

结合多信号模型与遗传算法的板级电路测点选取方法

石伟文 王学奇 范凯胤 王明君

(空军工程大学航空航天工程学院 西安 710038)

摘要 针对传统的电路板测点选取方法需要的输入信息多、工作繁琐、效率低及难以得到全局最优解等问题,提出了一种基于多信号模型与遗传算法相结合的优化方法。首先,通过建立板级电路的多信号流系统模型,获取测点与对应板级电路组成单元的相关性矩阵,并对其进一步分析,得出测点组合的测试能力参数。在测点选取数量不大于给定值的情况下,选取测试能力参数作为遗传算法的适应度函数并进行优化搜索,以确定测点的优化选取方案。结合 Multisim 仿真软件进行低通有源滤波电路系统的故障模拟实验,仿真结果表明,基于多信号模型与遗传算法选取的板级电路测点组合对低通有源滤波电路中的绝大部分故障都有良好的检测和隔离能力,取得了良好的效果,同时该方法也适用于多种其他电路。

关键词 板级电路,多信号模型,可达性分析,遗传算法,电路仿真

中图分类号 TM930.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.08.053

Measuring Point Selection Method of Board-level Circuit Based on Multi-signal Model and Genetic Algorithm

SHI Wei-wen WANG Xue-qi FAN Kai-yin WANG Ming-jun

(College of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract This paper proposed an optimization method by combining multi-signal model and genetic algorithm for the problems of many input messages, low efficiency, tedious work, and difficulty on getting a global optimal solution existing in the traditional circuit board measuring point selection method. First, a multi-signal flow system model of the board level circuit is established to get the correlation matrix of measuring points and corresponding board level circuit components. Then a further analysis is taken on the correlation matrix, and the test ability parameters of measuring points combination is got. Second, when the number of selected measuring points is not bigger than the given value, the test capability parameters are selected as the fitness function of the genetic algorithm, and the search is optimized to determine the optimal selection of measuring points. Third, combining with Multisim simulation software, the fault simulation experiment of circuit system with active low-pass filter is carried out. The simulation results show that the combination of board-level circuit measuring point selection based on multi-signal model and genetic algorithm has good detection and isolation capabilities for most of the faults in active low-pass filter circuits, and achieves good results. Besides, this method is applicable to a variety of other circuits.

Keywords Board-level circuit, Multi-signal model, Reachability analysis, Genetic algorithm, Circuit simulation

随着电子电力技术的发展,各类电路板的结构和功能日趋复杂,这给电路板的测试与维修带来了极大的困难。其中,测点的选取是电路板测试的首要问题,不同测点会得到不同的测试信号,通过对信号进行整合、处理和分析可以确定电路板的故障原因和引起故障的组成单元,最终实现电路板的测试与维修。

赵伟^[1]进行了基于仿真的电路测点研究,通过对待测电路进行仿真实验,建立电路的故障字典,依据故障字典进行电路板测点的选择优化;但对于复杂电路系统,建立故障字典的难度大、耗时长,而且不同类型的电路板的故障字典差别较大,用该方法难以得到通用的测点选取策略。

杨智勇等^[2]利用多信号模型对电路板进行建模,建立了电路部件故障与测试点的相关性矩阵,确定了单一测试点的

故障检测和隔离的能力指标,但没有考虑多个测点组合之后检测故障和隔离故障的能力。

李光升等^[3]提出了基于 BP 神经网络的电路板故障诊断方法,但该方法需要得到不同电路故障模式下各测试节点的电气数据以对神经网络进行训练。对于测点数量多、电路结构复杂的系统,该算法的运算量大、耗时长,同时神经网络容易陷入局部最优,有时难以得到全局最优的测点组合。

针对上述问题,本文提出了基于多信号模型与遗传算法相结合的测试点优化方法。多信号模型是目前测试性建模的主流方法之一,利用多信号模型进行建模不仅简单直观,而且可以通过故障传播路径的搜索快速地得到测试-故障相关性矩阵。借助相关性矩阵进行系统的测试性分析,从而得到测试性能参数。遗传算法中的二进制编码与测试点的选取可以

