

模拟电路故障重叠诊断方法研究

谈恩民 何正岭

(桂林电子科技大学 桂林 541004)

摘要: 在实际的模拟电路中,电路故障种类很多,但是测试节点的数目是有限的,导致了不同的故障类之间可能存在重叠现象。对于故障重叠问题,采用常规的马氏距离诊断方法,误诊率会很高。阐述了误诊对后期电路改善的严重后果,说明通过降低故障分辨率提高故障诊断正确率是有意义的,提出在进行故障判定时不仅仅考虑最优值还要考虑最优与次优的优劣程度,结合马氏距离故障诊断方法距离进行具体说明,最后对具体电路进行分析,验证了本文的有效性。

关键词: 模拟电路;故障重叠;故障诊断;马氏距离

中图分类号: TP206+.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Study on the faults overlap diagnosis method in analog circuit

Tan Enmin He Zhengling

(Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: There are many kinds of faults in the actual analog circuits. And the limited number of test nodes results in a possible overlap between the different fault classes. For the fault overlap, the usage of conventional diagnostic methods based on Mahalanobis distance makes the high misdiagnosis rate. This paper describes the serious consequences of misdiagnosis for late circuit improvement, and it is significant to enhance the accuracy of fault diagnosis by reducing the faults resolution. It is proposed that not only the optimal value but also the degree of optimization and inferior between the optimal and suboptimal. The fault diagnosis based on Mahalanobis distance is combined to explain it concretely. Finally, the analysis of the specific circuit is done to verify the validity of the method in this article.

Keywords: analog circuit; faults overlap; fault diagnosis; Mahalanobis distance

1 引言

虽然在混合电路中模拟部分只占20%,但是发生在模拟部分的故障占整个混合电路故障的80%^[1]。混合信号电路故障诊断的发展依赖于模拟电路故障诊断技术的发展,模拟电路的故障诊断对整个电子系统故障诊断技术的发展具有重要影响,因此对模拟电路故障诊断的研究是有意义的^[2]。

针对模拟电路故障诊断常用的方法有:故障字典法^[3]、基于神经网络法^[4]、支持向量机算法^[5]。马氏距离通过协方差矩阵对样本的不同属性(即各指标或各变量)之间的差别信息进行综合考虑,可以更有效的度量样本和故障类别之间的距离。文献[6]提出了运用马氏距离和聚类分析实现模拟电路的故障诊断。文献[7]提出了运用马

氏距离和小波分析对电路中的硬故障进行检测分析。但是由于实际电路的测试点很少,提供的故障信息不够多,因此会出现故障类不能完全分离,故障类之间会出现混叠的现象。此时用马氏距离最小原则判断时,会导致故障正确率不高。

为此本文提出在进行故障判定时,不只是找出与其马氏距离最小的状态,还要找出与其马氏距离次最小的状态,考虑次小与最小马氏距离之间的比值。对于某个测试样本,与其马氏距离最小的状态为电路状态类A,与其马氏距离次小的距离为电路状态B,计算出 D_B/D_A 与阈值 δ 比较,如果大于,则判定该测试样本为电路状态A,如果小于等于则判定该测试样本为电路状态 $A \cup B$ 。显然当阈值 $\delta = 1$ 时,就简化成了只找出与其马氏距离最小的状态,将此状态作为该样本直接作为该样本的

收稿日期:2015-03

诊断结果。

2 故障类的重叠分析

在模拟电路故障诊断中,测试者往往希望有足够多的数据信息(即足够多的测试点)将各个故障类完全分离开,没有重叠;但是在实际的模拟电路故障诊断中,电路故障种类繁多,而测试节点数又是十分有限的,从而会导致不同的故障类之间会存在重叠现象。若两类或两类以上的故障具有相似的故障特征,则称这些故障类之间存在故障类重叠^[8]。

如图1所示为2个故障类的示意,图中圆形区域代表其故障类的故障特性分布的范围。在图1(a)中,A、B 2种故障类没有重叠部分,是完全分离的。在图1(b)中,故障A与故障B存在重叠区域,重叠区域为 $A \cap B$ 。

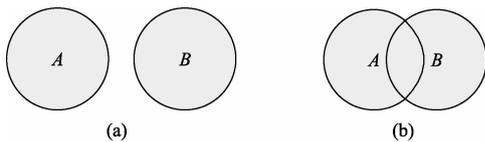


图1 故障类示意

图1(a)是故障类间没有重叠,是故障诊断工作者期望的状态,基于常规马氏距离判断原则的故障诊断方法就能取得很高的故障诊断正确率。图1(b)是实际故障诊断中经常会遇到的情况。区域 $A \cap B$ 同时具有故障A、故障B的特性。最后对区域 $A \cap B$ 进行故障判定时,就容易误判。

