

文章编号:0253-9993(2007)07-0773-05

面向维护的矿山机电系统服役年龄 动态仿真与近似建模

岳文辉, 刘德顺, 黄良沛

(湖南科技大学 湖南省机械设备健康维护重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 基于机械系统中零件的失效时间分布密度函数, 建立了面向维护的矿山机电系统服役年龄模型, 探讨了零件失效时间分布参数对系统服役年龄的影响规律, 给出了系统服役年龄近似数学模型. 理论分析与仿真结果表明: 系统服役年龄变化是一个从振荡趋于稳定的过程, 可以用二阶系统的时间响应函数来描述; 系统服役年龄的变化周期近似于零件服役寿命的均值, 稳定值近似于振幅的平均值; 对于给定的维护周期和偏差, 根据近似数学模型可以方便地计算出系统服役年龄的稳定值、振荡时间和振荡次数等特征值.

关键词: 重组维护; 系统服役年龄; 可靠性; 零件替换率; 维护成本

中图分类号: H17 **文献标识码:** A

Modeling and simulation of service life of mining mechanical and electronic systems under going maintenance

YUE Wen-hui, LIU De-shun, HUANG Liang-pei

(Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Based on the time-to-failure density function of parts, the service life model of mining mechanical and electronic systems were constructed to track the change course of part service life for the systems that were reassembled and maintained. At last, the service life approximate mathematic model was defined. By means of theoretical study and simulation, it is indicated that the variation of the service life is a process from oscillating to stability. The process can be described by the time response of two order system. The variation cycle is about mean value of part service life, the stable value is about the average of the oscillation amplitude. The feature parameters, such as stable value, oscillating time and cycles of system service life can be calculated easily according to the approximate mathematic model for the maintain cycle and deviation given.

Key words: reassembly & maintenance; system service age; reliability; replacement rate; maintenance cost

在矿山机电设备使用过程中, 机电系统中的零部件可能因各种原因而失效^[1,2]. 为了确保机电系统具有较高的可靠性和较长的使用寿命, 必须对设备进行及时维护, 更换失效的零部件. 矿山机电系统的服役年龄直接反映了系统的新旧程度. 机电系统的服役年龄越小, 系统越新, 系统的安全可靠性越高; 反之, 机电系统的服役年龄越大, 系统越老, 系统的安全可靠性越低. 机电系统服役年龄综合反映了维护后系统

收稿日期: 2007-02-10 责任编辑: 高雪梅

基金项目: 国家安全生产监督管理局资助项目 (06-398); 湖南省科技计划资助项目 (06JT1034)

作者简介: 岳文辉 (1965-), 男, 湖南邵阳人, 副教授, 博士研究生. Tel: 0732-8290288, E-mail: jwc1999178@126.com

的安全可靠性和维护成本。

重组维护后系统的可靠性、系统的服务能力和产品的全生命周期成本优化等问题引起了一些学者的关注。Shu 和 Jiang 在假设机电系统零件失效行为满足 Weibull 分布的基础上,建立了面向维护的机电系统平均服役年龄模型和可靠性模型,探讨了应用模型仿真结果分析和优化系统全生命周期成本和系统可靠性评估的途径^[3,4]。韩帮军等人构建了可靠度约束条件下有限时间区间的预防性维修策略的数学模型,为维修计划的制订和现场的作业调度提供了决策支持^[5]。李果等人从维修需求和维修目标出发,提出了维修效用函数驱动的多目标维修优化模型,为制订综合考虑安全性、可靠性和维修费用经济性的维修策略提供了依据^[6]。戴旭东等人以矿井提升设备为研究对象,为达到以最低的成本保证设备最大的可靠性与安全检查性为目的,提出了“针对性维修策略”,确立了理论依据、理论要点、具体实施的方法步骤^[7]。Dimarco 等人把失效分析模型融入到计算机辅助设计中,在产品的早期设计中对产品的维护费用进行探讨^[8]。Chaudhuri 和 Mohammed 从最小修理费用出发,建立了零部件替换模型,以此来确定系统的最佳检查期^[9]。本文基于零件的失效时间分布,通过面向维护的机电系统服役年龄动态仿真,建立系统服役年龄与零件失效时间分布的近似数学模型,探讨零件失效时间分布函数的参数对系统服役年龄的影响规律。

