Analog Engineer's Circuit

采用 INA901-SP 且适用于 TPS7H500x-SP 系列器件的航天级过流保护电路

Carolus Andrews

设计目标

输入		过流条件	输出	电源	电离总剂量	单粒子抗扰度
$I_{load\ Min}$	$I_{load\ Max}$	I_{OC_TH}	V_{out_OC}	V_S	TID	SEL
10A	20A	21A	2.1V	5V	50krad (Si)	75MeV × cm^2/mg

设计说明

这是一种单向电流检测设计，通常称为过流保护 (OCP)，可提供过流警报信号以对超过阈值电流的系统断电。在此特定设计中，正常工作负载为 10A 至 20A。当 TPS7H500x-SP 的 FAULT 引脚达到 0.6V 时，该设计的过流阈值将触发。TPS7H500x-SP 是一系列 PWM 控制器，它们提供许多的特性有利于设计面向太空应用的直流/直流转换器拓扑。这些器件具有内置迟滞功能，当系统中恢复有效的 PWM 时，器件将保持有效关断状态，直到该值恢复到低于 0.5V。完整 TPS7H500x-SP 系列及其各种特性在 TPS7H500x-SP 器件比较表中列出。

TPS7H500x-SP 器件比较

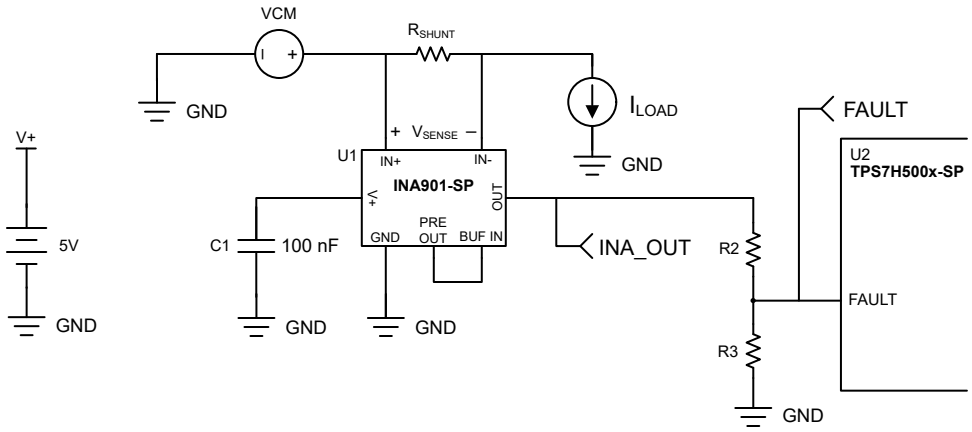
器件	主要输出	同步整流器输出	死区时间设置	前沿消隐时间设置	占空比限制选项
TPS7H5001-SP	2	2	电阻器可编程	电阻器可编程	50%、75%、100%
TPS7H5002-SP	1	1	电阻器可编程	电阻器可编程	75%，100%
TPS7H5003-SP	1	1	固定（典型值 50ns）	固定（典型值 50ns）	75%，100%
TPS7H5004-SP	2	0	不适用	电阻器可编程	50%

TPS7H4011-SP 是 TPS7H500x-SP 系列 PWM 控制器的 14V、12A 同步降压转换器替代产品。TPS7H4011-SP 将功率 MOSFET 集成到器件中，从而在减少元件数量的情况下实现高效率。TPS7H4011-SP 还具有可用作过流输入的 0.6V 故障阈值，与 TPS7H500x-SP 系列类似。

