

解决方案

借助MEMS开关在AI驱动的高带宽内存和GPU中实现环回测试

随着人工智能与高速计算技术飞速发展，HBM高带宽内存、GPU图形处理器的信号传输速率持续攀升，高速接口带宽也随之不断扩容，这对这类芯片测试的信号完整性、测试密度及测试效率提出了更高要求。环回测试作为核验高速芯片通道性能、保障设备稳定运行的核心方式，重要性愈发凸显。

传统测试方案主要依托机械继电器与常规射频开关，普遍存在体积偏大、带宽不足、信号损耗高、使用寿命短、集成能力弱等问题，无法适配新一代高频、高密度、高精度的测试场景。而MEMS开关凭借体积小、频带宽、插入损耗低、可靠性强、易实现多通道集成等核心优势，能同时完成直流参数测试与高速信号环回测试，有效提升自动测试设备的测试能力。

体积微小的MEMS开关，凭借出众性能重构高速信号路由体系。在HBM、GPU等前沿芯片的测试架构中，MEMS开关可同时支持直流参数与高速环回两类测试，有效提升测试覆盖范围。本文将围绕高速环回测试对AI算力系统带来的改变展开深度解析，同时介绍ADI MEMS开关的技术背景、发展布局、产品矩阵、核心价值及典型应用场景。

ADI MEMS开关技术背景和发展规划

图1为某款MEMS开关剖面结构示意图。图示左侧为高压栅极控制器，右侧为MEMS裸片，二者集成后采用标准层压封装工艺，形成一款结构紧凑、性能稳固的产品。该产品的MEMS裸片、高压控制器及晶圆级封盖工序，均在ADI爱尔兰利默里克工厂完成。这座厂区是ADI规模最大的生产基地之一，拥有45000平方英尺的1级洁净车间，在公司整体产能与营收体系中占据核心战略地位。

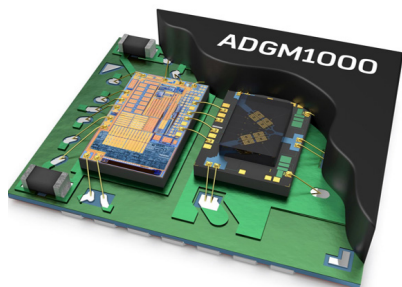


图1: ADI MEMS开关的剖视图

MEMS裸片基于硅基半导体工艺制备，依托成熟、高精度且具备规模化拓展能力的制造技术，不仅让器件拥有优异的灵敏度、可重复性，还可与各类集成电子元器件良好兼容。该工艺能够实现精密的尺寸管控，同时支撑高性价比的大批量量产。在集成无源器件(IPD)产线中，MEMS裸片需要进行封盖处理，通过气密性封装将MEMS裸片有效封装在受控的保护腔内，可隔绝污染物与外界环境干扰，有效保护精密的MEMS结构，保障产品始终维持最佳工作性能，并具备长期运行可靠性。

ADI针对全制造流程建立严苛管控体系，保障产品品质与性能高度一致。该生产基地同步配套专业可靠性测试实验室，所有器件量产前均需完成全项严苛检测，确保产品满足顶级质量与可靠性要求，同时构筑可持续、抗风险的供应链体系。

此外，设计、应用、测试及产品支持团队均布局于厂区周边。地理区位的协同优势，推动各职能部门高效联动，大幅提升问题处理、技术创新与客户响应效率。这套一体化运营模式实现了制造、设计与技术支持的深度融合，有效缩短产品开发周期、夯实产品品质，持续优化客户服务体验。

产品开发技术演进

图2展示了ADI两代MEMS梁式开关技术，分别为第一代悬臂梁结构与第二代主动式开梁结构。

1. 第一代：悬臂梁结构

该架构为经典悬臂梁设计，其一端以铰链为支点进行转动，作为单刀单掷(SPSD)器件具有一个输出和一个输入，如图2左侧所示。图中左上角为悬臂梁的三维渲染图，右下角为对应的扫描电镜图像，左下角为横截面视图，以金色突出显示，其上的灰色部分是气密性密封，用以保护MEMS梁免受任何污染物的影响。

向图中红色标识的栅极施加高压后，静电力驱动梁向下拉动使电路闭合，因此输入与输出连接。当移除电压后，梁的弹簧力会使其恢复到开路位置，电路随之断开。该结构方案成熟稳定，但仅可实现基础通断切换功能。

2. 第二代：主动式开放梁结构

针对行业对更高通道密度和更强路由灵活性的需求，ADI推出了第二代MEMS开关技术——主动式开放梁结构。该器件有一个输入和两个输出，为单刀双掷(SPDT)架构，在同等小型化尺寸下，可实现更为复杂的多路信号路由。

