

# BIT 系统的三态马尔可夫模型分析\*

柳新民,邱 静,刘冠军

(国防科技大学机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

**摘 要** BIT 技术是改善系统测试性和诊断能力的重要途径,但是较高的虚警率一直是阻碍 BIT 广泛应用的一个重要原因。研究过程中将系统状态划分为正常、间歇、故障三种状态,建立了马尔可夫模型,分析、对比了三态模型与两态模型的关系。理论分析结果表明:基于三态模型的 BIT,在提高故障检测率的同时,还可以较大程度地降低虚警率。

**关键词** BIT;三态马尔可夫模型;间歇故障;虚警率;故障检测率

**中图分类号** TN06 **文献标识码** A

## Analysis of the 3-state Markov Model in BIT

LIU Xin-min, QIU Jing, LIU Guan-jun

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** The BIT technique is an important approach to improve the testability and diagnostic capability of the system. But the high false alarm rate (FAR) is one of the important factors that prevent BIT from wider application. The states of a system are divided into 3 states that include OK state, intermittent state and faulty state. The Markov model is set up, the relation between 3-state model and 2-state model is compared. Theoretical analysis shows that BIT of 3-state model is better than that of 2-state model in reducing FAR as well as increasing false diagnosis rate (FDR).

**Key words** BIT; 3-state Markov model; intermittent fault; FAR; FDR

BIT 技术从 20 世纪 70 年代末开始应用在国外航空领域和武器装备系统中,在提高系统测试性、简化维修过程和降低保障费用等方面发挥了重要作用。但是 BIT 在应用上也存在一些问题,虚警率居高不下,降低虚警的同时往往也引起故障检测率的降低,该问题严重地阻碍了 BIT 效能的充分发挥和更广泛、更深入的应用<sup>[1]</sup>。如何在保证故障检测率一定的条件下降低虚警率,成为一个棘手的、亟待解决的问题。

来自美军装备和电子工业的数据表明,间歇故障是电子系统暂时失效的一个主要原因。它直接导致了不必要的修理、低战备完好率、太早的系统更换等,由此产生的浪费数目惊人<sup>[2]</sup>。通讯网络中,间歇故障非常常见,也很难确定<sup>[3]</sup>。数字系统的功能紊乱大多是由间歇故障与硬故障引起的。间歇故障在其中占了绝大多数,由此引起的异常经常在系统重新启动后消失<sup>[4]</sup>。混合电路里面,间歇故障是引起暂时失效的主要原因,即使在理想环境中,间歇故障次数也是硬故障的 10 ~ 30 倍<sup>[5]</sup>。国内外装备实践也表明:间歇故障是导致 BIT 虚警的主要原因之一,间歇故障很难与在工作试验和使用中出现的虚警区分开<sup>[1]</sup>。

因此,有学者提出将设备状态划分为正常、间歇、故障三种状态的模型方法,建立三态马尔可夫模型,通过辨识间歇故障,达到降低虚警的目的<sup>[6]</sup>。但是,三态模型迄今缺乏系统的理论研究,这在一定程度上影响了三态模型在 BIT 中的研究与应用。本文分析了三态模型与两态模型的关系,并对两者进行了对比,揭示了状态间更为深层的关系,获得了更有价值的结论。

### 1 定义

在进行分析研究之前,首先明确一些与三态有关的概念,并对三态的概念做出定义。

\* 收稿日期:2003-06-27  
基金项目:国家部委资助项目(41319040202)  
作者简介:柳新民(1971—),男,高级工程师,博士生。

1.1 传统的基于两态模型的故障分类及其特点

故障<sup>[7]</sup>是指产品不能执行规定功能的状态。一般按其持续时间划分为如下三类:

间歇故障<sup>[1]</sup>:随机出现和消失的故障,没有明显的模式或频率。

瞬态故障<sup>[1]</sup>:由系统内外部瞬时因素引起的故障。

永久故障<sup>[1]</sup>:持续、稳定的故障,其属性在测试前、测试中、测试后都不变化,永久地影响系统功能的行为,又叫硬故障、固态故障。

瞬态故障、间歇故障的特点是离线检测中不能发现,而在线检测却往往能够发现。显然,两态意义的故障包括永久故障和表现出来的那一部分间歇故障和瞬态故障,未表现出来的另一部分间歇故障、瞬态故障归入到正常状态。

