

保护 RS-485 通信网络不受有害 EMC 事件影响

作者：James Scanlon 和 Koenraad Rutgers

内容提要

在实际工业和仪器仪表 (I&I) 应用中，RS-485 接口链路需要在恶劣电磁环境下工作。雷击、静电放电和其他电磁现象引起的大瞬变电压可能损坏通信端口。为了确保这些数据端口能够在最终安装环境中正常工作，它们必须符合某些电磁兼容性 (EMC) 法规。

这些要求包括三个主要瞬变抗扰度标准：静电放电、电快速瞬变和电涌。

许多 EMC 问题并不简单或明显，因此必须在产生设计开始时予以考虑。如果把这些问题的解决留到设计周期后期去解决，可能导致工程预算和计划超限。

本文介绍各主要瞬变类型，并针对 RS-485 通信端口的三种不同成本/保护级别，提出并演示三种不同的 EMC 兼容解决方案。

ADI 公司和 Bourns, Inc 携手合作，共同开发了业界首个 EMC 兼容 RS-485 接口设计工具，提供针对 IEC 61000-4-2 ESD、IEC 61000-4-4 EFT 和 IEC 61000-4-5 电涌的四级保护，从而扩展面向系统的解决方案组合。它根据所需保护级别和可用预算为设计人员提供相应的设计选项。借助这些设计工具，设计人员可在设计周期之初考虑 EMC 问题，从而降低该问题导致的项目延误风险。

RS-485 标准

工业与仪器仪表 (I&I) 应用常常需要在距离很远的多个系统之间传输数据。RS-485 电气标准是 I&I 应用中使用最广泛的物理层规范之一，I&I 应用包括：工业自动化、过程控制、电机控制和运动控制、远程终端、楼宇自动化（暖通空调 HVAC 等）、安保系统和再生能源等。

使 RS-485 成为 I&I 通信应用理想之选的一些关键特性如下：

- 长距离链路 — 最长 4000 英尺
- 可在一对绞线电缆上双向通信
- 差分传输可提高共模噪声抗扰度，减少噪声辐射
- 可将多个驱动器和接收器连接至同一总线

- 宽共模范围 (-7 V 至 +12 V) 允许驱动器与接收器之间存在地电位差异
- TIA/EIA-485-A 允许数据速率达到数十 Mbps

TIA/EIA-485-A 描述 RS-485 接口的物理层，通常与 Profibus、Interbus、Modbus 或 BACnet 等更高层协议配合使用，能够在相对较长的距离内实现稳定的数据传输。

但在实际应用中，雷击、功率感应、直接接触、电源波动、感应开关和静电放电可能产生较大瞬变电压，对 RS-485 收发器造成损害。设计人员必须确保设备不仅能在理想条件下工作，而且能够在实际可能遇到的恶劣环境下正常工作。为了确保这些设计能够在电气条件恶劣的环境下工作，各个政府机构和监管机构实施了 EMC 法规。如果设计符合这些法规，可以让最终用户确信它们在恶劣环境下也能正常工作。

电磁兼容性

电磁环境由辐射和传导两种能量组成，因此 EMC 包括两个方面：发射和耐受性。EMC 是指电气系统在目标电磁环境下保持良好性能且不会向该环境引入大量电磁干扰的能力。本文讨论如何提高 RS-485 端口的 EMC 耐受性以防范三种主要 EMC 瞬变。

国际电工委员会 (IEC) 是致力于制定和发布所有电气、电子和相关技术国际标准的全球领先组织。自 1996 年以来，向欧盟出售或在欧盟范围内出售的所有电子设备都必须达到 IEC 61000-4-x 规范定义的 EMC 级别。

IEC 61000 规范定义了一组 EMC 抗扰度要求，适用于在住宅、商业和轻工业环境中使用的电气和电子设备。这组规范包括以下三类高电压瞬变，电子设计人员必须确保数据通信线路不受它们损害：