到稿日期:2018-03-01 返修日期:2018-04-23 本文受军委装发预研基金:基于云计算的测试体系结构及其关键技术研究(9140A17040115JB32238)资助。

石伟文(1993—),男,硕士,主要研究方向为测试技术及自动化;王学奇(1981—),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为测试技术及自动化, E-mail:17782622551@163.com(通信作者);范凯胤(1993—),男,硕士,主要研究方向为测试技术及自动化。

建立逐一对应的映射关系,由多信号模型分析得到的测试性参数可以作为遗传选择的种群适应度函数。相比于传统的测点优化选取方法,该方法可以实现对单一和多个测点组合的全局优化选取,进而提高复杂系统的故障检测与故障隔离能力,从而高效且准确地进行电路板测点的布局优化。

1 多信号模型

1.1 模型的假设与表示方法

模型的基本假设:1)被测对象由 m 个组成单元构成,所有单元发生故障的概率都是相等的;2)被测对象拥有 n 个可用测试点,每个测试点进行测试所消耗的时间和费用都相等。

多信号模型有两种表示方法,即图形法与矩阵法。图形法是指在被测对象原理图或结构图的基础上,将被测对象的各个组成单元用有向线段连接起来,并标注出测试点的位置与序号。有向图可以直观地反映各个组成单元之间以及组成单元与测试点之间的信号流关系。

有向图的矩阵表示主要是指故障与测试的相关性矩阵,以下简称为 D 矩阵。

$$D_{m \times n} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{故障 } i \text{ 可以被测试点 } j \text{ 观测} \\ 0, & \text{故障 } i \text{ 无法被测试点 } j \text{ 观测} \end{cases} \quad (2)$$

下面结合实例来说明将电路图转换为多信号流图模型的过程。图 1 为有源低通滤波器原理图。

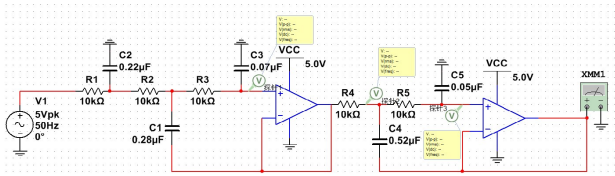


图 1 滤波器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of filter

图 1 中含有 13 个组成单元和 8 个测点,将原理图转化为信号流图,如图 2 所示。

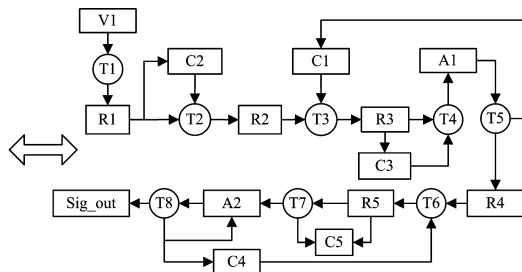


图 2 信号流图

Fig. 2 Signal flow diagram

图 2 中,R1—R5 对应电路图中的电阻 R1—R5,C1—C5 对应电路图中的电容 C1—C5,A1 和 A2 代表电路图中的两个运算放大器,V1 表示交流信号源。通过信号流图进行可达性分析^[4],搜索出任意给定节点通过有向边所到达的全部节点,并做出相应的标记,最终生成测试-故障相关性矩阵 D ,如表 1 所列。

表 1 D 矩阵

Table 1 D Matrix

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
R1	0	1	1	1	1	1	1	1
R2	0	0	1	1	1	1	1	1
R3	0	0	0	1	1	1	1	1
R4	0	0	0	0	1	1	1	1
R5	0	0	0	0	0	1	1	1
C1	0	0	1	1	1	1	1	1
C2	0	1	1	1	1	1	1	1
C3	0	0	0	1	1	1	1	1
C4	0	0	0	0	0	1	1	1
C5	0	0	0	0	0	0	1	1
V1	1	1	1	1	1	1	1	1
A1	0	0	0	0	1	1	1	1
A2	0	0	0	0	0	0	0	1

