的设备才能提供的功能。NI 通过与 Maury Microwave、Antevertamw（已被 Maury Microwave 合并）、福科斯微波和 Mesuro（已被福科斯微波合并）的解决方案合作来支持先进器件表征系统的开发。在开发这些负载牵引解决方案时，供应商将其专业技术与 NI PXI 硬件和 LabVIEW 等系统设计软件相结合，解决了许多耗时较长的问题以及微波功率放大器的负载牵引表征要求。

负载牵引表征是提高功率放大器效率的重要工具。由于时间和成本原因，供应商仅在设计时执行负载牵引。而现在，基于 PXI 的系统的快速和灵活性使得工程师也能够在设计验证和生产测试过程中验证功率放大器的性能（见图 4）。

LabVIEW 可重配置 I/O（RIO）架构是 NI PXI 平台的一部分，包含了多核 CPU 和 FPGA 等最新计算技术，同时提供了一种统一的开发方法与语言。Maury、福科斯及其收购的公司将各自独特的开发方法与该架构相结合，帮助客户简化了测试并缩短产品上市时间。

Maury Microwave（和 Anteverta）利用 NI PXI 的高速和宽带调制能力为开发、预制和生产测试期间的功率放大器表征提供了理想的解决方案。这些系统可实现宽带阻抗合成，这一功能在设计功率效率和线性放大器时的重要性日益显著。生成的大量测试数据可通过 NI LabVIEW（用于开发测试系统的图形化编程环境）进行管理。工程师可以将所有数据压缩到基于测量结果的行为模型，然后导入到 NI AWR 设计环境中进行电路设计。

借助最新的现货 NI PXI 硬件，福科斯（和 Mesuro）开发了一个快速负载牵引系统，采用“准闭环”方式来维持闭环有源负载牵引系统的速度，同时解决了限制其应用的固有稳定性问题。器件的输出信号进入循环器或耦合器后传递到 PXI 机箱。在 PXI 机箱中，信号经过下变频和调整来使系统达到所需的阻抗，然后经过上变频后返回到测试器件，以设置恒定阻抗。由于系统反馈，激励电平变化导致的器件输出变化将自动在反馈信号中得到补偿，从而实现了极其快速的阻抗调整及快速校准过程。

我们甚至可以使用无源调谐器和基于 PXI 的矢量信号收发器（VSG、VSA 和通用 FPGA 架构的组合）或者再加上 PXI SMU 来加速传统的源和负载牵引。LPLite 是由 NI 作为参考架构提供的开源 LabVIEW 应用程序，该程序使用两家负载牵引公司的无源调谐器来支持直观源和负载牵引应用。LPLite 将特性数据以 NI/AWR 可兼容的数据格式存储起来。该参考架构可轻松针对 ET 和 DPD 进行扩展，这一点也是受益于 PXI 的同步及速度。所有这些选项提供了一个灵活的系统来满足大部分工程师的需求。

通过交钥匙测量和建模系统满足上市时间要求

Addressing Time to Market with Turnkey Measurement and Modeling Systems

Steve Dudkiewicz, Maury 微波公司，美国加州安大略市

厂商的纵向整合使得他们需要在准确、稳健的器件建模以及多个产品层次（IC、裸片、封装等）的相应测量方面承担更大的责任。随着缩减产品上市时间成为企业的重要目标，能高效执行从元件到电路再到系统级的测量和建模以及器件表征的交钥匙解决方案变得越加重要。Maury 微波公司和 AMCAD 工程公司联手开发了一个交钥匙设计流程（见图 5）来解决这一需求，该流程包括测量以及提取、验证和优化紧凑模型和行为模型所需的仪器和软件，全部在一个直观