1 机电系统服役年龄建模

1.1 模型假设

① 每一个零件失效都是随机独立事件;② 失效后及时维护更换,且更换的零件失效时间分布与原零件相同;③ 机电系统由 M 个零件组成,所有零件的失效时间分布相同。机电系统由零(元)件组成,对于一般机电组成,所有零件的失效时间分布相同。如链条、履带等,它们的零件数目是一定的,由于零部件的受力状况、破坏失效形式和材料性质等方面的相似性,这些零件具有相同或相近的失效时间分布函数;在机电系统的服役时间内,更换的零件一般和原来零件具有相同或相近的失效时间分布函数。对于不同零件时间分布密度函数以及更换的零件与原来零件具有不同时间分布密度函数等情况,将在另文介绍。

1.2 系统服役年龄仿真数学建模

机电系统在运行过程中往往会因零部件的失效而产生故障,因此必须对失效的零部件进行及时更换。经过维护后的机电系统其内部零件的服役年龄组成就会发生相应变化。假设系统维护周期为 Δt (可以是小时、天、月、年等时间单位),机电系统运行时间 $t_n = n\Delta t$ 后,对系统中零件的服役年龄分布进行统计分析。对于某类零件,其失效时间分布密度函数为 $f(x)$,若用 p_{ni} 表示系统在 t_n 时刻具有 $i\Delta t$ 服役年龄的零件的比例,则 t_n 时刻各个时段的服役年龄分布(年龄组)可表示为 $\{p_{n0}, p_{n1}, \dots, p_{nm}\}$ 。年龄组是依据机电系统维护间隔时间 Δt 进行划分的。零件的失效时间分布密度函数决定了下一时刻的年龄构成,零件使用 t_n 后失效的可能性,可通过失效时间分布密度函数在区间 $[0, t_n]$ 上的积分来表示。在重组维护下一时刻 t_{n+1} ,没有失效而继续使用的零件其年龄会相应增大 Δt ,因失效而被更换的新零件此时的服役年龄为 0。

在初始阶段,系统所有的零件都是新的,其服役年龄都为 0。即在 $t_0 = 0$ 时,令 $p_{00} = 1$ 。在 $t = \Delta t$ 时, $p_{11} = p_{00}[1 - \int_0^{\Delta t} f(x) dx]$, $p_{10} = p_{00} \int_0^{\Delta t} f(x) dx$; 在 $t = 2\Delta t$ 时, $p_{22} = p_{11}[1 - \int_0^{2\Delta t} f(x) dx]$, $p_{21} = p_{10}[1 - \int_0^{\Delta t} f(x) dx]$, $p_{20} = p_{11} \int_0^{\Delta t} f(x) dx + p_{10} \int_0^{\Delta t} f(x) dx$ 。依此类推,在 $t_n = n\Delta t$ 时,可由 $i = 1 \sim n$ 应用式(1)~(3)递推求得各时间(服役年龄组)段的零件比例,用矩阵表示为

$$p_{00} = 1, \quad (1)$$

$$p_{i0} = 1 - \sum_{k=1}^n p_{ik} = [\psi(i), \psi(i-1), \dots, \psi(1)] \begin{bmatrix} p_{i-1, i-1} \\ p_{i-1, i-2} \\ \vdots \\ p_{i-1, 0} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} p_{ii} \\ p_{ii-1} \\ \vdots \\ p_{i1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \psi(i) & & & \\ & 1 - \psi(i-1) & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 - \psi(1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{i-1, i-1} \\ p_{i-1, i-2} \\ \vdots \\ p_{i-1, 0} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, $\psi(k) = \int_0^{k\Delta t} f(x) dx$.

根据系统各类零件的服役年龄分布, 定义系统服役年龄为系统所有零件的平均年龄, 即机电系统在 t_n 时的服役年龄 $a(t_n) = \sum_{k=1}^N p_{nk} k \Delta t$. 当机电系统零件的失效时间分布密度函数已知时, 根据数学模型可求出系统的服役年龄. 由于第1个年龄组存放的是部件在 t_0, t_1, \dots, t_n 时刻因系统零件失效而更换的新零件比例, 因此系统维护各相应时刻零件替换率(失效率)可表示为 $p_{10}, p_{20}, \dots, p_{n0}$.

2 机电系统服役年龄的近似模型

2.1 服役年龄仿真

假设机电零件的失效时间分布密度函数为正态分布, 其概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (-\infty < x < \infty),$$

式中, μ 为零件的服役寿命的期望值; σ 为零件服役寿命的标准差, 表示零件服役寿命分布的分散程度, 用来度量零件失效时间 x 相对于其均值的分散程度.

