

## Application Note

## 数据中心应用中适用于 Intel Xeon Sapphire Rapids 可扩展处理器的负载点解决方案



Richard Nowakowski

## 摘要

数据中心对于业务连续性和可靠通信至关重要。德州仪器 (TI) 提供了高性能电源管理解决方案，在为数据中心和机架服务器的处理器供电时，可实现高可用性和高效率。先进的处理器 (例如 Intel® Xeon® Sapphire Rapids 可扩展处理器) 需要负载点解决方案通过 12V 标称输入总线满足低功耗 CPU 电源轨以及 3.3V 和 5V 电源轨的要求。DDR5 内存负载点电源现在由双列直插式内存模块 (DIMM) 提供，主板上不再需要。有关 Intel 处理器及其电源要求的具体信息，请登录到 Intel 资源与设计中心。若要获取与根据 VR14 V<sub>CCIN</sub> 和串行电压识别 (SVID) 规范规范专门设计多相控制器和功率级相关的信息，请与 TI 联系。本文档旨在重点介绍直流/直流转换器，并描述其用于满足高性能处理器电源要求的特性。

## 内容

1 推荐使用的直流/直流转换器.....	2
2 电压调节精度.....	3
3 负载瞬态响应 (D-CAP4).....	5
4 安全特性.....	6
5 效率和热性能.....	7
6 具有可调软启动和高输出电压精度的线性稳压器.....	8
7 结论.....	9
8 其他资源.....	9
9 修订历史记录.....	10

## 插图清单

图 2-1. 配置有内部或外部反馈的 TPS548B23.....	4
图 3-1. TPS54JB20 瞬态响应 (D-CAP3).....	5
图 3-2. TPS54KB20 瞬态响应 (D-CAP4).....	5
图 5-1. TPS543C20A 的 SOA 曲线.....	7
图 5-2. TPS543C20A 的功率损耗曲线.....	7
图 6-1. TPS748A 启动波形.....	8

## 表格清单

表 1-1. 推荐使用的负载点转换器.....	2
表 2-1. TPS548A28 的内部电压基准.....	3
表 2-2. TPS548B23 的输出电压调节精度.....	3
表 4-1. 具有安全特性的直流/直流转换器.....	6

## 商标

D-CAP4™ and D-CAP3™ are trademarks of Texas Instruments.  
Intel® and Xeon® are registered trademarks of Intel Corporation.  
PMBus® is a registered trademark of Texas Instruments.  
所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 推荐使用的直流/直流转换器

**表 1-1** 重点介绍了适用于为 Sapphire Rapids 应用供电并集成了 MOSFET 的最新负载点直流/直流转换器；但是，根据设计，它们也能满足多种市场应用的需求。这些器件旨在实现快速瞬态响应、高效率、良好的热性能和高输出电压精度。请注意，在**表 1-1** 中推荐了不同的控制架构。

固定频率控制架构将提供可预测的开关频率，并可与外部时钟同步。在使用数据转换器和高速模拟电路的噪声敏感型应用中，适合采用电流模式或电压模式控制。另一方面，与采用电压或电流模式控制的器件相比，采用恒定接通时间控制的器件对快速变化的负载分布具有更快的瞬态响应，其原因在于没有内部时钟来控制开关频率。有几款器件搭载了 PMBus® 或 I<sup>2</sup>C，具有自适应电压调节和裕度调节功能。集成了带遥测功能的 PMBus 或 I<sup>2</sup>C 的器件会向主机处理器报告电压、电流和温度信息。

现已提供支持串行电压识别 (SVID)、带有集成 MOSFET 的直流/直流转换器，如果输出电流更低，可提供比基于多相控制器的解决方案更小、更易于设计的解决方案。TPS53820 最多提供两个输出，可在 VR13.HC 应用中为低电流 SVID 电源轨供电，例如 VCCANA (5.5A) 和 P1V8 (4A)；TPS544C26 与 Intel VR13 SVID 兼容，适用于 Eagle Stream (EGS) 和 Birch Stream (BHS) 应用。TPS544C27 和 TPS544E27 支持 VR14 Oak Stream (OKS) 应用，这些应用包含遥测和安全特性，并向后兼容早期的 Birch Stream 和 Eagle Stream 应用。

