

D-PSO 算法的单变量测试参数集成电路筛选方法*

詹文法¹ 余储贤² 胡心怡² 郑江云¹ 张庆平¹ 蔡雪原¹

(1. 安庆师范大学电子工程与智能制造学院 安庆 246133; 2. 安庆师范大学计算机与信息学院 安庆 246133)

摘要:针对集成电路尺寸缩小和复杂度提升导致的筛选成本提高问题,提出了一种针对单变量测试参数的集成电路筛选方法。具体先使用归并排序算法将参数值与集成电路编号拼接成数组,确保后续筛选的准确性,并按照参数值对数据进行排序。然后,利用 K-means 算法对测试数据的异常值进行预处理,对测试数据进行初步优化。最后,通过结合导数与粒子群优化算法创新性地提出了 D-PSO 算法,D-PSO 算法增强了拐点位置定位的敏感性和准确性,能够精确地定位拐点,达到直接筛选出参数数据相近集成电路的目的。通过仿真实验的结果证明了该算法的收敛速度远高于其他算法,并能够准确、快速的筛选集成电路,在保持测试精度的同时,实现了测试集的优化和相似性筛选,有效降低了集成电路筛选成本。

关键词: 芯片筛选; K-means 算法; D-PSO 算法; 拐点检测

中图分类号: TN47

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.3

One-variable test parameter integrated circuit screening method for D-PSO algorithm

Zhan Wenfa¹ Yu Chuxian² Hu Xinyi² Zheng Jiangyun¹ Zhang Qingping¹ Cai Xueyuan¹

(1. School of Electronic Engineering and Intelligent Manufacturing, Anqing Normal University, Anqing 246133, China; 2. School of Computer and Information, Anqing Normal University, Anqing 246133, China)

Abstract: In response to the increased screening costs associated with the reduction in size and increased complexity of integrated circuits, a new screening method for integrated circuits based on single-variable test parameters has been proposed. Initially, the merge sort algorithm is used to concatenate the parameter values with the integrated circuit numbers into an array, ensuring the accuracy of subsequent screening and sorting the data according to parameter values. Then, the K-means algorithm is employed to preprocess outliers in the test data, optimizing the test data preliminarily. Finally, an innovative algorithm called D-PSO is introduced, combining derivatives and particle swarm optimization. The D-PSO algorithm enhances the sensitivity and accuracy of locating inflection points, precisely identifying these points to directly screen integrated circuits with similar parameter data. Simulation results demonstrate that this algorithm converges much faster than other algorithms and can accurately and swiftly screen integrated circuits. While maintaining test accuracy, it optimizes the test set and performs similarity screening, effectively reducing the screening costs of integrated circuits.

Keywords: chip screening; K-means algorithm; D-PSO algorithm; inflection point detection

0 引言

随着现代半导体工艺高速发展,超大规模集成电路生产技术也日渐成熟,已经可以利用几亿个晶体管组成一个小集成电路^[1]。由于集成电路尺寸的缩小和电路复杂度的提升,自动测试设备需要通过增加测试向量来适

应这一变化^[2],这不仅提高了测试难度,还增加了测试成本。

在大数据时代,自动测试向量生成在集成电路测试领域的测试理论和方法中有着举足轻重的地位,其中测试程序验证更是重中之重^[3-4]。在功能测试向结构测试演变的过程中,故障等价理论通过减少了故障数,进一步缩小了测试集数量。但是又因为 ATE 设备具有加载时

间少和前设备测试受限等技术难题,使得降低测试成本成为了行业中的又一难题^[5]。为了解决这一难题,集成电路工作者创新了大量的测试理论和方法。例如,针对晶圆制造和晶片测试,开创了无接触测试的探索^[6];针对半导体制造领域缺陷检测问题,研发出了晶片电路缺陷的激光定位装置^[7]。国内外大学学者也做出了很多的贡献,例如杜克大学学者提出使用贝叶斯网络模型,基于测试项之间的互信息和马尔科夫毯的原理选择测试子集^[8];东华大学学者使用最大相关性最小冗余项算法分析测试项和测试结果之间的关系,并通过深度信念网络模型准确率选择最终的测试集^[9]。也有人提出利用新型的优化工艺来提升芯片良率和工艺可靠性^[10],从而达到最终目的。

由于自适应测试的目标是提升测试质量并降低测试应用成本^[11],也有相当一部分学者着眼于此。适应性测试是在测试过程中灵活地调整测试类型和模式,以最大程度地适应电路特性,从而确保测试的全面性和高效性。迄今为止已经大量适应性测试方法涌现出来,例如利用重排序方法解决测试向量混乱问题^[12];利用实时自适应算法解决测试逃逸问题^[13];利用晶圆级性能预测方法解决站点间差异问题^[14];针对良率的 RCA 自适应框架^[15];针对电路故障改进的哈里斯鹰算法^[16];针对测试效率改进的 mRMR 算法^[17];针对测试逃逸率的晶圆级适应性测试方法^[18];还有同时对模型连接结构和权重位宽进行自适应联合优化的压缩方法^[19-20],这些传统的方法通常针对多参数的综合考虑和测试。

