

干簧继电器在自动化测试设备中的应用

自动化测试设备(ATE)在全球范围内用于测试半导体芯片、组装的印刷电路板、手机等电子设备、电缆组件等。ATE通过程序来控制继电器开关,用以控制被测设备(DUT)引脚的多通道测试信号的发送或接收,包含了数字和模拟信号,有时单一ATE设备需要数千个继电器才能完成其功能。

由Coto Technology 制造的干簧继电器(可从中国代理商成都迈极芯科技有限公司采购)具有极高的关断电阻和极低的导通电阻,完全适合ATE需求的电气特性。当关闭时,它们的电阻可能是一百万兆欧或更大;当打开时,它们的电阻可能低于100 mΩ。因为它们体积小,速度快,可靠性高,多年来一直是世界上许多ATE制造商的选择。



1 介绍

自动化测试设备(ATE)在全球范围内用于测试半导体芯片、组装的印刷电路板、手机等电子设备、电缆组件等。ATE通过程序来控制继电器的开关,在多个通道间收发数字或模拟信号到被测器件(DUT)的引脚,以此测试器件的各项指标参数,有时单一ATE机台需要数千个继电器才能完成其功能。

电子设备变得越来越小,速度越来越快,这意味着测试信号的运行频率将不断拉升。而且设备的引脚数呈指数级增长,这意味着向DUT发送和接收信号测试卡(通常称为测试负载板)变得越来越拥挤。因此,从实用性来考虑,继电器必须很小,而且它们必须在GHz范围内以最小的损耗或失真传输高频信号。最重要的是,继电器必须可靠性很高,因为一个ATE系统具有数千个继电器,如果一个继电器失效,整个ATE系统都会停止工作。ATE经常全天候运行,运行成本超过3美元/分钟,任何的停机时间都是成本极高的。

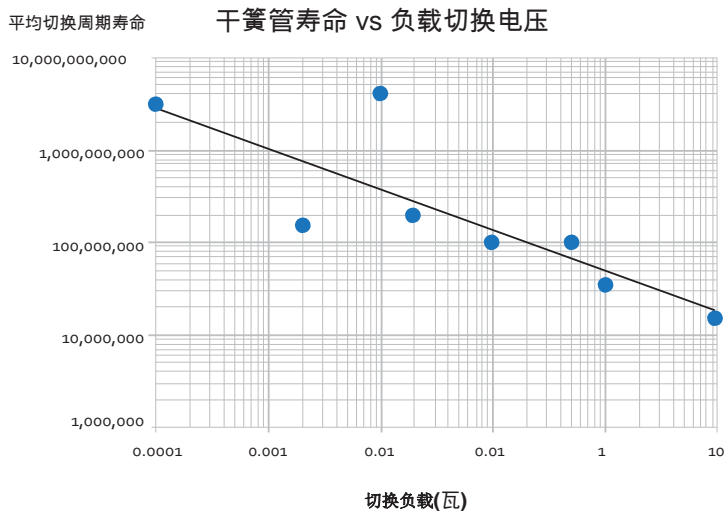


图1:干簧管触点寿命 vs 切换电压

由Coto Technology制造的干簧继电器(可从中国代理商成都迈极芯科技有限公司购买)它们具有极高的关断电阻和极低的导通电阻,完全适合ATE设备电气特性的需求。当关闭时,它们的电阻可能是一百万兆欧或更多。当打开时它们的电阻可能低于100 mΩ。

2 干簧继电器的高可靠性

让我们首先讨论干簧继电器的可靠性问题。有时干簧继电器被不公平地贴上可靠性有限的标签,特别是与一些不同技术的替换产品相比较,因为干簧继电器是机电开关而不是固态开关。(它们被归类为机电开关,是因为干簧继电器内部有两个弹性的镍铁簧片包覆于密封的玻璃管内,当施加磁场时,两个簧片会吸附并接触,从而形成一个电性回路。

