

Application Note

固态继电器的基础知识



Jose Rojo

摘要

固态继电器是没有活动部件的开关，可通过 MCU 等外部器件提供的信号控制负载。高压系统（例如电动汽车中的高压电池）需要使用固态继电器，以便通过低压信号控制高压负载。这些类型的应用通常需要隔离，防止两个电源域由于高电势差而形成不必要的接地环路，并确保在危险电流下对用户提供的保护。

有许多方法可用来实现固态继电器的隔离。过去几年，光电隔离或光学隔离技术在工业中得到了广泛应用。与光电隔离相比，新型电容隔离和电感隔离技术更具优势。这些优势包括可靠性更高，以及能够跨隔离势垒快速发送和接收信号，从而可提供诊断信息，向系统发送有关过流或过热等意外故障的通知。本应用手册探讨了不同类型的固态继电器及其内部拓扑。

内容

1 引言.....	2
2 什么是固态继电器？.....	2
2.1 历史记录.....	2
2.2 隔离技术.....	2
2.3 继电器演变.....	3
3 故障机制.....	3
3.1 机电继电器中的电弧.....	3
3.2 光电继电器中的光降解.....	4
3.3 局部放电.....	4
3.4 电容隔离和电感隔离中的时间依赖型电介质击穿.....	5
4 机电、光电与电容或电感等类型继电器之间的比较.....	6
4.1 机电继电器.....	6
4.2 光电或光学继电器.....	7
4.3 电容式或电感式继电器.....	7
4.4 总体比较.....	8
5 总结.....	9
6 参考资料.....	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

固态继电器是一个电子开关，在控制端子上施加外部电压时打开或关闭。固态继电器的典型应用与机电继电器相同；但主要区别在于，固态继电器没有活动部件，并具有可靠性优势。固态继电器的常见示例包括光学继电器或光电继电器，或者具有电容式或电感式隔离的隔离式开关和隔离式开关驱动器。

2 什么是固态继电器？

2.1 历史记录

2.1.1 机电继电器

机电继电器于 19 世纪中叶发明。这些器件将线圈与可移动的金属触点结合使用来充当电动开关。这些器件会因为金属触点出现磨损而发生故障，例如焊死在一起。因此，在完全失效之前器件能够进行的开关周期数有限，从而限制了其总体可靠性。

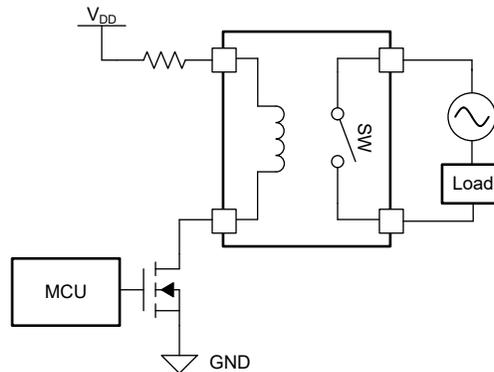


图 2-1. 机电继电器的方框图

2.1.2 固态继电器

开发固态继电器是为了克服传统继电器的这些故障和限制，其中光电继电器作为固态继电器的早期设计之一，逐渐成为这类技术中主要的设计方案。光电继电器在器件内集成了 MOSFET，从而可提高可靠性。因此，光电继电器可实现更多的开关周期数，但由于内部 LED 会随着时间的推移而老化，光电继电器会以不同的方式发生故障。

目前已开发出更新的替代方法来进一步提高固态继电器的可靠性。为了解决光电继电器中存在的问题，开发了电容式和电感式隔离技术，从而可提供强大的可靠性和高性能。请参阅节 2.2 以了解详情。

隔离式开关是具有集成 MOSFET 的单芯片设计；另外，隔离式开关驱动器是用于驱动外部 MOSFET 阵列的控制信号和电源的芯片。这两种设计都利用电容隔离和电感隔离技术来形成固态继电器

