

考虑预防性维修的ADC效能评估模型

鲍 鸣^{1,2}, 戴跃伟¹, 孔建寿¹, 邹 云¹

(1. 南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094; 2. 无锡市轨道交通发展有限公司, 江苏 无锡 214035)

摘要: 根据预防性可修复系统的特点, 利用离散可修复模型来分析预防性维修下的系统效能. 通过对单部件可修系统状态转移方程的分析, 获得了考虑预防性修复策略下的系统可信赖度 D . 通过对系统可用度 A 、可信赖度 D 和能力 C 的综合, 可以获得预防性维修下的系统效能评价. 数值算例说明了该评估模型有助于选择合适的预防性修复周期, 提高系统的效能.

关键词: ADC效能评估方法; 可信赖度; 离散可修复系统; 预防性修复

中图分类号: TP202+.1 **文献标识码:** A

ADC-effectiveness-evaluation model with preventive maintenance

BAO Ming^{1,2}, DAI Yue-wei¹, KONG Jian-shou¹, ZOU Yun¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China;

2. Wuxi Rail Transportation Development Co., Ltd, Wuxi Jiangsu 214035, China)

Abstract: For the repairable system with preventive maintenance, this article uses the discrete-time repairable model to discuss the system effectiveness with preventive maintenance. By analyzing the state transition equation of a single-component repairable system, we derive the dependability D with preventive maintenance. The effectiveness-evaluation model of the system with preventive maintenance is obtained by integrating the availability A , the dependability D and the capacity C . Numerical examples illustrate that this effectiveness-evaluation model with preventive maintenance is advantageous for selecting the appropriate preventive repair-cycle to improve the system performance.

Key words: ADC-effectiveness-evaluation model; dependability D ; discrete-time repairable system; preventive maintenance

1 引言(Introduction)

ADC效能评估方法是由美国工业界武器系统效能委员会(weapon system effectiveness industry advisory committee, WSEIAC)提出来的评价系统效能的模型和方法. 该效能评估方法通过对系统可用度 A (availability)、可信赖度 D (dependability)和能力 C (capability)3个指标的定义与分析, 综合成一个描述系统效能的单一效能度量.

系统维修性策略对于保障系统效能有着极其重要的作用, 维修策略包括了预防性维修、修复性维修等. 预防性维修是指为了保持系统规定功能, 防止系统性能退化而按照事先规定的计划或目标进行的维修, 通常又叫做事先维修. 但是在以往的ADC评估模型研究中, 不论是针对ADC效能评估模型的理论研究^[1], 还是应用ADC效能评估方法进行的系统效能分析^[2~7], 一般都是在马尔科夫假设条件^[7]下进行评估研究的, 即只考虑系统故障率和修复率服

从指数分布的情况, 具有比较严格的约束条件. 而且并未考虑到系统工作期间存在预防性维修对系统效能的影响, 不利于研究更一般条件下的预防性维修对系统效能的影响. 所以传统的ADC效能评估模型不够全面, 有必要在更一般条件下, 即分布函数为一般的概率分布, 考虑预防性维修存在情况, 对传统ADC评估模型进行改进, 拓宽模型的使用范围.

2 ADC效能评估方法简介(Introduction of ADC effectiveness evaluation model)

系统效能ADC评估方法是由美国工业界武器系统效能委员会(WSEIAC)提出来的评价系统效能的方法, 其表达式为:

$$S = A \times D \times C, \quad (1)$$

A , D , C 分别表示为系统的可用度、可信赖度和能力度量, 如文献[7]所示.

可用度 A : 是系统备用程度的度量. 可用度

$$\{Z(k) = Z(k-1) = 0, Z(k-2) \neq 0\} + \dots + \{Z(k) = Z(k-1) = \dots = Z(0) = 0\}, \quad (5)$$

所以

$$P\{Z(k) = 0\} = \sum_{j=0}^k P_0(k, j) = \sum_{j=0}^{T_0} P_0(k, j), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &\{Z(k) = 1\} = \\ &\{Z(k) = 1, Z(k-1) = 0\} + \\ &\{Z(k) = Z(k-1) = 1, Z(k-2) = 0\} + \dots + \\ &\{Z(k) = Z(k-1) = \dots = Z(0) = 1\}, \end{aligned} \quad (7)$$

