

## Application Note

## 保护和维护 PLC 系统中的信号完整性



Kameron Hill, Lutz Naumann, Michael Koltun

## 摘要

电气快速瞬变 (EFT) 是一系列高电压快速频率脉冲, 可对工厂自动化可编程逻辑控制器 (PLC) 系统中的模拟输入和输出模块造成冲击。EFT 突发通常来自 PLC 系统周围的电缆, 并通过电感耦合或电容耦合使数据或电力传输中断。由于恶劣工业环境中引入的不利影响, PLC 系统需要防范 EFT 突发和永久误接线。本文档介绍了如何将 TI 的故障保护多路复用器设计到系统中, 以保护信号链器件免受有害高压信号的影响, 同时允许器件在突发事件期间继续进行通信。

## 内容

1 系统中的故障保护多路复用器运行以及 EFT 突发测试要求	2
2 系统级保护说明和基于快速故障恢复时间的设计	4
3 EFT 突发测试的系统级实验室测试程序和结果	6
4 结语	12
5 参考资料	12
6 修订历史记录	13

## 插图清单

图 1-1. 故障保护多路复用器在 PLC 系统中的典型应用	2
图 1-2. 突发波形和时序定义	3
图 1-3. 测试重复时间	4
图 2-1. 突发测试期间链路放电且恢复时间过长	5
图 2-2. 突发测试期间链路重新充电, 满足 EFT 突发测试标准 B	5
图 2-3. Tina-TI 模型	6
图 2-4. Tina-TI 模型结果	6
图 3-1. EFT 突发测试设置	7
图 3-2. EFT 突发测试设置和探头位置	7
图 3-3. 5kHz 仿真 EFT 突发测试 TMUX7462F 放大图	8
图 3-4. TMUX7462F 缩小图	9
图 3-5. 5kHz 仿真 EFT 突发测试 TMUX7309F 放大图	10
图 3-6. TMUX7309F 缩小图	10
图 3-7. 100kHz 仿真 EFT 突发测试 TMUX7462F	11

## 表格清单

表 1-1. IEC61000-4-4 EFT 突发测试的测试级别	2
表 3-1. 失调电压误差表	11
表 4-1. 用于 PLC 应用的 TI 故障保护多路复用器	12

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 系统中的故障保护多路复用器运行以及 EFT 突发测试要求

TI 创建了故障保护多路复用器，此类多路复用器具有被称为过压保护 (OVP) 的集成特性。这些多路复用器的 OVP 特性旨在阻止超出多路复用器正电源或负电源范围的输入信号。例如，在查看图 1-1 时，假设我们使用的是 PLC 系统，其中输入为 24V，多路复用器的电源电压为  $\pm 15V$ 。在此示例中，TMUX7308F 的 OVP 功能激活并断开源输入传递信号，以保护 PLC 系统中的下游元件。

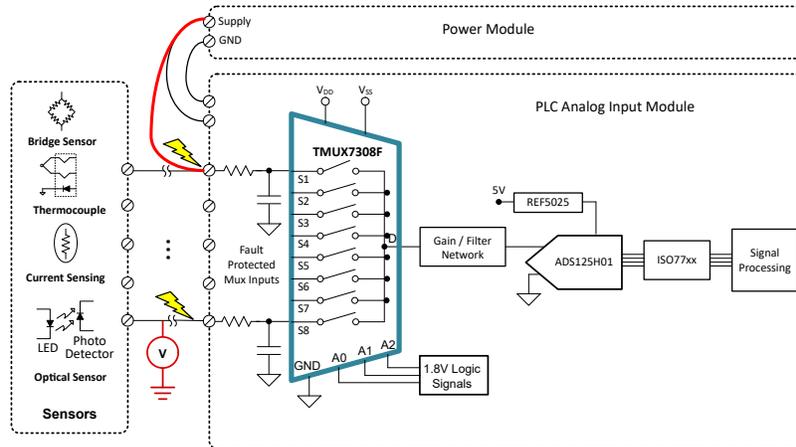


图 1-1. 故障保护多路复用器在 PLC 系统中的典型应用

同样的 OVP 功能还可用于在工厂自动化环境中阻止 EFT 突发信号，这些信号会冲击模拟输入和输出模块之间的通信线路。虽然对工厂自动化通信中的元件进行即时保护很重要，但另一个重要细节是需要 EFT 突发事件期间快速恢复通信线路。凭借 TI 的故障保护多路复用器的快速恢复时间 (*trecover*)，此系列器件能够在比 EFT 突发脉冲 (*toff*) 间隔时间更短的时间内重新连接模拟信号线。这保证开关可以快速重新连接 PLC 模块，从而在 EFT 突发事件期间实现准确通信和超小的信号衰减。

EFT 突发测试的典型特性包括峰值电压幅度、测试电平、突发波形和时序定义以及测试重复时间，如下图 (表 1-1、图 1-2 和图 1-3) 所示。

表 1-1. IEC61000-4-4 EFT 突发测试的测试级别

	峰间振幅			
	电源端口		I/O、信号、数据和控制线	
电平	$V_{CC}$ (kV)	$I_{SC}$ (A)	$V_{CC}$ (kV)	$I_{SC}$ (A)
1	0.5	10	0.25	5
2	1	20	0.5	10
3	2	40	1	20
4	4	80	2	40