在这些测试的过程中,由于考虑了多个参数,测试流程变得复杂,要使用多种测试设备和工具才能准确的测量各个参数。传统方法的测试时间通常较长,尤其在需要迅速推向市场的应用中,长时间的测试可能成为制约因素。而且对于电子设备的可靠性和性能而言,集成电路的一致性和稳定性是至关重要的考量因素,因此如何快速筛选出一批参数一致、性能稳定的集成电路至关重要。于是,针对这一问题提出了 D-PSO 算法的单一变量测试参数芯片筛选方法,选取一个代表性的参数并利用改进的 D-PSO 算法筛选数据集中相似度较高的数据区间,那么这个区间内的集成电路具有极高的一致性和稳定性。

1 主要思想

首先通过选取的待测晶圆,得到晶圆测试后的测试数据^[21]。利用这些测试数据建立特征数据集 $X, X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 。利用 K-means 算法对原始数据进行预处理,这一过程是为了尽早删除差异大的数据,达到简化测试集和提高筛选效率的目的。

之所以选择 K-means 算法对数据的预处理,是因为其在初步聚类和去除差异较大的数据点方面具有广泛的应用^[22-24]。以下是对这一应用场景的详细展开论述:

初步聚类:第 1 步是形成簇, K-means 通过迭代过程,将数据点划分为 K 个簇,每个簇由一个簇中心代表^[25]。这能够更好的发现数据中潜在的簇,将相似的数据点被分到同一簇中;再进行相似性度量,算法使用欧氏距离或其他相似性度量来确定数据点之间的距离,使得同一簇内的数据点彼此更加相似。

去除差异较大的数据点:首先进行离群值检测,在聚类的过程中,离群值通常会被分到独立的簇中,因为它们离其他数据点较远。通过观察聚类结果,可以识别并去除那些与其他数据点明显不同的簇,从而降低了差异较大数据点的影响;再进行异常簇的识别,通过检查簇的大小和密度,可以确定哪些簇包含较少的数据点,可能是由于差异较大的离群值引起的。这些异常簇可以被进一步检查和处理。

在筛选算法的选择过程中,本文创新了一种 D-PSO 算法,通过检测数据集中的拐点,来确定测试参数的变化情况。D-PSO 算法有助于确定哪些参数在其变化方面相近,通过识别拐点,可以将参数空间划分为不同的区域,这些区域内的参数相对稳定,能够更好的筛选出性能相近的集成电路。通过将 K-means 和 D-PSO 算法相结合,更好的优化了集成电路筛选过程。K-means 用于初步聚类和去除差异较大的数据点,而 D-PSO 算法用于更详细地挖掘参数的变化,帮助进一步优化集成电路的筛选。

具体方法流程如下:

- 1) 选择不同批次的晶圆,得到集成电路测试数据,根据样本数据集选取测试参数。
- 2) 使用归并排序算法将测试参数与相应集成电路编号之间建立了一一对应的映射,确保筛选结果与具体集成电路的关联性。
- 3) K-means 对样本数据集 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 进行聚类分析,删除部分差异大的数据。
- 4) 利用 D-PSO 算法判断数据突变处,得到数据相近的集成电路区间。
- 5) 输出拐点区间内参数数据的集成电路编号。

2 改进的 D-PSO 算法

粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 最初的简化算法模型是根据鸟群觅食行为得到的^[26-27],后来经过不断改进才形成的。该算法就是利用粒子在搜索空间中的移动方式来寻找问题的最优解^[28-29],其基本原理是基于群体协作和搜索空间中的迭代优化^[30],核心思想是模拟鸟群中协作和信息共享的搜索过程,使得粒子

在搜索空间中通过相互合作逐渐收敛到问题的最优解附近^[31-32]。这种群体协作和自适应调整的机制使得粒子群算法在解决多种优化问题时都表现出良好的性能^[33]。

2.1 D-PSO 算法

虽然 PSO 具有全局搜索的能力,但在高维、复杂的解空间中,粒子群可能需要很长时间才能有效地覆盖整个空间,尤其是在拐点位置较远的情况下。另外当数据集中存在多个局部最优解时,PSO 算法会陷入局部最优解,收敛到其中一个拐点而忽略其他可能的拐点位置。而且 PSO 是一种无模型的优化算法,对函数形状的先验知识要求相对较低,在没有足够先验信息的情况下,PSO 可能无法准确判断拐点的存在和位置。

拐点是数据趋势发生显著变化的点,它在金融市场分析、气候变化研究和生物信息学等各个领域中都重要的意义。由于拐点是函数图像凹凸型转换的位置,这种变化对应于导数的零点。所以通过在搜索过程中关注导数为 0 的位置,可以有效地找到可能的拐点。在拐点周围,导数的变化率非常大,这是因为在拐点处,函数的曲率发生明显变化,导致导数的绝对值增大。PSO 算法可以利用这种导数变化率的信息,通过调整粒子的位置和速度来更有针对性地搜索可能的拐点位置。而且拐点处的导数的符号也会发生变化,PSO 算法可以通过检测导数符号的变化来判断可能的拐点位置。因此结合导数特性,可以为 PSO 算法提供更有针对性的搜索方向。在导数为 0 或变化率大的区域,可以引导粒子更可能接近拐点位置,而不是随机搜索整个解空间。通过将 PSO 算法与导数特性相结合,能够更充分地利用导数信息来引导搜索,提高对拐点位置的敏感性和准确性,从而实现在数据集中更精准地定位拐点。

