

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003570

基于改进最小二乘支持向量机的 FPGA 焊点失效故障评估方法研究^{*}

佐磊^{1,2} 徐相相¹ 陈昊¹ 姜学义¹ 朱良帅¹(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 可再生能源接入电网技术
国家地方联合工程实验室 合肥 230009)

摘要:针对现有现场可编程逻辑门阵列(FPGA)焊接点失效故障评估方法存在的无法提供准确的信息、样本数据少、时效性不高等问题,提出结合遗传算法(GA)改进最小二乘支持向量机(GA-LS-SVM)的FPGA焊接点失效故障评估方法。建立SJ BIST测试模型,选择合适的外接小电容,通过改变不同工作频率下可变电阻的大小模拟焊点阻值,获得基于小电容电压变化的故障数据,建立电容低电平的持续时间、电容测试工作频率和焊接点电阻值的三维数据图;最后利用遗传算法优化的最小二乘支持向量机对所得到的数据进行状态评估,由三维数据图可知,健康的FPGA焊接点与断裂的FPGA焊接点在低电平的持续时间具有明显差异。仿真实验结果表明,所提出的GA-LS-SVM方法焊接点健康状态等级分类的总准确率达到97.2%,相较于BP神经网络、标准SVM及LS-SVM方法分别提高了17.9%、13%及7.2%。

关键词: FPGA; 最小二乘支持向量机; 遗传算法; 焊接点失效; SJ BIST 测试

中图分类号: TN335 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3030

Research on FPGA solder joint failure evaluation method based on improved least square support vector machine

Zuo Lei^{1,2} Xu Xiangxiang¹ Chen Hao¹ Jiang Xueyi¹ Zhu Liangshuai¹

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Renewable Energy Grid Technology,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the problems in the current FPGA welding point failure assessment methods, such as the inability to provide accurate information, lack of sample data and low timeliness, combined with genetic algorithm (GA), an improved FPGA welding point failure assessment method based on the least square support vector machine (GA-LS-SVM) was proposed. Establish the SJ BIST test model, select the appropriate small external capacitor, simulate the welding spot resistance value by changing the variable resistor size at different operating frequencies, obtain the fault data based on the voltage change of small capacitor, and establish the three-dimensional data graph of the duration of capacitor low level, capacitor test working frequency and welding point resistance value; Finally using genetic algorithm to optimize the least squares support vector machine (SVM) to state evaluation of the obtained data, according to the three-dimensional data graph, there is a significant difference in the duration of low-level between healthy FPGA solder joints and broken FPGA solder joints. The simulation results show that the proposed GA-LA-SVM method has an overall accuracy rate of 97.2%, which is 17.9%, 13% and 7.2% higher than BPNN, standard SVM and LS-SVM methods.

Keywords: FPGA; least squares support vector machine; genetic algorithm; solder joint failure; SJ BIST test

收稿日期: 2020-10-26 Received Date: 2020-10-26

^{*} 基金项目: 装备预先研究重点项目(41402040301)、国家重点研发计划(2016YFF0102200)、国家自然科学基金重点项目(51637004)、国家自然科学基金(51777050)项目资助

0 引言

集成电路技术发展越来越快,BGA 封装型现场可编程逻辑门阵列(FPGA)凭借着其功能强大、开发周期短、体积不大等优点越来越多的应用到空间技术、移动通信、雷达电子等领域^[1]。BGA 封装型 FPGA 的焊接球直径为 0.6 mm,间距为 1.0 mm,焊接球的连接稳定极为重要。然而,焊接球裂缝、焊接球断裂和缺少焊接球,以及 FPGA 在生产过程中遇到的热应力、机械应力、电应力等因素可能会导致焊接点的连接失效^[2-3]。因此,FPGA 焊点失效故障评估方法成为提高 FPGA 可靠性亟需解决的关键技术难题。

当前,支持向量机(SVM)在集成电路故障诊断评估具有一定的应用,取得了较好的效果,SVM 是一种基于统计理论的机器学习方法。最小二乘支持向量机(LS-SVM)是标准 SVM 的改进,能够通过构造新的二次损失函数将 SVM 二次规划问题变成线性方程,提高了支持向量机的求解速度和精度,在故障诊断和状态评估等方面得到广泛应用^[4-6]。对于 LS-SVM 参数的确定是一个非常重要的问题,因此为了快速准确的对 FPGA 焊接点故障进行分类,采用遗传算法(genetic algorithm,GA)对 LS-SVM 的参数进行优化。

文献[7-12]对 FPGA 焊接点健康状态进行评估,采用某个焊点的阻抗值作为临界点,大于该临界点则为故障态,小于该临界点则为正常态,但在实际测试中较难准确获取所需的焊点阻抗值,限制了方法的普适性。文献[13-15]在不改变外接电容的情况下对已损坏的焊接点电阻 50~500 Ω 的阻抗信息进行监测,得到焊接点的健康信息,对已经损坏的焊接点的测试,得到的样本数据少,使得故障评估的准确性受限。对已经损坏或者没有损坏的焊接点的状态评估的时效性和准确性不高。

