

舰船机电系统非完备使用故障数据分析*

陈丹丹¹, 姚智刚¹, 李 磊², 刘艳彬²

(1. 中国人民解放军 91872 部队, 北京 102442;

2. 国防科技大学 装备综合保障技术重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:舰船机电系统在使用维修过程中所记录的故障数据通常质量不高,信息记录不完整、不准确。针对这类不完备数据,利用图示法给出故障趋势的判定。在此基础上,分别利用齐次泊松过程、非齐次泊松过程和几何过程,对装备的历史故障数据进行分析。结果表明,几何过程产生的拟合误差最小,可预测装备的未来故障强度。

关键词:故障数据;非完备数据;非齐次泊松过程;几何过程

中图分类号:TP202;O213 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)05-183-06

Analysis on imperfect failure data of warship electromechanical system

CHEN Dandan¹, YAO Zhigang¹, LI Lei², LIU Yanbin²

(1. The PLA Unit 91872, Beijing 102442, China;

2. Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The fault data of ships' mechanical system are usually not well recorded during operation and maintenance activities, and are typically incomplete and inaccurate. For such incomplete data, fault trend was justified by graphical representation. On this basis, historical fault data was analyzed using homogeneous Poisson process, non-homogeneous Poisson process and geometric process respectively. Numerical results show that the fault of geometric process is minimized, and the future fault intensity can be predicted.

Key words: fault data; incomplete data; non-homogeneous Poisson process; geometric process

舰船机电系统的故障数据分析属于可修复系统的研究范畴。可修复系统的故障数据分析所关注的问题是如何评定系统的故障间隔时间是否随着时间的增大而劣化或改善,进而采取合适的预防性维修或更换措施^[1]。

一般而言,可修复系统的故障过程可用随机点过程表示^[2-3],如图1所示。图1中 $T_1 < T_2 < \dots < T_n$ 为系统的故障时刻, $X_i = T_i - T_{i-1}$ ($i = 1, 2, \dots, n$)为故障间隔时间。但随机过程的使用需要一定的适用条件,需要根据系统的故障数据进行检验与选择。常见的检验方法有 Nelson-Aalen 图检验法、Mann 检验法、系列检验法等^[4]。



图1 可修复系统的故障间隔数据

Fig. 1 Fault interval data for repairable system

按照图1中的过程进行统计分析,通常在概率模型统计理论中的“修复如新”假设不一定成

立,即故障数据不一定独立同分布。这是因为,对一个可修复系统,可能由于老化、磨损、疲劳等原因使得相邻的故障间隔时间缩短;或者由于磨合,运行经验的积累,合理的维护、使用和管理,使得相邻的故障间隔时间变大。

在实际工作中,舰船机电系统收集的故障数据是不完备的,部分故障数据可能缺失,并且记录的故障具体发生的时间也不精确。由于这些不精确不完备的数据无法构成一个良好的故障时间序列样本函数,很难直接对这些数据进行分析。为了减少数据不完备造成的影响,考虑采用区间故障数据进行间接分析,即将故障数据所持续的时间长度分为若干个时间区间,统计每个区间内的故障数目,然后针对这种故障计数数据进行分析。

本文采用图示法和统计方法分别分析装备的故障数据,前者主要用于对故障趋势粗略的定性分析,而后者基于随机过程模型进行定量分析,可用于预测系统在未来一个时间段内的平均故障间

* 收稿日期:2015-05-13

基金项目:装备预先研究基金资助项目(51327020302)

作者简介:陈丹丹(1981—),女,黑龙江萝北人,工程师,博士,E-mail:chendandanwhf@163.com

隔时间等指标。

1 图示分析方法

最常用的图示法是 Nelson-Aalen 法^[4],其原理是:若 $\{x_i, i=1,2,3,\dots\}$ 独立同分布,则相邻故障的平均间隔 $E(x_i)$ 相同。因此,观察到的 $\{x_i, i=1,2,3,\dots\}$ 应无显著的变化趋势,这可通过 $n+1$ 个点的连线的图形来判断。点坐标为:

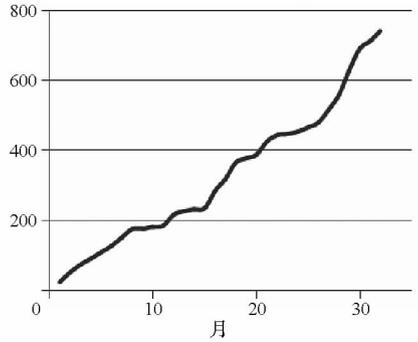
$$(t_i, N(t_i)), i=1,2,\dots,n$$

$$\begin{cases} t_i = \sum_{j=1}^i x_j, i=1,2,\dots,n \\ t_0 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

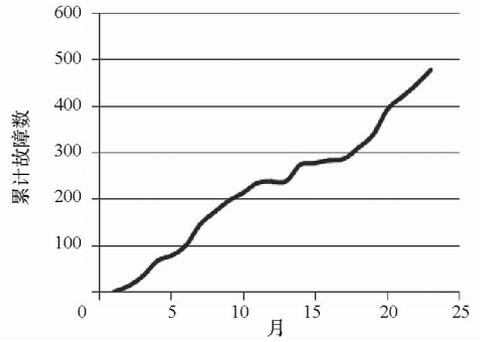
其中: x_i 为第 i 个时间区间的间隔; t_i 为初始时刻到第 i 个时间区间的总时间; $N(t_i)$ 为 t_i 时间内总故障数。

若图形呈凸形,则表明故障间隔时间随时间的推移增加,可靠性得到改善,故障强度减小;若呈凹形,表明故障间隔时间随时间的推移减小,可靠性在衰退,故障强度增大;若大体上呈直线状,则可认为无变化趋势。

选用四艘任务剖面不同的舰船机电系统的故障数据进行分析。以月为时间区间的 $(t, N(t))$ 曲线如图 2 所示,其中横坐标 t 为月数,纵坐标 $N(t)$ 为累计故障数。这样不仅可以分析出故障次数随时间的变化趋势,也可分析不同任务剖面对舰船机电系统故障的影响。



(c) 3 号舰船
(c) Warship 3



(d) 4 号舰船
(d) Warship 4

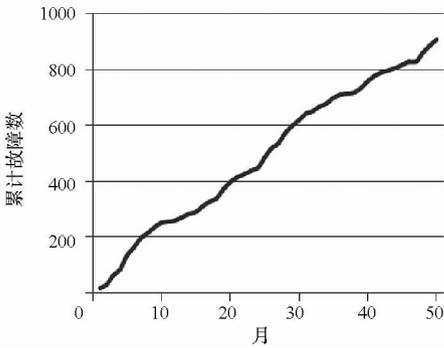
图 2 四条舰船机电系统的累计故障数据
Fig. 2 Cumulative fault data of four warships electromechanical system

由图 2 可见,这四艘舰船机电系统故障的 $(t, N(t))$ 曲线接近直线,这表明其机电系统的故障间隔时间基本稳定,不存在明显的变化趋势。说明这四艘舰船的机电系统均处于平稳期,无须进行大修。其中 1 号舰船曲线略凸,故障强度略微减小;2 号、3 号舰船略凹,故障强度略微增加;4 号舰船的趋势较为复杂,故障强度变化不太容易判断。

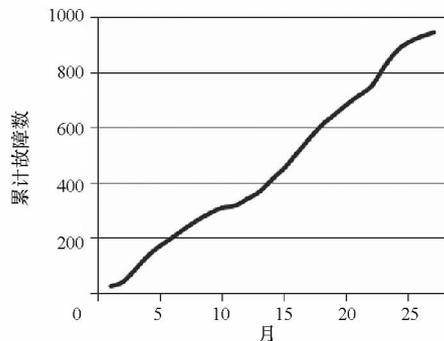
图 3 是各舰船不同月数的故障数目统计图,从图 3 中的趋势线(线性拟合)可以看出,1 号舰船有减少的趋势,而 2 号、3 号、4 号舰船故障数目有增加的趋势。这与图 2 中故障强度的分析相对应。

2 统计分析方法

传统上,可修系统的故障数据统计分析一般先判断故障数据是否符合更新过程(Renewal Process, RP)模型,即判断数据是否存在变化趋势。如果存在趋势,则利用非齐次泊松过程(Non-Homogeneous Poisson Process, NHPP)^[4-5]进行分析。如果不存在趋势并且故障率为常数,则认为是齐次泊松过程(Homogeneous Poisson

