

通过基于人工智能的验证空间优化， 加快覆盖率收敛速度

作者

Taruna Reddy
资深产品营销经理

Will Chen
首席应用工程师

Badri Gopalan
新思科技科学家

引言

覆盖率是现如今半导体验证流程的核心。在半导体验证流程中，最基本的原则是：“如果没有进行测试，就等于没有验证过”。尽管对芯片设计的特定方面进行验证并不能保证发现所有错误（因为错误效应传播和检查器质量也是其中的一些重要因素），但如果不进行测试，根本不可能在逻辑设计中触发错误。覆盖率通常被视为发现错误的一个指标，因此在基于仿真的测试中，它被视为验证的关键点。

虽然手写测试在现今仍能发挥一定的作用，但大多数仿真测试采用的都是约束随机激励。这些测试与所验证的设计部分之间并没有明显的相关性，因此覆盖率对于建立这种联系至关重要。尽管验证工作永无止境，但覆盖率指标有着重要的指导作用，有助于确定是否已经运行了足够多的测试迭代，以及设计方案是否经过了足够的验证可以开始流片。

即便约束随机测试能带来一定的自动化优势，但收敛到覆盖率目标的速度往往会很慢，而随着仿真的继续，回报将会不断减少，验证过程中也仍然涉及大量的手动工作。为此，半导体行业显然需要一种更好、更加自动化的方法来“左移”覆盖率收敛并优化最终的覆盖率结果。

为了帮助开发者应对上述挑战，新思科技的VCS仿真器使用人工智能和机器学习（AI/ML）提供了智能覆盖优化（ICO）功能，能够增强激励多样性、暴露测试平台错误并提高覆盖率。另外，新思科技的VCS最近还使用AI/ML推出了验证空间优化（VSO.ai）功能，以在细粒度和粗粒度级别上更直接地对标覆盖率，与ICO功能相辅相成。本白皮书将重点介绍新思科技VSO.ai。

覆盖率收敛方面的挑战

在仿真中，覆盖率背后的基本概念看似很简单。验证团队选择想要使用的结构代码覆盖率指标（代码行、表达式、模块等），并自动将它们添加到仿真测试中。开发者通常会定义额外的功能覆盖点和覆盖组，用于指出他们希望测试的设计部分。此外，开发者还可能定义交叉覆盖，以观察覆盖点的特定组合。

然后，验证团队将定义约束条件，以确保自动生成的激励保持在规范范围内，然后开始运行仿真。随着每项测试迭代生成符合规则的约束随机激励，仿真器会收集所含的各种形式的覆盖率指标。验证团队会监测结果，并可能决定运行更多的测试或调整约束条件，以尝试改进覆盖率结果。在某个时刻，验证团队会判定，鉴于当前芯片项目的时间和资源限制，他们已经尽力达成了最佳结果，于是便选择开始流片。

