doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.06.012

侦察装备的可靠性概率模型及其应用

宋朝河，戎皓
（南昌陆军学院 教研部，南昌 330100）

摘要：针对新侦察装备的故障率和维修率未知的情况，建立基于复合泊松过程理论的侦察装备可靠性概率模型。简述复合泊松过程的概念，对未知装备故障率和维修率的侦察装备可靠性进行分析、仿真。结果表明，该可靠性概率模型不依赖于系统的参数，可动态分析系统的可靠性，也可预测某个系统可靠性的未知参数。

关键词：侦察装备；可靠性；概率模型；复合泊松过程
中图分类号：O213.2 **文献标志码**：A

Scout Equipment Credibility Probably Model and Its Applied

Song Chaohe, Rong Hao
(Dept. of Teaching & Researching, Nanchang Army Academy, Nanchang 330100, China)

Abstract: Aiming at the condition that the breakdown rate and the maintain rate of the new scout equipment is unknown, scout equipment credibility probability model based on compound Poisson process theories is established. Recount the notion of the compound Poisson process briefly, then analysis and emulate the scout equipment which the breakdown rate and the maintain rate of equipment is unknown. Result shows that the credibility probability model isn't dependent on the system parameters, for this reason, it not only can complete the dynamic analyze to the system credibility, but also can predict unknown parameter of a certain equipment system credibility.

Keywords: scout equipment; credibility; probability model; compound Poisson process

0 引言

装备可靠性分析的关键因素是装备系统的故障率和维修率。对于新装备的故障率和维修率未知的情况，装备可靠性的分析就非常困难。因此，笔者基于复合泊松过程建立系统可靠性的概率模型，对未知装备故障率和维修率的情况的装备可靠性进行分析。

1 复合泊松过程的概念

设随机过程 $\{X(t),t\geq 0\}$ 的状态只取非负整数值。如果它还满足：1) $X(0)=0$；2) $\{X(t),t\geq 0\}$ 具有独立增量性；3) 对任意 $s,t>0$，$X(s+t)-X(s)=P(\lambda t)$，即 $P\{X(S+t)-X(s)=k\}=(\lambda t)^k e^{-\lambda t}/k!$，$k=0,1,2,\cdots$；$\lambda>0$，则称 $\{X(t),t\geq 0\}$ 是强度为 λ 的泊松过程，其特征函数为：$\varphi_X(t)=\exp[\lambda(e^{jt}-1)]$。如果存在 $Y(t)=\sum_{n=1}^{X(t)} Z_n,\ t\geq 0$，其中 $\{Z_n,n\geq 1\}$ 为独立同分布随机序列且与 $\{X(t),t\geq 0\}$ 独立，则称 $\{Y(t),\ t\geq 0\}$ 为复合泊松过程。如果 $E[X_1^2]<\infty$，则 $E[Y(t)]=\lambda t E(X_1)$，且 $D[Y(t)]=\lambda t E(X_1^2)$，其特征函数为：$\varphi_Y(t)=\exp\{\lambda t[\varphi_{X_1}(t)-1]\}$。

2 建立侦察装备的可靠性概率模型

假设侦察装备故障次数是一泊松过程，每次发生故障的时间是一列指数分布的随机变量，而且故障次数与每次发生故障的时间相互独立，则在[0, t]时间内发生故障的总时间为复合泊松过程，可以利用复合泊松过程建立概率计算模型。建立概率计算模型的步骤如下：

1) 确定故障发生次数的泊松过程。首先，对数据进行处理。在整个分析过程中，以 d（8 h）为时间计量单位，将一次故障持续时间超过 8 h 的事件进行拆分，使得故障持续时间最大为 8 h。如果故障时间为 2 d，则认为是 2 次故障，故障间隔时间为 0，不满一天的按照 1 d 时间计算，即为 1 次。其次，确定泊松分布的强度 λ。泊松分布的强度是指单位时间内故障平均发生的次数，因此，对数据处理后可以得到故障强度 λ。最后，确定 0～t 时间内侦察系统故障次数 $n(t)$ 的特征函数为：