- IEC 61000-4-2 静电放电 (ESD)
- IEC 61000-4-4 电快速瞬变 (EFT)
- IEC 61000-4-5 电涌耐受性

所有这些规范都定义了测试方法，用以评估电子和电气设备对指定现象的耐受性。下面概要说明各种测试。

静电放电

ESD 是指静电荷在不同电位的实体之间的突然传输，由靠近接触或电场感应引起。其特征是在短时间内产生高电流。IEC 61000-4-2 测试的主要目的是确定系统在工作过程中对系统外部 ESD 事件的抗扰度。IEC 61000-4-2 描述了两种耦合测试方

法，即所谓接触放电和空气放电。接触放电要求放电枪与受测单元直接接触。在空气放电测试期间，放电枪的充电电极朝向受测单元移动，直到气隙上发生电弧放电。放电枪不与受测单元直接接触。空气放电测试的结果和可重复性会受到多种因素的影响，包括湿度、温度、气压、距离和放电枪逼近受测单元的速率。这种方法能够更好地反映实际 ESD 事件，但可重复性较差。因此，接触放电是首选测试方法。

测试期间，数据端口须经受至少 10 次正极放电和 10 次负极放电，脉冲之间间隔 1 秒。测试电压的选择取决于系统端环境。规定的最高测试为 4 级，要求接触放电电压为±8 kV，空气放电电压为±15 kV。

图 1 显示了规范所述的 8 kV 接触放电电流波形。一些关键波形参数包括小于 1 ns 的上升时间和大约 60 ns 的脉冲宽度。这说明脉冲总能量约为数十 mJ。

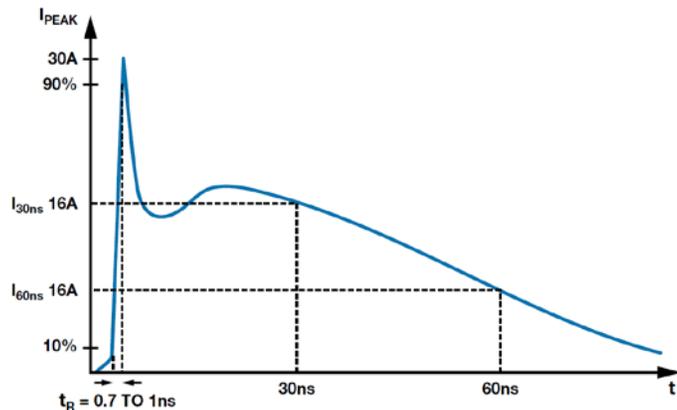


图 1. IEC 61000-4-2 ESD 波形 (8 kV)

电快速瞬变

电快速瞬变测试要求将数个极端快速的瞬变脉冲耦合到信号线上，以代表容性耦合到通信端口的外部开关电路的瞬态干扰，这种干扰可能包括继电器和开关触点抖动，以及切换感性或容性负载引起的瞬变，所有这些在工业环境中非常常见。EC 61000-4-4 中定义的 EFT 测试尝试模拟因为这些类型的事件产生的干扰。

图 2 显示 EFT 50 Ω 负载波形。EFT 波形用具有 50 Ω 输出阻抗的发生器在 50 Ω 阻抗上产生的电压来描述。输出波形由 15 ms 的 2.5 kHz 至 5 kHz 突发高压瞬变脉冲组成，以 300 ms 间隔重复。每个脉冲具有 5 ns 的上升时间和 50 ns 的持续时间，在波形的上升和下降沿的 50%点之间测量。单个 EFT 脉冲的总能量与 ESD 脉冲相似。单个脉冲的总能量典型值为 4 mJ。施加于数据端口的电压可以高达 2 kV。