**表 1-1. 推荐使用的负载点转换器**

I <sub>OUT</sub> 额定值	恒定接通时间控制	固定频率控制	SVID 转换器	带遥测功能的 PMBus/I <sup>2</sup> C
<b>具有集成式 MOSFET 的直流/直流转换器</b>				
≤2A	<a href="#">TPS562231</a>	<a href="#">TPS62902</a>	<a href="#">TPS53820</a>	不适用
2A - 3A	<a href="#">TPS563231</a>	<a href="#">TPS543320</a>	<a href="#">TPS53820</a>	不适用
3A - 6A	<a href="#">TPS54J061</a>	<a href="#">TPS543620</a>	<a href="#">TPS53820</a>	<a href="#">TPS546C25</a>
7A - 11A	<a href="#">TPS548A28</a>	<a href="#">TPS543A22</a>	<a href="#">TPS544C27</a>	<a href="#">TPS546C25</a>
12A - 15A	<a href="#">TPS548B23</a>	<a href="#">TPS543B22</a>	<a href="#">TPS544C27</a>	<a href="#">TPS546C25</a>
16A - 20A	<a href="#">TPS548B23</a>	<a href="#">TPS543B22</a>	<a href="#">TPS544C27</a>	<a href="#">TPS546C25</a>
21A - 25A	<a href="#">TPS548C26</a> <a href="#">TPS54KB20</a>	<a href="#">TPS543B25</a>	<a href="#">TPS544C27</a>	<a href="#">TPS546C25</a>
26A - 35A	<a href="#">TPS548C26</a>	<a href="#">TPS543C20A</a>	<a href="#">TPS544E27</a>	<a href="#">TPS546E25</a>
>35A	<a href="#">TPS548D26</a>	<a href="#">TPS543C20A</a>	<a href="#">TPS544E27</a>	<a href="#">TPS546E25</a>
<b>串行电压识别 (SVID) 控制器</b>				
双通道, 8 相 (EGS)		<a href="#">TPS53689</a>		
双通道, 12 相 (EGS)		<a href="#">TPS536C9</a>		
双通道、8 相 TLVR (BHS)		<a href="#">TPS53689T</a>		
双通道、12 相 TLVR (BHS)		<a href="#">TPS536C9T</a>		
OKS: 联系 TI 以获取多相控制器				
<b>智能功率级</b>				
采用 5x6mm 封装的 90A NexFET™ 智能功率级		<a href="#">CSD95410</a>		
采用 4x5mm 封装的 50A NexFET™ 智能功率级		<a href="#">CSD95420</a>		
BHS、OKS: 联系 TI, 了解正在开发的智能功率级				
<b>低压降稳压器</b>				
1.5A	<a href="#">TPS748A</a>	具有可调软启动、PG 使能和 0.85% 基准精度的线性稳压器		

以斜体显示的产品具有其他供应商提供的替代来源。

## 2 电压调节精度

随着半导体工艺技术的进步，处理器需要更精密的电压精度和更低的工作电压。处理器数据表中将电压容差规定为以百分比形式显示或以 mV 为单位的值，涉及整个工作温度范围内的直流、交流和纹波变化。设计人员还要考虑直流/直流转换器使用的电阻分压器的容差、电路板的布线和迹线损耗以及应用的变化（例如输入电压变化、温度摆幅和负载的快速变化）。

应在数据表而不是首页中查看直流/直流转换器的反馈电压精度。表 2-1 所示为 TPS548A28（这是一款 2.7V 至 16V、15A 转换器）的稳压反馈电压或内部电压基准规格，并显示出在整个温度范围内的基准精度为  $\pm 6\text{mV}$  或  $\pm 1\%$ 。通过为分压网络选择容差更精密的电阻器，可提高总输出电压精度。如果需要更多的余量，设计人员可以选择 0.1% 或 0.5% 的电阻器，但其成本略高。额外的余量可确保以较小的大容量电容和旁路电容满足总计  $\pm 3\%$  或  $\pm 5\%$  的输出电压变化。<sup>1</sup>

