

文章编号: 1001-1455(2000)01-0039-06

引信的系统辨识及其失控模型^①

王军波

(军械工程学院, 河北 石家庄 050003)

摘要: 为了解决引信元器件及产品可靠性预测值与靶试可靠性估计值不相符的问题, 引入引信系统辨识概念, 建立了引信可靠性试验过程的系统辨识一般模型, 元器件强度失控模型和参数失控模型, 最后得出引信系统的综合可靠度。模型对可靠性的预测值与试验结果相吻合。

关键词: 引信; 可靠性; 试验; 系统辨识

中图分类号: TJ430.1 **文献标识码:** A

在引信的生产和试验中经常遇到这样的问题, 即在生产检验和实验室试验时得到的元器件及产品可靠性很高, 预测产品靶试可靠度应有较高的水平, 可一旦进入现场试验时, 往往是引信试验失效概率比预测值要大得多。造成这种结果的一个主要原因, 就是由于引信系统、分系统及元器件的设计和检验条件与引信的实际使用环境条件不相符。设计、检验与实际环境条件不适应主要有两种情况^[1]: 一种是对环境条件有所检验, 但应力水平不符; 另一种是对引信使用环境和元器件性能认识不足, 致使引信设计时未能考虑和控制元器件在使用环境下的某些性能差异, 使其性能参数超过设计所能承受的限度。为了防止或避免引信设计、检验中的不足, 以减少靶试可靠性失效概率, 需要建立引信试验过程的环境失控模型。

1 引信系统辨识的一般模型

在引信的方案论证、研制、生产和验收过程中, 总是通过在一定条件下的试验来考核引信的设计、生产水平。实际的过程是: 在一定条件下进行引信试验, 将试验条件视为输入, 将试验结果视为输出, 通过输入、输出之间的关系来分析引信参数与响应之间的关系, 在对引信系统认识的基础上改进设计。这种辨识过程正是系统辨识的基本思想。系统辨识将系统看成参数或响应模型的待估系统, 是引信的研制者和使用者需要通过试验得知的。

在引信的试验过程中, 使用方或设计者将引信认为是一未知体, 通过一定条件下的输入来观察引信系统的输出结果, 从输入-输出结果认识引信系统, 这就是辨识过程中的黑箱模型

Input → Black box → Output

由以上分析我们可以得出以下结论: 即引信的试验过程是一个系统辨识过程, 引信的系统辨识^[2]是在人为输入作用下, 通过输入输出的数据估计引信系统、分系统及零部件的响应模型的过程。引信的各个不同的试验过程是引信系统辨识过程的一种形式, 而辨识的目的是揭示作为一个实体形式的引信系统对一定输入的内在响应规律。由此可得出引信系统辨识的一般

^① 收稿日期: 1999-04-05; 修订日期: 1999-06-21
作者简介: 王军波(1964—), 男, 硕士, 讲师。

模型,如下

Test condition \rightarrow Fuze system \rightarrow Test result

Input \times Model \rightarrow Output

设 μ 为系统的输入矢量, Y 为输出矢量, H 为系统的响应矩阵, 则系统响应方程^[3]为

$$Y^T = \mu^T \times H \quad (1)$$

上面建立的是引信系统辨识的多输入多输出(MIMO)一般模型,事实上引信试验往往是有针对性的,所以引信的辨识还可根据不同的试验建立其特定的输入输出模型。为了研究引信的可靠性试验过程,需要建立引信的环境适应性系统辨识失控模型。