故障被诊断错误,会对后期工作带来巨大危害。用病人去看病的例子描述误诊的危害。待诊断电路就和患者一样,故障误诊就如同将患者的A病诊断为了B病,患者将会被当做B病进行治疗,这将会给患者带来很大的危害。误诊后,在后期的工作中要发现误诊这个错误是比较困难的。需要对一些数据进行分析从而判断是否是个错误。这个过程实际上是一个假设检验的过程。误诊的结果是作为原假设的,而假设检验是一个保护原假设的方法。

例如:某面粉厂家称其生产的每袋面粉的重量不低于50 kg,现从一批这样的面粉中随机抽取25袋,称其重量得其平均重量为51.5 kg。已知该面粉重量服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, $\sigma_0 = 5$ kg,试在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下,判断这批面粉是否合格?

第1种假设: $H_0: \mu \geq 50; H_1: \mu < 50$ 。经计算得到: $Z = 1.5 < Z_{0.05} = 1.65$,故在显著水平 $\alpha = 0.05$,接受原假设,认为这批面粉合格。

第2种假设: $H_0: \mu \leq 50; H_1: \mu > 50$ 。经计算得到: $Z = -1.5 > -Z_{0.05} = -1.65$,故在显著平 $\alpha = 0.05$ 下,接受原

假设,认为这批面粉不合格。

在样本、显著水平相同的情况下,只是将原假设与备择假设互换就得到了2种完全相反的结论。因此显得原假设的选取显得特别重要,即以降低故障分辨率提高故障诊断正确率是有意义的。

现在对于存在有重叠区域的A、B故障类常用的处理方法是将对故障类重叠进行重新分类:

1) 故障类合并法,即不区分A故障和B故障,将其合并成 $A \cup B$ 故障。该方法优点是:可以消除了重叠区域中故障样本被误诊的可能性,提高了故障诊断的正确率;缺点是:浪费了故障类之间未重叠的信息。

2) 故障类拆分法,即将A、B故障类重新分为 $(A - A \cap B)$ 、 $(B - A \cap B)$ 、 $A \cap B$ 3个故障类。该方法优点是:保留了所有故障样本的信息,提高了故障诊断的正确率;缺点是:增加了故障种类数和故障诊断的计算量,而且在故障类结合处还是容易出现误判。

3 马氏距离故障诊断

3.1 马氏距离

马氏距离是由印度统计学家马哈拉诺比斯(P C Mahalanobis)提出的数据协方差距离^[9]。马氏距离考虑到了样本不同属性(即各指标或各变量)之间的差别,可以更好的衡量未知样本与样本集之间的距离^[10]。

设 Y 为 $n \times m$ 维的样本集,其中 n 行对应 n 维特征, m 列为 m 个样本, $n \times 1$ 维样本 x 与样本集 Y 之间的马氏距离 D_m 的定义如下:

$$D_m = \sqrt{(x - z)^T C^{-1} (x - z)} \quad (1)$$

$$Z = \frac{1}{m} Y u \quad (2)$$

$$C = \frac{1}{m-1} (Y - z u^T) (Y - z u^T)^T \quad (3)$$

式中: u 为 $m \times 1$ 维向量,其个元素全部为1。 z 为 $n \times 1$ 维的特征均值向量。 C 为样本集的协方差矩阵,维数为 $n \times n$ 。 u^T 和 C^{-1} 分别为 u 的转秩矩阵和 C 的逆矩阵。

3.2 马氏距离故障诊断

马氏距离故障诊断的基本步骤是:

步骤1:将9种状态下的训练样本值代入式(2)、(3),计算出每种电路状态下的均值矢量以及协方差矩阵。

步骤2:利用式(1),分别计算出每个测试样本与各个电路状态的中心值的马氏距离。

步骤3:对于每个测试样本,找出与其马氏距离最小的中心值对应的电路状态,(将此状态作为该样本直接作为该样本的诊断结果)则将此电路状态判定为该测试样本对应的电路状态。

待将所有测试样本的诊断完成后,将测试样本的仿真电路状态与其诊断结果进行对比,判断诊断是否正确。

4 实例分析

4.1 选取电路进行仿真

为了简单明了的说明问题,本文选用图2所示的直流纯电阻电路模型,其中 U_1 (节点2)、 U_2 (节点3)为测试点。各个元件的标称值为 $R_1=R_2=R_3=R_4=10\text{ k}\Omega$ 。

