基于轻量化深度学习的集成电路故障检测算法研究

曾维益
湖北工业大学，湖北 武汉 430068
DOI: 10.61369/TACS.2026080019

摘　　要： 随着集成电路集成度越来越高、工艺尺寸越来越小，芯片内部结构变得越来越复杂，传统的故障检测方法检测效率和计算资源消耗之间的矛盾也越来越突出。深度学习技术给故障特征的自动提取带来了新的想法，但是标准的深度模型参数量大、计算开销高，不能适应集成电路检测场景下对实时性和资源受限环境的要求。轻量化深度学习用紧凑的网络结构和高效的运算方式，在保证检测精度的基础上大大降低了模型的复杂度，给集成电路故障检测提供了一种可行的方法。本文主要针对轻量化深度学习在集成电路故障检测中的应用进行研究，分析常见的故障类型和检测难点，研究轻量化网络的设计基本原理以及适应性，从算法优化、特征处理、硬件适配等几个方面来论述轻量化检测方法的优势和适用条件。

关 键 词： 集成电路；故障检测；轻量化深度学习；算法优化

Research on Integrated Circuit Fault Detection Algorithm Based on Lightweight Deep Learning

Zeng Weiyi
Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068

Abstract: With the continuous improvement of integration density and shrinking process size of integrated circuits, the internal structure of chips has become increasingly complex. The conflict between detection efficiency and computing resource consumption of traditional fault detection methods has become more prominent. Deep learning technology provides new ideas for automatic extraction of fault features. Nevertheless, standard deep learning models feature massive parameters and high computational overhead, which fail to meet the requirements for real-time performance and resource-constrained environments in integrated circuit detection scenarios. Adopting compact network structures and efficient computing modes, lightweight deep learning greatly reduces model complexity while ensuring detection accuracy, and offers a feasible solution for integrated circuit fault detection. This paper mainly studies the application of lightweight deep learning in integrated circuit fault detection, analyzes common fault types and detection difficulties, and explores the basic design principles and adaptability of lightweight networks. It also discusses the advantages and applicable conditions of lightweight detection methods from the perspectives of algorithm optimization, feature processing and hardware adaptation.

Keywords: integrated circuit; fault detection; lightweight deep learning; algorithm optimization

集成电路是现代电子系统的主要组成部分，它的可靠性、安全性会直接影响到整个设备的工作状况。在制造过程中，由于工艺偏差、材料缺陷、环境干扰等造成芯片内部出现短路、开路、参数漂移等各种故障[1]。近几年来，深度学习因为强大的特征学习能力，在图像识别、信号处理等领域取得了很好的成果，部分研究将它应用到集成电路故障检测当中，得到比传统方法更好的检测效果。但是标准深度学习模型一般有数百万到数千万个参数，计算资源和存储空间要求高，不适合在测试设备或者嵌入式检测系统上使用。轻量化深度学习是为资源受限的环境而设计的，用模型压缩、高效网络结构、知识蒸馏等方法来减小计算量，给集成电路故障检测提供了一条新的技术途径。本文主要研究该方向，从算法特征和检测需求匹配的角度进行系统地阐述。

一、集成电路故障检测的技术背景与需求分析

（一）集成电路故障的主要类型与检测难点

集成电路在制造和使用过程中会存在各种各样的故障。制造阶段的缺陷有颗粒污染、光刻偏差、介质击穿、金属互连短路或者断路等，这些故障具有随机分布的特点，并且随着特征尺寸进入纳米级，缺陷尺寸也随之减小，给光学检测和电学测试带来了双重困难。使用阶段出现的故障大多和电热应力、静电放电、辐

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

射效应等有关，表现出参数退化、时序违规、间歇性失效等特征，检测困难之处在于故障发生存在随机性以及环境依附性。

从检测技术角度来讲，主要的难题有三个方面。第一，故障特征变得隐蔽起来。深亚微米工艺下，微小的缺陷造成的电学异常会被正常的信号波动所掩盖，传统的阈值判断方法容易造成漏检[2]。第二，检测速度越来越快。大规模生产测试要在一个短时间里完成大量的芯片检测，算法层面的延迟就会成为很大的时间成本。第三，测试设备计算能力小。大多数集成电路测试系统采用嵌入式结构，处理器的性能和内存容量都比通用计算机低很多，不能运行复杂的分析算法。因此故障检测算法要在这两者之间取得平衡。

