

引信安全系统过程识别理论及其可靠性

王军波 高 敏

(军械工程学院三系 石家庄 050003)

摘要 将马尔可夫(Markov)过程理论应用于引信安全系统的状态转移过程,通过状态转移过程分析和状态转移概率的计算,建立起引信安全系统过程识别理论,并得到计算该系统可靠性的方法。

关键词 引信 安全系统 马尔可夫过程 失效率 可靠性

中图法分类号 T J430 1*

引信是弹药战斗部的控制中枢。引信中都设有安全系统,其作用是保证在平时勤务处理和发射时使引信处于安全状态。而发射后在预定时间或地点使引信处于待发状态,因此,引信安全系统应具有很高的可靠性。我国“引信安全性设计准则”规定,引信安全系统在发射周期开始前失效率应小于 $\times 10^{-6}$ 。对于这一高可靠性指标,采用常用的抽样试验与数据处理方法很难得到验证。如何计算或验证引信安全系统失效率,历来是摆在人们面前的一个难题。我们将马尔可夫过程应用于引信安全系统的过程识别,以双环境独立可恢复系统为例,建立起引信安全系统过程识别理论并得到引信安全系统失效率计算方法。

1 引信安全系统环境识别模型

引信安全系统的环境识别与决策可用图 1表示。输入是引信在勤务处理或发射时所受的环境激励;识别与决策是引信安全系统对环境激励的响应过程;输出是决策后的引信安全状态。

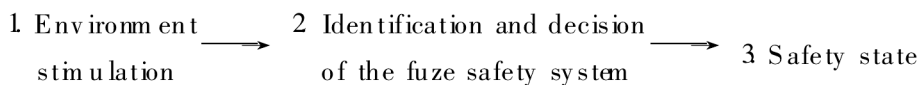


图 1 安全系统环境识别过程

Fig. 1 Course of environmental recognition for the safety system

一旦安全系统将环境条件识别为解除保险的预定条件,则状态控制器将使安全系统由安全状态向待发状态转变。设在 t 时刻安全系统在环境激励下的状态变量为 $S(t)$,由于安全系统一般只有两个稳定状态,即安全和待发状态。若忽略过渡状态存在时刻,则安全系统状态变量表示为

$$S(t) = \begin{cases} S_0 & \text{安全状态} \\ S_1 & \text{待发状态} \end{cases} \quad (1)$$

其中: T 为引信的勤务处理时间;在 T 时间内安全系统在待发状态实际上是失效状态。考

* 王军波:男,1960年 11月生,硕士,讲师。
1998-04-09收到原稿,1998-05-06收到修改稿。

虑到安全系统的安全状态又有两种情况,即正常安全状态和故障安全状态,则相应安全系统状态变量又可表示为

$$S(t) = \begin{cases} S_{01} & \text{正常安全状态} & \text{识别环境为“假”} \\ S_{02} & \text{故障安全状态} & \text{先识别为真,后识别为假而转入故障态} \\ S_1 & \text{待发状态(失效状态)} & \text{识别环境为“真”} \end{cases} \quad (2)$$

由此得到引信安全系统环境识别模型如图 2 所示。

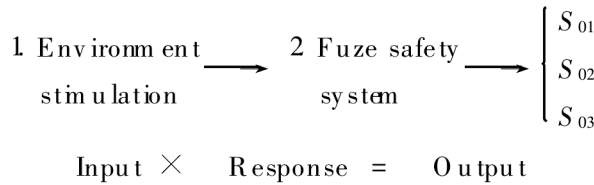


图 2 安全系统环境识别模型

Fig 2 Model of environmental recognition for the safety system

则安全系统在勤务处理时间 T 内的可靠度、安全系统失效率及故障安全机率分别为

$$\begin{cases} R_A = P_{01}(T) = P[S(T) = S_{01}] \\ F_d = P_1(T) = P[S(T) = S_1] \\ F_m = P_{02}(T) = P[S(T) = S_{02}] \end{cases} \quad (3)$$

$$R_A + F_d + F_m = 1 \quad (4)$$

2 安全系统状态变量的马尔可夫特性

在引信中由于环境条件的差异(包括勤务处理条件、发射条件等)和零部件性能参数的散布,引信安全系统的状态转移必然是一种随机过程。

记引信状态转移随机过程为 $\{S(t), t \geq 0\}$, 由于状态变量 $S(t)$ 只有两个取值,即 S_0 (安全)和 S_1 (待发),那么 $\{S(t), t \geq 0\}$ 的状态空间为