1.2 测试性参数分析

根据测试的目标,测试性参数可以分为两类:1)描述测试系统自身特征;2)描述测试能力特征^[5]。假设各个测点进行测试时所消耗的时间和费用都是相等的,即认为测试系统中的各项测试的自身特征一致,因此只需要考虑各个测点以及测点相互组合后所形成的测试能力特征。针对板级电路系统,测试能力特征又可以进一步分为故障检测能力和故障隔离能力。

设系统的组成单元为一有限集 $\{f_1, f_2, \dots, f_m\}$,而系统的可用测试点的组合为 $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 。对于单元 f_i ,由它引发的故障可能被 a 个不同的测试点探测到。为了节约测试成本,应以尽可能少地测试判定被测系统是否处于故障状态,因此应该优先选择关联组成单元多的测试点进行测试^[6]。对于测点组合来说,每个测点的测试能力可以表示为一个“与或”式,对于图中的测试点 T1 和 T3, $T_{t_1} = f_1, T_{t_3} = f_1 + f_2 + f_6 + f_7 + f_{11}$,则两测点组合后可以探测的故障单元应该为: $T_{t_1, t_3} = T_{t_1} \cup T_{t_3} = f_1 + f_2 + f_6 + f_7 + f_{11}$ 。

通过以上分析,测试点集合 T_s 对系统的故障检测能力可以定义为:

$$FDA = \bigcup_i T_{t_i} \quad (3)$$

故障隔离的目标是找出被测系统中发生故障的组成单元。系统中某个单元的故障是否可以被测试集隔离的关键在于所选的测点集合的故障测试矩阵中对应的行向量是否为 1,即单元 f_i 发生故障时测试集的状态唯一确定。

由上面的分析可以得出,行矢量相异的两个测试可以用来隔离相异点发生的故障,例如,测试点 T6 和 T7 可以隔离故障 $I_{t_6, t_7} = T_{t_6} \oplus T_{t_7} = f_{10}$,其中 \oplus 为异或运算符。对测点集合中的所有元素之间的循环取异或运算,则得到可以隔离的故障集合,集合中元素的数目为 N_T 。对于含有 P 个测点的集合 T_s ,求取 N_T 的伪代码如下:

```

NT = 0
DO for k=1 to p
    DO for j=k+1 to p
        NT = NT + length(find(Ttk⊕Ttj!=0))
    END
END
    
```

END

在测点选取不超过上限的前提下,故障隔离能力 FIA 可以定义为选取的测点集合中可以准确地将故障隔离到单个组成单元的数量 N_T 。

$$FIA = N_T \quad (4)$$

综合考虑系统的测试性参数,引入比例系数来计算测点

组合的综合测试能力参数 TA(Test Ability):

$$TA = FDA \times \alpha + FIA \times (1 - \alpha) \quad (5)$$

2 遗传算法

对于一个拥有 n 个可用测试点的系统,每个测试点都有 0(不选取)和 1(选取)两种状态,因此一共有 2^n 种测点选择的组合。通过遍历所有组合并计算测试系统的测试性参数 TA,可以找到最优的测试点组合。但是对于复杂的电路系统来说,测点数量越多,遍历算法浪费的时间就越长。相比于遍历这种盲目搜索,采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)求解可以有效地缩短搜索时间,降低搜索成本。遗传算法起源于对生物系统所进行的计算机模拟研究,是一种基于生物遗传和进化机制的适合于复杂系统优化的自适应概率优化技术。

2.1 遗传算法的数学模型与基本流程

针对测点选取问题,遗传算法的数学模型可以表示为:

$$SGA = (C, E, P_0, M, \Phi, \Gamma, \Psi, T) \quad (6)$$

其中, C 为可选测点的选取情况; E 为测点选择集合的测试能力参数; P_0 为初始随机生成的测试点选择编码; M 为测试点编码的数量; Φ 为选择算子; Γ 为交叉算子; Ψ 为变异算子; T 为运算终止条件,通常将最大遗传代数 T 作为遗传的终止条件。