表 2-1. TPS548A28 的内部电压基准

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
内部电压基准	$T_J = -40^\circ\text{C}$ 至 $125^\circ\text{C}$ , $V_{CC} = 3\text{V}$	594	600	606	mV
	$T_J = 0^\circ\text{C}$ 至 $85^\circ\text{C}$ , $V_{CC} = 3\text{V}$	597	600	603	mV

具有可选输出电压和内部电压反馈的直流/直流转换器优于使用外部电压反馈分压器对输出电压进行编程的直流/直流转换器。具有内部电压反馈的转换器（如 TPS548B23）需要的外部元件更少，并且可以提供更高的电压精度。这两种转换器都具有内部电压基准，但在具有内部电压反馈的转换器内部，需要考虑外部电阻分压器的直流误差。表 2-2 展示了具有内部电压反馈的 TPS548B23 的实际输出电压。

表 2-2. TPS548B23 的输出电压调节精度

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值
输出电压调节精度	内部反馈配置, $T_J = 0^\circ\text{C}$ 至 $+85^\circ\text{C}$	-0.75%		+0.75%
	内部反馈配置, $T_J = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$	-1.25%		+1.25%

TPS548B23 可配置为使用外部或内部反馈，如图 2-1 所示。如果所需输出电压是 16 种选项之一，TPS548B23 将减少外部元件并提高输出电压精度。通常，布局限制、连接器和电路板密度要求会影响总输出电压精度。直流/直流转换器的遥感功能可补偿较长迹线引起的电压降，以便适应需要高精度输出电压的处理器。当输送较大的电流时，此功能尤其有用，因为电压降在整个直流误差中的占比很大。新型直流/直流转换器在反馈引脚 (VOS) 和接地检测回路引脚 (GOS) 之间（而不是传统的 VSNS+ 和 VSNS- 引脚）集成了遥感放大器，以减少转换器的引脚数。遥感功能在这两种情况下都是全差分的，能够补偿电路板布线上的压降，从而在稳态运行状态和负载瞬态事件中帮助保持  $V_{OUT}$  精度。