图1为均值 μ 和标准差 σ 不同组合的正态分布密度函数. μ, σ 为无量纲, 它们可以是小时, 天, 月和年等时间单位. μ 越大, 说明系统零件的寿命越长; 反之, μ 越小, 系统零件的寿命越短. 显然, σ 越小, 系统零件的服役时间越有可能与期望值一致; σ 越大, 系统零件的服役时间越分散. 图2追踪了4个时间 $t=0, 7\Delta t, 10\Delta t, 15\Delta t$ 的系统零件年龄组分布, 且系统零件的失效时间密度函数参数 $\sigma=0.2, \mu=1$, 维护周期 $\Delta t=0.1$.

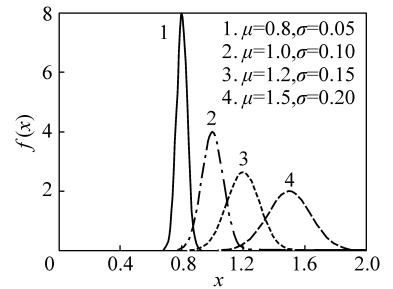


图1 正态分布概率密度函数

Fig. 1 Normal probability distributions

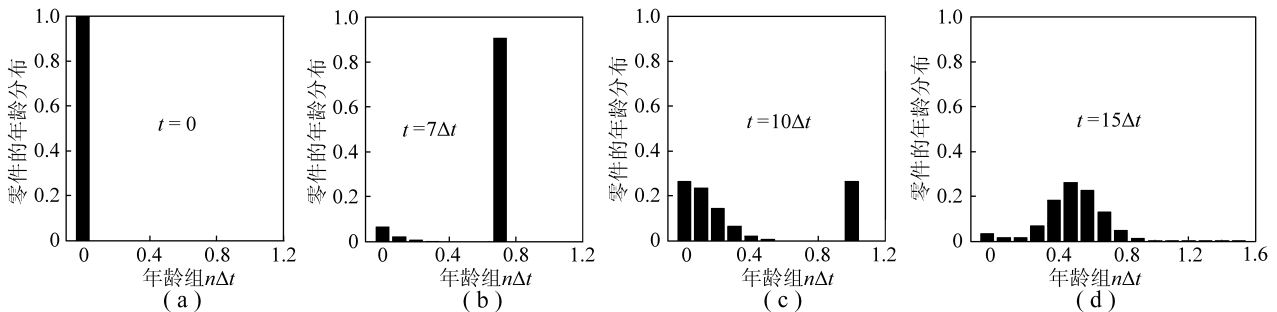


图2 年龄分布

Fig. 2 Age distribution

2.2 仿真结果与分析

应用系统服役年龄数学模型, 根据系统维护周期, 得到机电零件失效时间为正态分布的系统服役年龄(图3). 图3(a)表示系统零件寿命(期望值或均值 μ) 对系统服役年龄的影响, 3条曲线分别代表了3种类型的零件, 其正态分布参数 $\mu=0.8, 1, 2, 1.5, \sigma=0.3$. 图3(b)为系统零件寿命标准差 σ 对系统服役年龄的影响, 3条曲线的正态分布参数 $\sigma=0.2, 0.3, 0.4, \mu=1$, 图3仿真间隔时间为 $\Delta t=0.1$.

从图3可以看出, 机电系统在其服役期内服役工作年龄的变化可分为2个阶段: 开始经历的振荡阶段

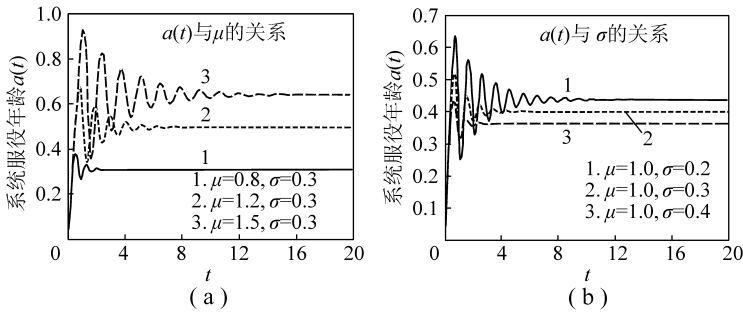


图3 系统服役年龄 $a(t)$ 与均值 μ , σ 的关系

Fig. 3 System service age $a(t)$ with μ , σ

同时,大量的仿真结果表明,系统服役年龄(稳态值)取决于系统零件失效时间分布(正态分布)的两个参数。 μ 越大,表示系统零件的预期寿命越长,因此平均年龄也就越大; σ 越小,说明系统零件的使用时间达到期望值之前,失效的概率极低,从而大多数零件使用时间加长,系统服役年龄也会相应增大。