EFT 脉冲波形的定义和分类如下：

- $t_r$  (上升时间) = 5ns
- $t_p$  (脉冲持续时间) = 50ns

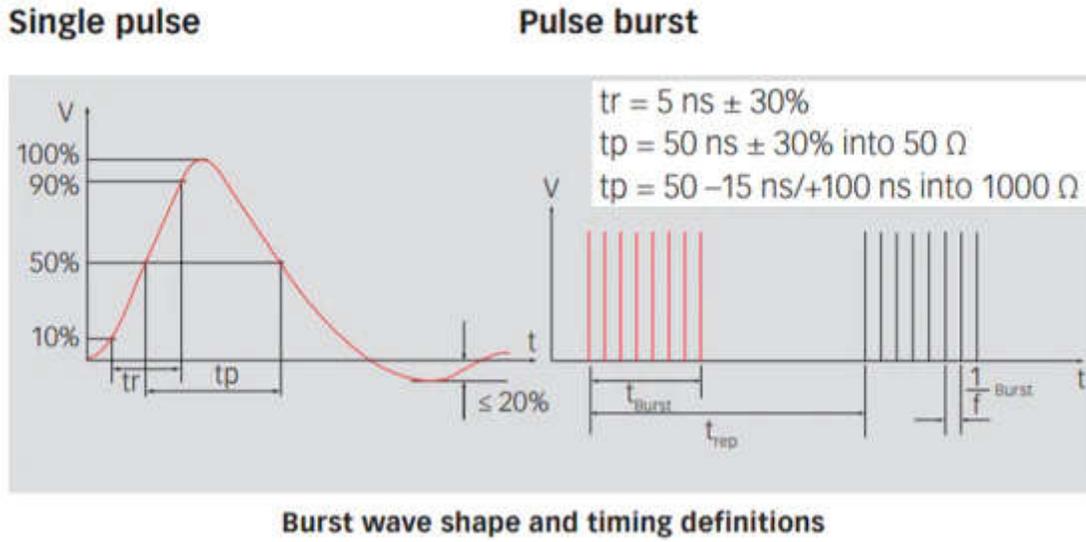


图 1-2. 突发波形和时序定义

这些短脉冲在一个特定的突发数据包中重复 75 次，时间为 ( $t_{rep}$ )。

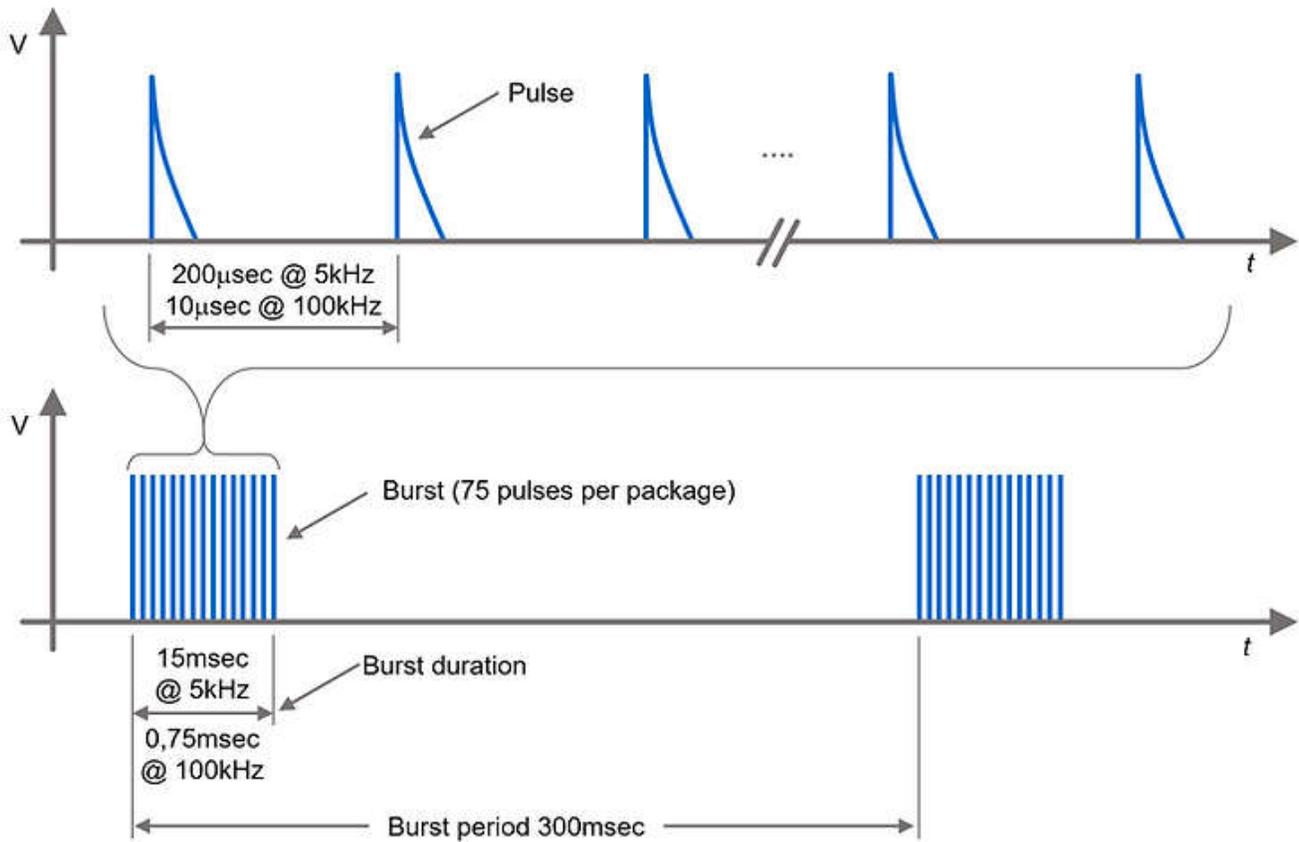


图 1-3. 测试重复时间

该标准在突发数据包内提供两种重复时间：200us (100kHz) 或 10us (5kHz)。每个数据包包含 75 个脉冲。产生的突发数据包持续时间为 15ms 或 750us。之后，突发数据包每 300ms 重复一次。根据此信息，两个 EFT 突发重复时间的等效占空比为 0.00125%。

对于 EFT 突发抗扰度测试，定义了以下四个标准：

- 性能标准 A - 性能处于规格范围内
- 性能标准 B - 可自我恢复的暂时性降级
- 性能标准 C - 需要操作人员干预的暂时性降级
- 性能标准 D - 不可恢复的功能丧失

PLC 系统必须至少满足标准 B。如果不满足该基准，系统操作人员就必须关闭和复位以恢复可接受的 PLC 性能。在不使用保护开关的最坏情况下，操作人员必须彻底更换永久损坏的元件。为了满足标准 B，信号链路不得断开，但其值可能会降低。例如，电压为 10V 时可能会受到影响，电压会按典型的行业标准 10% 的幅度降级，但信号传输不得中断，且链路不得放电。系统自恢复能力可保证信号链路在 EFT 突发期间不会断开，只会导致暂时性降级。这是标准 B 性能的要求。

## 2 系统级保护说明和基于快速故障恢复时间的设计

为了帮助系统设计人员解决 EFT 突发和永久误接线导致的故障，我们概述了 PLC 通信设计中的重要注意事项。首先，通常使用 TVS 二极管（分立式二极管或类似 TVS3301 的平缓钳位二极管）保护 PLC 输入和输出。这些 TVS 二极管已经钳制了非常高的突发瞬变。虽然 TVS 二极管可承受 kV 范围内的突发，但电子元件却不能。

另一方面，PLC 系统的电子电路必须能够承受外部电压源的永久性 EFT 突发脉冲和永久性误接线。由于 TVS 二极管在过压条件下导通，因此它们无法处理永久性过压/欠压 (OV/TVS UV) 情况。对于可产生更高电流的模拟输出或电流输入，使用没有保护开关的 TVS 二极管带来了挑战。例如，虽然突发钳位 TVS 二极管会在 36V 的更高电压下触发，但向输出端施加永久的 24V 直流电可能会损坏 PLC 系统电子元件。系统设计人员可以放置一个能够钳