2 引信环境适应性失控模型

设引信的系统辨识过程为使用条件下的可靠性试验过程,试验目的是考核引信的可靠度。此时系统辨识输入为引信的使用环境条件,记为 μ ;引信的状态性能变量是系统在使用环境条件下的固有响应,记为 W ;引信的限制变量是设计所决定的参数,是通过检验手段和条件来考查的,记为 w ;辨识输出为引信可靠性。系统响应函数

$$R = G(\mu, W, w) \quad (2)$$

对于不同的引信设计方案和不同的输入,具有不同的形式,它对应于式(1)的响应矩阵。

在实际的引信试验中,失效往往集中在系统的关键元器件或部件上。同时,元器件的失效又表现为两种形式:一种是由于试验条件或检验条件应力水平与使用环境不相符,导致元器件在引信试验时失效,称为强度失控模型;另一种是由于对使用环境认识不足,未能对引信在某些环境激励下产生的物理特性及其参数加以检验和控制,从而造成引信元器件失效,称为参数失控模型。

2.1 强度失控模型

元器件的强度是给定设计方案中的固有特性,同一元器件既有功能(破坏)强度,又有性能强度,而每种强度又可能有多种变量,如元器件的抗过载和耐高温强度等。为方便起见,在同一元器件上不加区分,统一记为强度 σ 。若用 s_j 表示引信使用环境的第 j 种应力,则元器件的失效逻辑变量

$$Q_{ij}(s, \sigma) = u(s_j - \sigma_i) = \begin{cases} 0 & s < \sigma \\ 1 & s \geq \sigma \end{cases} \quad (3)$$

元器件的可靠性逻辑变量

$$Q_{ij}(s, \sigma) = 1 - Q(s, \sigma) = u(\sigma_i - s_j) = \begin{cases} 0 & s \geq \sigma & \text{失效状态} \\ 1 & s < \sigma & \text{可靠状态} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ 为元器件序号, $j=1, 2, \dots, k$ 为元器件经受的应力种类序号。 u 为单位阶跃函数。

考虑到弹药的发射过程为瞬态过程,在此过程中,引信及其元器件受到应力最大。若当应力大于强度允许值时,则元器件失效。假设元器件不存在过应力失效,则由式(4)可得元器件 i 的功能与性能强度失控模型逻辑变量

$$Q_i(s, \sigma) = \prod_{j=1}^k Q_j(s, \sigma) = \prod_{j=1}^k u(\sigma_i - s_j) \quad (5)$$

当输入变量为应力 s 时,元器件强度可靠性模型为

$$R_{\sigma_i} = E | Q_i(s, \sigma) | = \prod_{j=1}^k E | u(\sigma_i - s_j) | = \prod_{j=1}^k P(\sigma_i > s_j) \quad (6)$$

式中: E 为数学期望, P 为概率。

σ 和 s 都是随机量, 假设 σ 和 s 的概率密度函数分别为 $f(\sigma)$ 和 $f(s)$, 则元器件应力强度干涉区如图 1 所示。左图中阴影部分为干涉区, 右图为干涉区的放大图。对区间 $[s - ds/2, s + ds/2]$, 应力落入此区间的概率