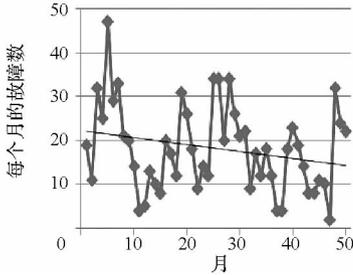


(a) 1 号舰船
(a) Warship 1

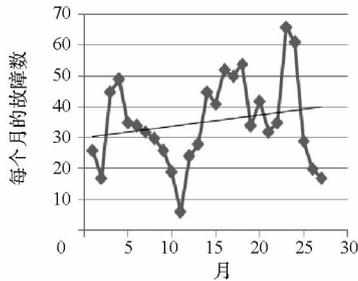


(b) 2 号舰船
(b) Warship 2

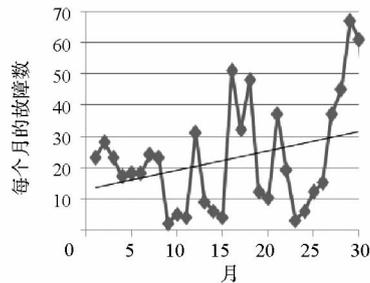
Process, HPP), 而对于一般的更新过程还可能需
要拟合其他分布。



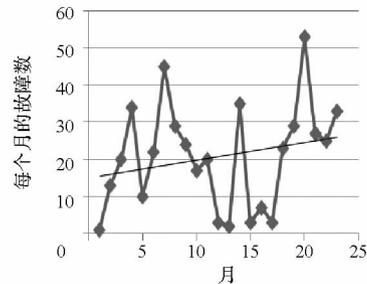
(a) 1号舰船
(a) Warship 1



(b) 2号舰船
(b) Warship 2



(c) 3号舰船
(c) Warship 3



(d) 4号舰船
(d) Warship 4

图 3 四条舰船机电系统的月份故障数据
Fig. 3 Mensal fault data of four warships
electromechanical system

数据处理可按照下面两种方法进行:故障间
隔数据、故障区间数据。故障间隔数据研究的是
相邻故障的间隔时间;故障区间数据研究的是相
同时间区间内发生的故障数。

由于舰船机电系统故障数据的不完备、不精

确等特点,如果某个故障没有记录或记录丢失,那
么它上一个故障与下一个故障的时间间隔会成倍
增加(假设故障强度不变),这样基于故障间隔数
据的分析会出现比较大的误差。为此,将故障间
隔数据转换成故障区间数据进行分析,如图 4
所示。

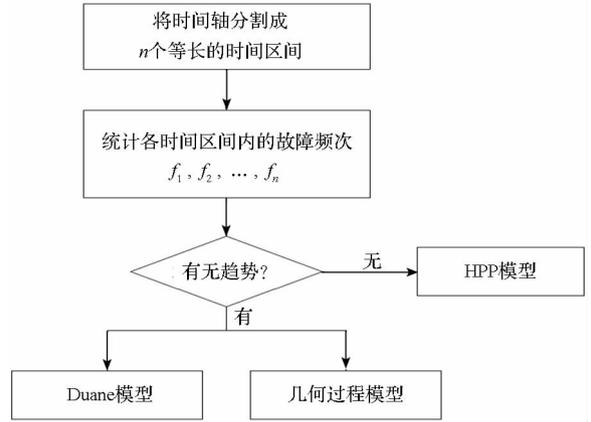


图 4 故障区间数据的分析步骤

Fig. 4 Analysis steps of fault interval data

由上面分析可知故障数据的大致趋势,对
于无趋势的区间数据适合采用 HPP 过程分析,
而对于有趋势的区间数据适合采用 Duane 模
型分析。此外,将基于近年来出现的一种新的
随机过程——几何过程^[6],研究趋势数据的分
析方法。

2.1 无趋势区间数据的 HPP 参数估计方法

设区间长度为 Δ , 区间故障数据为 f_1, f_2, \dots, f_n , HPP 过程的故障强度为 λ 。由每个区间发生的故障数目服从参数为 $\lambda\Delta$ 的泊松分布知,极大似然函数定义为:

$$L = \prod_{i=1}^n \frac{(\lambda\Delta)^{f_i}}{(f_i)!} \exp(-\lambda\Delta) \quad (2)$$

