

Hao Liu

摘要

本设计指南为不熟悉电力线数据通信实现的工程师提供了设计指南。本文有助于在尽可能短的时间内完成稳健可靠的数据和电力传输设计。

内容

1 简介和器件概述.....	2
2 与 RS-485 的比较.....	3
3 电缆类型.....	3
4 数据速率、载波频率和通信距离.....	3
5 电感器和电容器选择.....	4
6 网络拓扑.....	8
7 终端和失效防护.....	8
8 总线负载.....	10
9 接地和共模噪声.....	11
10 结论.....	12
10.1 参考文献.....	12
11 修订历史记录.....	12

插图清单

图 1-1. RS-485 总线负载.....	0
图 1-2. THVD8000 电感器负载.....	0
图 1-3. THVD8000 电感建议图表.....	0
图 1-4. THVD8000 负载电流路径.....	0
图 1-5. THVD8000 电容器负载.....	0
图 1-6. THVD8000 电容建议图表.....	0
图 1-7. 沿总线的驻波.....	0
图 1-8. 单位长度电缆的等效电路.....	0
图 1-9. 不带端接的 Cat5e 电缆 S11 图.....	0
图 1-10. 带有 100Ω 端接的 Cat5e 电缆 S11 图.....	0
图 1-11. 不带端接的 Cat5e 电缆反射.....	0
图 1-12. 带 100Ω 端接的 Cat5e 电缆反射.....	0
图 1-13. THVD8000 多节点设置.....	0
图 1-14. 两个收发器的接地.....	0
图 1-15. 分裂端接.....	0
图 1-1. THVD8000 OOK 调制信号.....	2
图 5-1. RS-485 总线负载.....	4
图 5-2. THVD8000 电感器负载.....	5
图 5-3. THVD8000 电感建议图表.....	6
图 5-4. THVD8000 负载电流路径.....	6
图 5-5. THVD8000 电容器负载.....	7
图 5-6. THVD8000 电容建议图表.....	7
图 6-1. 沿总线的驻波.....	8
图 7-1. 单位长度电缆的等效电路.....	8
图 7-2. 不带端接的 Cat5e 电缆 S11 图.....	9
图 7-3. 带有 100Ω 端接的 Cat5e 电缆 S11 图.....	9

图 7-4. 不带端接的 Cat5e 电缆反射.....	9
图 7-5. 带 100Ω 端接的 Cat5e 电缆反射.....	9
图 8-1. THVD8000 多节点设置.....	10
图 9-1. 两个收发器的接地.....	11
图 9-2. 分裂端接.....	11

表格清单

表 1-1. THVD8000 和 RS-485 比较.....	0
表 1-2. 电缆长度与载波频率.....	0
表 2-1. THVD8000 和 RS-485 比较.....	3
表 4-1. 电缆长度与载波频率.....	4

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介和器件概述

RS-485 标准是一种差分接口，已被广泛应用于工业、医疗和消费类应用。THVD8000 器件使用 RS-485 物理层信令实现电力线通信。借助内置的开关键控 (OOK) 调制功能，输入晶体管到晶体管逻辑 (TTL) 数据能够通过串联电容器直接耦合到共享电源线上，而无需对微控制器 (MCU) 进行任何更新。需要一根两线电缆来传输电源和 RS-485 信号。更具体地说，OOK 调制将逻辑低电平输入转换为高频时钟信号，而逻辑高电平输入会产生直流电压 (图 1-1)。THVD8000 接收器会在交流耦合后，使用精密的带通滤波器和解调器从电源线提取数据。总线上的电源通过在 OOK 数据频率下显示高阻抗的串联电感器去耦。

