

测量平衡式器件

矢量网络分析仪提供解决方案

测量传统RF信号时并不能经常达到预期效果，如常用的单端式传输线中的微带线架构间的传导板常被视为理想接地，但由于许多电路器件以其为参考电位的操作模式，从而导致板上产生电流。而且微带线本身也会受磁场干扰而成为干扰源并影响到其他传输线或器件，这些问题都可以采用对称性的平衡式器件来解决。

■ 赵韵致 ROHDE & SCHWARZ 公司

统上RF信号是通过一组传输线传送，而其中一条传输线与地线连接。此种类型的传输线称之为非平衡式或单端结构，而一般常用的单端式传输线包括同轴线、微带线与共面线。

RF信号微带线，其架构为一条金属细带与传导板，其间由介质作为分隔。传导板被视为理想接地，也就是说，此平板上任一位

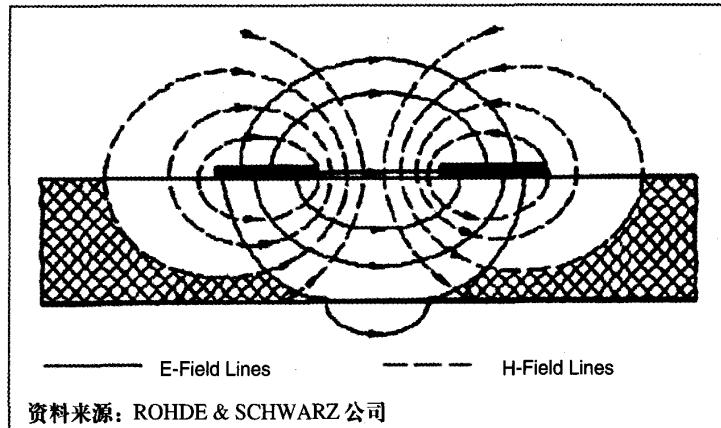
置都具有相同的电位。但事实却并非如此，许多电路器件以此地线板为参考电位的操作模式，将导致此板上有电流产生。有限的导电率与寄生的电感效应将提高地线板上电位的差异，而这些差异性将会干扰到信号。

再者，由于微带线上的金属细带像天线一样容易受到干扰电磁场的影响，并且微带线本身也会成为干扰源而影响到其他传输线或器件。

这些问题都可以采用对称性的平衡式器件来解决相关问题。图1则为共面架构（Coplanar Structure）下所采用的平衡式传输线的切面图，显示出共同平衡式传输切面（Cross section of a planar balance transmission）。

信号是通过两条导线间的电压差来读取，称之为差模，在理想架构下是与地线无关的。然而事实上，大部分的线板皆非常靠近导线，因此除了差模之外，还共模方式。

■ 图1 共面平衡式传输线切面图



资料来源：ROHDE & SCHWARZ 公司

差模与共模

一组具有地线的平衡式传输线可将之等效为两条耦合式单端传输线架构。由传输线理论得知，此两条耦合线存在两种独立的操作模式——奇模（odd）与偶模（even）或差模与共模。图2显示为一组共面平衡式传输线在两种操作模式下电场、磁场的分布切面图。

对于共模架构而言，试想在垂直对称平面有一磁墙（Magnetic

Wall), 则在差模架构下为一电墙(Electric Wall)。

一般来说, 这两种模式下的特性阻抗与传导系数是不同的, 且两者之间并无固定的关系可表示, 这些参数是根据传输线的型态而定。差模下的特性阻抗为 Z_d , 共模下的特性阻抗为 Z_c 。假设对两条单端传输线, 其特性阻抗为 Z_0 , 则 Z_d 与 Z_c 可轻易求出。对于差模来说, 两组电压大小相同, 相位反向, 如此可视为电压双倍而电流不变, 因此 $Z_d=2Z_0$ 。对于共模来说, 电流双倍而电压不变, 因此 $Z_c=Z_0/2$ 。

一条传输线可利用单端模式下的波量(Wave Quantities)及S参数来描述, 也可以差模及共模下的参数表示, 由于后者并非为单一操作模式, 所以其S参数称之为混

模(mixed-mode)参数。传输线不论以单端还是混模参数描述都是一样的, 而且两者之间可相互转换。

混模参数不仅用来表示传输线, 也可以用在线性电路的架构中, 图3的滤波器具有一个单端口(port 1)与一个平衡式端口(port 2)。

其混模矩阵为公式1所示:

$$S = \begin{bmatrix} S_{ss11} & S_{sd12} & S_{sc12} \\ S_{ds21} & S_{dd22} & S_{dc22} \\ S_{cs21} & S_{cd22} & S_{cc22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