第二代产品同样采用高压栅极驱动方案，其专属优化的开放梁结构具备更优异的可靠性与耐久性能，有效改善了高密度应用场景下长期工作产生的机械磨损问题。

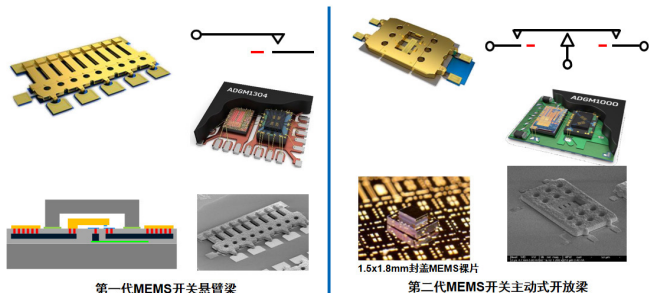


图2: ADI MEMS开关第一代与第二代技术对比

两代产品都具备MEMS的核心优势，具备**极低插入损耗、高隔离度、高精度的开关性能**。产品结构由初代悬臂梁迭代为主动式开放梁后，应用场景显著拓宽、使用寿命有效提升，可适配现代复杂电子系统，充分满足客户对设备灵活性与高通道密度的应用要求。

MEMS开关发展历程

ADI的产品技术演进按照如下几个历程进行：

1. 第一代悬臂梁构架（2022年之前），ADI率先完成第一代悬臂梁工艺技术研发并推出ADGM1004，这是一款工作频率达14 GHz

的单刀四掷(SP4T) MEMS射频开关。在此基础上，ADI进一步推出衍生产品ADGM1304，射频通道静电防护(ESD)等级提升至5 kV。对于要求更严苛的测试环境而言，更强的鲁棒性是产品真正的优势。

2. 第二代主动式开放梁架构（2023-2024年）：ADI推出基于第二代主动式开放梁技术的产品系列，全面升级器件性能与应用灵活性。其中ADGM1001为当前业内带宽表现领先的MEMS开关，工作带宽覆盖直流至34 GHz。同期上市的产品还包括单刀四掷开关ADGM1144，以及ADI首款双刀双掷(DPDT) MEMS开关ADGM1121。全系产品均采用5 mm×4 mm紧凑型封装，可有效缩减PCB占用面积，帮助客户优化硬件布局。
3. 第三代小型化迭代（2026年研发规划）：2026年，产品研发重心聚焦封装尺寸优化，新一代产品将升级为3 mm×3 mm超小型封装，它有助于客户实现更高的通道密度和效率而不影响电气与RF性能。计划于本年度末正式发布的ADGM3144与ADGM3121，集中体现了产品在小型化设计、智能化集成领域的技术突破。与此同时，产品研发同步面向高速应用场景，重点适配新一代高速传输速率与主流测试总线标准，涵盖MIPI、PCIe等协议。目前多款差异化定制开关正处于研发阶段，包含20 GHz、PCIe 6.0、高阶MIPI等配置方案，可为大吞吐量新一代硬件平台提供优异的信号完整性与带宽支撑。
4. 面向未来，ADI将持续深耕互连架构与信号链路优化，依托差分DPDT解决方案，发力研发支持40GHz、60GHz带宽的新一代器件。该技术路线可完美适配下一代PCIe 6.0、PCIe 7.0等主流标准，实现64 Gb/s及以上的超高信号传输速率。依托上述技术能力，ADI MEMS开关可充分满足未来测试测量领域对传输速率、隔离度及应用灵活性的高阶需求。