算法的运算流程如图 3 所示。

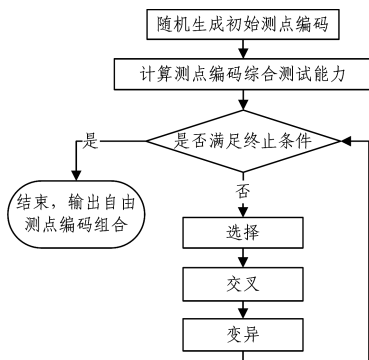


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flowchart of algorithm

2.2 算法编码与种群适应度的计算

当系统共有 n 个可用测点时,可以根据测点的选取情况生成长度为 n 的二进制编码,编码的一位对应一个测试点,编码中 1 代表该位对应的测试点被选中,0 代表未被选中。图 4 为染色体编码与测试点的对应关系示意图。

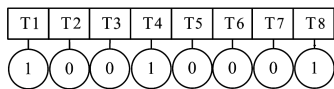


图 4 染色体编码与测试点的关系图

Fig. 4 Relation diagram between chromosome coding and test points

以图 4 中的编码为例,该染色体所代表的含义为测点 T1, T4 和 T8 被选中。

本文 1.2 节中分析了系统的测试性参数 TA,其综合了系统的故障检测能力与故障隔离能力,因此选择 TA 作为测试点集合的适应度函数。式(4)和式(5)表明,测试系统的故障检测能力和故障隔离能力都会随着测试点数量的增多而增强。但是,测试点数量的增加会带来测试成本和测试时间的增加,因此必须对测试点数量进行约束。最终,种群的适应度可以按下式进行计算:

$$Fitness_i = \begin{cases} TA, & \sum_{j=1}^n T_j \leq Q \\ 0, & \sum_{j=1}^n T_j > Q \end{cases} \quad (7)$$

式(7)表明,当测试点的数量少于或等于给定的值 Q 时,个体适应度等于所选取测试点的测试性参数 TA;若测点的数量超过给定值 Q ,则种群的适应度为 0。

2.3 遗传算子

遗传算法主要使用选择、交叉和变异 3 种遗传算子。

选择运算通过比例选择算子。若种群中的编码数量为 H ,编码 k 的适应度为 f_k ,则编码 k 被选取的概率为:

$$P_k = f_k / \sum_{i=1}^H f_i \quad (8)$$

通过选择算子,可以淘汰测试能力较弱和测点数目超过限制的测点选择编码,使算法具有明确的搜索方向。

交叉是指将挑选后的两个任意编码作为交叉对象,随机产生交叉点位置,两个测点编码在交叉点位置互换部分基因,从而形成两个子编码。为了防止已经形成的优良的测点组合编码段被破坏,采用单点交叉方式。