这种将 PSO 算法与导数特性相结合的创新性算法,能够精准定位数据集中的拐点,因此将本方法命名为导数粒子群优化算法(derivative particle swarm optimization, D-PSO)。

2.2 D-PSO 算法应用

首先对给定的数据集进行了导数计算,以识别数据中的变化趋势,在数据分析中,导数的突变往往预示着潜在的拐点。

目标函数定义:设计一个目标函数,该函数旨在最大化导数绝对值的局部总和。具体来说,对于给定的数据点,本文考虑了该点周围的一个固定大小的窗口,并计算了该窗口内所有点导数绝对值的和。这个总和越大,表明在该点附近导数的变化越剧烈,因此更有可能是拐点。为了更详细地描述目标函数的定义,可以引入以下公式:

设 x_i 是数据点的序号,其中 $i=1,2,\dots,N$, N 是数据集的总点数。对于给定的数据点 x_i ,计算该点周围一

个固定大小的窗口内所有点的导数绝对值之和作为目标函数。这个窗口可以表示为 $x_{i-w} \sim x_{i+w}$,其中 w 是窗口的半径。

目标函数 $f(x_i)$ 定义如下:

$$f(x_i) = \sum_{k=i-w}^{i+w} |dIDDA(x_k)| \quad (1)$$

其中, $dIDDA(x_k)$ 是在点 x_k 处的导数值, $|dIDDA(x_k)|$ 是其绝对值。目标函数的值越大,表示在 (x_i) 点附近的导数变化越剧烈,从而该点更可能是拐点。

在定义了目标函数之后,采用 D-PSO 来寻找最大化该目标函数的数据点。在本算法中,目标是找到使 $f(x_i)$ 最大化的 x_i ,也就是寻找使得导数变化总和最大的窗口中心点 x_i ,将其作为数据集集中的潜在拐点。通过这种方法,D-PSO 算法能够有效地定位数据趋势变化的关键点,即拐点。在这个算法中,空间中的一个每个候选解都相当于一个粒子^[34],粒子根据自己和其他粒子的飞行经验来调整飞行轨迹。

每个粒子有位置和速度这两个基本属性,可以通过算法迭代来改变这些属性,用 $x_i^{(t)}$ 和 $v_i^{(t)}$ 分别表示第 i 个粒子位置和速度的第 t 次迭代结果。

粒子的速度和位置按照如下公式更新:

$$v_{|i|}^{(t+1)} = w \cdot v_i^{(t)} + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_i - x_i^{(t)}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest - x_i^{(t)}) \quad (2)$$

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + v_i^{(t+1)} \quad (3)$$

其中, $pbest_i$ 是第 i 个粒子迄今为止找到的最佳位置, $gbest$ 是当前全局最佳位置, w 是惯性权重, c_1 和 c_2 是学习因子, r_1 和 r_2 是 $[0,1]$ 区间内的随机数,提供随机性以探索解空间。

图 1 为 D-PSO 算法的迭代流程图,先需要随机初始化粒子的位置和速度,计算每个粒子的适应度值,并更新个体最佳位置($pbest$)和全局最佳位置($gbest$)^[31],再按照上述公式更新每个粒子的速度和位置,然后重复第 2 步和第 3 步,直到完成预设的迭代次数后停止。

D-PSO 算法能够有效地搜索解空间,并逐渐靠近最优解,这种方法结合了数据的导数变化特性,有效地提升了寻找数据拐点的精确度和效率。

3 实验结果与分析

3.1 对比试验

本方法的重要部分就是通过 D-PSO 算法对数据集集中的拐点进行了识别,为了验证 D-PSO 算法的优越性,将其与文献中的遗传算法(genetic algorithm, GA)^[35-36]和模拟退火算法(simulated annealing, SA)^[37-38]进行了对比。GA 和 SA 都是经典的优化算法,同样适用于复杂的搜索问题。然而,改进的 D-PSO 算法在找到最优解的速

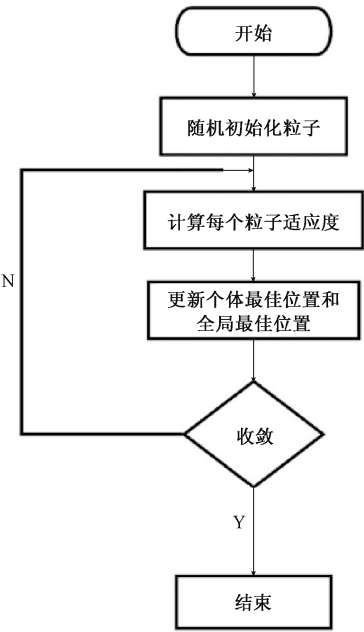


图 1 迭代流程
Fig. 1 Iteration flow chart

度和稳定性方面要优于 GA 和 SA 算法。如图 2 所示, GA 算法和 SA 算法在迭代过程中波动较大且收敛速度较慢,而 D-PSO 表现出更稳定和高效的搜索能。

