

Application Note

多路复用器将取代继电器



摘要

随着自动化测试和测量以及工厂自动化等诸多系统变得越来越小且成本越来越受限，缩小信号链有望实现成本节约。几乎每个系统都包含某种类型的开关，过去一直使用机械继电器。从性能的角度来看，这种实现可能很好，但要在尺寸、成本和可靠性方面做出重大权衡。在更现代的设计中，通常使用光继电器代替机械继电器。这些通常会对信号性能造成很小的影响，从而在提高可靠性的同时大幅缩减尺寸和成本。通过使用 TI 的集成型**平缓导通电阻多路复用器**（而非光继电器），可以进一步优化许多系统。在本应用手册中，我们将讨论这三种解决方案在性能、成本、尺寸和可靠性方面的差异。

虽然这三种器件可用于类似用途，但其内部设计却有很大不同。机械继电器通常由一个电感线圈和一个物理开关组成。当电流激励线圈时，线圈变为磁性，并将两块金属拉在一起。光继电器的运行方式类似，只不过使用 LED 代替线圈来驱动 MOSFET 的栅极开/关。多路复用器将多个驱动器和 MOSFET 集成到同一芯片上，并使用恒定电压源驱动栅极。因此，与光继电器和机械继电器相比，多路复用器节省了 PCB 空间。

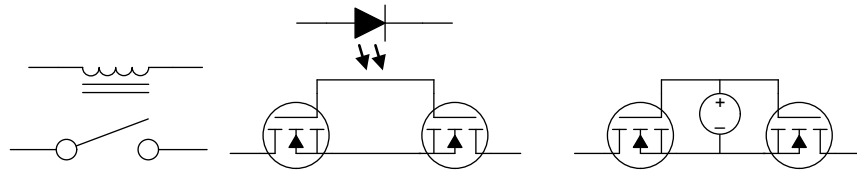


图 1-1. 等效电路（从左到右）：机械继电器、光继电器、多路复用器

内容

1 尺寸要求.....	3
1.1 优化的布局和控制.....	4
2 长期可靠性.....	4
3 功耗.....	4
4 开关速度和热开关.....	5
5 信号隔离.....	5
6 电容.....	6
7 导通电阻和平坦度.....	6
8 漏电流.....	7
9 集成式保护.....	7
10 闩锁效应抑制.....	7
11 电流隔离.....	7
12 结语.....	8
13 参考文献.....	8
14 修订历史记录.....	9

插图清单

图 1-1. 等效电路（从左到右）：机械继电器、光继电器、多路复用器.....	1
图 1-1. 16 通道、50V 设计尺寸比较（按比例绘制）.....	3
图 1-2. TMUXS7614D 顶部、TMUX7612/TMUX8212 中间、光继电器底部.....	3
图 2-1. 随时间变化所需的驱动强度.....	4
图 4-1. 开关配置文件示例（从上到下）机械继电器、光继电器、多路复用器.....	5
图 5-1. MOSFET 简化电容寄生效应.....	5
图 5-2. 整个频率范围内的微小信号关断隔离.....	5

图 6-1. 等效电容关断隔离方程 (假设阻抗系统为 50 欧姆)	6
图 7-1. 机械继电器、光继电器、传统多路复用器和 TI 的扁平 Ron 多路复用器的导通电阻.....	6
图 8-1. 光继电器、传统多路复用器和 TI 的扁平 Ron 多路复用器的关断漏电流.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 尺寸要求

尺寸是集成多路复用器开关设计的主要优势之一。例如，在 16 通道系统中，需要 16 个 SPST (1:1) 继电器，占 $>450\text{mm}^2$ 的电路板面积。这是未包含任何继电器驱动器 IC 的情况。与光继电器设计相比，用户可以看到尺寸要求明显降低。但是光继电器不能直接通过 GPIO 驱动，需要一个 LED 驱动器来控制每个开关的状态。这会增加设计尺寸、增加系统复杂性以及电源要求。TI 的多路复用器设计（例如 [TMUX821x](#) 和 [TMUX7612](#)）不需要任何其他 IC。每个单独的开关都可以通过具有 **1.8V 逻辑电平** 的标准数字引脚进行控制。因此，TI 的开关设计甚至比同类光继电器设计还要小。