所以

$$P\{Z(k) = 1\} = \sum_{j=0}^k P_1(k, j), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} &\{Z(k) = 2\} = \\ &\{Z(k) = 2, Z(k-1) = 0\} + \\ &\{Z(k) = Z(k-1) = 2, Z(k-2) = 0\} + \dots + \\ &\{Z(k) = Z(k-1) = \dots = Z(0) = 2\}, \end{aligned} \quad (9)$$

所以

$$P\{Z(k) = 2\} = \sum_{j=0}^k P_2(k, j). \quad (10)$$

因此, 根据离散型可修系统可信赖度矩阵的描述和式(6)(8)(10)的结果, 可以得到:

$$\begin{cases} P_0(0, 0) = 1, P_1(0, 0) = P_2(0, 0) = 0, \\ d_{00} = P\{Z(k) = 0 \mid Z(0) = 0\} = \\ \quad \sum_{j=0}^k P_0(k, j) = \sum_{j=0}^{T_0} P_0(k, j), \\ d_{01} = P\{Z(k) = 1 \mid Z(0) = 0\} = \sum_{j=0}^{k-1} P_1(k, j), \\ d_{02} = P\{Z(k) = 2 \mid Z(0) = 0\} = \sum_{j=0}^{k-1} P_2(k, j), \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_1(0, 0) = 1, P_0(0, 0) = P_2(0, 0) = 0, \\ d_{10} = P\{Z(k) = 0 \mid Z(0) = 1\} = \\ \quad \sum_{j=0}^{k-1} P_0(k, j) = \sum_{j=0}^{T_0} P_0(k, j), \\ d_{11} = P\{Z(k) = 1 \mid Z(0) = 1\} = \sum_{j=0}^k P_1(k, j), \\ d_{12} = P\{Z(k) = 2 \mid Z(0) = 1\} = \sum_{j=0}^{k-1} P_2(k, j), \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_2(0, 0) = 1, P_0(0, 0) = P_1(0, 0) = 0, \\ d_{20} = P\{Z(k) = 0 \mid Z(0) = 2\} = \\ \quad \sum_{j=0}^{k-1} P_0(k, j) = \sum_{j=0}^{T_0} P_0(k, j), \\ d_{21} = P\{Z(k) = 1 \mid Z(0) = 2\} = \sum_{j=0}^{k-1} P_1(k, j), \\ d_{22} = P\{Z(k) = 2 \mid Z(0) = 2\} = \sum_{j=0}^k P_2(k, j). \end{cases} \quad (13)$$

3.3 预防性维修下ADC效能评估步骤(The evaluation steps of ADC model with preventive maintenance)

可用度A:

可用度是系统备用程度的度量^[7], 一般可以由系统备用条件下的平均故障间隔时间MTBF和平均修复时间MTTR来确定. 因此, 根据预防性维修下状态的定义可得可用度向量 $A = [a_0 \ a_1 \ a_2]$:

$$\begin{aligned} a_0 &= P(Z(0) = 0) = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}, \\ a_1 &= P(Z(0) = 1) = \frac{\text{MTTR}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}, \\ a_2 &= P(Z(0) = 2) = 0. \end{aligned}$$

可信赖度D:

可信赖度反映的是系统工作期间由于物理故障而引起的系统性能退化的频度. 在考虑预防性维修下系统效能评估中, 可信赖度可以由式(11)~(13)计算获得.

能力度量C:

能力度量C的计算是一项复杂的系统工程问题, 涉及到系统的组成、性能和任务. 因此, 可以综合考虑影响系统效能的若干性能指标, 采用品质效用函数的方法来获得系统的能力度量.

根据实际系统的性能, 组成和任务, 可以得到 m 个影响系统效能的性能指标 $Q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_m]$. 这些性能指标对系统生存能力作用的重要程度并不完全相同, 可以用不同的指标权重来区分, 设其权重为 $W = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_m]$. 借助模糊数学的方法, 根据每个评估指标的特点, 通过建立各项指标的隶属函数, 可以求得性能指标的隶属度 $\mu = [\mu_1 \ \mu_2 \ \dots \ \mu_m]$. 最后采用加权和法得到系统的能力度量C为 $C = \sum_{i=1}^m w_i \times \mu_i$.