这个过程听起来非常简单，但在实际的芯片设计中，会遇到诸多挑战，如图1所示。

第一个重大挑战是定义覆盖率目标，因为对于任何大尺寸或高复杂度的设计来说，实现全覆盖都是不可能的。

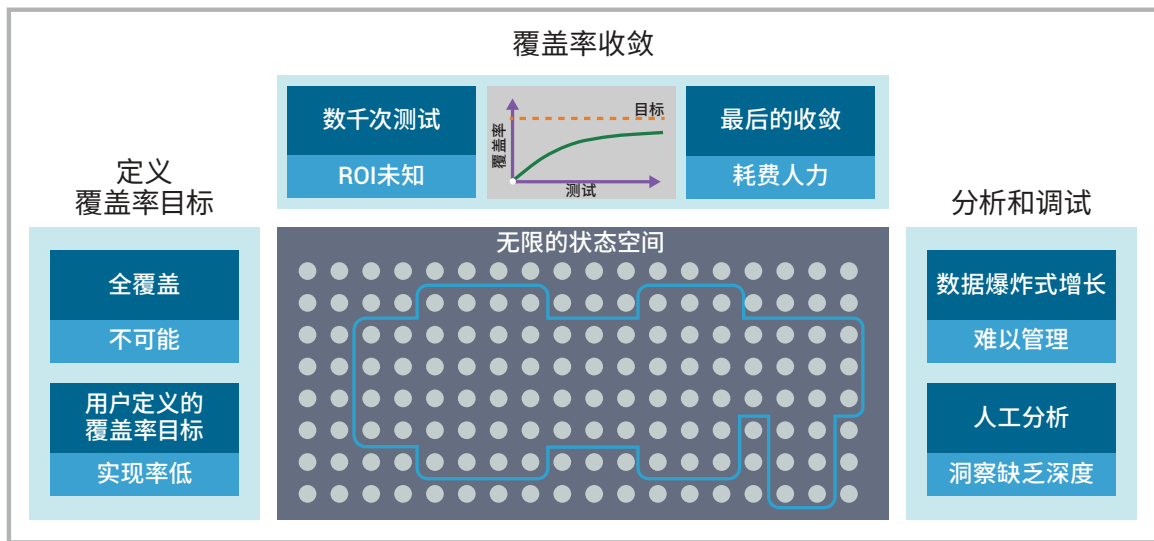


图1：在仿真中使用覆盖率所面临的挑战

由于代码覆盖率并不能反映设计方案的预期功能，因此用户定义的覆盖率目标也发挥着重要作用。然而，定义覆盖率目标是一项手动工作，通常只涉及设计方案的一小部分。无论仿真测试中包含哪些结构和功能覆盖率的组合，试图收敛覆盖率并实现与验证目标相匹配的指标都将面临更大的挑战。

图1正上方的图表显示了几乎每个项目都要面对的情况。初始测试中涉及到设计方案的多个部分，而随着时间的推移，迭代约束随机测试往往会提高覆盖率。一个典型的芯片项目要进行数千次约束随机仿真测试，并且设计中会有大量的重复活动。因此，之后的覆盖率收敛将急剧放缓，并且随着时间的推移，每次额外仿真的投资回报率（ROI）也会下降。ROI下降是覆盖率收敛中所面临的第二个重大挑战。

在某个时刻，曲线将会趋平，之后的仿真只会带来很少的改善或几乎没有改善。验证团队必须判定是否已达到足够的覆盖率，以便开始流片。当出现这种渐近收敛时，就意味着永远不会达到100%的覆盖率。这也是芯片项目的目标设定得较低的原因之一。不幸的是，往往在实现覆盖率目标之前，曲线已经趋平。验证团队必须设法弄清楚发生了什么，并在可行的时间和资源范围内尽可能提高覆盖率。由于只是运行更多的自动化测试并不足以解决问题，因此还需要大量的手动工作。

仿真收敛流程中，“最后的收敛”是第三个重大挑战，而它受到两个因素的制约。第一，从仿真中收集的数据量非常庞大。第二，要试着分析这些数据并确定造成覆盖率漏洞的根本原因：是由于该配置的分箱不符合规定，还是确实存在覆盖率漏洞？对海量数据集进行人工分析，不太可能得出有效的见解。要改善这种情况，唯一的方法是定义更合理的覆盖率目标、减少测试的运行次数、更快地收敛到更高质量的结果，并使分析阶段实现自动化。

新思科技VSO.ai简介

人工智能和机器学习技术正在帮助解决许多行业的难题，在芯片开发行业中也不例外。许多电子设计自动化（EDA）工具开始成功地使用AI/ML来实现任务自动化、改进用时和优化结果。新思科技是将AI/ML应用于芯片设计、验证、实现等领域的EDA行业领导者。特别是在基于仿真的覆盖率收敛领域，新思科技VSO.ai无疑是一个独特且功能强大的解决方案。

新思科技VSO.ai可以在多个方面为开发者提供帮助，图2展示了它如何帮助应对图1中所示的挑战。针对定义覆盖率目标的挑战，新思科技VSO.ai能够推断出一些不同的覆盖率类型，不再局限于传统的代码覆盖率，从而与用户指定的覆盖率形成互补。ML可以从经验中进行学习，并在适当情况下智能化地复用覆盖率目标。即使在单个项目中，从前期覆盖率结果中获得的经验也有助于改进之后的覆盖率模型。