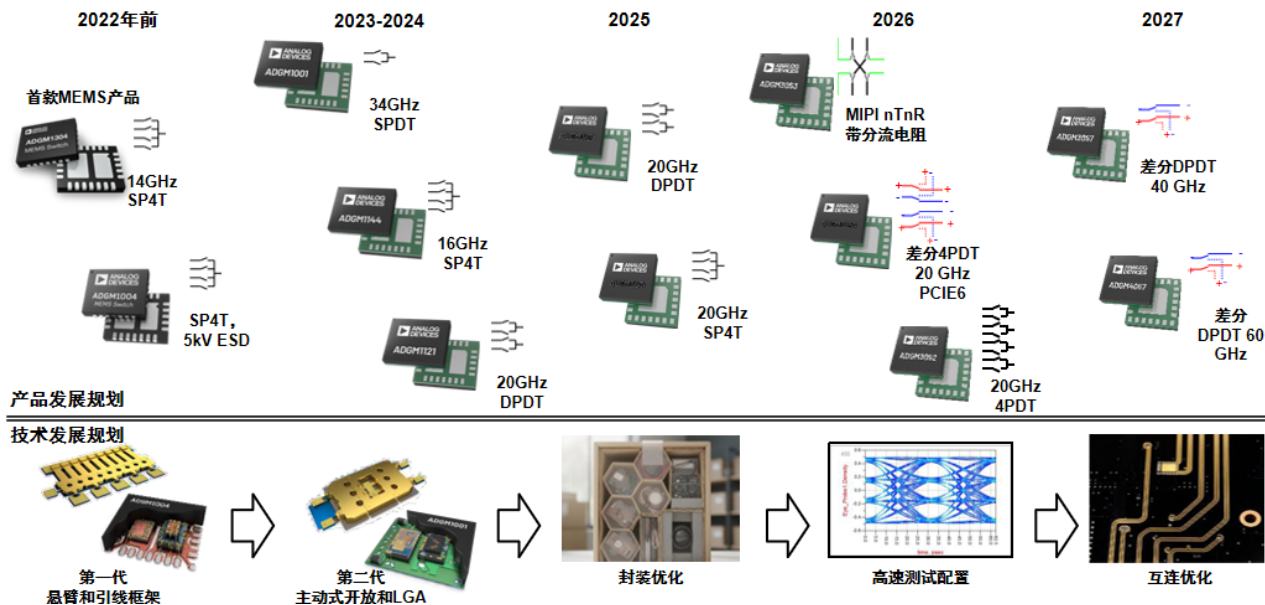


图3: MEMS开关发展历程

MEMS开关设计亮点

1. 小型化设计

微型化封装优化是MEMS开关设计的核心创新方向之一。依托器件小型化迭代与先进架构设计，产品封装尺寸实现显著缩减。上一代产品ADGM1121和ADGM1144采用5mm×4mm LGA封装，高度1mm。新一代ADGM3121和ADGM3144则将尺寸缩小到3mm×3mm，高度小幅增加至1.5mm。相较前代产品，新款器件封装面积缩减55%，具体尺寸对比详见图4。

值得强调的是，尽管尺寸缩小但新款器件仍具备与前代产品相同的集成高压驱动电路，功能与性能保持均保持不变。该设计大幅提高电路板密度，支持更高吞吐量，可在给定面积内布置更多开关。从量产制造角度来看，更小的封装可实现单批次更多器件的同步测试，有效提升测试效率、缩短生产时间。

全系产品均采用标准层压LGA/LFCSP封装工艺制造，具备诸多实用优势。该封装方案支持无源器件内置集成，不仅简化电路板布局，还可进一步提升整体电气性能；同时器件兼容行业标准表贴焊接工艺，确保组装过程简单、工艺一致且可靠性优异，可在任何制造环境中都能轻松部署。

综上，封装面积缩小55%的升级，提高了设计灵活性和量产制造效率，可充分满足终端客户的应用预期。

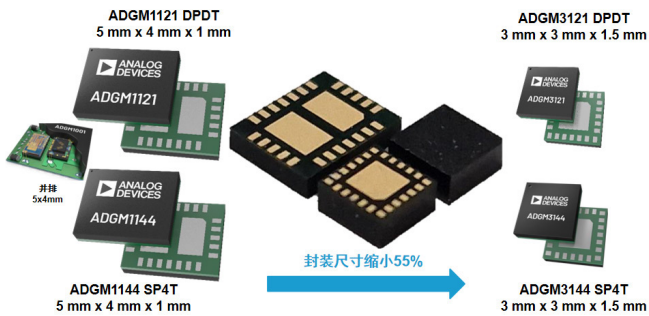


图4：微型设计尺寸显著缩小，幅度达55%

2. 极简供电

图5是MEMS开关的典型工作电路，左侧采用5×4mm封装，右侧为3×3mm封装供电方案简洁，仅需单路+3.3V电源。无需配置大尺寸的片外高压电路，器件内部集成+80V高压电荷泵，可自主生成驱动MEMS悬臂梁所需的栅极高压，有效简化终端客户电路板设计，省去额外复杂供电线路，目前该内置80V电源的MEMS开关产品已得到主流客户的广泛应用，大幅降低产品设计与集成难度。

