

人一机系统可靠性计算方法的探讨

徐保林

程文明 张质文

(校长办公室)

(西南交通大学)

摘 要 在分析人一机系统可靠性传统计算方法的基础上,依据可靠性框图与失效树之间的等价关系,指出传统计算模式使用的局限性,并提出人一机系统有效和合理的分析方法是应用失效树分析.

关键词 人一机系统;失效树;可靠性

分类号 TP11

1 传统计算方法

人一机系统可靠性传统计算方法是将具有可靠度 R_h 的人和具有可靠度 R_m 的机器看作是相互串联的两个子系统,人一机系统的可靠度 R_i 等于两个子系统可靠度乘积,即

$$R_i = R_h \cdot R_m. \quad (1)$$

由式(1)看出,传统计算方法认为,只要人一机系统中任一个(人或机器)失效($R_h = 0$,或 $R_m = 0$,或两者均为零),则整个系统失效, $R_i = 0$.在计算系统可靠度时,先求出 R_h 和 R_m ,代入式(1)即可得出所求的结果.

如果在系统中,人的操作包含 $1, 2, 3, \dots, n$ 个动作,实现每个动作的可靠度分析为 $R_{h1}, R_{h2}, R_{h3}, \dots, R_{hn}$,则作为子系统的人操作可靠度为:

$$R_h = \prod_{i=1}^n R_{hi}. \quad (2)$$

同理,如果机器由 S 个零部件组成,每个零部件的可靠性为 R_{mj} ($j=1, 2, 3, \dots, s$),则作为子系统的机器可靠度为:

$$R_m = \prod_{j=1}^s R_{mj}. \quad (3)$$

由此,人一机系统可靠性 R_i 为:

$$R_i = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^s R_{hi} R_{mj}. \quad (4)$$

人一机系统可靠性框图如图1所示,这是一个由人的动作和零部件可靠性构成的串联系统.

收稿日期:1994-12-01.

徐保林,男,1936年生,副教授.

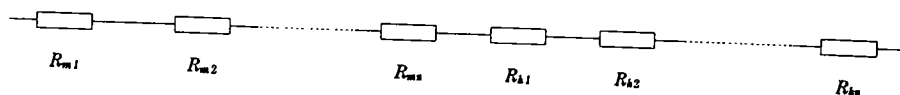


图1 人一机系统可靠性框图

2 可靠性框图与失效树之间的关系

2.1 串联系统可靠性框图

当由任意 n 个元件构成的串联系统可靠性框图与由 n 个事件用或门联接的失效树之间比

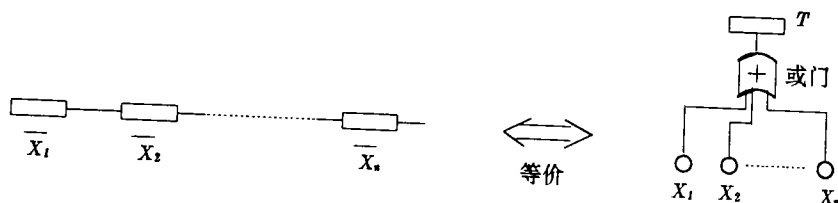


图2 串联系统可靠性框图与或门失效树

较时, 如图 2.

在图 2 中, $X_1, X_2, \dots, X_n$ 为或门的输入事件, 均为失效事件, T 为输出事件, $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n$ 为失效事件的逆, 即正常工作事件. 如果 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 分别代表各事件的失效概率, 则 $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n$ 代表各事件的可靠度.

在串联系统的可靠性框图中, 系统可靠度等于各元件可靠度之积, 即

$$R_s = \bar{X}_1 \bar{X}_2 \dots \bar{X}_n = \prod_{i=1}^n \bar{X}_i \quad (5)$$

只要任一个元件的可靠度 $\bar{X}_i = 0$ (即该元件失效), 则系统失效, $R_s = 0$.

