

考虑维修的产品可靠性模型研究

张志华¹, 李大伟², 钟强晖³, 梁胜杰⁴

(1. 海军工程大学 科研部, 湖北 武汉 430033; 2. 海军工程大学 兵器工程系, 湖北 武汉 430033;
3. 海军工程大学 装备经济管理学系, 湖北 武汉 430033; 4. 海军 91697 部队, 山东 青岛 266505)

摘要: 维修是保持或者恢复产品技术状态的重要手段。为了掌握定期维修条件下产品的可靠性规律, 从产品失效原因出发, 在充分考虑维修后产品性能退化量变化特点的基础上, 利用复合 Poisson 过程建立了该条件下产品的性能退化规律模型, 进而得到可靠度和失效率指标。通过比较分析维修前后的失效率变化规律, 给出了描述维修效果的解析表达式。以某水泵转子为例, 通过进行数值分析, 验证了该方法不仅能够较好地描述定期维修条件下转子的可靠性规律, 而且还可以准确直观地描述维修效果, 为使用方制定维修策略提供一定的理论依据。

关键词: 应用统计数学; 不完全维修; 状态恢复; 性能退化; 恢复因子

中图分类号: O213; TH17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2014)07-1131-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.07.030

Research on Reliability Model Considering Maintenance

ZHANG Zhi-hua¹, LI Da-wei², ZHONG Qiang-hui³, LIANG Sheng-jie⁴

(1. Office of Research and Development, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China;

2. Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China;

3. Department of Equipment Economics and Management, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China;

4. 91697 PLA Troops, Qingdao 266505, Shandong, China)

Abstract: Maintenance is a good means to retain or recover the product state. In order to understand the reliability law of products under the condition of periodic maintenance, a performance deterioration rule model is established based on the composite Poisson process. In the model, the failure mechanism and the product deterioration character are fully considered in the case of periodic maintenance. The model can be used to determine the reliability and failure rate. An analytical expression, which can specify the maintenance effect, is presented by analyzing the change law of failure rate. The model can exactly describe the reliability law of product by taking the pump rotor for example. It also can portray the maintenance effect more objectively and intuitively.

Key words: applied statistical mathematics; imperfect maintenance; state recovery; performance deterioration; recovery factor

0 引言

通过定期对产品进行维修可以恢复其性能状

态, 不仅保证产品以较好的状态继续工作, 而且还能够延缓可靠性下降速度, 起到延长使用时间的作用^[1]。实际工程中, 许多产品都会进行维修, 比如

收稿日期: 2013-05-07

基金项目: 总装备部预先研究项目(51327020105_51304010206)

作者简介: 张志华(1965—), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: zzh_li@sina.com;

李大伟(1985—), 男, 博士研究生。E-mail: ldw1198@126.com

水雷武器定期进行壳体补漆、对电缆涂滑石粉,航空发动机的调校,道路日常保养等^[2-3]。鉴于维修的重要性 and 广泛应用性,开展其相关研究,以掌握维修对产品使用可靠性的影响规律,对合理制定维修策略,降低维修费用,提高任务成功性有着重要意义。