为了解决上述出现的缺陷,本文提出了基于改进 LS-SVM 的 FPGA 焊点失效故障评估方法。根据 FPGA 的特性,利用一个内建自测试(BIST)电路对多个焊接点同时进行测量,通过人为改变电阻值(模拟焊接点处的阻值大小)的实验测试,同时对测量得到的数据利用 MATLAB 建立电容低电平的持续时间、电容测试工作频率和焊接点电阻值的三维数据图。同时利用改进的 LS-SVM 方法精准训练评估焊接点电阻的故障信息,通过不断的数据训练、数据测试得到 LS-SVM 的最优参数值,结果显示焊接点健康状态等级分类的总准确率达到 97.2%,相较于 BP 神经网络、SVM 及 LS-SVM 方法准确率明显提高。证明实验和评估结果的准确性,进而对其健康状态进行更为准确的评估。

1 FPGA 焊接连接失效机理

FPGA 焊接点故障失效主要是由于 BGA 焊接盘与 PCB 印制板中间焊接点不充分接触,产生大大小小的空洞。焊盘的协调以及焊接过程中的不充分也就造成了焊盘开裂和少部分开裂的失效故障^[16]。

在器件生产运输以及安装过程中,FPGA 焊点失效是由多种因素造成的,因为从 PCB 板制成到与焊接盘连接到一起,这个过程是由许多的工作细节和繁杂的步骤拼凑而成的,而对于每个环节之间都是有联系的,只要有任何一个环节出现错误,就会导致最终焊点失效的问题。当焊接完成后,在器件储存、运输、使用的过程中也会由于各种应力的累积作用而产生失效。经过多方考证,整体把各种因素分成应力相关的失效和制造生产相关的因素两大类。焊接球在 PCB 板上的位置如图 1 所示。

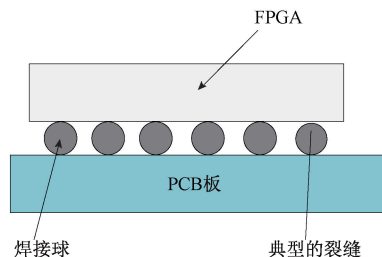


图1 焊接球在 PCB 板上的裂缝位置

Fig. 1 Crack position of welded ball on PCB board

1.1 制造生产因素

有数据显示,78%的硬件失效原因是由于焊接时的操作不当和贴片物料的错放导致的^[17]。

案例 1,焊接师傅由于对焊接时间和温度的控制不当,导致 FPGA 中焊接盘与 PCB 板之间的焊接点锡球因为高温而变形,如果焊接锡球因为变形而没有和 PCB 接触,就会导致某一信号的意外断开,从而造成 FPGA 的功能工作异常。

案例 2,FPGA 周围存在着较多的 I/O 缓冲电路和一些较高的部件,在焊接过程中多余的焊锡搭在了别的电路引线上,会造成部分短路,也会造成 FPGA 的工作异常。

案例 3,BGA 封装焊盘周围油墨不均匀导致短路,当印制板裸露在空气中时,空气中的一些物质会对镀层造成污染,如果长时间放置,焊盘的质量将会大打折扣。

1.2 应力相关的失效

FPGA 在生产过程中会遇到热应力、机械应力、电应力等因素的影响,在运输过程中会受到机械应力、震动应力等因素的影响,在储存过程中会受到化学应力、机械应

力的影响,当然在加工、使用、安装等过程中也会受到各种各样应力的影响,主要会发生物理和化学方面的变化。

在物理方面,无论是震动应力,器件受热膨胀还是环境中的其他应力,在这些应力的共同作用下,持续对器件造成损伤,当造成的损伤达到一定程度便会形成机械故障^[18]。

在化学方面,在安装使用或者储存过程中,BGA 焊接盘与 PCB 的焊接界面上会有一些金属化合物的生成,从而造成焊点电阻增大或者减少,加快焊点的失效速度,在 FPGA 通电过程中,由于电应力的作用下,会产生焊点空洞,一定数量的空洞聚集到一起,便会造成焊点处的失效故障。

在焊接失效中,由于物理应力和化学应力的共同作用下,则会造成焊接球出现几种故障类型,其中最常见的是为焊接球裂缝、焊接球断裂和缺少焊接球。

3 种类型随着时间的推移依次发生,焊接部位由于物理应力和化学应力的作用下造成的损伤不断累积,刚开始会出现裂缝,裂缝经常会出现 BGA 焊盘与 PCB 印制板焊接的边缘,会造成其部分断开。有了裂缝,在应力的持续下,损伤也在不断积累,积累到一定程度便会导致焊接球的断裂,这种断裂相较于裂缝的危害更进一步,会完全导致焊接球与 PCB 印制板的断开,发生长时间的开路故障。继续加大机械应力,将会把断裂的焊接球发生错位,此时焊接球所在位置的引脚会永久失效。

当焊接球发生裂纹、断裂、错位时,将会使焊点的阻抗值逐渐升高,当产生焊接球错位,也就是焊点与 BGA 焊接盘和 PCB 印制板彻底断开,焊点的阻抗值会变成无穷大。

1.3 焊接点电阻对 FPGA 失效的影响

图 2 所示为 FPGA 的焊接点处的模型图和示意图,焊接球位于 FPGA 和 PCB 板的中间位置,随着物理应力和化学应力的作用下,焊接球的位置就会发生变化,由于图中裂缝的出现,与 PCB 板或者 FPGA 之间的接触变小,焊接球的阻抗值就会变大,随着裂缝的增大,阻抗值也会增大,由于 FPGA 和 PCB 板之间是由一个个的焊接球连接起来的,当有焊接球出现裂缝,甚至断裂,会影响 FPGA 的正常工作。焊接球的阻抗值的变化是一个渐变的过程,随着阻抗值的增大,FPGA 的焊接点会出现不同程度的故障,对 FPGA 焊接点不同程度故障做出合理的等级划分,从而建立一个较为完善的 FPGA 焊接点评估模型。

