

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.05.012

## 装备可靠性试验寿命评估 GERT 网络模型

杨晓钰 方志耕 陶良彦

(南京航空航天大学经济与管理学院,南京,211106)

**摘要:**针对装备寿命试验中失效样本量比较小的情形,基于应力冲击思想,提出了一种基于失效选择机制的装备系统可靠性评估定量分析方法。首先引入图示评审技术(Graphic evaluation and review technique, GERT)表征系统的多种工作状态和状态间的传递关系,根据系统结构进行可靠性评估建模。然后基于失效观测数据对元器件的可靠性进行估计,确定可靠性评估 GERT 网络中的参数。最后依据失效选择机制对网络进行计算,实现系统可靠性的评估。算例研究结果表明了基于失效选择机制的装备可靠性评估 GERT 模型的有效性。

**关键词:**系统可靠性评估;GERT 网络;小样本;失效选择机制;应力冲击

**中图分类号:**TB114      **文献标志码:**A      **文章编号:**1005-2615(2016)05-0689-07

## Life Evaluation GERT Network Model of Equipment Reliability Test

Yang Xiaoyu, Fang Zhigeng, Tao Liangyan

(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

**Abstract:** In view of the small failure sample in the equipment life test, a quantitative analysis method for equipment system reliability evaluation based on impact stress is presented. Firstly, graphic evaluation and review technique (GERT) is introduced to describe the multiple working states of the system and transitive relations between the states. And a reliability evaluation model is constructed based on the system structure. Then the reliability of the components is estimated according to observed failure data, and the parameters in the reliability GERT network are determined. Finally, the system reliability is evaluated according to the network computing results. Case study results show that the equipment reliability GERT model is effective.

**Key words:** system reliability evaluation; GERT network; small sample; failure choice mechanism; stress impact

可靠性数据是装备可靠性评估的基础,产品可靠性的信息来源于对失效数据的分析。传统的可靠性评估方法均属于统计方法,评估出测试性指标需要样本量足够大才能获得较可信的评估结果<sup>[1]</sup>。对于高端装备制造领域的高可靠性、长寿命的产品零部件,寿命试验中往往只有少量失效或者没有失

效出现,即使采用加速寿命试验方法,在规定时间内也难以取得大量样本;商用装备出于成本等原因,更不可能进行大量的系统级可靠性试验。现场试验数据具有较高的可信性<sup>[2]</sup>,对系统可靠性进行精确的评估需融合现场失效数据和系统的各种试验信息,许多学者就如何利用这些信息、提高系统可

**基金项目:**国家社会科学基金重点项目(12AZD102)资助项目;国家自然科学基金重点培育项目(NP2015208)资助项目。

**收稿日期:**2016-02-27;**修订日期:**2016-07-14

**通信作者:**方志耕,男,教授,博士生导师,E-mail:zhigengfang@163.com。

**引用格式:**杨晓钰,方志耕,陶良彦.装备可靠性试验寿命评估 GERT 网络模型[J].南京航空航天大学学报,2016,48(5):689-695. Yang Xiaoyu, Fang Zhigeng, Tao Liangyan. Life evaluation GERT network model of equipment reliability test[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(5): 689-695.

可靠性评估准确性进行了探索<sup>[3]</sup>。

目前,系统可靠性建模方法主要有可靠性框图<sup>[4-6]</sup>(Reliability block diagram, RBD),故障树分析法<sup>[7-9]</sup>(Fault tree analysis, FTA),贝叶斯网络<sup>[10]</sup>(Bayesian networks)等技术,这些模型都属于静态分析模型,在定量分析过程中常以给定的可靠度为基础,忽略了系统的故障发生过程是一个受环境应力冲击影响的随机过程,可靠性随时间变化这一问题。Markov<sup>[11]</sup>状态转移法能够分析系统故障情况下各状态变化过程的可靠性,但其状态空间的规模与系统规模呈指数型关系,状态组合空间容易出现指数爆炸问题。

本文引入图示评审技术(Graphic evaluation and review technique, GERT)进行系统可靠性分析动态建模,将故障的发生视为一个随机过程<sup>[12]</sup>,装备系统运行状态和状态转移传递关系采用服从一定的概率分布的网络进行表征,同时融合现场失效数据与历史经验信息,实现较少失效数据情形下装备可靠性试验寿命估计,进而通过 GERT 网络拓扑结构进行系统的可靠性评估。