但事实上,这种簧片开关的寿命可能超过10亿个开关周期,这取决于开关触点部分的热切换负载功率水平,失效现象可能是触点电阻超高(称为开路故障,电阻 $\geq 2\Omega$)或短路(短路故障,触点卡在关闭时间超过0.5s)。十亿次开关周期寿命对于ATE应用来说足够吗?这里有一个例子。考虑一个全天候运行的ATE,且预期寿命为5年。假设它每分钟运行10次测试,每次测试有4个继电器在切换。在ATE的寿命周期中,继电器总共有1.03亿次关断。注意,我们说了"寿命周期取决于负载",在1V且10mA的热开关条件下,继电器可能超过10亿次循环寿命,而更大的电流或更高的电压可能会降低寿命。图1显示了簧片开关触点寿命与开关负载之间的一些趋势数据。

我们所说的继电器的寿命是指什么?为了评估寿命,Coto通常会取32个生产出来的继电器样品,并在不同的电气负载下重复循环切换它们直到失效。即使在高循环率下,这样的测试也可能需要数周或数月的时间。

使用威布尔统计(Weibull statistics)来计算单个继电器失效前的平均周期(MCF)。此外,威布尔分布法通过威布尔斜率因子来估计被测继电器在测试时是否会出现早期失效,这一特性对于自动测试(ATE)中使用的继电器是非常不希望看到的。[点击这里了解更多关于统计方法的细节。](#)

包含多个继电器的ATE系统的故障率也可以计算出来;例如,一个包含2000个ATE级继电器的系统,其单个继电器MCF为10亿次循环,典型的威布尔斜率为1.5,在大约30万个系统循环后,系统故障率为1%。[\(有关统计计算的详细信息,请点击这里\)](#)。对于具有多个继电器的系统,如果已知其单个MCF数据,也可以预测其最佳预防性维护(PM)策略。例如,对于配备了16个3美元继电器的PCB,具有10亿次周期的MCF和花费500美元的非计划维护,最便宜的PM策略是在8千8百万次开关循环,将所有的继电器换掉,不论这些继电器是否已经失效。[点击这里了解更多预防性维护](#)

3 出厂测试

任何干簧继电器的核心都是干簧开关,Coto对其产品中使用的开关进行寿命测试,以确定在不同的电气负载下的MCF。当然,这样的测试是破坏性的。因此,为保证已发货继电器的高可靠性,最好的保障措施是在发货前测试所有已生产的继电器,这就是Coto所做的事。根据继电器的配置,Coto对每一颗继电器进行9到12个不同的参数测试,包括静态和动态接触电阻测量,操作和释放电压,操作和释放时间,绝缘电阻和击穿电压。

4 ATE等级干簧继电器

是什么使干簧继电器适用于ATE应用?第一是可靠性,根据电性负载的不同开关寿命可以从1亿次循环到超过10亿次循环不等。第二,它们的性能几乎像一个完美的开关,其ON/OFF电阻比约为 $10E_{13}$ 。第三,在数个GHz范围内传输高频的能力,是现代高频ATE测试的一个重要属性。虽然其他类型的继电器在某些特定属性上可能优于干簧继电器,但没有一种继电器能在同等成本的情况下提供干簧继电器的全面性能。

让我们看看Coto Technology为ATE行业提供的一些干簧继电器,从简单的1-Form A(单刀单掷)继电器到设计用于高速SOC(系统芯片)切换和串行设备测试的超高性能多通道RF继电器。

5 1-Form A (单刀单掷, SPST)

1-Form A, SPST(单刀, 单掷)继电器简单地开关一个通道,其极低的导通电阻允许它们可以用作级联,以提供几乎无限阵列的不同开关拓扑。例如Coto 9814系列继电器,不同管脚的设计, RF带宽工作在5到6 GHz范围内-轴向管脚的带宽最大, J型管脚的带宽居中,鸥翼管脚射频性能较好,而且比较容易返修。所有这些继电器的阻抗都是接近 50Ω 的射频阻抗,并提供了黑色磁壳,以减少在密集的环境中的磁相互干扰。在冷切换或1V/10mA负载下,预期寿命至少为10亿次。(冷切换意味着当继电器激活时没有电流流过触点。)这类继电器中的其他产品包括Coto 9900系列,它使用较小的干簧开关,是现有最小的表面贴装干簧继电器。它们具有相似的接触寿命,并提供同轴屏蔽和磁屏蔽选项,根据管脚的类型不同,它们的带宽可达5.5至7.0 GHz不等。