$$S = [S_0, S_1]$$

对引信安全系统而言,引信未来安全状态只与当前状态有关,而与从前历史无关,即当前时刻已失效的引信,安全与失效的可能性已消失,下一时刻不会再出现。只有当前时刻未失效的引信,未来才会出现安全与失效的可能。所以对于引信安全状态而言,存在下式

$$\begin{cases} P[S(t_n) = S_0 | S(t_{n-1}) = S_1] = P_{10}(t_{n-1}, t_n) \equiv 0 \\ P[S(t_n) = S_1 | S(t_{n-1}) = S_1] = P_{11}(t_{n-1}, t_n) \equiv 1 \\ P[S(t_n) = S_0 | S(t_{n-1}) = S_0] = P_{00}(t_{n-1}, t_n) \\ P[S(t_n) = S_1 | S(t_{n-1}) = S_0] = P_{01}(t_{n-1}, t_n) \end{cases} \quad (5)$$

由于状态空间为 $S = [S_0, S_1]$, 故 i, j 只有 S_0, S_1 两个取值。由 (5) 式可得

$$\begin{cases} \sum_{j=0}^1 P_{0j}(t_{n-1}, t_n) = P_{00}(t_{n-1}, t_n) + P_{01}(t_{n-1}, t_n) \equiv 1 \\ \sum_{j=0}^1 P_{1j}(t_{n-1}, t_n) = P_{10}(t_{n-1}, t_n) + P_{11}(t_{n-1}, t_n) = 0 + 1 \equiv 1 \end{cases} \quad (6)$$

由此可看出,引信状态随机过程 $\{S(t), t \geq 0\}$ 为马尔可夫过程,而且引信一旦从 S_0 状态转到 S_1 状态,引信就不能再转回,这种过程称之为只灭不生的纯灭过程。

由马尔可夫过程的性质可知,在 t 时刻安全系统保持 S_0 状态和由 S_0 向 S_1 转移的概率密度函数

$$\begin{cases} \lambda_{00}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{00}(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \\ \lambda_{01}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{01}(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \end{cases} \quad (7)$$

则 $\lambda_{01}(t)$ 即为安全系统的失效率。

3 引信安全系统的过程识别

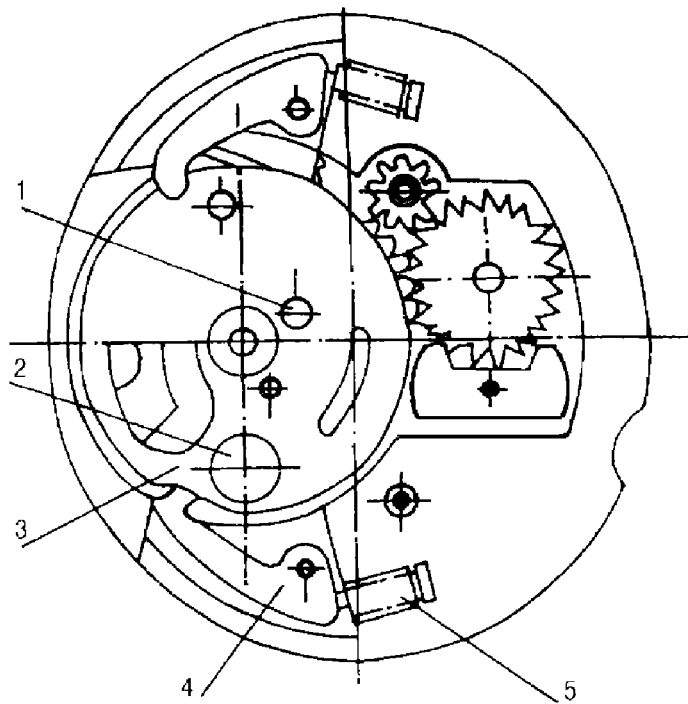
图 3 所示是美 M 739 引信的安全系统结构图。它由保险件惯性销和离心板簧及隔爆件回转体等组成。惯性销和离心板簧组成独立双环境具有运动可逆性的保险机构。由于惯性销和离心板簧的作用,在只有一个保险件解除时,回转体仍在另一保险件保险下处于安全状态,当环境激励消失时,已解除的保险件复位,仍能再处于保险状态。只有当离心环境和惯性环境激励同时存在时,惯性销和离心板簧同时解除保险,回转体保险被释放,安全系统解除保险,此时系统不能再恢复到原来的安全状态。