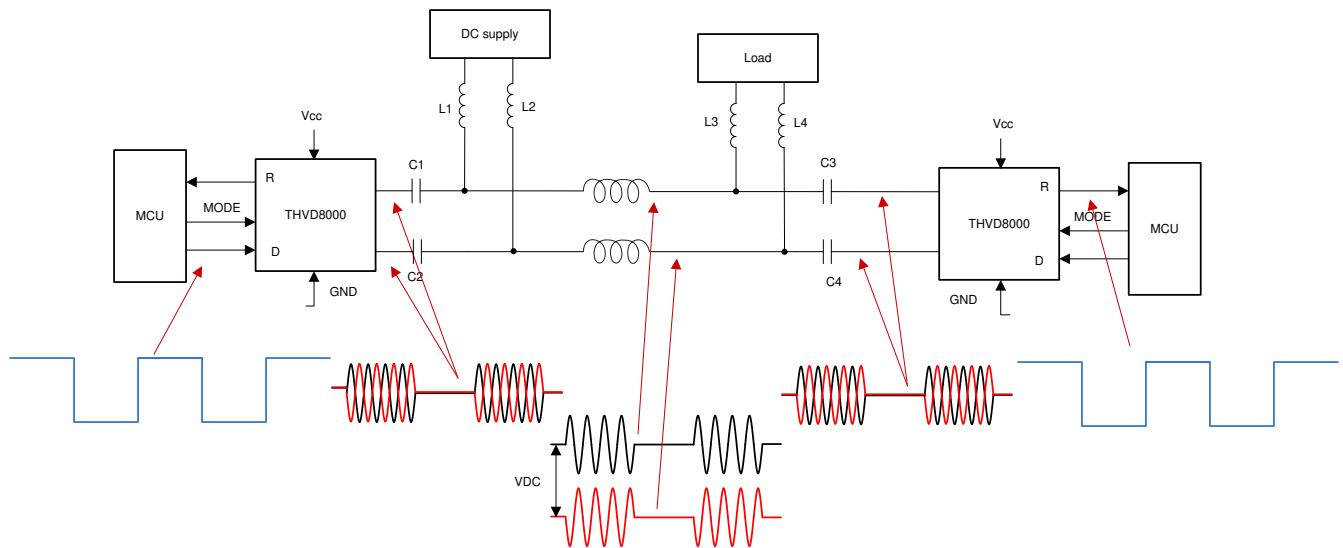


图 1-1. THVD8000 OOK 调制信号

2 与 RS-485 的比较

在本指南中，经常提及 RS-485 标准或与之进行比较。由于 THVD8000 器件利用 RS-485 信号，因此该器件继承了一些 RS-485 特性，如平衡多点传输和共模噪声抗扰度 (表 2-1)。此外，与 RS-485 收发器一样，THVD8000 也是只有物理层的器件。这使得 THVD8000 在需要不同高层数据通信协议的各种应用中易于实施且灵活。该器件与来自 MCU 的通用异步接收器/发送器 (UART) 信号一起工作，可以直接替换系统中现有的 RS-485 信号链路。

表 2-1. THVD8000 和 RS-485 比较

特性	RS-485 收发器	THVD8000
Vod	54 Ω 时为 1.5V	54 Ω 时为 1.5V
RX 阈值	200mV	115mV 至大约 225mV
传输方向	半双工或全双工	半双工
多点通信	有	有
共模噪声抗扰度	有	有
拓扑	菊花链	菊花链
终端	是	优选
无极性	否	有
TTL 接口连接到 MCU/UART	有	有
节点数上限	256	256

3 电缆类型

在 RS-485 应用中使用双绞线电缆可以获得优势，因为来自外部源的噪声与共模噪声一样均等地耦合到两条导线中，该差分信号被差分接收器所拒绝。在 THVD8000 应用中，出于同样的原因，优选双绞线电缆。此外，电缆应具有足够的额定电流和足够低的串联电阻，可在没有过度压降的情况下提供电力。应用中的很多电源线可能不是双绞线类型。在这种情况下，耦合的共模噪声可能会以差分方式出现在总线上。因此，在系统设计中需要特别注意尽可能减少噪声耦合，下面各节中将会对此进行讨论。同样，在传输高速差分信号时，使用长度匹配的电缆也很重要。长度不匹配会导致反相线和同相线之间的相位不平衡，进而导致部分差分信号传输到共模。模式转换可能会导致更高的 EMI，在更严重的情况下可能会导致通信中断。

4 数据速率、载波频率和通信距离

在系统设计中，OOK 调制的载波频率是根据所需数据速率和通过电缆的预期交流损耗来选择的。通常建议选择至少比数据速率快 10 倍的载波频率。换句话说，数据的一位周期内有超过 10 个周期。例如，对于 19200 波特率的应用，可以使用 300kHz 的载波频率。对于 115200 波特，优先选择至少约 1.2MHz 的载波频率。这有助于尽可能减少因调制和解调期间可能发生的上升和下降信号转换中的不对称而导致的位时序失真。

不过，在载波频率选择方面有一些权衡。载波频率越高，电缆导致的信号损失就越大，因此通常可以支持的传输距离就更短。通常，由于电感器更小，实现成本可能会更低。关于电感器选择的详细信息将在下一节中讨论。

与 RS-485 传输类似，在给定载波频率下，最大总线长度受到传输线损耗的限制。抖动是信号完整性的常用参数，它会实时显示与理想信号边缘的偏差。在 THVD8000 应用中，除了电缆损耗之外，由于调制主题和反极性连接导致的占空比失真也可能对总抖动产生影响。

在表 4-1 中，根据实验室数据列出了每个载波频率可实现的最大电缆长度。测量是在 20AWG UL2464 电源线上进行的。如果接收的信号抖动比接收器的阈值高出或低出 20%，则认为该通信不适用（在表中标记为“n”）。

表 4-1. 电缆长度与载波频率

		fo (kHz) (数据速率 = 1/10 fo)				
		125	300	500	750	1000
电缆长度 (米)	300	y	y	y	y	y
	600	y	y	y	y	y
	900	y	y	y	y	n
	1200	y	y	y	n	n
	1500	y	y	n	n	n

5 电感器和电容器选择

电感器和电容器值的选择基于 OOK 调制载波频率下的阻抗。一般规则是总电感器阻抗应保持大于 375Ω ，每个电容器的阻抗小于 5Ω 。这背后的原因源于 RS-485 标准，该标准要求考虑 54Ω 负载时，每个输出驱动器需要最小 1.5V 的差分电压。如图 5-1 所示，对于两个 120Ω 终端，剩余的总线负载必须大于 375Ω 才能使最强（最低电阻）负载小于 54Ω ($120 \parallel 120 \parallel 375 \times 2 = 54\Omega$)。接收器的输入阻抗相对较高，在负载计算中可以忽略不计， 375Ω 的预算全部分配给电感器。