为实现预期结果，此设计将用于监控初级的 INA901-SP 的输出衰减到一个精密分压器，该分压器在计算得出的过流点触发，以根据系统中产生的热量优化设计中的误差。

TPS7H500x-SP 在 4V 至 14V 的 V_{IN} 下工作，而 INA901-SP 在 2.7V 至 16V 的单电源下工作，从而支持两个器件均可在相同电源幅度下工作的多个设计用例。出于本设计的目的，INA901-SP 由单个 5V 电源轨供电。OCP 可应用于高侧和低侧拓扑。此电路中介绍的设计是高侧实现方案，共模电压 (VCM) 表示 5V 至 28V 之间的理想电压电源。该电路可用于 TPS7H500x-SP 周围的遥测、运行状况监控和系统诊断等。除了此功能外，此电路还实现了 INA901-SP 耐辐射加固保障 (RHA) 器件，在低剂量率下为 50krad(Si)，也即，在 125°C 下的单粒子闩锁 (SEL) 抗扰度可达 75MeV-cm^2/mg。TPS7H500x-SP 系列器件为 RHA 器件，在低剂量率下为 100krad(Si)，也就是说，在 125°C 下的 SEL 抗扰度也达到 75MeV-cm^2/mg。

English Document: SBOA560
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated



设计说明

1. 对于精确过流应用，保持电源稳定且将噪声和干扰降至更低至关重要。为此，请使用去耦电容器 C1 以确保器件电源稳定。将去耦电容器尽可能靠近 INA901-SP 的电源引脚放置。
2. 如果电路中需要额外的接地短路保护功能，与输入引脚串联的保险丝可以提供此功能，但请勿使用电阻器达到此目的。在 INA901-SP 的输入引脚上添加电阻器会从根本上改变放大器的增益。然而，内部电阻器的容差会波动高达 30%（这些电阻器会互相匹配，而不是绝对值），因此这种增益变化会因器件而异，不能算是可靠的设计。

设计步骤

1. **满标量程**：确认需要监测的条件的负载范围。就本设计示例而言，负载范围定义为 10A 至 20A，所需的过流响应 (I_{TRIP}) 发生在 21A 时。请根据输入感应电压允许的最大电流范围（包括过流值）选择 R_{SHUNT}。其他注意事项包括位于测量低端的失调电压（包括 CMRR 和 PSRR 产生的影响），以及位于测量高端的分流电阻器中的功耗注意事项。采用 INA901-SP 进行设计时，为获得更佳性能，请确保所选分流电阻器的 I_{MIN} 条件产生 > 20mV 的检测电压，以符合 *INA901-SP 耐辐射、–15V 至 65V 共模电压、单向电流分流监控器* 数据表中 *V_{SENSE} 和共模电压作用下的精度范围* 部分的要求。
2. **增益选项**：对于 INA901-SP，只有 20V/V 选项可用，因此对于此设计，此条件是固定的。
3. **选择分流电阻器**：当给定在步骤 1 中定义的设计条件时，使用以下公式来选择合适的分流电阻器。电源电压要降低 200mV，以确保器件满足摆幅至轨限制。数值来自于之前定义的使用案例：

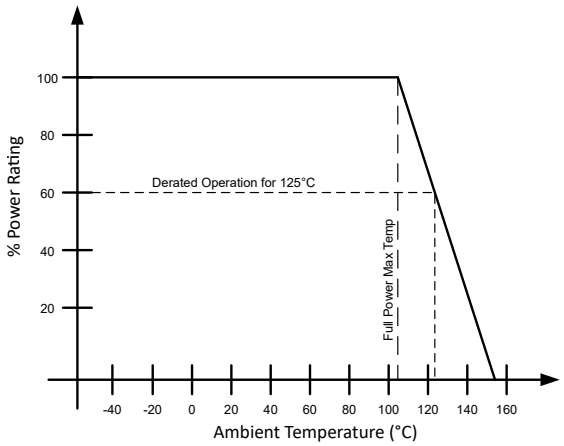
$$R_{SHUNT} \leq \frac{V_{SWING-RAIL}}{I_{TRIP} \times GAIN} = \frac{4.8\ V}{21\ A \times 20\frac{V}{V}} = 11.43\ m\Omega$$

此处的计算值为 11.43mΩ，从 E 标准制造值的角度来看，这很不方便。因此，为此设计选择了 10mΩ 的分流电阻器值，该值对应于 4.2V 的计算过流点。然而，在热约束随着电阻成比例增加的折衷条件下，设计为输出最大值可更好地利用满量程范围。以下公式给出了分流电阻器中最坏情况下的功耗：

$$P_{SHUNT} = I_{max}^2 \times R_{SHUNT} = 21\ A^2 \times\ 0.01\ \Omega = 4.4\ W$$