在产品使用过程中,部分维修手段较为有限,比如润滑、擦拭和校准等,通常情况下,其维修效果多表现为“不完全维修”,即介于“修复如新”和“修复如旧”之间。针对“不完全维修”的维修效果,国外学者在 20 世纪 80 年代便开展了相关研究,提出了 (p, q) 模型、虚拟寿命、 (α, β) 模型等经典方法^[4]。上述方法主要是在不同的可靠性指标中引入维修参数来描述维修效果,具有描述直观,处理过程简便的优点,被广泛应用于不完全维修策略研究当中^[5-6],但是由于具体的维修参数值往往需要借助专家打分或者工程经验给出,导致该类方法又具有一定的主观性和局限性。因此,部分学者进一步进行研究, Kijima 等从产品的失效原因出发提出了冲击模型^[7],以较为客观的产品性能退化量恢复情况来描述维修效果。该方法认为当退化量恢复到零值便认为产品“修复如新”,而实际中部分维修要求将性能状态恢复到规定的数值(通常可记为零点),比如惯导系统的初始对准、鱼雷标校等^[8]情况,显然利用该方法会夸大维修的作用。按照该研究思路,国内外学者深入研究,提出了如 δ -冲击模型并将其应用到维修策略研究中^[9-11]。由于现有的冲击模型侧重于冲击时刻和冲击类型的微观描述,导致建模过程较为复杂,数学解析表达式较难获得,同时,该类研究也较少从产品自身的性能变化角度进行分析。综上所述,针对维修对产品性能状态的恢复现象,如何建立一个摆脱主观性且可以直观利用数学解析表达式描述其维修效果的模型,进而掌握维修条件下的可靠性规律尚需进一步研究。

本文从产品的失效原因出发,结合维修后其性能退化量变化特点,描述了定期维修条件下的产品性能变化规律。以此为基础,重点分析了该条件下产品的可靠度和失效率变化规律,进而建立了维修效果分析模型。最后以某水泵转子的寿命数据为例,通过开展相关的数值分析,验证并说明了本文方法的准确性和适用性。

1 维修过程描述

产品在使用过程中会受到外界因素(如应力、温度、湿度等)的影响,这些影响因素与产品自身共

同作用便会引起性能状态的微小变化^[12]。随着使用时间的增加,因共同作用造成的产品性能退化量会逐渐增加,当超过某一规定值 L_s 时便认为产品发生失效。该变化过程如图 1 所示,其中横轴表示时间,纵轴表示产品的性能退化量。

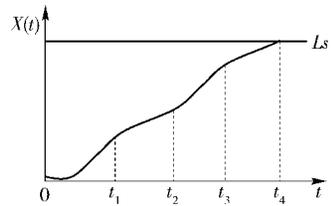


图 1 产品的性能退化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of product performance degradation

图 1 表示产品在没有任何维修手段干预情况下的性能退化现象。一般情况下,产品的性能退化量可认为是时间的连续单调非减函数。

对于要求定期维修的部分产品而言,在实际使用过程中,每隔一定周期 Δt 会将产品的性能退化量恢复到规定值(通常可记为零值)^[8],使产品以较好的性能状态继续工作。此时,产品的性能变化过程如图 2 所示。

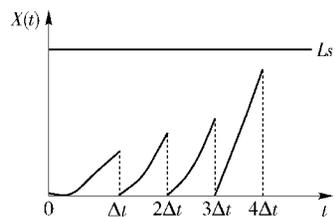


图 2 定期维修条件下产品的性能退化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of product performance degradation under the condition of periodic maintenance

由图 2 可以发现,由于定期进行维修,产品的性能退化量被恢复到零点,导致退化量变化具有间断性。同时,随着维修次数的增加,产品性能退化速度逐渐加快,增幅变大,而当工作到一定时刻后,性能退化量会急速变化,存在一个“爆发期”,如图 2 中 $[3\Delta t, 4\Delta t]$ 之间的性能变化现象。

直观来看,维修效果随次数和时刻的增加而逐渐下降,这与实际情况是比较相符的。根据维修后产品的性能变化特点,如果仅从退化量恢复角度来描述维修效果^[7],很容易认为每次维修后均会使产品“修复如新”,显然这是不合理的。那么,为了直观准确地描述维修效果,需要从失效原因出发,对产品受到外界和自身因素共同作用的规律以及每次作

用后的性能变化规律进行分析。

2 可靠性模型

根据上述分析,结合维修后产品性能退化量的变化特点,建立定期维修条件下产品的可靠性模型。首先,介绍本文所作出的相关假设:

1) 相比较产品的工作时间,外界因素和自身属性共同作用的时间较短,因此,可以忽略每次作用时间。在该前提下,设作用的次数为随机变量且服从非齐次 Poisson 过程,即产品在时间 $[t, t+s]$ 内受到的作用数 $N_{t,t+s}$ 是强度函数为 at^{b-1} 的非齐次 Poisson 过程,即

$$P(N_{t,t+s} = n) = \frac{[a(t+s)^b - at^b]^n}{b^n n!} \exp\left\{-\frac{1}{b}[a(t+s)^b - at^b]\right\}, n = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

式中: a, b 为参数。

2) 每次作用均会对产品的性能状态造成一定的影响,影响程度通常与产品的材料、制造工艺等因素有关。因此,可假设每次作用对产品造成的性能变化量 Y_i 相互独立且服从相同的正态分布,即

$$Y_i \sim N(\mu, \sigma^2), i = 1, 2, \dots, N_{t,t+s}, \quad (2)$$

式中: μ 和 σ 为产品的性能参数。

3) 通常情况下,可认为 $N_{t,t+s}$ 与 Y_i 互相独立。根据上述假设,可以确定在时间 $[t, t+s]$ 内的性能退化量 $X_{t,t+s}$ 为产品在该时间段内每次作用造成的性能变化量 Y_i 的累加和,即满足:

$$X_{t,t+s} = \sum_{i=1}^{N_{t,t+s}} Y_i. \quad (3)$$

显然, $X_{t,t+s}$ 为一个典型的复合 Poisson 过程。进一步分析, $X_{t,t+s}$ 可以看作是 $N_{t,t+s}$ 个正态分布的线性组合,即

$$P(X_{t,t+s} < x) = \sum_{i=1}^{\infty} P(N_{t,t+s} = i) P\left(\sum_{j=1}^i Y_j < x\right). \quad (4)$$

由于 $N_{t,t+s}$ 和 Y_i 都为随机变量,导致上式的解析表达式较为复杂。

根据复合 Poisson 过程的性质,产品在时间 $[t, t+s]$ 内的性能退化量 $X_{t,t+s}$ 的数学期望和方差分别满足:

$$E(X_{t,t+s}) = \frac{a\mu}{b} [(t+s)^b - t^b], \quad (5)$$

$$D(X_{t,t+s}) = \frac{a(\mu^2 + \sigma^2)}{b} [(t+s)^b - t^b]. \quad (6)$$

通过(4)式可以知道产品在时间 $[t, t+s]$ 内的

性能退化量 $X_{t,t+s}$ 为无穷个互相独立的变量累加和。为了方便描述其变化规律,根据中心极限定理可以认为 $X_{t,t+s}$ 近似服从正态分布,即 $X_{t,t+s} \sim N(\mu_{t,t+s}, \sigma^2)$, 式中: $\mu_{t,t+s}$ 和 $\sigma^2_{t,t+s}$ 分别满足 $\mu_{t,t+s} = E(X_{t,t+s})$, $\sigma^2_{t,t+s} = D(X_{t,t+s})$ 。

对于部分维修行为(如调校、润滑和补漆等)而言,其技术手段往往有限,可以认为维修并不改变产品的退化机理,仍保持原有的作用强度继续工作,仅是对性能退化量进行了恢复。那么,结合上述分析,当给定产品维修周期为 Δt 时,可以得到其性能退化量 $X_{(i-1)\Delta t, t}$ 在不同周期内的变化规律为

$$P(X(t) \leq x) = \Phi\left(\frac{x - \mu_{(i-1)\Delta t, t}}{\sigma_{(i-1)\Delta t, t}}\right), \quad t \in ((i-1)\Delta t, i\Delta t], i \in N^+, \quad (7)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布; x 为任意实数。