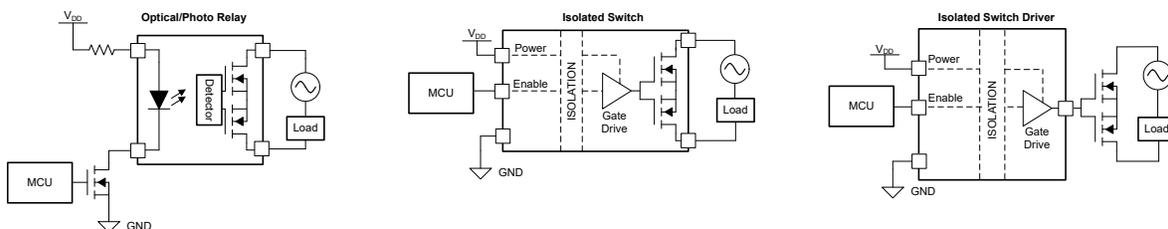


图 2-2. 固态继电器的方框图

2.2 隔离技术

2.2.1 隔离规格

固态继电器在器件的初级侧和次级侧之间通常有一个隔离势垒，该隔离势垒可以使用各种绝缘材料实现。请参阅表 2-1 以了解详情。

表 2-1. 隔离技术规格比较

隔离类型	绝缘材料	电介质强度 (1s)	工作温度
光学隔离	环氧树脂或聚酰亚胺	约 20V _{RMS} /μm 约 300V _{RMS} /μm	-40°C - 85°C
电感隔离	层压板或聚酰亚胺	约 300V _{RMS} /μm	-40°C - 125°C
电容隔离	二氧化硅	约 500V _{RMS} /μm	-40°C - 125°C

要详细了解光学隔离、电容隔离和电感隔离的内部拓扑，请参阅 [利用可靠且性价比高的隔离技术应对高压设计挑战](#)。

2.3 继电器演变

过去，机电继电器和光电继电器需要外部电阻器来控制电流，并需要外部 MOSFET 通过线圈或 LED 来驱动负载。隔离式开关和驱动器整合了基于晶体管的输入（如 TTL 或 CMOS 逻辑），从而不再需要外部电阻器和 MOSFET。因此，与其他隔离技术相比，隔离式开关或驱动器可降低总体 BOM。

