

# 聊一聊TDR测试中曲线上飘现象

随着PCIe 6.0和即将到来的PCIe 7.0技术的高速发展，传输速率不断突破极限，从112 Gbps到224 Gbps的应用逐渐成熟，未来甚至448Gbps的高速链路也将在实际场景中落地。伴随着速率的大幅提升，高速信号的完整性 (SI) 问题也变得日益突出。从信号反射、串扰、到通道损耗等因素，设计和验证过程面临前所未有的挑战。在这一背景下，TDR (时域反射计) 测试作为重要的测量手段，对传输线的阻抗控制及信号路径问题的定位至关重要。TDR测试不仅能够直观反映传输线的阻抗特性，还可帮助工程师快速识别故障点，是解决高速信号完整性难题的“关键武器”。

传统的TDR测试需要使用阶跃信号源和示波器，现在比较流行的另一种TDR测试是使用矢量网络分析仪来进行TDR测量，这部分的介绍可以参考本公众号以前的文章：《【实践分享】网分的TDR功能，时频域的双向奔赴》。

经常进行TDR测试的小伙伴们都会注意到在TDR测试中，不管是示波器测试还是矢量网络分析仪测试。阻抗曲线都会随横轴 (t) 增加而逐渐增大，而且分别从两个端口测试，都会出现阻抗上飘的现象，如图 1所示，可以看出，从0.11 ns到3.45 ns，阻抗上升了大约7欧姆。不管是单端还是差分测试，都会观察到这种现象。

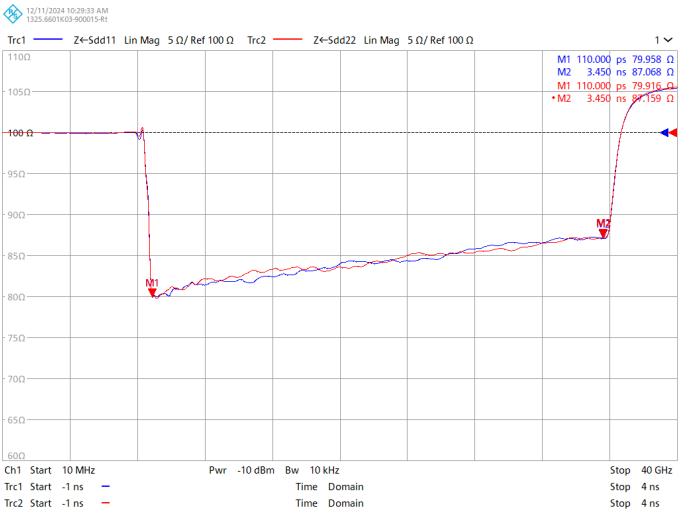


图1：两个端口 (逻辑1端口和逻辑2端口) 的阻抗测试结果

对于这个阻抗上飘的现象，在R&S公司的应用文档《Time Domain Measurements using Vector Network Analyzer ZNA》[1]，中只有一句简单的说明：