$$P(s - ds/2 < \sigma < s + ds/2) = f(s)ds$$

强度大于应力 s 的概率

$$P(\sigma > s) = \int_s^c f(\sigma)d\sigma$$

式中: c 为强度概率分布中可能有的上限值。

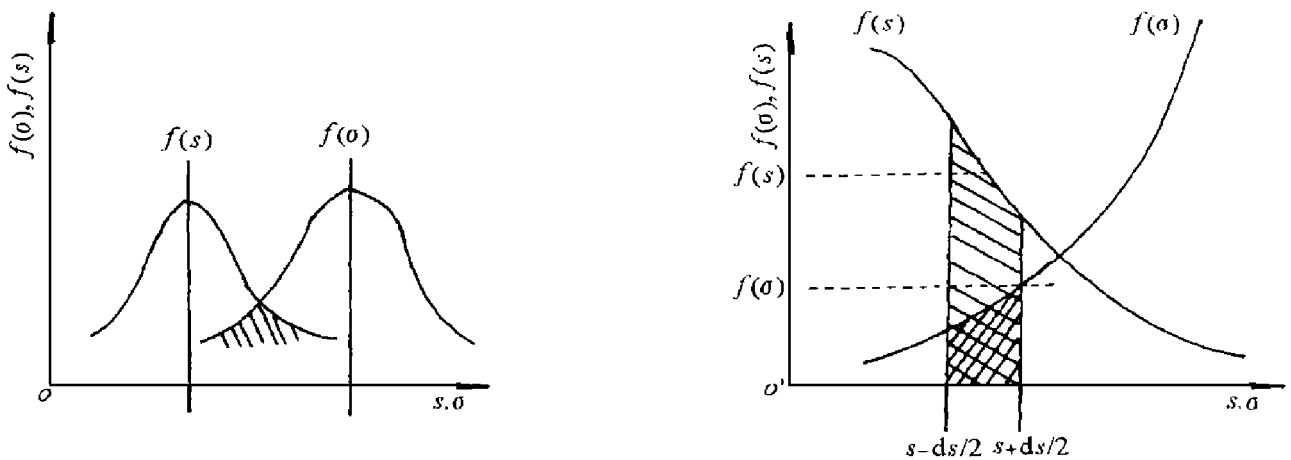


图 1 应力-强度干涉图

Fig.1 Probabilitis of intensity and stress

$s - ds/2 < s < s + ds/2$ 与 $\sigma > s$ 为两个独立事件, 若工作可靠, 则这两个事件都要发生, 由乘法定理得区间 $[s - ds/2, s + ds/2]$ 内的元器件强度可靠度

$$dR = f(s)ds \cdot \int_s^c f(\sigma)d\sigma$$

则元器件强度可靠度^[4]

$$R_{\sigma_i} = \prod_{j=1}^k \int_{a_j}^{b_j} f(s_j) \left| \int_{s_j}^c f(\sigma_i)d\sigma_i \right| ds_j \quad (7)$$

式中: a_j 和 b_j 为应力概率分布的下限和上限值。如果应力和强度分布取值上、下限为正负无穷大, 则

$$R_{\sigma_i} = \prod_{j=1}^k \int_{-\infty}^{\infty} f(s_j) \left| \int_{s_j}^{\infty} f(\sigma_i)d\sigma_i \right| ds_j = \prod_{j=1}^k \int_{-\infty}^{\infty} f(\sigma_i) \left| \int_{-\infty}^{\sigma_i} f(s_j)ds_j \right| d\sigma_i \quad (8)$$

当应力和强度都服从正态分布时, 它们的概率密度函数分别为

$$f(s_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{s_j}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{s - u_{s_j}}{\sigma_{s_j}} \right)^2 \right], \quad f(\sigma_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\sigma_i}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma - u_{\sigma_i}}{\sigma_{\sigma_i}} \right)^2 \right]$$

令 $z = \sigma - s$, 则 $u_{z_{ij}} = u_{\sigma_i} - u_{s_j}$, $\sigma_{z_{ij}} = \sqrt{\sigma_{s_j}^2 + \sigma_{\sigma_i}^2}$ 。当 s, σ 为正态时, z 也为正态, 则式(8)变为

$$R_{\sigma_i} = \prod_{j=1}^k \sigma_{z_{ij}} \int_0^{\infty} \exp \left[-\frac{(z - u_{z_{ij}})^2}{2\sigma_{z_{ij}}^2} \right] dz_{ij}$$

进一步令 $t_{ij} = \frac{z - u_{z_{ij}}}{2\sigma_{z_{ij}}}$, 则有

$$R_{\sigma_i} = \prod_{j=1}^k \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-u_{z_{ij}}/\sigma_{z_{ij}}}^{\infty} e^{-t_{ij}^2} dt_{ij} = \prod_{j=1}^k \left[1 - \Phi \left(-\frac{u_{z_{ij}}}{\sigma_{z_{ij}}} \right) \right] \quad (9)$$