图 2-3 展示了机电继电器、光电继电器和隔离式开关或驱动器（从左到右）。

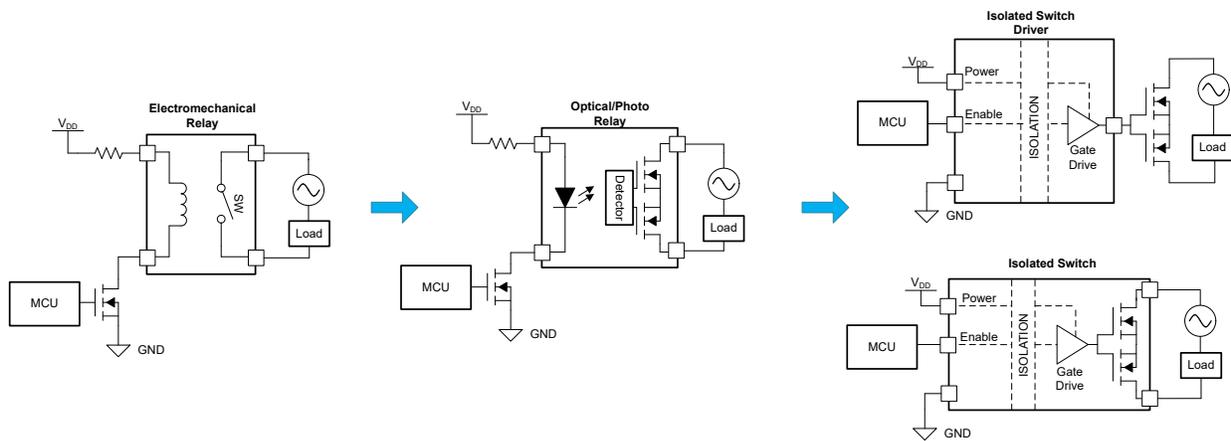


图 2-3. 继电器演变方框图

3 故障机制

所有固态继电器和机电继电器都可能会出现故障。这些故障的主要区别在于故障机制，每种器件的故障机制可能有所不同。本节介绍了机电、光和电容/电感技术中的故障机制。

3.1 机电继电器中的电弧

当机电继电器从闭合状态切换到断开状态时，金属触点最初会在两种状态之间摆动。在与电感负载结合时，金属触点会出现电弧现象，在这个过程中，电子流过金属触点之间的间隙。经过多次循环后，金属触点可能会焊接闭合，从而导致器件故障。这种故障机制限制了器件的开关周期，从而降低了总体可靠性。

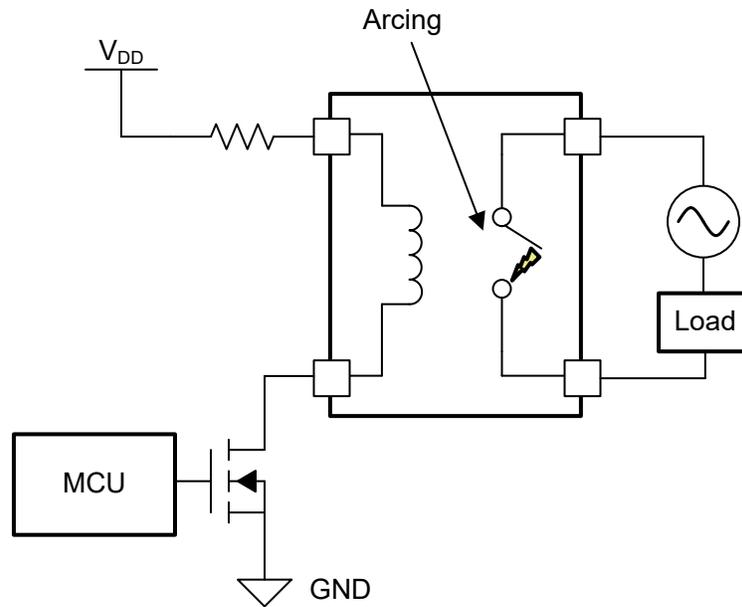


图 3-1. 机电继电器中的电弧方框图

3.2 光电继电器中的光降解

光电继电器可能会因为内部复杂的 LED 而出现故障。具体而言，LED 会受到光衰减的影响，对于光电继电器来说，这意味着极端条件下（如过热或过流），LED 的光输出能力会降低。因此，光电继电器中的 LED 没有足够的光度来驱动栅极电压，从而限制了器件的开关功能。

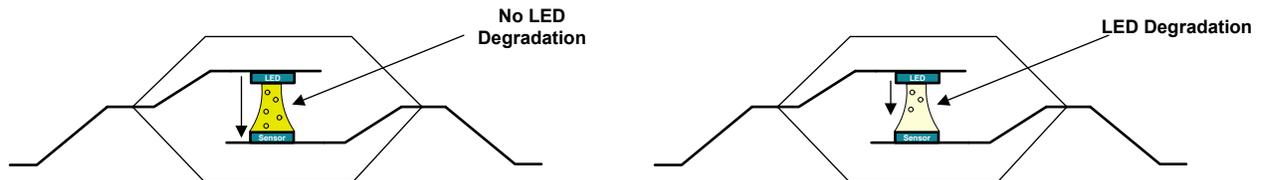


图 3-2. 光学继电器 LED 故障方框图

3.3 局部放电

固态继电器中使用的绝缘材料存在缺陷，这些缺陷称为内部空洞。这些缺陷会导致出现局部电离，即在施加高额定电压时，原子由于失去电子或得到电子而产生负电荷或正电荷的过程。因而会降低绝缘材料的介电强度，从而降低器件的隔离等级。此过程称为局部放电 (PD)，适用于大多数固态继电器。