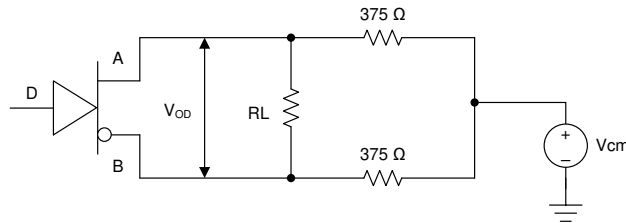


图 5-1. RS-485 总线负载

假设总线上有 $2n$ 个电感器（每个节点上的差分负载由两个串联电感组成）。假设直流电源阻抗低，负载有较大滤波电容，使电感交流接地（图 5-2）。

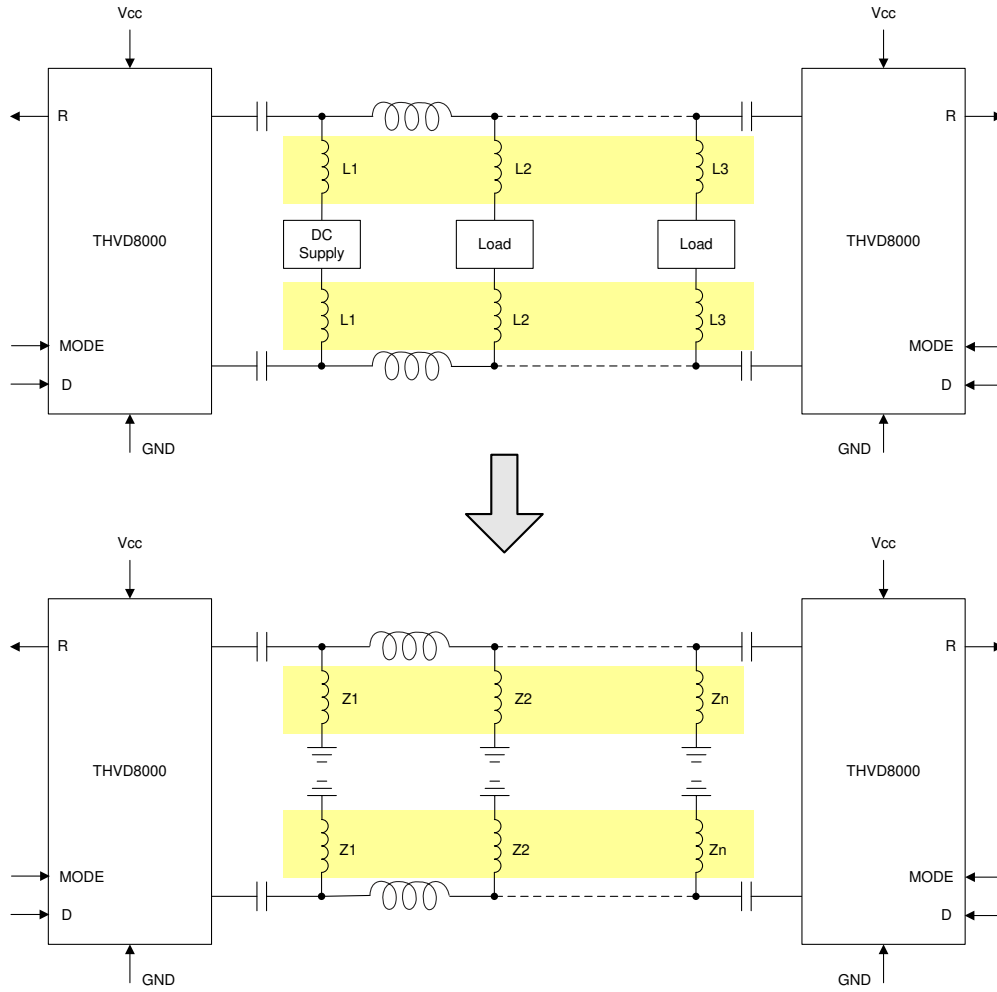


图 5-2. THVD8000 电感器负载

总等效差分阻抗按每个电感器值的并联组合近似得出 (f_0 为 OOK 的载波频率) , 而总值等于按 [方程式 5](#) 计算出的值。

$$Z_1 || Z_2 || \dots || Z_n \tag{5}$$

$$Z_n = 2\pi f_0 L_n \tag{6}$$

使用 [图 5-3](#) 中的参考图表找到每个载波频率下的推荐电感器值。这就是上一节提到的原因, 即电感可以随着载波频率的升高而变小。请注意, 该指南基于一阶估计。在实际系统中, 还要考虑其他因素, 例如相位、电缆损耗等。