此外,系统零件寿命均值 μ 和标准差 σ 不仅影响系统服役年龄稳态值,而且影响服役年龄曲线的振荡程度。系统服役年龄之所以产生振荡,是因为系统零件群在低失效阶段只有极少数的零件失效,平均年龄将会单调上升;进入高失效阶段以后,随着失效零件的日益增加,相当一部分零件被新的零件所取代,势必造成平均年龄的降低,此波动过程的振荡周期时间大致和零件寿命的期望值(均值 μ)相当。最新安装的零件会逐渐老化,直到失效情况再次发生,也会引起平均年龄的再次波动。在每次波动期间,许多零件失效并非都集中于中心区域,系统中零件的年龄日趋多样化,并且零件群中平均年龄的波动就会逐渐减小,最后趋于稳态值。

由图3可知, μ 越大,零件逐渐老化的过程越长,服役年龄的波动就越大,产生年龄多样化的时间越长,服役年龄从振荡到稳态值的过渡时间越长; σ 越小,在靠近期望值之外发生失效的几率越小,系统服役年龄的波动也就越大,产生年龄多样化的时间越长,过渡时间越长。

将图4和图3(b)进行比较可以看出,在均值 μ 和标准差 σ 相同的情况下,系统零件替换率(即零件的失效率)的变化规律和系统服役年龄变化规律大致相当,在经历了最初一段同样长时间的振荡后也将趋于稳定状态。

2.3 服役年龄的近似模型构建与分析

从图3,4可知,机电系统服役年龄的变化规律:①系统服役年龄变化曲线是一条幅值不断衰减趋于稳定值的振荡曲线,这被解释为机电系统零件更新过程是一个必然的结果。②振荡周期与 μ 有关, μ 越大,振荡周期越大; μ 越小,振荡周期越小。振荡周期近似于 μ 。③振荡衰减快慢与 μ 和 σ 有关, μ 越小, σ 越大,衰减越快;反之, μ 越大, σ 越小,衰减越慢。④年龄稳定值大小与 μ 和 σ 有关, μ 越大, σ 越小,稳定值就越大;反之, μ 越小, σ 越大,稳定值就越小。⑤振荡强弱与 μ 和 σ 有关, μ 越大, σ 越小,振荡越强,振幅越大;反之, μ 越小, σ 越大,振荡越弱,振幅越小。⑥稳定值近似于振幅的平均值。当 $\sigma \rightarrow 0$,系统服役年龄变化就是一条锯齿线,变化周期为 μ ,振荡激烈,没有衰减(图5)。由图5可知,随着 σ 不断增加,振荡不断减弱,振幅减小。

综合以上分析,提出能反映机电系统服役年龄变化基本特征的近似数学模型,即

$$a(t) = \frac{\mu}{2} e^{-\xi \frac{t}{\mu}} \left\{ 1 - e^{-\xi \frac{t}{\mu}} \left[\sin \frac{2\pi t}{\mu} + \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{2\sigma}{\mu} \right) \right] \right\}$$

ζ 和 ξ 是与零件寿命和维护周期有关的系数,通过回归分析获得。由图6可以看出,服役年龄的近似模型与仿真结果相当吻合,较好地反映了机电系统服役年龄的变化规律。从服役年龄的近似模型可以得

和最终的稳定阶段。这说明机电系统服役初期的零件替换率和系统可靠性非常不稳定,时高时低,因此,在该阶段应特别注意系统维护。机电系统服役年龄变化最终都趋于平稳状态,这和狄拉克的收敛理论是一致的,也进一步表明无限数目独立平衡更新过程近似于泊松过程^[2]。如果一个系统的零件失效时间分布相同,则这个系统的服役年龄应该趋近于一个常数。

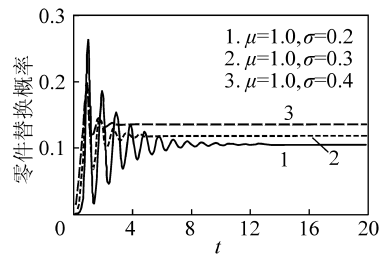


图4 系统零件替换率

Fig. 4 Part replacement rate

到, 机电系统服役年龄的稳定值 $a_s = \lim_{t \rightarrow \infty} a(t) = \frac{\mu}{2} e^{-\xi\sigma/\mu}$.

