

基于半马氏决策过程的电容器维修策略优化*

金光,肖磊,厉海涛

(国防科技大学 信息系统与管理学院,湖南 长沙 410073)

摘要:针对电容器随机劣化失效的特点,采用半马氏决策过程解决其预防性维修方案设计和维修策略优化问题。在电容器随机劣化的 Gaussian-Poisson 模型基础上,以检测周期为优化变量,同时考虑预防性维修次数阈值的影响,建立电容器长期运行费用率优化模型。分析表明,对该型号电容器来说,预防性维修相比于事后修理更加有利于节省部件长期运行的费用率。

关键词:维修策略;预防性维修;半马氏决策过程;电容器

中图分类号:TP391.9 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2012)01-0078-04

The optimization of capacitor maintenance strategy based on semi-Markov decision process

JIN Guang, XIAO Lei, LI Haitao

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the characteristics of capacitor's stochastic deterioration, the research studied the scheme design and strategy optimization problem of its preventive maintenance based on semi-Markov process. Taking the inspecting time as optimization variable and considering the threshold of preventive maintenance times, the research built the long-run expense rate optimizing model of the capacitor based on the Gaussian-Poisson process model of its stochastic deterioration. The analysis shows that for the capacitors preventive maintenance is superior to posterior replacement in the saving of long-run expense rate.

Key word: maintenance strategy; preventive maintenance; semi-Markov decision process; capacitor

某激光装置能源组件是其能源系统最重要的部分,要求在预定时间内以脉冲形式,为片状放大器系统氙灯组提供能量。主储能电容器是能源组件的关键部件,属典型的随机劣化产品,即不仅存在因多次充放电导致的薄膜“击穿—自愈”的性能退化失效,也存在过高电流导致的突发失效。根据能源组件可用性设计要求,需要制定科学的维修方案,确保电容器的性能和可靠性始终满足其任务要求。

视情维修是在对系统或设备进行状态检测和诊断的基础上,根据系统劣化情况或“健康”水平,对维修项目进行安排的维修策略。与传统的时候维修和定时维修相比,具有更好的经济性,得到广泛研究。Newby 等^[1]针对带漂移参数的 Wiener 过程,以平均费用和寿命周期费用为基础,考虑协变量和不完全检测和修复的影响,给出状态监测、预防性维修和修复性维修下相关指标表示。Tan 等^[2]采用 Markov 过程描述系统状态变化,提出多状态系统预防性维修调度框架。

van Noortwijk^[3]综述了采用 Gamma 过程描述的随机劣化系统最优检测时间和维修决策问题。Barker 等^[4]研究多元 Wiener 退化模型下系统最优检测问题,以退化过程的泛函作为决策变量,以平均费用作为决策变量。Jardine 等^[5]在 Lévy 过程下研究随机劣化产品维修决策建模问题。程志君^[6]采用 Gamma 过程描述电容器的随机劣化,并基于 Markov 决策过程研究检测间隔时间、预防性维修阈值与电容器长期运行平均费用率之间的关系。可以看出,目前的研究一般针对已有退化模型如 Wiener 过程、Gamma 过程、Lévy 过程等,缺乏根据对象劣化机理的有针对性的研究。比如,电容器试验数据分析表明,其劣化是缓慢退化和突发失效两种机理综合作用的结果,采用 Gamma 过程是不适合的。针对上述问题,本文在电容器性能劣化的 Gaussian-Poisson 过程模型基础上,建立其维修决策的半 Markov 决策过程,在此基础上提出其维修决策方案。实例分析结果表明,本文给出的维修方案是合理的,符合工程实际情况。

* 收稿日期:2011-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71071158);国家部委资助项目

作者简介:金光(1973-),男,河北抚宁人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:kingbayes@21cn.com

1 电容器随机劣化过程建模

能源组件储能部件采用高密度的金属化膜脉冲电容器, 该部件是由两张单面涂层厚约 20 ~ 100nm 的铝合金有机膜绕卷而成。由于膜在生产过程中不可避免地存在带有杂质或缺陷, 在外界电压不断作用下, 这些区域会因放电而使局部击穿, 击穿电流使击穿点周围的金属膜迅速蒸发, 向外扩散并使绝缘恢复, 其结果是清除了短路, 即“自愈”。对一般电容器, 介质击穿会因电容器的短路而报废。而对于金属化膜电容器, 一次的“自愈”仅使电容量发生微量减少, 数千次的“自愈”才导致电容量较明显地减少。