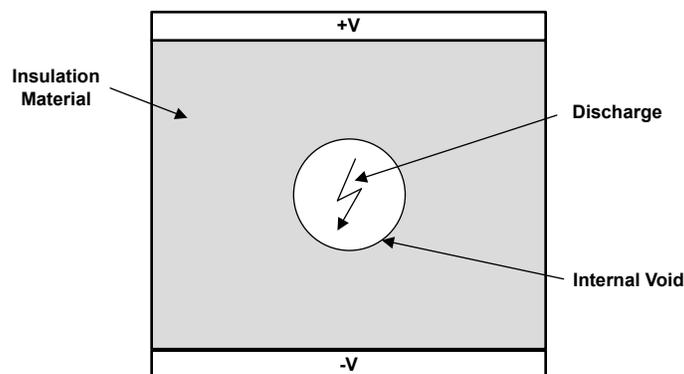


图 3-3. 内部空洞方框图

3.4 电容隔离和电感隔离中的时间依赖型电介质击穿

与光继电器类似，电容隔离和电感隔离技术也会受到局部放电的影响。因此，这种现象可以量化为时间依赖型电介质击穿 (TDDB)，这是验证任何电介质寿命的标准测试方法。可以收集器件上的时间依赖型电介质击穿 (TDDB) 性能数据来表征预期故障率。