1.2 三态模型中的三种状态的定义

故障态:电路或系统表现出与其规定行为之间存在持续稳定偏差的状态。理想状态下只指电路或系统处于永久故障的状态。

正常态:电路或系统运行良好,系统与其规定行为之间不存在偏差。理想状态下应该不包括任何故障或隐含故障。

间歇态:电路或系统介于正常态与故障态之间的临界或过渡状态。理想状态下应该包括全部瞬态故障和间歇故障。

2 状态、时间离散情况下两态马尔可夫模型与三态马尔可夫模型

马尔可夫过程是利用某一变量的现在状态和动向去预测该变量未来的状态及其动向,为决策者提供依据的一种分析方法。在故障诊断方面,马尔可夫模型依据设备的磨损和故障情况,将设备分成若干状态,设备内部的磨损或技术状态的降低由状态转移来反映。

2.1 状态、时间离散情况下的两态马尔可夫模型

先针对BIT系统传统的两状态划分建立两态马尔可夫模型,如图1所示。其中,状态0:正常状态;状态2:故障状态; $p$ :状态0到状态2的转变概率; $q$ :状态2到状态0的转变概率;且 $0 \leq p, q \leq 1$ 。 $P'_0(t)$ 为设备处于状态0的概率; $P'_2(t)$ 为设备处于状态2的概率。

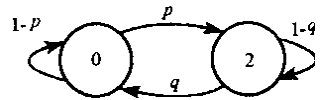


图1 两态马尔可夫模型  
Fig.1 2-state Markov model

则 Chapman-Kologorov 方程为:

$$[ P'_0(n) \quad P'_2(n) ] = [ P'_0(0) \quad P'_2(0) ] \times \begin{bmatrix} 1-p & p \\ q & 1-q \end{bmatrix}^n \tag{1}$$

由(1)式可以求得任意  $n \geq 0$  时的解,而其稳定状态下解为:

$$\begin{cases} P'_0(n) = \frac{q}{p+q} \\ P'_2(n) = \frac{p}{p+q} \end{cases} \tag{2}$$

且  $P'_0(n) + P'_2(n) = 1$  (3)

2.2 状态、时间离散情况下的三态马尔可夫模型

建立三态马尔可夫模型,如图2。状态0、2同上,状态1:间歇状态; $a$ :状态0到状态1的转变概率, $b$ :状态1到状态0的转变概率, $c$ :状态1到状态2的转变概率, $d$ :状态2到状态1的转变概率,且 $0 \leq a, b, c, d \leq 1$ ; $P_0(t)$ 、 $P_1(t)$ 、 $P_2(t)$ 分别为设备处于状态0、1、2的概率。

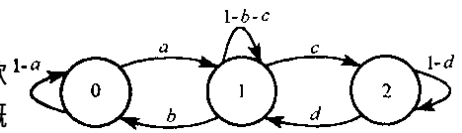


图2 三态马尔可夫模型  
Fig.2 3-state Markov model

则 Chapman-Kologorov 方程为:

$$[P_0(n) \quad P_1(n) \quad P_2(n)] = [P_0(0) \quad P_1(0) \quad P_2(0)] \times \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ b & -b-c & c \\ 0 & d & -d \end{bmatrix}^n \quad (4)$$

由(4)式可以求得任意  $n \geq 0$  时的解,而其稳定状态下解为:

$$\begin{cases} P_0(n) = \frac{bd}{ac + ad + bd} \\ P_1(n) = \frac{ad}{ac + ad + bd} \\ P_2(n) = \frac{ac}{ac + ad + bd} \end{cases} \quad (5)$$