其他类型的专业1-Form A继电器包括Coto的9104型号,能够切换到1000V且最高可承受4000V。这种继电器适用于ATE应用,如电缆介电测试。而在开关电压谱的另一方面,Coto的3500和3600系列继电器是专门设计来降低不同金属接点之间产生的热电动势到亚微伏级别,这使得它们对于用于测量分钟电压的设备(如扫描仪、多路复用器和数字电压表)是不可或缺的。

6 1-Form C (单刀双掷, SPDT)

用于测试高引脚数半导体器件的负载板通常有严格的空間限制,因为射频信号的PCB走线必须保持尽可能短,以减少传输线路上的损耗。此外,通常还需要双面贴PCB以最大限度地提高负载板组件的密度。因此,1-Form C, SPDT(单刀双掷)继电器具有很大优势,体积尺寸和Form A相当,在ATE系统中可以切换不同的信号源到同一个DUT引脚。最常见的应用是在同一个DUT引脚上切换不同的参数测量,如电流、电压和电阻(本质上是低频测量)等特性,或者是多GHz带宽的串行脉冲串等高速信号源。

适用于这种应用的Form C继电器必须具有良好的射频带宽,以避免高频信号的失真,并具有较低的导通电阻,以避免低频参数测量的偏置。Coto 9852 1-Form C继电器是为此目的而设计的。它包含一个Form C的干簧开关,根据继电器线圈是否激活,将传入信号传递到两个触点中的任何一个。这种模式是可以绝对保证先断后通。常开(NO)和常闭(NC)通道的带宽大约都为4 GHz。

请记住,Form C的簧片开关的接触力比Form A开关的接触力略低,因此Form C的触点寿命略低。例如,在1V 10mA信号级负载下,9852 1-Form C NO触点的MCBF为2亿次,NC触点1亿次。为了方便客户,Coto已经开发了一系列方法来优化9852继电器的性能,并实现最大的寿命。有关更多信息,"[请参阅 应用Coto Technology的9852 Form C Reed Relay的最佳应用](#)"。

9852等真正的Form C继电器的替代方案是伪Form C设计。在ATE中,一个特别有趣的模型是2970干簧继电器系列,用于高达125°C的高温测试(例如汽车引擎盖下的半导体器件测试)。2970包含两个干簧开关,其中一个被一个小的永磁体偏压关闭(即通常关闭)。干簧开关被一个普通线圈包围,当被正确的极性激活时,它会消除磁铁的磁场,迫使NO开关关闭,并允许NC开关打开。这种模式是在功能上实现单刀双掷Form C,但缺点是这类类型的继电器不能保证先断后接通。

7 射频继电器

用于处理超过5 GHz带宽高频信号的干簧继电器需要专门的设计和测试。设计通常涉及到用有限元分析软件进行计算机仿真,求解麦克斯韦方程组来优化信号输入和输出端口以及通过继电器本体的 50Ω 传输的射频阻抗。这类继电器的测试不仅包括通常的不同负载下的寿命测试、接触电阻和开关定时等低频参数测试,还包括先进的射频测试。一般情况下,用矢量网络分析仪(VNA)分析干簧继电器的散射参数(S参数)来表征干簧继电器的射频性能。根据S参数数据,可以得到继电器在不同频率下的插入损耗、回波损耗和隔离度的曲线。此外,眼图可以模拟预测继电器以可接受的保真度携带高速数字脉冲流的能力。