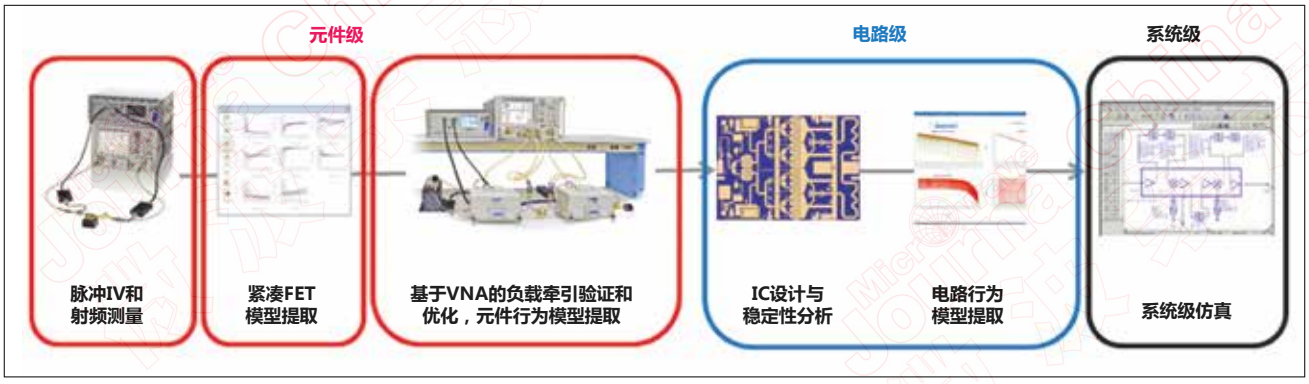

图 5. 提取元件级和电路级紧凑模型和特性模型的设计流程。

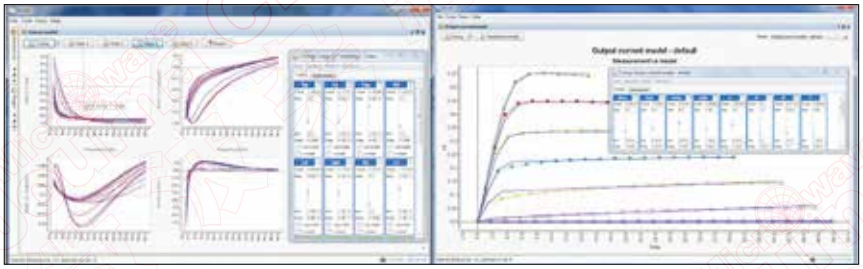

图 6. IVCAD 中的线性和非线性模型提取优化。

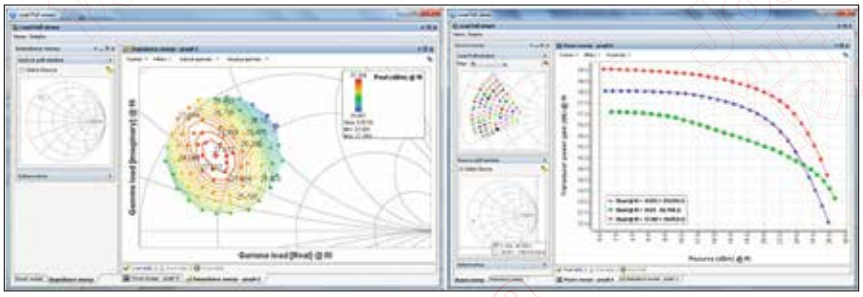

图 7. 非线性工作条件下的负载牵引等高线和增益压缩曲线。

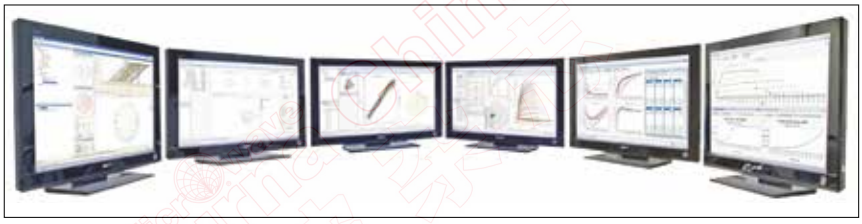

图 8. IVCD 测量和建模器件表征软件套件。

的软件平台上提供。

晶体管模型

要打造先进的晶体管综合工艺线，首先要做的是建立准确性高、可靠性高的晶体管紧凑模型。紧凑模型包括与线性、非线性、电热和陷阱效应等效电路模型相关的元素，使用 AMCAD BILT 脉冲 IV 系统、Keysight PNA-X 和 Maury IVCAD 软件套件从同步的脉冲 IV/S 参数测量中提取（见图 6）。线性紧凑模型使用 S 参数提取，用于确定外围寄生参数，而得到的数据可以用于进一步提取与频率无关的本征参数。