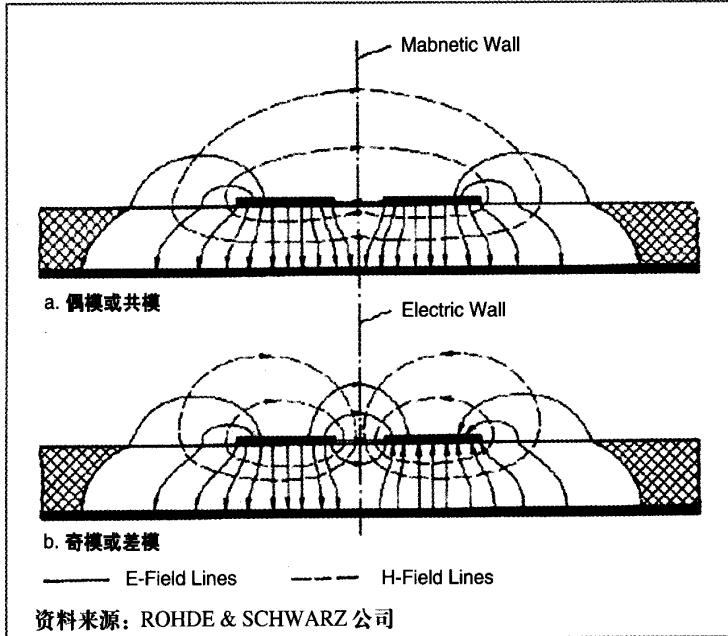
下标符号 $xyij$, x与y表示s(单端口), d(差模), c(共模), i与j表示端口的编号。x与i表示负载端的模式与编号, 而y与j表示信号源的模式与编号。当有超过一个单端口或平衡式端口时, 这些

参数可区分为9大区域, 如公式2所示:

$$S = \begin{bmatrix} S_{ssij} & S_{sdij} & S_{scij} \\ S_{dsij} & S_{ddij} & S_{dcij} \\ S_{csij} & S_{cdij} & S_{ccij} \end{bmatrix} \quad (2)$$

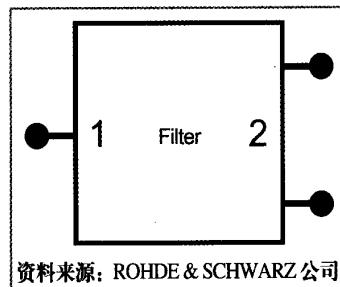
- ◆ S_{ssij} 代表所有单端口上的反射与入射参数
- ◆ S_{ddij} 代表所有平衡式端口上差模的反射与入射参数
- ◆ S_{ccij} 代表所有平衡式端口上共模的反射与入射参数
- ◆ S_{sdij} 代表所有自平衡式端口上差模输入在单端口输出的入射参数
- ◆ S_{dsij} 代表所有自单端口输入在平衡式端口上差模输出的入射参数
- ◆ S_{scij} 代表所有自平衡式端口上共模输入在单端口输出的入射参数
- ◆ S_{csij} 代表所有自单端口输入在平衡式端口上共模输出的入射参数
- ◆ S_{dcij} 代表所有自平衡式端口上共模输入, 在平衡式端口上差模输出的入射参数
- ◆ S_{cdij} 代表所有自平衡式端口上差模输入, 在平衡式端口上共模输出的入射参数

