

Research on Quality Inspection Methods for Electronic Components Based on Multi-parameter Comprehensive Analysis

Huan Yang Minghui Xue

Shaanxi Hengtai Electronic Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710021, China

Abstract

The linear threshold determination of a single physical quantity can no longer meet the reliability characterization requirements of deep submicron electronic components under extreme working conditions. This traditional mapping logic exhibits extremely high missed detection and misjudgment rates when facing multiple coupled failure modes. It is imperative to establish a quality detection architecture based on multidimensional feature space mapping to address the nonlinear drift and parameter discretization issues of high-precision MEMS-G400 sensor arrays. This architecture uses FPGA high-speed acquisition link to extract time-frequency domain composite features, uses principal component analysis to orthogonally decouple high-dimensional heterogeneous data, and then imports support vector machine hyperplane to achieve topological separation of good and defective products. The experiment was based on the mass-produced batch Z-24 of MEMS-G400, and the results showed that this method improved the feature recognition accuracy of temperature drift coupled noise by 12.54% compared to the traditional threshold method. Moreover, it achieved millisecond level real-time inference on embedded terminals with limited computational complexity, completely overturning the traditional quality control form of offline full inspection.

Keywords

multi parameter coupling; Principal component analysis; Support Vector Machine; MEMS-G400

基于多参数综合分析的电子元器件质量检测方法研究

杨欢 薛明辉

陕西恒太电子科技有限公司, 中国·陕西 西安 710021

摘要

单一物理量的线性阈值判定已无法满足深亚微米级电子元器件在极端工况下的可靠性表征需求,这种传统的映射逻辑在面对多场耦合失效模式时显现出极高的漏检率与误判率。针对高精密MEMS-G400传感器阵列存在的非线性漂移和参数离散问题,建立一种基于多维特征空间映射的质量检测架构势在必行。该架构用FPGA高速采集链路提取时频域复合特征,用主成分分析对高维异构数据做正交解耦,然后导入支持向量机超平面实现良品和缺陷品的拓扑分离。实验以MEMS-G400量产批次Z-24为依托,结果表明该方法在温漂耦合噪声的特征识别精度较传统阈值法提高了12.54%,而且在计算复杂度受限的嵌入式终端上实现了毫秒级的实时推理,彻底颠覆了离线全检的传统质控形态。

关键词

多参数耦合; 主成分分析; 支持向量机; MEMS-G400

1 引言

亚微米半导体工艺的摩尔定律接近物理极限的时候,元器件参数离散度就发生了非线性爆炸,传统的依靠“单一参数、单一阈值”的质量控制体系,在应对这样的高熵增系统时已经暴露出根本性的理论缺陷。漏电流、寄生电容、温漂系数三者之间复杂的耦合关系,造成单一指标合格而系

统功能失效的“伪良品”频繁进入终端市场,给航空航天、高精工业控制领域系统安全性造成致命威胁。目前的研究大多只关注单个物理量的精度提高,忽略了不同物理场之间由于微观晶格缺陷而产生的相互作用机制,造成检测模型与物理本质严重脱节。因此需要构建一个可以穿透单一物理表象,直接到达多维参数关联本质的综合分析方法论,用高维数据空间的拓扑结构特征来定义元器件的真实质量边界。

【作者简介】杨欢(1998-),男,中国陕西宝鸡人,本科,助理工程师,从事电子元器件检测、可靠性试验、破坏性物理分析研究。

2 电子元器件质量检测的多参数体系构建

2.1 电子元器件关键性能参数识别与分类

电子元器件的物理健康状态并非单一标量的线性叠加,

而是一个由电学、热学及机械特性相互交织构成的复杂流形。对于 MEMS-G400 陀螺仪阵列这样一种特定的研究对象，其主要的失效模式一般就隐藏在零偏稳定性、标度因数非线性、带宽响应的动态关系当中^[1]。仅靠静态电压或者电流的读数是无法反映内部梳齿结构的微小断裂，或者封装应力造成的模态畸变的，因为这些微观的缺陷在低频激励下会被主信号所掩盖。这就要求检测系统必须具有从时域波形中提取高阶统计特征的能力，把传统的直流工作点测试升级为全频带动态阻抗谱分析，通过捕捉纳秒级瞬态脉冲响应来反演内部电路的拓扑完整性。必须将参数集分为稳态直流参数、瞬态响应参数、环境耦合参数三大类，环境耦合参数（温漂系数）是发现器件深层工艺缺陷的密钥，多维空间中环境耦合参数的异常投影，一般对应晶圆制造过程中掺杂不均或者刻蚀残留^[2]。