为了避免问题过早收敛,对测点编码的部分位置进行小概率翻转,这种行为被称为变异。我们采用离散变异算子来增强算法的全局搜索能力。

3 实例分析

3.1 基本参数的设置

在用遗传算法进行优化之前,首先对算法所需参数进行初始化。实验的初始化参数如表 2 所列。

表 2 初始化参数

Table 2 Initialization of parameters

参数类型	参数值
种群大小	40
最大遗传代数	70
编码长度	8
单点交叉概率	0.7
离散变异概率	0.1
测试点数量 Q	≤ 3
FDA 权重 α	0.6

3.2 算法优化结果

经过实验得到了各代种群中适应度的最大值与平均值随种群迭代次数的变化曲线,如图 5 所示。

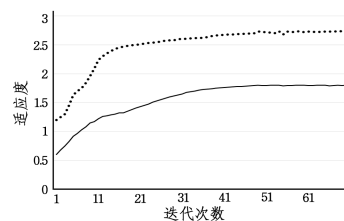


图 5 变化曲线

Fig. 5 Changing curve

图 5 中,实线表示种群适应度的均值,点线表示种群适应度的最大值。可以看出,种群大约在遗传到 50 代左右时,种群适应度的均值趋于稳定,表明算法已经趋于收敛。

记录各代适应度最大的个体的测点选取情况,如图 6 所示,图中纵轴为 1 代表该测点被选取,为 0 代表测点未被选取。

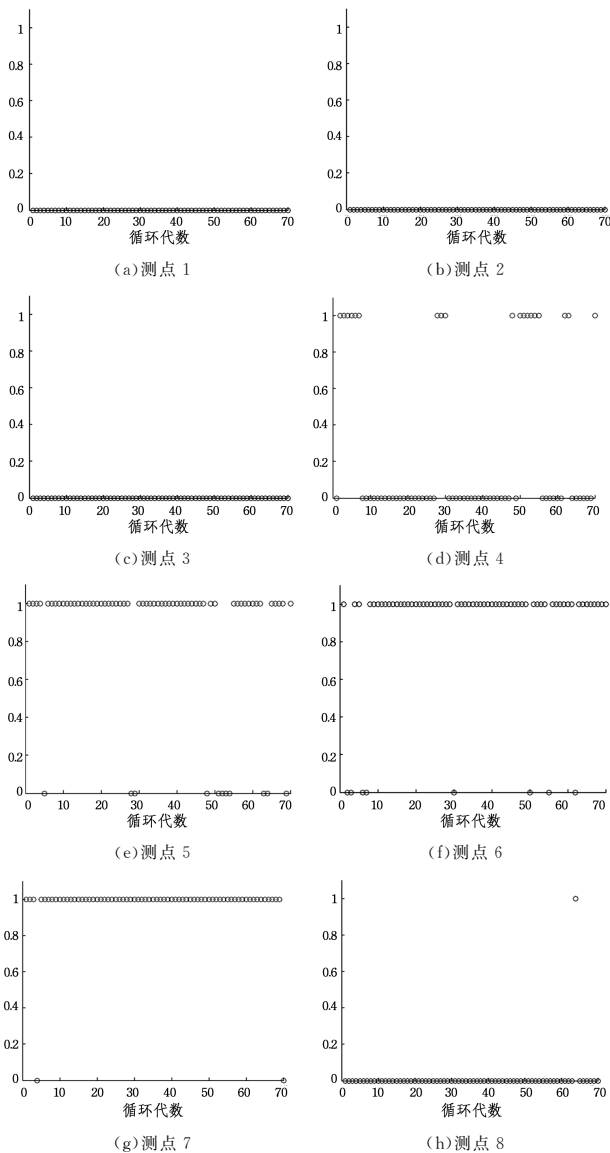


图6 测点选取图

Fig. 6 Selection of measuring points

计算在70次遗传迭代的种群适应度最大个体中各测试点出现的频率,如表3所列。

表3 各测点出现的频率

Table 3 Frequency of measuring points occurrence

测点	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
频率	0	0	0.01	0.27	0.84	0.88	0.97	0.01

从表3中可以看出,8个测试点中测试点5,6,7出现的频率最大。结合图像与表3中的数据得出:5,6,7是应该选择的测试点。

3.3 实验结果的验证

通过在Multisim电路仿真软件中进行仿真实验来验证所选取的测点对电路系统的故障检测和隔离能力。对电路中的组成部件进行故障模拟,电阻的故障主要选取短路和开路,电容的故障主要选取短路与开路,运放的故障主要选取管脚之间短路。实验选择峰峰值为5V、频率为50Hz的交流信号源。仿真时采用单点设置故障,即同一时间只有一个组成单元发生故障。选取部分典型故障,观察故障发生前后测点电压的有效值与频率的变化情况。电路处于不同状态时,测试

点5,6,7测得的电路参数如表4所列。

表4 电路参数

Table 4 Circuit parameters

测试点	电路状态	电压有效值 V_{RMS}/V	频率 $Freq/Hz$
5	正常	0.92	50
	电阻 R1 短路	2.11	50
	电阻 R1 开路	3.80	—
	电容 C1 短路	3.11	50
	电容 C1 开路	2.02	50
	电容 C3 短路	0	0
	电容 C3 开路	1.13	50
	运放 A1 输入端短路	1.96	50
6	正常	2.07	100
	电阻 R4 短路	2.00	—
	电阻 R4 开路	—	—
	电容 C4 短路	3.20	180
	电容 C4 开路	1.85	102
	运放 A1 输入端短路	1.96	50
7	正常	2.04	100
	电阻 R4 短路	1.86	200
	电阻 R4 开路	—	—
	电容 C4 短路	3.11	107
	电容 C4 开路	1.83	100
	电阻 R5 短路	1.88	100
	电阻 R5 开路	—	100
	电容 C5 短路	0	0
	电阻 C5 开路	1.93	120
	运放 A1 输入端短路	1.97	50
运放 A2 输入端短路	1.96	120	