因此, 通过对可用度A、可信赖度D和能力C3个指标的综合, 可以获得预防性维修下的系统效能评价. 该评价结果包含了预防性维修对单部件系统效

能的影响, 而通过对不同预防性维修周期下效能评价的比较, 有助于选择合适的预防性修复周期 T_0 , 使得系统效能最大化.

4 数值算例分析(Numerical example analysis)

假设备用条件下的系统平均故障间隔时间 $MTBF = 100$ h, 平均故障修复时间 $MTTR = 10$ h, 则可用度向量 $A = [a_0 \ a_1 \ a_2]$ 表示为:

$$a_0 = P(Z(0) = 0) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = 0.91,$$

$$a_1 = P(Z(0) = 1) = \frac{MTTR}{MTBF + MTTR} = 0.09,$$

$$a_2 = P(Z(0) = 2) = 0.$$

并且假设系统只有在正常工作时才能够百分之百地完成任任务. 因此可以设系统能力矩阵为: $C = [1 \ 0 \ 0]^T$.

假定修复性维修和预防性维修的修复时间都遵从几何分布, 分别取 $\mu_1(k) = 0.01$, $\mu_2(k) = 0.5$. 部件工作寿命遵从参数为 (q, β) 的离散韦布尔分布, 为了使仿真图形更有说服力, 取尺度参数 $q = 0.8$, 根据部件故障率的单调性(形状参数 β 反映)分成3组算例来研究.

算例 1 取 $\beta = 1.5 > 1$, 则故障率为单调递增序列;

算例 2 取 $\beta = 1$, 则部件寿命的分布退化为几何分布, 故障率 $\lambda(k) = 0.001$ 为常数;

算例 3 取 $\beta = 0.8 < 1$, 则故障率为单调递减序列.

则根据公式(11)~(13)计算可以得到预防性维修下各个算例的可信赖度. 因此, 通过可用度 A 、可信赖度 D 和能力 C 3个指标的综合, 可以获得考虑预防性维修下的系统效能评价曲线, 如图1~3所示. 图中, S 表示系统效能.