$$\Phi_{n(t)}(v)=\exp[\lambda t(e^{iv}-1)] \tag{1}$$

2) 确定系统故障时间的概率分布。为了弥补样本数据的不足，系统故障时间的累积概率采用中位秩法进行计算：

$$F_n(x_i)=(i-3)/(n+0.4) \tag{2}$$

收稿日期：2011-01-27；修回日期：2011-03-11
作者简介：宋朝河（1979—），男，安徽人，硕士，助教，从事装备可靠性研究。

式中，$F_n(x_i)$ 为数据系列 $X<X_i$ 的概率；X 为随机变量；n 为数据序列总数；i 为将变量数据由大到小排列后的序号。

对侦察系统故障时间的概率分布采用指数分布，其累积概率分布函数为：

$$F(x)=1-e^{-\theta x},\ x\geq 0 \tag{3}$$

对应的分布密度函数为：

$$f(x)=\theta e^{-\theta x},\ x>0 \tag{4}$$

其特征函数为：

$$\Phi_X(v)=\theta/(\theta-iv) \tag{5}$$

3) 构造在[0, t]时间内发生侦察系统故障时间 $d(t)$ 的复合特征函数。假设计数过程为泊松过程，系统故障时间为指数分布，构造[0, t]时间内系统故障时间为 $\{d(t)=\sum_{i=1}^{N(t)} d_i,\ t\geq 0\}$ 的复合泊松过程的特征函数 $\Phi_d(v)=\exp[\lambda t(\frac{iv}{\theta-iv})]$。利用复合泊松过程特征函数的数学期望和方差公式，计算 $E[d(t)]$ 和 $\mathrm{var}[d(t)]$。再利用傅里叶逆变换求出系统故障时间的概率密度，并求出累积系统故障时间的概率分布的近似分布函数。

3　可靠性概率模型在侦察雷达中的应用

由于侦察系统平时用作训练，可认为系统是在连续工作。根据某部队侦察雷达 2007 年的履历表，运用系统故障概率模型，对系统可靠性进行分析(其中工作效率表示每天的训练时间占一天 24 h 的比例)，其数据如表 1。

表 1　2007 年某雷达侦察系统履历表

训练月份	故障日	占总训练天数的比例/%	月故障天数	月总训练天数	工作效率	故 障 原 因
1	15-17	13.04	3	23	1/3	电源供电不足
2	26-28	20.00	3	15	1/3	天线故障
3	3	4.54	1	22	5/12	接收机信号不稳定
4	24-26	13.64	3	22	5/12	处理器故障
5	——	0	0	20	5/12	——
6	5-9	22.73	5	22	5/12	脉冲编码信号混乱
7	25-26	9.09	2	22	5/12	激励器故障
8	——	0	0	20	5/12	——
9	11-14	19.05	4	21	5/12	滤波器故障
10	23-25	13.64	3	22	1/3	检波器故障
11	22-27	33.33	6	18	1/3	放大器对信号放大不足
12	28-29	10.53	2	19	1/3	干扰器不工作

在整个分析过程中，中断持续时间最大为 8 h。因此系统故障时间为：$g_i=24\cdot t_i\cdot r_i/8$；月总训练时间为：$T_i=24z_i\cdot r_i/8$；经处理后的历史数据可以得到：$\lambda=\sum_{i=1}^{12} g_i\Big/\sum_{i=1}^{12} T_i=\frac{35.75}{283.25}=0.126$；从而可知，侦察系统故障次数 $n(t)$ 的特征函数为：$\Phi_{n(t)}(v)=\exp[0.126t(e^{iv}-1)]$。根据概率模型，结合式(5) 求得系统故障时间概率分布，其结果如表 2。

表 2　系统故障时间概率分布情况

$T_{故障}$/h	概率	$T_{故障}$/h	概率	$T_{故障}$/h	概率
0	0.074	2.50	0.394	5.00	0.713
1.25	0.181	3.00	0.500	6.00	0.819
2.00	0.287	3.75	0.606	6.25	0.926

假设概率分布符合指数分布，运用最小二乘法，结合 Matlab 软件对表 2 数据进行曲线拟合，得其累积概率分布的数学表达式为：$F(x)=1-e^{-0.21x},\ x\geq 0$；则对应的分布密度函数为：$f(x)=0.21e^{-0.21x},\ x>0$。因此，系统故障时间的特征函数为：$\Phi_Y(v)=0.21/(0.21-iv)$。

复合泊松过程 $Y(t)$ 的期望和方差以及特征函数分别为：$E[Y(t)]=\lambda tE(X_1)=\lambda t/\theta=0.6t$；$D[Y(t)]=\lambda tE(X_1^2)=\lambda t/\theta^2=2.86t$；$\Phi_g(v)=\exp[\lambda t(\frac{iv}{\theta-iv})]=\exp[0.126t(\frac{iv}{0.21-iv})]$。

运用傅里叶变换可知：

$$\Phi_g(v)=\exp[0.126t(\frac{iv}{0.21-iv})]\leq\exp(0.6tiv-1.43tv^2)$$

所以，复合泊松过程的特征函数 $\Phi_g(v)$ 的傅里叶变换的最大近似解为：

$$f(g)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\times 2.86t}}\exp\left(\frac{-(g-0.6t)^2}{5.72t}\right)$$

因此，系统故障时间的概率分布近似正态分布 $N(0.6t,\ 2.86t)$。从正态分布的密度函数可知，$E=0.6t$，即随着统计时间的增加，系统故障概率密度分布的对称中心由偏左逐渐趋于中心对称分布。令 $u=(g(t)-0.6t)/\sqrt{2.86t}$，则可以通过查正态分布表求