<sup>1</sup> 电源设计小贴士 18：稳压器的输出电压精度可能并没有想象的那么差。

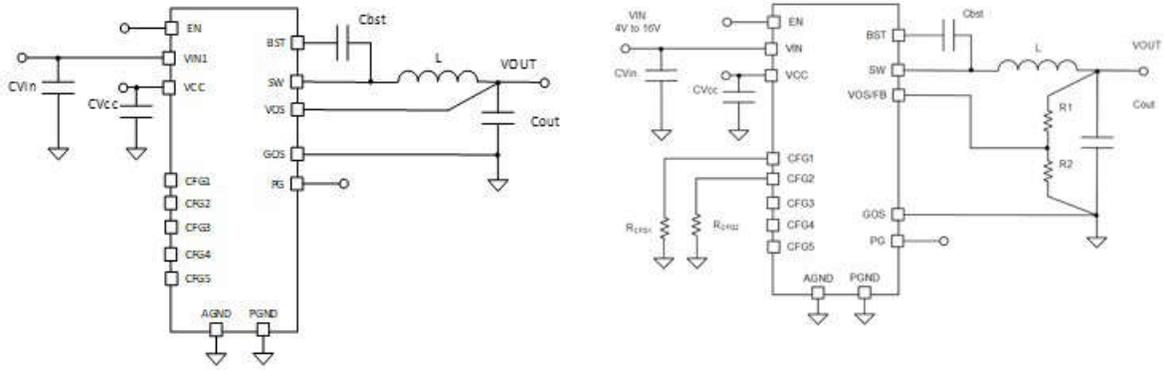


图 2-1. 配置有内部或外部反馈的 TPS548B23

### 3 负载瞬态响应 (D-CAP4)

负载在企业机架服务器中的分布会发生巨大变化，因此考虑交流瞬态性能非常重要。选择具有快速瞬态响应能力并采用非线性控制技术（例如恒定接通时间或 D-CAP4™）的直流/直流转换器，即可实现快速瞬态响应，并具有最小输出电容。D-CAP4 控制架构包括一个内部纹波生成网络，支持使用极低 ESR 输出电容器，例如多层陶瓷电容器 (MLCC) 和低 ESR 聚合物电容器。使用 D-CAP4 控制架构时无需外部电流检测网络或电压补偿器。内部纹波生成网络的作用是仿真电感器电流信息的纹波分量，然后将其与电压反馈信号相结合以调节环路运行。D-CAP4 控制架构与 D-CAP3™ 不同，它减少了整个输出电压范围内的环路增益变化，使得在整个输出电压范围内仅需一个斜坡设置即可实现快速负载瞬态响应，尤其是在 3.3V 和 5V 等较高输出电压下。与其他基于 R-C 的内部斜坡生成架构类似，内部斜坡电路的 R-C 时间常数设置斜坡的零点频率。环路增益变化减小还降低了对前馈电容器的需求，从而优化瞬态响应。斜坡幅度随输入电压而变化，以更大限度地减小输入电压范围内的环路增益变化（通常称为输入电压前馈）。采用 D-CAP4 和 D-CAP3 的转换器利用内部电路来校正由注入的斜坡引起的直流偏移量，并清除由输出纹波电压引起的直流偏移量，尤其是在选择跳跃模式运行时的轻负载电流条件下。图 3-1 展示了 D-CAP3 在 5A 至 15A 负载阶跃、1A/μs 压摆率、3.3V 输出和 800kHz 开关频率下的瞬态响应，而图 3-2 展示了 D-CAP4 在相同工作条件下的瞬态响应。在两个转换器都使用相同的 470nH 电感器和 570 μF 总输出电容条件下，D-CAP4 性能优于 D-CAP3，其中 D-CAP3 的压降和过冲响应为 117mV，而 D-CAP4 的压降和过冲电压响应为 60.7mV。



图 3-1. TPS54JB20 瞬态响应 (D-CAP3)

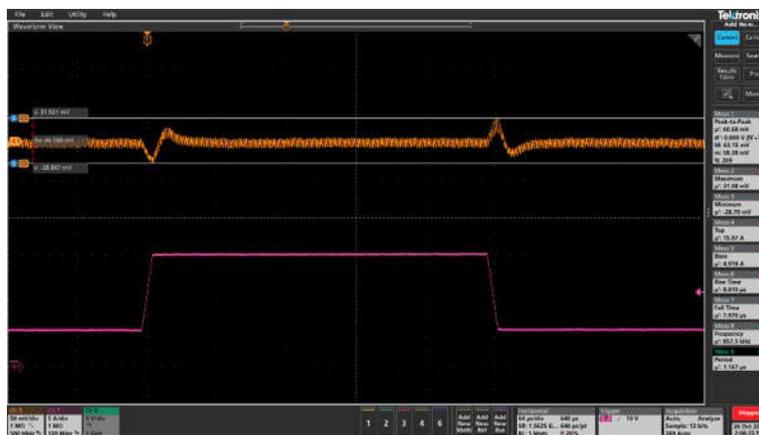


图 3-2. TPS54KB20 瞬态响应 (D-CAP4)

## 4 安全特性

过去，数控电源设计（无论是使用 I<sup>2</sup>C、SMBus、PMBus、SVID 还是其他一些数字接口）依赖总线控制器器件的安全性，来防止恶意行为者获得访问权限和使用数字控制来关闭转换器甚至损坏硬件。对于大多数应用来说，这已经足够。随着数字接口不断增加并且威胁日益复杂化，这已无法始终确保系统的完整性。当器件连接到远程接口时，远程行为者有可能通过连接的器件之一访问数字总线，并且有可能通过总线发送恶意命令。表 4-1 展示了具有安全特性的新型直流/直流转换器。