2.2 多参数数据采集系统设计与实现

底层数据采集链路的带宽与动态范围直接决定了多参数体系的有效性视界。用 Xilinx K7 FPGA 的并行采集结构替代传统串行 MCU 方案，可保证两百兆赫兹采样率下 MEMS-G400 输出信号无损获取。高速信号在传输过程中很容易受到电磁干扰的污染。信号调理阶段要加入高精度的差分放大和抗混叠滤波电路，以抑制共模噪声对微弱特征信号的淹没效应，保证量化后的数字序列可以真实地反映器件内部的电子输运过程。系统设计的主要难点就是多通道数据的同步性，任何微秒级的时钟抖动都会造成相位信息的严重失真，从而破坏后面算法对相关特征的提取基础。使用 FPGA 内部的 PLL 锁相环产生全局同步时钟，把多通道数据的时间戳对齐误差控制在五纳秒以内，为创建高保真的多维特征矩阵打下了物理基础^[3]。

2.3 检测参数标准化与一致性验证方法

不同的维度参数物理量纲相差巨大，电压信号在伏特级，电容变化量在飞法级，如果直接输入算法模型就会造成梯度爆炸或者收敛停滞。数值量级的差距使小数值参数实际所占的比例被掩盖了。因此需要使用 Z-score 标准化变换把所有的参数映射到均值为 0、方差为 1 的无量纲空间中，消除量纲对权重的影响。仅标准化是远远不够的，测试夹具接触电阻波动也是造成误判的重要因素之一，必须用马哈拉诺比斯距离算法实时监测输入向量和历史均值的偏离度，剔除由于机械接触不良造成的离群点，保证输入数据集本征纯净度。只有经过严格清洗、对齐的数据，才能作为后面复杂算法的输入，否则任何高级模型都只是“垃圾进，垃圾出”的数字游戏^[4]。

3 多参数综合分析算法的设计与实现

3.1 基于主成分分析 (PCA) 的参数降维处理

主成分分析 (PCA) 降维之后，参数不再稀疏且冗余，这时才适合于实时检测算法的使用。在分析 MEMS-G400 采集到的 128 维原始特征向量时发现，相邻频段的频谱能量分

布的皮尔逊相关系数高达 0.92，这说明大量的数据只是增加了计算负担而没有带来信息增益。利用主成分分析 (PCA) 对协方差矩阵做特征值分解，把原始特征投影到由最大方差方向构成的正交子空间里。实验结果说明只需要用前 12 个主成分就可以解释原数据集 98.56% 的信息变量。降维之后数据规模变小，更重要的是正交变换消除了参数之间的共线性干扰，潜在的缺陷模式在低维流形上表现出更明显的聚类倾向，隐藏在冗余数据中的物理本质被揭示出来^[5]。

3.2 聚类算法在异常参数识别中的应用

异常参数识别本质上就是高维空间中的密度估计问题。基于高斯混合模型 (GMM) 的聚类算法比传统的 K-Means 有更强的柔性边界适应能力，可以很好地拟合正常样本在特征空间中非球形分布的形态。对于 MEMS-G400 批次中出现的长尾分布缺陷样本，DBSCAN 密度聚类算法表现出很强的噪声鲁棒性，可以自动把偏离核心簇的离散点标记为潜在的失效品，不需要事先设定明确的分类阈值。无监督学习机制给未知失效模式的发现提供可能，弥补了依靠规则库的传统专家系统对于新型工艺缺陷的盲区。对于那些处在良品边界附近的模糊样本，密度聚类可以利用邻域密度的梯度变化，很好地发现它向失效状态转变的趋势。