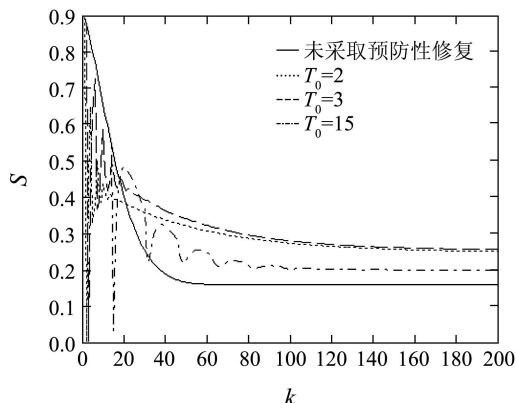


图 1 故障率递增下的系统效能曲线

Fig. 1 Instantaneous effectiveness of system with increasing failure rate

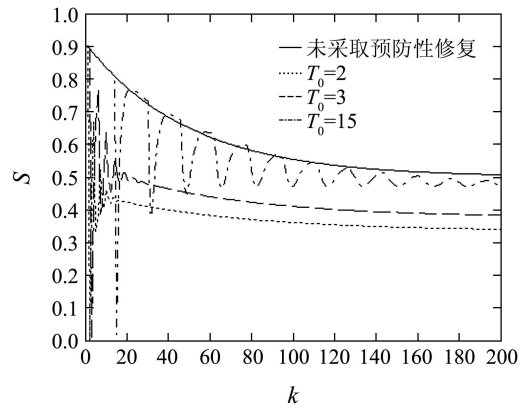


图 2 故障率为常数的系统效能曲线

Fig. 2 Instantaneous effectiveness of system with constant failure rate

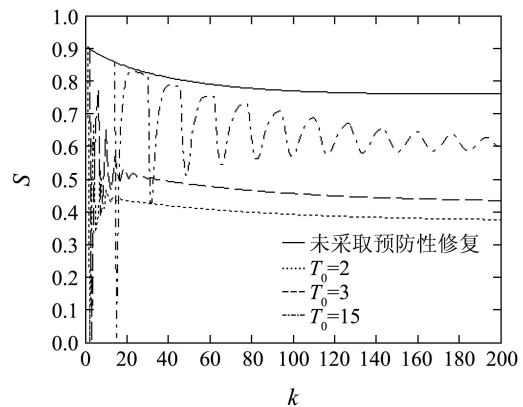


图 3 故障率递减下的系统效能曲线

Fig. 3 Instantaneous effectiveness of system with decreasing failure rate

图1~3描述了参数 β 分别为 $\beta = 1.5$, $\beta = 1$ 和 $\beta = 0.8$ 下的系统效能ADC评估曲线. 对比上述3组系统效能评价曲线可以看出:

当系统工作在单位个预防性周期时刻点附近时, 瞬时系统效能一般比较低. 这主要是由于系统进入预防性维修过程时, 系统停止正常工作而进行预防性维修的结果. 因而对非故障部件进行预防性维修会导致系统效能的短时下降, 产生效能曲线的震荡.

预防性维修的特点是可以促使部件役龄回退. 因此, 当部件故障率为递增函数时, 役龄回退促使部件故障率下降而使系统瞬时效能在大部分时间得到一定增强, 如图1所示. 但是, 预防性维修会增加停机时间, 过于频繁的预防性维修对系统效能的提高作用不大, 如图1中 $T_0 = 2$ 时曲线所示. 因此, 适当的预防性维修周期有助于提高系统效能.

当部件故障率为常数时, 役龄的回退对部件故障率没有影响, 即故障率为常值不变. 因此, 此时的预防性维修对非故障部件维修并不能使系统效能得到改善, 相反会使正常部件进入预防性维修状态而降

低了系统效能. 特别地, 随着预防性维修周期的减小或预防性维修次数的增加, 系统效能会进一步降低, 如图2所示.

当部件故障率为递减函数时, 役龄的回退同样不能使部件故障率降低, 反而会使系统故障率增大. 因此, 此时的预防性维修对非故障部件维修并不能使系统效能得到改善, 相反会加剧系统效能变差的趋势. 特别地, 随着预防性维修周期的减小或预防性维修次数的增加, 系统效能会进一步降低, 如图3所示, 符合实际工程的情况.

根据上述3个算例的比较分析, 当故障率为递增函数时, 可以通过选择适当的预防性维修周期来提高系统效能; 当故障率为常数或递减函数时, 预防性维修反而会降低系统效能, 因而此时无法通过预防性维修来提高系统效能, 符合客观实际.

5 结论(Conclusions)

根据预防性可修复系统的特点, 利用离散可修复系统来分析预防性维修下的系统效能. 通过对单部件系统状态转移方程的分析, 获得了考虑可修复策略下的系统可信赖度. 最后通过对系统可用度 A 、可信赖度 D 和能力 C 3个指标的综合, 可以获得考虑预防性维修下的系统效能评价. 该评价结果包含了预防性维修对系统效能的影响, 而通过对不同预防性维修周期下的效能评价的比较, 有助于合适的预防性修复周期, 使得系统效能最大化.

参考文献(References):