## 1 模型构建思路与步骤

装备失效的发生与受到的各种来自环境的应力冲击强度及装备固有可靠性有关。环境应力冲击反映了环境的严苛程度,如高温、高压、高电磁辐射和海水腐蚀等环境都会降低装备的使用可靠性<sup>[13]</sup>;装备固有可靠性则体现了装备抵抗冲击应力的一种能力,因此每一次冲击作用后装备并不一定失效,而是以一定的概率失效。在装备运行过程中,由于受到各种随机因素的影响,环境应力冲击到达的次数及其发生时间都是随机的<sup>[14]</sup>,根据冲击应力发生特点,从理论上应满足下列条件:(1)在不相重叠的时间区间内应力的到达是互相独立的,即无后效性;(2)对充分小的 $\Delta t$ ,在时间区间 $[t, t + \Delta t]$ 内装备受到冲击的概率与区间端点无关,而与区间长度 $\Delta t$ 成正比,即具有平稳性;(3)对于充分小的 $\Delta t$ 内,装备受到多于1次应力冲击的概率极小,即具有普通性。因此,装备受外界冲击的次数可用泊松分布来描述,冲击在某一时间区段内为泊松过程的“质点流”。对于冲击应力受控的加速可靠性试验,由温度、湿度和振动构成综合环境应力,只需测得装备在每次冲击下的失效概率即可进行

寿命估计。

理论上讲,如果知道应力到达时间与装备在受到应力冲击后的失效概率,就可以对装备的可靠性进行评估,预测其平均使用寿命。在影响装备可靠性的应力冲击不容易观测的情形下,通常得到的是失效观测数据,如失效的发生时间和发生次数。失效的发生可以看作装备在受到多次应力冲击后发生状态转移的外在表现,因此可以利用对失效的观测替代对应力的观测,实现对装备的平均寿命的预测,如图1所示。

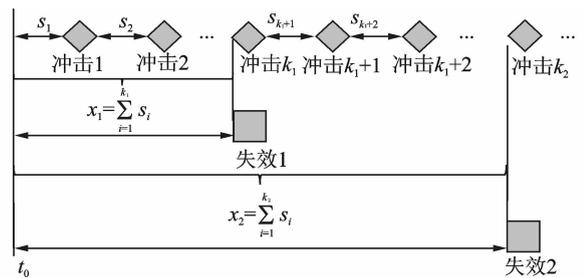


图1 装备在应力冲击下的失效示意图

Fig. 1 Schematic diagram of equipment failure under impact stress

图1描述了装备在冲击应力下的由正常状态到失效状态的情形,试验开始时装备处于正常工作状态,每次冲击后,装备以一定概率选择维持其正常状态或转移到失效状态,若维持其正常工作状态,则其一直正常工作到下一次冲击时刻再做选择,直到第 $k$ 次冲击到达,装备转移到失效状态。对一批装备进行可靠性试验,可以认为它们所受到的环境应力相同,并且每一装备的寿命是独立同分布的随机变量,冲击到达时装备进行独立选择。当观测到失效时,其实是观测到了若干次冲击的结果,通过对多个失效数据的观测,可以近似求得装备对冲击应力的响应情况,从而测算出装备正常状态保留时间和与之对应的状态转移概率,进行可靠性评估。在冲击应力受控的加速可靠性试验中,则只需测得在每次冲击下的失效概率即可进行寿命估计。

为方便研究,需将上述过程转化为数学语言易处理的模型,考虑到 GERT 模型可表征多种系统运行状态,状态转移之间具有概率性质,并且允许自环存在,因此这里将上述过程转化为 GERT 网络模型,模型构建基本步骤如下:

**步骤 1** 依据装备系统结构画出系统的可靠性框图,将其转化为可靠性评估 GERT 网络模型。

**步骤 2** 根据专家经验或历史统计信息确定部件的寿命分布函数,对部件状态进行观测,记录部件的失效时间序列、试验样本总数和已失效样本数,计算每一个部件正常状态保留时间及相应的部件状态转移概率。

**步骤 3** 确定装备可靠性评估 GERT 网络模型中的参数,依据网络结构写出系统的等价传递函数。

**步骤 4** 根据模型进行求解,对装备寿命进行评估。

## 2 装备可靠性评估 GERT 网络模型结构

**定义 1** 装备可靠性评估 GERT 网络模型由节点、箭线和状态转化流 3 个要素组成:节点表示装备的某种状态;箭线用于描述装备运行状态之间的传递关系;流为网络中传递关系的定量化描述,网络基本构成单元如图 2 所示。图 2 中  $U_{ij}$  表示装备或部件由状态  $i$  到状态  $j$  的状态转化流; $p_{ij}$  表示状态转移的发生概率; $t_{ij}$  表示状态转移时间。