式中: Φ 为正态分布函数。

如果系统为串联结构, 则引信系统强度可靠度

$$R = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^k \left[1 - \Phi \left(-\frac{u_{z_{ij}}}{\sigma_{z_{ij}}} \right) \right] \quad (10)$$

2.2 参数失控模型

设引信系统输入的环境应力^[5]

$$\mathbf{G} = [s_1, s_2, \dots, s_j, \dots, s_k]^T$$

对应这些环境应力, 引信元器件可能表现出 $W_1, W_2, \dots, W_j, \dots, W_k$ 个状态性能变量。由于引信系统具有一定的工作稳定性, 所以对某一元器件来讲, 其所有参量都不加以检验的可能性不大, 假设某元器件只有一项参数未加以检验, 而此参数直接影响引信系统的可靠性。元器件 i 的未控状态性能参数记为 W_i , 当限制变量取上下限时, 元器件 i 的限制变量上下限记为 w_{Hi} 、 w_{Li} , 故元器件 i 的参数失控模型的可靠性逻辑变量

$$Q_i(W, w) = u(w_i - W_i) = \begin{cases} 0 & \text{系统失效} \\ 1 & \text{系统正常} \end{cases}$$

而做为辨识系统输出的参数失效模型的元器件可靠性响应模型为

$$R_{W_i} = E[Q_i(W, w)] = E[u(w_i - W_i)] = P[w_{Li} < W_i < w_{Hi}] \quad (11)$$

若已知元器件 i 的状态性能变量 W_i 的概率密度函数为 $f(W_i)$, 则元器件 i 参数失控的可靠性模型为

$$R_{W_i} = \int_{w_{Li}}^{w_{Hi}} f(W_i) dW_i \quad (12)$$

如果系统为串联结构, 则系统参数失控可靠性模型为

$$R_W = \prod_{i=1}^n \int_{w_{Li}}^{w_{Hi}} f(W_i) dW_i \quad (13)$$

2.3 引信系统综合可靠性模型

如果不考虑其它因素, 只考虑元器件的固有可靠度、强度失控可靠度和参数失控可靠度, 则元器件综合可靠度模型为

$$R_i = R_{0i} \circ R_{\sigma_i} \circ R_{W_i} = R_{0i} \prod_{j=1}^k \left[1 - \Phi \left(-\frac{u_{\sigma_i} - u_{s_j}}{\sqrt{\sigma_{\sigma_i}^2 + \sigma_{s_j}^2}} \right) \right] \int_{w_{Li}}^{w_{Hi}} f(W_i) dW_i \quad (14)$$

系统综合可靠度模型为

$$R = \prod_{i=1}^n R_{0i} \prod_{j=1}^k \left[1 - \Phi \left(-\frac{u_{\sigma_i} - u_{s_j}}{\sqrt{\sigma_{\sigma_i}^2 + \sigma_{s_j}^2}} \right) \right] \int_{w_{Li}}^{w_{Hi}} f(W_i) dW_i \quad (15)$$

式中： R_{0i} 为元器件固有可靠度，对一定的元器件它是一个已知的定值。

3 应用实例

图 2 为某无线电引信远距离接电电路^[6]。该电路预定远距离接电时间 t_s 由 RC 决定， R 为充电电阻， $R = 200\text{k}\Omega$ ； C 为充电电容， $C = 22\mu\text{f}$ 。在 t_s 之前， A 点电位不足以使单结管 UJT 导通，因此火药推进器 T 不会发火。当 RC 充电到 A 点电位达到预定值时，UJT 导通，电源电压 U 加在火药推进器 T 上，使之发火，火药气体推动火塞运动到位，使电源 U 接通引信的信号处理电路。图中单结管的 η 为 0.65， r 为单结管与充电电容的漏电阻。