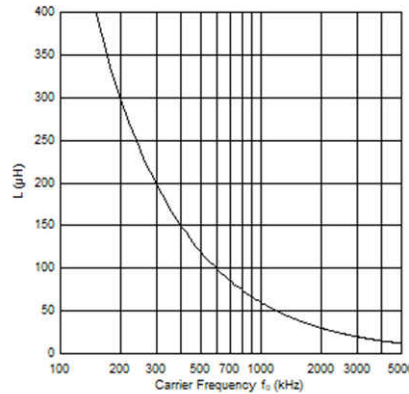


图 5-3. THVD8000 电感建议图表

除了电感之外, 选择电感器时还需要考虑其他参数。其中之一是电流额定值, 具体取决于供电能力要求。另一个参数是 DCR (直流电阻) 。如 [图 5-4](#) 所示, 网络中的源极和负载共经过 4 个电感。如果电阻不小, 则在汲取高电流时电压降可能会很大。

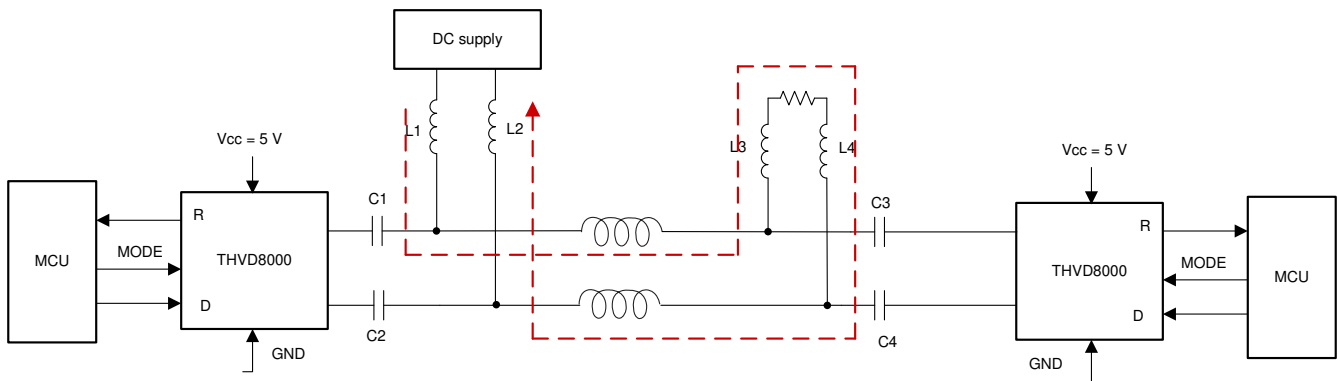


图 5-4. THVD8000 负载电流路径

类似地, 对于每个去耦电容器, 载波频率下的阻抗按 ([方程式 7](#)) 计算。

$$Z_c = \frac{1}{2\pi f_0 C} \tag{7}$$

电容器阻抗与 OOK 信号路径串联, 因此它可以衰减接收到的信号 ([图 5-5](#)) 。与电感器不同, 电容器阻抗在多节点系统中被认为是点对点的。电容器将低频总线电压分量与 THVD8000 器件隔离。选择时需要考虑额定电压和泄漏。