M 739 引信安全系统结构具有广泛的代表性。若不考虑系统具体结构形式,抽象出具有该引信安全系统特性的双环境独立可恢复系统,其逻辑图如图 4 所示。其中: $Q_1(t)$ 、 $Q_2(t)$ 代表两种环境激励; K_1 、 K_2 代表两个可恢复的开关; W_1 、 W_2 为两开关可恢复时间,当部件解险后,在该时间内经“维修”又恢复保险状态,故 W_1 、 W_2 可称为平均恢复时间,具有“平均修复时间 MTTR”的意义。

定义可恢复度为具有运动可逆特性的开关,在激励作用下打开后,在规定条件下

和规定时间内能完全恢复其闭合状态的概率。因可恢复度是时间的函数,记为 $M(t)$; 而不可恢复度记为 $G(t)$, 则 $G(t) = 1 - M(t)$ 。若将 $M(t)$ 求导, 可得恢复密度函数

$$m(t) = \frac{dM(t)}{dt} = - \frac{dG(t)}{dt} \quad (8)$$



1 Inertial pin; 2 Detonator; 3 Body of revolution; 4 Centrifugal plate; 5 Centrifugal spring

图 3 M 739 引信安全系统结构图

Fig. 3 Sketch of the safety system for M 739 fuze

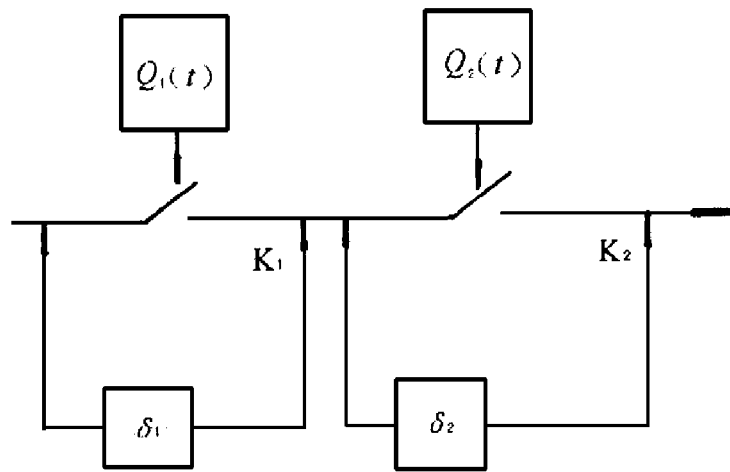


图 4 双环境独立可恢复系统示意图

Fig. 4 Sketch of the double environmental independent and reversible system

按照可维修理论的概念, 定义可恢复率为到某时间还在等待恢复的保险件在下一个单位时间内恢复的概率

$$u(t) = \frac{m(t)}{G(t)} = \frac{dM(t)}{[1 - M(t)]dt} = - \frac{dG(t)}{G(t)dt} = - \frac{d[\ln G(t)]}{dt} \quad (9)$$

积分上式得

$$G(t) = e^{-\int_0^t u(x)dx} \quad (10)$$

则
$$M(t) = 1 - e^{-\int_0^t u(x)dx} \quad (11)$$

假设在时间间隔 $[0, t]$ 内, $u(t) = u$, 则有

$$M(t) = 1 - e^{-ut}, \quad m(t) = ue^{-ut} \quad (12)$$

平均恢复时间是指解险部件恢复到初始状态所需时间的期望值, 它等于保持解险状态时间, 即激励维持时间。 则

$$\begin{aligned} E(t) &= \int_0^\infty m(t) dt = - \int_0^\infty dG(t) = - \int_0^\infty G(t) dt \\ &= - \int_0^\infty e^{-\int_0^t u(x)dx} dt = - \int_0^\infty e^{-ut} dt = \frac{1}{u} = \text{MTTR} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $\text{MTTR} = \frac{1}{u}$ 所以 $u = \frac{1}{\text{MTTR}} = \frac{1}{M}$; 对于开关 K_1, K_2 有 $u_1 = \frac{1}{M_1}, u_2 = \frac{1}{M_2}$ 。

相应的概率转移图如图 5 所示。图中: S_{A0} 为安全系统处于安全状态; S_{A1} 为安全系统解除保险状态, 即待发状态; S_{12} 为系统处于 K_1 闭合 K_2 打开时的中间状态; S_{21} 为系统处于 K_1 断开 K_2 闭合时的中间状态; λ_1 表示使 K_1 闭合的环境激励出现的频率; λ_2 表示使 K_2 闭合的环境激励出现的频率。