对某国产金属化膜脉冲电容器进行充放电试验, 每隔 1000 次充放电测量一次电容器的电容量, 试验样品数为 8, 如图 1 所示。可以发现, 电容器的电容量将随着电容器充电次数的增加而逐渐劣化, 并最终发生故障而失效; 同时由于外界应力环境的影响, 电容器也可能发生突发失效, 因此电容器劣化模型中将同时考虑性能退化和突发失效两种情况。

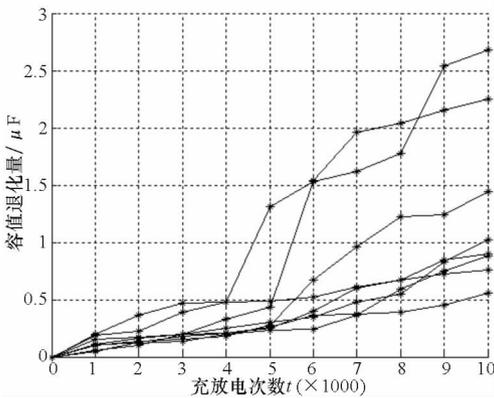


图 1 容值变化曲线

Fig. 1 Change curve of capacitor capacity

由电容器容值性能变化数据, 可设电容器在单位时间 Δt 内的性能退化 $X(\Delta t)$ 服从均值为 μ , 标准差为 σ 的正态分布, 而在单位时间 Δt 内发生突发耗损的次数服从均值为 λ 的泊松分布, 并且每次突发耗损的退化量为 β 。设电容器工作时间 t 后的容值损耗量为 $Z(t)$, 则

$$Z(t) = X(t) + Y(t)$$

其中 $X(t)$ 为累积退化耗损量, $Y(t)$ 为累积突发耗损量。由电容器试验过程中积累的数据, 利用矩估计方法可得到参数的估计值如下^[7]:

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= 0.08843, \hat{\sigma} = 0.06579, \\ \hat{\lambda} &= 0.062742, \hat{\beta} = 0.68728. \end{aligned}$$

2 基于半 Markov 决策过程的视情维修决策模型

2.1 维修策略描述

考虑周期性检测下金属化膜脉冲电容器的预防性维修策略, 维修过程中可能采取的行为包括周期性检测、预防性维修和修复性维修三种。以 $R_{i,j}(T, N, a)$ 描述维修策略, 其中的参数含义如下:

(1) 采用周期性检测, T 为检测间隔周期; 认为部件相关状态可通过检测获知, 且检测结果完全反映部件的工作状态, 同时不经检查可立即发现部件失效状态。设劣化状态 a 平均检测时间为 u_a , 平均检测费用为 c_a 。部件在维修或检测时将停止工作, 但其在停机时间内不会继续发生劣化, 同时停机会造成一定的损失。假设 s 为单位停机时间损失, o_s 为单位时间运行费用。

(2) N 表示部件最大预防性维修次数, 指针部件进行的预防性维修次数达到 N 时, 将不再对其进行预防性维修而直接进行更换。

(3) i 和 j 分别表示预防性维修和预防性更换的阈值, 记作 (i, j) 。

(4) 任意检测完成时刻 E_a^m , 其中 m 表示该时刻以前已经进行 m 次预防性维修, a 表示检测时获得的部件劣化水平, 则对部件可能采取的维修行为按如下规则实施:

- 当 $a \leq i - 1$ 或者 $i \leq a \leq j - 1, m = N$ 时, 不采取任何维修行为;

- 当 $i \leq a \leq j - 1$ 且 $m < N$ 时, 进行预防性维修, 使其劣化水平以概率 $\alpha_{a,r}$ 从 a 恢复到 r , 其中 $1 \leq r \leq i - 1$, 并且 $\sum_{r=1}^{i-1} \alpha_{a,r} = 1$, 预防性维修的时间和费用分别为 $t_{a,r}$ 和 $c_{a,r}$;