且

$$P_0(n) + P_1(n) + P_2(n) = 1 \quad (6)$$

### 2.3 三态马尔可夫模型与两态马尔可夫模型之间的关系

仅从数学表达式(2)和式(5)来看,其参数  $p, q$  与  $a, b, c, d$  可以取  $[0, 1]$  间任意值,两态和三态模型的状态划分可以是任意的,显然这不符合实际情况,也没有意义。实际上,真实系统的转变概率参数  $a, b, c, d$  与  $p, q$  要受实际系统的限制,由状态划分的具体情况决定。根据两态与三态的定义所做的状态划分,决定了  $a, b, c, d, p, q$  必定满足下面的条件:

$$\begin{cases} \Delta P_0(n) = P'_0(n) - P_0(n) \geq 0 \\ \Delta P_2(n) = P'_2(n) - P_2(n) \geq 0 \\ \Delta P_0(n) + \Delta P_2(n) = P_1(n) \end{cases} \quad (7)$$

这个条件的物理意义十分明确,它在数学表达上是限定间歇态不能任意划分,必须是正常态与故障态的中间状态,包括所有的间歇故障与瞬态故障,即由原划在两态模型下正常态与故障态中的那部分间歇故障与瞬态故障组成。以后的分析总是在满足式(7)的条件下进行。

## 3 三态模型对 BIT 系统的影响分析

假设某系统的 BIT 以足够高的频率持续进行  $N$  次在线检测,令  $N_F$  为系统发生故障的次数,  $N_{OK}$  为正常状态的次数,  $N_{FD}$  为 BIT 检测是故障且确实是故障的次数,  $N_{FA}$  为虚警次数,  $N_{FN}$  为 BIT 未检测到的故障的次数,  $N_{IF}$  为处于间歇状态的次数。以下符号右上角加(')的表示两态模型下的量,不加(')的表示三态模型下的量。

两态模型下:

$$N'_{OK} \text{ 的数学期望值: } N'_{OK} = E(N'_{OK}) = N \times P'_0$$

$$N'_F \text{ 的数学期望值: } N'_F = E(N'_F) = N \times P'_2$$

三态模型下:

$$N_{OK} \text{ 的数学期望值: } N_{OK} = E(N_{OK}) = N \times P_0$$

$$N_F \text{ 的数学期望值: } N_F = E(N_F) = N \times P_2$$

$$N_{IF} \text{ 的数学期望值: } N_{IF} = E(N_{IF}) = N \times P_1$$

实际上,  $N'_{OK}$  应该是由  $N_{OK}$  和  $N_{IF}$  的一部分(也即是  $N'_{OK}$  比  $N_{OK}$  大的那部分,记为  $N_{IFOK} = N \times \Delta P_0$ ) 组成,即  $N'_{OK} = N_{OK} + N_{IFOK}$ 。

$N'_F$  也应该是由  $N_F$  和  $N_{IF}$  的一部分(也即是  $N'_F$  比  $N_F$  大的那部分,记为  $N_{IFF} = N \times \Delta P_2$ ) 组成,即  $N'_F = N_F + N_{IFF}$ 。

其中  $N_{IF} = N_{IFOK} + N_{IFF}$ 。

### 3.1 降低 BIT 的虚警率

两态模型下的虚警次数  $N'_{FA}$  的一个来源是将  $N'_{OK}$  中的某些点误判为故障,其原因有多方面,就 BIT 系统工作过程而言可分为(1)信号获取层上的原因,如从 BIT 系统中获取的信息不足,传感失效导致信

息丢失,环境干扰导致有用信息被淹没,系统工作的工况影响等(2)信号处理层上的原因,如信息处理方法不当,提取的特征不明显和特征不匹配等(3)诊断决策层上的原因,如决策模型与使用工况不匹配,决策方法不当等。由  $N'_{OK} = N_{OK} + N_{IFOK}$  可以得出: $N'_{FA}$  必有一部分是由  $N_{IFOK}$  贡献的(此部分记为  $N_{FAI}$ ,  $N_{OK}$  贡献部分记为  $N_{FAOK}$ , 因此  $N'_{FA}$  包含  $N_{FAOK} + N_{FAI}$ )。