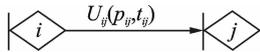


图 2 基本单元构成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of elementary unit in GERT

在实际工程应用中,装备及其元部件具有除完全正常与故障之外多种运行状态,如:(1)系统部件均正常工作(完美状态);(2)系统部分元件故障或整体性能退化;(3)系统完全故障。其中退化的工作状态又可以有多种情形,这些系统状态可用 GERT 网络的节点来表征。考虑实际情况,对于部件一般仅考虑其正常工作和失效两种状态,系统则表现为多种运行状态。考虑系统连接方式,装备可靠性评估 GERT 网络模型主要有 3 种结构,下面以定义形式给出。

**定义 2** 单部件装备系统是指装备仅含一个部件或不再对装备系统进行拆分,视作一个整体进行可靠性试验的系统,其基于失效选择机制的可靠性评估 GERT 网络结构如图 3 所示。图 3 中  $t_{11}$  为装备保持正常状态的时间, $p$  为装备受到冲击后由正常状态到失效状态的转移概率,节点 0 是一个虚

拟节点,表示试验开始,节点 1 表示装备正常运行,即在应力冲击下装备如果不失效,它将保持这种正常工作状态直到下次冲击到达,节点 E 表示装备失效状态,试验结束。

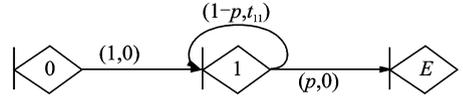


图 3 单部件装备系统可靠性评估 GERT 网络模型

Fig. 3 Structure of reliability evaluation GERT network for equipment with single component

**定义 3** 对于一个双部件串联型装备系统,若部件的运行状态相互独立,则根据可靠性框图将其转化而来的基于失效选择机制的可靠性评估 GERT 网络结构如图 4 所示。

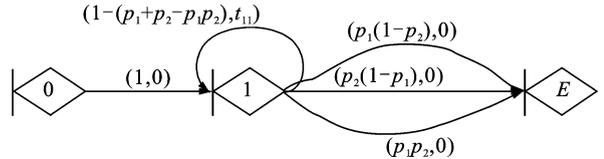


图 4 双部件串联型装备系统可靠性评估 GERT 网络模型

Fig. 4 Structure of reliability evaluation GERT network for series structural system with two components

图 4 所示系统保持正常工作的时间为  $t_{11}$ ,双部件串联型系统有 3 种失效模式,故节点 1 到节点 E 有 3 条箭线,分别表示装备在冲击应力下只有 A 失效,只有 B 失效,和 AB 同时失效,系统状态由正常转为失效。对于含  $N$  个部件的串联型装备系统,若部件运行状态相互独立,其可靠性评估 GERT 网络模型有相似结构,且节点 1 到节点 E 有  $2^N - 1$  条箭线。

**定义 4** 对于一个双部件并联型装备系统,若部件的运行状态相互独立,则根据可靠性框图将其转化而来的基于失效选择机制的可靠性评估 GERT 网络结构如图 5 所示。

对于图 5 所示并联系统,系统由正常工作状态转为失效状态需 A, B 都失效,即节点 E 的实现有 3 种路径:AB 同时失效、A 先失效后 B 失效和 B 先失效后 A 失效。对于含  $N$  个部件的并联型装备系统,若部件运行状态相互独立,其可靠性评估 GERT 网络模型有相似结构,且节点 1 到节点 E 有  $2^N - 1$  条路径,节点 2, 3 表示系统处于退化的工作状态,在可靠性评估 GERT 网络中,同样可以求

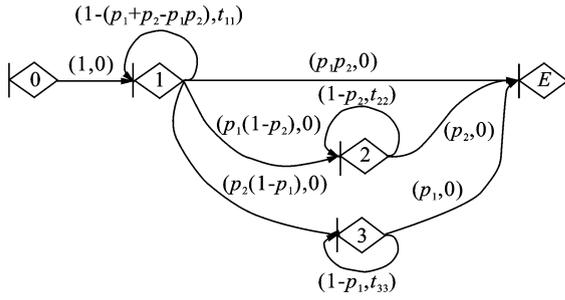


图5 双部件并联型装备系统可靠性评估 GERT 网络模型  
Fig. 5 Structure of reliability evaluation GERT network for parallel structural system with two components