位在 15V 左右的钳位二极管，从而保护  $\pm 15V$  供电的输出。如果发生 24V 接线错误，二极管将永久导通并分流电源可以提供的所有电流。这会导致二极管消耗大量能量，并最终损坏。引入保护开关可解决这个问题，因为会阻止永久的直流误接线电压。

TVS 二极管也不得用其漏电流影响模拟信号。这意味着所选的钳位电压必须对信号透明，不在开关的 OVP 保护额定值范围内导通，但要钳位在该电平以上以防止突发。这样就需要一个保护开关，该开关可以处理永久 EFT 突发脉冲，并可以阻断 TVS 二极管之后的永久直流过压/欠压条件。

最后，为了帮助在 EFT 突发期间保持信号完整性，设计人员必须选择具有适当故障恢复时间的保护开关。如果信号链路上保护开关的故障恢复时间 (*trecover*) 超过突发数据包内两个脉冲之间的关断时间 (*toff*)，则系统将无法通过标准 B，这意味着链路放电和信号丢失 (图 2-1)。对于 EFT 突发测试，突发数据包内两个脉冲的间隔时间是 10us 或 200us，具体取决于所选的重复时间。

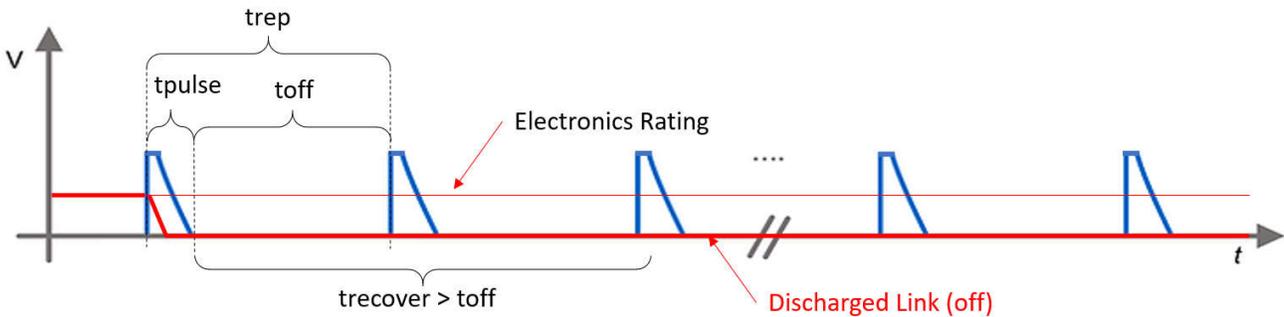


图 2-1. 突发测试期间链路放电且恢复时间过长

要解决该问题，请使用恢复时间足够快的 TI 故障保护多路复用器，以便链路在 EFT 脉冲之间重新充电。在由  $\pm 15V$  电源供电时，TI 故障保护多路复用器的故障恢复时间介于 1.1us 至 1.6us 之间 (图 2-2)。

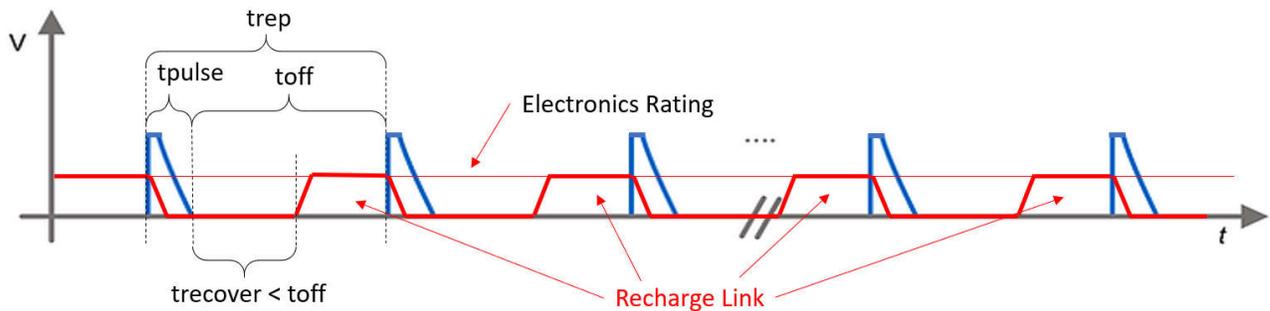


图 2-2. 突发测试期间链路重新充电，满足 EFT 突发测试标准 B

要查看预期结果，我们还可以查看 Tina-TI 模型 (图 2-3)。此模型代表了一个 PLC 通信系统，其中 OPA990 产生 10V 信号，通过输出保护器开关发送，然后最终通过接收器 (也称为模拟输出模块)。此外，脉冲群发生器会将 0V 至 20V、100kHz 标准 EFT 脉冲发送到信号线上，模拟一个钳位脉冲。输出保护器的故障恢复时间为 2us。