English Document: SBOA560
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4. **降额分流电阻器：**对于温度过高的应用，必须考虑所选分流电阻器的功率降额。下图显示了电阻器的典型功率降额曲线。



典型分流电阻器降额曲线

如曲线所示，对于最大额定负载，该分流电阻器能够处理的最高温度大概为 105°C。对于 125°C 的应用，根据曲线信息，分流电阻器只能处理原始额定功率的 60%。根据计算出的最大值，这表明所选分流电阻器的额定功率选择正确，如以下公式所示。

$$P_{REQUIRED} > \frac{P_{max}}{Derating} = \frac{4.4\ W}{0.6} = 7.33\ W$$

这一计算结果表明，如果这是所选择的分流电阻器，则需要从该数据表中选择额定功率至少为 7.33W 的产品，以在额定温度范围的高端提供分流承受能力。为增强此设计的稳健性，还可以增加额外的裕量。这些数字并不是所有分流电阻器的标准；这些工作点因电阻器而异。这些数字还可以包括额外的数据点和标准，例如允许扩展范围的覆盖物或散热器。请参阅预期分流电阻器和设计的数据表，以确保它适合设计需求。

5. **将过流点移位至** TPS7H500x-SP：如步骤 3 中确定的那样，基于所选分流电阻器的实际过流点为 4.2V。为了实现 TPS7H500x-SP 的 FAULT 引脚的用途，过流电压必须向下衰减至 0.6V。R2 和 R3 之间的一个简单分压器可以实现这一点。为 R3 选择 10kΩ 的值，并为 R2 求解以下等式：

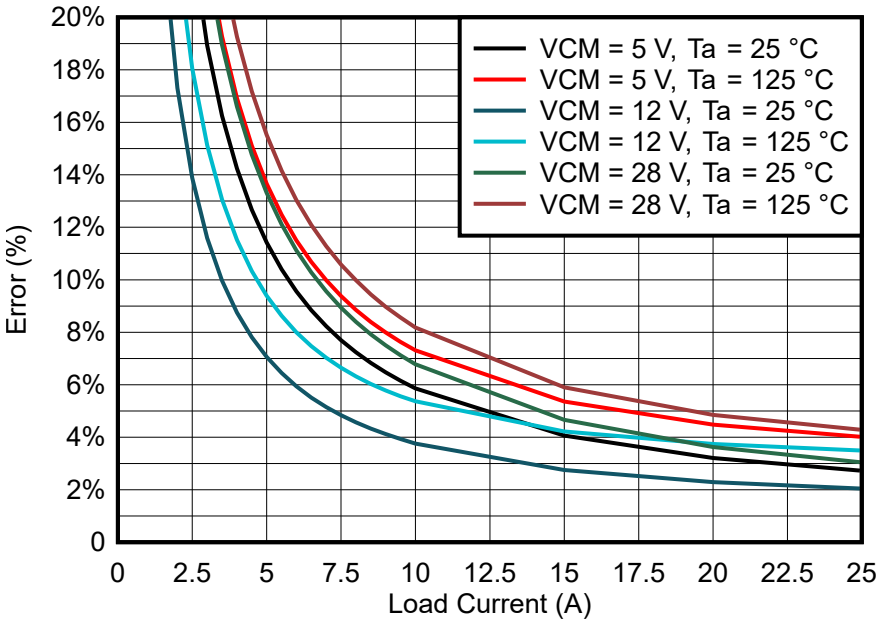
$$R_2 = \frac{R_3(V_{OUT,\ max} - 0.6)}{0.6} = \frac{10\ k\Omega(4.2\ V - 0.6)}{0.6} = 60\ k\Omega$$

通常，计算得出的电阻器值并不是直接与可选的电阻器相对应。这里，60kΩ 并不是标准值，最接近的标准值是 59.7kΩ。这种选择会在 OCP 点上另外增加 0.5% 的误差，并且需要进行设计选择，以确定该误差是否可接受。某些 60kΩ 选项确实存在，但通常成本更高，因为这些选项不是标准值。出于本设计的目的，选择 60kΩ 将以额外的成本为代价。选择这两个电阻器时，容差均为 0.1%。如果设计决策是接受此误差，请始终向下舍入到最接近的标准值，以避免将过流点设置为高于预期目标，而可能导致无法在指定点跳闸。