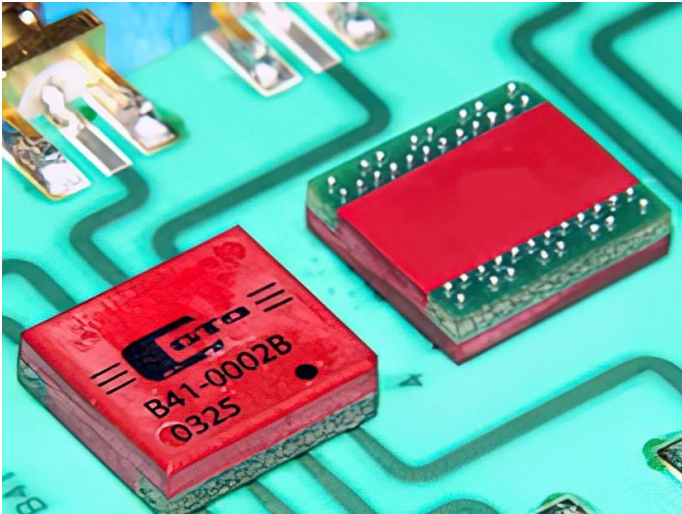


图2: B41 4-通道 球栅阵列射频继电器

前面讨论的继电器类型使用引脚或引线进行通孔或SMD焊接。这些类型的连接在每个弯道都会产生感应电阻抗，导致电阻随频率增加，不可避免地限制了继电器的带宽。4通道SPST B41射频继电器(图2)完全不用导线，而是使用内部波导，通过球栅阵列(BGA)连接到PCB上的50Ω传输线。这种没有显著阻抗间断的50Ω环境大大提高了系统带宽。[单击此链接查看B41继电器的规格书](#)。要进一步阅读有关继电器导联的一般资料，请阅读“[论干簧继电器的管脚形状对射频信号及阻抗的影响](#)”。

图3比较了9814继电器的各种管脚形状和B41的带宽差异。B41的优势是显而易见的。图4显示了B41发射15 Gbps兼容Jitter Tolerance Pattern (CJTPAT)伪随机比特流(PRBS)的眼图，相当于频率为10 GHz的信号。眼图开得很大很明显。图5显示了9852在5 Gbps的NC接触点的眼图。NO接触眼图非常相似的。

8 ATE应用

IC器件测试-三个使用引脚电子切换的干簧继电器的例子

在IC器件测试机中，引脚电子器件的核心是引脚驱动器。该驱动必须对被测器件(DUT)产生高度可重复，低抖动脉冲，精确设置的振幅和转换速率的信号。引脚驱动器的时序可数字设置，它的振幅由模拟控制电压决定。在图6中，参数测量单元(PMU)连接到伪1-FormC继电器的通道A的下游，它可以透过B41射频继电器的一半通道来实现。这是非常重要的，因为开关A在开路的状态下可隔离驱动比较器负载(DCL)，避免DCL的输出级漏电流破坏了PMU的测量结果。用芯片铁氧体作为低通滤波器，放置在继电器附近，降低了PMU线的短截线电容，否则会降低DCL线的带宽。在这种配置中，B41提供了DCL和DUT之间的高频路径。如果使用差分信号，B41的全部4个通道可以用来在每个差分通道上的DCL和PMU之间切换