- 当 $j \leq a \leq L$ 时, 进行预防性更换, 平均时间和费用分别为 U_a 和 C_a 。

2.2 维修决策过程模型

用半马氏决策过程描述电容器维修决策过程。半马氏决策过程为如下六元组^[8]:

$$\{S, A(i), p_{ij}(a), T(\cdot | i, j, a), r(u, i, a, j, t), V, i, j \in S, a \in A(i)\}$$

其中 $S = \{0, 1, 2, \dots, L\}$ 为模型状态空间; $A(i) = \{(I_a, R_{i,j}(T, N, a))\}$ 为状态 i 的决策行动集, 其中 I_a 为维修因子; $p_{ij}(a)$ 表示在某个决策点处于状态 i , 采取行动 a 时, 下一个决策时刻系统处于状态 j 的概率; $T(\cdot | i, j, a)$ 为采取行动 a 的条件

下,由状态 i 转移到状态 j 的时间分布; $r(u, i, a, j, t)$ 为由状态 i 转移到状态 j , 且转移时间为 t 的条件下,系统在时间 $[0, u]$ ($u \leq t$) 内获得的报酬; V 为准则函数或目标函数,可以分为期望总报酬和平均报酬等多种。进一步设任意时刻 t 状态转移概率为 $\delta_{a,b}(t)$, 这可通过 Chapman-Kolmogorov 方程求得,这里直接给出计算方程:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\delta_{a,a}(t) = -\lambda_a\delta_{a,a}(t), & 0 \leq a \leq L-1 \\ \frac{d}{dt}\delta_{a,b}(t) = -\lambda_b\delta_{a,b}(t) + \rho_{b-1}\delta_{a,b-1}(t), & 0 \leq a < b \leq L-1 \\ \frac{d}{dt}\delta_{a,L}(t) = \sum_{k=a}^{L-1} \theta_k\delta_{a,k}(t), & 0 \leq a \leq L-1 \end{cases} \quad (1)$$

下面研究维修策略对长期费用率的影响。首先,时间 $[0, T]$ 内的长期费用率为^[9]

$$\sigma(T) = \psi_0^0(T|a) / \omega_0^0(T|a)$$

其中 $\omega_0^0(T|a)$ 和 $\psi_0^0(T|a)$ 分别表示从开始时刻到下一次更换完成的平均时间和平均费用,其结果可由式(2)得到

$$\omega_a^m(T|a) = \begin{cases} U_a, & a \geq j \\ \sum_{r=1}^{i-1} \alpha_{a,r}(t_{a,r} + \omega_r^{m+1}(T|a)), & i \leq a < j, m < N \\ \sum_{b=a}^{L-1} \delta_{a,b}(T)[T + u_b + \omega_b^m(T|a)] \\ + \delta_{a,L}(T)[T - Q_{a,L,L}(T) + \omega_b^m(T|a)], & i \leq a < j, m = N \text{ or } a < i \end{cases} \quad (2)$$

其中 $Q_{a,k,b}$ 为时间 $[0, T]$ 内部件处于状态 k 的平均时间, a, b 为允许的状态取值范围,其表达式如式(3)所示:

$$Q_{a,k,b} = \int_0^T E(I_{a,k,b}(t)) dt = \int_0^T \frac{\delta_{a,k}(t)\delta_{k,b}(T-t)}{\delta_{a,b}(T)} dt \quad (3)$$

而检测完成时刻 E_a^m 到下一次更换完成的平均费用^[10] 如公式(4)所示:

$$\psi_a^m(T|a) = \begin{cases} s \times U_a + C_a, & a \geq j \\ \sum_{r=1}^{i-1} \alpha_{a,r}(s \times t_{a,r} + c_{a,r} + \psi_r^{m+1}(T|a)), & i \leq a < j, m < N \\ \sum_{b=a}^{L-1} \delta_{a,b}(T)[(\sum_{k=a}^b Q_{a,k,b}(T) \times o_k) + u_b \times s + c_b + \psi_b^m(T|a)] \\ + \delta_{a,L}(T)[(\sum_{k=a}^{L-1} Q_{a,k,L}(T) \times o_k) + \psi_b^m(T|a)], & i \leq a < j, m = N \text{ or } a < i \end{cases} \quad (4)$$