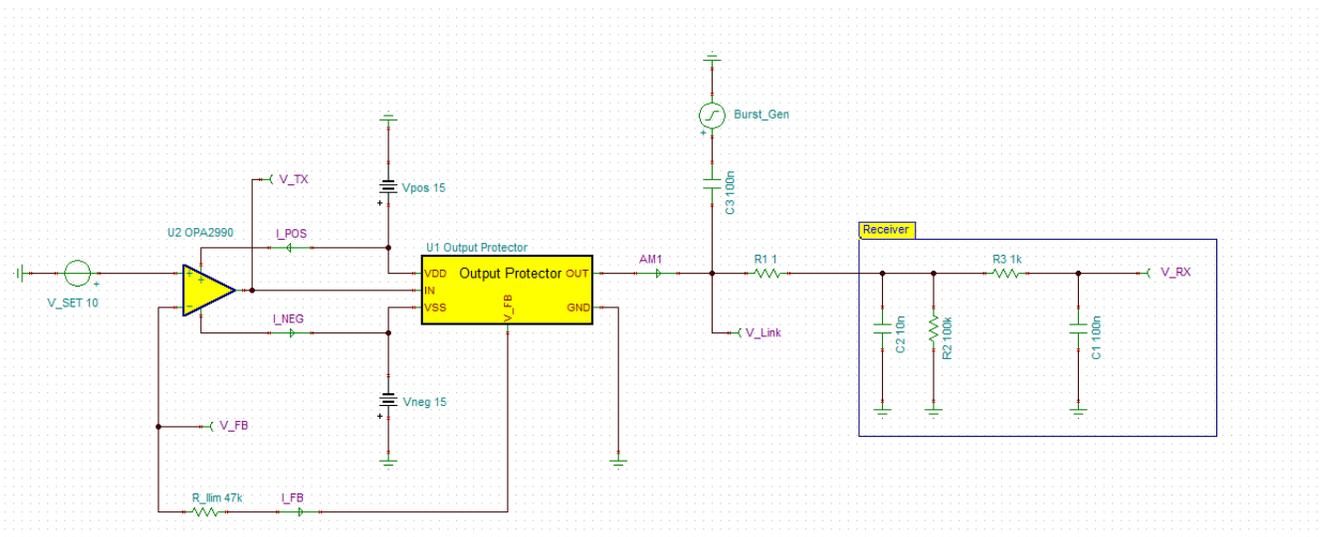


图 2-3. Tina-TI 模型

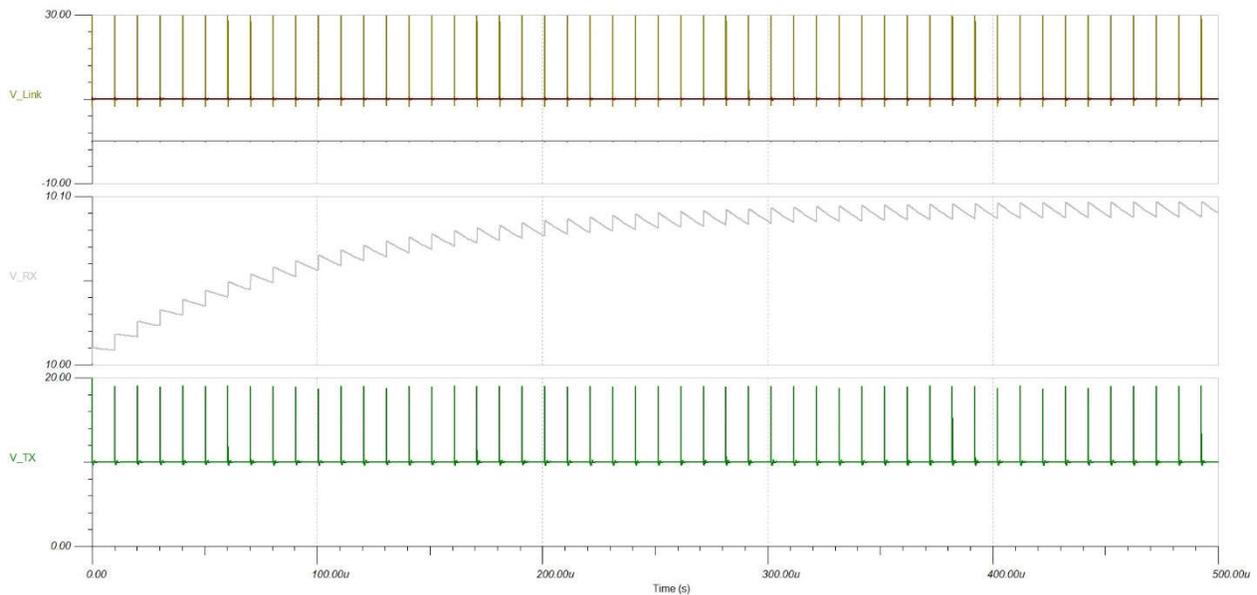


图 2-4. Tina-TI 模型结果

V\_Link 显示信号顶部的突发脉冲。V\_TX 是放大器的输出，V\_RX 是模拟输出模块。通过查看图 2-4，我们可以预期故障保护开关能够在 EFT 脉冲之间重新连接信号线，输出端上的失调电压误差为 100mV。在使用标准 EFT 脉冲测试 TI 的故障保护器件时，我们预计 10V 信号线链路上会出现小于 100mV 的小电压误差。

### 3 EFT 突发测试的系统级实验室测试程序和结果

在本实验室实验中，5kHz、5% 占空比信号作为模拟 EFT 突发发送到线路上。由于实验室波形发生器的限制，该测试仪着眼于针对在信号线上钳位 TVS 二极管后产生的电压的保护。虽然本实验中未使用 TVS 二极管，但请注意，器件的 OVP 特性会阻止故障保护多路复用器可接受输入范围 ( $\pm 60V$ ) 内的任何钳位电压，并提供 EFT 突发保护。其他限制包括：需要根据测试期间的供货情况选择无源器件；在 PLC 通信系统中，当突发脉冲发送到导线屏蔽层时，需要使用交流电容器来替代电容耦合。

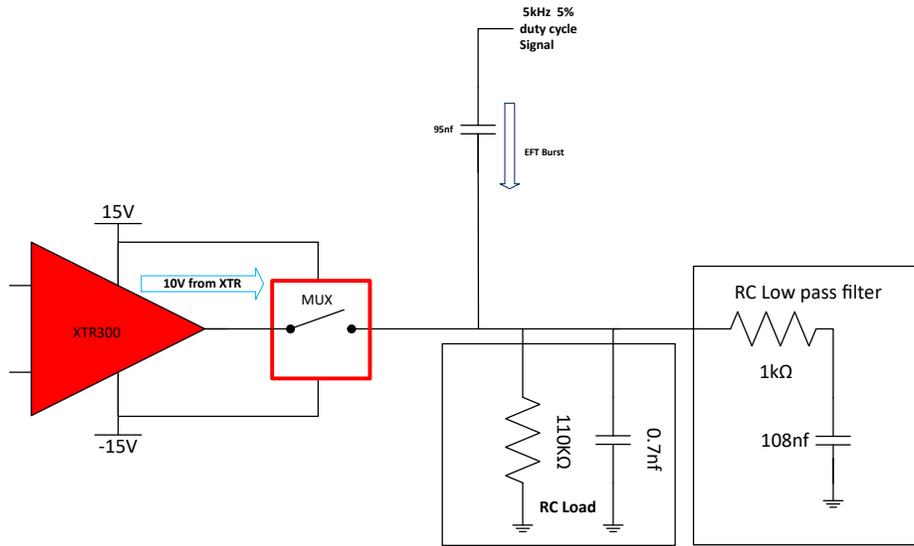


图 3-1. EFT 突发测试设置

图 3-1 显示了使用 XTR300 放大器在 Vout 模式下向模拟信号线发送 10V 电压时，此 EFT 突发测试的设置。首先，RC 负载为放大器提供稳定性，并在多路复用器开关期间保持线路上的 10V 信号。RC 负载代表模拟输出模块的一部分。