由图 2 可知,从 D-PSO 算法的迭代过程,可以看到随着迭代次数的增加,算法逐渐找到并接近最优解。GA 算法和 SA 算法的迭代过程,其同样展示了解的逐步改善。通过对比 3 种算法的迭代路径,观察到 D-PSO 算法能更快地收敛到最优解,这表明在特定的问题和数据集上,D-PSO 算法具有更好的性能。

3.2 仿真实验

为了评估该方法的准确性和有效性,实验的测试数据是池州的华宇电子科技有限公司提供的 CV8011 芯

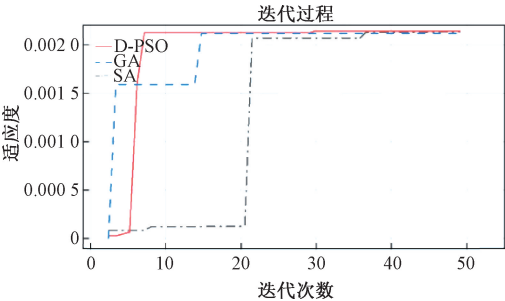


图 2 D-PSO 与 GA 算法和 SA 算法迭代过程
Fig. 2 D-PSO and GA algorithm and SA algorithm iterative process

片测试数据,CV8011 是一颗高集成、高效率、低功耗、符合 WPC 1.2 协议的无线充电接收芯片。其内部集成了高效的全同步整流器,低压降稳压器 (low-dropout regulator,LDO),可以单芯片实现非接触无线充电接收方案。将所得测试数据作为原始数据导入到仿真实验平台 Python 中。实验运行环境为 Intel i5 6300HQ CPU, 12 G 运行内存,Windows 10 系统,实际仿真平台为 Python 3.10。实验过程中,首先要选择待测参数,在选择参数进行集成电路筛选时,应该从应用需求相关性、性能影响因素、技术可行性、可测性、优先级和权重这些方面进行选择。本文选择以 IDD(A)为例进行实验,IDD(A)是集成电路的静态电流,它是集成电路生产测试和评估中的重要参数,对于判断集成电路的性能、功耗和电源管理能力具有指导意义,先将所得测试数据作为“结果保存到 Python 中,再进行后续处理。

在集成电路测试数据的预处理前,需要对参数与集成电路编号进行绑定和排序,这是为了更好地判定和输出集成电路编号。此处编写归并排序算法进行实现,将参数值和集成电路编号拼接成数组,并按照参数值对数据进行排序,如图 3 所示。