令 $\ln(L)/d\lambda = 0$ 可求得参数的估计值
 $\hat{\lambda} = \sum_{i=1}^n [f_i / (n\Delta)]$ 。

采用 HPP 方法分析四艘舰船机电系统的故障
强度,可得计算结果分别为 18.16/月、35.15/月、
23.22/月和 20.78/月。利用无趋势区间数据的
HPP 参数估计虽不能得到故障强度的变化趋势,
但可以判断故障强度与任务剖面的关系。由以上
结果可以看出 1 号、3 号、4 号舰船的故障强度比
较接近,而 2 号舰船的故障强度明显高于其他三
艘舰船。推测原因如下:2 号舰船的使用强度更
大;2 号舰船的故障数据记录更加全面完整。实
际中 2 号舰船的任务量是四艘舰船中最大的,与
推理相符。

2.2 有趋势区间数据的 Duane 模型参数估计方法

Duane 模型是一种 NHPP 模型。NHPP 模型假设在时刻 t 前发生的故障数 $N(t)$ 是一个独立增量过程,对于 Duane 模型,其累积故障强度函数定义为:

$$E(N(t)) = m(t) = \lambda t^\beta \quad (3)$$

由式(3)可知,在区间 $[0, t_i = i\Delta)$ 内发生的故障次数 N_i 可表示为:

$$\ln N_i = \ln \lambda + \beta \ln t_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

其中, ε_i 是一个均值为 0 的随机变量。利用最小二乘法,可求得参数 λ 与 β 的估计值为:

$$\hat{\lambda} = \exp \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \ln N_i - \hat{\beta} \sum_{i=1}^n \ln t_i \right) \quad (5)$$

$$\hat{\beta} = \frac{n \sum_{i=1}^n \ln N_i \ln t_i - \left(\sum_{i=1}^n \ln N_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i \right)}{n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2} \quad (6)$$

对于 Duane 模型,通过对参数 β 的判别,可知故障趋势。显然当 β 大于 1 时,系统有故障增加的趋势;而当 β 小于 1 时,表面故障有减少的趋势;当 $\beta = 1$,则 Duane 模型退化为 HPP 模型。

对于四只舰船,采用 Duane 模型的计算的相关结果见表 1。由表 1 可见 1 号、2 号、3 号舰船的初始故障强度 λ 的值接近,而 4 号舰船的 λ 值偏低,这与它们第 1 个月的实际故障数据 19, 26, 23, 1 是比较符合的。由 β 值可知,2 号、4 号舰船故障强度增加,而 1 号、3 号舰船故障强度减少,其中对 3 号舰船的判断结果与图 4 中的线性拟合结果不同,在后面将借助几何过程对此进一步分析。平均故障强度的分析结果与 HPP 过程的分析结果相差不大,这与图 2 中 $(t, N(t))$ 曲线基本呈直线状的判定符合。

表 1 Duane 模型的计算结果

Tab. 1 Calculation results of Duane model

	1 号舰船	2 号舰船	3 号舰船	4 号舰船
λ	23.80/月	25.75/月	23.08/月	4.10/月
β	0.94	1.09	0.95	1.60
平均故障强度	19.14/月	34.96/月	19.07/月	26.80/月
当前故障强度	18.08/月	38.14/月	18.04/月	42.28/月

2.3 有趋势区间数据的几何模型参数估计方法

几何过程最早出现在非完美维修理论的研究中,后来也用于可靠性加速寿命试验的研究。现重点基于几何过程分析故障区间数据的演化趋势。

定义 (几何过程) 如果非负随机变量序列 $\{Y_n, n = 1, 2, 3, \dots\}$ 构成一个更新过程,那么对于给定实数 $\alpha, \{X_n = \alpha^{n-1} Y_n, n = 1, 2, 3, \dots\}$ 称为一个几何过程。