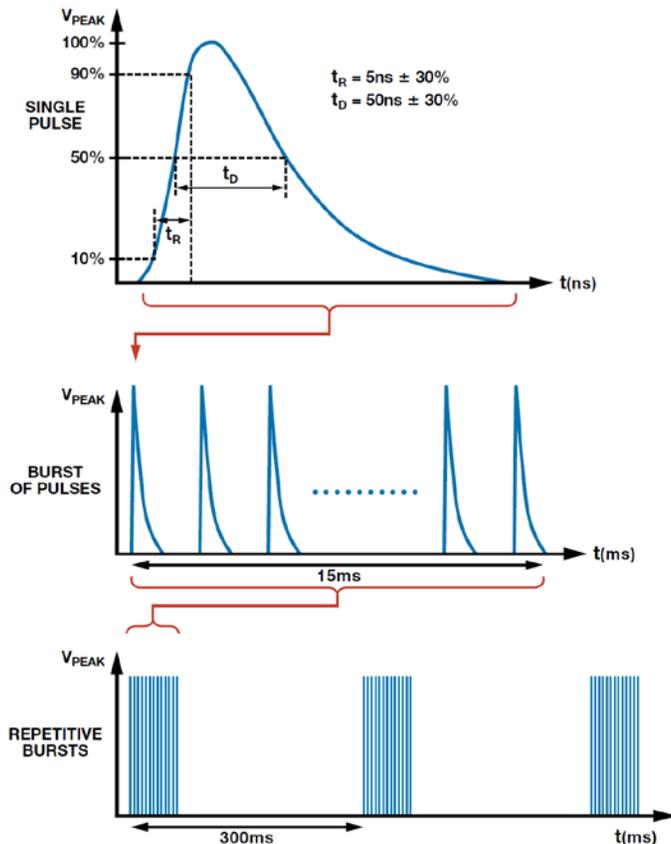


图 2. IEC 61000-4-4 EFT 50 Ω 负载波形

这些快速突发瞬变通过电容耦合钳耦合到通信线路。EFT 通过耦合钳容性耦合到通信线路，而不是直接接触。这同样降低了 EFT 发生器的低输出阻抗所引起的负载。耦合钳和电缆之间的耦合电容取决于电缆直径、屏蔽和绝缘。

电涌瞬变

电涌瞬变由开关或雷电瞬变产生的过压引起。开关瞬变的原因可以是电源系统切换、电源分配系统的负载变化或短路等各种系统故障。雷电瞬变的原因可以是附近的雷击将高电流和电压注入电路中。IEC 61000-4-5 定义了用于评估对这些破坏性电涌的抗扰度的波形、测试方法和测试级别。

波形定义为开路电压和短路电流下波形发生器的输出。标准描述了两种波形。10/700 μs 组合波形用于测试要连接到对称通信线路的端口，例如电话交换线。1.2/50 μs 组合波形发生器用于所有其他情形，特别是短距离信号连接。RS-485 端口主要使用 1.2/50 μs 波形，本部分将予以说明。波形发生器的有效输出阻抗为 2 Ω，因此电涌瞬变相关的电流非常高。

图 3 显示 1.2/50 μs 电涌瞬变波形。ESD 和 EFT 具有相似的上升时间、脉冲宽度和能量水平，但电涌脉冲的上升时间为 1.25 μs，脉冲宽度为 50 μs。此外，电涌脉冲能量可以达到 90 J，比 ESD

或 EFT 脉冲的能量高出三到四个数量级。因此，电涌瞬变被认为是最严重的 EMC 瞬变。ESD 与 EFT 相似，因此电路保护的设计可以相似，但电涌则不然，其能量非常高，因此必须以不同方式处理。这是开发保护措施以改善数据端口对所有三种瞬变的抗扰度，同时保持高性价比的过程中会遇到的主要问题之一。

电阻将电涌瞬变耦合到通信线路。图 4 显示半双工 RS-485 器件的耦合网络。并联电阻总和为 $40\ \Omega$ 。对于半双工器件，每个电阻为 $80\ \Omega$ 。