该开关的恢复时间要比 EFT 突发脉冲的间隔时间短，从而阻止链路放电。如果此器件的故障恢复时间超过脉冲的间隔时间，则开关保持开路状态，并且不会重新连接信号线，以避免导致信号链路上的电压损失。这会导致模拟输入和输出模块之间的通信出现故障。

典型的 PLC 系统 RC 负载范围为 1nf 至 10nf 和 100kΩ 至 1MΩ。因此，我们可以看到系统 RC 时间常数的范围为 100us 至 10,000us。这些时间常数表示信号链路放电所需的时间。这意味着开关能够更快地恢复并在信号能够在电路上放电之前为信号再充电，从而实现一个 10V 的一致信号链路，在 EFT 突发期间几乎看不到任何信号衰减。

模拟输出模块的下一部分是低通滤波器，其作用是在 EFT 突发信号到达 ADC 输入之前提供保护/平滑处理。这款低通滤波器是 PLC 保护方案的另一个重要部分，可以直接设计，也可以集成在一些 ADC 内部。预期的行为是链路不会中断，并且允许在系统设计人员指定的范围内更改线路上的值。图 3-2 显示了 EFT 突发测试设置及探头位置。这一点很重要，因为我们可以使用 TI 的故障保护多路复用器了解系统的行为。

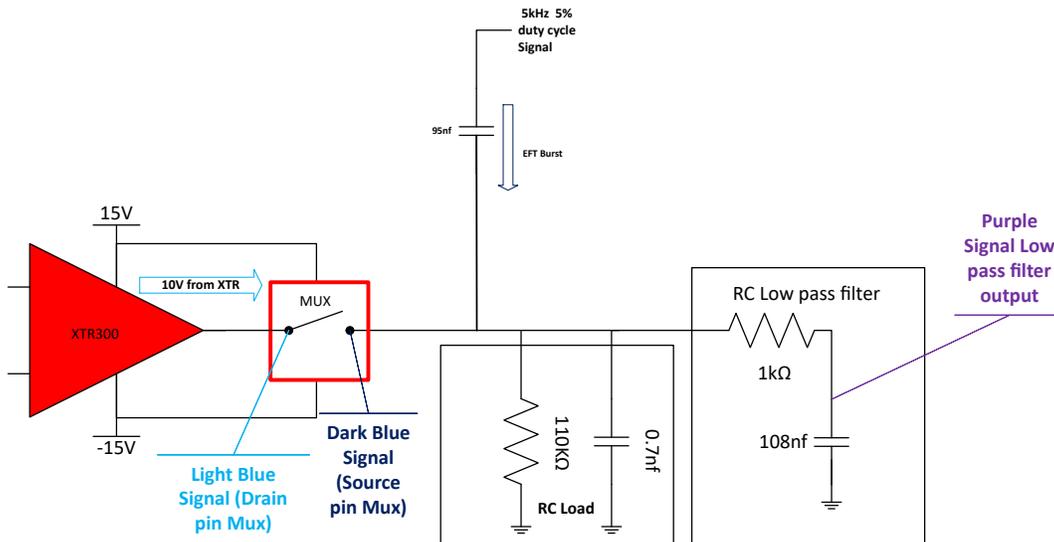


图 3-2. EFT 突发测试设置和探头位置

以下图像展示了 EFT 突发测试的波形。观察 TMUX7462F 的图像 ( 图 3-3 和图 3-4 )，可以看到故障保护多路复用器按预期运行，并且在突发脉冲之间快速重新连接信号线，可实现从多路复用器的漏极引脚向低通滤波器发送连续 10V 信号。浅蓝色线与紫色线之间的差异称为失调电压，这是由低通滤波器使 EFT 突发平滑的结果。

