

面向维修的机械系统可靠度预测与仿真研究

黄良沛,尹喜云,岳文辉

(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] 机电产品在服役期间因零件失效而产生故障,重组维修破坏了原有的系统可靠性模型,因而需要对设备可靠性问题重新进行研究和评价。基于机电系统中零件的失效时间分布密度函数,研究了在重组维护过程中机电系统服役期间零件年龄结构的分布规律,发展了机电系统可靠性数学模型。通过仿真研究,探讨了系统服役期间年龄结构、可靠度和失效率的发展规律,定量地研究了失效时间分布密度函数的参数对系统可靠度的影响。这对于评估机械系统的可靠性和全生命周期的失效率,制定合理的维修策略具有重要意义。

[关键词] 重组维修;可靠度预测;年龄分布;失效率

[中图分类号] TU283.2 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)12-0069-06

1 引言

随着现代生产技术和人们生活水平的提高,对机电产品可靠性的要求越来越高。机电产品在服役期间,机电系统或部件运行一段时间往往因零件失效而产生故障,需要以新的零件替换。由于在重组维修阶段,安装条件的改变、新旧零件的失效特征的差异、新旧零件之间相互匹配等问题,都有可能使系统原有的可靠性模型发生改变。机电产品维修过程破坏了原有的系统可靠性模型,需要对设备整体可靠性和安全性重新进行研究和综合评价。因此研究面向重组维修的机电产品系统的可靠性问题具有重要意义。

许多可靠性模型是针对产品设计初期建立的,并未考虑零件更换与维修对可靠性模型的影响^[1,2]。近年来有关重组维修后系统的可靠性、系统的服务能力、系统的维修成本等问题,引起了国内外学者的广泛关注。J. Gershenson 和 K. Isshi 在进行产品全生命周期设计时,考虑产品失效过程和服务能力,提出了产品服务分析模型,该模型针对用户定义不同的失效现象,根据修复故障的程度计算其服务能力指数^[3]。P. Dimarco 等把失效分析模型融

入计算机辅助设计,在产品早期设计中即探讨了产品的维护费用^[4]。H. Pham, H. Wang 等对相同的两台机器采用不同的维修政策建立数学模型,进行比较研究,也是出于成本优化考虑^[5,6]。L. H. Shu 和 W. C. Flower 在零件失效行为满足相同韦布分布的基础上,假设系统中的零件数目相对固定,建立了面向维护的机械系统平均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生命周期成本和系统可靠性评估的途径^[7]。Z. H. Jiang 和 L. H. Shu 考虑到模型中零件数目的变化,通过仿真研究进一步探讨了如何优化系统生命周期成本和评估系统可靠性的方法^[8]。机械系统中零件失效的时间函数为正态分布,为了发展面向重组维修的机械系统可靠性模型,笔者探讨了失效时间分布函数对系统可靠度和失效率的影响规律。

2 重组维修系统的可靠性模型重构

2.1 模型假设

笔者描述的系统有 3 个假设条件:**a.** 它们由许多结构相同的零件组成,零件的数目相对固定;**b.** 零件的失效时间密度函数相同,更换零件与失效零件相比,都具有相同的分布;**c.** 每个零件的失效

[收稿日期] 2007-04-23;修回日期 2007-07-04

[基金项目] 国家安全生产监督管理局资助项目(06-398)

[作者简介] 黄良沛(1971-),男,湖北天门人,博士,湖南科技大学副教授,高级工程师

行为都是随机独立事件。

某些简单的机械系统,譬如链条、履带、紧固螺栓组件等,往往能够满足上述假设条件。笔者重点探讨此类系统在重组维修过程中的可靠性问题。对于较复杂的机械系统,系统模型中零件数目发生变化的情况,更换的零件时间分布密度函数与原来零件不同的情况,将在另文讨论。

2.2 重构模型

机械零件的失效时间分布密度函数(寿命分布)为正态分布,其概率密度函数为

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

式中 μ 是零件服役寿命的期望值, σ 为零件寿命标准差,表示零件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。 μ, σ 可以是小时、天、月和年等时间单位。