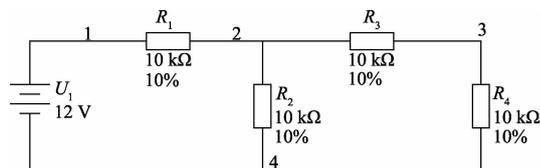


图2 直流电阻电路

将电路分为9个故障类如表1所示。

表1 电路状态

编号	电路状态
1	正常状态,元件参数在 $\pm 10\%$ 容差范围内
2	电阻 R_1 ↑软故障:R1电阻值为 $100\text{ k}\Omega\sim 5\text{ M}\Omega$
3	电阻 R_1 ↓软故障:R1电阻值为 $100\text{ k}\Omega\sim 5\text{ k}\Omega$
4	电阻 R_2 ↑软故障:R2电阻值为 $15\text{ k}\Omega\sim 100\text{ M}\Omega$
5	电阻 R_2 ↓软故障:R2电阻值为 $100\text{ k}\Omega\sim 5\text{ k}\Omega$
6	电阻 R_3 ↑软故障:R3电阻值为 $15\text{ k}\Omega\sim 100\text{ M}\Omega$
7	电阻 R_3 ↓软故障:R3电阻值为 $100\text{ k}\Omega\sim 5\text{ k}\Omega$
8	电阻 R_4 ↑软故障:R4电阻值为 $15\text{ k}\Omega\sim 100\text{ M}\Omega$
9	电阻 R_4 ↓软故障:R4电阻值为 $100\text{ k}\Omega\sim 5\text{ k}\Omega$

对电路进行随机仿真电阻值分别在各个故障类的范围类取值,并测量节点2和节点3的电压值组成故障样本矢量 $[U_1, U_2]$ 采集900个样本,其中450个样本作为训练样本,450个作为测试样本。其中训练样本分布如图3所示。

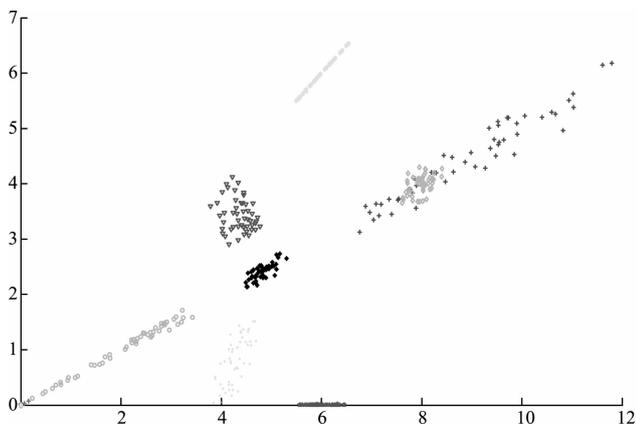


图3 各故障类分布

由图3可以看出,故障 R_1 ↓与 R_2 ↑、 R_1 ↑与 R_2 ↓存在重叠现象。

4.2 改进马氏距离故障诊断

改进马氏距离故障诊断的基本步骤是:

步骤1:将9种状态下的训练样本值代入式(2)、(3),计算出每种电路状态下的均值矢量以及协方差矩阵。计算各训练样本到各个电路状态的中心值的马氏距离,对于每个训练样本,计算出次小的马氏距离与最小马氏距离的比值。找出最小马氏距离误判中的最大比值,将此值设为阈值 δ 。

步骤2:利用式(1),分别计算出每个测试样本与各个电路状态的中心值的马氏距离。

步骤3:对于每个测试样本,找出与其马氏距离最小的状态A及次小的状态B,计算到B的马氏距离与到A的马氏距离的比值,与 δ 进行比较,如果大于,则判定该测试样本为电路状态A,如果小于等于则判定该测试样本为电路状态A∪B。待将所有测试样本的诊断完成后,将测试样本的仿真电路状态与其诊断结果进行对比,判断诊断是否正确。

4.3 诊断结果分析

通过训练样本计算,得出 $\delta = 3.085$,对450个测试样本进行诊断分析,其中正确被确定为某一电路状态的为351;其中正确被确定为某2个电路状态并集的为99。诊断正确率为100%。

设定 $\delta = 1$ 时,即采用传统的马氏距离故障诊断方法时,其正确诊断数为388;误诊断数为62。诊断正确率为86.2%。

通过以上数据可知改进后的马氏距离诊断方法虽然降低了部分故障的故障分辨率,但是大大提高了故障诊断正确率。

5 结论

本文从模拟电路故障诊断中由于测试点不足而导致的故障类重叠的现象分析出发:

1)研究通过不仅考虑最优还要考虑最优与次优之间的优劣程度,结合马氏距离故障诊断方法并对其进行改进,充分利用数据信息。对故障重叠采用常规的马氏距离故障诊断方法诊断正确率不高的问题进行改善。将故障诊断正确率提高了13.8%。

2)本文提出的方法与故障类重叠合并法相比,充分利用了A、B故障类不重叠的故障信息。只是以少量的故障分辨率为代价大大提高故障诊断正确率。与故障类重叠拆分法相比,在测试前不用增加故障类数,只在测试过程中加入阈值判断,以较少的计算量提高故障诊断正确率。

参考文献

- [1] 杨士元,胡梅,王红. 模拟电路软故障诊断的研究[J]. 微电子学与计算机,2008,25(1):1-8.
- [2] 胡梅,胡列峰,明德祥. 模拟电路统一软故障诊断的

- 研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(11): 1060-1066.
- [3] YANG CH L, TIAN SH L, LONG B. Application of heuristic graph search to test-point selection for analog fault dictionary techniques[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(7): 2145-2158.
- [4] 金鑫,任献彬,周亮. 智能故障诊断技术研究综述[J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(7): 30-32.
- [5] 孙健,王成华. 基于 mRMR 原则和优化 SVM 的模拟电路故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 221-226.
- [6] 黄亮,侯建军,刘颖. 模拟电路层次聚类故障分析与马氏距离故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(7): 610-615.
- [7] 秦庆强,张晓安,李艾华. 马氏距离在模拟电路硬故障检测中的应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(7): 41-45.
- [8] 张屹,魏学业,蒋海峰. 模拟电路故障诊断中故障重分类方法的研究[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(2): 53-56.
- [9] 赵建光,李红波,曾繁景,等. 模拟电路的马氏距离故障诊断方法研究[J]. 电子测量技术, 2012, 35(3): 128-131.
- [10] 韩涵,王厚军,龙兵,等. 基于改进马氏距离的模拟电路故障诊断方法[J]. 控制与决策, 2013(11): 1713-1717, 1722.

作者简介

谈恩民,教授,主要研究方向为电路可测试性设计、计算机辅助测试、智能测控技术。

E-mail: tem0135@guet.edu.cn

何正岭(通讯作者),硕士研究生,主要研究方向为计算机辅助测试。

E-mail: hezl1208@163.com

(上接第 28 页)

参考文献

- [1] 姚昆,杨学志,唐益明,等. SAR 海冰的三维区域 MRF 图像分割[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2551-2557.
- [2] 陈少华,韩冰,雷斌. SAR 海冰 MRF 分割精度与图像质量的关系研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(10): 31-35.
- [3] 张金良,鲁昌华,杨道莲. 曲波变换域的 SAR 图像相干斑去噪[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(12): 1108-1112.
- [4] 朱敏慧. 地球同步轨道星载合成孔径雷达概念研究[J]. 现代雷达, 2011, 33(5): 1-4.
- [5] 李雨龙,张红毅,黄丽佳,等. 同步轨道 SAR 电离层影响分析与仿真研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(9): 14-22.
- [6] 江冕,胡文龙. 地球同步轨道星载 SAR 观测特性分析[J]. 现代雷达, 2013, 35(4): 1-6.
- [7] 李军,荆孟道. 同步轨道 SAR 参数分析及成像方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(5): 931-936.
- [8] 赵宁,谈璐璐,张永胜,等. 星载 P 波段 SAR 电离层效应的双频校正方法[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(3): 255-261.
- [9] 李财品,张洪太,谭小敏. 地球同步轨道合成孔径雷达特性分析[J]. 现代电子技术, 2009(21): 1-4.
- [10] 李亮,洪峻,明峰,等. 电离层时空变化对中高轨 SAR 成像质量的影响分析[J]. 电子与信息学报, 2011, 36(4): 915-922.
- [11] 胡仕兵,汪学刚,姒强. 线性调频波形产生器相位误差影响分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(2): 101-106.
- [12] JEHLE M, FREY O, SMALL D, et al. Measurement of ionospheric TEC in spaceborne SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(6): 2460-2467.
- [13] MEYER F, BAMLER R, JAKOWSKI N, et al. The potential of low-frequency SAR systems for mapping ionospheric TEC distributions[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(4): 560-564.

作者简介

朱雪莹,1990 年出生,在读硕士研究生。主要研究方向为地球同步轨道 SAR 电离层影响、电离层 TEC 的估计方法。

E-mail: zzyycqu@163.com