当掌握了定期维修条件下产品的性能变化规律后,给定失效阈值 L_s , 利用(7)式能够获得任意时刻产品的可靠度函数满足:

$$R(t) = P(X(t) < L_s, X(\Delta t) < L_s, \dots, X(i\Delta t - \Delta t) < L_s) =$$

$$P(X(t) < L_s) \prod_{j=1}^{i-1} P(X(j\Delta t) < L_s) = \Phi\left(\frac{L_s - \mu_{(i-1)\Delta t, t}}{\sigma_{(i-1)\Delta t, t}}\right) \prod_{j=1}^{i-1} \Phi\left(\frac{L_s - \mu_{(j-1)\Delta t, j\Delta t}}{\sigma_{(j-1)\Delta t, j\Delta t}}\right), \quad t \in ((i-1)\Delta t, i\Delta t], i \in N^+. \quad (8)$$

观察(8)式可以发现该条件下产品的可靠度函数为一个条件概率,其数值大小不仅与工作时间 t 、维修周期 Δt 有关,而且与 t 时刻前各维修周期内产品不发生失效的概率密切相关。通过选取适宜的维修周期 Δt , 维修可以将各维修周期内产品不发生失效的概率控制在一个相对较高的水平。同时,维修后产品的性能状态得到恢复,推迟了退化量到达失效阈值的时间。因此,维修延缓了可靠度随时间增加而降低的速度,进而延长了产品的使用时间。

为了说明利用正态分布近似定期维修条件下产品性能变化规律的合理性,在给定相关性能参数和维修周期的情况下,利用数值仿真大量模拟产品的使用过程以获得各维修时刻的可靠度值,然后采用本文方法(8)式确定可靠度解析值,将二者进行对比,得到结果如图3所示。

由图3可知,两种方法获得的各维修时刻产品的可靠度近似相等,说明利用正态分布近似产品的性能变化规律具有较好的精度。

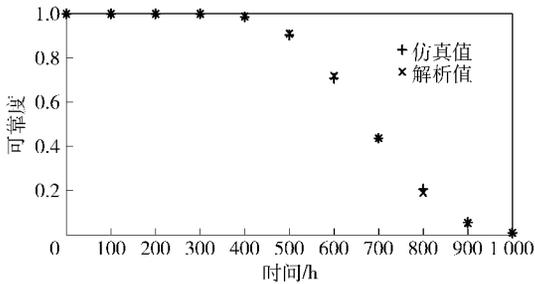


图3 可靠度对比图

Fig. 3 Comparison of simulation and calculated reliabilities

3 维修效果分析

为了更加直观地分析维修效果,对维修前后的产品失效率变化规律进行分析。根据失效率的定义,可以得到产品任意时刻失效率 $\lambda(t)$ 满足:

$$\lambda(t) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \varepsilon)}{R(t)\varepsilon}. \quad (9)$$

根据上文分析,产品性能退化规律(7)式的分布参数 $\mu_{t,t+\varepsilon}$ 和 $\sigma_{t,t+\varepsilon}^2$ 为时变参数且形式较为复杂,导致上极限式较难求解。同时,由于维修的影响,对于任意维修时刻 $i\Delta t$,上极限式左右极限并不相等,导致其并不是时间的连续函数。以上均给准确描述定期维修条件下产品的失效率函数造成了一定的困难。

为了方便且更直观地描述维修过程的产品失效率规律,可以取各维修周期内可靠度的变化均值定义失效率,即取 $\varepsilon = \Delta t$ 。此时,产品的失效率满足:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t}. \quad (10)$$

根据工程定义,上式可以表示若产品工作到时刻 t 仍然正常,则其在时间 $(t, t + \Delta t]$ 内单位时间发生失效的比例。那么,可以获得产品在任意维修时刻 $i\Delta t$ 的失效率满足:

$$\hat{\lambda}^+(i\Delta t) = \frac{R(i\Delta t) - R(i\Delta t + \Delta t)}{R(i\Delta t)\Delta t} = \frac{1 - \Phi\left(\frac{Ls - \mu_{i\Delta t, (i+1)\Delta t}}{\sigma_{i\Delta t, (i+1)\Delta t}}\right)}{\Delta t}, \quad (11)$$