机械系统在运行中因某些零部件失效而产生故障,需要及时更换失效的零件。经过维修后的机械

系统,其内部零部件的年龄组成发生相应变化。假设机械系统运行时间 $t_n = n\Delta t$, 以 Δt 来划分年龄组的大小,用 $p_i(t_n)$ 表示 t_n 时刻第 i 个时段(年龄组)的零件数占总零件数比例,则 t_n 时刻所有年龄组的分布用行矩阵表示为 $\{p_0(t_n), p_1(t_n), \dots, p_i(t_n), \dots, p_n(t_n)\}$ 。上一时刻各年龄组的分布情况和零件的时间失效分布函数决定了下一时刻各年龄组的分布。系统在运行过程中各年龄组的零件都具有失效的可能性,在重组维修下一时刻 t_{n+1} ,没有失效而继续使用的零件年龄会增大 Δt ,因失效而被更换的新零件又重新变为 0 岁,机械系统中在上一个时刻获得的零件年龄分布决定着下一个时刻的零件失效率。在 t_{n+1} 时刻,第 $i+1$ 个年龄组的分布 $p_{i+1}(t_{n+1})$ 可通过时间失效分布函数 $f(x)$ 在区间 $[0, (i+1)\Delta t]$ 积分乘以零件在 t_n 时刻的零件分布 $p_i(t_n)$ 来表示。图 1(a)至图 1(d)追踪了连续 4 个时刻系统中零件的年龄组成分布,这些零件的失效时间密度函数具有相同参数的正态分布, $\sigma=0.4, \mu=1$ 。

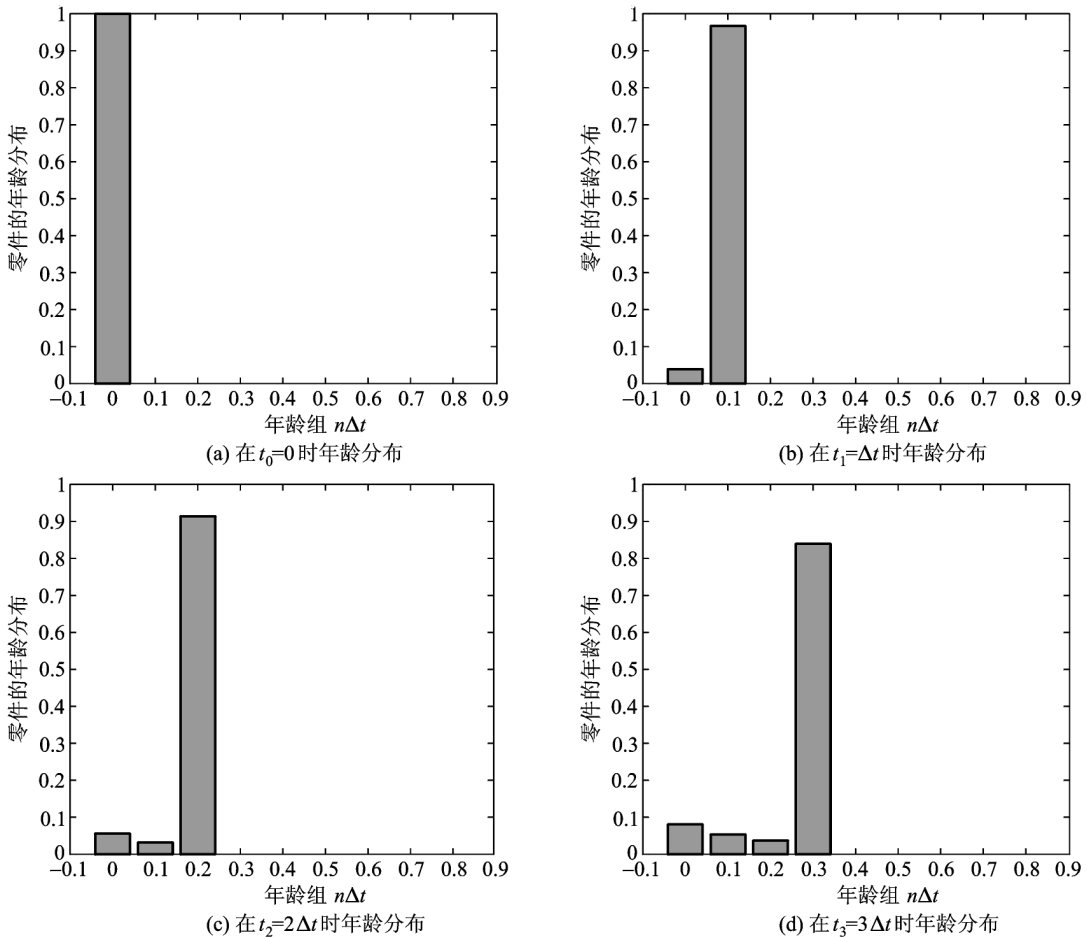


图 1 零件在不同时刻的年龄分布

Fig. 1 Age distribution at different time

在初始阶段,所有的零件都是新的,其年龄结构都为0岁,如图1(a)所示。即在 $t_0=0$ 时,可令第一个年龄组的年龄分布为

$$p_0(t_0) = 1 \quad (2)$$

在 $t_1 = \Delta t$ 时:

$$\begin{aligned} p_1(t_1) &= p_0(t_0) \left[1 - \int_0^{\Delta t} f(x) dx \right], \\ p_0(t_1) &= p_0(t_0) \int_0^{\Delta t} f(x) dx \end{aligned} \quad (3)$$

在 $t_2 = 2\Delta t$ 时:

$$\begin{aligned} p_2(t_2) &= p_1(t_1) \left[1 - \int_0^{2\Delta t} f(x) dx \right], \\ p_1(t_2) &= p_0(t_1) \left[1 - \int_0^{\Delta t} f(x) dx \right], \\ p_0(t_2) &= p_1(t_1) \int_0^{2\Delta t} f(x) dx + p_0(t_1) \int_0^{\Delta t} f(x) dx \end{aligned} \quad (4)$$

在 $t_3 = 3\Delta t$ 时:

$$\begin{aligned} p_3(t_3) &= p_2(t_2) \left[1 - \int_0^{3\Delta t} f(x) dx \right], \\ p_2(t_3) &= p_1(t_2) \left[1 - \int_0^{2\Delta t} f(x) dx \right], \\ p_1(t_3) &= p_0(t_2) \left[1 - \int_0^{\Delta t} f(x) dx \right], \\ p_0(t_3) &= p_2(t_2) \int_0^{3\Delta t} f(x) dx + \\ & p_1(t_2) \int_0^{2\Delta t} f(x) dx + p_0(t_2) \int_0^{\Delta t} f(x) dx \end{aligned} \quad (5)$$

在 $t_n = n\Delta t$ 时:

$$\begin{aligned} p_n(t_n) &= p_{n-1}(t_{n-1}) \left[1 - \int_0^{n\Delta t} f(x) dx \right], \\ p_{n-1}(t_n) &= p_{n-2}(t_{n-1}) \left[1 - \int_0^{(n-1)\Delta t} f(x) dx \right], \\ p_{n-2}(t_n) &= p_{n-3}(t_{n-1}) \left[1 - \int_0^{(n-2)\Delta t} f(x) dx \right], \\ &\dots\dots \\ p_3(t_n) &= p_2(t_{n-1}) \left[1 - \int_0^{3\Delta t} f(x) dx \right], \\ p_2(t_n) &= p_1(t_{n-1}) \left[1 - \int_0^{2\Delta t} f(x) dx \right], \\ p_1(t_n) &= p_0(t_{n-1}) \left[1 - \int_0^{\Delta t} f(x) dx \right], \\ p_0(t_n) &= \sum_{i=0}^{n-1} p_i(t_{n-1}) \int_0^{(i+1)\Delta t} f(x) dx \end{aligned} \quad (6)$$

由于第一个年龄组存放的是在 t_0, t_1, \dots, t_n 时间因零件失效而更换的新零件,故系统中零件替换率可为 $RP = [p_0(t_0), p_0(t_1), p_0(t_2), \dots, p_0(t_n)]$ 。在 t_{n+1} 时刻系统中零件累积失效的概率可用 t_n 时刻的年龄分布来表示,即

$$F(t_{n+1}) = \sum_{i=0}^n p_i(t_n) \int_0^{(i+1)\Delta t} f(x) dx \quad (7)$$

事实上,系统在 t_{n+1} 时刻零件累积失效的概率 $F(t_{n+1})$ 可由零件的替换率 $p_0(t_{n+1})$ 来表示。而系统在 t_{n+1} 时间可靠度预测为

$$R(t_{n+1}) = \sum_{i=0}^n p_i(t_n) \left[1 - \int_0^{(i+1)\Delta t} f(x) dt \right] \quad (8)$$