2 SJ BIST 模型建立和仿真

2.1 SJ BITS 诊断模型

为了诊断焊点处阻值的大小,利用 BIST 模型进行测

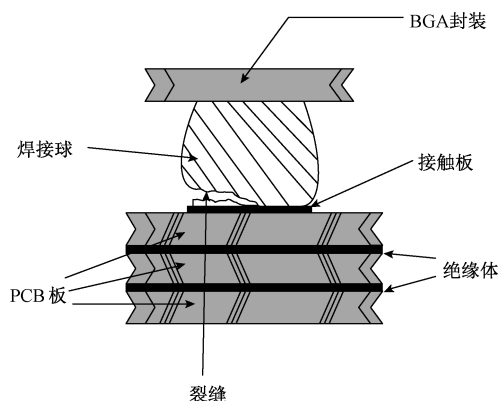


图 2 焊点处的模型图

Fig. 2 Model diagram and schematic diagram of solder joint

量,因为 FPGA 是封装好的,很难直接去测量焊点处的阻值,只能通过外接小电容,通过测量 C_1 、 C_2 、 C_3 等各个电容的充放电时间,利用相应的小电容和焊点阻值关系的计算公式,可以转换成各个焊点的阻值。图 3 所示为 BIST 故障测试诊断模型。

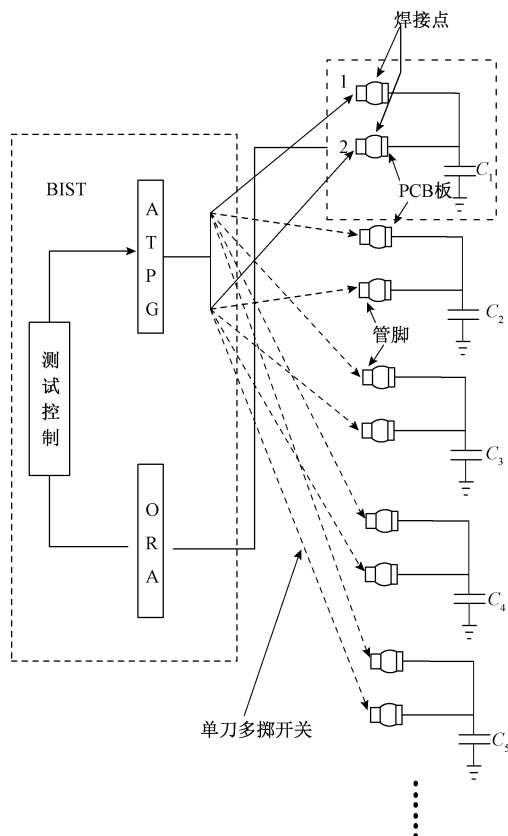


图 3 BIST 诊断模型

Fig. 3 BIST diagnostic model

2.2 焊点阻抗值的计算

因为后期需要对这些焊点阻抗值的数据进行优化处

理,所需要的数据很多,建立了如图 3 所示的测量模型,利用一个 BIST 测试电路对 PCB 板上的多个焊点进行测量,得到电容的充放电时间,得到这些数据之后需要把它转化成阻抗值的大小。

RC 电路的时间常数为:

$$\tau = RC \quad (1)$$

充电时:

$$U_c = U \times [1 - e^{-\frac{t}{\tau}}] \quad (2)$$

式中: U 是电源电压。

放电时:

$$U_c = U_0 \times e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

式中: U_0 是放电前电容上的电压。

计算电容充放电公式,设 V_0 为电容上的初始电压值, V_1 为电容最终可充到或放到的电压值(也就是 BGA 封装的 FPGA 所能提供的最大电压值), V_t 为 t 时刻电容上的电压值, t 为充电时间,则电容的充放电公式如下:

$$V_t = V_0 + (V_1 - V_0) \times [1 - e^{(-\frac{t}{\tau})}] \quad (4)$$

或者:

$$t = RC \times \ln\left[\frac{(V_1 - V_0)}{(V_1 - V_t)}\right] \quad (5)$$

一般设电容的初始电压 $V_0 = 0$, BGA 封装的供电电压为 3.3 V, 式(5)改写成:

$$t = RC \times \ln\left[\frac{3.3}{(3.3 - V_t)}\right] \quad (6)$$

测试所用的电阻值和电容上的电压值,便可得到充电时间 t ,即电容上低电平的持续时间 t 。

2.3 硬件平台的波形

图 4、5 所示为示波器观察电容电压的变化,图 4、5 是工作频率 20 MHz 时失效电阻达到 10、500 Ω 时,通过 SJ BIST 读取,得到的电容电压信号。当电阻值为 10 Ω 时,故障信号的低电平持续时间几乎为 0,可推测 10 Ω 为焊接点健康的临界电阻值。当电阻值为 500 Ω ,读取的电容电压信号为低电平,并且完全没有正向脉冲的产生,一般焊接点电阻值达到 500 Ω ,电容电压低电平的持续时间达到 0.25 μs 时,视为焊接点完全失效, FPGA 停止工作。可以推测,500 Ω 为此测试焊接点完全失效的临界电阻值。