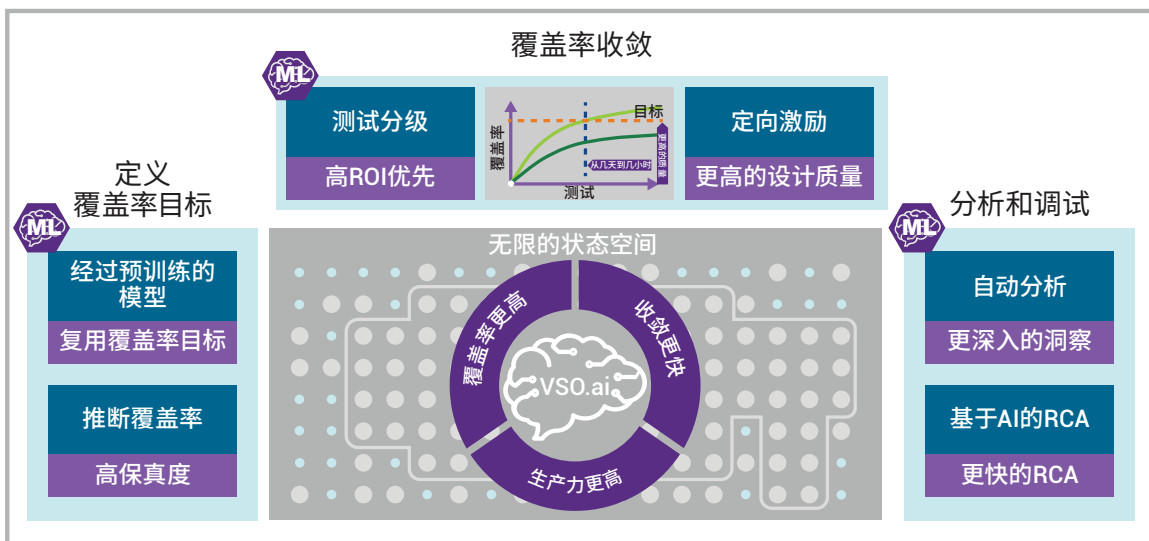


图2：在仿真中使用AI/ML后实现的覆盖率改进

运行更好的测试仿真来应对ROI的下降，这也许正是ML最擅长的领域。如前所述，许多测试都是重复的，覆盖率指标几乎没有改进。同时，随着项目进展，设计、覆盖和约束可能会发生变化，回归测试的排名也会因此而多次改变，所以手动回归优化并不可靠。尝试根据这些变化手动作出调整是不切实际的，而新思科技的VSO.ai在粗粒度测试级别上工作，可以随着结果的变化而不断学习，从而自动实现自适应的测试优化。运行测试时以实现最高ROI为优先目标，同时消除冗余测试，这样即可加快覆盖率收敛速度并节省计算资源。

在仿真中，新思科技VSO.ai还可在细粒度级别上工作，它通过调整约束随机激励以更好地对标未测试的覆盖点，从而提高测试结果质量（QoR）。这不仅加快了覆盖率收敛速度，而且还能收敛到更高的覆盖率。

最后的收敛工作挑战则可通过AI驱动的覆盖结果自动化分析来解决。新思科技的VSO.ai可以执行根本原因分析（RCA），确定为什么没有到达特定的覆盖点（例如由于约束冲突）。新思科技的VSO.ai会首先尝试自行解决，如果不能解决，它会向验证开发者提供可行的结果，例如识别出有冲突的约束。

与新思科技VCS的集成

要想在EDA解决方案中有效地部署AI/ML技术，必须与传统工具进行紧密集成。新思科技VSO.ai也不例外，它通过与新思科技VCS的紧密集成来实现自身特有的优势。图3显示了使用新思科技VCS来运行测试和收集覆盖率指标的传统手动流程。

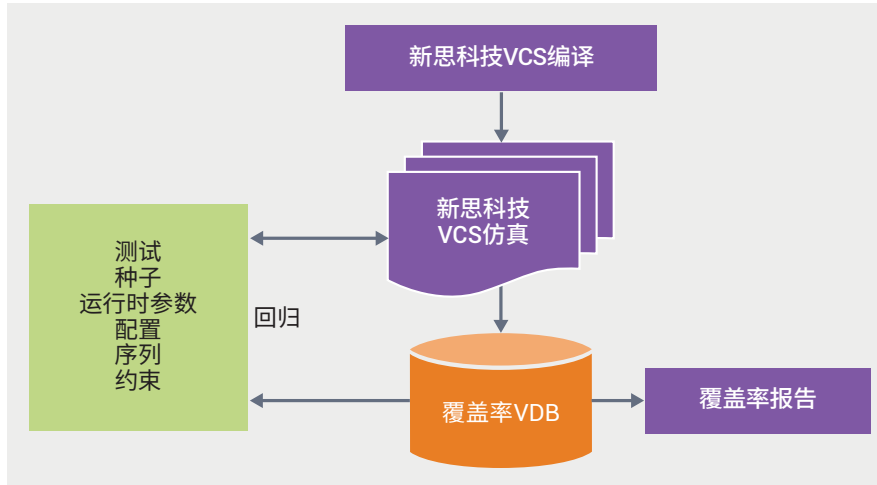


图3：手动仿真测试流程

验证团队首先编译设计和验证环境（测试平台），然后运行仿真。除了各种约束外，验证团队还可以指定其他几种类型的信息，包括各种配置开关和运行时参数。随着测试的运行，覆盖率指标会保存在验证数据库（VDB）中。结果可通过覆盖率报告的形式进行查看，并且可合并来自多个测试的数据库以生成摘要报告。