为了更好地反映系统的可靠性水平和失效程度,可以引入瞬时失效率和平均失效率。产品瞬时失效率可定义为产品在某一瞬时后的单位时间内发生失效的概率,产品平均失效率可定义为产品在某段时间内的总失效数目与总工作时间之比^[9],则系统在 $t_{n+1} = (n+1)\Delta t$ 时刻的瞬时失效率定义为

$$\lambda(t_{n+1}) = \frac{F(t_{n+1}) - F(t_n)}{R(t_{n+1}) \Delta t} \quad (9)$$

式中 $F(t_{n+1}), F(t_n)$ 分别表示系统在 t_{n+1}, t_n 时刻零件累积失效的概率。

系统在时间段 $0 \sim t_{n+1}$ 的平均失效率定义为

$$\bar{\lambda}(t_{n+1}) = \frac{\sum_{i=0}^n p_i(t_n) \int_0^{(i+1)\Delta t} f(x) dx}{\sum_{i=0}^n p_i(t_n) (i+1) \Delta t} = \frac{F(t_{n+1})}{\sum_{i=0}^n p_i(t_n) (i+1) \Delta t} \quad (10)$$

3 可靠度模型的仿真研究

3.1 仿真结果

考虑机械零件的失效时间密度函数为正态分布,选择仿真间隔时间为 $\Delta t = 0.1$,应用上述可靠性数学模型进行数值仿真,选择不同的正态分布参数,得到机械系统的可靠度如图2所示。图2(a)表示系统零件寿命(期望值)对系统服役年龄的影响,其正态分布参数 $\mu = 0.8, 1, 1.2, \sigma = 0.4$ 。图2(b)说明了系统零件寿命标准差对系统服役年龄的影响,五条曲线的正态分布参数 $\mu = 1, \sigma = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ 。

图3表示零件的正态分布参数对系统瞬时失效率的影响,图4表示零件的正态分布参数对系统的平均失效率影响,图3(a)、图4(a)与图2(a)正态分布参数相同,图3(b)、图4(b)与图2(b)正态分布参数一致。

从图2明显可以看出,机械系统在其服役期内可靠度的变化可分为两个阶段:开始的振荡阶段和最终的稳定阶段。这说明机械系统服役初期的零件

替换率和系统可靠性非常不稳定,此阶段应特别注意系统维护。机械系统可靠度变化最终都趋于平稳状态,这与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^[8]。如果一个系统的零件失效时间分布相同,那么系统可靠度应该趋于一个常数。

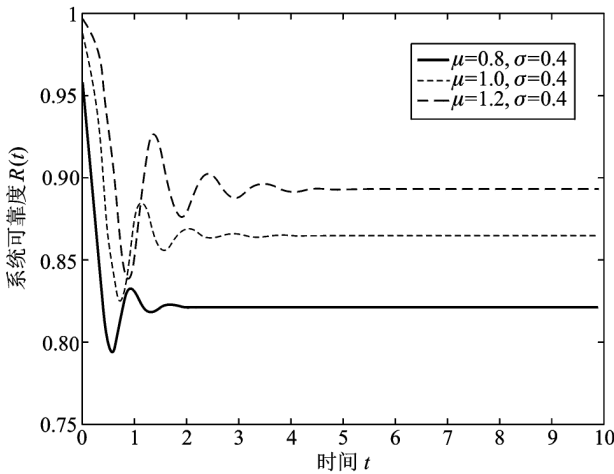
对比图2(a)、图2(b)和图3(a)、图3(b)可知,系统维护中零件平均失效率的变化规律与系统可靠度变化规律是相对应的,最终都趋于平稳状态,系统可靠度越大,系统零件平均失效率越低;反之,系统可靠度越小,系统零件平均失效率越高。

从图4(a)、图4(b)可见,系统零件瞬时失效率的

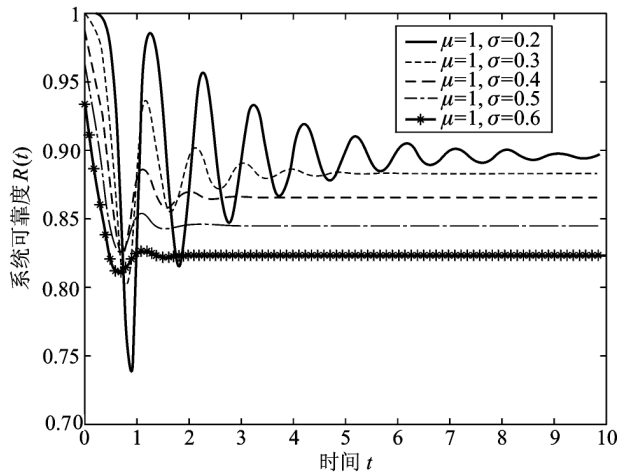
变化规律与平均失效率的变化规律并不一致;系统零件平均失效率越高,系统零件瞬时失效率反而越低,并且随着可靠度逐渐趋于稳定,系统零件瞬时失效率最终趋近于零,这主要是因为系统可靠度逐渐趋于稳定后,相邻两个时段替换的零件数目相等。

