第16卷 第4期 自 动 化 学 报 Vol. 16, No. 4
1990年7月 ACTA AUTOMATICA SINICA July, 1990

关于系统可靠性中的瞬时故障的若干考虑

蔡开元 文传源
(北京航空航天大学三系)

摘 要

故障可分为永久故障和瞬时故障. 本文指出了二者的不同点, 并定义了第一类和第二类瞬时故障,分别计算了这两类瞬时故障在 $(0,t)$ 时间内不导致系统故障的概率.

关键词——永久故障,瞬时故障,可靠度.

一、引 言

故障 (Fault) 一般可分为永久故障和瞬时故障. 永久故障和瞬时故障有许多不同点. 首先它们的表现形式不同. 永久故障必将导致系统功能失效,产生系统故障(System Failure). 瞬时故障则在多数情况下不会导致系统故障;其次, 它们的持续时间不同. 永久故障持续时间很长,一般被认为超过系统工作时间,而瞬时故障持续时间很短, 譬如不超过几个毫秒;第三,它们的产生原因不同. 永久故障一般是由于系统(元件)物理性能随工作时间递增而恶化所致. 瞬时故障则由于一系列外部或内部的不确定因素所致. 外部因素包括温度、大气压力、电源波动、电磁干扰等. 内部因素则指元件之间的连接松散、阻抗波动、内部噪音等,如计算机存储器的刷新动作和指令执行会产生噪音[1]. 迄今为止,对系统可靠性的研究主要面向永久故障而忽略对瞬时故障的考虑, 这是因为瞬时故障一般不导致系统故障,其持续时间短,不易发现和隔离, 而且其检测费用甚至可高达系统维修费用的 90%[2].

然而实际系统中瞬时故障大量存在, 许多功能失效是因瞬时故障所致[3,4], 其发生几率比永久故障发生几率大得多[5]. 另一方面, 在计算机系统中瞬时故障可能导致数据错误或控制流错误, 是产生软件错误的重要原因[6]. 可见瞬时故障是系统可靠性中不可忽视的因素.

对瞬时故障特性的数学描述始于 Breuer 的工作[7],给出的模型是在假定瞬时故障存在的情况下,分析瞬时故障在无效 (Inactive) 状态(这时瞬时故障不导致系统功能失效)与有效 (Active) 状态(这时瞬时故障导致系统功能失效)上的动态特性, 并认为两状态之间的转移可以 Markov 链描述. Su 等人将 Breuer 模型推广到连续时间的 Markov 链的情形[3] Stiffler 则在考虑检测条件下将 Su 模型推广到半 Markov 链的情形[8]. 迄今

本文于1988年2月8日收到.

为止，在这三个模型中，Breuer 模型最为典型，在瞬时故障检测中被广泛应用[9]．然而这三个模型都是以瞬时故障存在为前提，并不能体现瞬时故障对系统可靠性的影响．尽管有个别模型从可靠性角度考察瞬时故障的特性，但它们都假定瞬时故障的状态转移具有 Markov 性质[1]．本文针对两类性质不同的瞬时故障(其状态转移未必具有 Markov 性质)考虑其对系统的影响，着重给出在 $(0, t)$ 时间内瞬时故障不导致系统故障的概率．

二、第一类瞬时故障

第一类瞬时故障具有这样的性质：只要其持续时间超过某一界限，譬如 e，则导致系统故障．假设系统具有单一瞬时故障源（即所发生的所有瞬时故障具有相同的概率意义上的动态特性)，且在一个瞬时故障消失之前不会产生新的瞬时故障．又假设瞬时故障发生于时刻 $\{t_i, i = 1,2,\cdots\}$，消失于时刻 $\{\tau_i, i = 1,2,\cdots\}$，如图 1 所示．

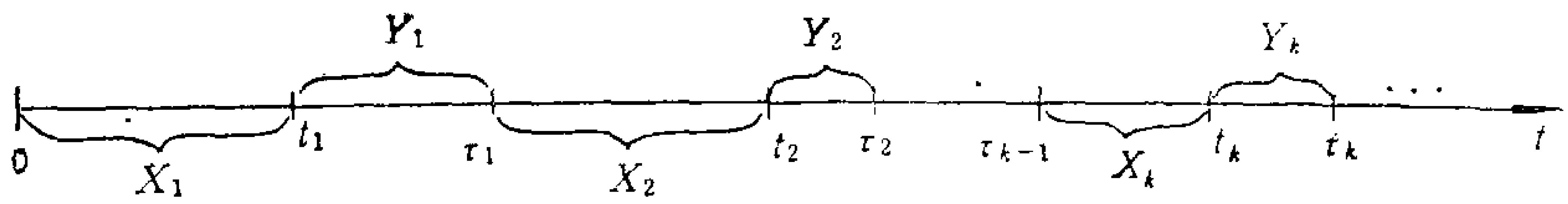

图 1　瞬时故障

记

$$X_i = t_i - \tau_{i-1},\ i = 1,2,\cdots;\ \tau_0 = 0, \tag{1}$$

$$Y_i = \tau_i - t_i,\ i = 1,2,\cdots;\ Y_0 = 0. \tag{2}$$

$\{X_i, i = 1,2,\cdots\}$，$\{Y_i, i = 1,2,\cdots\}$ 是两组随机变量．假设它们两两相互独立，且具分布

$$P_r\{X_1 \leqslant t\} = A_1(t),\ P_r\{X_i \leqslant t\} = A(t),\ i = 2,3,\cdots, \tag{3}$$