2.4 焊接点发生故障后的仿真测试

既然是用来测试 FPGA 焊接点的数据,本文选用已经有所损坏的 FPGA 进行测试,利用文献[15]测试所得, BGA 封装外边缘最接近 4 个角落里的 I/O 端口最易发生焊接点的失效,选用这个位置的多个焊接点进行测试。利用图 6 所示测试电路,选择测试工作频率为 20、5、1、0.1、0.05 MHz 分别进行测试,外接小电容选择 2.2 nF,选择可变电阻(从 1 Ω 增加到 800 Ω)模拟焊接点的失效

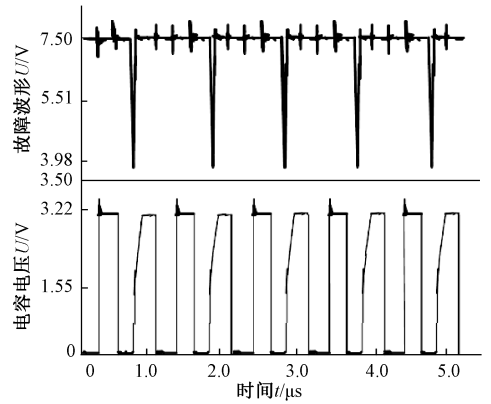


图 4 焊点电阻为 10 Ω

Fig. 4 Solder joint resistance of 10 Ω

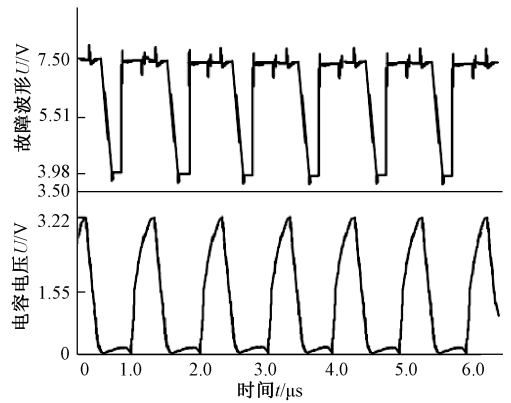


图 5 焊点电阻为 500 Ω

Fig. 5 Solder joint resistance of 500 Ω

电阻的程度。

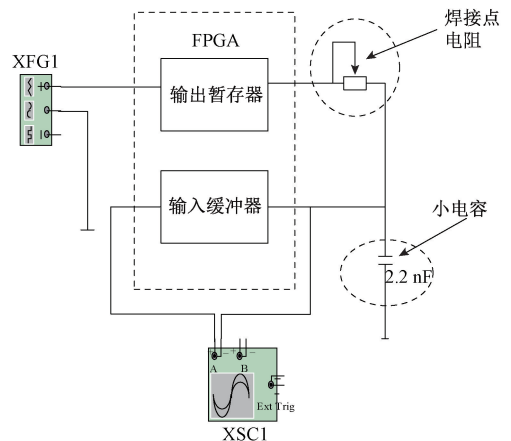


图 6 焊点仿真测试电路

Fig. 6 Welding spot simulation test circuit

通过测量可变电阻的值,把可变电阻值的信息状态转化成电容电压故障波形的低电平持续时间,改变可变

电阻的值,测试实验得出大量的数据,测量低电平的持续时间长度,利用 MATLAB 数据仿真得到电容电压低电平的持续时间的变化曲线如图 7 所示。

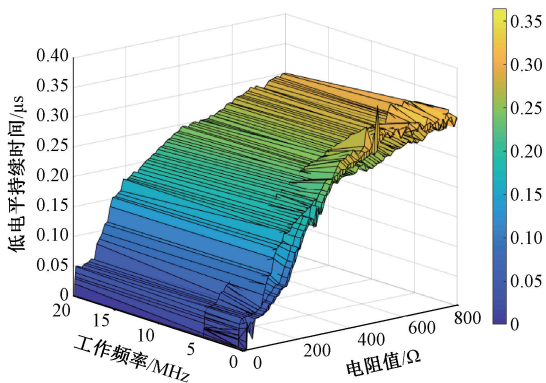


图 7 电容电压低电平持续时间

Fig. 7 Duration of capacitor voltage depression

图 7 中,焊接点电阻值在接近 10 Ω 时,电容电压几乎没有低电平,此时可断定焊接点为健康状态,FPGA 芯片正常工作;随着焊接点电阻值的增加,电容电压的低电平出现,且随时焊接点电阻值的增加,低电平的持续时间逐渐增加,在此期间,焊接点处已经开始失效,但是 FPGA 依然可以继续工作;直到焊接点电阻值达到 500 Ω ,电容电压低电平的增加速度放缓,且维持在一定的范围内,此时应该是完全没有正向脉冲产生,可以说明焊接点已经完全失效,FPGA 工作异常或者停止工作。

由得到的 MATLAB 仿真图可以看出,测试频率在 0~10 MHz 以及选择的外接小电容的阻值在 400~800 Ω 的电容的低电平的持续时间相关的数据极不稳定,对于选择合适的外接小电容和工作频率至关重要(本文选择 2.3 nF 电容值和工作频率 20 或 15 MHz 进行评估),用相对应的电阻代替焊接球处阻值大小,通过 BIST 可将相应的电阻的信息转化为故障信号低电平的持续时间,选用在 0~800 Ω 的电阻值进行测量,也就是分别代表焊接球在遇到机械应力和热应力时发生相应的故障焊接球的阻抗值,通过观察故障波形低电平的持续时间来评估焊接球的故障严重程度。