电涌测试期间，将 5 个正脉冲和 5 个负脉冲施加于数据端口，各脉冲间隔最长时间为 1 分钟。标准要求，器件在测试期间设置为正常工作状态。

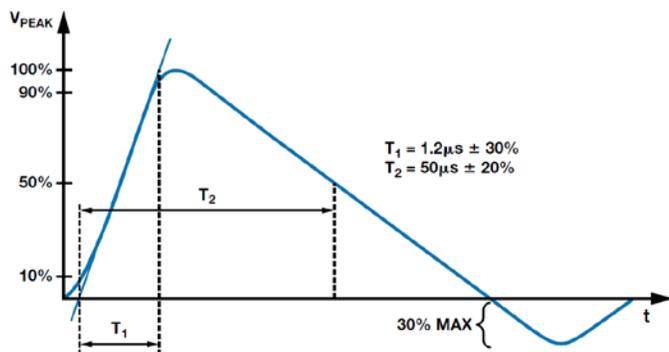


图 3. IEC 61000-4-5 电涌 1.2/50 μs 波形

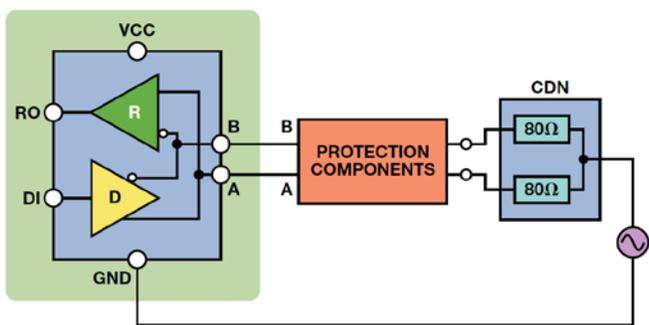


图 4. 半双工 RS-485 器件的耦合/去耦网络

通过/失败标准

将瞬变施加于被测系统时，测试结果按照通过/失败标准分为四类。下面是通过/失败标准的列表，并举例说明各标准与 RS-485 收发器的关系。

- 正常工作；施加瞬变期间或之后不会发生位错误。
- 功能暂时丧失或性能暂时降低，不需要操作员干预；施加瞬变期间或之后的有限时间内可能发生位错误。

- 功能暂时丧失或性能暂时降低，需要操作员干预；可能发生门锁事件，但上电复位后可消除，对器件的功能和性能无永久影响。
- 功能丧失，设备永久损坏；器件未通过测试。

标准 A 是最希望达到的，标准 D 是不可接受的。永久损坏会导致系统停机和维修/更换成本。对于任务关键型系统，标准 B 和标准 C 也是不可接受的，因为系统在瞬变事件期间必须能无错误运行。

瞬变保护

设计瞬变保护电路时，设计人员必须考虑以下主要事项：

1. 该电路必须防止或限制瞬变引起的损坏，并允许系统恢复正常工作，性能影响极小。
2. 保护方案应当非常可靠，足以处理系统在实际应用经受到的瞬变类型和电压水平。
3. 瞬变时长是一个重要因素。对于长时间瞬变，热效应可能会导致某些保护方案失效。
4. 正常条件下，保护电路不得干扰系统运行。
5. 如果保护电路因为过应力而失效，它应以保护系统的方式失效。

图 5 显示一个典型保护方案，其特征是具有两重保护：主保护和次级保护。主保护可将大部分瞬变能量从系统转移开，通常位于系统和环境之间的接口。它旨在将瞬变分流至地，从而消除大部分能量。

次级保护的目的是保护系统各个部件，使其免受主保护允许通过的任何瞬态电压和电流的损坏。它经过优化，确保能够抵御残余瞬变影响，同时允许系统的敏感部分正常工作。主保护和次级保护的设计必须与系统 I/O 协同工作，从而最大程度地降低对受保护电路的压力，这点很重要。主保护器件与次级保护器件之间一般有一个协调元件，如电阻或非线性过流保护器件等，用以确保二者协同应对瞬变。