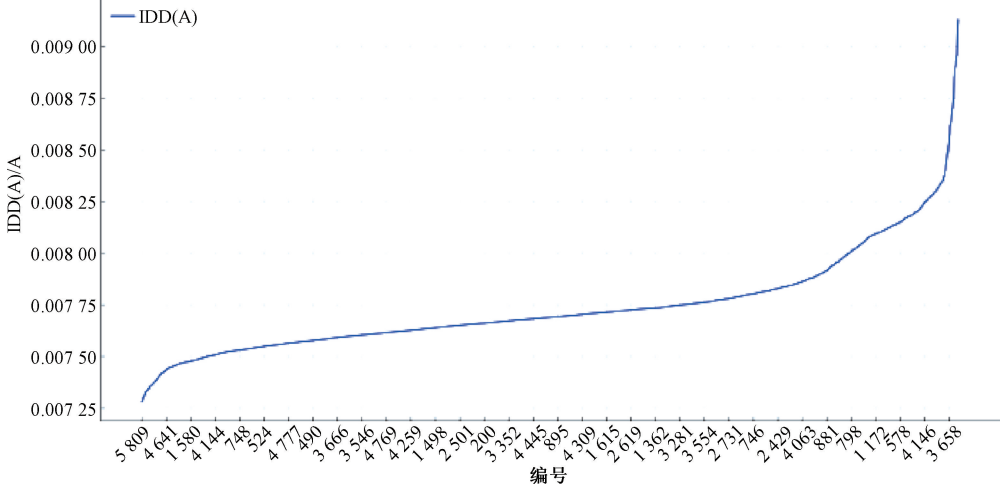


图 3 数据排序与映射
Fig. 3 Data sorting and mapping

然后利用 K-means 算法对数据进行预处理,这是为了提前删除差异大的数据,达到简化测试集和提高筛选

效率的目的。如图 4 所示,通过 K-means 算法找到了异常值,并对其进行了删除。

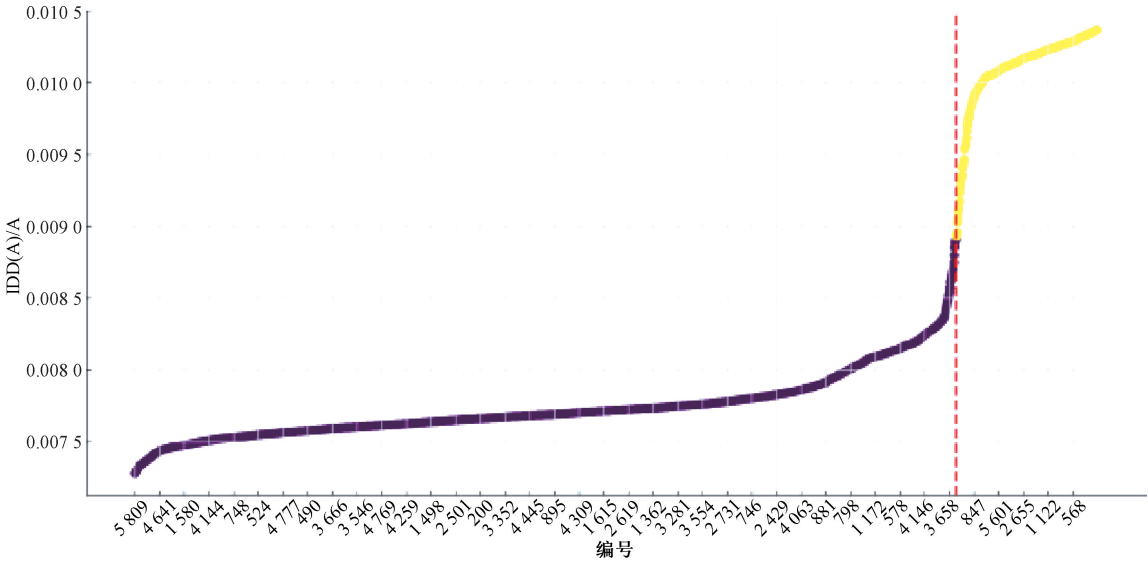


图 4 K-means 删除异常值
Fig. 4 K-means delete outliers

在进行多次实验之后,证实了本方法的可行性。图 5 为随机选取的 4 次筛选过程,其中导数“dIDD A”是通过相邻数据点的差分来获得的,它反映了数据随序号变化的速率。IDD(A)表示芯片的筛选过程和拐点的范围区间。

D-PSO 算法通过考虑数据导数的局部极值来有效识别拐点,增加了拐点检测的准确性。在实验中,D-PSO 算法显示了极高的拐点识别准确性,如图 6 所示。通过与传统方法和其他优化算法的对比,D-PSO 不仅在找到准确拐点方面表现出色,还在收敛速度和稳定性方面展现了优势。这一结果不仅证实了 D-PSO 在理论上的有效性,也展示了其在实际应用中的强大。

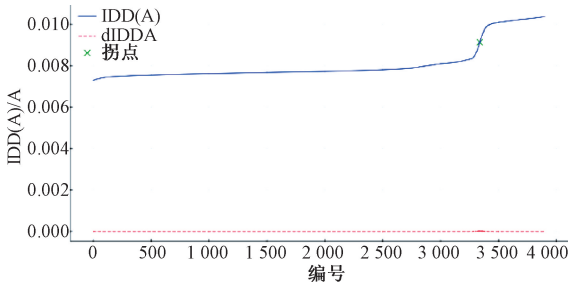


图 6 D-PSO 寻找的拐点
Fig. 6 The inflection points sought by D-PSO

变处及拐点所在位置,得到数据相近的集成电路区间。输出区间内参数数据的集成电路编号,得到最佳测试集。

从实验中可以看出,改进的 D-PSO 算法在数据拐点识别方面展现了显著的优势,通过精确计算数据导数并利用粒子群优化的搜索能力,有效地定位了数据中的关键转折点。导数分析的引入增强了对数据趋势变化的敏感性,而粒子群优化算法的并行搜索机制则确保了高效且准确的解空间探索。实验结果显示,与传统方法和其他优化算法相比,D-PSO 在拐点识别的准确性、计算效率和稳定性方面均有显著提升。这一发现不仅丰富了数据分析领域的理论工具箱,也为实际应用中复杂数据集的分析提供了新的视角和有效手段。

为了进一步验证筛选结果的正确性,此处选择筛选出的集成电路 LDO(V) 参数为例进行比较。如图 7 所示,实线为 IDD(A),虚线为 LDO(V),通过分析 LDO(V)