如果 X_n 表示第 n 个区间的故障数目,按定义知 α 反映了故障数目均值增加的比例系数。如果 $\alpha = 1$,几何过程就是一个更新过程,它反映系统运行处于平稳期,故障强度并未随时间增加;如果 $\alpha > 1$, X_n 的均值呈几何级数增加,表明故障强度增大;而 $\alpha < 1$ 则表明故障强度有减小的趋势。由于几何过程的数学描述形式简洁,参数物理意义清晰,有利于对区间数据的定量分析。

首先考虑几何过程的假设检验问题,即几何过程对数据拟合结果的置信度问题。定义随机变量序列 U_i 和 V_i 如式(8)、式(9)所示。

当 n 为偶数:

$$U_i = \frac{X_{2i}}{X_{2i-1}}, i = 1, 2, \dots, \frac{n}{2} \quad (7)$$

当 n 为奇数:

$$V_i = \frac{X_{2i+1}}{X_{2i}}, i = 1, 2, \dots, \frac{(n-1)}{2} \quad (8)$$

不难验证 U_i 和 V_i 都是独立随机变量序列,因此可采用下面的差异 g 检测法来判断几何模型的适用性。假设 $\{W, i = 1, 2, 3, \dots, m\}$ 是一组独立随机变量,定义

$$D_w = \sum_{i=2}^m I[W_i > W_{i-1}] \quad (9)$$

那么

$$D(W) = \frac{\left(D_w - \frac{m-1}{2} \right)}{\left(\frac{m+1}{12} \right)^{\frac{1}{2}}} \sim N(0, 1) \quad (10)$$

对于几何过程的参数估计问题,采用非参数化方法进行估计。

令

$$X_i = \alpha^{i-1} Y_i, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (11)$$

并取对数,有:

$$\ln X_i = (i-1) \ln \alpha + \ln Y_i, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (12)$$

由于 Y_i 构成一个更新过程,因此可设 $E(\ln Y_i) = \mu, VAR(\ln Y_i) = \tau^2$,则式(12)可写为:

$$\ln X_i = (i-1) \ln \alpha + \mu + \varepsilon_i, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

其中, ε_i 是一组均值为 0、方差为 τ^2 的随机变量序列。显然式(13)变成了线性回归问题,进而可求得 α 和 $\lambda (\lambda = E(Y_i))$ 的估计值。

$$\hat{\lambda} = \exp\left\{\frac{2}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n [(2n-3i+2)\ln X_i]\right\} \quad (14)$$

$$\hat{\alpha} = \exp\left\{\frac{6(n-1)n(n+1)}{\sum_{i=1}^n [(n-2i+1)\ln X_i]}\right\} \quad (15)$$

α 和 λ 的估计值也可以直接利用最小二乘法求得。

$$Q = \sum_{i=1}^n (X_i - \alpha^{i-1}\lambda)^2 \quad (16)$$

对式(16)取偏导数可得:

$$\begin{aligned} & \left(\sum_{i=1}^n \alpha^{i-1} X_i\right) \left\{ \sum_{i=1}^n [(i-1)\alpha^{2i-1}] \right\} \\ &= \left\{ \sum_{i=1}^n [(i-1)\alpha^i X_i] \right\} \left(\sum_{i=1}^n \alpha^{2i-2} \right) \quad (17) \end{aligned}$$

$$\hat{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha^{i-1} X_i}{\sum_{i=1}^n \alpha^{2i-2}} \quad (18)$$

第二种估计方法没有闭项形式的解析解,但在拟合数据时却往往更加精确(均方根误差意义下)。表2和表3分别给出了两种方法对四艘舰船的分析结果,而且表3给出的平均故障强度与HPP过程的分析结果比较接近。两种几何模型参数估计方法都表明1号舰船的故障强度减小,而2号、3号、4号舰船的故障强度在增加。两种几何模型参数估计方法的分析结果与Duane模型参数估计方法相比,1号、2号、4号舰船故障强度的变化趋势相同,3号舰船的故障强度变化趋势结果不同,而图示方法中得到的3号舰船的故障强度变化趋势与两种几何模型参数估计方法相同。

表2 几何模型(对数拟合)的计算结果

Tab.2 Calculation results of geometric model (logarithmic)

	1号舰船	2号舰船	3号舰船	4号舰船
λ	19.640/月	28.099/月	11.865/月	9.791/月
α	0.989 6	1.009 5	1.022 1	1.032 8
平均故障强度	15.386/月	31.877/月	16.994/月	14.284/月
当前故障强度	11.785/月	35.967/月	23.372/月	19.911/月