得系统从某一种退化的工作状态到完全失效的相关参数。

### 3 装备可靠性评估 GERT 网络模型求解

#### 3.1 装备状态转移过程矩母函数设计

结合图示评审技术理论,类似地给出装备可靠性评估 GERT 网络模型中状态转移过程有向弧  $(ij)$  的矩母函数,其定义如下:

**定义 5** 在基于失效选择机制的装备可靠性评估 GERT 网络模型中,假设装备受到的应力冲击到达时间间隔  $t_{ij}$  服从某种概率密度函数为  $f(x)$  的分布,则状态转化有向弧  $(ij)$  的矩母函数为

$$M_{ij}(s) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{sj} f(t_{ij}) dt_{ij}$$

在可靠性评估 GERT 网络中,分布函数  $f(x)$  可为任意分布形式,具体分布需依据装备特点选取。令  $p_{ij}$  为装备到达某状态  $i$  时弧  $(ij)$  被执行概率,则定义弧  $(ij)$  的等价传递函数为  $W_{ij}(s) = p_{ij} \cdot M_{ij}(s)$ 。

设系统的等价传递函数为  $W_E(s)$ ,等价概率  $p_E$  就是等价传递函数  $W_E(s)$  在  $s=0$  处的数值,即  $p_E = W_E(s)|_{s=0}$ ,其等价矩母函数为  $M_E(s) = \frac{W_E(s)}{p_E} = \frac{W_E(s)}{W_E(0)}$ 。

由矩母函数的基本性质,即随机变量的原点矩就是矩母函数的  $n$  阶导数在  $s=0$  处的数值,可知装备平均寿命  $E(t)$  和寿命方差  $V(t)$  分别为

$$E(t) = \left. \frac{\partial M_E(s)}{\partial s} \right|_{s=0} = \left. \frac{\partial \left[ \frac{W_E(s)}{W_E(0)} \right]}{\partial s} \right|_{s=0} \quad (1)$$

$$V(t) = E(t^2) - (E(t))^2 =$$

$$\left. \frac{\partial^2 \left[ \frac{W_E(s)}{W_E(0)} \right]}{\partial s^2} \right|_{s=0} - \left\{ \left. \frac{\partial \left[ \frac{W_E(s)}{W_E(0)} \right]}{\partial s} \right|_{s=0} \right\}^2 \quad (2)$$

#### 3.2 基于失效选择机制的装备可靠性评估模型性质

**定理 1** 本文所构建的装备可靠性评估 GERT 网络模型终结点的实现概率为 1。

证明:本文所构建的可靠性评估 GERT 网络模型仅有一个终结点,所有活动都以一个正概率流向终结点,故终结点必定实现,即  $p_E = W_E(0) = 1$ ,证毕。

**定理 2** 对于单部件装备系统,若装备保持正常状态的时间  $t_{11}$  的期望为  $E(t_{11})$ ,那么装备平均寿命为

$$E(t_E) = \frac{1-p}{p} E(t_{11}) \quad (3)$$

证明:设  $f(t_{11})$  为装备保持正常状态的时间  $t_{11}$  的概率密度函数,系统的等价矩母函数为

$$M_E = W_E = \frac{p}{1 - (1-p)M_{11}}$$

装备平均寿命为

$$E(t) = \left. \frac{\partial M_E(s)}{\partial s} \right|_{s=0} = \left. \frac{\partial \left[ \frac{p}{1 - (1-p)M_{11}(s)} \right]}{\partial s} \right|_{s=0} = \left\{ \frac{p(1-p)}{[1 - (1-p)M_{11}(s)]^2} \cdot \frac{\partial M_{11}(s)}{\partial s} \right\} \Big|_{s=0}$$