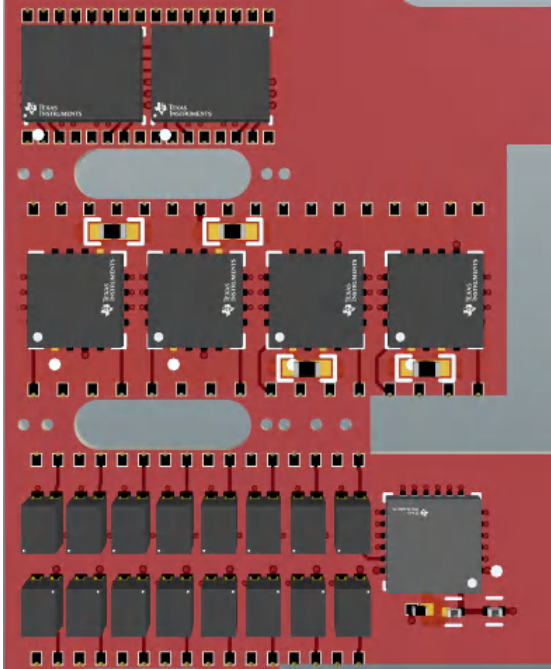


图 1-1. 16 通道、50V 设计尺寸比较 (按比例绘制)

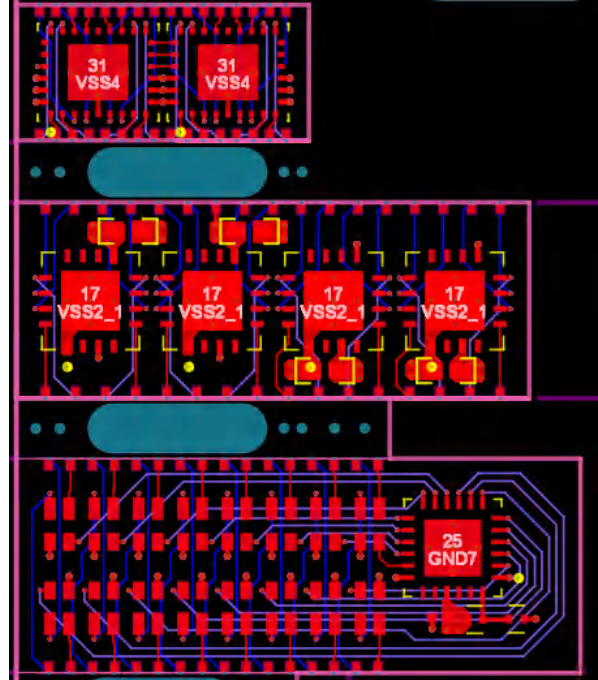


图 1-2. TMUXS7614D 顶部、TMUX7612/TMUX8212 中间、光继电器底部

随着设计尺寸成为更大的问题，布线和布局成为主要考虑因素。下表将这三个选项的实际设计尺寸与布线进行了比较。您可以看到，虽然 [TMUX7612](#) 和光继电器的封装密度相似，但当考虑布线和布局时，节省的空间更为显著。[TMUXS7614D](#) 通过集成无源器件并优化引脚排列，节省了更多的空间。

表 1-1. 16 通道设计的 PCB 面积比较

	TMUXS7614D	TMUX7612 TMUX8212	光继电器
封装总面积	2.5mm ² /通道	4.0mm ² /通道	4.2mm ² /通道
总 PCB 面积	3.18mm ² /通道	9.13mm ² /通道	11.22mm ² /通道
面积节省	129mm ² (减少 70%)	33.5mm ² (减少 20%)	-

1.1 优化的布局和控制

集成多路复用器或开关的另一个选择是优化布局和控制。大多数模拟开关都是 GPIO CMOS 输入控制，与光继电器等 LED 输入控制相比，它已经具有优势。但这可以通过 SPI 控制型器件（如 **TMUXS7614D**）得到进一步优化。如上一示例所示，如果您尝试控制 16 通道系统，通常需要分别对模拟开关和光继电器控制 16 个 GPIO 或 16 个 LED 驱动通道。借助 SPI 控制的多路复用器，可将控制以菊花链形式连接，这意味着您只需 3 条控制线（时钟、数据、芯片选择）即可独立控制所有 16 个通道。它可以扩展到任意通道数，仅使用 3 个控制引脚。