**表 4-1. 具有安全特性的直流/直流转换器**

器件	数字接口	安全性	当前封装
<a href="#">TPS544C27</a>	SVID、PMBus	2 级	35A, 4x5mm
<a href="#">TPS544E27</a>	SVID、PMBus	2 级	40A, 5x6mm
<a href="#">TPS546C25</a>	PMBus	Passkey	35A, 4x5mm
<a href="#">TPS546E25</a>	PMBus	Passkey	50A, 5x6mm

PASSKEY 功能为设计人员提供了一种中等安全性，介于开放安全性和使用写保护命令实现的永久锁定之间。

PASSKEY 是一个 16 位数字密钥。设置后，PASSKEY 会禁用对 EXT\_WRITE\_PROTECT 和用户 NVM 存储的写入访问，直到将 PASSKEY 写回器件。为防止器件遭受蛮力攻击，每次下电上电时 PASSKEY 写入尝试失败次数不得超过 3 次。

2 级安全性采用 32 字节的预共享密钥 (PSK) 来进行器件验证和经过身份验证的更新。这两个功能都结合使用器件内的 SHA2-384 和 HMAC SHA2-256 哈希算法来计算消息身份验证代码 (MAC)。进行器件验证时，器件会将计算出的 MAC 与预期的 MAC 进行比较，以验证器件是否已编程正确的 PSK 和 NVM 配置。

## 5 高效率 and 热性能

机架服务器采用具有许多 PCB 层的电路板，具体情况受限于外形因素。机架服务器设计用于狭窄的空间，因此在选择直流/直流转换器时，请考虑散热环境和可用气流。机架服务器内部的环境温度通常在 60°C 至 70°C 之间，因为通常可以使用强制气流。较高的电路板温度会降低可靠性，而较高电流的直流/直流转换器会影响总体热预算。

图 5-1 所示为 TPS543C20A 的安全运行曲线，而图 5-2 展示了其功率损耗图。TPS543C20A 直流/直流转换器可在环境温度为 75°C 且无气流的情况下提供 40A 和 1V 输出。在 25A 和 1V 输出下，整个解决方案的功率耗散小于 3W，相当于在以 500kHz 频率进行开关时的效率约为 90%。

根据 6 层、每层 2 盎司覆铜和 2.75 英寸 x 3 英寸电路板尺寸的条件，TPS543C20A 测得的结至环境热阻为 12°C/W，这证明了其低热阻特性。但是，半导体和 IC 封装存在许多热指标，范围可从  $R_{\theta JA}$  到  $\psi_{JT}$ 。通常，设计人员会误用这些热指标来估算系统内的结温。最终，热性能取决于电路板布局以及对以 JEDEC 为参照的标准热数字的使用。<sup>2</sup>