式中: $\hat{\lambda}^+(\cdot)$ 表示维修后的产品失效率。

如果产品在某维修时刻 $i\Delta t$ 并没有进行维修,则可以获得其失效率满足:

$$\hat{\lambda}^-(i\Delta t) = \frac{R(i\Delta t) - R^-(i\Delta t + \Delta t)}{R(i\Delta t)\Delta t} = \frac{1 - \Phi\left(\frac{Ls - \mu_{(i-1)\Delta t, (i+1)\Delta t}}{\sigma_{(i-1)\Delta t, (i+1)\Delta t}}\right)}{\Delta t}, \quad (12)$$

式中: $R^-(i\Delta t + \Delta t)$ 表示产品 $i\Delta t$ 时刻没有进行维修继续工作到 $i\Delta t + \Delta t$ 时刻的可靠度。

比较(11)式和(12)式,可以发现当产品进行维修后,失效率会有所下降,即 $\hat{\lambda}^-(i\Delta t) > \hat{\lambda}^+(i\Delta t)$ 。此时,利用各次维修后产品失效率的恢复因子 α_i 来反映各次维修后的维修效果,即

$$\alpha_i = \frac{\hat{\lambda}^-(i\Delta t) - \hat{\lambda}^+(i\Delta t)}{\hat{\lambda}^-(i\Delta t)}. \quad (13)$$

显然, $\alpha_i \in [0, 1]$ 。特殊的, $\alpha_i = 0$ 说明该次维修使产品“修复如旧”,并没有改变其失效率。相反,对于初始失效率为 0 (即 $\lambda(0) = 0$) 的产品而言, $\alpha_i = 1$ 则说明该次维修使产品“修复如新”,令其失效率降低为 0 值。由于失效率是时间的函数,在不同时刻进行维修恢复因子 α_i 会各不相同,通过比较 α_i 的数值大小便可以掌握产品在任意时刻进行维修所具有的恢复效果。

4 实例分析

4.1 算例分析

针对某型水泵转子而言,在使用过程中会每隔一个周期便对其进行润滑,即定期进行维修。对实际寿命数据进行处理,将各维修时刻未失效产品数除以总产品数记为可靠度试验值,由此得到其可靠性规律。针对该组寿命数据所表现出来的可靠性规律,利用本文方法进行处理。首先,对相关参数进行假设,设该转子受到作用数 $N(t)$ 服从强度函数 $\lambda(t) = 0.21t^{0.75}$ 的非齐次 Poisson 过程,每次作用引起产品的性能变化量 $Y_i \sim N(4.5 \times 10^{-4}, 10^{-8})$ 。基于(8)式,在给定失效阈值为 0.04 和维修周期为 10 d 的情况下,化简得到该转子的可靠度函数满足:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{0.04 - 0.54[t^{1.75} - (10i - 10)^{1.75}]}{1.6 \times 10^{-4}[t^{1.75} - (10i - 10)^{1.75}]^{0.5}}\right) \cdot \prod_{j=1}^{i-1} \Phi\left(\frac{0.04 - 30.36[j^{1.75} - (j-1)^{1.75}]}{11.97 \times 10^{-4}[j^{1.75} - (j-1)^{1.75}]^{0.5}}\right), \quad (14)$$

$$t \in (10i - 10, 10i].$$

将寿命数据表现出来的可靠度规律与利用本文方法获得的可靠度解析值进行比较,具体如图 4 所示。

如图 4 所示,二者在数值上较为接近。从失效过程来看,转子在正常磨损阶段,其磨损率较为稳定,往往较难发生失效。当过了正常磨损阶段后,转子尺寸会发生较大变化,导致失效概率随时间延长而越来越高^[13],可靠度迅速下降。可见转子的磨损失效过程与图 4 描述的变化规律也较为吻合。以上