此外，**TMUXS7614D** 集成了去耦电容器并具有优化的布局，因此可以通过在开关周围留出极小的空白边距来完成布线和放置。这可以在考虑布线时实现高得多的有效通道密度。

2 长期可靠性

与机械继电器相比，光继电器明显提高了可靠性，因为没有活动器件。光继电器通过 LED 进行光学控制。通常情况下，此 LED 会随着时间的推移比开关本身更快地降级，具体取决于温度、正向电流、开关速度等。随着 LED 性能下降，需要更多电流才能完全开启光继电器。这可能需要更改系统并增大系统尺寸，以补偿这种可靠性。TI 多路复用器的可靠性不依赖于控制或开关频率的驱动强度。只要驱动多路复用器的电压高于阈值并且在器件的工作条件内，开关就会始终打开。与 LED 的驱动电流不同，该阈值电压不会随时间变化。

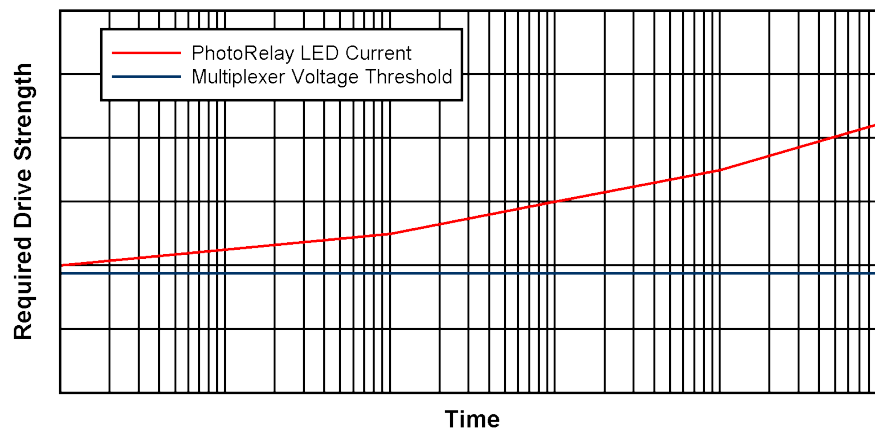


图 2-1. 随时间变化所需的驱动强度

此外，多路复用器将具有额外的 ESD 保护，以在处理和组装过程中保护器件。通常，光继电器没有这种额外的集成，需要外部元件来实现相同级别的保护。

3 功耗

另一项关键系统要求是功耗。在机械继电器和光继电器器件上，主要功率分别由线圈和 LED 消耗。电流消耗可能因器件和实施方式而异，但通常需要 100mW/通道来激励机械继电器上的线圈。对于光继电器，LED 通常需要 5mW/通道才能完全打开开关。在 4 通道多路复用器上，每通道电源消耗的功率小于 2.5mW。因此，在图 1-1 所示的 16 通道示例中，机械解决方案将使用 1600mW，光继电器将使用 80mW 加上 LED 驱动器的功耗，而多路复用器将使用 <20mW。使用多路复用器可以显著降低系统对便携式和低功耗解决方案的电源需求。

4 开关速度和热开关

由于光继电器和多路复用器是没有活动器件的固态器件，因此它们不会像机械继电器那样出现弹跳问题。机械继电器改变状态时会发生弹跳。由于开关是物理的，因此在稳定之前，开关在导通和关断状态之间有一段时间抖动。此外，出于同样的原因，光继电器和多路复用器可以热切换（当开关上有电压时打开/关闭），而不会影响可靠性。在机械继电器中，这种热切换会磨损甚至焊接接触器，从而导致严重的可靠性问题。

多路复用器的另一个主要优势是其接通/关断时间快得多。机械继电器以 1ms 至 10ms 级打开/关闭。光继电器在这方面改进到大约 0.1ms 至 1ms。多路复用器的性能甚至提高到了 50us 至 500us 左右。这可以提高运行速度并消除系统中的潜在同步错误。另一个重要的性能差异是，光继电器打开/关闭时间取决于 LED 驱动电流。随着 LED 上的正向电流增加，关断时间也会增加。多路复用器没有这种依赖性，无论 GPIO 驱动电压如何，都以恒定速度切换。