例如，下面是 **TPSI3050-Q1** 的绝缘寿命预测数据。通过收集在各种高压等级下的击穿数据，下图显示了失效时间与 V_{RMS} 之间的关系。

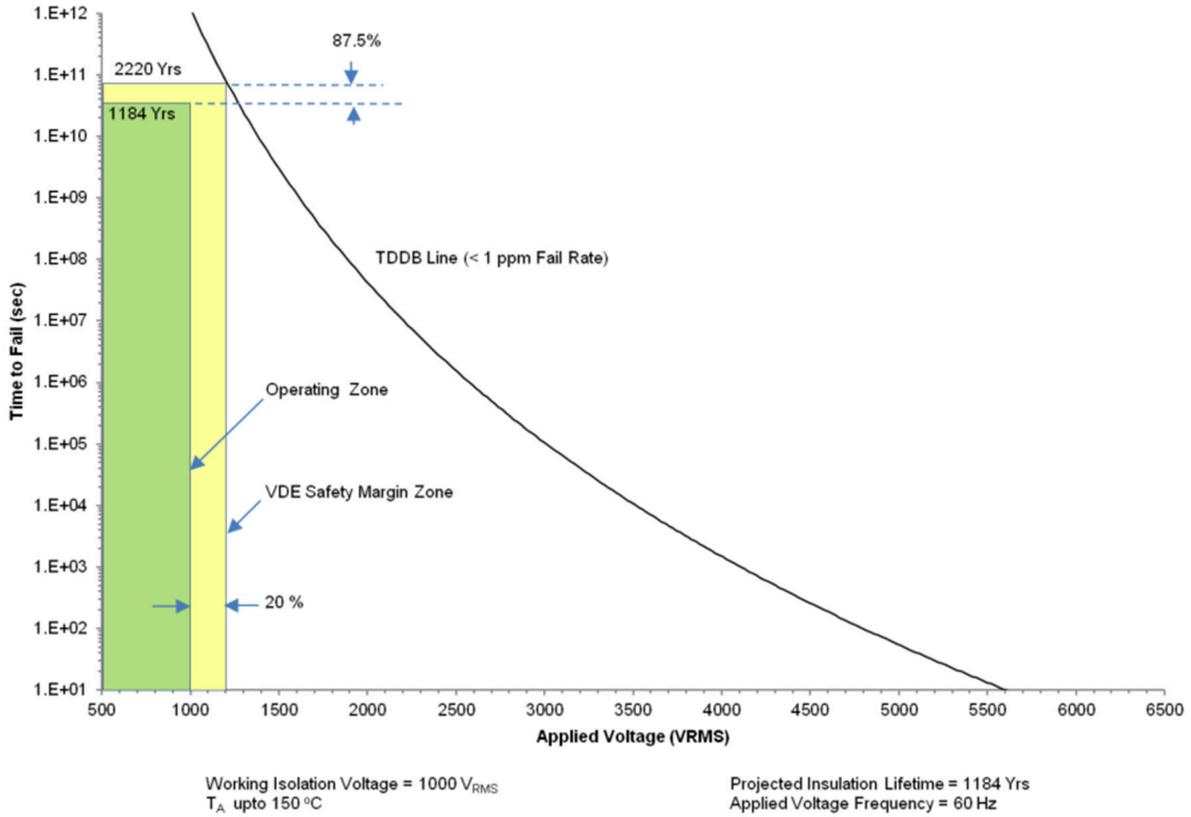


图 3-4. TPSI3050-Q1 绝缘寿命预测数据

4 机电、光电与电容或电感等类型继电器之间的比较

所有固态继电器都具有相同的特性，即没有活动部件，从而可实现高开关速度和大量开关周期。然而，由于实现隔离的方法有很多，因此每种器件都有不同的限制。

4.1 机电继电器

4.1.1 优势

4.1.1.1 无漏电流

机电继电器使用金属触点，而不是使用集成或外部 MOSFET。由于能够实现纯粹的机械断开，这样就不会在器件内产生漏电流。固态继电器的情况并非如此，由于 MOSFET 的性质，可能会存在漏电流。

图 4-1 展示了机电继电器中为什么不存在漏电流，以及固态继电器中存在漏电流的位置。

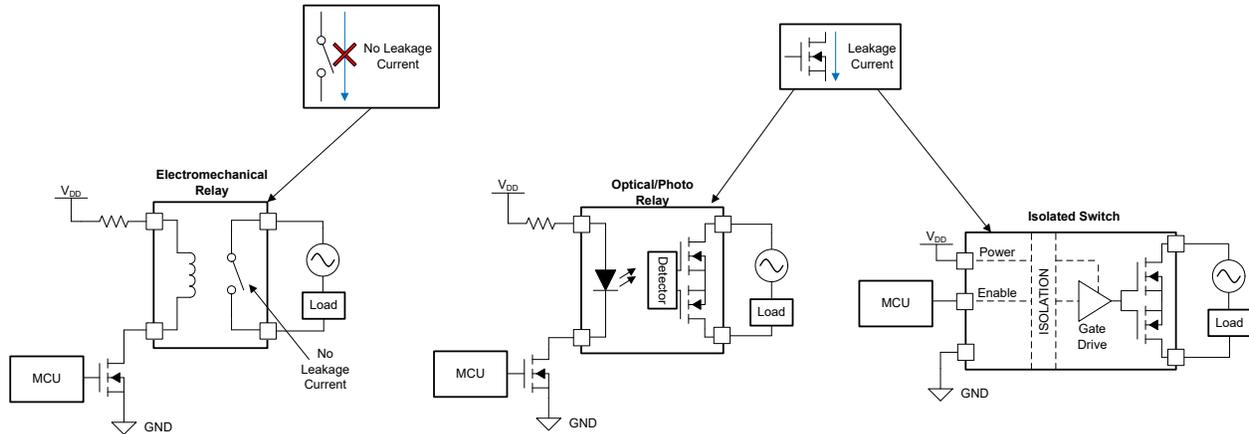


图 4-1. 所有继电器中的漏电流方框图

4.1.2 局限性

4.1.2.1 开关速度

机电继电器的开关速度通常比固态继电器更慢。这是因为流经金属触点的电流必须达到特定条件，然后才能切换到断开/闭合状态。例如，当从断开状态切换到闭合状态时，在施加电流负载之前，金属触点必须停止摆动。这称为稳定时间，在大多数机电继电器中都会出现这种现象。