注:“—”表示交流电压有效值或频率值大幅度跳变,难以测得精确值

由表4中的数据可以看出,将5,6,7这3个测试点组合起来,对电路发生的大多数故障都有较好的检测和隔离能力,而且不同的故障发生后测点的电气参数变化明显,容易探测和鉴别。仿真结果验证了遗传算法结果的有效性。

结束语 根据电路中的信号流动与测试性建模中多信号流图的映射关系,本文提出了一种以多信号流图为基础,通过遗传算法进行优化的板级电路测试点优化选取方法。该方法充分利用了多信号流图对电子电路问题描述方面的优势以及遗传算法中二进制编码与测试点选择情况之间的良好对应关系。相比于传统的搜索算法,所提方法在提高搜索效率的同时保证了搜索的准确性。结合实例进行实验仿真与验证,结果显示测试点组合对低通有源滤波电路系统中各个部件的故障都有良好的诊断和隔离能力。另外,该方法可推广且适用于多种其他电路系统,具有一定的通用性。

参考文献

[1] ZHAO W. Simulation Based on Fault Diagnosis Technology for Analog Circuits[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
赵伟. 基于仿真的模拟电路故障诊断技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.

[2] YANG Z Y, XU H L, XU A Q. Fault Diagnosis Strategy Design Based on Multiple Signal Models[J]. Computer Measurement and Control, 2016, 14(12): 1616-1619. (in Chinese)
杨智勇, 许化龙, 许爱强. 基于多信号模型的故障诊断策略设计[J]. 计算机测量与控制, 2016, 14(12): 1616-1619.

[3] LI G S, LIANG J C, XIE Y C, et al. Application of Improved BP Neural Network Based on Immune Genetic Algorithm in Fault Diagnosis of Armored Vehicle Circuit Boards[J]. Computer

- Measurement and Control, 2016, 25(6):9-13. (in Chinese)
李光升,梁靖聪,谢永成,等.基于免疫遗传算法改进的BP神经网络在装甲车辆电路板故障诊断中的应用[J].计算机测量与控制,2017,25(6):9-13.
- [4] SIMPSON W R, SHEPPARD J W. System Test and Diagnosis [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [5] QIU J, LIU G J, YANG P. Equipment Testing Modeling and Design Technology [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
邱静,刘冠军,杨鹏.装备测试性建模与设计技术[M].北京:科学出版社,2012.
- [6] LIU H M, YI X S. Testability Modeling and Analysis of Multi-Signal Flow Diagrams [J]. China Test, 2007, 33(1):49-50. (in Chinese)
刘海明,易晓山.多信号流图的测试性建模与分析[J].中国测试,2007,33(1):49-50.
- [7] WANG G. Research on optimization selection technology of equipment testing parameters [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
王刚.装备测试性参数优化选择技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2010.
- [8] SU Y D, LIU G J, QIU J, et al. Method for Determining System Testability Indexes [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(5):401-405. (in Chinese)
苏永定,刘冠军,邱静,等.系统测试性指标确定方法[J].测试技术学报,2008,22(5):401-405.
- [9] FIJANY A, VATAN F. A unified and efficient algorithmic approach to model-based diagnosis and optimal sensor placement [C]//Proceedings of 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (I-SAIRAS), 2005:1-8.
- [10] LI G, QIN Q, DONG C. Selecting the Optimal Distribution Point of Sensors in Suspension Bridge Monitoring System by Genetic Algorithm [J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(1):25-34. (in Chinese)
李戈,秦权,董聪.用遗传算法选择悬索桥监测系统中传感器的最优布点[J].工程力学,2000,17(1):25-34.
- [11] HUANG N, QI J, LI F, et al. Short-Circuit Fault Detection and Classification Using Empirical Wavelet Transform and Local Energy for Electric Transmission Line [J]. Sensors, 2017, 17(9):2133-2144.
- [12] CHOI U M, LEE J S, BLAABJERG F, et al. Open-Circuit Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control for a Grid-Connected NPC Inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10):7234-7247.
- [13] WU F, ZHAO J. A Real-Time Multiple Open-Circuit Fault Diagnosis Method in Voltage-Source-Inverter Fed Vector Controlled Drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2):1425-1437.
- [14] LI Z P, SHAO X Y, ZHANG D X, et al. Steering System Control Strategy Based on Overview of Automotive Electric Power [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015, 29(8):6-11. (in Chinese)
李志鹏,邵宪友,张东兴,等.基于BP神经网络的电控发动机故障诊断研究[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2015,29(8):6-11.