■ 图2 共面平衡式传输线电场、磁场的分布切面图



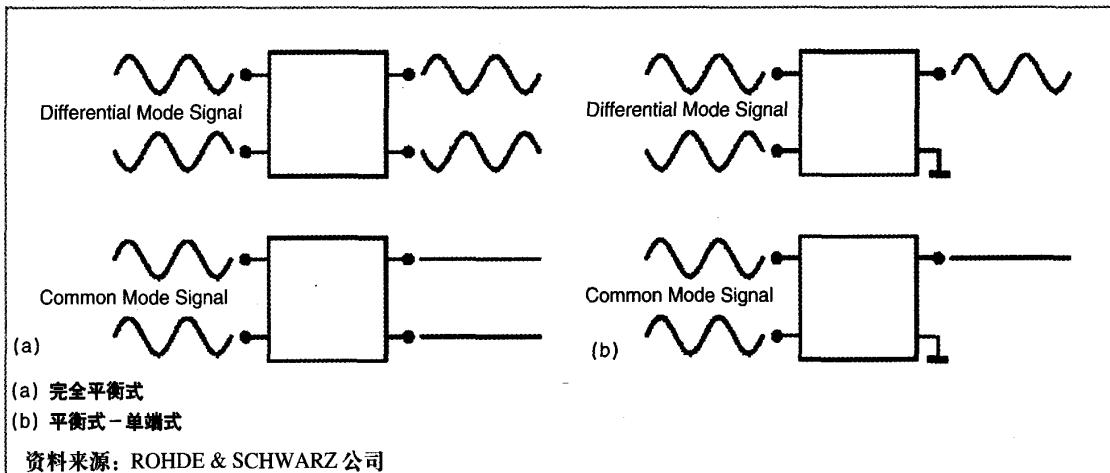
资料来源: ROHDE & SCHWARZ 公司

■ 图3 具有一个单端口与一个平衡式端口的滤波器



资料来源: ROHDE & SCHWARZ 公司

■ 图 4 理想的平衡式器件



理想的平衡式器件是操作在差模下，而且会排除所有共模信号。图4显示完全平衡式器件与平衡式—单端口器件的操作模式。对于理想的完全平衡式器件，公式(2)的S参数中非对角线区域皆为0，而理想的平衡式—单端式器件，其 S_{sd} 与 S_{ds} 区域的值不为0。

针对一些非理想特性来说，图3的滤波器是在操作频段内自单端口1传送至平衡式端口2读取差模信号，而这项特性以参数 S_{ds21} 表示。然而由于非理想性将

导致 S_{cs21} 项的产生，也就是由端口1传入的信号，部分会转换成共模信号由端口2传出。负载端将会接收或反射这些共模或差模信号（图5）。

在滤波器输出端产生二次反射后（并且共模信号经过模式转换后产生差模信号），这些反射信号将会干扰到传送的差模信号而影响滤波器的特性。由此可知，倘若无法将模式转换的影响降为0，则平衡式器件至少必须涉及到对于共模能够有好的匹配特性。而那些已经转换成一次共模信号并

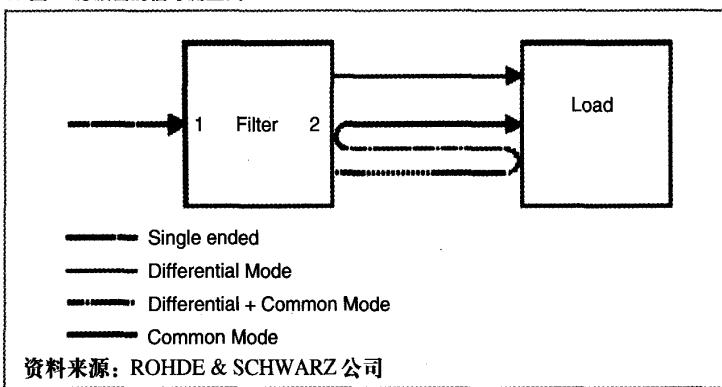
且维持共模类型的信号成分，并不会影响到传送信号的特性。但在端口1端接收到噪声时，这些信号会产生EMI。相反地，共模噪声会被接收并转成差模信号而降低噪声比（Signal to Noise）。

测量技术

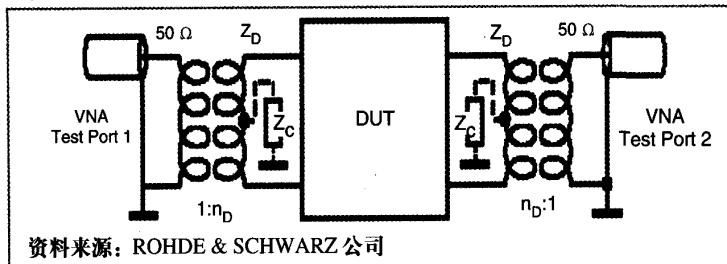
定义待测物的混模参数时需要测量仪器提供纯差模及纯共模的输入，再者，仪器的接收端必须分辨由待测物传回的差模及共模响应。因此，定义正确的参考平面与平衡式校正程序尤为重要。

商业经济型网络分析仪并无法达到这些需求，因其测试端口为非平衡式且同一时间仅有一个测试端口输出。这些测量上的限制可通过使用平衡—不平衡转换器（baluns）来解决。图6以简易的平衡—不平衡转换器搭配矢量网络分析仪来针对双端口待测物作差模信号测量。当差模下的特性阻抗为 Z_D 时，平衡—不平衡转