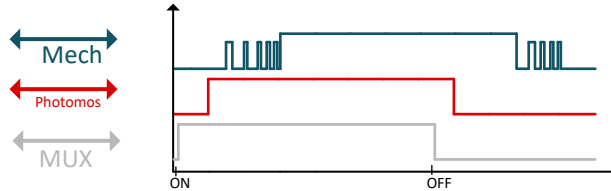


图 4-1. 开关配置文件示例 (从上到下) 机械继电器、光继电器、多路复用器

5 信号隔离

任何开关的一个关键性能指标是它在关断时隔离开关上的信号的程度。请参阅此处图 5-1 所示的等效电路图。理想情况下，开关的关断电阻非常高，而从输入到输出的电容非常低。当信号出现在开关的一侧时，我们可以计算整个频率范围内输出电压与输入电压的比值（以 dB 为单位）。对于光继电器和多路复用器器件，非隔离性能在不同频率范围内具有可比性，但可能因架构而异。由于采用了内部隔离分流器，TI 的平缓导通电阻多路复用器稍占优势。

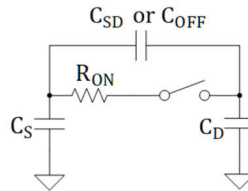


图 5-1. MOSFET 简化电容寄生效应

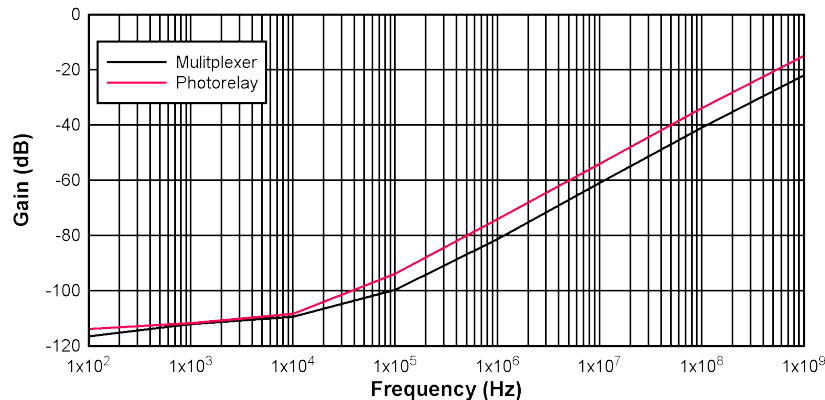


图 5-2. 整个频率范围内的微小信号关断隔离

6 电容

对于瞬态和交流系统，开关电容会影响信号质量。请参考图 6-1。MOSFET 的主要电容分量有两个：开关两端的电容以及开关接地端的电容。在许多 PhotoRelay 数据表中，开关两端的电容指定为 C_{off} 。该电容将开关的交流隔离定义为高通滤波器。该电容越大，关断时通过开关的交流电压越大。还需要注意的是，该电容在整个频率范围内并不平坦，并且通常会在较高频率时增加。对于多路复用器器件，数据表中通常未定义该参数，而是直接将关断隔离定义为开关关断时的性能。但是，可以使用图 6-1 轻松地转换这些值。

$$C_{sd} = \sqrt{\frac{A^2}{w^2 R^2 (1-A^2)}} \quad A = 10^{OISO/20} \quad OSIO = 20 \log_{10} \left(\frac{RCw}{\sqrt{1+(RCw)^2}} \right)$$

$$w = 2\pi f \quad R = 50 * 2$$

图 6-1. 等效电容关断隔离方程 (假设阻抗系统为 50 欧姆)

另一个关键寄生参数是多路复用器上的接地电容。在数据表中，这被描述为 C_{off} (当开关关闭时) 和 C_{on} (当开关打开时)。该电容将交流性能定义为低通滤波器。该电容越大，在高频下衰减的信号就越多。在光继电器中，没有直接的接地基准。因此，该电容的等效值定义为总电容。通常，系统中的关注点实际上是开关的 RC。这由导通电阻和乘以的电容一起定义。通常，RC 越低，开关在高速下的性能就越好。

7 导通电阻和平坦度

许多多路复用器器件的一个缺点是导通电阻。由于许多多路复用器器件的架构，导通电阻可能随偏置电压的变化而显著变化。这会导致输出失真较大。但是，TI 的平缓导通电阻系列多路复用器解决了这个问题。这些器件在宽偏置范围内保持平缓的导通电阻。因此，其性能更可与光继电器或机械继电器相媲美。这种平缓导通电阻为系统性能提供了显著优势，可降低 THD 并确保信号完整性。这些平缓导通电阻多路复用器具有极低的失真，并缩小与光继电器的性能差距。TMUX821x 就是此类 TI 多路复用器中的一个。