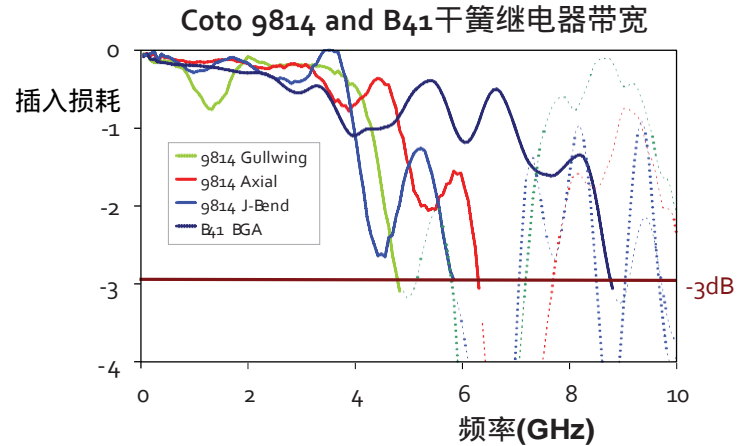


图3: 9814 and B41干簧继电器带宽比较

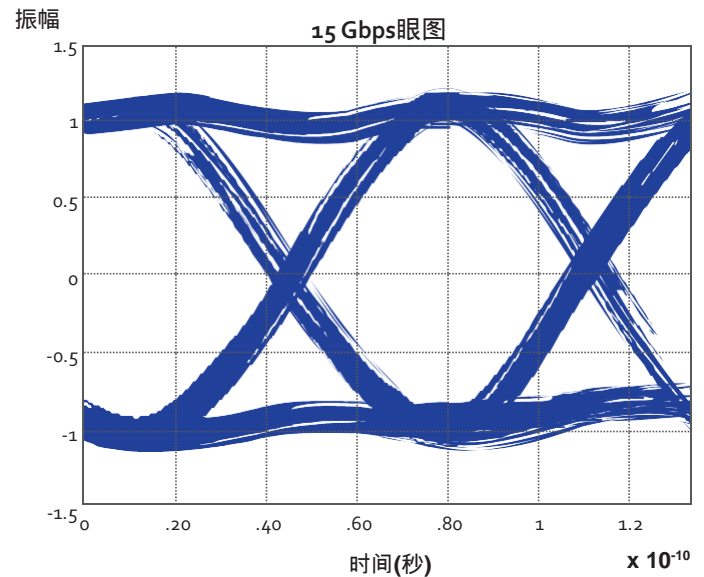


图4: B41 射频继电器于15 Gbps眼图 (~10 GHz), CJTPAT比特流

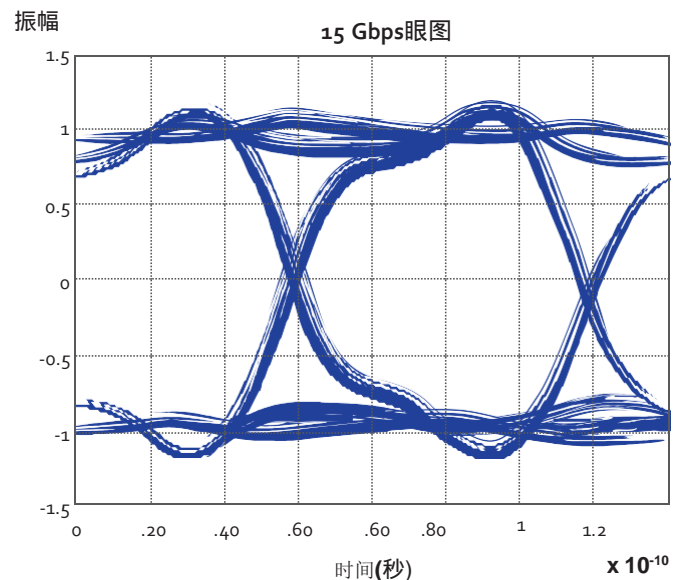


图5: 9852 干簧继电器 5 Gbps 眼图 (~3.3 GHz), CJTPAT 比特流

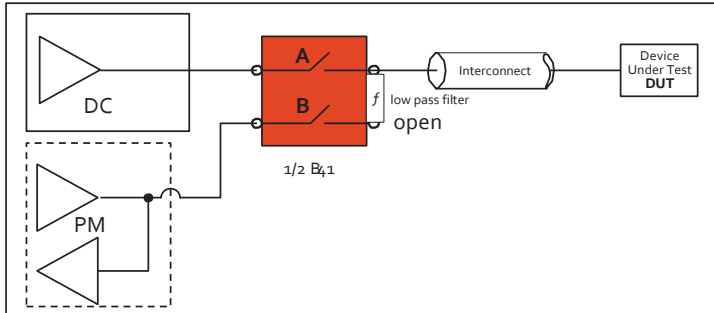


图 6: PMU/DCL切换电路示意图

回环测试

回环测试(图7)将串口的发射端(X)连接回串口的接收端(RX)。利用其芯片上的BST (内置自测试)电路,传输已知模式的串行数据。一旦数据被传输和接收,测试设备会去检测器件的低速引脚,根据已有的发射接收的正确状态机来判断测试是通过还是失败。FormC或两个FormA继电器在高速回环线路和较低速度的BST状态引脚的DUT之间切换。