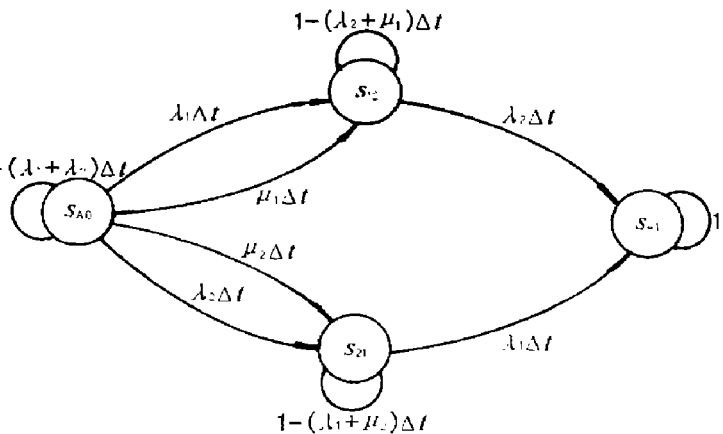


图 5 系统状态转移概率图

Fig. 5 Sketch of state transition for the system

设 t 时刻系统处于 S_{A0}, S_{12}, S_{21} 和 S_{A1}

状态的概率分别为 $P_0(t), P_{12}(t), P_{21}(t)$ 和 $P_1(t)$, 由图 5 得差分方程

$$\begin{cases} P_0(t + \Delta t) = P_0(t) [1 - (\lambda_1 + \lambda_2)\Delta t] + u_1\Delta t P_{12}(t) + u_2\Delta t P_{21}(t) \\ P_{12}(t + \Delta t) = \lambda_1\Delta t P_0(t) + P_{12}(t) [1 - (u_1 + \lambda_2)\Delta t] \\ P_{21}(t + \Delta t) = \lambda_2\Delta t P_0(t) + P_{21}(t) [1 - (u_2 + \lambda_1)\Delta t] \\ P_1(t + \Delta t) = \lambda_2\Delta t P_{12}(t) + \lambda_1\Delta t P_{21}(t) + P_1(t) \end{cases} \quad (14)$$

令 $\Delta t \rightarrow 0$ 取极限得微分方程

$$\begin{cases} P'_0(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) + u_1P_{12}(t) + u_2P_{21}(t) \\ P'_{12}(t) = \lambda_1P_0(t) - (u_1 + \lambda_2)P_{12}(t) \\ P'_{21}(t) = \lambda_2P_0(t) - (u_2 + \lambda_1)P_{21}(t) \\ P'_1(t) = \lambda_2P_{12}(t) + \lambda_1P_{21}(t) \end{cases} \quad (15)$$

用矩阵表示为

$$\begin{aligned}
 [P'_0(t), P'_{12}(t), P'_{21}(t), P'_1(t)] &= [P_0(t), P_{12}(t), P_{21}(t), P_1(t)] \\
 &\times \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\ u_1 & -(u_1 + \lambda_2) & 0 & \lambda_2 \\ u_2 & 0 & -(u_2 + \lambda_1) & \lambda_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)
 \end{aligned}$$

考虑初始条件 $P_0(0) = 1, P_{12}(0) = P_{21}(0) = P_1(0) = 0$, 对上式取 Laplace 变换

$$\begin{cases} P_0^*(S) = \frac{(S + u_1 + \lambda_2)(S + u_2 + \lambda_1)}{(S + \lambda_1 + \lambda_2)(S + \lambda_2 + u_1)(S + \lambda_1 + u_2) - \lambda_1 u_1(S + u_1 + \lambda_2) - \lambda_2 u_2(S + u_2 + \lambda_1)} \\ P_{12}^*(S) = \frac{\lambda_1(S + u_2 + \lambda_1)}{(S + \lambda_1 + \lambda_2)(S + \lambda_2 + u_1)(S + \lambda_1 + u_2) - \lambda_1 u_1(S + u_1 + \lambda_2) - \lambda_2 u_2(S + u_2 + \lambda_1)} \\ P_{21}^*(S) = \frac{\lambda_2(S + u_1 + \lambda_2)}{(S + \lambda_1 + \lambda_2)(S + \lambda_2 + u_1)(S + \lambda_1 + u_2) - \lambda_1 u_1(S + u_1 + \lambda_2) - \lambda_2 u_2(S + u_2 + \lambda_1)} \\ P_1^*(S) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 [(S + u_2 + \lambda_1) + (S + u_1 + \lambda_2)]}{(S + \lambda_1 + \lambda_2)(S + \lambda_2 + u_1)(S + \lambda_1 + u_2) - \lambda_1 u_1(S + u_1 + \lambda_2) - \lambda_2 u_2(S + u_2 + \lambda_1)} \end{cases} \quad (17)$$

由弹簧质量系统冲击响应理论可知, 激励作用下保险件运动维持时间 W 是很小的量, 一般有 $W \ll 2s$, 故恢复率 $u = \frac{1}{W} > 1800h^{-1}$.