此外，针对电荷泵模块内置的10MHz振荡器，若其对整机功能或噪声性能造成影响，可关断电荷泵模块，切换为外部电源供电模式。

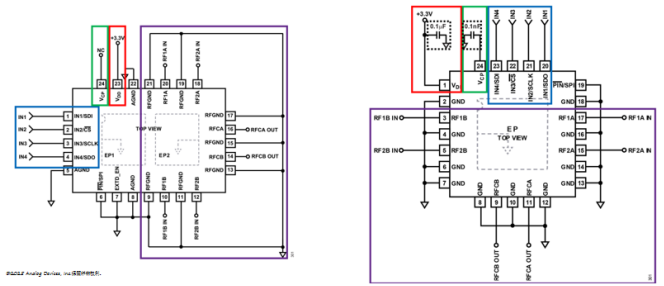


图5：极简供电与集成控制器驱动器

3. 集成控制器驱动器

集成控制器驱动单元支持并行和SPI编程接口，接口适配性优异，可与各类主控器件无缝对接，有效简化软硬件设计与开发工作。针对多通道应用需求，产品支持菊花链拓扑架构，可实现多器件级联。级联后所有MEMS开关可由单一接口统一控制，不仅简化布线设计、提升系统扩展能力，同时不会增加整体设计复杂性。

此外，数字驱动引脚单侧布局，进一步优化电路板布局难度。如图5框图所示，RF区域经过专项布局优化，远离数字和模拟控制器模块。该隔离设计可强化电气隔离效果，有效降低数字噪声向射频通路的耦合干扰，保障射频信号完整性，提升器件综合性能，在低噪声、高保真度的应用场景中优势尤为突出。

对于3mm×3mm小型封装版本，外围仅需配置常规去耦电容，用于适配3.3V供电引脚与80V VCP电荷泵电源引脚。该类电容可实现电源稳压与噪声滤除，保障器件在简洁布局下稳定工作。

通过以上特性，可以明显看到MEMS开关外围配置少，能够轻松、可靠地集成到任何系统中。

MEMS开关产品介绍

ADGM1304、ADGM1004：两款产品是基于第一代悬臂梁技术的MEMS开关，采用5mm×4mm LFCSP封装，属于SP4D开关。产品工作频率范围是直流至14GHz，宽频覆盖出色。器件具有极低的插入损耗，6GHz频率下约为-0.4dB，最大导通电阻仅2.9Ω，可高效应用于RF及精密切换场景。两款器件均支持±6V直流工作电压。其中ADGM1004进一步强化了静电防护能力，RF端口HBM静电防护等级可达5kV，在复杂严苛的工况环境下具备更高的运行稳定性。

ADGM100X系列：该系列是采用第二代主动开放梁技术的SPDT开关，工作频率范围DC~34GHz，可满足广泛的高频应用需求。该系列所有器件的插入损耗都很低，回波损耗指标也很出色。器件使用寿命由悬臂梁结构的7.2年延长至主动开放梁的10年。此系列器件统一采用5mm×4mm LGA紧凑封装，适合空间受限的高性能RF与混合信号设计。系列产品包括ADGM1001、ADGM1002、ADGM1003，可匹配多样化系统需求，同时具备快速开关与高可靠性，充分满足行业对MEMS射频器件的技术与品质要求。

ADGM1144: 基于先进主动开放梁技术的SP4D开关，其RF指标与第一代悬臂梁技术的SP4D开关基本持平。

ADGM1121: 作为首款DPDT开关产品，支持高达64Gbps超高速PAM4信号，可保障优异的信号完整性。器件针对下一代高带宽测试、通信应用进行了优化，兼具出色的RF性能与可靠的电气特性，支持极高的数据速率。

ADGM3121: 为ADGM1121的更小尺寸版本，具备和ADGM1121开关相同的强大性能与功能但尺寸更小，适用于更紧凑的系统设计。ADGM3121采用3mm×3mm LGA封装，计划在今年年底前发布，目前已提供最终样片。此产品具备客户所期望的高频性能与可靠性，而且采用更小的封装，以支持先进的微型化测试与通信平台。

ADGM3144: 为ADGM1144紧凑型升级版本，这款紧凑型SP4T开关采用相同的MEMS开关技术，支持DC~18GHz超宽带宽，具有低插入损耗、高隔离度。器件采用3mm×3mm小尺寸封装，非常适合于空间有限的RF和精密设备开关应用。产品兼具高性能与微型化特点，能满足对频率和信号完整性要求苛刻的现代测试系统与通信设备需求。预计今年年底发布，已提供最终样片。

MEMS开关客户价值定位

ADI将客户价值定位概况为三大核心支柱，分别为**功能、容量与一致性**，图6形象化的显示了三大价值定位。三大核心支柱相辅相成，共同构建起ADI MEMS开关技术的核心竞争优势，为行业高端测试与通信应用提供坚实技术支撑。

功能: ADI的解决方案旨在满足并超越现行行业严苛技术指标，支持PCIe Gen5、Gen6等下一代行业需求。方案可充分应对先进接口对更高带宽、功率水平和信号完整性的挑战，帮助客户产品适配未来极为苛刻的连接和数据中心环境。