表3 几何模型(最小二乘拟合)的计算结果

Tab.3 Calculation results of geometric model (least squares fitting)

	1号舰船	2号舰船	3号舰船	4号舰船
λ	22.556/月	30.831/月	13.220/月	15.390/月
α	0.990 8	1.009 9	1.033 5	1.026 2
平均故障强度	18.155/月	35.154/月	23.052/月	20.749/月
当前故障强度	14.356/月	39.849/月	36.681/月	27.167/月

表4给出了各种估计方法的均方根误差。由表4可见,采用第二种估计方法的几何模型误差最小,大约在均值的1/10左右,因此拟合的效果比较好。

表4 各种模型拟合数据的均方根误差

Tab.4 Root mean square error of fitting data on various models

	1号舰船	2号舰船	3号舰船	4号舰船
HPP模型	1.376 5	2.715 5	2.982 6	2.895 1
Duane模型	1.357 8	2.652 1	3.108 6	3.468 3
几何模型1	1.391 3	2.736 5	3.024 5	3.117 9
几何模型2	1.335 0	2.662 0	2.762 2	2.809 9

由于几何模型2的估计效果最好,则基于该模型对四艘舰船未来半年的故障强度进行一定的预测,预测数据见表5。由表5可知,2号、3号舰船的当前故障强度较大,但是3号舰船的增长幅度最大,说明3号舰船的机电系统处于损耗故障期,建议对该舰船机电系统进行预防性维修。

表5 基于几何模型的故障强度预测数据

Tab.5 Forecast data of failure intensity based on geometric model

	1号舰船	2号舰船	3号舰船	4号舰船
当前故障强度	14.356/月	39.849/月	36.681/月	27.167/月
1个月后	14.224/月	40.244/月	37.909/月	27.878/月
2个月后	14.094/月	40.643/月	39.177/月	28.608/月
3个月后	13.965/月	41.047/月	40.488/月	29.356/月
4个月后	13.836/月	41.454/月	41.844/月	30.124/月
5个月后	13.709/月	41.865/月	43.244/月	30.913/月
6个月后	13.584/月	42.280/月	44.691/月	31.721/月
增长幅度	-0.773/月	2.431/月	8.010/月	4.554/月

3 结论

舰船机电系统的使用故障数据通常记录不够完备,难以使用故障间隔时间数据进行分析^[7]。因此,本文采用故障区间数据分析装备的故障发生强度,利用图示法分析故障强度的发展趋势,并基于泊松过程、非齐次泊松过程和几何过程对相关参数进行了估计。拟合结果表明,几何过程所产生的均方误差最小,具有较高的精度。根据当前和未来一段时间的故障强度增长情况的分析,能够为舰船的预防性维修安排提供合理的指导建议。

参考文献 (References)

- [1] 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
CAO Jinhua, CHENG Kan. An introduction to mathematics of reliability [M]. Beijing: Science Press, 1986. (in Chinese)
- [2] 邓永录, 梁之舜. 随机点过程及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
DENG Yonglu, LIANG Zhishun. Stochastic point process and its application [M]. Beijing: Science Press, 1992. (in Chinese)
- [3] 孙进康, 郦正能. 可修复系统故障数据分析模型与方法研究 [J]. 解放军理工大学学报, 2004, 1(2): 57-62.
SUN Jinkang, LI Zhengeng. Analysis model and method of repairable system fault data [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2004, 1(2): 57-62. (in Chinese)
- [4] Jasper L C. The role of NHPP models in the practical analysis of maintenance failure data [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1997, 56(2): 161-168.
- [5] Crow L H. Evaluating the reliability of repairable systems [C]// Proceedings of Reliability and Maintainability Symposium, 1990: 275-279.
- [6] Lam Y. Geometric process and its application [M]. Singapore: World Scientific Publishing, 2007.
- [7] 杨军, 冯振声, 黄考利. 装备智能故障诊断技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 24-25.
YANG Jun, FENG Zhensheng, HUANG Kaoli. Intelligent fault diagnosis technology for equipments [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 24-25. (in Chinese)