相比之下，图4显示了如何使用新思科技VSO.ai来使几个关键步骤实现自动化，从而改进此流程。覆盖率推断这一步发生在编译过程中，它用自动生成的覆盖率来补充结构覆盖率和用户指定的覆盖率。在细粒度级别上，新思科技VCS中的约束解算器是以覆盖率为导向的，因此它可以更精确地生成新的测试来达到之前未到达的覆盖点。解算器深嵌在仿真器中，这也是紧密集成至至关重要的原因之一。

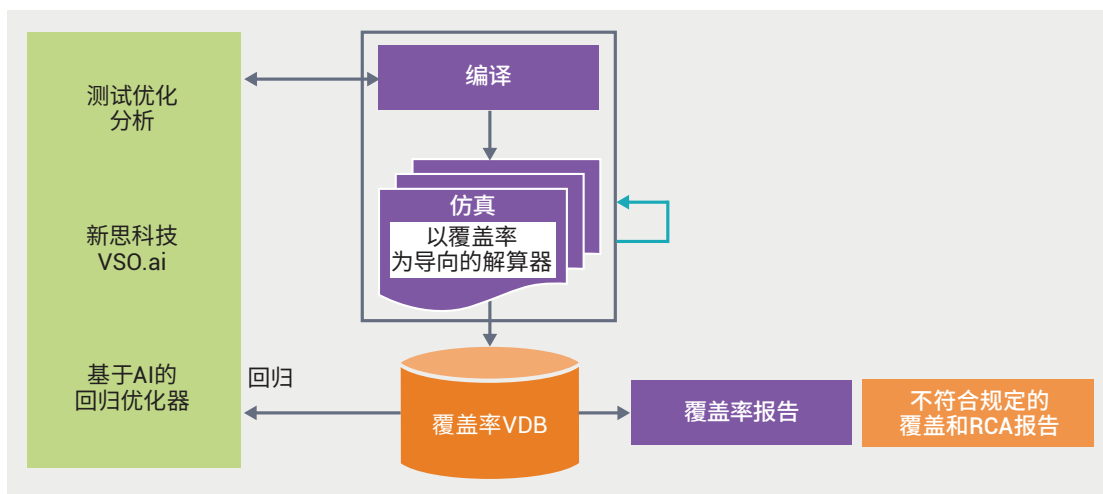


图4：采用新思科技VSO.ai的仿真测试流程

基于测试排名的手动测试排序和改动被完全自动化的流程所取代。在粗粒度级别上，新思科技VSO.ai会合理地规划回归测试，以使用最小的测试集获得最高的ROI，从而节省运行时间和计算资源。此外，它还会控制新思科技VCS的设置和开关，以优化每次测试运行。同样，作为对覆盖率结果进行手动分析的补充，RCA会识别可能无法达到的覆盖率，并报告根本原因以解决此类问题。

如果无需更高的覆盖率，那么VSO.ai可以在更短的时间内生成等效的覆盖结果。在很多情况下，新思科技VSO.ai会使用ML技术来随着时间的推移不断提高覆盖率，如图5所示。每次运行都会提供新的信息来改进约束解算和优化回归测试。与手动方法不同，该流程实现可完全自适应，结果会随着芯片项目的进展而变化。机器学习技术可以从当前的回归运行、项目上以前的回归运行，甚至之前类似项目上的仿真运行中，学习汲取经验。