非线性模型提取使用脉冲 IV 测量来研究安全工作区内温度相关性能的影响和晶体管的击穿区。选择脉冲宽度和占空比用于保持恒温工作条件。脉冲 IV 测量用于提取当前二极管模型，同步脉冲 IV/S 参数用于提取非线性电容模型。

电热等效电路用于建立由器件温度和器件自热效应决定的晶体管性能模型。晶体管热电阻通过连续脉冲和短脉冲偏置条件之间的差异来提取。热电容使用更长的脉冲提取，它研究的是电流随时间的下降。热阻抗是由代表不同时间常数的几个热电阻和电容建模。

陷阱效应、表面俘获（surface trapping）（栅延迟）和缓冲陷阱（buffer-trapping）（漏极延迟）是由多个静态偏置点上的脉冲 IV 测量集建模。模型中专门选择静态偏置点，使得 IV 特性的差异可以完全归因于栅延迟或漏极延迟。

模型确认

继交钥匙紧凑模型提取流程之后，58 个电学等效参数将被自动确定，生成即时可用的 III-V 器件或 MOS 场效应紧凑晶体管模型。由于非线性紧凑晶体管模型是从线性 S 参数测量提取，需要采用非线性矢量接收机负载牵引技术（见图 7），在不同阻抗、功率压缩和偏置条件下测试非线性基波和谐波负载相关的特性，用于该模型的验证和修正。

矢量接收机负载牵引使用 VNA 测量不同频率下的 a 波和 b 波，由此单独精确计算的基波和谐波输入与输出功率。由于晶体管的大信号输入阻抗是实时测得，因此可以不受源匹配的影响，计算出晶体管实际的输入功率以及与其固有性能直接相关的工作功率增益和增益压缩特性。可以测得矢量参数（如 AM/PM 和顶降）及多音参数（如互调失真产物和截断点），并与仿真数据进行比较。

某些 VNA，如 Keysight 的 PNA-X，可用非线性 VNA 测量时域电压和电流波形。将测量值去嵌入到内在晶体管基准平面，可与仿真数据进行比较，用于完善和提升紧凑模型。

连续波和脉冲射频功率可以使用可编程信号源进行扫描，用于研究小信号到高度压缩工作条件下器件的性能。直流和脉冲偏置可以使用可编程电源或脉冲偏置（脉冲 IV）系统进行调整。阻抗可以使用 Maury 公司经 LXITM 认证的无源单谐波或多谐波自动阻抗调谐器、纯有源调谐环路或两者结合在基波和 / 或谐波频率下调整。非线性矢量接收机负载牵引可为建模的晶体管呈现实际非线性工作条件，在验证非线性模型时发挥重要作用，并在需要时可用于模型优化。

行为模型

一旦提取了非线性紧凑模型，或

紧凑模型不可用时，通常会采用元件级行为模型进行电路设计。行为模型不同于暴露晶体管工作原理的紧凑模型，它是一个“黑匣子”，以一组激励的行为反应为基础。非线性负载牵引测量数据可转换为不同的行为模型，包括是德科技的 X 参数与 AMCAD 增强 PHD（EPHD）。这些模型可用于快速仿真晶体管的行为响应，在电路设计和针对不同工作条件下的晶体管性能评测中非常有用。某些行为模型，如 AMCAD 多谐波 Volterra（MHV）模型，考虑到了低频和高频记忆效应，能使用宽带调制信号准确仿真 ACPR 和 EVM，在系统设计中非常有用。

放大器和 MMIC 设计人员经常会发现他们的设计中存在杂散振荡，而这只能在电路制成之后发现，因此导致设计多次返工。为了避免昂贵的重新设计，稳定性分析（STAN）是设计流程的一个重要步骤，稳定性分析可用于确定小信号和大信号工作条件下振荡的性质。根据零极点识别技术，振荡可理解为电路上多个节点的偏置、功率、阻抗和电路工艺公差的函数。在未经制造的情况下，可对使用最低数量稳定网络所避免的振荡与射频性能进行比较和适当的权衡，从而实现一次设计成功。