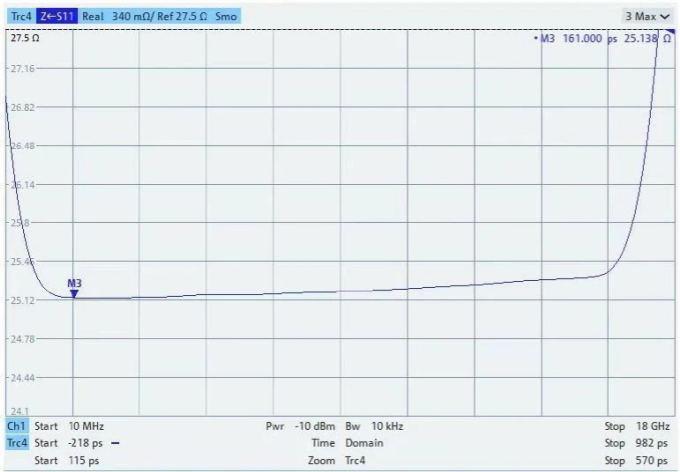


图2：R&S应用文档中对阻抗上飘现象的说明

应用卡片 | 01.00版

ROHDE & SCHWARZ  
Make ideas real



## 今天我们就来聊一聊，传输线的损耗是如何引起阻抗上飘的现象的。

我们先复习一下《微波技术基础》中的传输线集总元件电路模型，也称为RLGC模型。TEM波的传输线需要两根导体，我们把一根长的TEM传输线看成许多长度为 $\Delta z$ 的传输线串联，当 $\Delta z$ 远远小于电磁波的波长时，我们可以用一个集总元件模型来描述，如图3(b)所示：

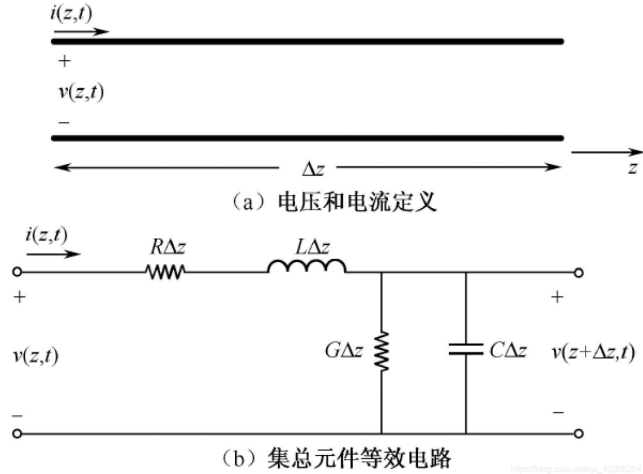


图3：TEM传输线RLGC模型

- **R**表示两导体单位长度的串联电阻，单位为 $\Omega/m$ ，这个值代表了导体引起的损耗。
- **L**表示两导体单位长度的串联电感，单位为 $H/m$ 。
- **G**表示单位长度的并联电导，单位为 $S/m$ ，这个值代表了介质材料引起的损耗。
- **C**表示单位长度的并联电容，单位为 $F/m$ 。

由此，我们可以根据基尔霍夫定律建立方程，并取 $\Delta z \rightarrow 0$ 时的极限，得到著名的电报方程。求解电报方程，可以得到传输线上电压与电流的比值，也就是传输线的特征阻抗 $Z_0$ ，可以认为TDR测得的阻抗就是这个特征阻抗 $Z_{0c}$ 。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1)$$

我们一般忽略传输线的损耗，即将要分析的传输线看成无耗传输线，此时 $R=G=0$ ，其特征阻抗为 $Z_0$ ：

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

此时在频域上，传输线的特征阻抗 $Z_0$ 不随频率变化，为一个常数 $C$ 。根据傅里叶/逆傅里叶变换原理可知，频域上的常数变化到时域上后，结果为 $C$ 与冲激函数 $\delta(0)$ 的乘积。再与阶跃函数做卷积后，得到的时域上的阻抗在 $t > 0$ 时刻之后为一个常数，不会随时间变化，也就不会有上飘现象。这个结果是我们期望看到的结果。

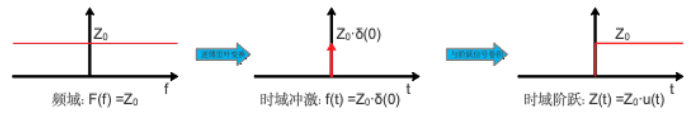


图4：无耗传输线时域阻抗无上飘现象

我们再来看一下有损耗的情况。很多前辈大佬们都做过分析[2]，[3]，[4]，大佬们一般认为，传输线的损耗主要由导体电阻 $R$ 决定，而介质损耗影响很小。那么在这里，我们考虑一种极限情况，即填充介质为真空，这时 $G=0$ ，则其特征阻抗为 $Z_0$ ：