3.2 分析讨论

如图2所示,机械系统可靠度是变化的。为了便于定量分析系统零件失效时间分布参数对系统可靠度的影响,给出了系统可靠度的过渡时间和稳定值的定义。稳定值 R_s 是指服役年龄经过若干次振荡后最后趋于稳态的值;过渡时间 T_s 指从零时刻开始至服役年龄达到 R_s 时的一段时间。



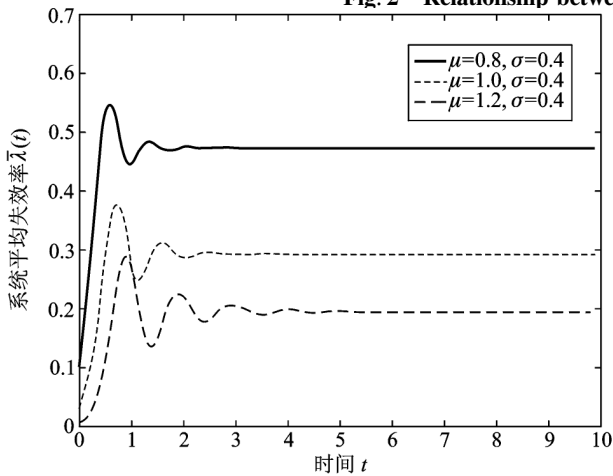
(a) 系统可靠度与 μ 的关系



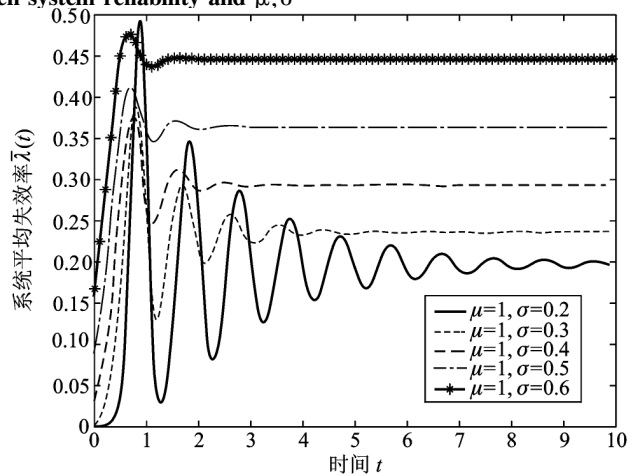
(b) 系统可靠度与 σ 的关系

图2 系统可靠度与 μ, σ 的关系

Fig. 2 Relationship between system reliability and μ, σ



(a) 系统平均效率与 μ 的关系



(b) 系统平均效率与 σ 的关系

图3 系统平均失效率与 μ, σ 的关系

Fig. 3 Relationship between system average failure rate and μ, σ

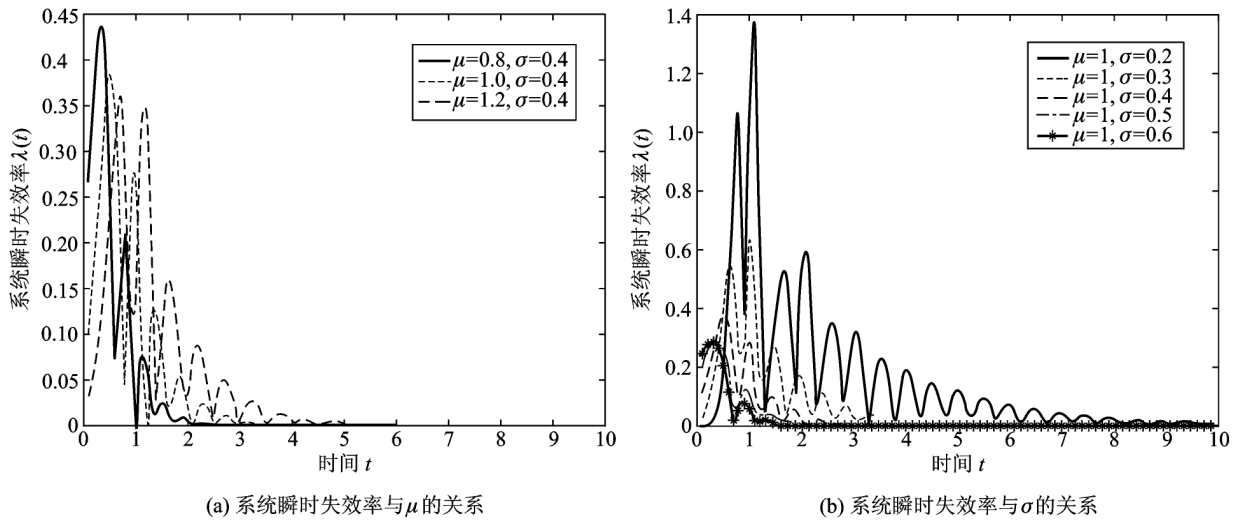


图4 系统瞬时失效率与 μ, σ 的关系

Fig. 4 Relationship between system instantaneous failure rate and μ, σ

从图2(a)、图2(b)可知,系统可靠度(稳态值)取决于系统零件失效时间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,系统可靠度也就越大。 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,系统可靠度也会相应增大。基于系统可靠度仿真结果,可以对系统可靠度稳态值 R_s 与系统零件寿命分布均值 μ 和标准差 σ 的关系进行回归拟合分析,如图5所示,得到

