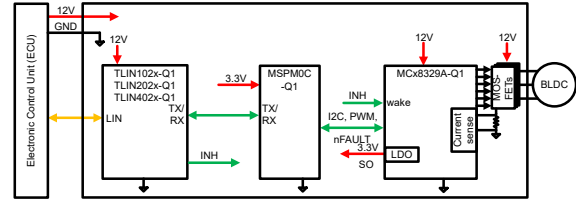


图 7. 基于 MCx 的 BLDC 电机方框图

智能执行器的有刷直流电机和步进电机应用示例

TI 为开发人员提供品类齐全、适配性强的栅极驱动器和集成 FET 驱动器产品组合, 帮助其实现基于 BDC 和步进电机的智能电机应用。在基于 BDC 的系统中, 可选用霍尔传感器来支持位置控制。开发人员可选用 TI 种类丰富的 LIN/CAN 系统基础芯片 (SBC) 产品组合, 打造高性价比、结构紧凑的设计方案, 非常适合用于空间受限的系统 (如图 8 所示)。

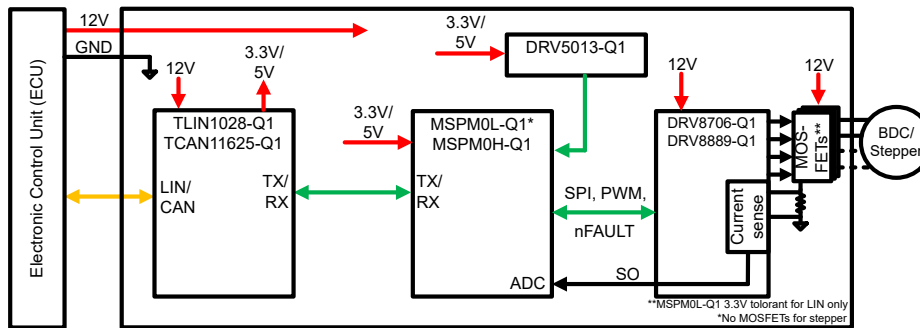


图 8. 基于 DRV 的 BDC 和步进电机方框图

智能执行器的系统要求：设计尺寸

智能电机架构采用焊接互连的方式，将 PCB 与电机各相直接集成，从而省去了中间的线缆组件。这种一体化架构需要将电机组件与控制电子器件共同封装在防护外壳内。因此需要尺寸较小的 PCB，而这类 PCB 通常在元件布局方面有诸多限制。TI 的系统设计方案经过高度的外形尺寸和引脚排布优化，可满足这类应用严苛的空间限制。图 9 重点展示 TI 如何支持 L 形布局等复杂的 PCB 几何布局，在保障关键电气性能参数的同时大幅提高空间利用率。同样地，TI 针对步进电机型精密阀门所设计的小型化驱动器方案（如图 10 所示），可在保证控制精度和运行可靠性的前提下缩减体积。当前市场趋势也要求采用 48V 智能执行器，而 TI 的设计可在保持小外形尺寸的前提下满足这一需求（如图 11 所示）。

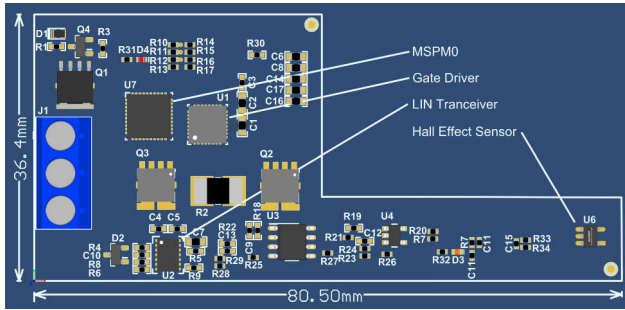


图 9. 车窗升降用紧凑型 L 形智能执行器 PCB

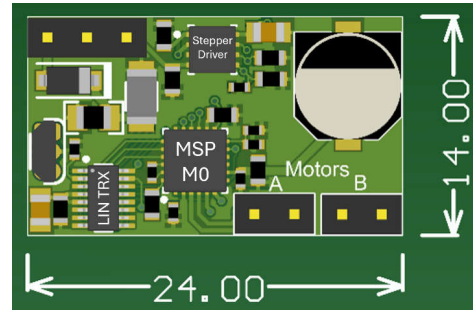


图 10. HVAC 阀门用紧凑型智能执行器 PCB

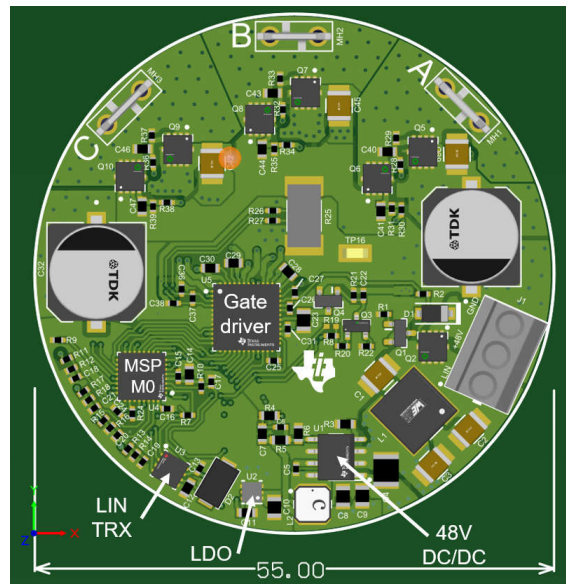


图 11. 泵和鼓风机用紧凑型智能执行器 PCB

结语

德州仪器 (TI) 可为汽车智能执行器提供完善的系统设计方案，覆盖从格栅挡板、阀门到冷却泵、风扇和车窗升降机构等多种应用。可扩展的 MSPM0 MCU 平台，搭配 TI 支持 12V、24V 和 48V 系统中 BLDC、BDC 和步进电机的电机驱动器产品组合，可打造经空间优化的 PCB 设计，满足严苛的外形尺寸要求。此类方案符合 ISO26262 ASIL-B 功能安全标准，并集成多种网络安全特性，完全契合现行汽车行业法规标准。

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

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