由引信勤务处理情况可知, $u \gg \lambda_1, \lambda_2$, 故可假设 $u_1 \approx u_2 \approx u, u + \lambda_1 \approx u + \lambda_2 \approx u$. 则得

$$P_0^*(S) \approx \frac{S + u}{S(S + u + \lambda_1 + \lambda_2)} \quad (18)$$

由 $P_{12}^*(S), P_{21}^*(S)$ 表达式得

$$P_{12}^*(S) = \frac{\lambda_1}{S + u_1 + \lambda_2} \cdot P_0^*(S) \approx \frac{\lambda_1(S + u)}{S(S + u + \lambda_1 + \lambda_2)(S + u + \lambda_2)} \quad (19)$$

$$P_{21}^*(S) = \frac{\lambda_2}{S + u_2 + \lambda_1} \cdot P_0^*(S) \approx \frac{\lambda_2(S + u)}{S(S + u + \lambda_1 + \lambda_2)(S + u + \lambda_1)} \quad (20)$$

对上述三式进行 Laplace 反变换, 在勤务处理时间 T 内得到各状态概率

$$P_0(T) \approx \frac{u}{u + \lambda_1 + \lambda_2} + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{u + \lambda_1 + \lambda_2} e^{-(u + \lambda_1 + \lambda_2)T} \quad (21)$$

$$P_{12}(T) \approx \frac{\lambda_1 u}{(u + \lambda_2)(u + \lambda_1 + \lambda_2)} + \frac{\lambda_2}{u + \lambda_2} e^{-(u + \lambda_2)T} - \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{u + \lambda_1 + \lambda_2} e^{-(u + \lambda_1 + \lambda_2)T} \quad (22)$$

$$P_{21}(T) \approx \frac{\lambda_2 u}{(u + \lambda_1)(u + \lambda_1 + \lambda_2)} + \frac{\lambda_1}{u + \lambda_1} e^{-(u + \lambda_2)T} - \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{u + \lambda_1 + \lambda_2} e^{-(u + \lambda_1 + \lambda_2)T} \quad (23)$$

而引信安全系统处于 S_{A1} 状态的概率为

$$P_1(T) = 1 - P_0(T) - P_{12}(T) - P_{21}(T) \quad (24)$$

由于 S_{12} 和 S_{21} 是过渡状态, 保持时间也很短, 故

$$P_{12}(T) \approx P_{21}(T) \approx 0 \quad (25)$$

则在勤务处理时间 T 内, 引信安全系统的可靠度和失效率分别为

$$\begin{aligned}
 R_A = P_{A0}(T) &= P_0(T) + P_{12}(T) + P_{21}(T) \\
 &\approx P_0(T) = \frac{u}{u + \lambda_1 + \lambda_2} + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{u + \lambda_1 + \lambda_2} e^{-(u + \lambda_1 + \lambda_2)T} \quad (26)
 \end{aligned}$$

$$F_d = P_{A1}(T) = P_1(T) \approx 1 - P_0(T) = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{u + \lambda_1 + \lambda_2} [1 - e^{-(u + \lambda_1 + \lambda_2)T}] \quad (27)$$

这样, 在统计出 K_1, K_2 的失效率 λ_1 和 λ_2 及恢复率 u 之条件下, 即可由此两式计算出引信

安全系统在勤务处理过程中的可靠度和安全系统失效率。其中 λ_1 , λ_2 和 u 可参阅美军引信安全性失效率数据或国军标《引信安全性失效率数据手册》, 也可在研制过程中由试验进行统计。

参 考 文 献

- 1 复旦大学编写组. 概率论 (第三册). 北京: 高等教育出版社, 1980
- 2 Clarke A B, Disney R L. Probability and random processes New York: John Wiley & Sons, 1985
- 3 施坤林, 谭惠民. 马尔可夫理论在引信安全系统安全性分析中的应用. 见: 中国兵工学会引信技术分会第六届年会论文集. 西安: 兵器工业机电信息研究所, 1993 10
- 4 高 敏. 引信安全系统环境识别和状态控制研究: [博士学位论文] 北京: 北京理工大学. 1992 4

IDENTIFICATION THEORY AND RELIABILITY OF THE FUZE SAFETY SYSTEM

W ang Junbo, G ao M in

(*Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, 050003*)

ABSTRACT Based on the Markov process theory, through state transition analysis and inference of state transition probability, an identification theory and a reliability calculation method of the fuze safety system are proposed in this paper

KEY WORDS fuze, safety system, markov process, fault rate, reliability