又有

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial M_{11}(s)}{\partial s} \right|_{s=0} &= \left. \frac{\partial}{\partial s} \int_0^{\infty} e^{st_{11}} f(t_{11}) dt_{11} \right|_{s=0} = \int_0^{\infty} t_{11} \cdot e^{st_{11}} f(t_{11}) dt_{11} \Big|_{s=0} = \\ &= \int_0^{\infty} t_{11} f(t_{11}) dt_{11} = E(t_{11}) \end{aligned}$$

$$M_{11}(s) \Big|_{s=0} = \int_0^{\infty} e^{st_{11}} f(t_{11}) dt_{11} \Big|_{s=0} = \int_0^{\infty} f(t_{11}) dt_{11} = 1$$

故有

$$E(t) = \left\{ \frac{p(1-p)}{[1 - (1-p)M_{11}(s)]^2} \cdot \frac{\partial M_{11}(s)}{\partial s} \right\} \Big|_{s=0} = \frac{p(1-p)}{[1 - (1-p)]^2} E(t_{11}) = \frac{1-p}{p} E(t_{11})$$

证毕。

**定理 3** 在单部件系统可靠性评价 GERT 网络模型中,对装备进行无替换定数截尾试验,转移概率  $p$  只与试验样本数  $N$  和观测到的失效数据个数  $n$  有关,与装备期望寿命无关。

证明:设装备的期望寿命为  $\theta$ ,试验样本数为  $N$ ,第  $r$  个装备失效时刻为  $t_r$ ,则失效间隔时间

$$x_r = \begin{cases} t_r & r = 1 \\ t_r - t_{r-1} & r = 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (4)$$

则失效平均间隔时间

$$X_r = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r x_i = \frac{1}{r} \left[ t_1 + \sum_{i=2}^r (t_i - t_{i-1}) \right] = \frac{1}{r} t_r \quad (5)$$

由式(3)可知,转移概率  $p_r = \frac{X_r}{\theta + X_r} = \frac{t_r}{r\theta + t_r}$ ,

根据大数定律  $\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \theta$ ,以试验样本均值

$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$  代替装备期望寿命  $\theta$ ,故有  $p_r = t_r /$

$\frac{r}{N} \sum_{i=1}^N t_i + t_r$ ,即装备可靠性 GERT 网络模型中,

转移概率  $p$  取决于试验样本数和观测样本数,与装备期望寿命无关。

证毕。

### 4 算例研究

某型号装备由 5 个可靠性单元组成,其可靠性框图如图 6 所示。单元 A 为新升级设备,其可靠性试验数据不足,寿命服从指数分布,可应用定义 2 中的单部件可靠性评估 GERT 网络模型对其进行参数估计,其完全样本失效数据为:770,1 450,1 589,1 775,2 257,2 325,2 829,3 398,4 835,6 405,6 540,7 292,7 509,7 517,13 934 h,但在一次规定时间内仅取得 5 个失效数据。

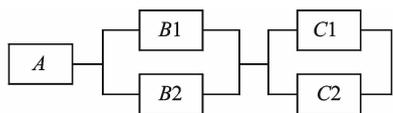


图 6 某型号装备系统可靠性框图

Fig. 6 Reliability block diagram of a kind of equipment system

基于失效选择机制的装备可靠性评估 GERT 模型构建步骤如下:

**步骤 1** 根据装备系统可靠性框图,建立装备系统可靠性评估 GERT 网络模型如图 7 所示。

**步骤 2** 根据专家经验,单元 A 寿命服从指数分布,应用如图 3 所示的 GERT 网络模型,其平均寿命为

$$E(t_A) = \frac{1 - p_r}{p_r} \cdot \frac{1}{r} t_r \quad (6)$$

式中: $r$  为观测到的失效样本数, $t_r$  为第  $r$  个样本失

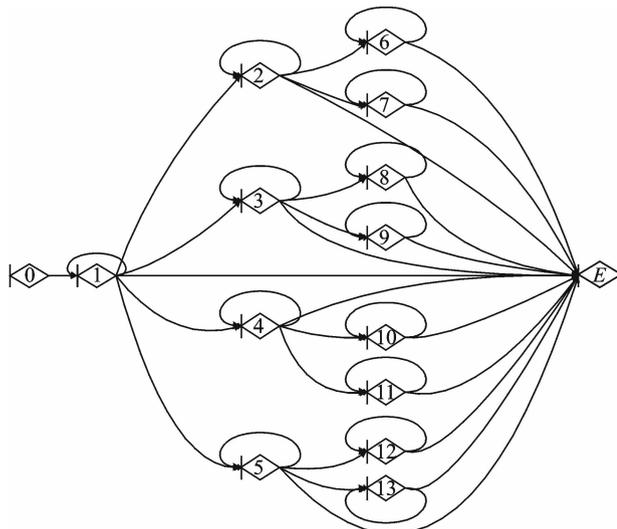


图 7 某型号装备系统可靠性评估 GERT 网络模型

Fig. 7 System reliability evaluation GERT network of a kind of equipment

效时刻。根据单元 A 寿命试验数据,截取 5 个失效数据,可得失效间隔时间序列  $x = \{770, 680, 139, 186, 482\}$  和平均失效间隔时间  $X = \{770, 725, 529.57, 443.75, 451.4\}$ 。