English Document: SBOA560
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

6. **误差检查**：电流分流监测器的一个主要误差源是偏移量误差，尤其是在测量值较低时。这还可能包括来自器件的共模抑制 (CMR) 和电源抑制 (PSR) 功能的影响。在测量的较高端，增益误差通常在测量中占主导地位，由于生成的感测电压相对于失调电压通常较大，因而可将这种影响降至更低。在过流应用中，失调电压通常不是问题，但如果所做出的设计决策将过流点设置在满量程范围内以用于分流电阻器的热释放，那么失调电压就会产生影响。下面的公式显示与电流检测放大器有关的所有误差的一般形式，而下图显示了在 5V、12V 和 28V 设计基础之上所完成的设计的总误差曲线。此处误差的主要差异是来自共模电压变化的影响。

$$e_{TOTAL} = \sqrt{e_{Vos}^2 + e_{CMRR}^2 + e_{PSRR}^2 + e_{GAIN}^2 + e_{Linearity}^2 + e_{Shunt}^2 + e_{Bias\ Current}^2 + e_{other}^2}$$

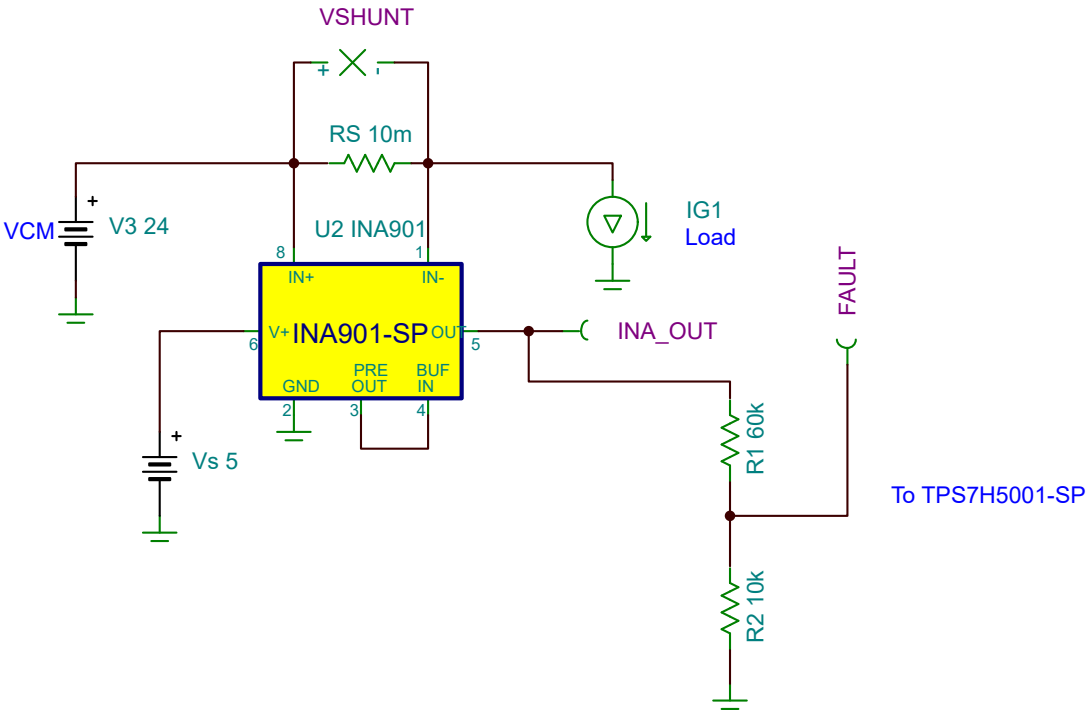


INA901-SP 不同 VCM 的总输出误差

误差公式中的*另一*部分误差通常涉及额外的外部因素，例如衰减电阻器的容差。如曲线所示，当电压偏离 12V 数据表条件（即 INA901-SP 的标称共模工作点）时，误差会根据电路的 VCM 而增加，表现为以输入为基准的附加失调电压误差。通过提供更大的电源电压并将过流点设计为进一步远离失调电压，可以获得额外的精度，但这会带来分流电阻器上热量增加的挑战，因为生成的检测电压与分流电阻器中产生的热量成正比。