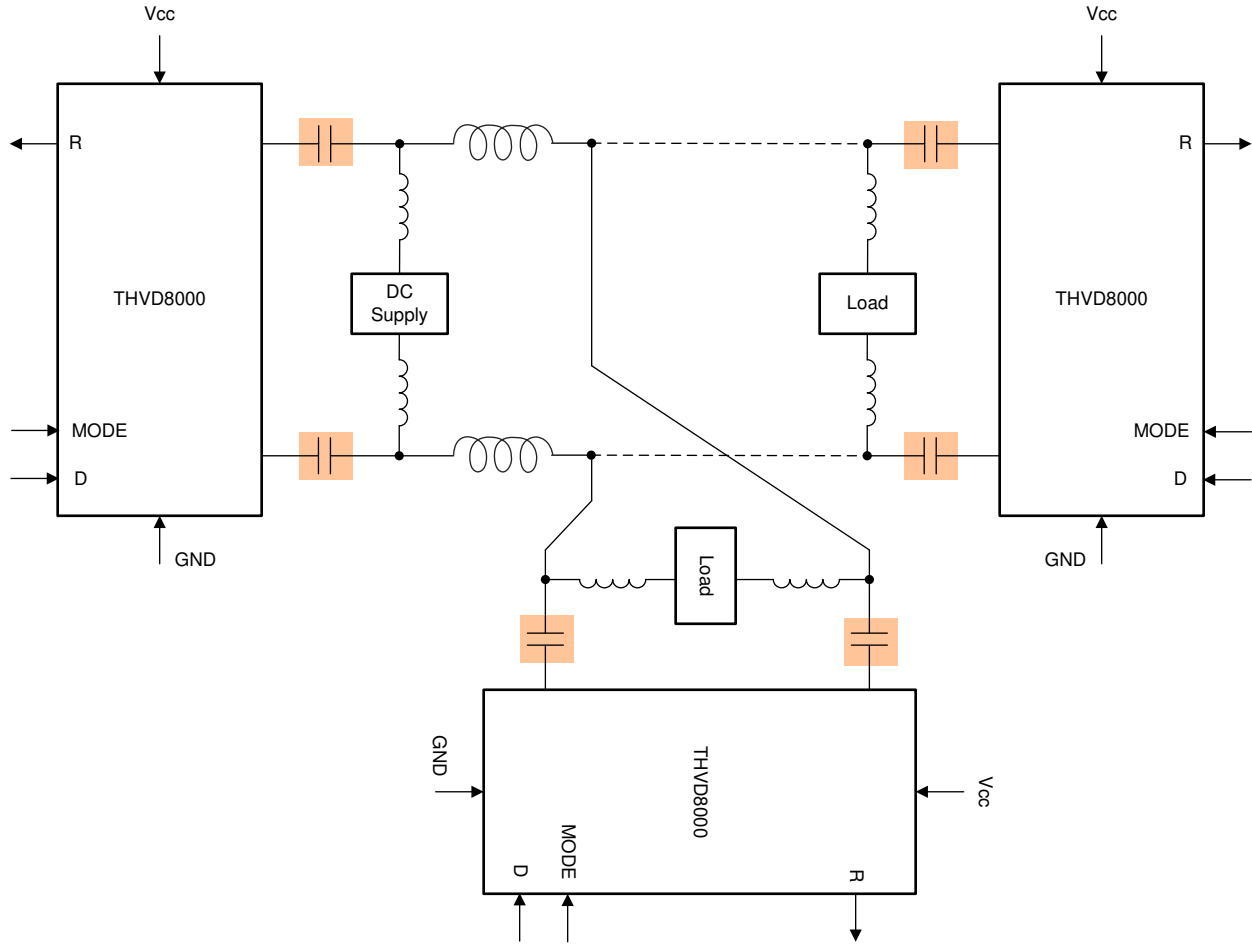


图 5-5. THVD8000 电容器负载

图 5-6 展示了电容器值选择图表，其中推荐电容器值位于上部区域的曲线上方。

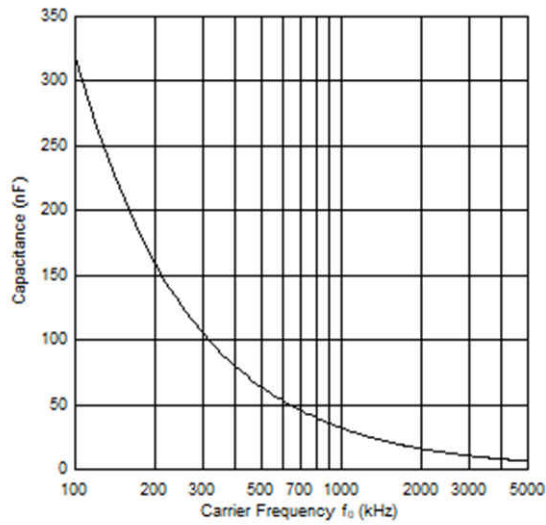


图 5-6. THVD8000 电容建议图表

6 网络拓扑

与 RS-485 系统一样，菊花链是推荐的拓扑结构，两个终端安装在总线的最远端。通过与电缆特性阻抗匹配的正确端接，总线反射被尽可能减少以提供更佳信号完整性。

然而，根据数据速率和距离，可能会实施其他拓扑。需要仔细研究每个系统的信号完整性。例如，若在没有端接的情况下使用长电缆运行 THVD8000，最终可能会在总线上产生驻波。原因是开口端产生几乎完全的反射。反射波向后传播并叠加在传输波上。如果两个波的相位相差 180 度，则传输信号的幅度可能会大大降低。在无端接系统中，最小幅度通常发生在传输信号的约 1/4 波长 (λ) 处。图 6-1 显示了传输波、反射波和电缆在 $N \times 1/4 \lambda$ ($N = 0, 1, 2, 3, 4$) 位置的叠加。

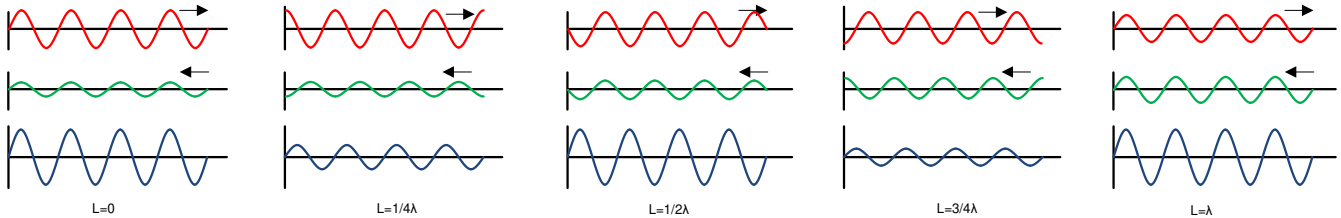


图 6-1. 沿总线的驻波

同样的问题也适用于系统中的残桩（未端接的电缆分支）。作为一般规则，如果残桩长于驱动器输出上升时间的 1/10，则应从信号完整性的角度考虑反射。使用方程式 8 计算最大残桩长度：

$$L_{stub} \leq \frac{t_r}{10} v c \quad (8)$$

其中

- t_r = 驱动器 10/90 上升时间 (ns)
- v = 电缆的信号速度
- c = 光速

7 终端和失效防护

如上一节所述，端接与电缆特性阻抗匹配的菊花链是优选拓扑。电缆的特性阻抗是一个复数值，取决于电缆的单位长度电容、电感、串联电阻和分流电导（图 7-1）。对于低损耗电缆，特性阻抗通常近似为一个实际值（主要由寄生电容和电感项决定），因此可以与一个简单的电阻匹配。但请注意，这是一个近似值，可能无法在所有信号频率和电缆长度下提供精确匹配。