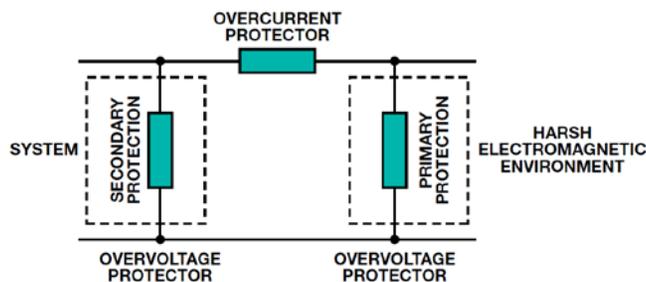


图 5. 保护方案框图

RS-485 瞬变抑制网络

就特性而言，EMC 瞬态事件在时间上会有变化，因此保护元件必须具有动态性能，而且其动态特性需要与受保护器件的输入/输出极相匹配，这样才能实现成功的 EMC 设计。器件数据手册一般只包含直流数据，由于动态击穿和 I/V 特性可能与直流值存在很大差异，因此这些数据没有太多价值。必须进行精心设计并确定特性，了解受保护器件的输入/输出级的动态性能，并且使用保护元件，才能确保电路达到 EMC 标准。

图 6 所示电路显示了三种不同的完整的 EMC 兼容解决方案。每个解决方案都经过独立外部 EMC 兼容性测试公司的认证，各方案使用精选的 Bourns 外部电路保护元件，针对 ADI 公司具有增强 ESD 保护性能的 ADM3485E 3.3 V RS-485 收发器提供不同的成本/保护级别。所用的 Bourns 外部电路保护元件包括瞬态电压抑制器 (CDSOT23-SM712)、瞬态闭锁单元 (TBU-CA065-200-WH)、晶闸管电涌保护器 (TISP4240M3BJR-S) 和气体放电管 (2038-15-SM-RPLF)。

每种解决方案都经过特性测试，确保保护元件的动态 I/V 性能可以保护 ADM3485E RS-485 总线引脚的动态 I/V 特性，使得 ADM3485E 输入/输出级与外部保护元件协同防范瞬变事件。

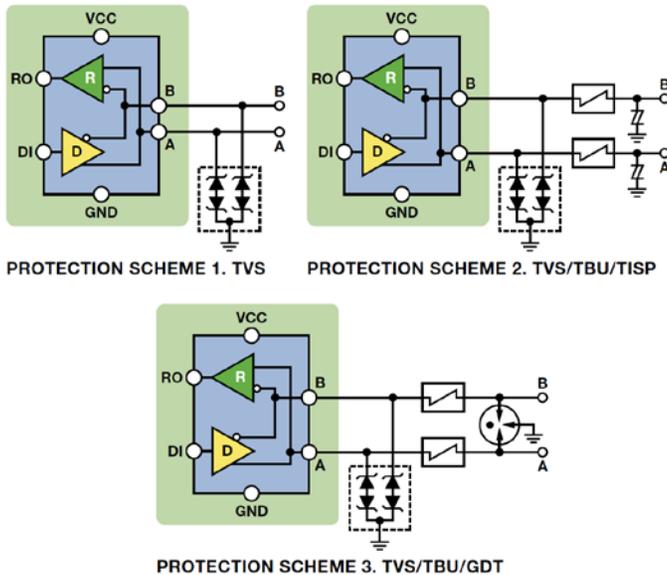


图 6. 三个 EMC 兼容 ADM3485E 电路 (原理示意图，未显示所有连接)

保护方案 1

前面说过，EFT 和 ESD 瞬变具有相似的能量水平，而电涌波形的能量水平则高出三到四个数量级。针对 ESD 和 EFT 的保护可通过相似方式实现，但针对高电涌级别的保护解决方案则更为复杂。第一个解决方案提供四级 ESD 和 EFT 保护及二级电涌保护。本文描述的所有电涌测试都使用 1.2/50 μ s 波形。

此解决方案使用 Bourns 公司的 CDSOT23-SM712 瞬变电压抑制器 (TVS) 阵列，它包括两个双向 TVS 二极管，非常适合保护 RS-485 系统，过应力极小，同时支持 RS-485 收发器上的全范围 RS-485 信号和共模偏移 (-7 V 至+12 V)。表 1 显示针对 ESD、EFT 和电涌瞬变的电压保护级别。

表 1. 解决方案 1 保护级别

ESD (-4-2)		EFT (-4-4)		电涌(-4-5)	
级别	电压 (接触/空气)	级别	电压	级别	电压
4	8 kV/ 15 kV	4	2 kV	2	1 kV