另外,对于故障状态而言,由于所包含的间歇故障(包括瞬态故障)无法预料、非定常,需在特定的条件和激励下才能重复,因此往往是在线检测能发现,而离线检测却不能发现,从而导致虚警。间歇故障引起的诊断与维修问题,可以归结为图3所示的关系。中间 INTERMITTENT 是间歇故障,四周是由间歇故障引发的问题,这些问题最终体现在虚警上。图中:

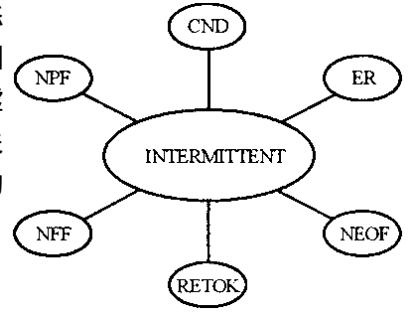


图3 间歇故障引发的问题

Fig.3 Problems induced by intermittent

CND: Can Not Duplicate(不能复现);

NPF: No Problem Found(没发现问题);

NFF: No Fault Found(没发现故障);

RETOK: Retest OK(重测合格);

NEOF: No Evidence of Failure(无失效迹象);

ER: Error Removal(错误更换)。

因此,两态模型下的虚警应该包括两个来源:一是来源于对两态模型下正常态的误诊部分,另一部分包含在故障态里面的间歇故障部分  $N_{IFF}$ 。从而有:

$$N'_{FA} = N_{FAOK} + N_{FAI} + N_{IFF} \quad (8)$$

式(8)中的  $N_{FAI}$  与  $N_{IFF}$  两项都来源于间歇故障,可见间歇故障是产生虚警的一个重要因素。

在三态模型下,间歇故障被单独辨识出来另行处理,原来由间歇故障引起的虚警部分  $N_{FAI}$  与  $N_{IFF}$  两项不复存在,即有  $N_{FA} = N_{FAOK}$ 。

根据虚警率的定义<sup>[1]</sup>:  $FAR = \frac{N_{FA}}{N} = \frac{N_{FA}}{N_{FD} + N_{FA}} \times 100\%$ , 可得:

$$\text{两态模型下的虚警率: } FAR'_2 = \frac{N'_{FA}}{N_{FD} + N'_{FA}} \times 100\% \quad (10)$$

$$\text{三态模型下的虚警率: } FAR_3 = \frac{N_{FA}}{N_{FD} + N_{FA}} \times 100\% \quad (11)$$

显然  $FAR_3 < FAR'_2$ , 即三态模型下的 BIT 虚警率低于两态模型下的 BIT 虚警率。这也说明,简单地将被测系统的状态划分为正常与故障的两态模型是不科学的。

从式(8)可以看出,降低虚警应该从两方面入手,一是提高 BIT 系统的诊断能力,尽量减小  $N_{FAOK}$  项,另一方面是确诊间歇故障,清除或减少间歇故障引起的  $N_{FAI}$  与  $N_{IFF}$ 。

### 3.2 提高 BIT 的故障检测率

两态模型下未检测到的故障次数  $N'_{FN} = N'_F - N_{FD}$ , 其  $N'_F$  是由三态模型下的  $N_F$  和  $N_{IF}$  的一部分( $N_{IFF}$ )组成,即  $N'_F = N_F + N_{IFF}$ 。因此可以推断: $N'_F$  必有一部分是由三态模型下的  $N_{IFF}$  贡献的(此部分记为  $N_{FNI}$ , 将  $N_F$  贡献部分记为  $N_{FNF}$ )。