容量: MEMS开关完成微型化迭代后，系统可实现更高的测试效率。封装尺寸更小使得电路板上可以布置更多器件，同时更多测试插槽可增加生产测试通道，适配先进集成电路和单次插入测试。面对复杂的高通道数应用，可以实现更高的容量与并行处理能力。

一致性: 本质上是可靠性与可拓展性。晶圆级MEMS制造技术简化了批量处理流程，能够在数百万次循环中确保一致的性能和可靠性。凭借稳定的测试结果和长久的使用寿命，客户能够实现可扩展的部署和产线自动化批量测试，保障长期稳定的现场使用。

ADI的MEMS开关技术通过这三大支柱解锁客户价值，包括面向未来标准超大的吞吐量、可扩展性和容量还有始终如一的制造一致性和现场可靠性。

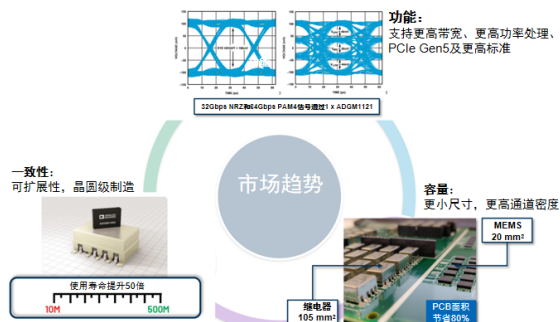


图6: 价值定位：功能、容量与一致性

MEMS开关解决方案的优势

1. 单次插入测试

负载板是 ATE 测试系统里的关键硬件平台，广泛用于集成电路、HBM、GPU等芯片的全面功能验证与电气参数检测。引入MEMS开关后，可实现单次插卡即可完成全面的功能与参数验证。借助于统一的负载板配置完成高频数字性能测试与高精度直流参数测量。

MEMS开关能够出色地处理各种信号，从纯直流DC信号到数Gbps的高频信号，他们是这种多功能应用的理想之选。目前市面上尚无其他开关器件，具有真正的DC处理能力和高达346GHz的高频运行能力。其他常见开关技术如簧继电器或同轴开关，往往只能在DC功能与高频操作之间二选一，难以在如此宽的带宽内兼顾两者。

图7左侧所示为SPDT开关，其公共端口连接到被测器件(DUT)，第一个触点连接到参数测量单元(PMU)，进行高精度DC参数的测试，实现对电流和电压特性的精准控制与测量。另一触点既可以环回到DUT，也可以连接到ATE中的高速通道，从而以支持的最快数据速率进行性能评估。

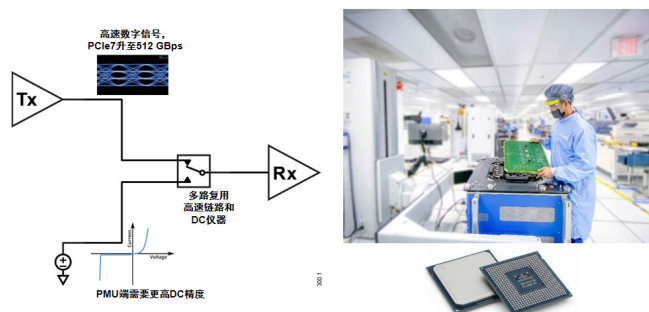


图7: MEMS开关在ATE中的单次插入测试

基于MEMS开关的单次插入测试能够简化工作流程，提高整体测试吞吐量，并确保客户高效可靠的满足先进IC、HBM和GPU验证的严格要求。

2. 较高吞吐量和较短的环回路径

如前所述，在目前的发展规划中正积极推进封装迭代，将尺寸从5×4mm缩小到3×3mm，以支持密度更高的测试解决方案。

图8左侧为传统的大体积继电器，该类器件受限于技术形态，仅支持三个被测器件并行测试，若要处理PCIe4高达8GHz的RF带宽场景，图8右侧的MEMS开关方案，凭借极致小型化的结构设计，大幅提升测试密度，可支持12路DUT同步并行测试，相比传统方案能力提升显著。

除测试吞吐量外，微型化MEMS开关的关键优势在于能够保持较短的环回路径。在高速功能测试场景中，信号路径越短，损耗越少，信号完整性越优异。这一特性对于验证先进移动处理器至关重要，既能有效提升整体测试吞吐效率，也强化了系统综合性能。该设计不仅帮助客户最大化利用每一个测试周期，同时也适合负载板未来的设计规范与行业最优实践。