TVS 是基于硅的器件。在正常工作条件下，TVS 具有很高的对地阻抗，理想情况下它是开路。保护方法是将瞬态导致的过电压箝位到电压限值。这是通过 PN 结的低阻抗雪崩击穿实现的。当产生大于 TVS 的击穿电压的瞬态电压时，TVS 会将瞬态箝位到小于保护器件的击穿电压的预定水平。瞬变立即受到箝位 (< 1 ns)，瞬态电流从受保护器件转移至地。

重要的是要确保 TVS 的击穿电压在受保护引脚的正常工作范围之外。CDSOT23-SM712 的独有特性是具有+13.3 V 和-7.5 V 的非对称击穿电压，与+12 V 至-7 V 的收发器共模范围相匹配，从而提供最佳保护，同时最大程度减小对 ADM3485E RS-485 收发器的过压应力。

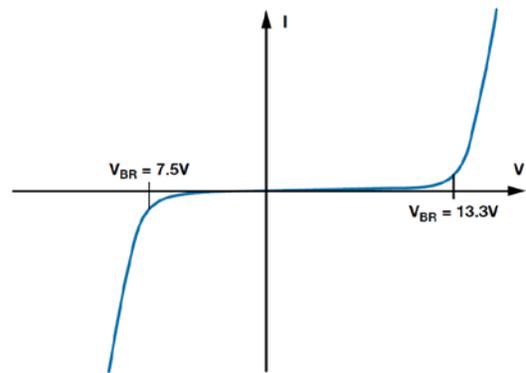


图 7. CDSOT23-SM712 I/V 特性

保护方案 2

上一解决方案可提供最高四级 ESD 和 EFT 保护，但只能提供二级电涌保护。为了提高电涌保护级别，保护电路变得更加复杂。以下保护方案可以提供最高四级电涌保护。

CDSOT23-SM712 专门针对 RS-485 数据端口设计。以下两个电路基于 CDSOT23-SM712 构建，提供更高级别的电路保护。CDSOT23-SM712 提供次级保护，而 TISP4240M3BJR-S 提供主保护。主从保护器件与过流保护之间的协调通过 TBU-CA065-200-WH 完成。表 2 显示使用此保护电路的 ESD、EFT 和电涌瞬变保护电压级别。

表 2. 解决方案 2 保护级别

ESD (-4-2)		EFT (-4-4)		电涌(-4-5)	
级别	电压 (接触/空气)	级别	电压	级别	电压
4	8 kV/ 15 kV	4	2 kV	4	4 kV

当瞬变能量施加于保护电路时, TVS 将会击穿, 通过提供低阻抗的接地路径来保护器件。由于电压和电流较高, 还必须通过限制通过的电流来保护 TVS。这可采用瞬态闭锁单元 (TBU) 实现, 它是一个主动高速过流保护元件。此解决方案中的 TBU 是 Bourns TBU-CA065-200-WH。

TBU 可阻挡电流, 而不是将其分流至地。作为串联元件, 它会对通过器件的电流做出反应, 而不是对接口两端的电压做出反应。TBU 是一个高速过流保护元件, 具有预设电流限值和耐高压能力。当发生过流, TVS 由于瞬态事件击穿时, TBU 中的电流将升至器件设置的限流水平。此时, TBU 会在不足 1 μs 时间内将受保护电路与电涌断开。在瞬变的剩余时间内, TBU 保持在受保护阻隔状态, 只有极小的电流 (<1 mA) 通过受保护电路。在正常工作条件下, TBU 具有低阻抗, 因此它对正常工作电路工作的影响很小。在阻隔模式下, 它具有很高的阻抗以阻隔瞬变能量。在瞬态事件后, TBU 自动复位至低阻抗状态, 允许系统恢复正常工作。

与所有过流保护技术相同, TBU 具有最大击穿电压, 因此主保护器件必须箝位电压, 并将瞬变能量重新引导至地。这通常使用气体放电管或固态晶闸管等技术实现, 例如完全集成电涌保护器(TISP)。TISP 充当主保护器件。当超过其预定义保护电压时, 它提供瞬态开路低阻抗接地路径, 从而将大部分瞬变能量从系统和其他保护器件转移开。

