

文章编号: 1672-2892(2011)02-0215-05

基于人工免疫的 PCB 电路信息融合故障诊断

郭朝有, 欧阳光耀, 李雁飞

(海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 印制电路板(PCB)非介入式故障诊断方法, 因获取信息有限, 存在故障覆盖率低、定位不准等问题。多源信息融合能综合各类信息以提高电路诊断效果。文章提出采用人工免疫网络(AIS)作为信息融合技术的融合算法, 实现 PCB 电路非介入式故障诊断。该方法以电路支路电流信息和节点电压信息为信息源, 运用人工免疫系统实现基于特征层信息融合的印制电路板非介入式故障诊断。某实装电流转电压电路故障诊断仿真实验表明: 基于多源信息融合的非介入式故障诊断可提高电路故障的覆盖率和定位的准确性。

关键词: 印制电路板; 非介入式故障诊断; 人工免疫系统; 信息融合

中图分类号: TN710; TP391

文献标识码: A

Non-intrusive information fusion fault diagnosis of printed circuit board based on artificial immune system

GUO Chao-you, OUYANG Guang-yao, LI Yan-fei

(College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei 430033, China)

Abstract: The non-intrusive fault diagnosis of Printed Circuit Board(PCB) based on information fusion is presented in this paper to improve the fault coverage of the non-intrusive fault diagnosis. The method based on the Artificial Immune System(AIS) algorithm integrates a comprehensive information for PCB taking the circuit branch current information and node voltage information as the data. The fault diagnosis result of the pitch control board's current-transfer-voltage circuit shows that better fault recognition result has been achieved using the fused data compared with either individual data source.

Key words: Printed Circuit Board; non-intrusive fault diagnosis; Artificial Immune System; information fusion

随着印制电路板(PCB)元器件密度的日益增大, 以及多层电路板和超大规模集成电路的使用, 电路中可及节点越来越少, 甚至不存在可及节点^[1]。很多学者开始研究和开发有效的 PCB 非介入式故障诊断技术和方法。

当前 PCB 非介入式故障诊断方法主要有基于磁场映像、基于红外热成像、基于电源电流和基于外部节点电压的诊断方法^[1-4]。国内外众多研究表明, 上述非介入式故障诊断方法若单独使用一种, 一般只能对某些特定 PCB 电路诊断有效, 如能采用信息融合技术将上述诊断方法有机结合起来, 充分发挥各种诊断方法的优势, 就有可能实现绝大多数 PCB 电路的高效诊断^[5-6]。

本文以某调距桨闭环控制系统的螺距控制板中电流转电压电路为对象, 研究基于信息融合的 PCB 电路非介入式故障诊断, 和基于人工免疫系统的融合算法实现技术。

1 基于信息融合的 PCB 电路非介入式故障诊断

1.1 印制电路板非介入式故障诊断方法信息融合的基本结构

基于磁场映像、基于红外热成像和基于电源电流的诊断方法, 其本质是根据电路板电路出现故障时, 电流模式发生改变, 从而导致电路的磁场信号、红外信号和电源电流信号的改变进行电路故障诊断, 因此上述 4 种 PCB

非介入式故障诊断方法的诊断信息源为支路电流信息和外部节点电压信息。

鉴于 PCB 电路中供电电源及输出节点是每块电路板必有的, 测量也十分方便, 最大限度利用这些信息进行电路故障诊断应是今后研究的重点。因此, 本文选取供电电源电流与输出节点电压信息为诊断信息源, 采用人工免疫系统作为信息融合算法, 实现基于特征层信息融合的印制电路板非介入式故障诊断, 基本结构如图 1 所示。

1.2 PCB 电路非介入式故障诊断融合信息特征提取和处理

1.2.1 特征提取

国内外电源电流测试技术研究表明: 电路发生故障时, 电源电流波形曲线将发生相应变化, 其在一定周期内的平均电流值也发生相应变化^[7]。因此, 可通过对待测电路进行全速电源电流测试, 选取供电电源在某一周期内的平均电流值作为电源电流的特征量。

同时选取电路输出节点电压值作为节点电压的特征量。

1.2.2 特征量预处理

鉴于平均电源电流和输出节点电压的幅值大小相差较大, 本文采用式(1)变换规则, 将各特征量归一到[0,1]空间:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中: x_i 代表整个样本集; $x_{\min}$ 代表数据的最小值; $x_{\max}$ 代表数据最大值。