另外,被划入到正常状态的那部分间歇故障应该也是故障。漏诊的原因有多方面,就 BIT 系统工作过程而言有(1)信号获取层上的原因,如 BIT 系统检测的时间间隔太长,有可能检测时,间歇故障正好处于不活跃阶段,从而漏诊(2)信号处理层上的原因,如降噪上采用的平均算法,将间歇故障信号与正常信号平均,造成特征丢失(3)诊断决策层上的原因,如诊断阈值相对而言太高,对一部分故障不敏感,尤其是被划入到正常状态的那部分间歇故障。漏诊的后果是  $N_{IFOK}$  成为  $N'_{FN}$  的一部分,从而有:

$$N'_{FN} = N_{FNF} + N_{FNI} + N_{IFOK} \quad (12)$$

式(12)中的  $N_{FNI}$  与  $N_{IFOK}$  两项都来源于间歇故障,可见间歇故障是造成故障检测率降低的一个重要因素。

在三态模型下,间歇故障同样被单独辨识出来而另行处理,原来由间歇故障引起的未检测到的故障次数  $N_{FNI}$  与  $N_{IFOK}$  不复存在,此时未检测到的故障次数为:

$$N_{FN} = N_{FNF} \quad (13)$$

由故障检测率的定义<sup>[1]</sup>:  $FDR = \frac{N_{FD}}{N_{FD} + N_{FN}} \times 100\%$ , 可得:

$$\text{两态模型下的故障检测率: } FDR'_2 = \frac{N_{FD}}{N_{FD} + N'_{FN}} \times 100\% \quad (14)$$

$$\text{三态模型下的故障检测率: } FDR_3 = \frac{N_{FD}}{N_{FD} + N_{FN}} \times 100\% \quad (15)$$

显然  $FDR'_2 < FDR_3$ , 即三态模型下的 BIT 故障检测率高于两态模型下的 BIT 故障检测率。这从另一个方面说明: 简单地将被测系统的状态划分为正常与故障的两态模型是不科学的。

从式(12)也可以看出, 提高 BIT 的故障检测率也应该从两方面入手, 一是提高 BIT 系统的诊断能力, 尽量减小  $N_{FNF}$  项, 另一方面是确诊间歇故障, 清除或减少间歇故障引起的  $N_{FNI}$  与  $N_{IFOK}$ 。

## 4 结论

将系统的状态划分为正常、间歇、故障三种状态进行辨识的 BIT 系统, 与基于两态(正常、故障)模型的 BIT 系统相比, 能力与性能得到了提高, 在提高 BIT 故障检测率的同时, 还可以降低 BIT 虚警率。在保证 BIT 故障检测率的条件下, 降低 BIT 虚警率的有效手段是确诊间歇故障。由此可以预计, 基于三态模型的方法在 BIT 系统中的应用前景将十分广阔。

## 参考文献:

- [1] 曾天翔. 电子设备测试性及诊断技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995.
- [2] Sorensen B A, Kelly G, Sajecki A, Sorensen P W. An Analyzer for Detecting Intermittent Faults in Electronic Devices[R]. IEEE, Autotestcon, Systems Readiness Technology Conference, Sept. 1994: 417 - 421.
- [3] Blom M, Lippolt B. Diagnosing Intermittent Faults in Telecommunication Networks[A]. IEEE Global Telecommunications Conference, 1992, Vol. 1: 544 - 548.
- [4] Prasad V B. Markovian Model for the Evaluation of Reliability of Computer Networks with Intermittent Faults[J]. IEEE. Circuits and Systems, 1991, 4: 2084 - 2087.
- [5] Ismaeel A A, Bhatnagar R. Test for Detection and Location of Intermittent Faults in Combinational Circuits[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1997, 46(2): 269 - 274.
- [6] Zbytniewski J. SMART BIT/TSMD integrat[R], AD-A247192, Rome Laboratory, 1991.
- [7] GJB 3385 - 98. 测试与诊断术语[S]. 国防科学技术工业委员会发布, 1998.
- [8] Prasad V B. Computer Networks Reliability Evaluations and Intermittent Faults[A]. IEEE. Proceedings of the 33<sup>rd</sup> Midwest Symposium on Circuits and Systems, 1990, Vol. 1: 327 - 330.
- [9] Prasad V B. Digital Systems with Intermittent Faults and Markovian Model[A]. IEEE. Proceedings of the 35<sup>th</sup> Midwest Symposium on Circuits and Systems, 1992, Vol. 1: 195 - 198.
- [10] Bharucha-Reid A. 马尔柯夫过程初步及其应用分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979.