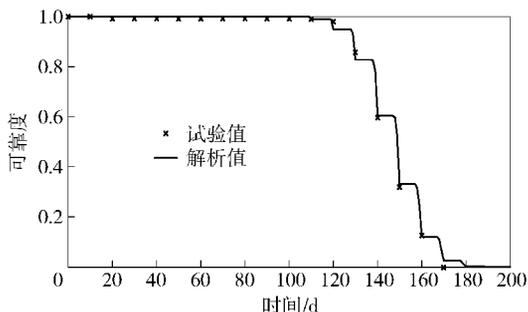


图 4 定期维修条件下转子的可靠度变化图

Fig. 4 Change in reliability of rotor under the condition of periodic maintenance

说明本文方法能够较好地描述该型转子在定期维修条件下的可靠度变化规律。

进一步分析,由于实际数据只能得到转子在各维修时刻的可靠度值,无法反映其在维修周期内的变化趋势。利用本文方法能够弥补其不足,得到转

子任意时刻的可靠度值。观察图 4 可以发现,每次维修后,转子可靠度呈现出先近似保持平稳,而后迅速下降的变化趋势。该现象说明产品维修后的一段时间内发生失效的概率较低,即维修后的可靠度与维修前的近似相等,但是维修效果毕竟有限,随着时间延长,产品的性能退化量会急速变化,导致可靠度急速下降。综上所述,利用本文方法描述出来的可靠度变化规律与直观认识较为相符,能够较好地反映维修是通过延缓可靠性下降速度来对产品产生积极影响的特性。

4.2 失效率恢复因子分析

针对上节研究的算例,利用本文提出的失效率恢复因子进行分析,以便更加直观地反映维修效果。

将相关参数分别代入到(11)式和(12)式,然后将结果代入(13)式计算获得转子在各维修时刻的失效率恢复因子,具体数值见表 1 所示。

表 1 失效率恢复因子表

Tab. 1 Recovery factors of failure rate

维修周期/d	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
恢复因子/%	100	100	100	100	100	100	100	100	99.99	99.89	99.07	95.74	87.38	72.99	54.74	21.97	11.90	5.88

观察表 1,可以发现恢复因子变化过程有两个明显的现象。一个现象是前 10 次的恢复因子近似为 100%,即表示通过维修使转子“修复如新”。而事实上,图 4 中转子前 10 个维修时刻的可靠度也近似为 1,验证了该现象。究其原因:一方面是转子工作时间相对较短,失效率本身就较低,通过维修可以及时降低;另一方面是因为较早的维修自身具有较好的维修效果,对降低转子的失效率有着更为积极的影响。该现象也与实际中“较早的不完全维修可以使产品修复如新”的直观认识较为吻合。另一个现象便是恢复因子随着工作时间和维修次数的增加呈现出下降的趋势,并且下降速度逐渐增快。该现象反映出不完全维修的特性:维修效果会随产品的工作时间和维修次数增加而逐渐降低,符合一般工程经验。

经典不完全维修模型描述维修效果往往需要专家打分主观给出或者建模过程较为复杂,难以获得解析表达式,而本文提出的失效率恢复因子以产品自身的性能退化规律为基础,能够较为客观、直观地描述维修效果。同时,通过本节分析说明该恢复因子能够较为准确地描述维修效果,与实际工程规律较为吻合。

4.3 可靠性指标分析

在产品工作过程中,可靠度会随着使用时间的增加逐渐下降。工程中,使用方往往关心产品可靠度下降到一定程度时所对应的时间,因此,本节将对水泵转子在定期维修条件下的可靠寿命进行研究。

根据可靠寿命的定义^[14]和水泵转子的相关性参数可以得到其可靠寿命,部分数值如表 2 所示。

表 2 可靠寿命表

Tab. 2 Reliability life

可靠度	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70
可靠寿命/d	129.31	129.79	138.60	139.19	139.47