BGA 封装焊点连接失效按照下面的标准来进行定义。

1) 大于 300 Ω 的峰值电阻持续 200 μs 或者更长时间。

2) 第 1 个失效时间发生后再 10% 的时间内发生 10 个或更多失效事件。

根据 BGA 封装连接失效的定义和通过测试电路得出的波形和数据分析,当电阻值小于 10 Ω 时,电容低电平持续时间在 0~0.05 μs 。焊接球电阻值在 10~500 Ω

时,电容电压低电平持续时间在 0.05~0.25 μs 。焊接球电阻值大于 500 Ω 的时,电容电压低电平的持续时间在 0.25~0.35 μs 。由此,可以对焊接球处阻抗值进行预测,焊接球电阻值在 0~10 Ω 之间焊接点是处于健康状态,焊接球电阻值在 10~500 Ω 焊接点是处于裂缝且 FPGA 可以继续工作,焊接球电阻值大于 500 Ω 的时候焊接点断裂,焊接球与 FPGA 和 PCB 板不再接触,焊接点失效,FPGA 可能会异常,可能会停止工作。而验证了 2.2 节的理论分析,可以对 FPGA 焊接点故障进行精确的等级划分。

因为 FPGA 的焊盘和 PCB 板的焊接点的失效在热应力和机械应力的作用下是随机产生的,并且在细间距的 BGA 封装中,存在有数以千计的 1.0 mm 间距和 0.60 mm 球直径的焊接球,并且 FPGA 焊接点故障出现的时刻是随机的,所以若对产生的大量数据仅采取人工识别的方式将极不现实。下面将采用遗传算法优化的 LS-SVM 对实验得到的三维数据模型进行训练,建立 FPGA 焊接点故障的健康状态评估模型。

3 基于 GA 优化 LS-SVM 的状态评估研究

3.1 SVM 的原理

SVM 是在统计学理论的基础上发展来的一种机器学习方法,LS-SVM 是标准 SVM 的改进,由 Vandewal 等提出了一种新型 SVM 方法^[19-20]。研究 SVM,首先对于 SVM 存在最优超平面:

$$H: \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x} + b = 0 \quad (7)$$

式中: $\mathbf{w}$ 为超平面法线方向; b 为常数。

同时存在平行于 H 的超平面

$$\begin{cases} H_1: \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x} + b = 1 \\ H_2: \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x} + b = -1 \end{cases} \quad (8)$$

其他的一些数据样本存在于 H_1 和 H_2 之外,有如下约束条件:

$$\begin{cases} \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}_i + b \geq 1, y_i = 1 \\ \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}_i + b \leq -1, y_i = -1 \end{cases} \quad (9)$$

原来数据样本的两分类问题就可以表示为:

$$y_i(\mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}_i + b) \geq 1 \quad (10)$$

式中: $y_i \in [-1, 1]$, 为输出类别。

当拿到收集到的数据时,是最原始的数据,存在很多的错误数据,引入松弛变量 ξ_i 和正则化参数 γ , 通过以上的分析,可以得出新的超平面约束条件变为:

$$\begin{cases} \min Q(\mathbf{w}, \boldsymbol{\xi}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + \gamma \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \xi_i^2 \\ \text{s. t. } y_i[\mathbf{w}^T \cdot \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_i) + b] = 1 - \xi_i, \forall i \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{w}$ 为权向量; b 为偏置参数。

对于不等式约束的条件极值问题,可以用拉格朗日方法求解,其方程如下:

$$G(\boldsymbol{\omega}, b, \zeta; \alpha) = Q(\boldsymbol{\omega}, \zeta) - \sum_{i=1}^N \alpha_i \{ \mathbf{y}_i [\boldsymbol{\omega}^T \cdot \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_i) + b] - 1 + \zeta_i \} \quad (12)$$

式中: α_i 表示拉格朗日乘子。

求解最优化条件如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial \boldsymbol{\omega}} = 0 \rightarrow \boldsymbol{\omega} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \mathbf{y}_i \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_i) \\ \frac{\partial G}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^N \alpha_i \mathbf{y}_i = 0 \\ \frac{\partial G}{\partial \zeta_i} = 0 \rightarrow \alpha_i = \gamma \zeta_i \\ \frac{\partial G}{\partial \alpha_i} = 0 \rightarrow \mathbf{y}_i [\boldsymbol{\omega}^T \cdot \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_i) + b] - 1 + \zeta_i = 0 \end{cases} \quad (13)$$

求解得:

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{y}^T \\ \mathbf{y} & \boldsymbol{\Omega} + I/\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \boldsymbol{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{I}_v \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: $\boldsymbol{\Omega}_{ij} = [\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_i)^T \mathbf{y}_i \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_j) \mathbf{y}_j] = \mathbf{y}_i \mathbf{y}_j K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$; $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]$; $\mathbf{I}_v = [1, 1, \dots, 1]$ 。

LLSVM 通过求解上述线性方程组,得到优化变量 α 和 b 的值。同时将 Mercer 条件代入到 $\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{Z}\mathbf{Z}^T$, 可得:

$$\boldsymbol{\Omega}_{kl} = \mathbf{y}_k \mathbf{y}_l \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_k)^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_l) = \mathbf{y}_k \mathbf{y}_l \psi(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_l)$$