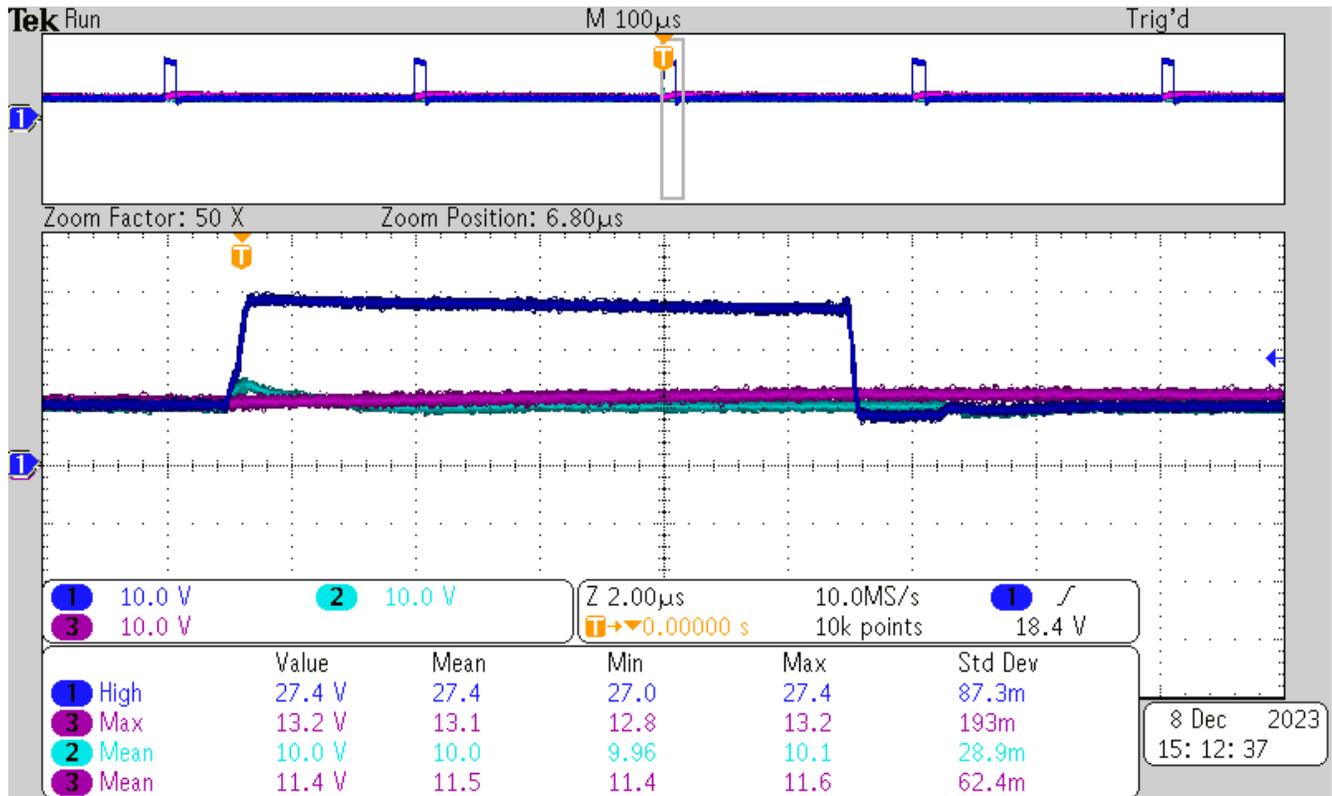


图 3-3. 5kHz 仿真 EFT 突发测试 TMUX7462F 放大图

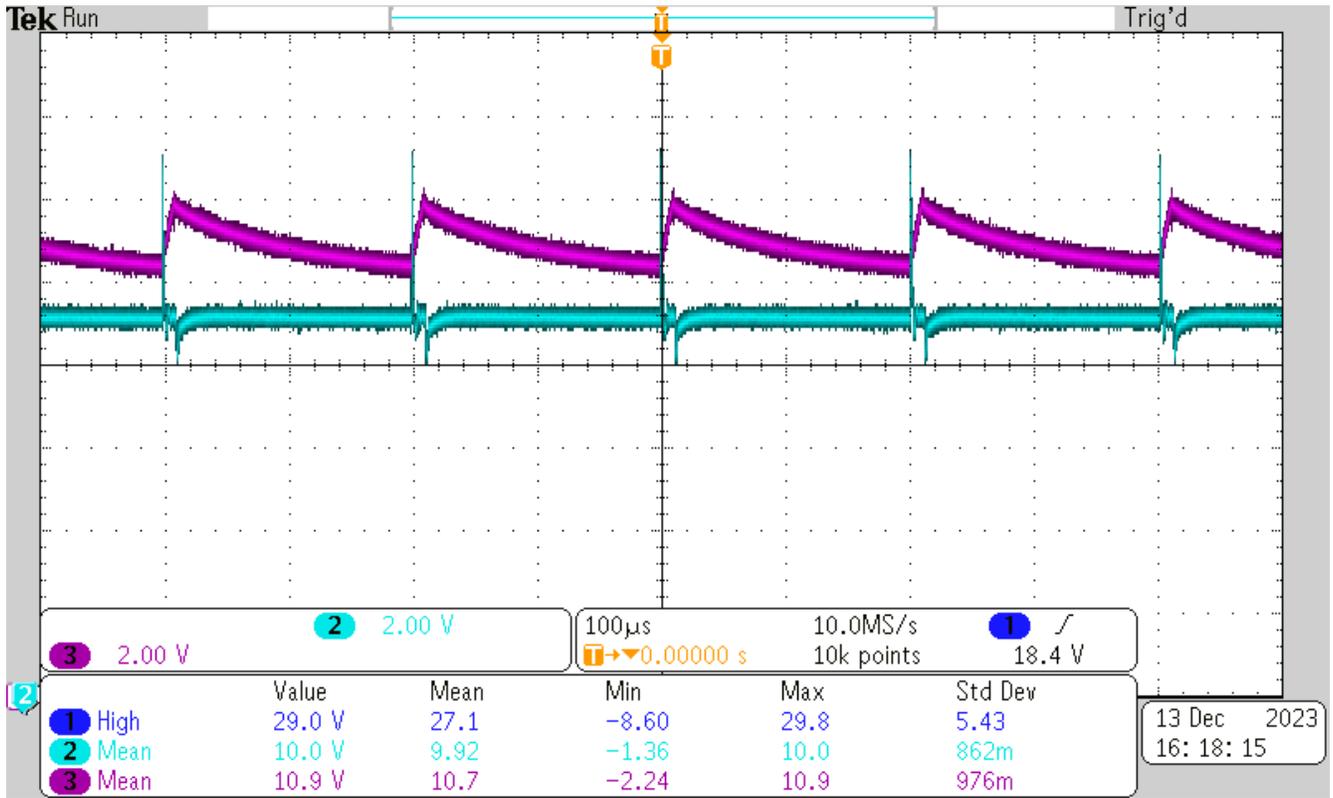


图 3-4. TMUX7462F 缩小图

观察 TMUX7309F ( 图 3-5 和 图 3-6 ) 时，可以看到系统如何按预期运行，并且在突发脉冲之间快速重新连接信号链路可实现持续不间断的通信。TMUX7309F 测试期间的失调电压误差与 TMUX7462F 测试类似。请注意，当完成 EFT 突发测试时，两个器件都将放大器信号从漏极传递到源极而不会中断。