由或门联接的失效树, 其结构函数为:

$$\begin{aligned} \Phi(x) &= 1 - (1 - x_1)(1 - x_2) \dots (1 - x_n) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i). \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\Phi(x)$ 为或门输出事件发生的概率.

由式 (6) 可见, 只要有任意一个失效事件发生 ($x_i = 1$), 则 $\Phi(x) = 1$, 系统失效.

比较式 (5) 和式 (6), 可知串联系统可靠性框图和由或门联接的失效树等价.

2.2 并联系统可靠性框图

同理, 当任意 n 个元件构成的并联系统可靠性框图和由 n 个事件用与门联接的失效树之间比较时, 如图 3.



图3 并联系统可靠性框图和与门失效树

并联系统的可靠度 R , 由下式算出

$$\begin{aligned} R_i &= 1 - (1 - \bar{x}_1)(1 - \bar{x}_2) \cdots (1 - \bar{x}_n) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \bar{x}_i) \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 只有当 $\bar{x}_i=0 (i=1, 2, \dots, n)$, 即所有元件失效, 系统才会失效, $R_i=0$.

由与门联接的失效树, 其结构函数为:

$$\Phi(x) = x_1 x_2 \cdots x_n = \prod_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

式中: $\Phi(x)$ 为与门输出事件发生的概率, 亦即系统失效的概率.

要系统失效, 即 $\Phi(x)=1$. 必须所有输入事件同时发生, 即 $x_i=1 (i=1, 2, \dots, n)$.

比较式(7)和式(8), 可知并联系统可靠性框图和由与门联接的失效树等价.

3 失效树分析方法

由以上分析可以看出, 人一机系统可靠性的传统计算方法只与或门失效树等价, 如果由某一个人一机系统建立的失效树中只包含或门, 即式(1)成立, 按传统方法计算人一机系统可靠性可以得出正确结果. 假如失效树中包括与门, 就不能应用传统方法计算.

实际上, 在人一机系统失效分析中, 总是针对系统的某个特定事故进行, 这个事故的发生必然是由于人的各种操作差错和机器的各种故障所引发. 通常两者之间相互联系, 则失效树中包括有与门和或门, 此时, 有效合理的分析方法是应用失效树分析.

失效树分析(Fault Tree Analysis)是比较适用于大型复杂可靠性计算的常用的有效方法. 它以图形的方式清晰地表明系统全部可能的失效状态, 这种图形化的方法配合计算机技术的发展已经逐渐地深入到各个科技领域中^[1]. 在人一机系统失效中, 失效树分析可以把系统的故障与组成系统的人操作差错和机器的故障有机地联系在一起, 使得设计人员, 运行人员和管理人员正确有效地进行人一机系统可靠性的计算^[2].

4 计算实例

现以汽车起重机倾覆失效为例计算人一机系统的可靠性. 汽车起重机倾覆的必需条件是:

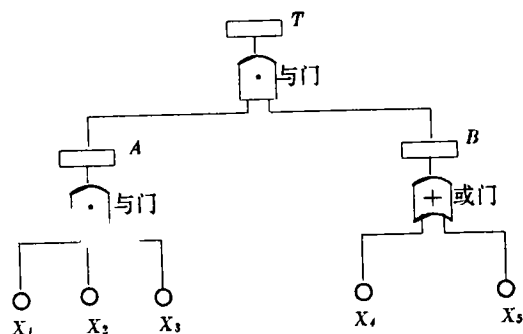


图4 汽车起重机倾覆失效树

(1)超载作业,(2)支腿失效,(3)操作失误.图4是以汽车起重机倾覆作为顶事件建立的失效树.