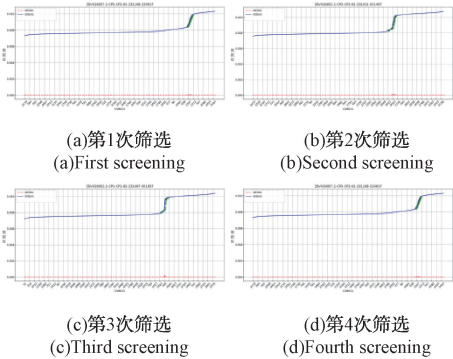


图 5 多次芯片筛选过程
Fig. 5 Multiple chip screening processes

最后运用 D-PSO 算法对处理好的数据判断数据突

波动曲线随着 $IDD(A)$ 波动的关系,观察到了筛选出的集成电路的 $LDO(V)$ 参数波动趋势与 $IDD(A)$ 相似,且

区间内的波动值不超过 0.02,说明其波动较为稳定,这也证实了筛选出的集成电路具有相似稳定性。

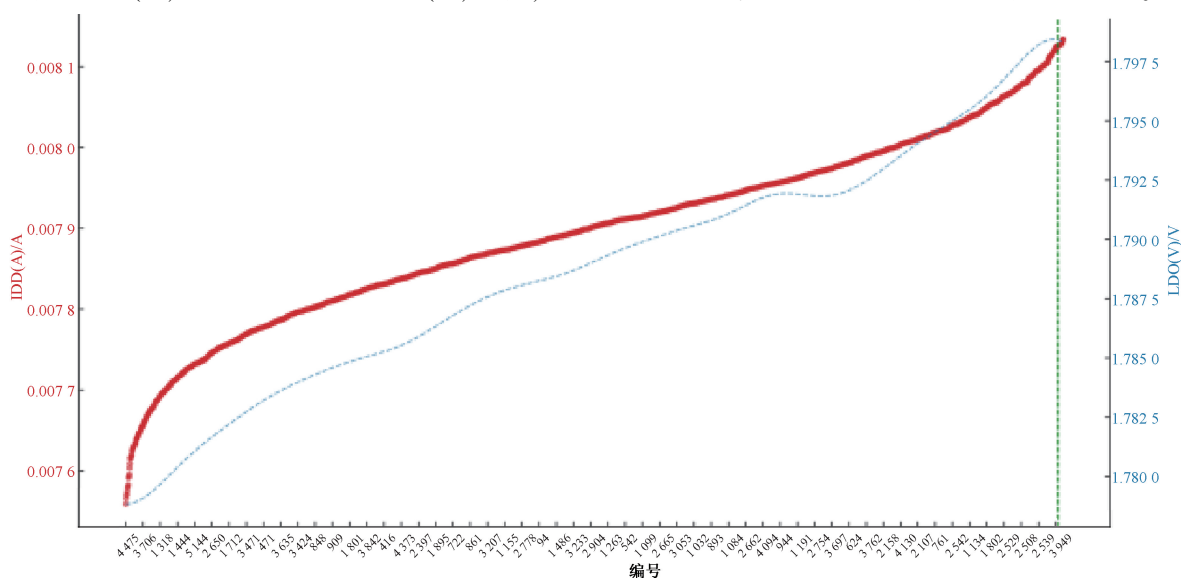


图7 其他参数验证结果

Fig. 7 Verification results of other parameters

总的来说,D-PSO 算法证明了其在处理数据拐点识别等复杂问题时的强大潜力和实用价值。

4 结 论

由于集成电路筛选成本的提高,提出 D-PSO 算法的单变量测试参数集成电路筛选方法,此方法适用于数字集成电路等具有一些关键性能参数的集成电路。该方法选择其中一个代表性参数,并利用筛选方法从数据集中选取相似度较高的数据区间,通过这一优化过程,可以确保由这批集成电路生产的机器性能具有一致性和稳定性。文中采用 K-means 算法对原始测试集进行聚类分析,删除部分差异大的数据,随后利用改进的导数结合粒子群优化算法(D-PSO)有效地定位了数据中的拐点,从而筛选出性能相似度较高的集成电路。D-PSO 算法在保持测试精度基本不变的情况下,实现了对测试集进行优化和对整个测试集进行相似性筛选的双重目的,有效降低了集成电路筛选成本。

参考文献

- [1] HOEFFINGER B. IrdS—international roadmap for devices and systems, rebooting computing, s3s [J]. NANO-CHIPS 2030: On-Chip AI for an Efficient Data-Driven World, 2020; 9-17. DOI: 10.1007/978-3-030-18338-7_2.
- [2] 朱永黎,常天庆,刘鹏. 基于 ATML 的装甲装备自动测试系统通用性设计 [J]. 价值工程, 2018, 37(31): 261-264.

- ZHU Y L, CHANG T Q, LIU P. Universal design of automatic test system for Armored equipment based on ATML [J]. Value Engineering, 2018, 37(31): 261-264.
- [3] MAYER F, SCHOTT C, BILLICH E, et al. Automatic verification of mixed-signal ATE test programs using device variation [C]. 2021 IEEE International Test Conference (ITC). IEEE, 2021: 374-379.
- [4] 彭宇,庞景月,刘大同,等. 大数据:内涵、技术体系与展望 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 469-482.
- PENG Y, PANG J Y, LIU D T, et al. Big data: Connotation, technology system and Prospect [J]. Journal of Electrical Measurement and Instrumentation, 2015, 29(4): 469-482.
- [5] BUSHNELL M, AGRAWAL V. Essentials of Electronic Testing for Digital, Memory and Mixed-Signal VLSI Circuits [M]. Springer Science & Business Media, 2004.
- [6] HUANG K, KUPP N, CARULLI J M, et al. Handling discontinuous effects in modeling spatial correlation of wafer-level analog/RF tests [C]. 2013 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). IEEE, 2013: 553-558.
- [7] 鲁文帅,尤睿,周扬,等. 基于单片 TMR 磁传感器的非侵入电流监测微系统 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 1-9.
- LU W SH, YOU R, ZHOU Y, et al. Non-invasive current monitoring microsystem based on monolithic TMR magnetic Sensor [J]. Chinese Journal of Scientific