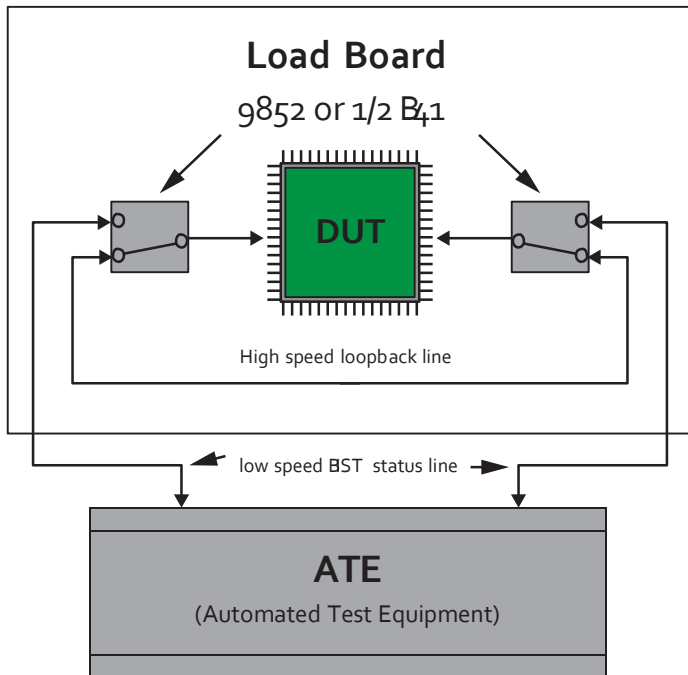


图7:回环测试示意图

接收口压力测试

半导体压力测试用来验证,当一个或多个外部条件接近其极限时,器件仍能工作正常。常见的压力包括高压、高温和高于正常时钟速率。图8显示了一个简化的接收口电压应力测试示例。安装在B41继电器附近的低通滤波器[f]在低频有非常低的阻抗,这可以接受在Tx/Rx线路上有变化的直流偏置,而它在高频的高阻抗降低了高速信号的失真。

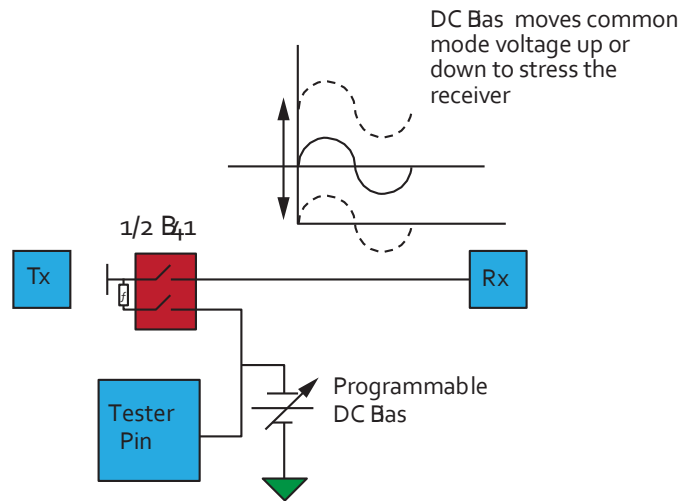


图8:接收口电压压力测试

其他常见的ATE应用

其他常见的ATE应用包括电缆测试(点击查看更多信息),高温测试(点击查看更多信息),以及飞针测试仪的一般切换需求。

9 ATE 切换技术替代方案

ATE应用中切换的替代方案包括固态继电器(SSR),通常是光耦隔离设计;机电继电器(EMR)、同轴继电器和微机电继电器(MEMS)。表1列出了每种类型的一些优点和缺点。