维修决策优化的目标是寻找最优维修策略 $R_{i,j}(T, N, a)$ 。可知存在两类特殊的维修策略 $R_{i,j}(0, N, a)$ 和 $R_{i,j}(\infty, N, a)$, 前者对应于部件的实时监控,后者表示对部件不进行检测而是待其

失效后进行修复性维修^[11]。设这两种维修策略对应的平均时间和平均费用分别为 $\omega_a^m(0|a)$ 、 $\psi_a^m(0|a)$ 以及 $\omega_a^m(\infty|a)$ 、 $\psi_a^m(\infty|a)$, 容易证明

$$0 \leq \sigma(T) \leq \min\{\sigma(0), \sigma(\infty)\}$$

于是存在最优检测时间 T^* , 使得 $T^* = \arg \inf_{T \in [0, \infty]} \sigma(T)$ 。 T^* 可用搜索算法和仿真方法求解^[9]。

3 电容器维修决策过程分析

首先,以电容器容值损失超过 5% 作为失效阈值,以区间 $[0, 0.1)$, $[0.1, 0.46)$, $[0.46, 1.3)$, $[1.3, 2.8)$, $[2.8, \infty)$ 划分容值范围并定义对应的劣化水平 $a(0 \leq a \leq 4)$, 利用电容器性能劣化的 Gaussian-Poisson 过程模型,获得近似的离散状态劣化过程模型转移概率矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} 0.2593 & 0.6448 & 0.0585 & 0.0018 & 0 \\ 0.0126 & 0.6802 & 0.3043 & 0.0030 & 0.001 \\ 0 & 0.0061 & 0.8540 & 0.1402 & 0.001 \\ 0 & 0 & 0.0033 & 0.8950 & 0.1015 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

其次,电容器维修决策过程模型中维修和费用等参数如下:

(1) 修复性维修费用: $U_a = (a + 1) \times 10$, $C_a = (a + 1)^3 \times 10^2 (0 \leq a \leq 4)$;

(2) 检测费用: 当 $0 \leq a \leq 3$ 时: $u_a = 1, c_a = 10$; 当 $a = 4$ 时, $u_a = c_a = 0$;

(3) 运行费用: 当 $1 \leq a \leq 3$ 时, $o_a = a^2 \times 10$, 并且 $o_0 = o_4 = 0$;

(4) 单位时间平均检测费用 $v = 8$, 单位时间平均延迟费用 $s = 100$;

(5) 预防性维修时间和费用参数: 阈值 $(i, j) = (2, 3)$ 时, $t_{2,1} = 1, c_{2,1} = 10, \alpha_{2,1} = 1$;

阈值 $(i, j) = (2, 4)$ 时, $t_{2,1} = 1, c_{2,1} = 10, \alpha_{2,1} = 1; t_{3,1} = 2, c_{3,1} = 20, \alpha_{3,1} = 1$;

阈值 $(i, j) = (3, 4)$ 时, $t_{3,1} = 2, c_{3,1} = 20, \alpha_{3,1} = 0.5; t_{3,2} = 1, c_{3,2} = 10, \alpha_{3,2} = 0.5$ 。

利用仿真方法对模型进行求解,得到维修次数阈值 $N = 1, 2$ 的条件下,不同预防性维修策略下长期运行费用率,如表 1 和图 2 所示。

表 1 长期运行费用率优化计算结果

Tab.1 Optimization calculation result of long-term running cost rate

		$\sigma(0)$	$\sigma(\infty)$	$\sigma(T^*)$	T^*
$N=1$	$R_{2,3}(T, N, a)$	95.7144	107.4258	72.6	9.2
	$R_{2,4}(T, N, a)$	299.5248	107.4252	80.4	8.1
	$R_{3,4}(T, N, a)$	250.3567	107.4176	82.6	13.7
$N=2$	$R_{2,3}(T, N, a)$	94.2758	107.4315	69.3	8.6
	$R_{2,4}(T, N, a)$	290.9663	107.4258	74.2	7.4
	$R_{3,4}(T, N, a)$	260.4756	107.4258	76.3	11.8