得在不同时间 t，不同发生概率情况下的系统故障时间区间，其结果如表 3。

表 3　不同时间不同发生概率情况下的系统故障时间区间

t/h	故障时间区间/h					
	50%故障率	60%故障率	70%故障率	80%故障率	平均工作时间/d	n
1	(0, 2.435)	(0, 3.560)	(0, 5.167)	(0, 5.762)	0.6	1
2	(0, 3.233)	(0, 4.285)	(0, 6.340)	(0, 7.576)	1.2	2
5	(0.447, 5.553)	(0, 6.384)	(0, 8.181)	(0, 10.358)	3.0	3
10	(2.390, 9.610)	(1.492, 10.508)	(0.460, 11.540)	(0, 13.942)	6.0	4
15	(4.579, 13.421)	(3.479, 14.521)	(2.214, 15.786)	(0.603, 17.396)	9.0	5
20	(6.895, 17.105)	(5.624, 18.376)	(4.165, 19.835)	(2.304, 21.696)	12.0	6
30	(11.748, 24.252)	(10.191, 25.809)	(8.404, 27.596)	(6.125, 29.875)	18.0	7
40	(16.780, 31.220)	(14.983, 33.017)	(12.919, 35.081)	(10.288, 37.712)	24.0	8
50	(21.928, 38.072)	(19.919, 40.081)	(17.611, 42.389)	(14.670, 45.330)	30.0	9

表 3 中的计算结果是指在系统故障时间为 t 的情况达到故障概率 P 的时间区间。由此可得侦察系统的可靠度为：

$$C=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{\text{系统总工作时间}\ -\text{系统故障时间}}{\text{系统总工作时间}}=$$

$$\frac{1}{9}\left(\frac{4.8-1}{4.8}+\frac{9.6-2}{9.6}+\frac{24-5}{24}+\frac{48-10}{48}+\frac{72-15}{72}+\frac{96-20}{96}+\frac{144-30}{144}+\frac{192-40}{192}+\frac{240-50}{240}\right)=0.791\ 7$$

4　结束语

该模型不仅适用于参数未知的系统可靠性分析，也可以用于检验系统的已知参数，可以对系统进行实时分析，具有一定的实用价值。通过对侦察系统的可靠性分析，验证了该方法的可行性和合理性，说明该模型可以作为系统可靠性分析的理论依据，达到提高装备可靠性的有效途径。但该模型在求解系统概率时间分布方面存在一定的局限性，检验数据还需要进一步扩充，笔者将在以后的研究工作中继续探索。

参考文献：

[1] 孙荣恒. 随机过程及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
[2] 张雅清, 王艳玲, 李晓虹. 复合泊松过程在系统可靠性中的应用[J]. 河南师范大学学报, 2007, 35(1): 38-58.
[3] 孙天晴. 基于复合泊松过程战略石油储备天数的概率模型及其应用[J]. 数理统计与管理, 2007, 9(5): 852-857.
[4] C .李普逊, N. J. 谢斯. 工程实验统计设计和分析[M]. 宁开平, 译. 成都: 成都科技大学出版社, 1980.
[5] 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
[6] 程洪涛, 张敬慧, 吕剑. 某型弹载侦察系统自毁技术[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(12): 16.
[7] 何友, 修建娟, 张晶炜. 雷达数据处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

****

（上接第 34 页）

求出时间之后，就可以求出其他的性能参数，如吞吐率、系统中平均任务数等。此外为表征任务有效完成时间 ET 与任务处理时间 T-ET 的比值，笔者结合 SNR 的概念提出系统任务时间信噪比的概念，计算公式如下：

$$\mathrm{SNR_T}=\log\frac{ET}{T-ET}=\log\frac{ET}{\max\limits_{i=1}^{n}(MT_i+LT_i)}$$

该指标可以作为组织结构调整、力量迁移的依据，从而提高装备维修保障指挥系统适应信息化条件下装备维修保障需求变化快的能力。

4　结论

装备维修保障指挥系统工作流模型不但有 Petri 网的形式化和图形化的优点，而且有面向对象的模块化、可重用性和可维护性等优点，既可以单独使用来研究具体对象的工作流程，又可以组合起来研究系统各部分之间的影响制约关系。该方法降低了系统建模的复杂度，提高了建模的效率，更好地适应了系统开放性、动态资源重组等功能。该工作流模型能成为分析装备维修保障指挥业务流程的有力工具，具有一定的实用价值。

参考文献：

[1] Murata T. Petri nets: properties, analysis and application [J]. proceeding of the IEEE, 1989, 77(4): 541-580.
[2] Jensen K.. An introduction to the theoretical aspects of colored Petri nets[J]. Lecture Notes in computer science, 1994, 803: 230-272.
[3] 陈乐. 装备保障指挥工作流模型及应用研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2010.
[4] 孙建召, 曾巧明. 基于面向对象 Petri 网的工作流建模及性能分析[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(10): 73-75.
[5] Li Jingzhou, Wang Haiyang. An Object-Oriented Modeling Method for Workflow Applications[C]. Canada: The Sixth International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, 2001.
[6] 林闯, 田立勤. 工作流系统模型的性能等价分析[J]. 软件学报, 2002, 13(8): 1472-1480.