表1引用了不同厂家的规格书中公布的参数,这些数据仅供参考,当进行新设计时,需进一步评估选择适合的方案。

表1: ATE 切换技术替代方案

类型	图 (不按比例)	优势	缺点	评论
干簧继电器		<ul style="list-style-type: none"> •根据负载的不同有良好的使用寿命 •良好的热切换能力 •极高的直流隔离能力 •极低的导通电阻 •高抗静电能力 •器件高度低,可用于双面PCB •价格便宜 \$\$ 	<ul style="list-style-type: none"> •基于不同类型3dB带宽限制最高为8GHz •射频隔离低于机电继电器 	<ul style="list-style-type: none"> •广泛用于ATE •能很好地应对ATE中变化的负载
光耦隔离继电器 (SSR)		<ul style="list-style-type: none"> •体积小 •高度低 •固态 •高可靠度 •较快的响应速度和释放时间 •价格便宜 \$ 	<ul style="list-style-type: none"> •较高的导通电阻 •较高的输出电容 •射频隔离能力较弱 •抗静电能力较弱 	<ul style="list-style-type: none"> •由于有较高的输出电容,较高的导通电阻和关断状态漏電,不太适合用于ATE应用 •有些场合用于低速的ATE测试,例如存储测试
同轴继电器		<ul style="list-style-type: none"> •极低的射频插入损耗和较高的隔离性能 •大功率 	<ul style="list-style-type: none"> •尺寸非常大 •价格昂贵 \$\$\$\$ •使用寿命有限 	<ul style="list-style-type: none"> •极少用在ATE中
机电继电器 (密封金属封装)		<ul style="list-style-type: none"> •某些型号具有很高的射频带宽 (DC -18GHz) •较好的射频隔离性能 •有2 Form C类型 •气密封装 	<ul style="list-style-type: none"> •尺寸大 •价格昂贵 \$\$\$ 到 \$\$\$\$ •使用寿命有限 (~一千万次操作) •功耗较大 	<ul style="list-style-type: none"> •应用于中速到高速的ATE应用 •对于现在的高密度负载板来说尺寸太大
机电信号继电器 (塑封)		<ul style="list-style-type: none"> •价格不高 \$\$ •3GHz频率范围内回波和插入损耗较低 	<ul style="list-style-type: none"> •尺寸较大, 20*9*9mm •频宽有限 (3GHz) •使用寿命有限 (不同负载使用寿命大约在100K到300K之间) •工作温度最高只能到70度 •功耗较大 •没有完全密封 	<ul style="list-style-type: none"> •尺寸较大, 射频带宽较低, 使用温度范围有限, 使用寿命有限, 塑封材料的继电器不太适用于ATE应用
微机电 MEMS (最新型号)		<ul style="list-style-type: none"> •射频性能较好 •较低的插入损耗和较高的隔离性能 •导通电阻3Ω •四通道的单刀单掷 •尺寸小, 高度低 	<ul style="list-style-type: none"> •热切换能力不足 (在30 dB/1W的情况下, 切换周期只有400,000次) •对抗ESD性能较弱 (HBM=100V) •没有双刀双掷 •导通电阻变化大 	<ul style="list-style-type: none"> •即便许多的公司经历了25年的开发(包含Coto Technology), 微机电开关在ATE行业中的使用仍然相当有限

10 结论

由于其具有极高的OFF电阻、极低的ON电阻、热开关能力、摆脱磨损负载的能力、抗ESD损坏、相对较低的成本、可用性和高可靠性，干簧继电器是许多ATE开关应用的首选技术。其他开关技术可能在某些特定领域超过干簧继电器，如射频隔离或最小占用空间，但Coto的干簧继电器全面性能仍然是ATE开关应用的主要选择。