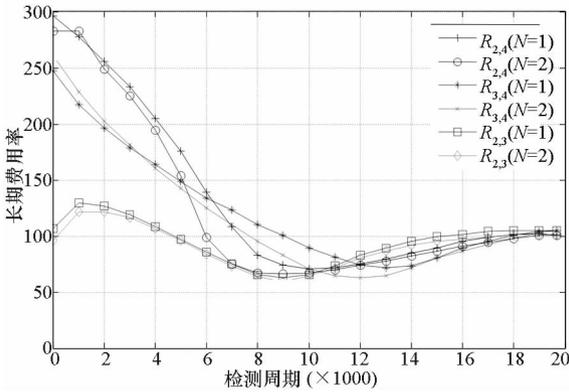


图 2 各种维修策略下检测周期与部件长期费用率关系

Fig.2 Relation between inspection period and long-term running cost rate based on different maintenance strategies

根据表 1 和图 2 结果,可以得出以下结论:

(1) 由表 1 可以看出,当电容器的检测周期 T 趋向无穷时,无论采取何种维修策略,部件长期费用率均收敛于 107.4258 (¥/1000 次)。由分析可知,检测周期 T 趋向无穷时,也就意味着部件仅存在修复性维修,因此从一定程度上证明了仿真结果的可信性。

(2) 从图 2 中可以看出,当电容器预防性维修最大次数 $N=2$ 时,部件长期运行费用率一般均要低于电容器预防性维修最大次数 $N=1$ 时的长期运行费用率。因此可以得出,预防性维修相比于更换来说将更加有利于节省部件长期运行的费用率。

(3) 当采取维修策略 $R_{2,3}(T, N, a)$ 时,即预防性维修阈值为 2,预防性更换阈值为 3 时,部件长期运行费用率可以达到最优。

(4) 需要注意的是,由图 2 可以看出, $R_{2,3}(T, N, a)$ 策略下部件长期费用率与检测周期并不是传统的“下降,上升”的过程,而是“先上升,然后下降,再上升”的过程。根据电容器劣化水平的马尔可夫过程模型分析可以得出,电容器处于劣化水平 2 和 3 的时间相比于其他劣化水平情况下

要长得多,若检测周期过短,势必增加预防性更换的次数和费用,从而导致在维修策略 $R_{2,3}(T, N, a)$ 下部件长期运行费用开始时存在有上升趋势的原因。

4 结 论

在电容器维修策略优化方面,提出了一种基于半马氏决策过程的方法,该方法充分考虑了电容器退化失效和突发失效两种失效类型,给出了维修策略的三种行为:维修检测、预防性维修和修复性维修之间的一种优化方法,并解决了某型电容器产品的维修决策问题。论文提出的模型和方法可用于具有类似特性产品的维修策略优化问题。

参考文献 (References)

- [1] Newby M J, Barker C T. A bivariate process model for maintenance and inspection planning [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2006, 83(4): 270-275.
- [2] Tan C M, Raghavan N. A framework to practical predictive maintenance modeling for multi-state systems [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93(8): 1138-1150.
- [3] Van Noortwijk J M. A survey of the application of gamma processes in maintenance [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2009, 94(1): 2-21.
- [4] Barker C T, Newby M J. Optimal non-periodic inspection for a multivariate degradation model [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2009, 94(1): 33-43.
- [5] Jardine A K S, Banjevic D, Wiseman M, et al. Optimizing a mine haul truck wheel motors' condition monitoring program: Use of proportional hazards modeling [J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2001, 7(4): 286-301.
- [6] 程志君. 多部件系统视情维修决策技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
CHENG Zhijun. Condition-based maintenance decision making techniques for multi-component system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [7] 孙权. 神光 III 装置可靠性研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
SUN Quan. Reliability study for SG-III facility [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [8] Mercier S B. A preventive maintenance policy with sequential checking procedure for a Markov deteriorating system [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 142(3): 548-576.
- [9] 肖磊. 劣化系统维修决策建模与仿真方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
XIAO Lei. Research on maintenance decision modeling and simulation of deteriorating system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [10] Chen D, Trivedi K. Optimization for condition-based maintenance with semi-Markov decision process [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 90(1): 25-29.
- [11] Chiang J H, Yuan J. Optimal maintenance policy for a Markovian system under periodic inspection [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 71(2): 165-172.