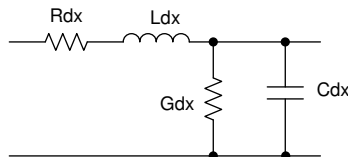


图 7-1. 单位长度电缆的等效电路

实际上，在许多应用中可能很难测量电缆的特性阻抗。使用矢量网络分析器 (VNA) 等便利设备，可以检查复域中电缆对不同频率的响应，并将结果显示在史密斯图上。频率范围的复阻抗环绕标称负载阻抗（仅电阻）。

在 S 参数测量中，S11 是显示反射能量的回波损耗。S11 的电压驻波比 (VSWR) 在相关频率范围内应接近 1。如果 VSWR 在应用频率范围内变化最小，则认为电阻与电缆匹配良好。一根 1000 英尺的 CAT5 电缆由 VNA 通过开路端接 (图 7-2) 和 100 Ω 电阻器端接 (图 7-3) 测量。与史密斯图不同，结果表明 S11 更小，并且在端接正确的情况下变化更小。

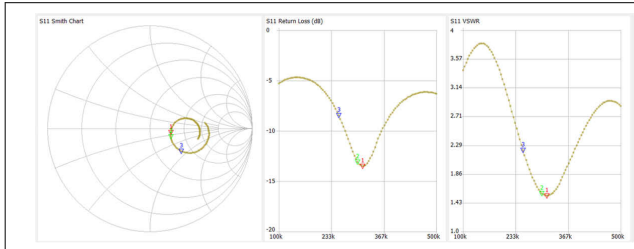


图 7-2. 不带端接的 Cat5e 电缆 S11 图

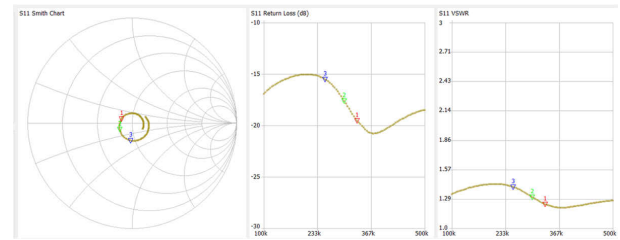


图 7-3. 带有 100Ω 端接的 Cat5e 电缆 S11 图

如果不使用 VNA，仍然可以搜索阻抗，但会更困难。例如，可以使用信号发生器驱动电缆。可以使用各种端接电阻器观察电缆末端的信号反射。在上一段提到的相同测试中，在开端时，信号需要过一段时间才能减弱，并且可以观察到纹波 (图 7-4)。

使用 100 Ω 端接时，信号会传输到电缆末端并快速趋稳 (图 7-5)。

由于 OOK 调制，THVD8000 器件具有对称阈值。在总线添加上拉或下拉电阻不会像 RS-485 系统那样产生失效防护功能。但是，THVD8000 与总线上的失效防护网络一起使用，因为接收器检索频率信息并且直流偏置被阻止。同样，接收器不依赖直流电压进行决策。如果由于某种原因接收到的信号显示出一些直流失调电压，则调制方案仍然有效。

THVD8000 器件具有无极性功能，这意味着无论节点之间的 A 线和 B 线如何连接，都可以进行通信。接线错误也会影响电力输送，并且可以通过使用全桥整流器在系统级实现电力线极性抗扰度。