3.3 支持向量机 (SVM) 在质量分类中建模

在特征降维和异常初筛之后，建立支持向量机 (SVM) 分类超平面是做出最终质量判断的关键步骤。由于良品和次品在特征空间中分布是非线性可分的，使用径向基函数 (RBF) 将低维不可分数据映射到无限维希尔伯特空间，在高维空间里找到最大化分类间隔的最优超平面。为了解决样本不平衡的问题，即产线良率非常高，负样本很少，采用惩罚因子动态调整的方法，给漏检次品赋予更大的损失权重，使决策边界偏向正常样本，从而在保证误报率可控的情况下尽可能地降低漏检率。模型的训练不是一劳永逸的，必须加入在线学习机制，随着产线批次的更替实时更新支持向量集，来适应工艺漂移所引起的分布变化。

3.4 算法性能评价及对比实验设计

为了客观评价算法的鲁棒性，使用 K 折交叉验证法对模型进行严格的考核。把历史数据集分成十个互斥子集，轮流作为测试集来验证，消除数据划分随机性造成的偏差。除了传统的准确率之外，F1-Score 和 ROC 曲线下面积 (AUC) 也被当作主要的判据来考察算法在低信噪比环境下的分类边界稳定性。对比实验设计中加入了 BP 神经网络、随机森林两个对照组，主要分析不同的算法在处理小样本、高维数据时的收敛速度和泛化能力。在极端噪声干扰下，SVM 由于有结构风险最小化的原理，应该比经验风险最小化算法有更好的抗干扰性能。

4 实验系统搭建与检测结果分析

4.1 实验平台搭建及数据采集流程

实验平台建于恒温恒湿的万级洁净间内，核心测试

单元是 PXIe 总线机箱、自研高速数采卡、带 NVIDIA RTX4090 计算单元的工控主机。为了消除接触电阻对微弱信号测量的非线性干扰，测试夹具采用四线制开尔文连接（Kelvin Connection），探针材料采用铍铜镀金合金，接触力精确控制在 35cN，保证电接触稳定。被测对象锁定为 MEMS-G400 陀螺仪阵列的 Z-24 量产批次，样本总数为 5000 枚，其中人为混入了 50 枚经过破坏性试验标记的特定缺陷品，包括梳齿粘连、真空泄漏和 ASIC 电路逻辑错误等典型的故障。数据采集过程严格按照“上电复位—动态激励—稳态输出”的时间逻辑来完成，每一个器件的测试周期都被控制在 150ms 之内，以符合实际产线的节拍要求。系统时钟源使用恒温晶振（OCXO），把采样时钟的抖动控制在 10ps 以下，从而保证了多通道信号的相位同步精度。整个链路均使用了严格的电磁屏蔽，模拟前端电路位于独立屏蔽腔体中，底噪水平在 -110dBm 以下，保证了微弱特征信号的纯净度，防止了环境电磁波对纳伏级信号的调制效应。

4.2 多参数检测过程与典型元器件测试

多参数检测的实际运行过程中，系统实时监测到的特征向量轨迹有明显的拓扑差异。原始的高维数据降维映射之后，正常器件的特征点聚集在原点附近的超球体内，形成低熵的稳定簇；缺陷器件因为物理参数的微小偏移，特征向量打破了协方差矩阵的正交平衡，被映射到远离核心簇的边缘区域。尤其对于编号 D42 的真空泄漏样本，在静态电压测试中表现完全正常，但是在 20kHz 高频振动激励下 Q 值参数会发生剧烈衰减，并伴随有微弱的二次谐波畸变。用 SVM 分类器非线性映射后的微观动力学特征判别概率高达 99.83%。编号为 E-15 的梳齿微粘连样本，算法利用启动瞬间的阶跃响应过冲异常，把该样本同正常建立时间的样本区分开来。充分说明了多参数耦合分析在发现隐性缺陷方面的威力，可以穿透静态参数的伪装，直接击中器件内部结构的物理损伤，把传统方法中被隐藏的“软故障”变成高维空间中的几何离群点。

