

自动测试设备的效率方程

高锡俊 周玉芬

(空军工程学院4系, 西安, 710038)

AN EFFECTIVENESS EQUATION OF ATE

Gao Xi-jun, Zhou Yu-fen

(*Electronic Engineering Dept. of the Air Force Engineering College,
Xi'an, 710038*)

摘要 效率是各项指标的综合度量。首先提出度量自动测试设备(ATE)效率的8项技术指标: 故障检测率FDR、故障隔离率FIR、检测准确度FDA、测试时间 t_d 、故障检测概率 P_d 、故障漏报概率 P_m 、虚警概率 P_f 和故障分辨率 δ 。重点是建立ATE的效率方程, 包括建立和求解ATE的工作状态方程, 导出故障检测效率方程, 无模糊故障隔离的效率方程和模糊故障隔离的效率方程, 即ATE的效率方程, 从而为ATE指标的分析与综合提供一种理论依据。

关键词 自动测试设备, ATE指标, 测试效率

Abstract Effectiveness is an integrated measurement of all parameters. This paper presents firstly eight technical parameters which measure the effectiveness of the automatic test equipment(ATE). They are fault detection rate (FDR), fault isolation rate (FIR), fault detection accuracy (FDA), test time (t_d), fault detection probability (P_d), fault missing probability (P_m), false alarm probability (P_f) and fault resolution (δ). Then the paper focuses its main discussion on establishing the effectiveness equation of ATE, during the process of which the authors begin with establishing and solving the operational state equation of ATE, and then deduce the fault detection effectiveness equation, fault isolation effectiveness equation without ambiguity and finally the fault isolation effectiveness equation with ambiguity, which is the ATE effectiveness equation providing a theoretical basis for analyzing and synthesizing the ATE parameters.

Key words automatic test equipment, parameters of ATE, test effectiveness

1 ATE效率的度量——ATE的技术指标

ATE的效率是ATE技术指标的综合度量, 由哪些指标度量ATE的效率众说不一。美国军标 MIL-STD-216 S 中提出测试效率的度量包括故障覆盖率、故障分辨率、故障检测时间、故障隔离时间和虚警率^[1]。本文认为度量ATE效率的技术指标是: 故障检测率、

1990年2月25日收到, 1991年9月21日收到修改稿

故障隔离率、检测准确度、测试时间、故障检测概率、故障漏报概率、虚警率和故障分辨率。

(1) 故障检测率 FDR FDR 定义为使用 ATE 检测故障的百分比。即在所有可能发生的故障总数中,可自动检测的故障数所占的百分比。

(2) 故障隔离率 FIR FIR 定义为使用 ATE 隔离已检测出的故障的百分比。即在所有可检测的故障总数中,可自动隔离的故障数所占的百分比。

(3) 检测准确度 FDA FDA 定义为正确检测故障的概率。即有了故障不漏报、没有故障不虚报的概率。

(4) 测试时间定 t_d t_d 义为执行一个完整的测试诊断周期所需时间。

(5) 故障检测概率 P_d 由于元件存在容差,测量存在随机误差,导致故障检测的不确定性。 P_d 定义为故障信号可以从噪声背景中检测出来的概率。

(6) 故障漏报概率 P_m P_m 定义为故障信号被噪声淹没的概率。由于故障被检出和被漏报互为对立事件,故 $P_m=1-P_d$ 。

(7) 虚警概率 P_f P_f 定义为未发生故障而误报故障的概率。即噪声信号超过检测力限的概率。

(8) 故障分辨率 δ 分辨率反映故障隔离的模糊性。 δ 定义为在故障的模糊集中,最大不可分辨的故障数。

2 ATE的效率方程

指标之间不是孤立的,而是互相制约的,效率则是其纽带。建立 ATE 的效率方程是指标分析和综合的基石。D Gleason 于 1982 年建立了包含 3 项指标的方程^[2],作者于 1989 年建立了包含 4 项指标的方程^[3],都未能包含 ATE 的全部技术指标,因此,有必要建立一个包含全部技术指标的 ATE 的效率方程。