1.3 基于人工免疫系统的 PCB 电路非介入式故障诊断信息融合算法

基于信息融合的电路故障, 可视在在一定条件下信息空间的一种非线性推理过程, 即将检测到的多源电路诊断信息作为一个空间 M, 电路故障模式信息作为另一空间 N, 信息融合技术是建立信息融合分类器实现 M 到 N 的映射推理过程, 即 $f:M \rightarrow N$ 。而人工免疫系统(AIS)是一个具有高度非线性的超大规模连续时间自适应信息处理系统, 其中多源电路诊断信息空间 M 相当于免疫系统中的抗原, 信息融合分类器相当于免疫系统中的抗体, 信息融合将空间 M 映射到空间 N 的过程, 对应为免疫系统中抗体识别抗原并做出反应, 形成成熟抗体即故障检测集的过程。同时 AIS 具有多样性寻优能力、分布式存储能力和自学习、自组织能力, 其非常适合信息融合技术的要求。

因此, 本文采用 AIS 作为信息融合算法, 实现 PCB 电路非介入式故障诊断的信息融合。具体过程如下:

1) 样本生成

将各经归一化处理的特征量合并成联合特征量, 并任选 1 组测试数据, 作为基于 AIS 的信息融合系统的训练样本, 其余为测试样本。

2) 人工免疫系统构建

借鉴文献[8-10]采用基于变异实值否定选择算法构建人工免疫系统。

3) 基于 AIS 的信息融合

采用 2 次匹配方法进行电路故障诊断, 具体步骤如下:

1) 将待检测数据与训练阶段生成的故障检测器集 R 进行匹配: 如果匹配, 则系统发生故障, 故障类型为故障检测器集 R 中与待检测数据匹配的故障类型($F>0$ 或 $F=-1$); 如果没有匹配, 则进入第 2)步进行 2 次匹配, 判断系统是否正常;

2) 将待检测数据与正常样本数据进行 2 次匹配: 如果匹配, 则系统正常($F=0$); 否则系统状态为落入孔洞的未知故障状态($F=-2$)。

2 诊断实例

2.1 诊断电路

以某调距桨闭环控制系统的螺距控制板中的电流转电压电路为待测电路。运用电路建模与仿真软件 OrCAD/Pspice10.5, 建立电路仿真模型, 如图 2 所示^[11]。

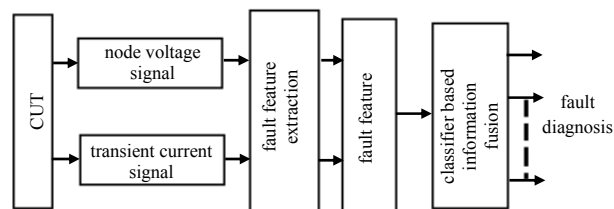


Fig.1 Basic frame of the non-intrusive information fusion fault diagnosis of PCB based on AIS

图 1 印制电路板非介入式故障诊断方法信息融合基本结构

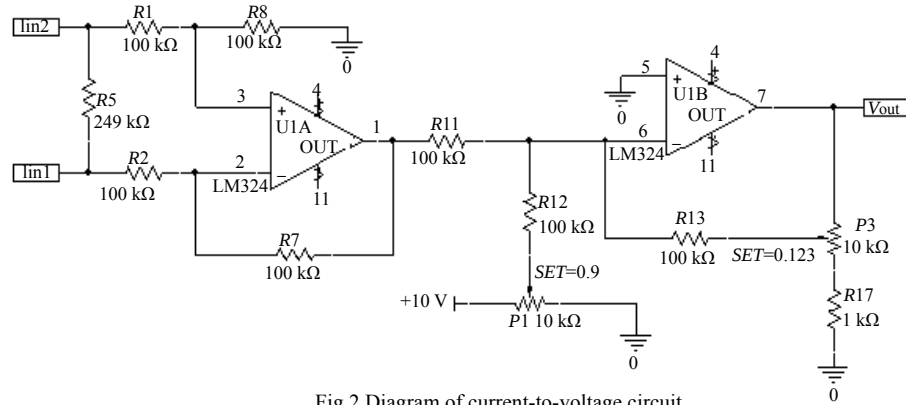


Fig.2 Diagram of current-to-voltage circuit

图2 电流转电压电路

对图2所示电流转电压电路,以一峰值为8 mA,14 mA,脉宽为900 ns,周期为1 800 ns的连续周期矩形波为输入电流信号,实施电路的全速电流测试仿真实验,测量供电电源 V_{dd} 和 V_{ss} 在5 μ s内的平均电流值作为电源电流的特征量。对表1所列25种电路工作模式各进行50次,共1 250次蒙特卡洛分析,得到1 250组电源电流测试数据。表1为仅有一电路元件发生故障,且其他电路元件容差为零时的 I_{DDA} 测试数据。