TISP 的非线性电压-电流特性通过转移产生的电流来限制过压。作为晶闸管, TISP 具有非连续电压-电流特性, 它是由于高电压区和低电压区之间的切换动作而导致的。图 8 显示了器件的电压-电流特性。在 TISP 器件切换到低电压状态之前, 它具有低阻抗接地路径以分流瞬变能量, 雪崩击穿区域则导致了箝位动作。在限制过压的过程中, 受保护电路短暂暴露在高压下, 因而在切换到低压保护导通状态之前, TISP 器件处在击穿区域。TBU 将保护下游电路, 防止由于这种高电压导致的高电流造成损坏。当转移电流降低到临界值以下时, TISP 器件自动复位, 以便恢复正常运行。

如上所述, 所有三个器件与系统 I/O 协同工作来保护系统免受高电压和电流瞬变影响。

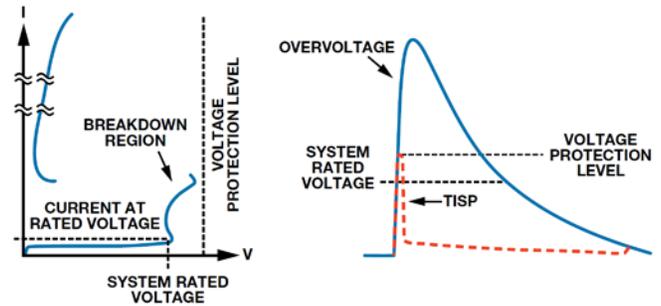


图 8. TISP 切换特性和电压限制波形

保护方案 3

常常需要四级以上的电涌保护。此保护方案可保护 RS-485 端口免受最高 6 kV 电涌瞬变的影响。它的工作方式类似于保护解决方案 2, 但此电路采用气体放电管 (GDT) 取代 TISP 来保护 TBU, 进而保护次级保护器件 TVS。GDT 将针对高于前一种保护机制中所述 TISP 的过压和过流应力提供保护。此保护方案的 GDT 是 Bourns 公司的 2038-15-SM-RPLF。TISP 额定电流为 220 A, 而 GDT 每个导体的额定电流为 5 kA。表 3 显示此设计提供的保护级别。

表 3. 解决方案 3 保护级别

ESD (-4-2)		EFT (-4-4)		电涌(-4-5)	
级别	电压 (接触/空气)	级别	电压	级别	电压
4	8 kV/ 15 kV	4	2 kV	X	6 kV

GDT 主要用作主保护器件, 提供低阻抗接地路径以防止过压瞬变。当瞬态电压达到 GDT 火花放电电压时, GDT 将从高阻抗关闭状态切换到电弧模式。在电弧模式下, GDT 成为虚拟短路, 提供瞬态开路电流接地路径, 将瞬态电流从受保护器件上转移开。

图 9 显示 GDT 的典型特性。当 GDT 两端的电压增大时, 放电管中的气体由于产生的电荷开始电离。这称为辉光区。在此区域中, 增加的电流将产生雪崩效应, 将 GDT 转换为虚拟短路, 允许电流通过器件。在短路事件中, 器件两端产生的电压称为弧电压。辉光区和电弧区之间的转换时间主要取决于器件的物理特性。

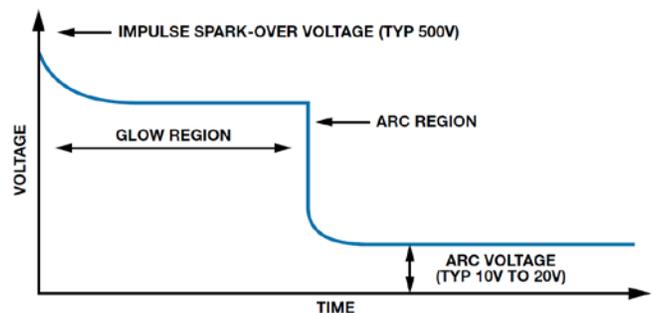


图 9. GDT 特性波形

表 4. 三种 ADM3485E EMC 兼容解决方案

保护方案	ESD (-4-2)		EFT (-4-4)		电涌(-4-5)	
	级别	电压 (接触/空气)	级别	电压	级别	电压
TVS	4	8 kV/ 15 kV	4	2 kV	2	1 kV
TVS/TBU/TISP	4	8 kV/ 15 kV	4	2 kV	4	4 kV
TVS/TBU/GDT	4	8 kV/ 15 kV	4	2 kV	X	6 kV