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}} \quad (3)$$

而导体电阻 $R$ 由直流电阻 $R_{DC}$ 和与趋肤效应有关的交流电阻 $R_{AC} = (1 + j)R_s \cdot \sqrt{f}$ 两部分组成：

$$R = R_{DC} + (1 + j)R_s \cdot \sqrt{f} \quad (4)$$

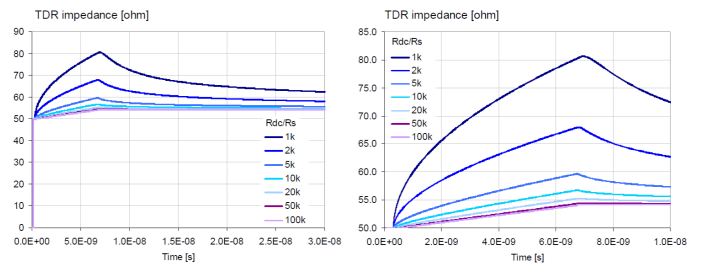
带入(3)式，可得此时的特征阻抗 $Z_0$ 为：

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{R_{DC} + (1 + j)R_s \cdot \sqrt{f} + j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \sqrt{\frac{R_{DC} + (1 + j)R_s \cdot \sqrt{f}}{2 \cdot \pi \cdot f L}} \quad (5)$$

前辈大佬们使用一阶泰勒级数近似、逆傅里叶变化和卷积后，最终得到了阶跃激励下的时域阻抗公式[3]：

$$z(t) = \sqrt{\frac{L}{C}} \left( 1 + \frac{R_s}{\pi L} \sqrt{t} + \frac{R_{DC}}{2L} t \right) \quad (6)$$

从这个式子可以看出，在 $t=0$ 时刻， $z(t)$ 的值与无耗传输线的结果是一致的，随后，随着时间的增加而单调上升，如果趋肤效应不能忽略，则 $z(t)$ 曲线为一个线性曲线和一个 $\sqrt{t}$ 曲线的叠加；当趋肤效应可以忽略时， $z(t)$ 为一个线性函数。这一点与文献[4]中的结论是吻合的。



AC resistance increases apparent impedance and creates a changing slope. With no AC resistance, TDR response climbs linearly to  $Z_{ref} + R_{DC}$

图5：文献[4]中的部分结论

文献[4]提到，工程上如果忽略趋肤效应引起交流电阻，TDR的响应应该是线性上升到无损耗时的特征阻抗与直流电阻的和： $Z_{ref}+R_{DC}$ 。那我们来验证一下这个结论。我们回到图1，这个是一个PCB板上差分线的测试结果：



图6：PCB板上的差分线

我们可以用万用表测量出每根线的直流电阻，这个电阻包括信号线上的电阻（同轴连接器内导体之间的电阻）和地上的电阻（同轴连接器外导体之间的电阻）。实际测量的结果是单根线上的信号线直流电阻约为2.4欧姆，地上的电阻约为0.3欧姆，二者之和为2.7欧姆，差分5.4欧姆。

我们使用R&S矢量网络分析仪的迹线统计功能，看一下单端TDR和差分TDR的上飘幅度（Slope）：



图7：使用迹线统计功能，测量上飘幅度 (slope)

单端阻抗上升了3.6欧姆和3.3欧姆，差分阻抗上升了7.1和7.2欧姆。跟我们计算出来的直流电阻值：单端2.7欧姆、差分5.4欧姆，不能说相同，只能说相差不大，工程上可以接受。

在有些规范中，针对TDR阻抗上飘现象，做出了规定，可以用来做修正。比如Open联盟制订的千兆以太网（STP）测试规范[5]的附录B中，就规定了可以使用“slope”来对测试得到的TDR阻抗结果做修正：