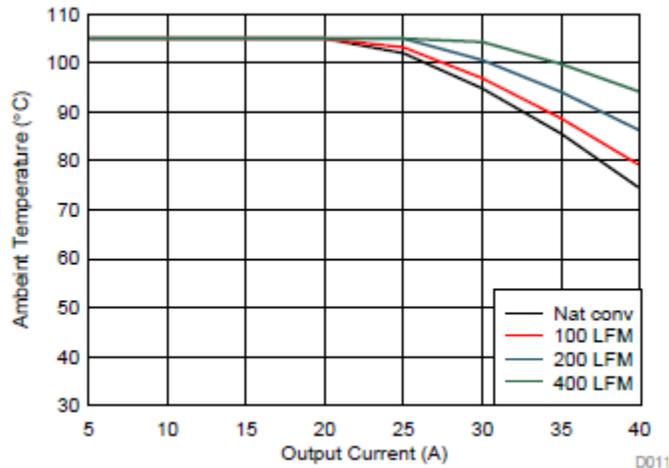


图 5-1. TPS543C20A 的 SOA 曲线

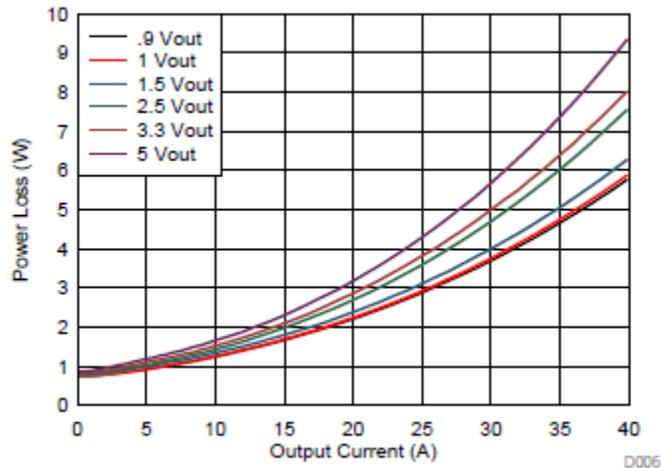


图 5-2. TPS543C20A 的功率损耗曲线

<sup>2</sup> 了解集成了功率 MOSFET 的直流/直流转换器的热阻规格

## 6 具有可调软启动和高输出电压精度的线性稳压器

对于低电流轨，具有用户可编程软启动功能的线性稳压器可通过减少启动时的容性浪涌电流来减小输入电源上的应力，特别是在存在高容性负载或者是处理器需要多个旁路电容器的情况下。TPS748A 可调线性稳压器提供了单调（非负斜率）线性软启动斜坡功能，非常适合为许多不同类型的处理器供电。该线性稳压器还包括使能引脚和电源正常引脚，以帮助实施时序控制方案。图 6-1 中的启动波形显示了启动时间在几个软启动电容值之间的变化。

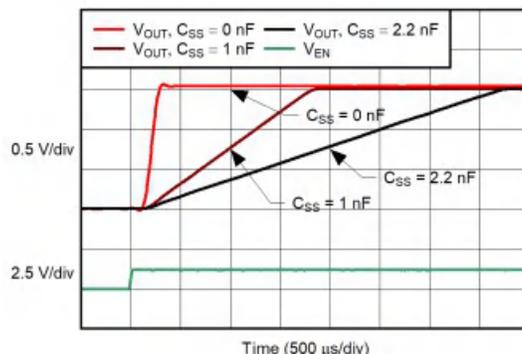


图 6-1. TPS748A 启动波形

该线性稳压器具有精密基准和误差放大器，即使是存在负载、线路、温度和工艺差异，也能提供 0.85% 的精度。基准电压的精度可与市场上许多开关模式直流/直流转换器相媲美，因此可在低电流应用中使用线性稳压器，而不影响功能和时序控制要求或输出电压精度性能。

## 7 结论

诸如数据中心内的 Intel Xeon Sapphire Rapids 可扩展服务器处理器之类的高性能处理器可从直流/直流转换器中受益，这些转换器必须提供更高的输出电压精度、快速瞬态响应、更少的外部组件数量、高效率和出色的热性能。TI 提供高性能负载点解决方案来满足这些设计要求。

## 8 其他资源

- 德州仪器 (TI), [如何满足直流电压精度和交流负载瞬态规格](#), TI 培训视频。
- 德州仪器 (TI), [适用于 D-CAP3 调制的精度提高型斜坡生成设计](#), 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [控制模式快速参考指南 - 降压非隔离式直流/直流转换器](#)。
- 德州仪器 (TI), [TI 机架服务器](#)。

## 9 修订历史记录

<b>Changes from Revision B (August 2023) to Revision C (October 2024)</b>	<b>Page</b>
• 更新了推荐使用的负载点转换器表.....	2
• 添加了 TPS548B23 的输出电压调节精度表.....	3
• 添加了 D-CAP4 .....	5
• 添加了 安全特性 主题.....	6
• 添加了新的线性稳压器、TPS748A 及波形 .....	8

<b>Changes from Revision A (August 2022) to Revision B (August 2023)</b>	<b>Page</b>
• 更新了推荐使用的负载点转换器表.....	2

<b>Changes from Revision * (January 2021) to Revision A (August 2022)</b>	<b>Page</b>
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1

## 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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司