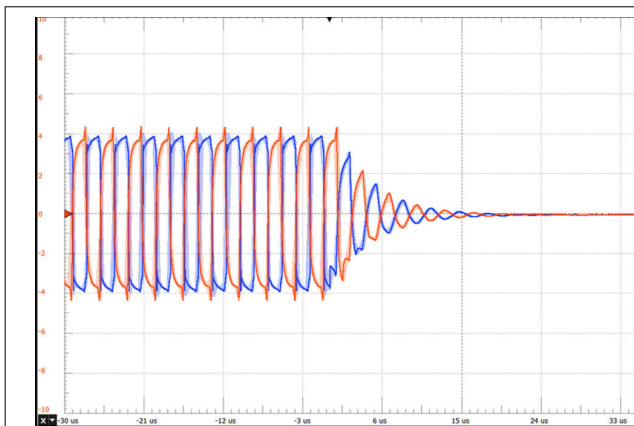


图 7-4. 不带端接的 Cat5e 电缆反射

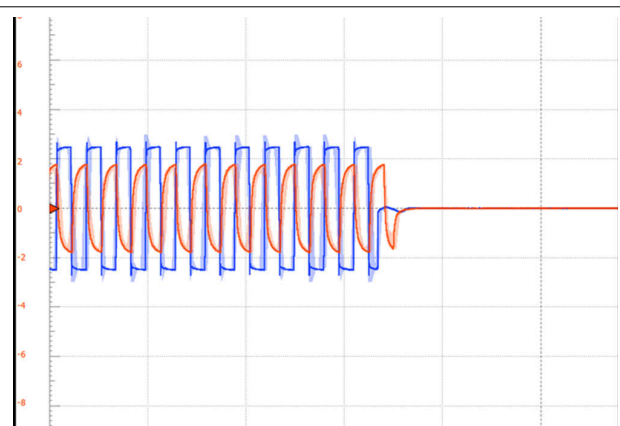


图 7-5. 带 100Ω 端接的 Cat5e 电缆反射

8 总线负载

如前所述，与 RS-485 收发器相比，THVD8000 具有类似的驱动强度和类似的接收器灵敏度。为了评估总线上的信号衰减，请计入因多个节点的端接、去耦电感和输入阻抗而导致的所有电缆损耗和总线上负载。关于电缆损耗和电感器负载，之前已在本应用报告中讨论过。THVD8000 接收器的输入阻抗约为 RS-485 标准中所测量单位负载 (UL) 的 1/8。连接到总线的所有其他外部元件 (如 TVS 二极管) 可能会对多个节点和高载波频率产生影响。在所有节点中，并非所有节点都必须同时提供数据和电力。一些节点可以自供电，只包含传输数据，如图 8-1 中的节点 3 所示。

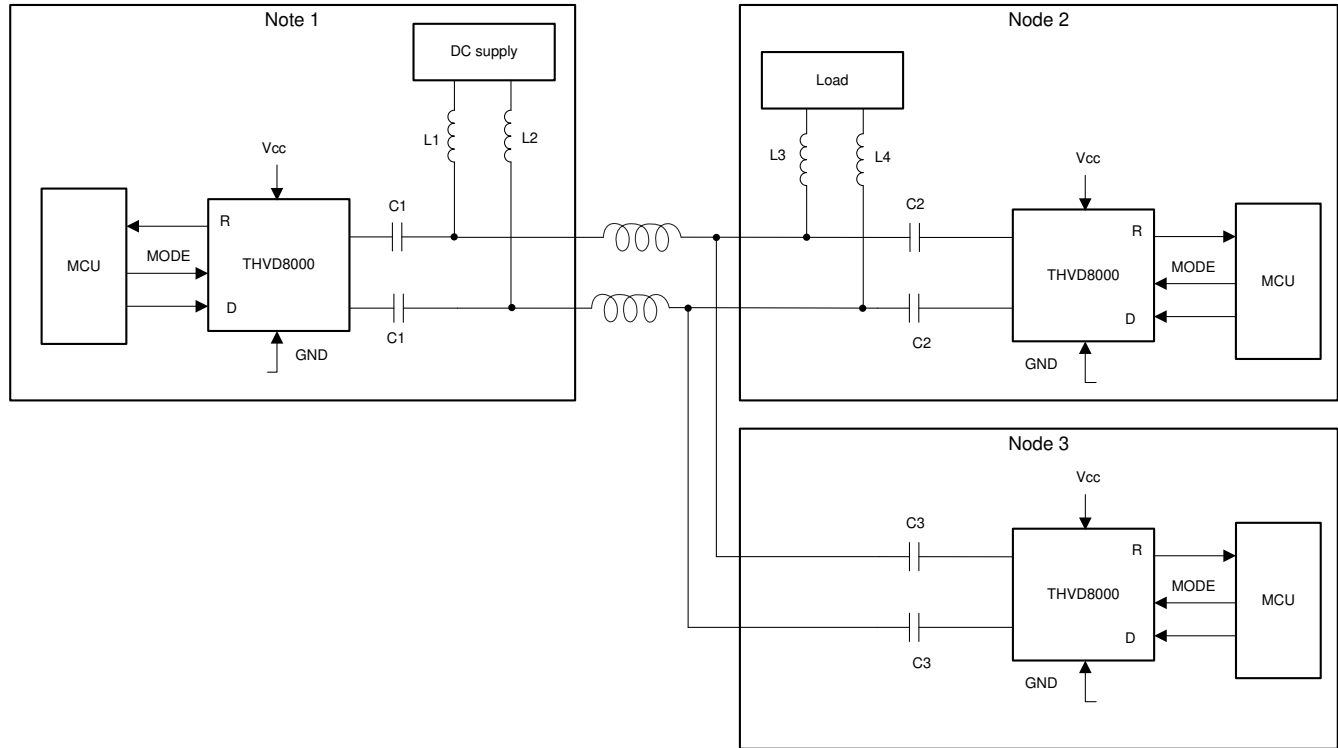


图 8-1. THVD8000 多节点设置

9 接地和共模噪声

设计远程数据链路时，设计人员必须假定可能存在很大的接地电势差。这些电压作为共模噪声显示在发送器输出中。即使总叠加信号在接收器的输入共模范围内，本地接地也可能不是返回电流的可靠路径。换句话说，多节点网络中的节点具有隔离本地接地，这些接地通过一些高阻抗路径连接（图 9-1）。为了帮助创建更强的电流返回路径，一种简单的方法是通过第三根导线或电缆的屏蔽层将所有收发器接地连接到相同的电位。如果此方法对系统来说不实用，那么可以使用电容器和 $10\text{M}\Omega$ 等大电阻器将收发器接地端与保护性接地端 (PE) 连接起来。目的是通过 PE 创建高频电流路径，而有效性取决于应用环境。