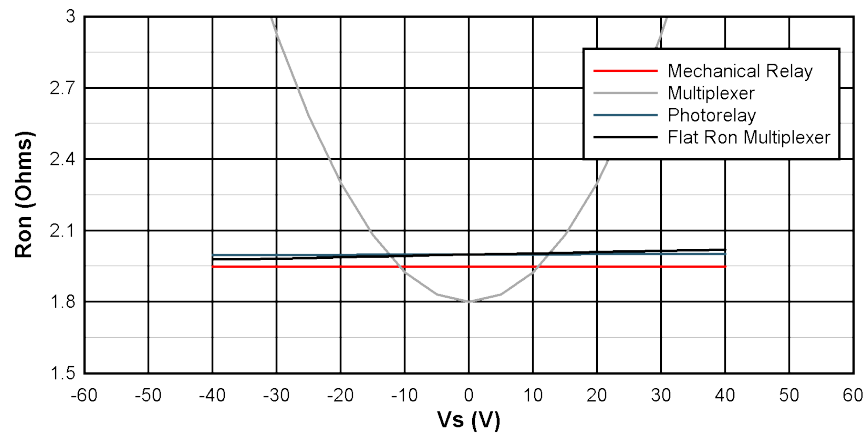


图 7-1. 机械继电器、光继电器、传统多路复用器和 TI 的扁平 Ron 多路复用器的导通电阻

8 漏电流

精密系统中的一项关键性能指标是漏电流。如果在开关关闭时在开关上施加大电压，则不需要的电流会流过 MOSFET。现代 MOSFET 设计已显著降低了这种泄漏，但对于某些应用，即使是几皮安也可能影响系统性能。

这种泄漏通常定义为 I_{off} 或关断漏电流。对于机械继电器，这种泄漏基本上为零，因为除了通过绝缘体之外没有其他路径可供电流通过。在固态解决方案中，漏电流主要来自 MOSFET 的背栅。因为光继电器没有接地基准，所以电流唯一可以通过的路径是开关。在多路复用器中，相对于地有一定量的漏电流。与传统多路复用器相比，TI 的扁平 R_{on} 多路复用器显著降低了开关的泄漏。虽然没有光继电器那么低，但这些器件在集成后提供了引人注目的性能。

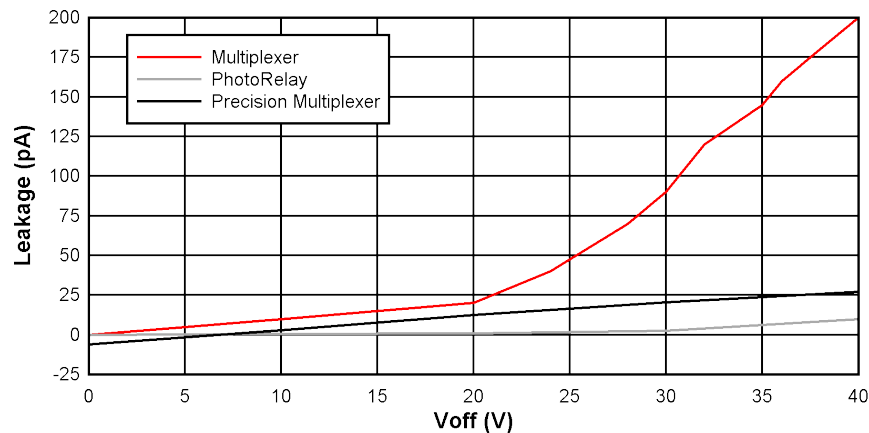


图 8-1. 光继电器、传统多路复用器和 TI 的扁平 R_{on} 多路复用器的关断漏电流

关于漏电流，最后要注意的是温度依赖性。 I_{off} 随温度呈指数增长。对于光继电器和多路复用器来说，均会出现这种情况。因此，对于精密应用，系统温度需要保持在尽可能低的水平，最好低于 50°C 。

9 集成式保护

由于多路复用器是集成 IC，它们通常会包含机械继电器或光继电器所没有的附加功能。例如，过压保护，即在检测到过压事件时，开关将自动打开。这在恶劣的工业环境中非常有用，可以保护下游的敏感 IC。有关更多信息，请参阅 [TMUX741x](#) 和 [使用故障保护多路复用器提高模拟输入模块的可靠性](#)