（二）传统检测方法的局限性

目前工业界广泛使用的故障检测方法各有不同的适用范围，但是存在着明显的不足。基于自动测试模式产生的逻辑测试方法是通过对激励施加和响应进行观察来判断故障的方法，对于结构性缺陷比较有效，但是随着电路规模的增大，测试时间也会随之增加[3]。基于边界扫描的结构测试方法通过嵌入测试电路来提高可测性，但是会改变芯片的设计，增加面积开销。基于光学成像的外观检测方法可以观察到芯片表面的缺陷，但是对于内部互连和多层结构的缺陷检测能力比较弱，而且设备成本较高[4]。近些年来，依靠机器学习技术所形成的检测手段，凭借人工设定的特征来完成故障分类，在某种程度上提高了检测的效果。但是特征的设计要依靠专业经验，不同的故障类型需要不同的特征组合，通用性较差。工艺更新或者产品变更的时候，特征常常要重新设计，适应性差。

（三）轻量化深度学习的应用价值

轻量化深度学习专门针对资源受限环境下的智能计算需求进行发展，其主要思想就是用网络结构的创新、模型优化技术来大幅度降低参数数量和计算量，并且保证模型有较好的表征能力[5]。把轻量化深度学习应用到集成电路故障检测当中，有着诸多的实际意义。第一，可以使得检测算法直接运行于现有的测试设备或者嵌入式系统上，而不需要对计算资源进行升级。第二，减少单次检测的计算时间，有利于提高生产测试的吞吐率，对大批量芯片筛选有重大意义。第三，轻量化模型推理速度快，可以用于在线检测或者流水线检测，提高了检测流程的集成度。因此，对适合于集成电路故障检测的轻量化深度学习方法进行研究，有着明显的工程应用前景。

二、轻量化深度学习的基本原理与算法特征

（一）模型轻量化的主要技术途径

深度学习模型轻量化主要是从结构设计、模型压缩、高效计算这三个方面入手来实现的。结构设计方面典型的有深度可分离卷积、分组卷积、通道混洗等，这些设计是在标准卷积的基础上进行分解或者重组，从而大大减少乘加运算次数。深度可分离卷积把标准卷积分解成逐通道卷积和逐点卷积两步，保留了相近的特征提取能力的同时，参数量可以是原来的几分之一到几十分之一。模型压缩技术有权值剪枝、量化、低秩分解等。剪枝方法就是从不重要的连接或者卷积核中剔除掉一些部分，以达到减小模型大小的目的，量化方法则是采用较小的比特位宽来代表权值以及激活值，进而缩减存储及计算的成本。高效计算策略就是对推理过程中涉及的运算进行调度，比如算子融合、内存复用等等，可以在保持模型结构不变的情况下提高运算速度。

（二）适用于故障检测的轻量化网络特点

集成电路故障检测任务中，轻量化网络要具有以下特性。第一，感受野和故障尺度要匹配。芯片故障可能会出现局部区域的微小异常，也可能会出现大面积的电路行为偏差，所以网络应该可以捕捉到不同的空间尺度特征。轻量化网络用多分支结构或者空洞卷积等方法，在控制参数量的同时保证有效的感受野。第二，对微弱信号的敏感度。部分故障在电学测试中产生的信号变化幅度小，需要检测网络有较强的抗干扰能力以及细节保留的能力。利用注意力机制等模块，在轻量化的框架中加强关键特征的响应。第三，推理的稳定性和可重复性。集成电路检测属于工业应用场景，对算法的输出一致性有较高要求，轻量化模型由于参数量少，过拟合风险较低，在训练数据充足的情况下可以保持较好的泛化性能。

（三）算法复杂度与检测精度的平衡策略

轻量化深度学习用于故障检测的时候，要解决的主要问题就是算法复杂度和检测精度之间的关系。降低模型复杂度一般会使得特征表达能力减弱，从而造成故障识别准确率降低[6]。就这个问题而言，目前的研究和实践已经形成了一些行之有效的办法。在设计网络的时候使用神经架构搜索技术，在计算资源的限制之下自动找到最好的网络结构，从而避免了人工设计造成的次优选择。又一策略是先训练教师模型，再用知识蒸馏的方式引导学生模型的学习，使学生模型具有轻量化结构的同时接近教师模型的性能。另外，根据集成电路故障检测的特性来设计一套具体的方案也是一种务实的做法。故障检测任务中正常的样本和故障样本之间存在着类别不平衡的问题，在损失函数中加入类别权重或者使用焦点损失，可以在不增加模型参数的基础上提高对少数类故障的识别能力。这些策略一起指向一个目的，在资源有限的时候最大限度地提高检测性能[7]。

三、轻量化深度学习算法在故障检测中的适配与应用

（一）检测流程中的算法部署位置

轻量化深度学习算法在集成电路故障检测流程中可以部署到不同的地方。晶圆测试时，算法可以处理探针台采集的电学参数数据，快速判断芯片是否存在制造缺陷，对故障类型做初步分类[8]。成品测试阶段算法可以对功能测试得到的响应序列进行分析，找出逻辑故障或者时序违规。可靠性筛选阶段算法可以对老化测试前后参数变化做比较，预测出现失效的风险。不同的部署位置对于算法的实时性要求是不一样的，晶圆测试一般要求每颗芯片的测试时间控制在毫秒级，模型推理速度要高一些；而成品测试中部分项目可以接受一些测试时间上的限制，用复杂度稍高