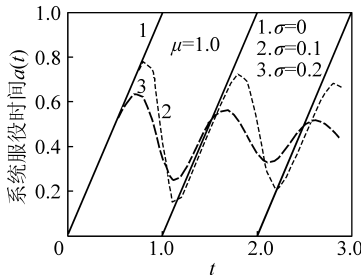


图5 系统服役年龄 $a(t)$ 的变化规律

Fig. 5 Changing rule of system service

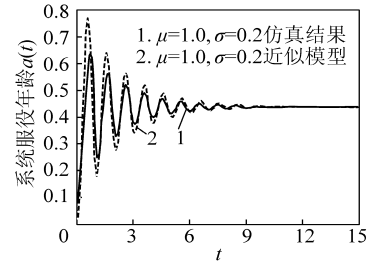
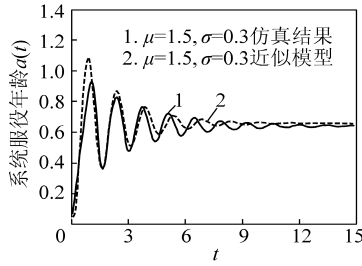


图6 近似模型与仿真结果的比较

Fig. 6 Comparison of approximate model and simulation results

机电系统服役年龄变化的振荡时间 T 和振荡次数 N 可以估计为: 当偏差 $\Delta = 2\% a_s$ 时, $T \approx 4\mu / (\xi\sigma)$, $N \approx 4 / (\xi\sigma)$; 当偏差 $\Delta = 5\% a_s$ 时, $T \approx 3\mu / (\xi\sigma)$, $N \approx 3 / (\xi\sigma)$. 例如, 当系统零件失效时间分布参数 $\mu = 1.5$, $\sigma = 0.3$, 设定维护周期 $\Delta t = 0.1$ 时 ($\zeta = 0.652$, $\xi = 2.356$), 机电系统服役年龄的变化规律: $a_s = 0.66$, $T = 8.5$, $N \approx 6$ ($\Delta = 2\% a_s$).

根据近似模型可以直接了解机电系统的服役年龄 $a(t)$ 与系统零件失效时间分布参数的定量关系, 同时, 也可以比较简便地获得系统服役年龄变化的稳定值、振荡时间等特征值, 这便于对具有多种失效时间分布零件的机电系统的服役年龄进行综合分析与研究.

3 结 语

在矿山机电设备或系统的生命周期中, 重组维护是其中的重要环节. 由于零件的更换, 引发系统的安全可靠性发生变化, 这一变化直接反映在系统服役工作年龄的变化中. 本文从系统零件的失效时间分布出发, 对系统服役年龄与零件失效时间分布参数的关系进行了仿真研究, 建立了面向维护的机电系统服役年龄近似数学模型, 为矿山机电系统全寿命周期的安全可靠性与维护成本评估提供了定量研究的手段, 有利于制定科学合理的维修策略.

参考文献:

- [1] 卢昆祥. 整机系统可靠性设计理论与实用技术 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1987.
- [2] 吴晓明, 赵梅芳, 蒋登峰, 等. 威布尔分布在机床可靠性计算的应用[J]. 机械工业标准化与质量, 2003(1): 31~34.
- [3] Shu L H, Flower W C. Reliability modeling in design for remanufacture [J]. ASME, Journal of Mechanical Design, 1998, 120 (12): 620~627.
- [4] Jiang Z H, Shu L H, Benhabib B. Reliability analysis of non-constant-size part populations in design for remanufacture [J]. ASME, Journal of Mechanical Design, 2000, 122 (6): 172~178.
- [5] 韩帮军, 范秀敏, 马登哲. 基于可靠度约束的预防性维修策略的优化研究 [J]. 机械工程学报, 2003, 39 (6): 102~105.
- [6] 李 果, 高建民, 陈富民. 基于可靠性的设备维修优化方法研究 [J]. 中国机械工程, 2007, 18 (4): 419~423.
- [7] 戴旭东, 赵三星, 谢友柏, 等. 以可靠性为中心的机械设备针对性维修策略研究 [J]. 机械科学与技术, 2002, 21 (1): 89~91.
- [8] Dimarco P, Eubanks C, Ishii K. Service modes and effects analysis: integration of failure analysis and serviceability design [J]. ASME, Computers in Engineering Conference and Engineering Database Symposium, 1995, 15 (3): 833~840.
- [9] Chaudhuri D, Mohammed O. Optimal inspection and replacement models for systems with increasing minimal repair cost [J]. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 1999, 6 (2): 155~171.