设计仿真

English Document: SBOA560
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated



INA901-SP TINA-TI 电路仿真设置

瞬态仿真和基准测试结果

如 INA901 TINA-TI 仿真结果所示，通过将所需的 4.2V 输出电压映射到所需的 0.6V FAULT 触发器，设计得到了确认。然后，根据基准实施了该设计。

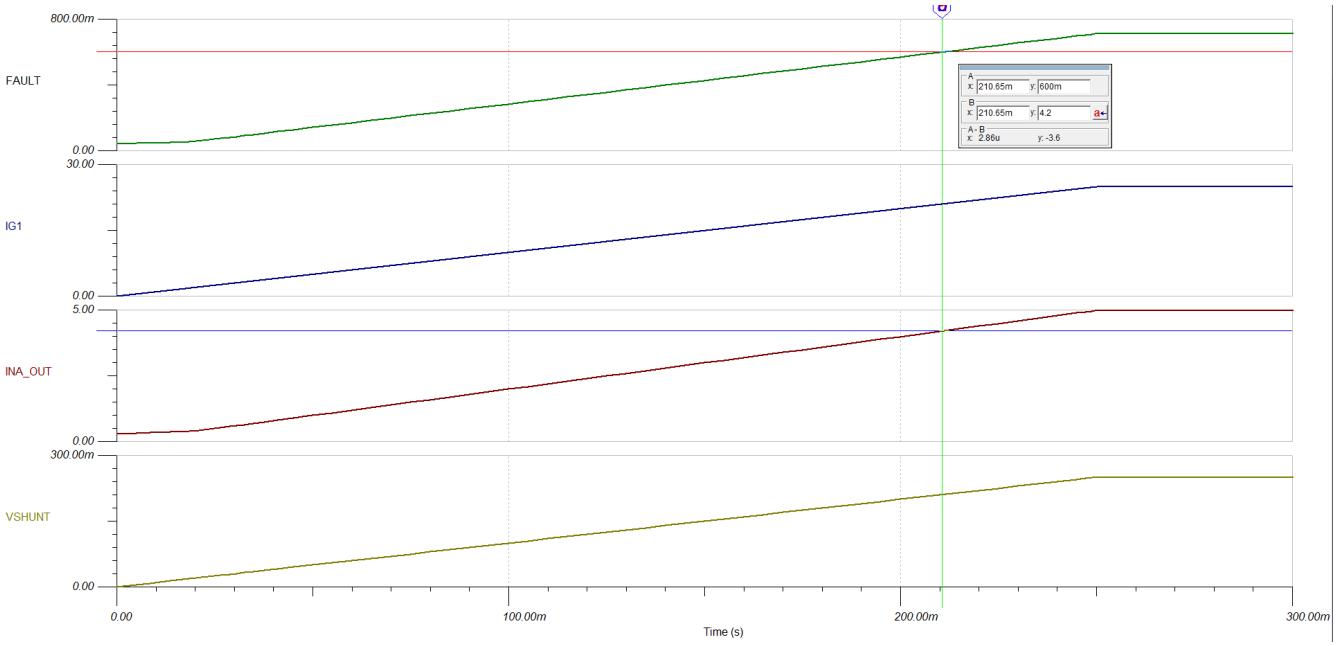
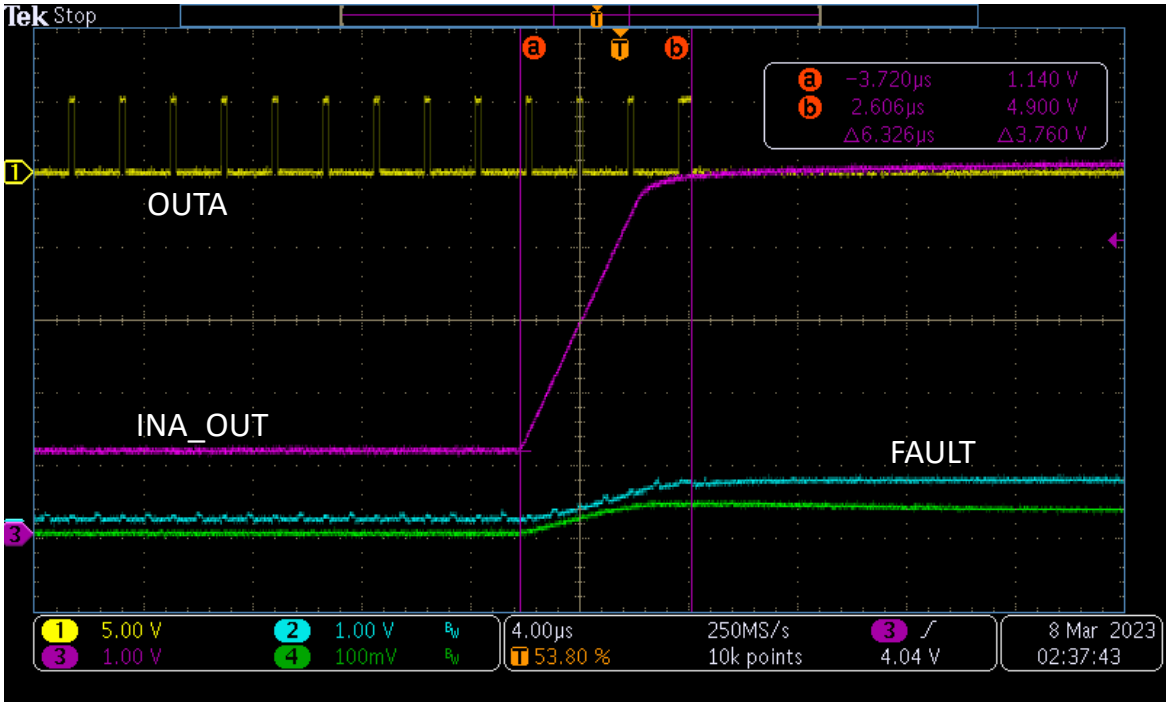