10 闩锁效应抑制

集成模拟多路复用器中发生闩锁事件的可能性增加，这是因为晶体管的特征尺寸更小且放置密度更高。对于在易受过压尖峰、瞬态和电流注入影响的恶劣环境中运行的器件，尤其如此。在这些环境中，我们建议使用绝缘体硅 (SOI) 等工艺来实现闩锁效应抑制多路复用器。有关更多信息，请参阅 [使用闩锁效应抑制多路复用器帮助改善系统可靠性](#)

11 电流隔离

光灯和机械继电器与开关路径电气隔离，因此这两个控制器可以基于其隔离电压额定值位于单独的域上。在不需要在控制信号之间进行隔离的应用中，可以使用多路复用器。在需要隔离的系统中，TI 提供 [固态继电器 \(SSR\) 解决方案](#)，例如 [TPSI3050-Q1](#) 隔离式开关驱动器。

12 结语

虽然机械和光继电器可以是许多开关应用的常规选择，但 TI 的集成多路复用器具有许多强大的优势，并且只需极少的权衡，例如设计尺寸更小，可靠性卓越，功耗低，开关速度快。但在漏电流、导通电阻平坦度和电容方面必须进行权衡，因为它们与系统要求有关。TI 的平缓导通电阻多路复用器已大大弥补了这一差距，可提供较低的漏电流和平坦度，同时集成了闩锁效应抑制和过压保护。

表 12-1. 推荐的光继电器替代器件

	信号范围	封装通道密度	漏电流	导通电阻 关断电容	特性
TMUXS7614DZEMR	4.5V 至 42V ±4.5V 至 ±25V	2.5mm ² /通道	32.5V、50°C 时为 930pA I _{off}	1.3 Ω 27pF	<ul style="list-style-type: none"> 集成无源器件和去耦电容器 使用菊花链时的 SPI 控制 经过优化的布局/引脚排列
TMUX7612RUMR	4.5V 至 50V ±4.5V 至 ±25V	4.0mm ² /通道	32.5V、50°C 时为 930pA I _{off}	1.3 Ω 27pF	<ul style="list-style-type: none"> 过热保护
TMUX8212RUMR	10V 至 100V ±10V 至 ±55V	4.0mm ² /通道	95V、85°C 时为 4nA I _{off}	5 Ω 12pF	<ul style="list-style-type: none"> -102dB THD+N
TMUX7412FRRPR	8V 至 44V ±5V 至 ±22V	4.0mm ² /通道	30V、85°C 时为 2nA I _{off}	8.3 Ω 12pF	<ul style="list-style-type: none"> ±60V 过压和断电保护
TMUX6112RTER	10V 至 17V ±8V 至 ±17V	2.25mm ² /通道	10V、85°C 时为 140pA I _{off}	120 Ω 3pF	-
TMUX1112RSVR	1.08V 至 5.5V	0.6mm ² /通道	10V、85°C 时为 300pA I _{off}	2 Ω 10pF	-

13 参考文献

- 德州仪器 (TI), [TMUX821x 具有闩锁效应抑制和 1.8V 逻辑电平的 100V、平缓 Ron、1:1 \(SPST\)、四通道开关数据表](#)
- 德州仪器 (TI), [TMUX741xF 具有 1.8V 逻辑的 ±60V 故障保护、1:1 \(SPST\)、4 通道开关数据表](#)
- 德州仪器 (TI), [TMUX7462F 具有可调节故障阈值、1.8V 逻辑电平和闩锁效应抑制的 ±60V 故障保护、4 通道保护器数据表](#)
- 德州仪器 (TI), [用于多路复用器和信号开关的 1.8V 逻辑](#)
- 德州仪器 (TI), [使用闩锁效应抑制多路复用器帮助改善系统可靠性](#)
- 德州仪器 (TI), [使用故障保护多路复用器提高模拟输入模块的可靠性](#)

14 修订历史记录

Changes from Revision * (May 2022) to Revision A (June 2024)	Page
• 通篇更新了表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 添加了有关 TMUXS7614D 的 SPI 控制、PCB 面积和性能的信息.....	3
• 更新了关键器件建议表.....	8

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