其中, $\psi(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_l)$ 表示 LS-SVM 的核函数。

则 LS-SVM 的分类决策函数为:

$$f(x) = \text{sgn} \left[\sum_{i=1}^m \mathbf{y}_i \alpha_i K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) + b \right] \quad (15)$$

式中: m 为支持向量的数目。

3.2 LS-SVM 的改进优化

关于 LS-SVM 核函数的选择对本文的分类性能有很大的影响。本文采用 $K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \exp \left\{ -\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2}{2\beta^2} \right\}$ 的高斯径向基(RBF)核函数, β 是一个自由参数。为了使得本文的分类效果更加准确,采用 GA 对标准 SVM 的参数进行优化,具体步骤如下。

1) 使用格雷码编码方式对模型编码。

2) 种群的规模生成,生成 80 组染色体,含有 β 和 C 两个参数,一个染色体上含有 β 和 C 两个基因,其初始值得范围取在 $[0, 100]$ 。

3) 适应度值,遗传算法中是以个体适应度的值来评定各个个体的优劣程度。

4) 选择,将适应度从大到小进行排列,把当前群体中适应度较高的个体遗传到下一个群体中。

5) 交叉,设置交叉概率 $P_c = 0.6$,选择单点交叉。

6) 变异,设置变异概率 $P_m = 0.015$,采用基本位变异的方法进行变异运算,产生新个体。

7) 终止条件,迭代次数的有效选择有助于参数寻优的进行,选择迭代 300 次,达不到精度要求或者迭代次数不够 300,继续进行步骤 4)~6) 操作,直到达到精度要求或迭代次数上限,选择最大适应度值的个体作为基于改进的 LS-SVM 的最优参数。

4 实验结果与分析

根据第 2 节的理论分析和实验测试以及 GA 算法优化的数据,本文将焊点失效故障分为 3 个等级,分别是健康、故障态(焊接球出现裂缝或部分断裂)、芯片失效(焊接球完全断裂),对应的焊接点的阻抗值分别为 $0 \sim 10 \Omega$, $10 \sim 500 \Omega$, 大于 500Ω 。采用标签 1、2、3 分别表示焊点故障的 3 个等级,如表 1 所示。

表 1 FPGA 焊点故障等级划分

Table 1 Fault classification of FPGA welding points

焊点故障等级	焊点电阻值/ Ω	LS-SVM
健康状态	0~10	1
故障态	10~500	2
芯片失效	≥ 500	3

根据第 3 节实验测试得到的数据,测试模型测量一组健康信号和 8 组故障信号,从每组信号中提取 331 个数据点,共 2 979 个数据点。利用每组信号中的 251 个数据点,共 2 259 个数据点,另外 720 个数据点作为测试样本数据。

在进行数据训练之前,建立模型,设置参数,整个 GA 算法的参数优化过程是在 MATLAB 中进行的,在经过多次迭代操作,选择最大适应度值的个体作为基于改进的 LS-SVM 的最优参数,最终得到 $\beta = 0.1897$, $C = 87.2546$, 才能使最小二乘支持向量机对故障等级分类准确率达到最高,利用遗传算法优化的最小二乘支持向量机对数据的状态评估的结果如表 2 所示。

表 2 遗传算法优化的 LS-SVM 状态评估结果

Table 2 LS-SVM state assessment results optimized by genetic algorithm (%)

等级划分	训练集准确率	测试集准确率
健康状态	95	96
故障态	96	97
芯片失效	98	98.6
总的准确率	96.33	97.2

为了验证 GA-LS-SVM 方法的有效性和准确性,本文同时对 GA-LS-SVM、LS-SVM、标准 SVM 和 BP 神经网络

的 4 种分类方法对 20 MHz 时的数据进行评估对比分析, 如图 8~10 及表 3 所示。

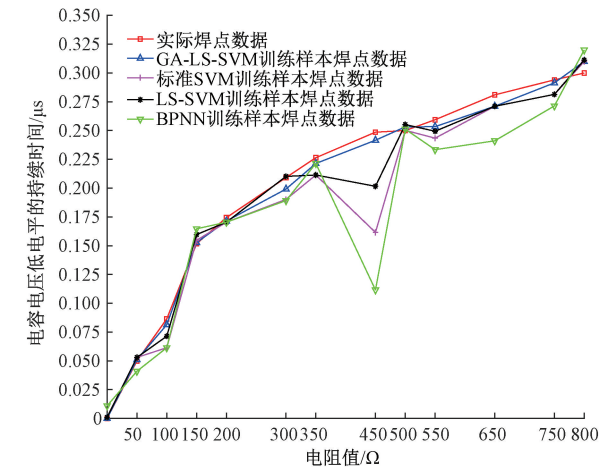


图 8 四种分类方法训练样本焊点数据对比

Fig. 8 Four kinds of classification the training sample solder joint data contrast