- [1] 王君, 周林, 白华珍. 效能评估ADC模型中可信赖度矩阵算法探讨[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(8): 1501 – 1505. (WANG Jun, ZHOU Lin, BAI Huazhen. Arithmetic of dependability matrixes in the ADC effectiveness evaluation model[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(8): 1501 – 1505.)
- [2] 鲍鸣, 戴跃伟, 孔建寿, 等. 基于ADC的信息系统生存能力评价[J]. 信息与控制, 2008, 37(6): 751 – 756. (BAO Ming, DAI Yuewei, KONG Jianshou, et al. Survivability evaluation for information system based on availability, dependence and capability[J]. *Information and Control*, 2008, 37(6): 751 – 756.)
- [3] 阎永玲, 雷英杰, 张庆波. 关于ADC法评估C4ISR系统效能中的可靠性[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(12): 70 – 76. (YAN Yongling, LEI Yingjie, ZHANG Qingbo. Research on reliability of the efficiency evaluation of the C4ISR system based on ADC method[J]. *Fire Control and Command Control*, 2008, 33(12): 70 – 76.)
- [4] LI W, MAO N, PAN W. The effectiveness evaluation model of radar jamming system based on WSEIAC model[C] // *Control and Decision Conference 2008*. Yantai, China: IEEE, 2008: 1848 – 1852.
- [5] 黄贡献, 张广苏, 田世英. 基于WSEIAC模型的自行火炮营系统效能分析模型[J]. 兵工自动化, 2008, 27(1): 28 – 30. (HUANG Gongxian, ZHANG Guangsu, TIAN Shiyong. Analysis model of system effectiveness for self-propelled gun battalion based on wseiac model[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2008, 27(1): 28 – 30.)
- [6] 于磊, 周世明, 汤剑. 基于WSEIAC模型的指挥自动化系统效能分析[J]. 兵工自动化, 2007, 26(4): 8 – 11. (YU Lei, ZHOU Shiming, TANG Jian. Assessing efficacy of the automated command system based on wseiac method[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2007, 26(4): 8 – 11.)
- [7] 肖元星, 张冠杰. 地面防空武器系统效费分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 56 – 72. (XIAO Yuanxing, HANG Guangjie. *Effectiveness-Cost Analysis on Land-Based Air Defense Weapon System*[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2006: 56 – 72.)
- [8] BRIS R, CHATELET E, YALAOUI F. New method to minimize the preventive maintenance cost of series-parallel systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2003, 82(3): 247 – 255.
- [9] 王美义, 端木京顺, 何新宏. 基于序列运算理论的维修备件保障决策模型[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(6): 1085 – 1089. (WANG Meiyi, DUANMU Jingshun, HE Xinhong. The decision-making model of spare parts support based on sequence operation theory[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(6): 1085 – 1089.)
- [10] 毛昭勇, 宋保维, 李正, 等. 并联系统预防性维修费用的优化方法[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(4): 819 – 821. (MAO Zhaoyong, SONG Baowei, LI Zheng, et al. Optimal method to minimize the preventive maintenance cost of parallel systems[J]. *Journal of System Simulation*, 2005, 17(4): 819 – 821.)
- [11] DUARTE J A C, TABORDA J C, CRAVERIRO A, et al. optimization of the preventive maintenance plan of a series components system[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2006, 83(4): 262 – 269.
- [12] DAS K, LASHKAR R S, SENGUPTA S. Machine reliability and preventive maintenance planning for cellular manufacturing systems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 183(1): 162 – 180.
- [13] PANAGIOTIDOU S, TAGARAS G. Optimal preventive maintenance for equipment with two quality states and general failure time distributions[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 180(1): 329 – 353.
- [14] 蔡景, 左洪福, 王华伟. 多部件系统的预防性维修优化模型研究[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(2): 133 – 138. (CAI Jing, ZOU Hongfu, WANG Huawei. A study on preventive maintenance optimization model for multi-unit system[J]. *Systems Engineering-Theory and Practice*, 2007, 27(2): 133 – 138.)
- [15] 杨春节, 童晟, 孙长生, 等. 基于可靠性约束的混合预防性维修模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(8): 1376 – 1379. (YANG Chunjie, TONG Sheng, SUN Changsheng, et al. Hybrid preventive maintenance model based on reliability constraint[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2008, 42(8): 1376 – 1379.)
- [16] DONGYAN CHEN, KISHOR S. TRIVEDI. Analysis of periodic preventive maintenance with general system failure distribution[C] // *Proceedings of 2001 Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing*. Washington DC, USA: IEEE, 2001: 103 – 107.
- [17] 杨懿, 王立超, 邹云. 考虑预防性维修的离散时间单部件系统的可用度模型[J]. 航空学报, 2009, 30(1): 68 – 72. (YANG Yi, WANG Lichao, ZOU Yun. Availability model of one-unit discrete time system with preventive maintenance[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(1): 68 – 72.)

作者简介:

鲍鸣 (1982—), 男, 博士研究生, 主要从事系统生存能力和效能评估相关技术研究, E-mail: bm_2001@163.com;

戴跃伟 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为信息安全技术、自动测控系统技术和复杂系统建模与控制技术;

孔建寿 (1962—), 男, 教授, 研究领域为系统工程、先进制造技术和人工智能;

邹云 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为应急控制与评估理论与应用、奇异系统、多维系统和奇异摄动系统.