图 1-1. INA901 TINA-TI 仿真结果

在 INA901-SP 瞬态响应基准测试中，INA901-SP 的阶跃输入从 60mV$_{SENSE}$ 更改为 250mV$_{SENSE}$，模拟了负载的短路，并检查输出响应。如曲线所示，从事件开始到 PWM 输出关断的时间大概为 6µs。根据 INA901-SP 的斜升，可以进行插值，以使临界触发和 OUTA 关断之间的时间大概为 2 µ s，这与 TPS7H500x-SP 的预期性能一致，如 TPS7H500x-SP FAULT 引脚响应时间所示。

English Document: SBOA560
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated



INA901-SP 瞬态响应基准测试

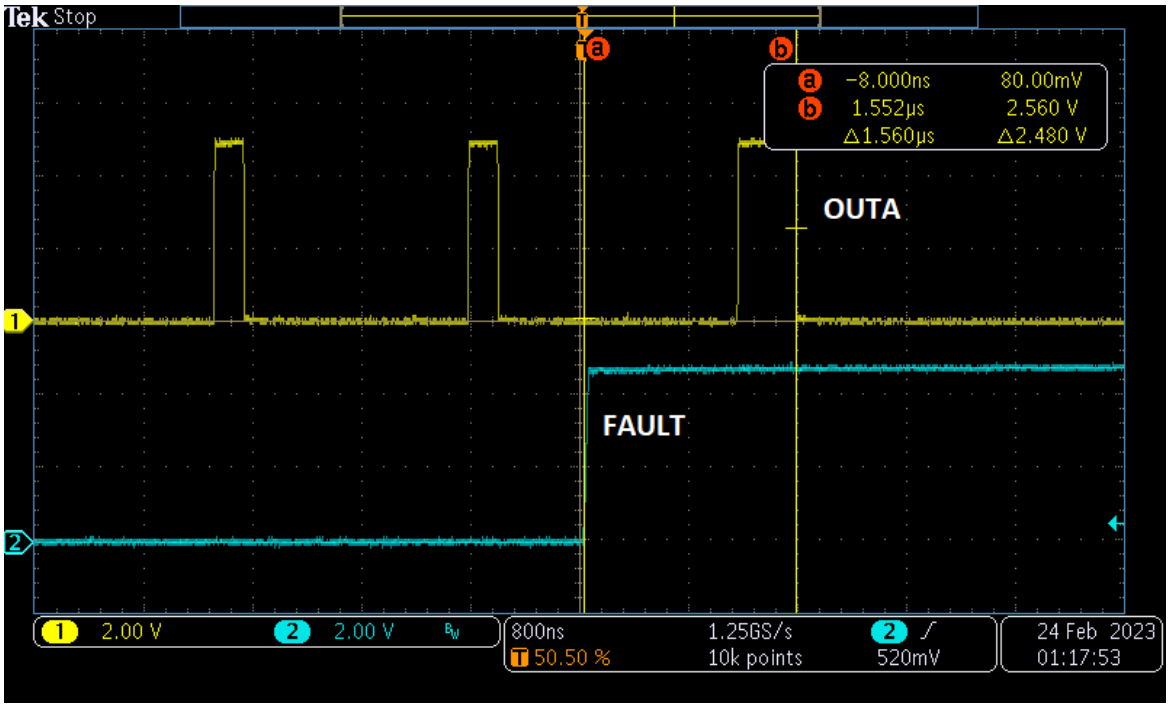


图 1-2. TPS7H500x-SP FAULT 引脚响应时间

English Document: SBOA560
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

设计参考资料

请观看“TI 精密实验室”的*电流检测放大器*系列视频。

设计特色电流检测放大器

INA901-SP	
V_S	2.7V 至 16V
V_{CM}	-15V 至 65V
V_{OUT}	GND + 3mV 至 V_S – 50mV，典型值
V_{OS}	±500 µ V，典型值
I_q	350 µ A，典型值
I_B	±8 µ A，典型值
TID 特性（无 ELDRS）	50krad(Si)
针对 LET 的 SEL 抗扰度	75MeV-cm^2/mg

对于不太严苛的辐射环境，TI 还提供了 INA950-SEP 和 INA951-SEP，这些器件在 125°C 时的 SEL 抗扰度可达 43MeV-cm^2/mg。这些器件在 30krad(Si) 的条件下无 ELDRS，并且每个晶圆批次的电离总剂量 (TID) RLAT 高达 30krad(Si)：

设计备选电流检测放大器

器件	INA950-SEP	INA951-SEP
V_S	2.7V 至 5.5V	2.7V 至 10V
V_{CM}	2.7V 至 80V	-4V 至 80V
V_{OUT}	GND + 5mV 至 V_S – 70mV，典型值	GND + 5mV 至 V_S – 70mV，典型值
V_{OS}	±6 µ V，典型值	±30 µ V，典型值
I_q	0.37 mA，典型值	1.5 mA，典型值
I_B	20 µ A，典型值	20 µA，典型值
TID 特性（无 ELDRS）	30krad (Si)	30krad (Si)
针对 LET 的 SEL 抗扰度	43MeV-cm^2/mg	43MeV-cm^2/mg

对于这些不太严苛的辐射环境，TI 还提供了 TPS7H5005-SEP、TPS7H5006-SEP、TPS7H5007-SEP、TPS7H5008-SEP 和 TPS7H4011-SEP 作为 TPS7H500x-SP 系列的替代产品。这些器件可提供 43MeV-cm ^{2}/mg 的 SEL、SEB、SEGR、SET 和 SEFI 抗扰度，并且每个晶圆批次的电离总剂量 (TID) 可保证高达 50krad (Si)：

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

修订历史记录

Changes from Revision * (March 2023) to Revision A (October 2026)	Page
• 向*设计说明*部分添加了有关新发布器件的信息	1
• 向*设计参考*部分添加了有关新发布器件的信息	1

English Document: SBOA560
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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出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