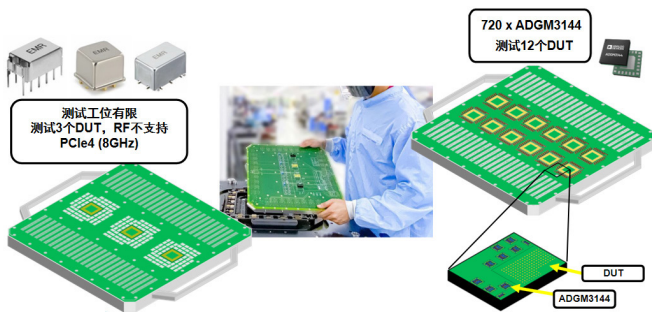


图8: 测试移动处理器的平面规划示例

3. 微型化设计

图9左侧展示了ADI主动式开放式MEMS梁结构，图中辅以沙粒与盐粒作为尺寸参照。可见该开关器件体积十分微小，尺寸与日常可见的微小颗粒物相近，同时具备优异的高速环回测试性能，是当前AI架构下HBM及GPU系统测试的关键支撑器件。这一微型化结构充分诠释了微缩科技，赋能全域的技术价值：凭借极小的物理尺寸，可在测试基板上实现高密度集成，全面支撑高端处理器的高阶测试需求。

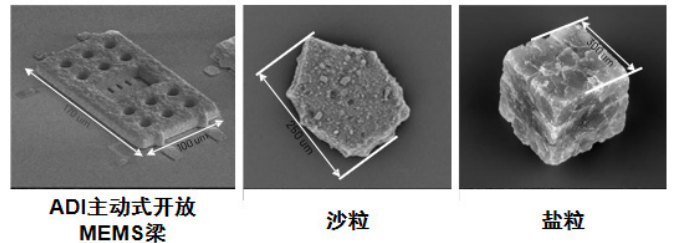


图9: 微型科技，巨大影响

与此同时，微型化MEMS梁架构能够在超小型封装内提升通道密度与可扩展能力，帮助研发人员能够充分利用电路板空间，在单位面积内集成更多测试链路及信号通道。器件小型化进一步提升了系统灵活性，可满足先进AI、GPU平台不断升级的应用需求。依托此项MEMS创新技术，业界得以在不占用有限板卡面积的前提下，落地高性能先进测试方案，充分显示了MEMS技术的核心竞争力。

MEMS开关应用

MEMS开关拥有丰富的典型应用场景，涵盖单次插入测试，高速信号切换、切换对称/非对称TX/RX切换、信号路径传输延迟校准及开关矩阵应用等。

1. 单次插入测试

该方案可实现ATE负载与探针板系统的环回和直流测试。图10为DPDT ADGM1121在单次插入测试中的应用示意。左侧电路通过拨动开关，将DUT的发射器或TX端口接回其自身的接收器或RX端口，其中DUT能够接收并解码其发送的内容。受益于ADGM1121优异的带宽性能，该链路可处理高达64GHz的高速信号。右侧的开关配置用于直流参数测试，将DUT的TX与RX端口均连接至ATE，这种连接使得客户能够执行，完成包括漏电流、VOH或VOL电平测量等重要的参数测试。