2.1 ATE 工作的状态方程

为了建立 ATE 的效率方程,首先分析 ATE 系统的工作过程。ATE 的工作过程可归结为 4 种工作状态及其转换过程。假定 ATE 的 4 种工作状态为 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 , S_1 为被测系统 (SUT) 正常 (指可测部件未发生故障),且检测为正常; S_2 为 SUT 正常但检测为故障 (虚警); S_3 为 SUT 可测部件发生故障且检测为故障; S_4 为可测部件故障但被漏报。为简化分析,假定故障流、虚警流都是最简单流,可测部件的故障率为 λ_d 、虚警率为 λ_f ,则 ATE 的工作过程可由 M/M/1 型排队服务系统来描述。若以 P_{ij} 表示系统从 t 时刻处于 S_i 状态,到 $t+\Delta t$ 时刻处于 S_j 状态的转移概率,根据最简单流的平稳性、无后效性和普通性,则有

$$P_{11}: \text{在 } \Delta t \text{ 时间内没有发生故障,也没有出现虚警,由于二事件是相互独立的,故}$$

$$P_{11} = (1 - \lambda_d \Delta t)(1 - \lambda_f \Delta t) = 1 - (\lambda_d + \lambda_f) \Delta t + 0(\Delta t) \quad (1)$$

$$P_{12}: \text{在 } \Delta t \text{ 时间内没有发生故障,但出现了虚警,类似地有}$$

$$P_{12} = (1 - \lambda_d \Delta t) \lambda_f \Delta t = \lambda_f \Delta t + 0(\Delta t) \quad (2)$$

$$P_{13}: \text{在 } \Delta t \text{ 时间内可测部件发生故障且被检测出来,故}$$

$$P_{13} = \lambda_d \Delta t P_d \quad (3)$$

P_{14} : 在 Δt 时间内可测部件发生故障但被漏报,故

$$P_{14} = \lambda_d \Delta t P_m \quad (4)$$

$S_2 \sim S_4$ 可以认为是吸收状态, 因为一旦发生故障且给出诊断结果, 一个测试过程就结束了, 故

$$P_{ii} = 1 \quad (i = 2 \sim 4) \quad (5)$$

这样, 可得如下转移矩阵

$$\begin{array}{c} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{array} \begin{array}{c} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{array} \begin{bmatrix} 1 - \lambda_a - \lambda_f & \lambda_f & \lambda_d P_a & \lambda_d P_m \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其状态方程为

$$\begin{cases} \dot{P}_1(t) = -(\lambda_a + \lambda_f) P_1(t) \\ \dot{P}_2(t) = \lambda_f P_1(t) \\ \dot{P}_3(t) = \lambda_d P_a P_1(t) \\ \dot{P}_4(t) = \lambda_d P_m P_1(t) \end{cases} \quad (7)$$

因为在开始工作时, 系统处于正常状态, 故有如下初始条件

$$P_1(0) = 1, P_i(0) = 0 \quad (i = 2 \sim 4) \quad (8)$$

在上述初始条件下, 状态方程的解为

$$P_1(t) = e^{-(\lambda_a + \lambda_f)t} \quad (9)$$

$$P_2(t) = \frac{\lambda_f}{\lambda_a + \lambda_f} [1 - e^{-(\lambda_a + \lambda_f)t}] \quad (10)$$

$$P_3(t) = \frac{\lambda_d P_a}{\lambda_a + \lambda_f} [1 - e^{-(\lambda_a + \lambda_f)t}] \quad (11)$$

$$P_4(t) = \frac{\lambda_d P_m}{\lambda_a + \lambda_f} [1 - e^{-(\lambda_a + \lambda_f)t}] \quad (12)$$