■ 图 5 滤波器的信号流量图

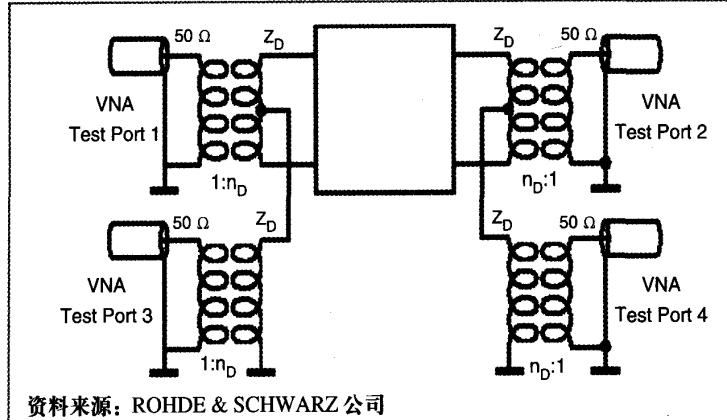


■ 图 6 以平衡—不平衡转换器测量双端口器件的差模特性



资料来源：ROHDE & SCHWARZ 公司

■ 图 7 平衡式器件的差模与共模特性测量



资料来源：ROHDE & SCHWARZ 公司

换器的转换比 n_D 为（公式 3）：

$$n_D = \sqrt{\frac{Z_D}{50\Omega}} \quad (3)$$

然而，这种测量方式也存在一些缺点：

- ◆ 待测物 S 参数的定义是以待测物平衡式端口为基准面，而校正平面在同轴端口，且测量结果包括待测物与平衡—不平衡转换器。假使平衡—不平衡转换器的特性并非理想加上额外的一些线长，将会严重影响到测量结果。由于平衡式校正标准不易定义，因此直接于平衡式端口作校正程序也不易实行。

- ◆ 在使用简易的 4 端口平衡—不平衡转换器时，共模下的负载阻抗为开路器件，由图 5 可知多次反射下将

严重影响测量的准确性。这种情形可通过在平衡—不平衡转换器与待测物间的缠绕线圈中置放一中央阀连接一共模特性阻抗为 Z_C 的器件至电线来解决（图 6）。

- ◆ 无法测量到共模与模式转换特性。
- ◆ 平衡—不平衡转换器的带宽限制在 1GHz 左右。

为了测量共模特性，可将共模转换器加入到图 6 电路中，如图 7 所示。

共模转换器是连接在差模平衡—不平衡转换器的中央阀上，因此可采用单端式测试端口矢量网络分析仪分别测量差模与共模信号。然而平衡—不平衡转换器的非理想性与限制带宽的缺点依然无法解决。

如前所提，以单端口特性描述待测物如同以混模特性描述，况且对于单端式多端口器件而言，测量仪器、配件、校正与测量技术是容易达到且定义的。

当单端式参数得到后，可通过模型分解技术（Modal Decomposition Technique）得到混模参数，基本采用以下两种不同方式：

- ◆ 将单端式 S 参数转换成单端式 Z 参数，由于单端式与混模式电压与电流间为线性关系，可将单端式电压电流关系式 $U=ZxI$ 替换为混模式电压电流，如此可得到混模 Z 参数，这些 Z 参数最后再转换为混模 S 参数。对于任意参考阻抗的单端口及平衡式端口而言，此项程序皆可适用。
- ◆ Bockelman 及 Eisenstadt 研究出单端式与混模式 S 参数间的直接转换关系，然而关于测试端口的阻抗仍有一些限制，若不符合条件，则必须采用另外的二次正规化方式来解决。

参考资料

1. D.E. Bockelman and W.R. Eisenstadt: Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters: Theory and Simulation, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.43, No.7, July 1995, pp.1530-1539
2. J.Simon: Measuring Balanced Components with Vector Network Analyzer ZVB, Rohde & Schwarz, Appl.Note 1EZ53_OE.

微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，推出多套微波射频以及天线设计培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表：<http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>

微波射频测量仪器操作培训课程合集



搞硬件、做射频，不会仪器操作怎么行！对于射频工程师和硬件工程师来说，日常电路设计调试工作中，经常需要使用各种测试仪器量测各种电信号来发现问题、解决问题。因此，熟悉各种测量仪器原理，正确地使用这些测试仪器，是微波射频工程师和硬件工程师必须具备和掌握的工作技能，该套射频仪器操作培训课程合集就可以帮助您快速熟悉掌握矢量网络分析仪、频谱仪、示波器等各种仪器的原理和使用操作…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/67.html>

矢量网络分析仪使用操作培训课程套装

矢量网络分析仪是最常用的测试仪器是射频工程师和天线设计工程师最常用的测试仪器；该套培训课程套装是国内最专业、实用和全面的矢量网络分析仪培训教程套装，包括安捷伦科技和罗德施瓦茨公司矢量网络分析仪的 5 套视频培训课程和一本矢网应用指南教材，能够帮助微波、射频工程师快速地熟悉掌握矢量网络分析仪使用操作…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/34.html>



示波器使用操作培训课程套装

示波器是硬件和射频工程师几乎在每天的工作中都会用到仪器，因此掌握示波器的原理并能够正确使用示波器是所有从事电子硬件电路设计和调试的工程师必须具备的最基本的技能。本站推出的示波器视频培训课程套装既有示波器的基本原理以及示波器性能参数对测量结果影响的讲解，也有安捷伦和泰克多种常用示波器的实际操作讲解，能够帮助您更加深入地理解手边常用的示波器从而更加正确地使用示波器…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rftest/osc/49.html>