4.1.2.2 封装尺寸

机电继电器通常比固态继电器更高。这是因为封装需要为器件内的所有元件（例如金属触点、线圈和弹簧）提供空间。

图 4-2 比较了机电继电器和隔离式开关驱动器的封装尺寸。

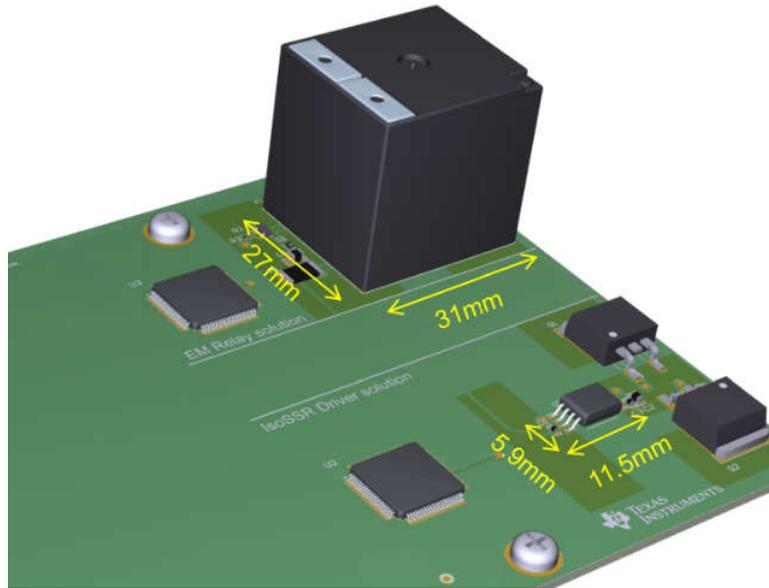


图 4-2. 机电继电器的封装尺寸

4.2 光电或光学继电器

4.2.1 优势

4.2.1.1 更低的 EMI

与电容式/电感式继电器相比，光电继电器的 EMI 等级更低。这是因为光电继电器不需要穿过隔离势垒调制或解调信号和电源，而是从 LED 向传感器发出恒定的光输出。

4.2.2 局限性

4.2.2.1 有限的温度范围

与其他继电器设计相比，光电继电器的工作温度范围更低。这是因为光电继电器内的 LED 可能会出现老化，因此如果超过一定的温度范围，可能会影响其高性能。为了达到更高的温度范围，大多数光电继电器必须使用更昂贵的材料，这在大多数应用中都是不现实的。

4.3 电容式或电感式继电器

4.3.1 优势

4.3.1.1 辅助电源

隔离式开关驱动器能够在器件的次级侧提供辅助电源，用于驱动额外的外部电路。因此，无需在器件次级侧使用任何外部电源即可为电流检测放大器等低压系统供电。

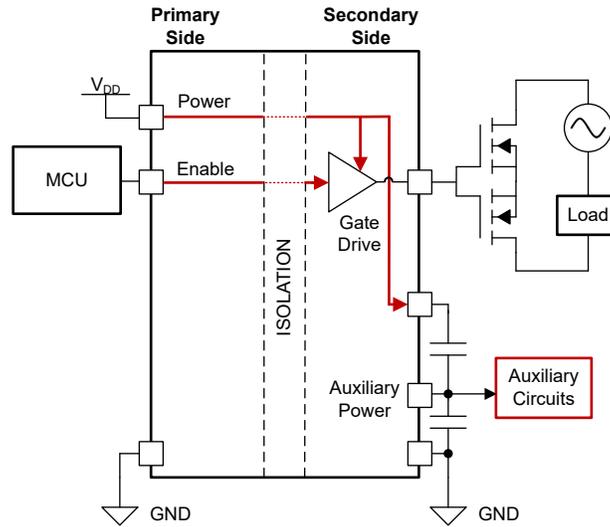


图 4-3. 具有辅助电源的隔离式开关驱动器方框图

4.3.1.2 双向通信

电容隔离和电感隔离技术能够实现诊断和保护功能。使用这些技术可以在两个方向上穿过隔离势垒发送信号，从而实现双向通信。例如，TPSI3100-Q1 能够从初级侧向次级侧发送信号和供电，以及从次级侧向初级侧发送故障和警报信号等诊断信息。这些诊断功能可用于检测过流等系统故障，或监控浪涌电流等系统状况。光学设计只能从初级侧向次级侧供电，因而仅允许单向通信，无法向系统提供诊断信息。