凭借可兼容直流与高频信号的特性，MEMS开关已成为当前HBM、GPU测试系统中环回测试环节的核心器件。

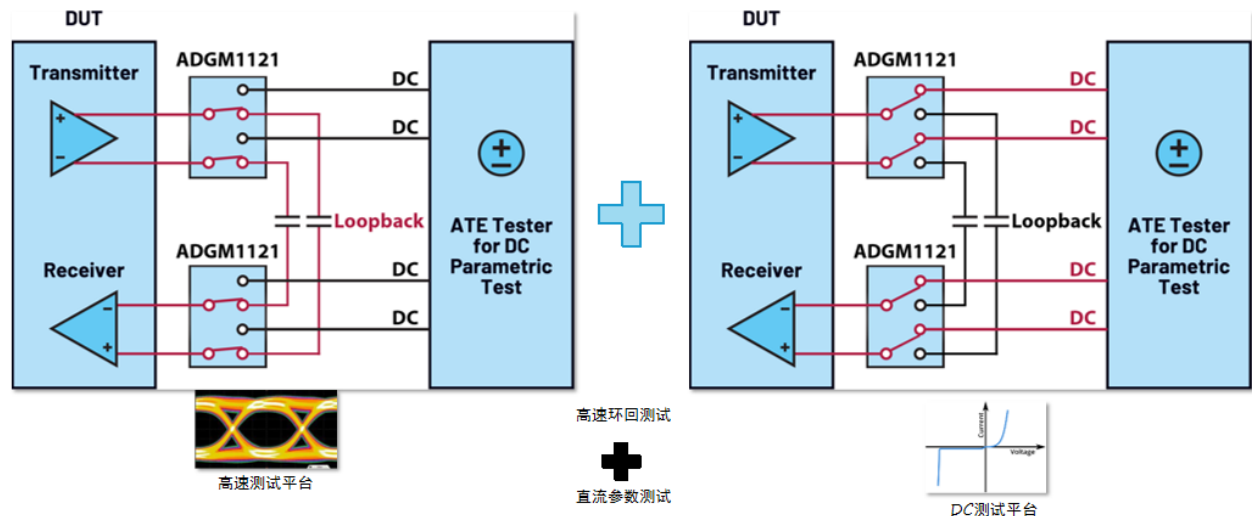


图10: 使用ADGM1121进行环回和DC参数测试应用示例

2. 高速数字信号和参数测量单元(PMU)信号切换

MEMS开关具备直流与高频路由能力的多功能特性。设备可将引脚电子的四通道高速路径被直接驱动到DUT的RX端口，实现精密功能和性能验证；或将这些RX端口重新路由至独立的四通道PMU端口，完成漏电流、阈值、电压电平关键直流参数检测。这些全部测试流程均可通过同一套灵活的硬件设置来完成。

除ADGM1121外，AGGM1001、AGGM1002、AGGM1003及全新ADGM3121等多款同系列MEMS开关，同样支持引脚电子与PMU信号的多通道切换应用。依托该系列产品，用户可结合通道数量、测试板布局及性能指标，灵活定制解决方案。

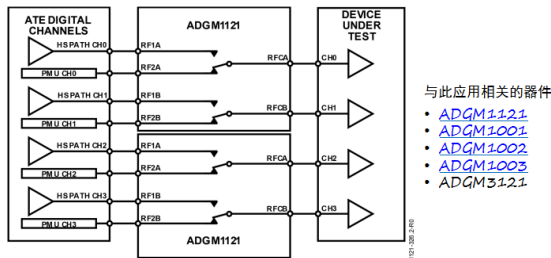


图11: 引脚电子产品和PMU信号切换

3. 高速MIPI/PCIe切换

图12展示了主机差分对通过MEMS开关路由至两个独立MIPI模块（A和B）的典型配置。主机处理器的差分TX/RX信号经切换后分别连接至模块A或模块B，该架构广泛应用于对通信速率与可靠性要求较高的系统，充分体现了MEMS开关技术在差分信号路由中的灵活性。

除ADGM1121外，图12亦列出若干替代器件，客户可根据具体的高速路由需求进行选型。

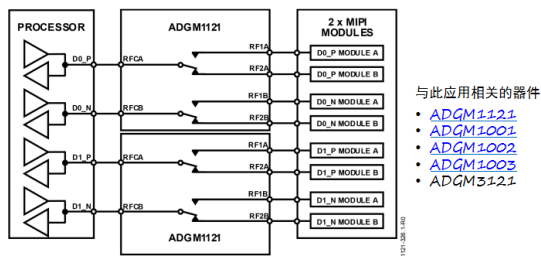


图12: 高速MIPI/PCIe切换

4. 非对称TX/RX切换

ADGM1144采用标准SP4D配置，如图13所示，左侧单个DSI（显示器串行接口）TX端口可动态路由至任意一个CSI（摄像头串行接口）RX通道，充分满足多路径信号测试的灵活性需求。开关的第四掷（TRO）用于PMU（探针单元模块）信号引出，可将DSI TX信号旁路至PMU通道，从而实现对DSI发射器线路的精密直流功能测试，无需更改硬件配置。

用户可根据项目具体的技术指标与设计要，从图13所列替代器件中选择合适型号

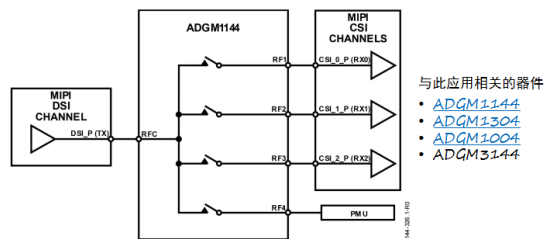


图13: 非对称切换

5. 对称TX/RX切换

图14展示了支持PMU信号引出的对称Tx/Rx切换方案。该配置采用两个SP4T MEMS开关以背靠背实现三个DSI-TX端口的任意组合进行全面的双向测试与信号追踪。同前所述，每个SP4D开关的四TRO用于PMU信号引出，通过集成化电路板设计来提供在所有6个信号通道（包括发射和接收通道）上的直流参数测试。