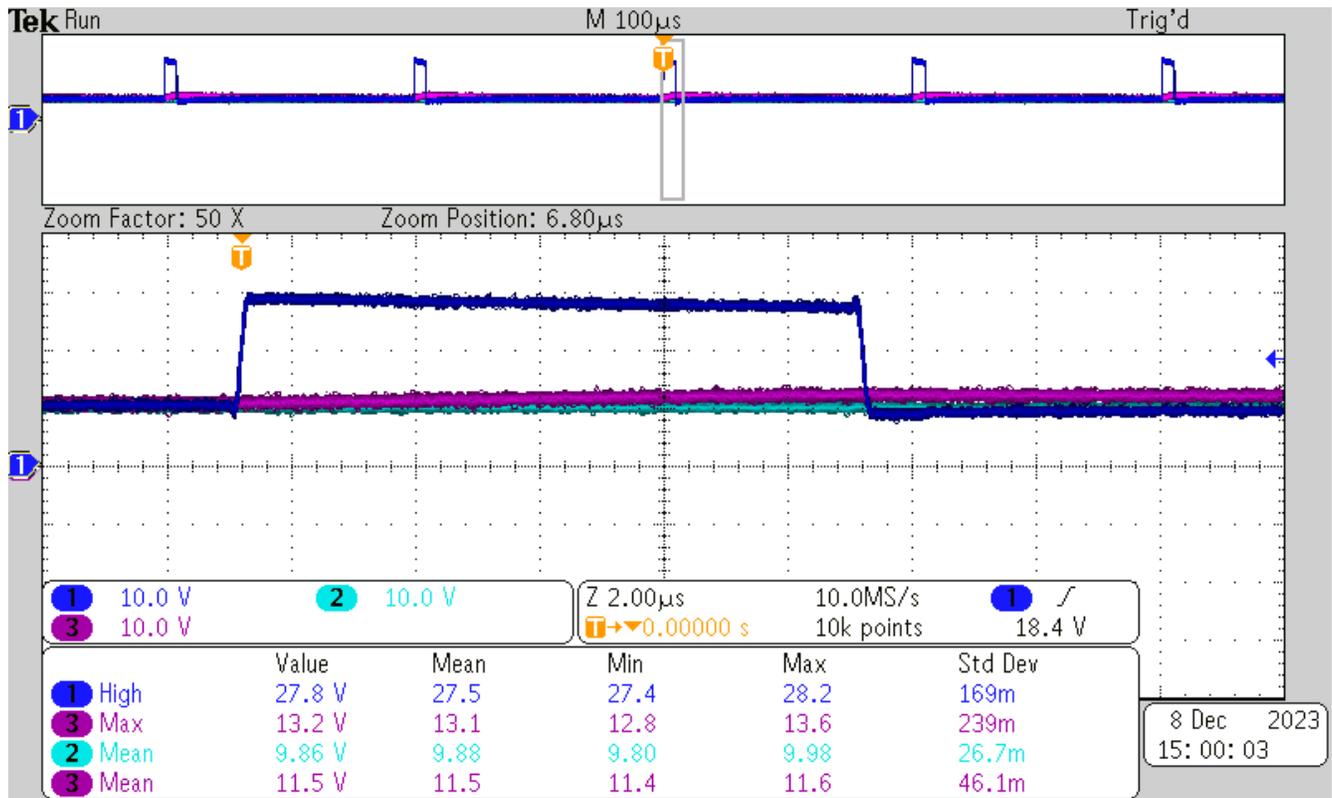


图 3-5. 5kHz 仿真 EFT 突发测试 TMUX7309F 放大图

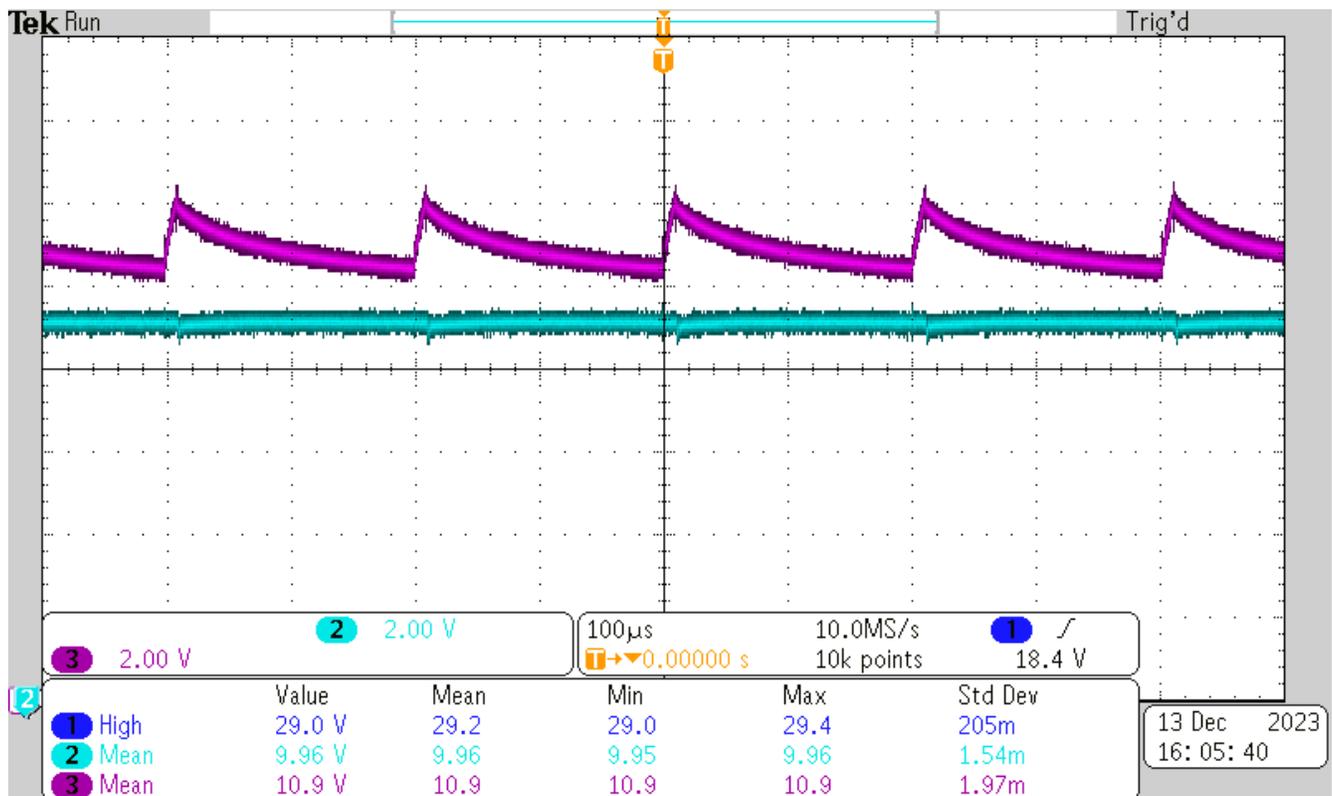


图 3-6. TMUX7309F 缩小图

表 3-1 显示了有关两种系统设置的失调电压的更多信息。

表 3-1. 失调电压误差表

	TMUX7309F	TMUX7462F
突发测试偏移测量 (5kHz)	0.94V	0.9V

此外，图 3-7 显示了在 TMUX7462F 上执行 100kHz 仿真 EFT 突发测试。请注意，此测试具有与之前的 5kHz 测试相同的设置和探头位置。由于两项测试具有相同的占空比，因此误差非常类似。这张放大的图片显示了开关何时重新连接并在大约 5us 后使链路恢复到稳压状态。