- a) TDR measurement from both sides of the investigated channel using system rise time 500 ps
- b) If the measured CIDM value increases with a linear slope over length for both particular measurements the correction given below is applicable, otherwise the correction is not allowed.
  - I. Calculation of slope of measured CIDM function over time at the region of cable:  
 $S(t, CIDM_{measured}(t))$   
Note: The impedance of measurement fixture and ECU connector must be out of focus for this calculation. Possible calculation method: EXCEL function “Slope” or comparable functions at other software tools
  - II. Correct slope  
 $CIDM1(t) = CIDM_{measured}(t) - S * t$
  - III. Getting offset O at the beginning of channel ( $t = t_{OUT0}$ )  
 $O = CIDM_{measured}(t_{OUT0}) - CIDM1(t_{OUT0})$   
Note: Needed to avoid correction of slope in measurement cables used for connection the TDR measuring equipment with the measurement fixture
  - IV. Correct offset  
 $CIDM_{corrected}(t) = CIDM1(t) + O$

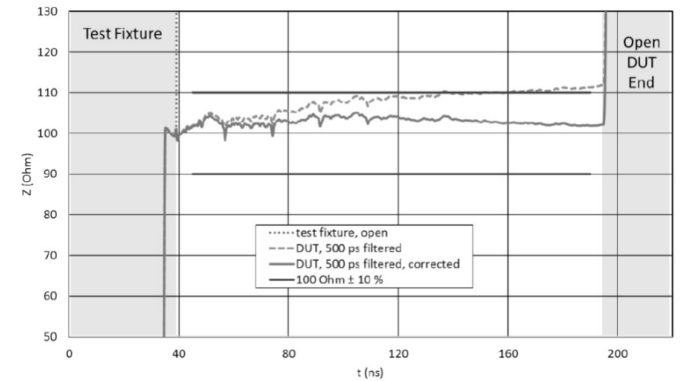


图8：Open联盟千兆以太网测试规范中的TDR阻抗修正

由此得出「结论」

TDR阻抗测试结果中，阻抗随时间逐渐增大的现象是由传输线的导体电阻引起的，导体电阻越大，阻抗上飘的斜率越大。

通过本文对TDR测试中曲线上飘现象的解析，我们可以看到高速信号完整性问题随着速率的提升变得越来越难以忽视，而TDR测试依旧是工程师们手中的利器。无论是传输线阻抗控制还是故障定位，TDR为我们提供了精准的洞察和解决思路。

## 参考文献:

- [1] T. Bednorz, "Time Domain Measurements using Vector Network Analyzer ZNA," 30 Jul 2020. [Online]. Available: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_application/application\\_notes/1ep83/1EP83\\_0e\\_TimeDomain\\_ZNA7.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ep83/1EP83_0e_TimeDomain_ZNA7.pdf).
- [2] J. Zhang, D. X. Fu, M. Bian, X.-D. Cai 和 B. Sen, "Analytical Derivations of the TDR Expressions of Lossy Transmission Lines with the Other End Perfectly Matched," 出处 12th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo), Haining, China, 2019.
- [3] P. Liu, J. Zhang 和 J. Fang, "Accurate characterization of lossy interconnects from TDR waveforms," 出处 IEEE 22nd Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems, 2013.
- [4] I. Novak, Y. Li, E. Kunz, S. Paydavosi, L. Kocubinski 和 K. Hinckley, "Determining PCB Trace Impedance by TDR:Challenges and Possible Solutions," 出处 DESIGNCON 2013, Santa Clara, 2013.
- [5] O. Alliance, "Channel and Components Requirements for 1000Base-T1 Link Segment Type A (STP)," 2020.

罗德与施瓦茨 (中国) 科技有限公司  
800-810-8228 400-650-5896  
[info.china@rohde-schwarz.com](mailto:info.china@rohde-schwarz.com)  
[www.rohde-schwarz.com.cn](http://www.rohde-schwarz.com.cn)

官方微信



官方视频号



## 环境承诺

- ▶ 能效产品
- ▶ 持续改进环境现状
- ▶ 有保证的ISO 14001环境管理体系

R&S®是罗德与施瓦茨公司注册商标  
商品名是所有者的商标 | 中国印制  
版本01.00 | 2025年5月  
聊一聊TDR测试中曲线上飘现象  
文件中没有容限值的数据没有约束力 | 随时更改