试验测得指数分布定数截尾寿命试验 GERT 模型转移概率值如表 1 所示。

表 1 指数分布定数截尾寿命试验 GERT 模型转移概率

Tab. 1 Transition probability of Type- II censoring life test of exponential distribution

观测失效数 $n$	试样样本总数					
	10	15	20	25	30	35
2	0.097 1	0.065 7	0.050 7	0.040 6	0.033 9	0.028 4
3	0.108 2	0.068 9	0.051 0	0.041 4	0.033 8	0.028 9
4	0.110 8	0.071 9	0.052 6	0.041 7	0.034 8	0.029 5
5	0.119 2	0.074 8	0.054 1	0.042 8	0.035 0	0.030 1

查表 1 可得,15 个试验样本下 5 个失效观测数据时的状态转移概率  $p_5 = 0.074 8$ ,据此可以对单元 A 的寿命进行评估,计算结果如表 3 所示, $\theta$  为完全样本计算的平均寿命。

表 2 单元 A 寿命评估结果比较

Tab. 2 Comparison of life evaluation results of unit A

$r$	$p_r$	极大似然估计		本文方法		$\theta/h$
		结果/h	误差/%	结果/h	误差/%	
2	0.065 7	10 535	124.39	10 310.01	119.60	4 695
3	0.068 9	7 625.667	62.42	7 157.803	52.46	
4	0.071 9	6 277.25	33.70	5 728.016	22.00	
5	0.074 8	6 082.2	29.55	5 583.359	18.92	

从表2中可以看出,在小样本情形下,采用本文方法结果优于极大似然估计,单元A的完全样本平均寿命为4 695 h,在5个失效样本情形下,本文方法计算结果为5 583 h,误差18.92%,低于极大似然估计的误差29.55%。

**步骤3** 依据网络结构及其装备系统各部件

$$W_E = \frac{1}{1-W_{11}} \left[ W_{1E} + W_{12} \frac{W_{2E} + W_{26} \frac{W_{6E}}{1-W_{66}} + W_{27} \frac{W_{7E}}{1-W_{77}}}{(1-W_{22})} + W_{13} \frac{W_{3E} + W_{38} \frac{W_{8E}}{1-W_{88}} + W_{39} \frac{W_{9E}}{1-W_{99}}}{(1-W_{33})} + W_{14} \frac{W_{4E} + W_{4,10} \frac{W_{10E}}{1-W_{10,10}} + W_{4,11} \frac{W_{11E}}{1-W_{11,11}}}{(1-W_{44})} + W_{15} \frac{W_{5E} + W_{5,12} \frac{W_{12E}}{1-W_{12,12}} + W_{4,13} \frac{W_{13E}}{1-W_{13,13}}}{(1-W_{55})} \right]$$

表3 某装备系统各部件状态参数

Tab. 3 State parameter of each component of equipment system

单元	寿命/h	状态保留时间/h	转移概率
A	5 583	10	0.001 788
B1	4 500	10	0.002 217
B2	4 500	10	0.002 217
C1	5 000	10	0.001 996
C2	4 000	10	0.002 494

**步骤4** 根据系统等价传递函数 $W_E$ ,可求得装备系统的平均使用寿命为

$$E(t_E) = \frac{\partial M_E(s)}{\partial s} \Big|_{s=0} = \frac{\partial W_E(s)}{\partial s} \Big|_{s=0} = 5 768.0 \text{ h}$$

根据传统基于故障率的平均失效时间的计算,装备系统的平均寿命为5 581.4 h,GERT网络计算结果与之基本接近,可验证计算结果可信度较好,系统可靠性评估GERT网络能模拟装备在冲击应力作用下的失效过程。此外,还可依据网络结构,计算任意状态之间转换的平均时间,实现对装备运行状态和剩余寿命的评估。