如果没有覆盖整个设计流程的单一软件平台，设计人员将面临诸多风险，如格式不相容、缺少测量数据和时间损失。IVCAD（见图 8）是一个单一软件套件，其中包括用于同步脉冲 IV 和脉冲 S 参数测量的模块、用于 III-V 器件或 MOS 场效应晶体管技术的紧凑晶体管模型提取、用于模型确认、优化和设计的无源 / 有源和混合有源基波和谐波负载牵引、多重行为模型提取技术以及微波电路的稳定性分析，同时还具有先进的可视化和数据分析功能，以及完整的脚本和自动化功能。IVCAD 测量、紧凑模型和行为模型文件格式与商用仿真工具兼容，便于从测量和模型到仿真的轻松过渡。

一体化测量和建模系统

All-in-One Measurement and Modeling Systems

Vince Mallette，福科斯微波公司，加拿大蒙特利尔市

当今的设计工程师正在寻找一种一体化系统。集成式非线性测量解决方案可以帮助设计者利用精确的线性脉冲 S- 参数生成紧凑模型。它们还可以执行所有所需的测量，从而通过谐波负载拉移测量数值的计算生成一个基于测量结果的强壮的行为模型。

在未来可预见的射频和微波功率器件的设计流程中，负载拉移测量将继续成为一个集成部分。收集丰富的负载拉移数据集可以缩短设计周期。去年年初，福科斯增加了 Auriga 微波公司的高功率脉冲 IV 测试组合方案和 Mesuro 公司的行为建模工具。

脉冲IV

根据设计师更喜爱的模型提取方法，有各种解决方案可以提供最终结果。脉冲 IV（电流 - 电压）测量已成为一种流行的捕捉有源设备的电流 - 电压特性的方法，这些设备包括场效应晶体管和双极结型晶体管。随着 GaN HEMT、LDMOS、SiC 和石墨烯等大功率设备的不断普及，电流和电压的要求也逐渐增加。

Auriga AU4850 是一种全功能表征平台，能够测量直流 IV 和脉冲 IV 曲线，可扩展到脉冲 S- 参数和脉冲负载拉移。通过 30 纳秒快速上升时间，可以在激活瞬间进行测量，以减轻通道、自加热和记忆效应。70 纳秒窄脉冲宽度使该系统非常适合于设备等温测试。先进的原位校准功能允许在 DUT 基准面进行校正并获得精度。

负载拉移

利用矢量接收机结构，可以采取多种配置进行基本和 / 或谐波负载拉移，包括使用内部 VNA 源或外部射频源和 PLL 接口。福科斯多用途的调谐器系列宽带谐波调谐器简化和减少了高度复杂的谐波负载拉移装置的费用。多用途的调谐器使用三种独立的宽带探头，在所有三类谐波频率上允许独立控制反射系数的振幅和相位。多用途的调谐器可以在基波及谐波频率上用来预匹配阻抗，采用有源系统达到斯密斯圆图的边缘时降低平均功率因素 10 dB 以及减少相应的费用。在具有一个基本注入源的高速有源设置中，多用途的调谐器还可以用于静态无源谐波调谐。以这种方式配置的有源谐波负载牵引装置分为

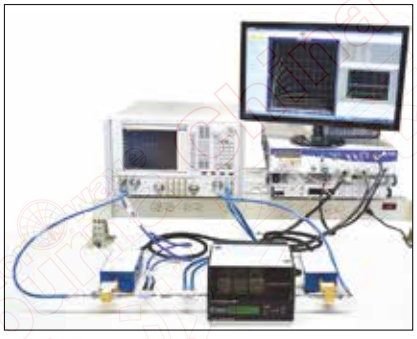

图 9. Auriga AU4850 高功率脉冲 IV 和 MPT-5080 8~50 GHz 多谐波调谐器。它们通过福科斯和 Mesuro 设备表征软件驱动。