在图4的失效树中,各符号含义如下:

x_1 :安全装置(力矩限制器)失效的事件,属于机械失效,失效概率为 $P(x_1)$;

x_2 :司索工将超载货物挂钩事件,属于人的操作差错,差错概率为 $P(x_2)$;

x_3 :起重机司机在超载情况下起动,属于人的操作差错,差错概率为 $P(x_3)$;

x_4 :支腿故障事件,属于机械失效,失效概率为 $P(x_4)$;

x_5 :支腿安设不当的事件(支腿不平或支腿未打),属于人的操作差错,差错概率为 $P(x_5)$;

A:超重运转事件,在失效树中为中间事件,其概率 $P(A)$ 决定于底事件 x_1, x_2, x_3 的概率;

B:支腿失效事件,为中间事件,其概率 $P(B)$ 决定于事件 x_4, x_5 概率;

T:顶事件,即系统失效,汽车起重机倾覆,其概率 $P(T)$ 决定于中间 A、B 事件概率.

先采用失效树分析法进行汽车起重机倾覆这一事故的人—机系统可靠性计算.根据与门和或门失效树的结构函数,中间事件 A、B 和顶事件 T 出现的概率分别为:

$$P(A) = P(x_1) \cdot P(x_2) \cdot P(x_3), \quad (9)$$

$$P(B) = P(x_4) + P(x_5) - P(x_4) \cdot P(x_5), \quad (10)$$

$$P(T) = P(A) \cdot P(B), \quad (11)$$

由于 $P(x_4), P(x_5)$ 值甚小,可忽略不计.

将 $P(A), P(B)$ 代入式(11)中,得:

$$P(T) = P(x_1)P(x_2)P(x_3)[P(x_4) + P(x_5)] \quad (12)$$

则汽车起重机不发生倾覆的可靠度为:

$$R_s = 1 - P(T) = 1 - P(x_1)P(x_2)P(x_3)[P(x_4) + P(x_5)] \quad (13)$$

再按传统计算方法(1)计算人—机系统可靠性,汽车起重机不倾覆的可靠度为:

$$R_s = R_n \cdot R_m = [1 - P(x_1)][1 - P(x_2)][1 - P(x_3)][1 - P(x_4)][1 - P(x_5)], \quad (14)$$

为了清楚说明问题,现以数字代入.若设 $P(x_1) = 0.01, P(x_2) = 0.1, P(x_3) = 0.1, P(x_4) = 0.01, P(x_5) = 0.01$, 则代入式(13)、(14)中分别有

$$\begin{aligned} R_i &= 1 - 0.01 \times 0.1 \times 0.1 \times (0.01 + 0.01) \\ &= 1 - 0.000002 = 0.999998 \\ R_i &= (1 - 0.01)(1 - 0.1)(1 - 0.1)(1 - 0.01)(1 - 0.01) \\ &= 0.99 \times 0.9 \times 0.9 \times 0.99 \times 0.99 = 0.7859 \end{aligned}$$

比较两种方法得出的不同结果,根据分析,在本例情况下,人一机系统可靠性传统计算方法不能应用,失效树分析方法所得的结果切合实际情况.

5 结 论

(1)人一机系统可靠性传统计算方法只能在用于针对某一特定失效事故所建立的失效树中只含有或门的情况,如果失效树只含有与门,传统计算方法不能应用.

(2)在人一机系统的失效分析中,事故的发生必然是由相互联系的人的各种操作差错和机器的各种故障所引发,失效树中与门和或门通常并存,此时,应用失效树分析方法进行人一机系统可靠性计算是有效合理的分析.

参 考 文 献

- 1 牟致忠. 可靠性设计. 北京:机械工业出版社,1992
- 2 Zhang Z W, Kececioglu D. New Concept on Man—Machine System Reliability Evaluation with FTA. Report of the 22nd Institute of Reliability and Maintainability Engineering Tucson,1985

A New Approach for Calculating Man—Machine System Reliability

Xu Baolin Cheng Wenming Zhang Zhiwen

Abstract The limitation of application of conventional method to calculate Man—Machine system reliability is pointed out. A new approach by use of FTA is proposed.

Key words Man—machine System; Fault Tree; Reliability