结论

本文说明了处理瞬变抗扰度的三种 IEC 标准。在实际工业应用中，RS-485 通信端口遇到这些瞬变时可能遭到损坏。EMC 问题如果是在产品设计周期后期才发现，可能需要重新设计，导致计划延迟，代价巨大。因此，EMC 问题应在设计周期开始时就予以考虑，否则可能后悔莫及，无法实现所需的 EMC 性能。

在设计面向 RS-485 网络的 EMC 兼容解决方案时，主要难题是外部保护元件的动态性能与 RS-485 器件输入/输出结构的动态性能相匹配。

本文介绍了适用于 RS-485 通信端口的三种不同 EMC 兼容解决方案，设计人员可按照所需的保护级别选择保护方案。EVAL-CN0313-SDPZ 是业界首个 EMC 兼容 RS-485 客户设计工具，针对 ESD、EFT 和电涌提供最高四级保护。表 4 总结了不同保护方案提供的保护级别。虽然这些设计工具不能取代所需的系统级严格评估和专业资质，但能够让设计人员在设计周期早期降低由于 EMC 问题导致的项目延误风险，从而缩短产品设计时间和上市时间。欲了解更多信息，请访问 www.analog.com/RS485emc。

参考文献

[ADM3485E Data Sheet](#).

Analog Devices Interface and Isolation. <http://www.analog.com/zh/interface-isolation/products/index.html>.

Bourns Telecom Protection Guide. www.bourns.com/data/global/pdfs/bourns_circuit_protection_selection_guide.pdf.

CDSOT23-SM712. www.bourns.com/pdfs/CDSOT23-SM712.pdf.

Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4-2: Testing and Measurement Techniques—Electrostatic Discharge Immunity Test (IEC 61000-4-2:2008 (Ed. 2.0)).

Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4-4: Testing and Measurement Techniques—Electrical Fast Transient/Burst Immunity Test (IEC 61000-4-4:2012 (Ed. 3.0)).

Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4-5: Testing and Measurement Techniques—Surge Immunity Test (IEC 61000-4-5:2005 (Ed. 2.0)).

EVAL-CN0313-SDPZ. www.analog.com/RS485emc.

GDT First Principles. www.bourns.com/pdfs/bourns_gdt_white_paper.pdf.

Marais, Hein. *Application Note AN-960. RS-485/RS-422 Circuit Implementation Guide, April, 2008.*

TBU-CA065-200-WH. www.bourns.com/data/global/pdfs/TBU-CA.pdf.

TISP4240M3BJR-S. www.bourns.com/data/global/pdfs/TISP4xxxM3BJ.pdf.

2038-15-SM-RPLF. www.bourns.com/data/global/pdfs/2038-xx-SM.pdf.

作者简介

James Scanlon [james.scanlon@analog.com] 是 ADI 公司的高级评估工程师。2001 年获得都柏林大学工程专业工程学士学位。2008 年获得利默里克大学 VLSI 系统工程学硕士学位。James 于 2001 年以设计评估工程师身份在爱尔兰利默里克加盟 ADI 公司，从事激光二极管驱动器的设计评估。他目前在接口和隔离技术部门工作，主要研究收发器产品系列。



Koenraad Rutgers 是 Bourns, Inc. 高级现场应用工程师。以前负责管理欧洲和亚洲电信电路保护团队，现在负责半导体部门的新产品开发。他的主要成就包括将参考设计工作与新产品开发流程相集成，以及向多家国际一级客户推出电路保护产品。Koenraad 与人合作撰写了两篇 IEEE 论文并申请了四项专利。