将测量输入电流4 mA和12 mA时的输出电压 V_{out} 作为输出节点电压的特征量,对表1所列25种电路工作模式各进行50次,共1 250次蒙特卡洛分析,得到1 250组输出节点电压测试数据。表2为仅有一电路元件发生故障,且其他电路元件容差为零时的输出节点电压测试数据。

表1 部分 I_{DDA} 测试数据Table1 I_{DDA} of current to voltage circuit

fault model	data set		fault model	data set	
	the average supply current at V_{dd} /mA	the average supply current at V_{ss} /mA		the average supply current at V_{dd} /mA	the average supply current at V_{ss} /mA
R1 short	0.999	1.085 0	R1 open	2.356	1.097
R2 short	0.999	1.085 0	R2 open	2.356	1.097
R5 short	2.317	1.097 0	R5 open	12.229	1.095
R7 short	1.807	1.091 0	R7 open	1.045	1.098
R11 short	1.023	1.081 0	R11 open	0.985	1.012
R1=80 k Ω	1.180	1.082 0	R1=120 k Ω	1.349	1.084
R2=80 k Ω	1.180	1.082 0	R2=120 k Ω	1.349	1.084
R5=200 k Ω	1.456	1.085 0	R5=300 k Ω	1.146	1.082
R7=80 k Ω	1.360	1.084 5	R7=120 k Ω	1.183	1.082
R11=80 k Ω	1.117	1.080 0	R11=120 k Ω	1.438	1.086
P1 set=0	0.950	1.078 0	P3 set=0	1.389	1.085
P1 set=0.6	2.384	1.103 0	P3 set=0.5	1.175	1.081
fault free	1.253	1.083 0			

2.2 诊断过程及结果

表1所列29组电源电流测试数据构成检测器生成阶段的自体集 S_1 (训练样本),以其中的28个故障模式样本为故障类型检测器集 R_F ;其余1 421组数据构成检测阶段的自体集 S_2 (测试样本)。由自体集 S_1 随机生成 $N_R=306$ 个初始随机检测器,组成初始随机检测器集 R_0 ,采用上述变异实值否定选择算法,并选取 $N_{\text{success-min}}=0$, $N_{\text{mutation-max}}=100$, $\text{rmutation}=2 \times \text{rab}=0.08$, $\beta=1$, $\text{rab}=0.04$, $\text{rsel}=0.04$ 对 R_0 进行优化,经139次迭代后得到优化的随机检测器集 R_R ;合并故障类型检测器集 R_F 和随机检测器集 R_R ,组成人工免疫系统的检测器集 R 。用建立的

表2 部分输出节点电压测试数据

Table2 Node voltage of current to voltage circuit

fault model	data set		fault model	data set	
	V_{out}/V $I_{in}=4 \text{ mA}$	V_{out}/V $I_{in}=12 \text{ mA}$		V_{out}/V $I_{in}=4 \text{ mA}$	V_{out}/V $I_{in}=12 \text{ mA}$
R1 short	-4.803	14.315 0	R1 open	-14.764	-14.744
R2 short	-4.803	14.315 0	R2 open	-14.764	-14.744
R5 short	-14.773	-14.772 0	R5 open	-14.993	-14.993
R7 short	-12.301	-7.310 4	R7 open	14.315	14.315
R11 short	14.315	14.315 0	R11 open	-14.770	-14.760
R1=80 k Ω	-9.228	1.862 0	R1=120 k Ω	-10.235	-1.158
R2=80 k Ω	-9.228	1.862 0	R2=120 k Ω	-10.235	-1.158
R5=200 k Ω	-10.763	-2.742 0	R5=300 k Ω	-8.761	3.263
R7=80 k Ω	-10.285	-1.301 0	R7=120 k Ω	-9.278	1.703
R11=80 k Ω	-8.533	3.945 0	R11=120 k Ω	-10.614	-2.294
P1 set=0	4.968	14.315 0	P3 set=0	-14.993	0.445
P1 set=0.6	-14.993	-14.462 0	P3 set=0.5	-3.669	0.075
fault free	-9.781	0.201 0			