- Instrument, 2020, 41(6): 1-9.
- [8] PAN R, ZHANG Z, LI X, et al. Black-box test-cost reduction based on Bayesian network models[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2020, 40(2): 386-399.
- [9] XU H, ZHANG J, LV Y, et al. Hybrid feature selection for wafer acceptance test parameters in semiconductor manufacturing [J]. IEEE Access, 2020, 8: 17320-17330.
- [10] LIU P, HAN J, MA Y, et al. A frequency mapping method for locating functional units inside ICs based on coaxial microscope [J]. Electronics Letters, 2022, 58(3): 115-117.
- [11] 张鲁萍. 超大规模集成电路适应性测试方法综述[J]. 数字技术与应用, 2023, 41(9): 134-136.
- ZHANG L P. Review of adaptive testing methods for VLSI [J]. Digital Technology and Applications, 2019, 41(9): 134-136.
- [12] 詹文法, 邵志伟. 一种集成电路测试流程分级动态调整方法[J]. 电子学报, 2020, 48(8): 1623-1630.
- ZHAN W F, SHAO ZH W. A hierarchical dynamic adjustment method for Integrated circuit test flow [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 48(8): 1623-1630.
- [13] SINGH A D. An adaptive approach to minimize system level tests targeting low voltage DVFS failures [C]. 2019 IEEE International Test Conference (ITC). IEEE, 2019: 1-10.
- [14] SHINTANI M, INOUE M, NAKAMURA T, et al. Wafer-level variation modeling for multi-site RF IC testing via hierarchical Gaussian process [C]. 2021 IEEE International Test Conference (ITC). IEEE, 2021: 103-112.
- [15] HUANG X, QIN M, XU R, et al. Adaptive nn-based root cause analysis in volume diagnosis for yield improvement [C]. 2021 IEEE International Test Conference (ITC). IEEE, 2021: 30-36.
- [16] 王力, 张露露. 基于 IHHO-BP 神经网络的模拟电路故障诊断[J/OL]. 电子测量与仪器学报, 1-13 [2024-01-19].
- WANG L, ZHANG L L. Fault diagnosis of analog circuit based on IHHO-BP neural network [J/OL]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 1-13 [2024-01-19].
- [17] 詹文法, 张鲁萍, 江健生. 基于联合分类的有效测试模式重选方法 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44 (3): 155-162.
- ZHAN W F, ZHANG L P, JIANG J SH. Effective test mode reselecting method based on joint classification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44 (3): 155-162.
- [18] 梁华国, 曲金星, 潘宇琦, 等. 低测试逃逸的晶圆级适应性测试方法 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45 (9): 3393-3400.
- LIANG H G, QU J X, PAN Y Q, et al. Wafer level adaptability testing method with low test escape [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2023, 45(9): 3393-3400.
- [19] 姚博文, 彭喜元, 于希明, 等. 深度神经网络的自适应联合压缩方法 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44 (5): 21-32.
- YAO B W, PENG X Y, YU X M, et al. Adaptive joint compression method of deep neural networks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44 (5): 21-32.
- [20] 姜月明, 俞洋, 彭喜元. 基于关键特征提取和 Elman 神经网络的开关电源多参数辨识 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 11-19.
- JIANG Y M, YU Y, PENG X Y. Multi-parameter Identification of switching power supply based on key Feature extraction and Elman Neural Network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 11-19.
- [21] 侯旺超. 低成本集成电路适应性测试方法研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- HOU W CH. Research on adaptability test method of low-cost integrated circuits [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [22] 俞立平, 潘伟波. 基于 K-means 和 PLS-DA 的期刊评价关键指标研究 [J]. 农业图书情报学报, 2022, 34(12): 55-64.
- YU L P, PAN W B. Research on key indexes of journal Evaluation based on K-means and PLS-DA [J]. Journal of Library and Information Science in Agriculture, 2012, 34(12): 55-64.
- [23] 袁沥平. 基于 K-means 和 TextRank 的中文自动文摘算法研究 [D]. 成都: 四川师范大学, 2021.
- YUAN L P. Research on Chinese automatic summarization algorithm based on K-means and TextRank [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2021.
- [24] 胡力. 基于高效功放的调制技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- HU L. Research on Modulation technology based on high efficiency power amplifier [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [25] 唐欣. 优化的 K-means 聚类算法在客户细分中的应用研究 [J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(9): 194-197.
- TANG X. Research on Application of optimized K-means clustering algorithm in customer segmentation [J].