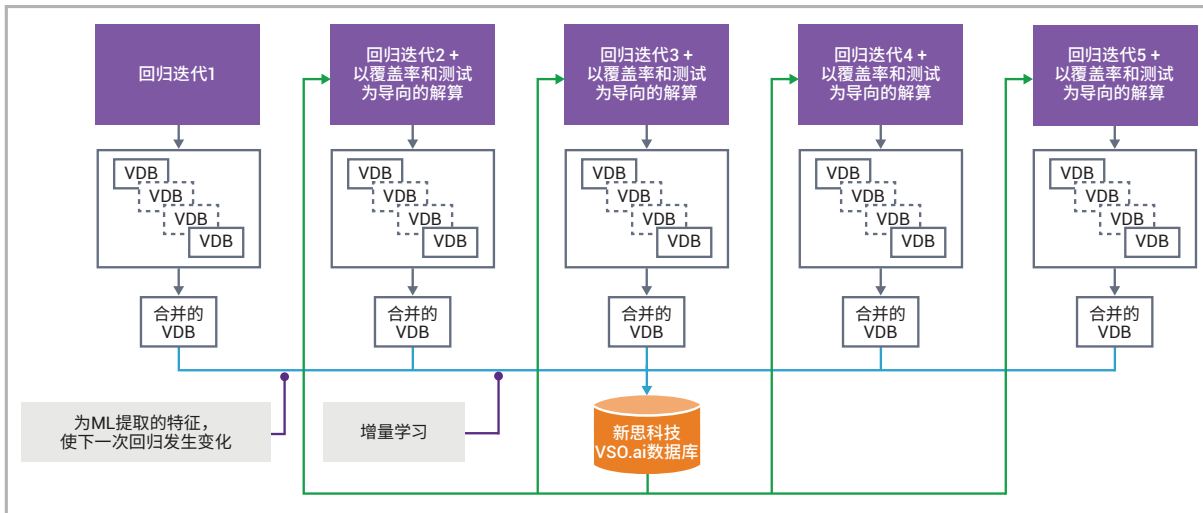


图5：新思科技VSO.ai如何使用ML来改进回归测试

在芯片开发阶段，新思科技的VSO.ai也具有很高的价值。在运行完全回归的子集时，无论是否有新的变更，新思科技的VSO.ai都能根据用户或工具定义的指标来确保证据质量。这种情况下，可以加快得出结果的时间（TTR），快速达到相同或类似水平的覆盖率。

新思科技VSO.ai的成果

新思科技VSO.ai可优化仿真回归，在更短的时间内实现相同的覆盖率，或根据需要提高覆盖率。举个例子，一家客户在最近的新思科技用户大会（SNUG）活动中表示，自己在四个IP模块上的回归测试数量至少缩减了一半。另外一个例子中（如图6所示），在OpenTitan HMAC知识产权（IP）模块上，VSO.ai成功将实现100%功能覆盖率所需的测试次数缩减到了原来的三分之一。

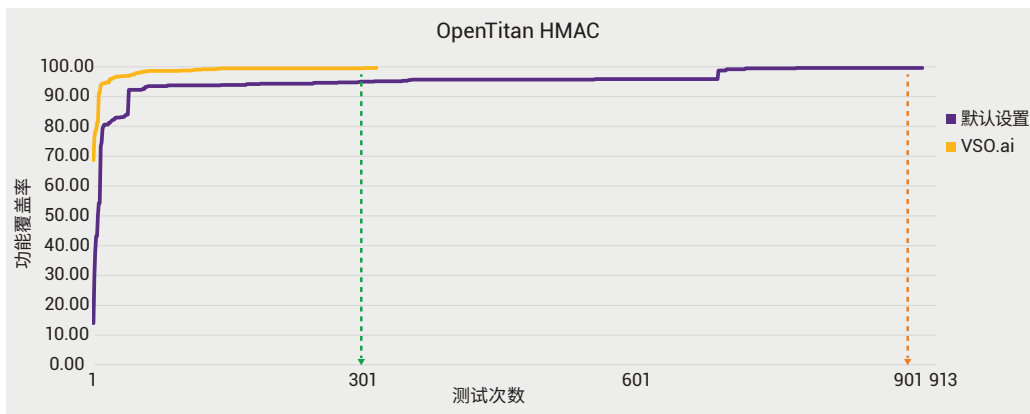


图6：新思科技VSO.ai为OpenTitan HMAC带来的成果

凭借丰富的IP模块和全片上系统（SoC）设计经验，新思科技VSO.ai展现了不凡的成果。得益于回归覆盖率优化和以覆盖率为导向的解算，实现覆盖率目标的时间缩短至了原来的三分之二，甚至十分之一，覆盖率结果的质量也提高了10%。通常情况下，有5%到20%的覆盖分箱会由于RCA而被识别为不可达。新思科技VCO.ai的价值是显而易见的，也是毋庸置疑的。

结语

使用覆盖率指标并不能保证发现所有错误，但它仍是验证流程的关键，而在解决覆盖率收敛这一难题上并没有万全之策。就像EDA的其他许多领域一样，验证流程也能从使用AI/ML技术中受益。新思科技VCS和VSO.ai的结合，为加快回归和覆盖率收敛速度提供了更具创新性和更完整的解决方案。