$$P_r\{Y_i \leqslant t\} = B(t),\ i = 1,2,\cdots. \tag{4}$$

令

$$Z_i = X_i + Y_i,\ i = 1,2,\cdots, \tag{5}$$

则 $\{Z_i, i = 1,2,\cdots\}$ 构成一个延迟更新过程．

记

$$S_0 = 0,\ S_n = \sum_{i=1}^{n} Z_i,\ n = 1, 2,\cdots. \tag{6}$$

又令

$$N(t) = \sup\{n: S_n \leqslant t\}, \tag{7}$$

$$Y'_{N(t)+1} = \begin{cases} 0, & \text{当 } X_{N(t)+1} \geqslant t - S_{N(t)}, \\ t - S_{N(t)} - X_{N(t)+1}, & \text{当 } X_{N(t)+1} < t - S_{N(t)}, \end{cases} \tag{8}$$

则在 $(0, t)$ 时间内瞬时故障不导致系统故障的概率为

$$M(t,e) = P_r\{\max_{0 \leqslant i \leqslant N(t)} Y_i \leqslant e,\ Y'_{N(t)+1} \leqslant e\}. \tag{9}$$

推导结果是：当 $t \leqslant e$ 时，

$$M(t,e) \equiv 1;\ \text{当 } t \leqslant e. \tag{10}$$

当 $t>e$ 时,

$$M(t,e)=1-A_1(t)+\sum_{k=1}^{\infty}\int_0^t G_k^y(e,s)[1-A(t-s)]dF_k(s)$$
$$+\int_{t-e}^{t}[1-B(t-x_1)]dA_1(x_1)+\sum_{k=1}^{\infty}\int_0^{t-e}G_k^y(e,s)\left[\int_{t-s-e}^{t-s}(1-B(t-s-x_{k+1}))dA(x_{k+1})\right]\cdot dF_k(s)+\sum_{k=1}^{\infty}\int_{t-e}^{t}G_k^y(e,s)\left[\int_0^{t-s}(1-B(t-s-x_{k+1}))dA(x_{k+1})\right]dF_k(s). \quad (11)$$

式中

$$F_k(s)=C_1(s)*C^{(k-1)}(s),\ k=1,2,\cdots, \quad (12)$$

$$C_1(s)=A_1(s)*B(s),\ C(s)=A(s)*B(s), \quad (13),(14)$$

$$G_k^y(e,s)=\begin{cases}1 & e\geqslant s,\ k=1,2,\cdots,\\ \int_0^s E_k^y(e,s-x)d_xI_k(x,s), & e<s,\ k=1,2,\cdots,\end{cases} \quad (15)$$

$$I_k(x,s)=\frac{\dfrac{\partial}{\partial s}J_k(x,s)}{\dfrac{dF_k(s)}{ds}},\ x\leqslant s,\ k=1,2,\cdots, \quad (16)$$

$$J_k(x,s)=\int_0^x B_k(s-\xi)dA_k(\xi),\ x\leqslant s,\ k=1,2,\cdots, \quad (17)$$

$$A_k(\xi)=A_1(\xi)*A^{(k-1)}(\xi),\ k=1,2,\cdots, \quad (18)$$

$$B_k(\xi)=B^{(k)}(\xi),\ k=1,2,\cdots, \quad (19)$$

$$E_1^y(e,s)=\begin{cases}1, & s\leqslant e,\\ 0, & s>e,\end{cases} \quad (20)$$

$$E_k^y(e,s)=\begin{cases}1, & s\leqslant e,\ k=2,3,\cdots,\\ \int_0^e E_{k-1}^y(e,s-y_k)d_{y_k}H_k(y_k,s), & s>e,\ k=2,3,\cdots,\end{cases} \quad (21)$$

$$H_k(y_k,s)=\frac{\dfrac{\partial}{\partial s}L_k(y_k,s)}{\dfrac{d}{ds}B_k(s)},y_k\leqslant e<s,\ k=2,3,\cdots, \quad (22)$$

$$L_k(y_k,s)=\int_0^{y_k}B_{k-1}(s-\xi)dB(\xi),\ y_k\leqslant e<s,\ k=2,3,\cdots, \quad (23)$$