- Intelligent Computer and Applications, 2023, 13 (9): 194-197.
- [26] 孟祥宇. 综合能源系统中多微网的混合能源共享[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- MENG X Y. Hybrid energy sharing of multi-micro grid in integrated energy system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [27] 刘建国. 混联腕式康复机构的设计及性能分析[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- LIU J G. Design and performance analysis of hybrid wrist rehabilitation institution [D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [28] 赵全友, 潘保昌, 郑胜林. 基于群评价的带变异粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45 (12): 57-59, 62.
- ZHAO Q Y, PAN B CH, ZHENG SH L. Particle swarm optimization with variation based on group evaluation [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45 (12): 57-59, 62.
- [29] 宋功伟. 大规模环境下的粒子群优化算法信息交互机制研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- SONG G W. Research on information interaction mechanism of particle swarm optimization algorithm in large-scale environment [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2023.
- [30] 余深泽. 基于实时数据的电动车电池续航预测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- YU SH Z. Research on electric vehicle battery life prediction method based on real-time data [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [31] 曹旭宁, 陈思泽, 俞杰, 等. 基于粒子群优化的自适应对比度增强算法在中子照相中的应用[J]. 核技术, 2021, 44(7): 69-77.
- CAO X N, CHEN S Z, YU J, et al. Application of adaptive contrast enhancement algorithm based on particle swarm optimization in neutron photography [J]. Nuclear Technology, 21, 44(7): 69-77.
- [32] 伍大清. 基于合作协同演化的微粒群计算及其应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
- WU D Q. Research on particle swarm computing and its application based on cooperative coevolution [D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [33] 郭文. 中高速地铁车辆轨轨系统动力学研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- GUO W. Study on dynamics of boot rail system of medium and high speed subway vehicles [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021.
- [34] 张柔. 血液透析器离心机加工工艺参数优化研究与实现[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.
- ZHANG R. Research and implementation on optimization of processing parameters of hemodialyzer Centrifuge [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [35] 温廷新, 白云鹤. 融合 RF-GA-XGBoost 和 SHAP 的虚假新闻群体互动质量可解释模型[J/OL]. 数据分析与知识发现, 1-18 [2024-01-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1478.G2.20240117.1108.018.html>.
- WEN T X, BAI Y H. Interpretable model of interactive quality of fake news groups combining RF-GA-XGBoost and SHAP [J/OL]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 1-18 [2024-01-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1478.G2.20240117.1108.018.html>.
- [36] 史墨可, 路妍, 颜潭成, 等. 基于 GA-BP 神经网络的宽带激光熔覆裂纹缺陷预测[J/OL]. 热加工工艺, 1-6 [2024-01-18]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20223162>.
- SHI M K, LU Y, JIE T CH, et al. Prediction of crack defects in broadband laser cladding based on GA-BP neural network [J/OL]. Hot Working Technology, 1-6 [2024-01-18]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20223162>.
- [37] 蔡杨, 王春飞, 钱小勇. 基于模拟退火算法的数控机床热误差补偿方法[J]. 机械工程师, 2023 (12): 116-119.
- CAI Y, WANG CH F, QIAN X Y. Thermal error compensation method for NC machine tools based on simulated annealing algorithm [J]. Mechanical Engineer, 2023(12): 116-119.
- [38] 石运琪, 王英志, 唐雁峰. 基于模拟退火算法的微流控芯片结构优化设计[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(11): 85-88, 92.
- SHI Y Q, WANG Y ZH, TANG Y F. Optimal design of microfluidic chip structure based on simulated annealing algorithm [J]. Sensors and Microsystems, 2019, 42(11): 85-88, 92.

作者简介



詹文法, 2000 年于安庆师范学院获得学士学位, 2004 年于合肥工业大学获得硕士学位, 2009 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为安庆师范大学教授, 主要研究方向为测试数据压缩、ATPG 算法等。

E-mail: zhanwf@aqnu.edu.cn

Zhan Wenfa received his B. Sc. degree from Anqing Normal University in 2000, M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2004 and Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2009, respectively. Now he is a professor in

Anqing Normal University. His main research interests include test data compression and ATPG algorithm, etc.



余储贤 (通信作者), 2021 年于安庆师范大学获得学士学位, 现为安庆师范大学硕士研究生, 主要研究方向为自适应测试算法。

E-mail: 963519861@qq.com

Yu Chuxian (Corresponding author)

received his B. Sc. degree from Anqing Normal University in 2021. Now he is a M. Sc. candidate at Anqing Normal University. His main research interest includes adaptive testing.



胡心怡, 2020 年于东南大学成贤学院获得学士学位, 现为安庆师范大学硕士研究生, 主要研究方向为集成电路测试设备稳定性。

E-mail: 734389103@qq.com

Hu Xinyi received her B. Sc. degree from

Southeast University Chengxian College in 2020. Now she is a M. Sc. candidate at Anqing Normal University. Her main research interest includes IC test equipment.

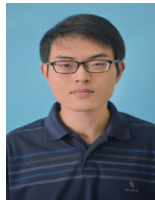


郑江云, 1996 年于北京理工大学获得学士学位, 2007 年于合肥工业大学获得硕士学位, 现为安庆师范大学副教授, 主要研究方向为集成电路测试。

E-mail: 2351050199@ aqq.com

Zheng Jiangyun received her B. Sc.

degree from Beijing Institute of Technology in 1996, M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2007. Now she is an associate professor at Anqing Normal University. Her main research interest includes integrated circuit testing.



张庆平, 2010 年于合肥工业大学获得学士学位, 2015 年于中国科学技术大学获得博士学位, 现为安庆师范大学副教授, 主要研究方向为 FPGA 嵌入式教学。

E-mail: ttzgysrflh@aliyun.com

Zhang Qingping received his B. Sc.

degree from Hefei University of Technology in 2010, Ph. D. degree from University of Science and Technology of China in 2015, respectively. Now he is an associate professor at Anqing Normal University. His main research interest includes FPGA embedded teaching.



蔡雪原, 2005 年于兰州大学获得学士学位, 2014 年于兰州大学获得博士学位, 现为安庆师范大学讲师, 主要研究方向为集成电路封装测试和半导体器件模型。

E-mail: caxy07@lzu.edu.cn

Cai Xueyuan received his B. Sc. degree from Lanzhou University in 2005 and Ph. D. degree from Lanzhou University in 2014, respectively. Now he is a lecturer in Anqing Normal University. His main research interests include IC packaging & testing and semiconductor device modeling.