(9)式~(12)式表达了 ATE 的动态特性, 我们感兴趣的是其稳态特性, 即统计平衡特性

$$P_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} P_1(t) = 0 \quad (13)$$

$$P_2 = \lim_{t \rightarrow \infty} P_2(t) = \frac{\lambda_f}{\lambda_a + \lambda_f} \quad (14)$$

$$P_3 = \lim_{t \rightarrow \infty} P_3(t) = \frac{\lambda_d P_a}{\lambda_a + \lambda_f} \quad (15)$$

$$P_4 = \lim_{t \rightarrow \infty} P_4(t) = \frac{\lambda_d P_m}{\lambda_a + \lambda_f} \quad (15)$$

2.2 ATE 的效率方程

根据检测准确度的定义并考虑到 (13) 式、(15) 式, 检测准确度 FDA 可表示为

$$FDA = P_1 + P_3 = \frac{\lambda_d P_d}{\lambda_d + \lambda_f} \quad (17)$$

由于虚警概率可表示为 $P_f = \lambda_f t_d$, 上式可改写为

$$FDA = \frac{\lambda_d t_d P_d}{\lambda_d t_d + P_f} \quad (18)$$

故障检测效率 E_d 与故障检测率 FDR 和检测准确度 FDA 成正比, 故

$$\begin{aligned} E_d &= FDA \times FDR \\ &= \frac{\lambda_d t_d P_d}{\lambda_d t_d + P_f} \times FDR \end{aligned} \quad (19)$$

故障隔离效率 E_i 与 E_d 和故障隔离率 FIR 成正比, 故

$$\begin{aligned} E_i &= FDA \times FDR \times FIR \\ &= \frac{\lambda_d t_d P_d}{\lambda_d t_d + P_f} \times FDR \times FIR \end{aligned} \quad (20)$$

上式中 FIR 是无模糊 ($\delta=1$) 故障隔离率, 故 (20) 式是无模糊故障隔离的效率方程。随着故障隔离率的增大, 可能出现模糊隔离, 即 $\delta > 1$, 不过, 在可隔离的故障 (故障率为 λ_i) 中, 大部分故障 (故障率为 λ_i) 仍能无模糊隔离 ($\delta_i=1$), 少部分故障 (故障率为 λ_k) 的分辨率 $\delta_k = k > 1$ 。对故障隔离效率起作用的是平均分辨率 $\bar{\delta}$, $\bar{\delta}$ 由加权平均算出

$$\bar{\delta} = \sum_{\forall k} \frac{\lambda_k}{\lambda_i} \delta_k, \quad \left(\lambda_i = \sum_{\forall k} \lambda_k \right) \quad (21)$$

则模糊故障隔离的效率 E 可表示为

$$\begin{aligned} E &= FDA \times FDR \times \frac{FIR}{\bar{\delta}} \\ &= \frac{\lambda_d t_d P_d \times FDR \times FIR}{(\lambda_d t_d + P_f) \sum_{\forall k} \frac{\lambda_k}{\lambda_i} \delta_k} \end{aligned} \quad (22)$$

当 $\bar{\delta}=1$, (22) 式变成 (20) 式; 当 $\bar{\delta}=1$, $FIR=100\%$, (22) 式变成 (19) 式; 进而当 $FDR=100\%$, (22) 式变成 (18) 式。可见, (18) 式、(19) 式、(20) 式都是 (22) 式的特例, 故 (22) 式是 ATE 的效率方程。

效率方程包含了 ATE 的 6 项技术指标: FDR、FIR、 t_d 、 δ 、 P_d 、 P_f , 给定目标函数 (如 E 最大) 和约束条件 (已定技术指标), 利用数学规划法可求出待定指标的最佳值, 从而为 ATE 指标的综合提供了一种理论依据

参 考 文 献

- 1 MIL-STD-2165. Testability Program for Electronic Systems and Equipment, Washington, DOD USA, Jan. 1985; 74
- 2 Gleason, D Analysis of Built-in Test Accuracy. In: 1982 Proc Annual R&M Symposium, R&M Symposium, Los Angeles CA USA, Jan. 1982, New York, IEEE, 1982, 370~372
- 3 周玉芬, 高锡俊. 模拟电路故障诊断, 北京, 国防工业出版社. 1982, 124~144