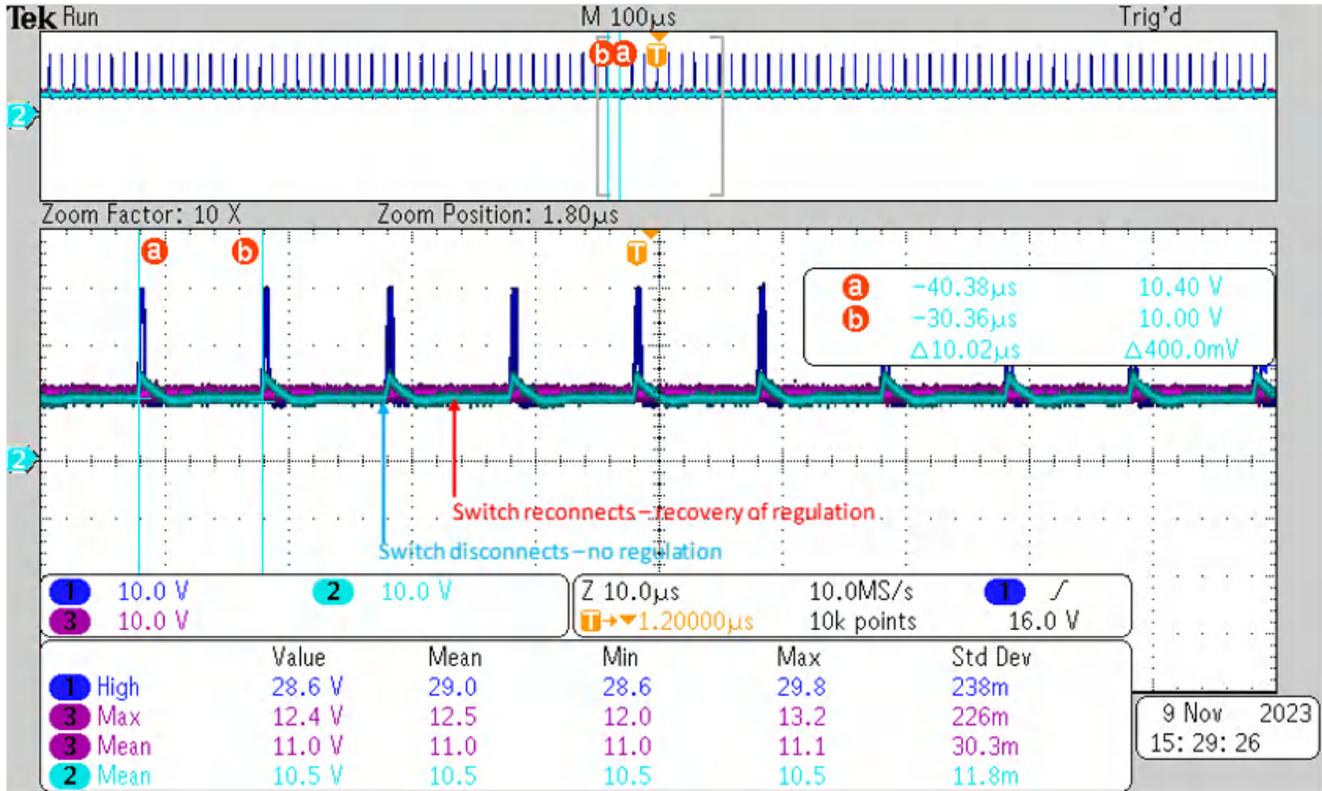


图 3-7. 100kHz 仿真 EFT 突发测试 TMUX7462F

最后，失调电压（浅蓝色线和紫色线之间的差异）来自 EFT 突发信号，该信号在线路上注入能量，显示为即使在低通滤波器之后也是增加的直流值。预期失调电压基于施加到信号线上的 EFT 突发信号的占空比。

要了解失调电压的原因以及如何使用标准 EFT 突发曲线减小该电压，我们可以查看以下示例。如果我们在 10V 信号线上发送 0V 到 18V 和 5% 占空比的信号来模拟 EFT 突发，我们会看到线路上大约增加了 0.9V (18\*0.05)，并在模拟输出或低通滤波器的输出上显示为误差。若要查看在采用标准突发曲线进行 EFT 突发测试期间线路上的注入电压，请按照以下方法操作。

- 首先，求出 EFT 突发信号的占空比（图 1-2 和图 1-3）。
  - 100kHz EFT 突发的脉冲间隔时间 (TP) = 10us，5kHz EFT 突发测试的脉冲间隔时间 (TP) 为 200us，脉冲持续时间 (tp)= 50ns
- 接下来，求出在突发数据包中发送 EFT 突发信号的占空比，如（图 1-3）“测试重复时间”中所述。
  - EFT 突发的占空比 = 50ns/10us = 0.5%，突发数据包占空比 = 0.75ms/300ms = 0.25% (100kHz 测试)
  - EFT 突发的占空比 = 50ns/200us = 0.025%，突发数据包占空比 = 15ms/300ms = 5% (5kHz 测试)
- 最后，乘以不同的占空比，看看标准 EFT 突发曲线会引入哪些误差。
  - 标准 EFT 突发信号的占空比
  - 100kHz 测试 = 0.5% \* 0.25% = 0.00125%

- 5kHz 测试 = 0.025% \* 5% = 0.00125%

因此，如果 18V 是 EFT 突发信号的峰值电压，系统设计人员可以看到在 10V 信号线上增加了 (18 x 0.00125% = 0.000225V)，即 0.225mV。如果我们将该误差与客户设计通常可接受的误差 (1% 至 2%) 进行比较，可以看到，0.225mV 可提供比客户允许的 100mV 至 200mV 误差更好的性能。

请注意，故障保护多路复用器本身不会引入失调电压误差，本报告中的 PLC 通信系统符合性能标准 A 性能处于规格范围内，因为增加的 EFT 突发信号误差对于客户应用来说是可以接受的。

## 4 结语

电气快速瞬变 (EFT) 是一系列高电压快速频率脉冲，可对工厂自动化可编程逻辑控制器 (PLC) 系统中的模拟输入和输出模块造成冲击。如果在系统设计中未正确考虑这些突发，则会导致信号精度问题以及对元件的潜在永久损坏。为了解决该问题，TI 打造了具有被称为过压保护 (OVP) 功能的故障保护多路复用器。当发送到输入引脚的电压高于电源电压时，该功能激活。虽然保护信号链元件很重要，但 TI 故障保护多路复用器具有额外的快速恢复时间，可实现 PLC 模块之间的精确通信。这使得系统设计人员能够根据 EFT 突发测试标准生成性能标准 A。有关具有快速恢复时间的故障保护多路复用器的更多信息，请参阅表 4-1。

表 4-1. 用于 PLC 应用的 TI 故障保护多路复用器

器件	配置	在 ±15V 电源供电时的故障恢复时间
TMUX7308F	8:1 x 1	1.2us
TMUX7309F	4:1 x 2	1.2us
TMUX7348F	8:1 x 1	1.4us
TMUX7349F	4:1 x 2	1.4us
TMUX7411F	1:1 x 4	1.6us
TMUX7412F	1:1 x 4	1.6us
TMUX7413F	1:1 x 4	1.6us
TMUX7436F	2:1 x 2	1.6us
TMUX7462F	1:1 x 2	1.1us

## 5 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[取代分立式保护并优化 PLC 系统保护](#)，应用简报。
- 德州仪器 (TI)，[防止过压事件、误接线和共模电压](#)，应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[针对 PLC AIO 模块中的过压事件提供保护](#)，视频。

## 6 修订历史记录

<b>Changes from Revision * (January 2024) to Revision A (July 2024)</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
• 添加了其他作者.....	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