由表 2 可以发现,当可靠度急速下降时,其可靠寿命变化却不大。该现象表明转子可靠度存在一个“拐点”,当工作时间达到一定时刻(如图 4 中所示的[130 d,140 d]),其可靠度会迅速下降。对于转子该类失效类型属于磨损失效的产品而言,该现象合理。该产品一般会有一段平稳的使用期,较难发生失效,当工作到某一临界点后,失效数量会迅速增多^[13]。同时,在该维修周期的安排下,根据可靠寿命,为了防止转子大量发生失效,可以考虑在第 13 个周期便停止维修,采取更换等手段使转子

“修复如新”。

通过开展产品的可靠性指标分析,可以为制定相关的维修策略——优化使用时间和维修费用奠定一定的理论基础。

5 结论

本文重点研究了不完全维修条件下的产品可靠性规律,建立了相应的分析模型,并针对某水泵转子实际数据进行了处理,得到了以下结论:

1) 本文建立的可靠性模型从维修后性能状态变化角度出发,能够较好地描述定期维修条件下产品的可靠度规律,揭示了维修的作用原理——通过延缓可靠性下降速度来延长产品使用时间。

2) 提出的失效率恢复因子能够较为准确直观地描述维修效果,并且能够反映出维修效果随产品工作时间和维修次数逐渐下降的变化规律。

3) 本文的研究内容为制定产品的维修策略奠定了一定的理论基础,便于开展相关分析。

参考文献 (References)

- [1] 中国人民解放军总装备部. GJB 451A—2005 可靠性维修性保障性术语[S]. 北京:中国人民解放军总装备部,2005.
Chinese PLA General Armament Department. GJB 451A—2005 Reliability, maintainability and supportability terms[S]. Beijing: Chinese PLA General Armament Department, 2005. (in Chinese)
- [2] Zhang X Q, Gao H. Determining an optimal maintenance period for infrastructure systems[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2012, 27(7):543–554.
- [3] Rangel-Ramirez J G, Sorensen J D. Risk-based inspection planning optimisation of offshore wind turbines[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2012, 8(5): 473–481.
- [4] Pham H, Wang H Z. Imperfect maintenance[J]. European Journal of Operational Research, 1996,94: 425–438.
- [5] Shen S H, Lin Y B, Liao G L. Optimum policies for a system with general imperfect maintenance[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006,91:362–369.
- [6] Cassady C R, Iyooob I M, Schneider K, et al. A generic model of equipment availability under imperfect maintenance [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005,54(4):564–571.
- [7] Kijima M, Nakagawa T. Accumulative damage shock model with imperfect preventive maintenance[J]. Naval Research Logistics, 1991, 38:145–156.
- [8] 郑梓祯,刘德耀,蔡迎波,等. 船用惯性导航系统海上试验[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
ZHENG Zi-zhen, LIU De-yao, CAI Ying-bo, et al. Sea experiment for marine inertial navigation system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [9] Lam Y, Zhang Y L. A shock model for the maintenance problem of a repairable system [J]. Computers and Operations Research, 2004, (31):1807–1820.
- [10] Tang Y Y, Lam Y. A δ -shock maintenance model for a deteriorating system[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 168(12):541–556.
- [11] 王小林,程志君,郭波,等. 基于冲击模型劣化系统的不完全维修决策[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(12):2380–2386.
WANG Xiao-lin, CHENG Zhi-jun, GUO Bo, et al. Imperfect maintenance decision for a deteriorating system based on shock model [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(12):2380–2386. (in Chinese)
- [12] Hsieh M H, Jeng S L, Shen P S. Assessing device reliability based on scheduled discrete degradation measurements[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2009, 24: 151–158.
- [13] 张栋,钟培道,陶春虎,等. 失效分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2008:229–231.
ZHANG Dong, ZHONG Pei-dao, TAO Chun-hu, et al. Failure analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 229–231. (in Chinese)
- [14] 张志华. 可靠性理论与工程应用[M]. 北京:科学出版社, 2012:9–11.
ZHANG Zhi-hua. Reliability theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2012:9–11. (in Chinese)