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

的轻量化模型来换取更高的精度。轻量化算法的优点是可以根据具体的场景自由地改变模型的配置，通过调节剪枝率、量化比特数等参数来达到不同的性能目标。

（二）数据形式与算法输入的匹配方式

集成电路故障检测所用数据形式多种多样，时序波形、频谱特征、空间分布图、状态转换序列等等都属于此类数据[9]。轻量化深度学习算法要对不同的数据形式采取合适的输入表示。对芯片供电电流时域波形进行分段采样后组织成一维序列输入轻量化的卷积网络，用卷积操作提取波形中突变点或者异常趋势。对电磁辐射扫描得到的二维热图或者近场分布图，可以采用二维轻量化卷积网络进行处理，检测出热点区域或者异常辐射模式。对数字电路内部节点状态序列进行编码成二维矩阵之后输入网络中，用轻量级模型来提取时空关联特征。算法输入匹配方式会影响检测结果的好坏，对轻量化的模型来说，使用一些预处理、数据增强的方法可以在较少的参数量内得到更多的特征信息[10]。

（三）硬件平台的适配与运行效率

轻量化深度学习算法的实际效果要由硬件平台来体现。集成电路测试设备的处理器大多采用 ARM 架构或者专用的数字信号处理器，部分老式设备的主频和内存资源比较少。针对这样的硬件环境，要从模型转换、算子优化、内存管理等各方面来适应。模型转换阶段把训练得到的浮点模型转换成定点或者整数表示的推理模型，减小对浮点运算单元的需求。算子优化是针对高频调用的卷积、全连接操作进行的，用硬件提供的向量指令集或者缓存结构来加速计算。内存管理用层间融合、原地操作等方法来减小中间结构所占内存，防止由于内存不够而造成数据搬运的频繁发生。经过充分适配的轻量化模型在典型的测试设备上单次推理的时间可以控制在数毫秒到几十毫秒之间，满足批量化生产测试的节拍要求。

四、结语

轻量化深度学习给集成电路故障检测赋予了既精确又高效的技术。通过对集成电路制造和测试环节对故障检测算法实际需求的分析可知，传统的检测方法以及标准深度学习模型，在资源受限的环境下都会存在适用性上的不足。轻量化深度学习从网络结构设计、模型压缩、高效计算等角度入手，在减少算法复杂度的同时保持了足够的特征表达能力，可以较好地满足集成电路检测场景下对于实时性、资源占用、部署方便的要求。从发展的角度来讲，轻量化算法具有很强的灵活性和可扩展性，可以满足各种工艺节点、各种产品类型的检测要求，具有较好的推广应用前景。

参考文献

[1] 席燕辉，杨紫妍，严格 . 基于轻量化双分支特征融合网络的配电网故障诊断 [J]. 湖南电力 ,2025,46(2):41-51.

[2] 林伟，郑述堂，沈凤国，等 . 基于深度学习的港口内供电设备漏油故障检测方法 [J]. 自动化与仪表 ,2025,41(2):56-60+67.

[3] 贾玉进，胡迎江，葛庆坤，等 . 基于轻量化 YOLOv3网络的高压输电线故障高效检测方法 [J]. 电力学报 ,2025,40(6):452-459.

[4] 胡军军，谢强，王伟鹏，等 . 基于深度学习模型的配电网故障检测 [J]. 信息与电脑 ,2025,37(22):40-42.

[5] 李文，翁天天，包海斌，等 . 融合轻量化 YOLOv5与 SimAM 的电力设备红外图像检测算法 [J]. 国外电子测量技术 ,2025,44(5):63-68.

[6] 陈鑫，唐东峰，江拼，等 . 基于改进轻量化 YOLOv8n 的输电线路绝缘子故障检测模型 [J]. 湖南科技大学学报 (自然科学版),2025,40(1):60-68.

[7] 刘璇 . 基于深度学习的变电站电力设备漏油检测 [J]. 电器工业 ,2024,(10):26-30.

[8] 武福，蒋鹏民，李忠学，等 . 基于轻量化 YOLOv8s 的轨道扣件状态检测方法 [J]. 北京交通大学学报 ,2024,48(5):59-68.

[9] 张长乐，金钧 . 基于深度学习的绝缘子故障检测仿真研究 [J]. 华东交通大学学报 ,2023,40(5):41-48.

[10] 陈海明，陈俊 . 基于深度学习的输电线路绝缘子故障检测方法研究 [J]. 电气开关 ,2023,61(1):71-75+83.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.