从图 8 可以看出,GA-LS-SVM 的评估准确度要高于其他 3 种评估方法,当样本量较大时,GA-LS-SVM 的评估焊接点故障更高效。

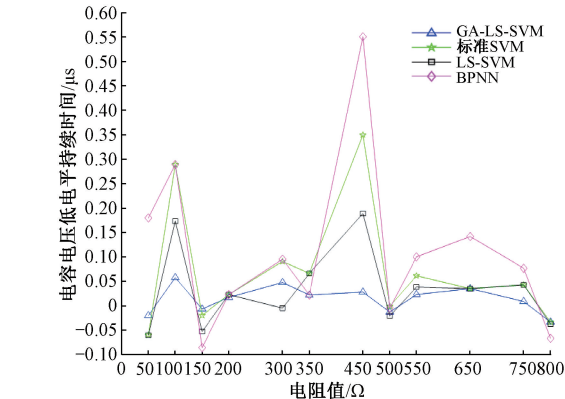


图 9 评估数据与实际数据的相对误差

Fig. 9 The relative error of evaluation data and the actual data and the actual data

在对评估数据和实际数据的相对误差和绝对误差的数据分析后,发现 GA-LS-SVM 的方法的误差是最小的,保证了 GA-LS-SVM 的评估方法的准确度。

为了进一步保证 GA 算法优化的 LS-SVM 的评估更高效,分别针对标准 SVM、LS-SVM 和 BP 神经网络分类的 3 种分类方法对焊接点故障模型评估的准确率与本文的数据进行对比,其对比结果如表 3 所示。可以看出,与这几种方法相比,本文提出的 GA-LS-SVM 的评估方法有非常高的判断准确率。

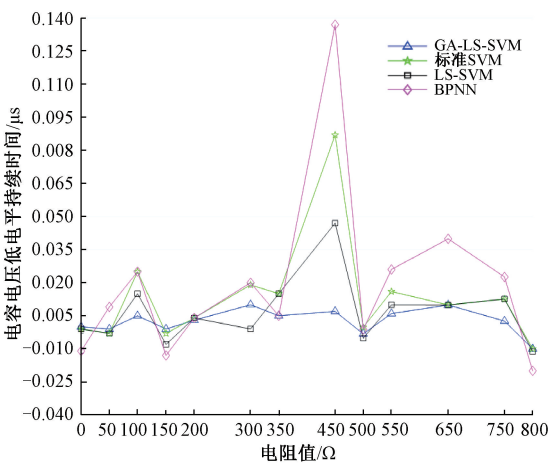


图 10 评估数据与实际数据的绝对误差

Fig. 10 Absolute error evaluation data and the actual data

表 3 四种分类方法的对比结果

Table 3 Comparison results of the four classification methods

模型	BPNN	标准 SVM	LS-SVM	GA-LS-SVM
训练集准确率/%	73.3	81.33	89	96.33
测试集准确率/%	79.3	84.2	90	97.2
运行时间/s	0.324 56	0.256 45	0.125 46	0.002 487

5 结 论

本文提出了一种基于 GA 算法优化的 LS-SVM 的 SRAM 型 FPGA 焊接点的故障诊断方法。利用硬件平台测量 FPGA 外接小电容电压的低电平持续时间,可以精确推测出焊接点的临界电阻值,然后,考虑相应的测试条件,建立 SJ BIST 诊断模型,通过人为改变电阻值(模拟焊接点处的阻值大小)的实验测试,建立电容低电平的持续时间、电容测试工作频率和焊接点电阻值的三维数据图。焊接点故障和健康状态所对应的低电平的持续时间有一定的区分度,验证测量 FPGA 的焊接点外部电容低电平的持续时间作为故障指示参数的可行性。最后,将 FPGA 焊接点分为 3 个等级,采用 GA 算法优化 LS-SVM,经过多次修改参数得到最优正则化参数和核函数,利用优化后的 LS-SVM 对 FPGA 焊接点故障进行状态评估。同时采用 4 种分类方法对 20 MHz 时的数据进行评估对比分析。经过算法分析可得,GA-LA-SVM 对 FPGA 焊接点健康状态等级分类的总准确率达到 97.2%,比 BPNN 提高了 17.9%,比标准 SVM 提高了 13%,比 LS-SVM 提高了 7.2%,并且所得的运行时间也明显少。经过多番论证和实验结果表明,采用 GA 优化的 LS-SVM 相对于其他算法,具有较高的准确率,且运行时间减小。该研究有助于完善 FPGA 焊接点的健康管理机制。