## 5 结束语

本文针对小样本失效数据,基于失效选择机制构建了装备系统可靠性评估GERT网络模型。该模型能够较好地融合历史经验信息和现场试验信息,在失效数据较少情形下取得较好置信度的寿命估计结果;GERT网络可对系统多运行状态进行描述,考虑系统运行的随机性质,根据网络拓扑结构和状态迁移概率,实现对系统可靠寿命、剩余寿命的均值和方差估计。试验结果表明,基于失效选择机制的可靠性试验寿命评估GERT网络模型有效、可行。

状态参数表,可计算此装备系统可靠性评估GERT网络模型的等价传递函数。

结合历史统计与单部件GERT网络模型测算,某装备系统各部件状态保留时间与转移概率如表3所示。

从节点0到节点E的等价传递函数为

## 参考文献:

- [1] 赵宇,杨军,马小兵. 可靠性数据分析教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009.  
Zhao Yu, Yang Jun, Ma Xiaobin. Reliability data analysis tutorial[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2009.
- [2] 张西山,黄考利,闫鹏程,等. 基于仿真数据的小子样复杂装备系统测试性综合评估[J]. 计算机测量与控制,2014,22(4):1175-1177.  
Zhang Xishan, Huang Kaoli, Yan Pengcheng, et al. Complexity equipment system testability integrated evaluation under small sample test based on simulation data[J]. Computer Measurement & Control, 2014,22(4):1175-1177.
- [3] Langseth H, Portinale L. Bayesian networks in reliability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(1):92-108.
- [4] Bistouni F, Jahanshahi M. Analyzing the reliability of shuffle-exchange networks using reliability block diagrams[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014,132:97-106.
- [5] Kim M C. Reliability block diagram with general gates and its application to system reliability analysis[J]. Annals of Nuclear Energy, 2011,38(11):2456-2461.
- [6] 刘哲锋. 航天产品可靠性框图自动评估系统实现与研究[J]. 装备指挥技术学院学报,2009,20(6):65-67.  
Liu Zhefeng. Study on automatic estimation system of spaceflight product's reliability black diagram[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2009,20(6):65-67.
- [7] Jong C, Leu S. Bayesian-network-based hydro-power fault diagnosis system development by fault tree

- transformation [J]. *Journal of Marine Science and Technology-TAIWAN*, 2013,21(4):367-379.
- [8] Hyun K, Min S, Choi H, et al. Risk analysis using fault-tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) applicable to shield TBM tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015,49:121-129.
- [9] 陶勇剑,董德存,任鹏,基于故障树的系统可靠性估计不确定性分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010,38(1):141-145.  
Tao Yongjian, Dong Decun, Ren Peng, Uncertainty analysis of system reliability estimate based on fault tree[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010,38(1):141-145.
- [10] 戴志辉,王增平,焦彦军. 基于动态故障树与蒙特卡罗仿真的保护系统动态可靠性评估[J]. *中国电机工程学报*, 2011,31(19):105-113.  
Dai Zhihui, Wang Zengping, Jiao Yanjun, Dynamic reliability assessment of protection system based on dynamic fault tree and Monte Carlo simulation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011,31(19):105-113.
- [11] 尹晓伟,钱文学,谢里阳. 基于贝叶斯网络的多状态系统可靠性建模与评估[J]. *机械工程学报*, 2009,45(2): 206-212.
- Yin Xiaowei, Qian Wenxue, Xie Liyang. Multi-state system reliability modeling and assessment based on Bayesian networks[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009,45(2): 206-212.
- [12] 于敏,何正友,钱清泉. 基于 Markov 过程的硬/软件综合系统可靠性分析[J]. *电子学报*, 2010, 38(2): 473-479.  
Yu Min, He Zhengyou, Qian Qingquan. Reliability analysis of combined hardware/software system based on Markov process[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010,38(2):473-479.
- [13] 赵涛. 可靠性工程基础[M]. 天津:天津大学出版社, 1999.  
Zhao Tao. Reliability engineering [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999.
- [14] 张勇,邱静,刘冠军,等. 基于非齐次泊松过程和统计仿真的故障样本模拟生成[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(15):75-82.  
Zhang Yong, Qiu Jing, Liu Guanjun, et al. Fault sample generation based on nonhomogeneous poisson process and statistical simulation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012,48(15):75-82.