可选替代器件包括ADGM1144、ADGM1304、ADGM1004及ADGM3144，用户可根据具体硬件架构与测试需求灵活选型。

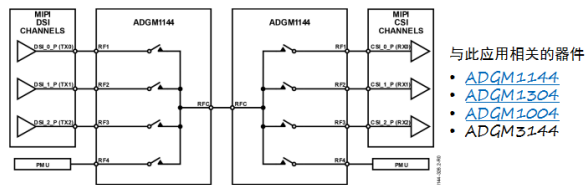


图14: 对称切换

6. 信号传输路径延迟校准

图15展示了利用匹配校准路径消除PCB传输线延迟的原理。校准路径从MEMS开关直接路由回ATE数字通道，其物理长度与开关至DUT的实际信号路径严格匹配。

实际工作原理：假设用户想要向DUT发送一个信号，该信号在30ps时准时变为高电平。当该信号通过校准路径后，于数字卡上在40ps时刻检测到电平转换，那么测得时间延迟为10ps。据此，意味着信号通过所选路径时会有10ps的传输延迟。通过使用匹配的校准路径，工程师可准确测量并补偿信号传输延迟，从而为高级测试应用提供高精度时序分析和校准。ADGM1121开关被配置为处在连接到DUT的信号路径上，根据之前的校准程序，用户知道信号发送和接收之间存在10ps的延迟。

如果客户希望DUT端信号在20ps时刻变为高电平，用户可以对之前测得的延迟进行补偿，将数字通道的信号设置为在10ps时变为高电平，DUT则会在大约20ps时看到信号变为高电平。

实现这种精准校准的关键在于ADGM1121的差分通道匹配特性，其典型值约4ps。这种闭合通道匹配技术，确保了校准技术能够成功且可靠地应用于高性能测试设置。

同样图15右上角列出了可替代器件，供客户根据具体需求选型。

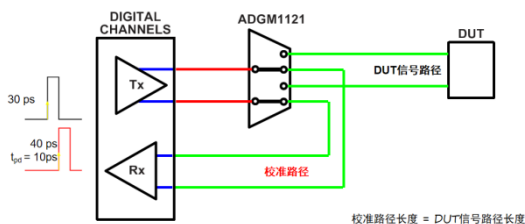


图15: 信号传输路径延迟校准

7. 开关矩阵应用

图16展示了BAM开关的典型应用场景，涵盖常规射频路由、混合信号切换、分压网络切换或滤波器网络切换。BAM开关凭借其宽频带、低插损及高线性度特性，尤其在5G网络、基站与网络设备关键市场中极具价值。

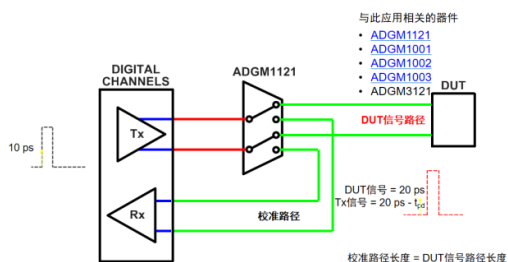


图16: 开关矩阵应用

ADI MEMS开关相关资料

为了探索和充分利用ADI MEMS开关技术，ADI提供了众多技术资源和学习机会，通过以下链接，产品主页，在线学习课程帮助您加深理解，更好地利用MEMS开关提高测试效率。对于寻求深度技术支持的工程师，ADI中文技术论坛和MEMS常见问题解答页面是交流和了解更多信息的绝佳空间。

- MEMS开关技术主页: analog.com/cn/memsswitch
- 产品主页 (包括数据手册、评估板和s-参数模型):
 - www.analog.com/cn/adgm1121
 - www.analog.com/cn/adgm1144
- 视频:
 - ADGM1144: 具有ADP7142线性稳压器的0Hz/DC至18 GHz、SP4T、MEMS开关
 - IMS2023: 利用MEMS开关改进高速测试
 - MEMS开关提高测试能力和系统生产力
- 产品聚焦:
 - 集成驱动器的直流至毫米波MEMS开关
- 在线学习课程: 利用MEMS开关提升测试生产力
- ADI中文技术论坛:
 - ez.analog.com/switches_multiplexers
 - MEMS开关常见问题解答

结束语

ADI MEMS开关凭借行业领先的技术实力、可靠的解决方案及快速交付能力，为客户提供稳健且可持续的供应链保障。依托丰富的产品组合与广泛的场景适配能力，ADI MEMS开关持续满足电子系统微型化、高集成化及性能升级的市场需求，赢得广泛认可。

访问我们的在线技术支持社区，与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

ez.analog.com/cn

ADI EngineerZone™
中文技术论坛

ANALOG DEVICES
超越一切可能™

analog.com/cn

有关地区总部、销售和代理商的信息，或客户服务和技术支持的联系信息，请访问analog.com/cn/contact。
©2026 Analog Devices, Inc.保留所有权利。商标和注册商标属各自所有人所有。