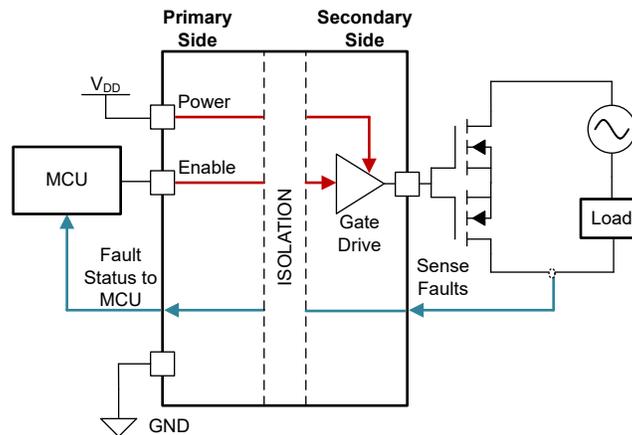


图 4-4. 具有双向通信功能的隔离式开关驱动器方框图

4.3.2 局限性

4.3.2.1 EMI

当跨越电容或电感隔离势垒供电时，需要进行开关调制。这些高频开关信号可以通过电路板进行耦合，这可能会导致出现更高的 EMI。有鉴于此，这些新技术在设计时考虑了电磁兼容性 (EMC)，有助于更大限度地减少传导发射和辐射发射。这些改进的设计能够满足严格的汽车标准，例如适用于工业应用的 CISPR 25 5 类或 CISPR 32 标准。

设计人员还可以使用其他系统级技术来改进 EMI 性能。要了解有关低成本 EMI 缓解技术的更多信息，请参阅 [TPSI2140-Q1](#) 数据表。

4.4 总体比较

请参阅表 4-1 中有关机电继电器、光学继电器和电容式/电感式继电器的比较。

表 4-1. 性能比较

继电器类型	器件	高温下的功耗	封装尺寸	漏电流	开关周期数	可靠性	开关速度
非固态继电器	机电继电器	较高	更大	无	受限	较低	慢
固态继电器	光继电器	较高	更小	漏电流小	高	较佳	快
	电容式/电感式继电器	较低	更小	漏电流小	高	较佳	快

5 总结

固态继电器适用于高压系统，可提供比机电继电器更好的总体可靠性和性能。与 EMR 相比，光电或光学设计在可靠性方面有了初步的改进，而电容隔离和电感隔离等较新的技术能够实现高级保护功能并进一步提高可靠性。这些下一代固态继电器能够为许多行业的创新奠定基础，突破电子开关器件的功能限制。

6 参考资料

- 德州仪器 (TI), [如何使用固态继电器实现更可靠的隔离和更小的解决方案尺寸](#) 技术文章。
- 德州仪器 (TI), [为何高压系统需要预充电电路](#) 应用简报。
- 德州仪器 (TI), [级联两个 TPSI3050 隔离式开关驱动器以提高栅极驱动电压](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [高压电动汽车充电和太阳能中的绝缘监测 AFE 参考设计](#)。
- 德州仪器 (TI), [固态继电器的过流和过热保护参考设计](#)。
- 德州仪器 (TI), [适用于固态继电器的过零开关参考设计](#)。
- 德州仪器 (TI), [增强型隔离电介质系统的高频 TDDB 技术白皮书](#)。
- 德州仪器 (TI), [利用可靠且性价比高的隔离技术应对高压设计挑战](#) 营销白皮书。
- 德州仪器 (TI), [TPSI2140-Q1 具有 2mA 雪崩能力的汽车级 1200V、50mA 隔离开关](#) 数据表。

有关更多信息，请参阅[固态继电器](#)。

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