如果以 $R_p(t)$ 表示 $(0,t)$ 时间内不发生永久故障的概率，那么在考虑瞬时故障情况下，$(0,t)$ 时间内不发生系统故障的概率，也即系统可靠度，记为 $R(t)$，可表示为

$$R(t)=R_p(t)\cdot M(t,e). \quad (24)$$

三、第二类瞬时故障

第二类瞬时故障具有这样的性质：其持续时间可假设为零，是否导致系统故障服从某一概率分布．假设其发生时刻为 $\{\tau_i, i = 1,2,\cdots\}$．可参见图 1，只是此时 t_i 与 τ_i 重叠．记

$$Z_i = \tau_i - \tau_{i-1},\ i = 1,2,\cdots;\ \tau_0 = 0. \tag{25}$$

已知

$$P_r\{Z_1 \leqslant z\} = C_1(z),\ P_r\{Z_i \leqslant z\} = C(z),\ i = 2,3,\cdots, \tag{26}$$

又记

$$S_i = \tau_i,\ i = 0,1,2,\cdots,\ N(t) = \sup\{n; S_n \leqslant t\}, \qquad (27),(28)$$

令 ω_i 表示第 i 个瞬时故障导致系统故障这一事件，$\bar{\omega}_i$ 表示其逆事件，且假设 $\bar{\omega}_i$ 出现概率仅与 S_i 有关，而独立于 $\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \cdots, \bar{\omega}_{i-1}$.

$$P_r\{\bar{\omega}_i | S_i = s\} = p(s),\ i = 1,2,\cdots. \tag{29}$$

那么我们所要求的 $(0, t)$ 时间内所有瞬时故障不导致系统故障的概率，记为 $M(t)$，可表示为

$$M(t) = P_r\{\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_1, \cdots, \bar{\omega}_{N(t)}\}. \tag{30}$$

推导结果是

$$M(t) = 1 - C_1(t) + \int_0^t [1 - C(t - \sigma_1)] p(\sigma_1) dC_1(\sigma_1) + \sum_{k=2}^{\infty} V_{1k}(t, 0). \tag{31}$$

式中

$$V_{1k}(t, 0) = \int_0^t V_{2k}(t - \sigma_1, \sigma_1) p(\sigma_1) dC_1(\sigma_1),\ k = 2, 3, \cdots, \tag{32}$$

$$V_{jk}(t, \sigma_{j-1}) = \int_0^t V_{(j+1)k}(t - \sigma_j, \sigma_{j-1} + \sigma_j) p(\sigma_{j-1} + \sigma_j) dC(\sigma_j),$$

$$j = 2,3,\cdots,k-1;\ k = 3,4,\cdots, \tag{33}$$

$$V_{kk}(t, \sigma_{k-1}) = \int_0^t [1 - C(t - \sigma_k)] p(\sigma_{k-1} + \sigma_k) dC(\sigma_k), k = 2, 3, \cdots. \tag{34}$$

参　考　文　献

[1] Malaiya, Y. K., Su, S. Y. H., A Survey of Models for Intermittent Faults Analysis. Proc. NCC, 577—585, 1979.

[2] Lala, P. K., Fault Tolerant and Fault Testable Hardware Design. Prentice-Hall(1985).

[3] 蔡开元，文传源，第三类瞬时故障，航空学报，**10**(1989)，A355—361.

[4] Cai Kaiyuan, Wen Chuanyuan, Zhang Minglian, Some Forms of Type 1 Transient Faults. Proc. the First China-Japan International Symposium on Instrumentation, Measurement and Automatic Control, 1989, 117—122.

[5] Kopetz, H., Software Reliability, Macmillan Press(1979).

[6] Cai Kaiyuan, Wen Chuanyuan, Lian Feng, Analysis of Software Reliability Behavior in the Presence of Hardware Transient Faults. Proc. Beijing International Conference on System Simulation and Scientific Computing, 1989, 283—287.

[7] Breuer, M. A., Testing for Intermittent Faults in Digital Circuits, *IEEE Transaction on Computer*, **C-22** (1973), 241—246.

[8] Stifflen, J. J., Robust Detection of Intermittent Faults. Dige. FTCS-10(1980), 216—218.
[9] Savir, J., Optimal Random Testing of Signal Intermittent Faults in Combinational Circuits. Proc. FTCS-7(1977), 180—185.

SOME CONSIDERATIONS ON TRANSIENT FAULTS IN SYSTEM RELIABILITY

Cai Kaiyuan Wen Chuanyuan
(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract

There are two kinds of faults: permanent and transient. This paper deals with transient fault, that will be further classified into two categories: type I and II. The probabilities of not leading to system failure, due to these two types of faults, will be calculated and expressed in terms of time.

Key words ——Permanent fault; transient fault; reliability.