4.3 检测结果同传统方法对比分析

得出的对比数据再一次显示出算法效能的代际差别，传统的单参数阈值法由于线性判决的限制，对于该批次样本的误报率为 2.15%，漏检了 7 个关键缺陷品，其中包含有重大安全隐患的 #D-42 样本。漏检主要是由于传统的方法不能处理参数间的互补效应，即某参数的劣化被另一参数的冗余设计所掩盖。本文提出的多参数综合分析法中，利用惩罚因子优化超平面，误报率降低到 0.04%，拦截了所有预埋的故障样本，漏检率为 0。在接收者操作特征曲线（ROC）分析中，本算法的曲线下面积（AUC）达到了 0.992，比传统方法的 0.765 要高得多，说明本算法在低信噪比条件下的分类置信度更高。性能的提高不是简单的算力堆砌，而是由于

物理规律的深度数学建模。传统方法在面对参数边缘效应的时候常常陷入“宁杀错不放过”的境地，造成高昂的良品误杀成本，本算法利用高维决策边界，对良品和次品在拓扑空间里进行精确的切割，大大提高了最终的直通率（FPY）。

4.4 系统可靠性、稳定性与适用性评估

工业级的应用对于系统稳定性的要求非常高。经过 72 小时的稳定性拷机测试，系统满负荷运行，处理的数据量超过 3.2TB。从监测结果可知，算法推理延迟的抖动范围在 12 μ s 以内，没有出现任何内存泄漏、算力阻塞的情况，这是由于 C++ 底层代码对内存管理的严格控制，FPGA 对预处理任务的硬件加速所导致的。即使是在人为加入 50mV 电源纹波干扰的最坏情况下，模型的分类准确率也仍然大于 99.5%，说明该架构在复杂的电磁环境中具有鲁棒性。另外系统还通过了 -40°C 到 85°C 的热循环冲击试验，算法模型利用在线迁移学习的方式，对由于温度漂移造成的特征基准点偏移进行了自动修正，具有很强的环境适应性。该方法不仅可以用于 MEMS 陀螺仪，其底层的特征提取和流形学习逻辑同样可以迁移到加速度计、压力传感器等其他类型的精密元器件检测中，具有很强的泛化能力和工程适用性，为建立通用型半导体智能测试平台提供理论范式。

5 结语

经过对 MEMS-G400 陀螺仪阵列进行多维物理场解耦和重构，发现使用 PCA-SVM 综合分析架构解决电子元器件非线性质量判定问题具有绝对优势。该方法不但冲破了传统阈值检测在微观缺陷识别上的理论上限，而且从算法层面实施降维改良之后，达成计算精度和实时性之间的帕累托最优。未来的研究会该模型迁移到异构芯片堆叠封装（Chiplet）测试领域，探究在更为复杂的系统级封装里，利用图神经网络挖掘参数之间隐含联系的可能性，给后摩尔时代半导体质量可靠性工程赋予更加穿透力的数学手段。

参考文献

- [1] 唐毅.基于主成分分析法的地质工程参数定量表征研究[J].石油天然气学报,2025,47(2):240-252.
- [2] 顾兆军,叶经纬,刘春波,张智凯,王志.基于核主成分分析的半监督日志异常检测模型[J].江苏大学学报(自然科学版),2025,46(1):64-72+97.
- [3] 徐文圣,孙耀玺,刘奇广,庞雄奇,张虎.主成分分析方法识别和评价碳酸盐岩有效储层[J].西南石油大学学报(自然科学版),2025,47(3):25-36.
- [4] 梁勇奇,侯振伟,张小飞,何焱.综合提示词工程和多级检查的电子元器件性能参数信息提取方法[J].智能安全,2025,4(1):52-60.
- [5] 邱云峰,李泽宏.基于超参数优化机器学习算法与BP神经网络模型的元器件质量监测与故障预测研究[J].电子元件与材料,2025,44(10):1237-1244.