参考文献

- [1] 郑含博,王伟,李晓纲,等. 基于多分类最小二乘支持向量机和改进粒子群优化算法的电力变压器故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3424-3429.
ZHENG H B, WANG W, LI X G, et al. Fault diagnosis method of power transformers using multi-class LS-SVM and improved PSO [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3424-3429.
- [2] 王欢,杨平,谢方伟,等. 复合加载下焊点寿命的数值模拟[J]. 焊接学报, 2012, 33(12): 65-68, 116.
WANG H, YANG P, XIE F W, et al. Numerical simulation of solder joint life under composite loading [J]. Chinese Journal of Welding, 2012, 33(12): 65-68.
- [3] 陈颖,康锐. 球栅阵列封装焊点寿命预测的综合方法[J]. 焊接学报 2009, 30(11): 105-108.
CHEN Y, KANG R. A comprehensive method for predicting solder joint life of spherical grid array package [J]. Chinese Journal of Welding, 2009, 30(11): 105-108.
- [4] 王贺,胡志坚,张翌晖,等. 基于聚类经验模态分解和最小二乘支持向量机的短期风速组合预测[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 237-245.
WANG H, HU ZH J, ZHANG Y H, et al. Short-term wind speed combination prediction based on cluster empirical mode decomposition and least square support vector machine [J]. Journal of Electrotechnics, 2014, 29(4): 237-245.
- [5] 李霄,王昕,郑益慧,等. 基于改进最小二乘支持向量机和预测误差校正的短期风电负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 63-69.
LI X, WANG X, ZHENG Y H, et al. Short-term Wind power load prediction based on improved least-squares support vector machine and prediction error correction [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 63-69.
- [6] 刘丽霞. 基于小波理论与 LSSVM 的模拟集成电路故障诊断方法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
LIU L X. Simulation integrated circuit fault diagnosis method based on wavelet theory and LSSVM [D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [7] HOFMEISTER J P, LUDKINS J B, GOODMAN D. A low-power sensor design, SJ monitor, for monitoring 24×7 the health of BGA solder joints [C]. IEEE Aerospace Conference 2008.
- [8] HOFMEISTER J P, TRACY T A, LALL P. Ball grid array (BGA) solder joint intermittency detection. SJ BIST[C]. IEEE Aerospace Conference, 2008.
- [9] HOFMEISTER J P, LALL P, ORTIZ E, et al. Real-time detection of solder-joint faults in operational field programmable gate arrays [C]. IEEE Aerospace Conference, 2007.
- [10] 鄢东洋,史清宇,吴爱萍. 搅拌摩擦焊接过程的试验测量及分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 67-70.
YAN D Y, SHI Q Y, WU A P. Experimental measurement and Analysis of friction stir welding process [J]. Journal of Welding, 2010, 31(2): 67-70.
- [11] 杜影,赵文彦,安佰岳. 基于 FPGA 的板级 BIST 设计和实现策略[J]. 计算机测量与控制, 2008(3): 389-391.
DU Y, ZHAO W Y, AN B Y. Design and Implementation strategy of Board LEVEL BIST based on FPGA [J]. Computer Measurement and Control, 2008(3): 389-391.
- [12] 张洪武,张照,陈金涛,等. 搅拌摩擦焊接过程的有限元模拟[J]. 焊接学报, 2005, 26(9): 13-18.
ZHANG H W, ZHANG ZH, CHEN J T, et al. Finite element simulation of friction stir welding process [J]. Chinese Journal of Welding, 2005, 26(9): 13-18.
- [13] 钟晶鑫,王建业,刘苍. BGA 封装 FPGA 焊点失效故障诊断系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(9): 2722-2725.
ZHONG J X, WANG J Y, LIU C. Design of BGA encapsulated FPGA solder joint failure diagnosis system [J]. Computer Measurement and Control, 2014, 22(9): 2722-2725.
- [14] 黄锋,王建业. FPGA 焊点网络失效的在线测试[J]. 化工自动化及仪表, 2012, 39(8): 1062-1065.
HUANG F, WANG J Y. Online test of FPGA solder joint network failure [J]. Chemical Automatic Chemical Machine Instrument, 2012, 39(8): 1062-1065.
- [15] 王建业,丁浩,刘苍,等. FPGA 焊点连接失效故障诊断[J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 66-70.
WANG J Y, DING H, LIU C, et al. Failure diagnosis of FPGA solder joint [J]. Chinese Journal of Welding, 2014, 35(8): 66-70.
- [16] 任宁,田野,龙旦凤. 热循环条件下温度效应对 PBGA 焊点可靠性的影响[J]. 焊接技术, 2016, 45(4): 8-11.
REN N, TIAN T, LONG D F. Effect of temperature effect on reliability of PBGA solder joint under thermal cycling condition [J]. Welding Technology, 2016, 45(4): 8-11.
- [17] 王永彬. 影响 BGA 封装焊接技术的因素研究[J]. 电子工艺技术, 2011, 32(3): 129-132, 180.
WANG Y B. Research on factors influencing BGA package welding technology [J]. Electronic Technology,

- 2011, 32(3): 129-132, 180.
- [18] 戴玮, 薛松柏, 张亮, 等. 不同阵列 PBGA 器件焊点可靠性分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(9): 73-76.
DAI W, XUE S B, ZHANG L, et al. Solder joint reliability analysis of PBGA devices with different arrays [J]. Chinese Journal of Welding, 2009, 30(9): 73-76.
- [19] 周欣然, 滕召胜, 蒋星军. 稀疏在线无偏置最小二乘支持向量机的预测控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(4): 331-337.
ZHOU X R, TENG ZH SH, JIANG X J. Predictive control of sparse online unbiased least squares support vector machines [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2011, 25(4): 331-337.
- [20] 叶永伟, 陆俊杰, 钱志勤, 等. 基于 LS-SVM 的机械式温度仪表误差预测研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 57-66.
YE Y W, LU J J, QIAN ZH Q, et al. Research on mechanical temperature instrument error prediction based on LS-SVM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1): 57-66.

作者简介



佐磊, 2013 年于湖南大学获得博士学位, 现为合肥工业大学副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为智能感知技术及应用、智能电网设备状态监测与评估。

E-mail: benzl0313@126.com

Zuo Lei received his Ph. D. degree from Hunan University in 2013. He is now an associate researcher and M. Sc. supervisor at Hefei University of Technology. His main research interests include intelligent perception technology and application, status monitoring and evaluation of smart power grid equipment.



徐相相(通信作者), 2018 年于皖西学院获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为智能电网信息工程技术。

E-mail: 1196869600@qq.com

Xu Xiangxiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from West Anhui University in 2018. He is now a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interest includes smart grid information engineering technology.