(上接第 267 页)

由表 4 可知,在 4 组样本下,新算法的执行时间分别降低了 10.7 ms, 10.2 ms, 11.3 ms, 10.8 ms。因此,新算法有效地提高了最大内切圆方法的执行效率。

结束语 本文提出了一种改进的基于最大内切圆算法的 ROI 提取方式。经过研究计算与实验统计表明,新算法在清晰度和信息丰富度上均有提高,迭代次数减少了 200 次。在 2DLDA, 2DPCA, SIFT 3 种特征提取算法提取特征值后进行匹配实验,结果表明 FRR 和 FAR 值均有所降低,匹配正确率均提高,在 4 组样本下,新算法的执行时间均降低。因此,新算法的执行效率更高,提取出的 ROI 具有更高的清晰度和信息丰富度,以及更好的匹配性能。

在今后的研究中,将尝试结合生物学知识,针对手掌中不同的生物学划分区域,在不同的区域尝试 ROI 提取,获得细节更为丰富的 ROI。

参 考 文 献

- [1] GOFMAN M I, MITRA S. Multimodal biometrics for enhanced mobile device security [J]. Communications of the Acm, 2016, 59(4):58-65.
- [2] LEE J C, CHANG C P, CHEN W K. Palm vein recognition based on directional empirical mode decomposition [J]. Optical Engineering, 2014, 53(4):043102.
- [3] LI W X, XIA S X, ZHANG D P, et al. A New Method of Palm-print Recognition Based on Bidirectional Matching of Main Line Features [J]. Computer Research and Development, 2004, 41(6):996-1002. (in Chinese)
李文新,夏胜雄,张大鹏,等.基于主线特征的双向匹配的掌纹识别新方法[J].计算机研究与发展,2004,41(6):996-1002.
- [4] WU W, YUAN W Q, LIN S, et al. Selection of Typical Wave-length for Palm Vein Recognition [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12):1211002.
- [5] YUAN W Q, WANG N. Segmentation Method of Palm Vein Image Based on Local Gray Minimum [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2011(7):1091-1096. (in Chinese)
苑玮琦,王楠.基于局部灰度极小值的掌脉图像分割方法[J].光电子·激光,2011(7):1091-1096.
- [6] ČONKA D, VISZLAY P, JUHÁR J. Fuzzy clustering in HMM-based triphone classes of 2DLDA in Slovak LVCSR [C]//International Conference on Systems, Signals and Image Processing, 2016:1-4.
- [7] WORARATPANYA K, SORNNOI M, LEELABURANAPONG S, et al. An improved 2DPCA for face recognition under illumination effects [C]//International Conference on Information Technology and Electrical Engineering, 2016:448-452.
- [8] LENC L, PAVEL L. Automatic face recognition system based on the SIFT features [J]. Computers & Electrical Engineering, 2015, 46(C):256-272.
- [9] MELEKHOV I, KANNALA J, RAHTU E. Image Patch Matching Using Convolutional Descriptors with Euclidean Distance [OL]. https://user.aalto.fi/~kannlj/publications/accv2016_ws.pdf.
- [10] BANSAL A, AGARWAL R, SHARMA R K. FAR and FRR based analysis of iris recognition system [C]//IEEE International Conference on Signal Processing, Computing and Control, IEEE, 2012:1-6.
- [11] FARID S, AHMED F. Application of Niblack's method on images [C]//International Conference on Emerging Technologies, IEEE, 2009:280-286.