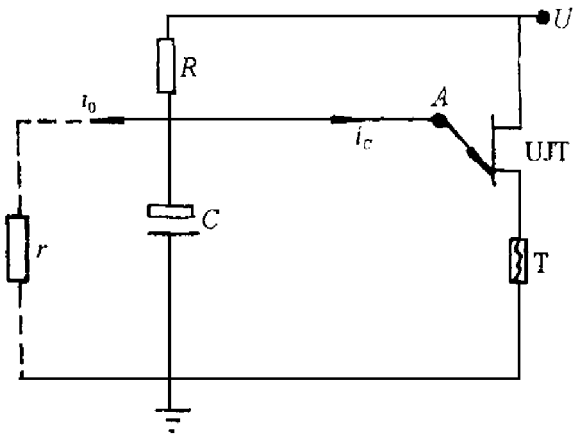


图 2 某引信远距离接电电路
Fig.2 The long-range wiring circuit for fuze

此产品在交验时出现较多瞎火失效，分析原因是远距离接电电路推进器没有发火而造成。经进一步验证，证明是在电路设计和检验中没有对图 2 所示的漏电流 i_0 进行测量，致使部分引信未检量 r 超差。实测表明，漏电阻 r 服从正态分布

$$f(r) = \frac{1}{640 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r-500}{640} \right)^2 \right] \quad (16)$$

设漏电阻为状态性能参量，而电路的性能限制变量 w 的上下限可由电路分析给出。由电路可得一阶常微分方程

$$RC \frac{dU_C}{dt} + \left(\frac{R}{r} + 1 \right) U_C = U \quad (17)$$

当 $t=0$ 时， $U_C=0$ ；当 $t=t_s$ (t_s 为预定远距离接电时间) 时，即当 $U_C/U = \eta$ 时，单结管 UJT 开始导通，电路开始工作。由方程(17)得

$$\begin{aligned} U_C &= U \frac{r}{R+r} \left[1 - \exp \left(-\frac{R+r}{RrC} t \right) \right] \\ \eta &= \frac{r}{R+r} \left[1 - \exp \left(-\frac{R+r}{RrC} t \right) \right] \\ t &= \frac{RrC}{R+r} \ln \frac{1}{1 - \eta(R+r)/r} \end{aligned} \quad (18)$$

当 $\eta \frac{R+r}{r} \geq 1$ 时， $t = \infty$ ，电容 C 将充不到设计要求的电压，故推进器将不会工作。

若 $\eta=0.65$ ， $R=200\text{k}\Omega$ ，则 $r \leq 371\text{k}\Omega$ 时电路将不工作。此时参数失控模型的性能限制变量 $w_L=371\text{k}\Omega$ ，而 $w_H = \infty$ ，由式(12)可得

$$R_r = \int_{371}^{\infty} \frac{1}{640 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r-500}{640} \right)^2 \right] dr \approx 0.82$$

即由于电路失控参数 r 造成的引信瞎火概率为 0.18，而实际靶试引信瞎火概率约为 0.19，结果与分析相吻合。

参考文献:

- [1] 胡昌寿. 可靠性工程、设计、试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1985.
- [2] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- [3] 蒂莫西 L K, 博纳 B E. 状态空间分析导论[M]. 胡钦训, 刘 颖. 北京: 人民教育出版社, 1981.
- [4] AMSC N/A. Military Handbook Fuzes[R]. MIL-HDBK-757(AR), 1994.
- [5] Overman D L. Explosive Train Barrier Module for Fuzes[P]. USA: USP 3760726, 1973.
- [6] 李彦学, 智敦旺. 无线电与电子时间引信[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1996.

The System Recognition and Runaway Model for Fuze

WANG Jun-bo

(*Ordance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China*)

Abstract: In order to solve the question of the reliability forecast value not consistent with the reliability estimated value for the fuze component and product, the conception of fuze system recognition is applied. This paper sets up the system recognition model for fuze reliability test, the intensity runaway model, and the paramter runaway model. In the end, the comprehensive reliability of fuze system is obtained. The example in practice proves that the reliability forecast value with this paper's model is identical with the test value.

Key words: fuze; reliability; test; system recognition