人工免疫系统对自体集 S_2 进行检测, 即进行电路的故障诊断, 诊断结果如表 3 所示, 故障诊断的平均正确率达到了 90% 以上。

表 3 诊断结果
Table3 Diagnosis results of current to voltage circuit

fault model	diagnosis rate/(%)			fault model	diagnosis rate/(%)		
	node voltage	I_{DDA}	fusion		node voltage	I_{DDA}	fusion
R1 short	100	100	100	R1 open	100	100	100
R2 short	100	44.9	46.94	R2 open	100	100	100
R5 short	0	51.02	53.06	R5 open	100	100	100
R7 short	63.27	100	100	R7 open	100	48.98	46.94
R11 short	100	100	100	R11 open	0	51.02	67.35
R1=80 k Ω	48.98	100	100	R1=120 k Ω	100	100	100
R2=80 k Ω	59.18	48.98	46.94	R2=120 k Ω	100	100	100
R5=200 k Ω	0	38.78	53.06	R5=300 k Ω	100	100	100
R7=80 k Ω	51.02	100	100	R7=120 k Ω	100	100	100
R11=80 k Ω	22.45	100	100	R11=120 k Ω	100	100	100
P1 set=0	100	38.78	57.14	P3 set=0	100	100	100
P1 set=0.6	0	57.14	53.06	P3 set=0.5	100	100	100

3 结论

针对各类 PCB 非介入式故障诊断方法存在故障检出率低的问题, 提出以电路支路电流信息和节点电压信息为信息源, 运用人工免疫系统实现基于特征层信息融合的印制电路板非介入式故障诊断。螺距控制板中的电流转电压电路 25 种故障模式的故障检测与定位仿真实验表明人工免疫系统可以作为一个完整的智能化信息融合算法, 实现多源信息基于特征层的信息融合, 同时可提高电路故障定位的准确性。

参考文献:

- [1] 万九卿. 印制电路板故障诊断技术研究——基于统计模式识别理论的印制电路板非介入式故障诊断[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003. (WAN jiuqing. Research on the fault diagnosis technology of printer circuit board[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003.)
- [2] 陈彬, 于盛林. 基于集成芯片热模式的 PCB 电子电路故障诊断方法[J]. 计算机与数字工程, 2005, 33(1): 73-76. (CHEN Bin, YU Shenglin. Circuit fault diagnosis based on IC thermal mode[J]. Computer & digital engineering, 2005, 33(1): 73-76.)
- [3] 吴清华, 周经国, 刘维周. 磁场映像技术在数字电路故障诊断中的应用[J]. 装备指挥技术学院学报, 2002, 13(6): 101-103. (WU Qinghua, ZHOU Jingguo, LIU Weizhou. The applications of magnetic-field mapping in digital circuit diagnosis[J]. Journal of the academy of equipment command & technology, 2002, 13(6): 101-103.)
- [4] 刘勃, 张少刚, 齐世平. 现代模拟电路故障诊断新方法[J]. 信息与电子工程, 2006, 4(6): 16-19. (LIU Qing, ZHANG Shaogang, QI Shiping. Fault diagnosis methods of modern analog circuit[J]. Information and Electronic Engineering, 2006, 4(6): 16-19.)
- [5] 王承, 孙秀斌, 谢永乐, 等. 基于神经网络信息融合技术的模拟电路故障诊断[J]. 电路与系统学报, 2007, 12(5): 25-29. (WANG Cheng, SUN Xiubing, XIE Yongle, et al. Fault diagnosis in analog circuits based on neural network information fusion technique[J]. Journal of circuits and systems, 2007, 12(5): 25-29.)
- [6] 葛红, 田联房. 基于 AIN 信息融合方法的应用研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(12): 16-19. (GE Hong, TIAN Lianfang. Application research of information fusion technology based on AIN[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(12): 16-19.)
- [7] Min Yinghua, Kuang Jishun, Niu Xiaoyan. At-speed current testing[C]// Proceedings of the 12th Asian Test Symposium(ATS' 03), Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2003: 396-399.
- [8] Fabio G. A Study of Artificial Immune Systems Applied to Anomaly Detection[D]. MEMPHIS: The University of Memphis, 2003.
- [9] 牛慧峰, 姜万录, 王文杰. 阴性选择算法在工业控制系统故障诊断中的应用[J]. 燕山大学学报, 2008, 32(4): 363-368. (NIU Huifeng, JIAN Wanlu, WANG Wenjie. Application of negative selection algorithm in fault diagnosis for industrial control system[J]. Journal of Yanshan University, 2008, 32(4): 363-368.)
- [10] 徐学邈, 王如根, 侯胜利. 基于反面选择原理的智能融合故障检测模型及应用[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(8): 2029-2032. (XU Xuemiao, WANG Rugen, HOU Shengli. Intelligence fusion approach to fault detection based on negative selection principle and its application[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(8): 2029-2032.)

(下转第 223 页)