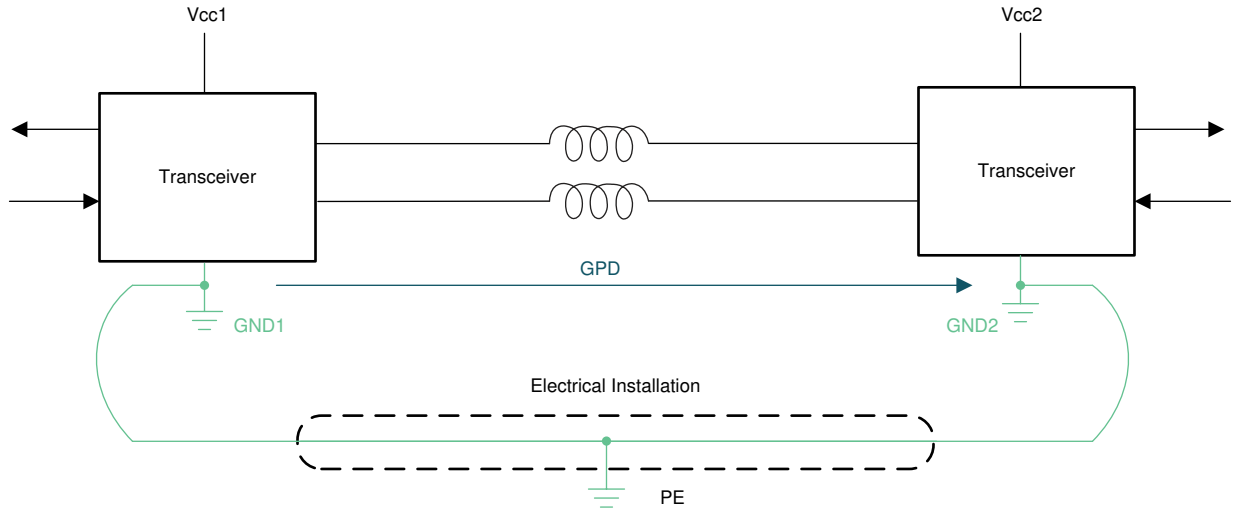


图 9-1. 两个收发器的接地

尽管 THVD8000 器件与 RS-485 收发器一样具有良好的共噪抗扰度，但如果耦合共模噪声幅度较大，则嘈杂的环境可能会出现问題。在这些应用中，可以将 120Ω 电阻替换为两个 60Ω 的低通滤波器，用于提供附加的共模噪声滤除（图 9-2）。

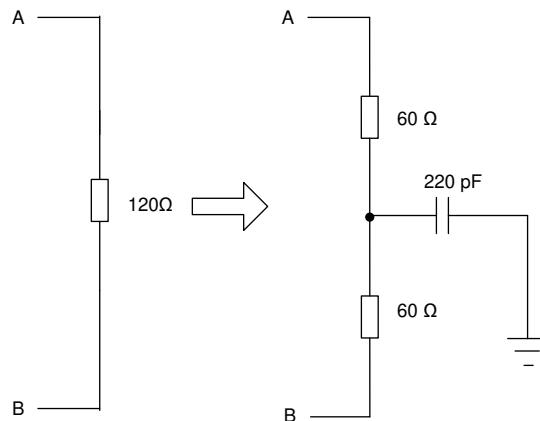


图 9-2. 分裂端接

10 结论

本应用报告介绍了 THVD8000 器件的电力线数据通信系统设计的主要方面。

按照本文档讨论的内容进行操作并查阅参考资料部分中的详细应用报告，可以帮助您在短时间内完成稳健系统设计。

10.1 参考文献

1. 信号完整性和反射：
 - 德州仪器 (TI), 《[AN-806 数据传输线路及其特性](#)》应用报告
 - 德州仪器 (TI), 《[AN-807 反射：计算和波形](#)》应用报告
 - 德州仪器 (TI), 《[AN-808 长距离传输线路和数据信号质量](#)》应用报告
2. RS-485 设计指南：
 - 德州仪器 (TI), 《[RS-485 设计指南](#)》应用报告
3. 接地噪声：
 - 德州仪器 (TI), 《[消除数据传输系统中的接地噪声](#)》应用报告
4. 数据供电仿真：
 - 德州仪器 (TI), 《[使用 RS-485 的电力线通信仿真参考设计](#)》设计指南

11 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (June 2020) to Revision A (July 2021)

Page

-
- | | |
|---------------------------------|---|
| • 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式。..... | 2 |
|---------------------------------|---|
-

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司