$$R_s = 0.5575\mu - 0.2224\ln\sigma \quad (11)$$

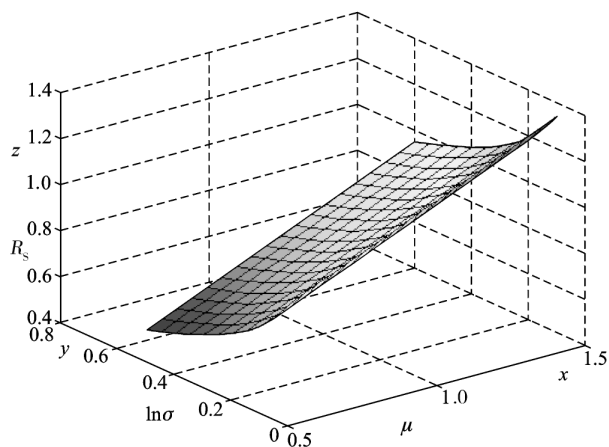


图5 可靠度稳定值 R_s 与 μ, σ 拟合曲面

Fig. 5 Fit surface of R_s with μ, σ

系统零件寿命分布均值 μ 和标准差 σ 不仅影响系统可靠度稳态值,而且影响可靠度曲线的振荡

程度。系统可靠度之所以产生振荡,是因为系统零件群在低失效阶段只有极少数零件失效,系统可靠度较大;随着服役时间变长,系统可靠度将会单调下降;进入高失效阶段以后,随着失效零件的不断增多,一部分零件被新的零件取代,造成系统可靠度升高,此波动过程延续的时间大致与零件寿命的期望值(均值 μ)相当。重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。随着系统服役时间的延长,系统中零件的年龄日趋多样化,零件年龄分布区间和零件年龄结构会逐渐趋于稳定。当系统零件年龄结构趋于稳定时,系统可靠度最后趋于稳态值。由图2可知, μ 值越大,零件逐渐老化的过程也越长,系统可靠度的波动也就越大,产生年龄多样化的时间越长,过渡时间 T_s 越长; σ 的值越小,在靠近期望值之外发生失效的概率越小,系统可靠度的波动也就越大,产生年龄多样化的时间越长,零件年龄结构趋于稳定时间越长,过渡时间 T_s 越长。基于系统可靠度仿真结果,同样对过渡时间 T_s 与系统零件寿命均值 μ 和标准差 σ 的关系进行回归拟合分析,如图6所示,得到

$$T_s = 4.8401\mu + 3.8876e^{-\sigma} \quad (12)$$

4 结语

在机械设备或系统的生命周期中,重组维护是重要环节。由于零件的更换,引发系统的可靠度和系统的失效率发生变化。从系统零件的失效时间分布出发,通过系统可靠度预测模型重构与仿真研究,

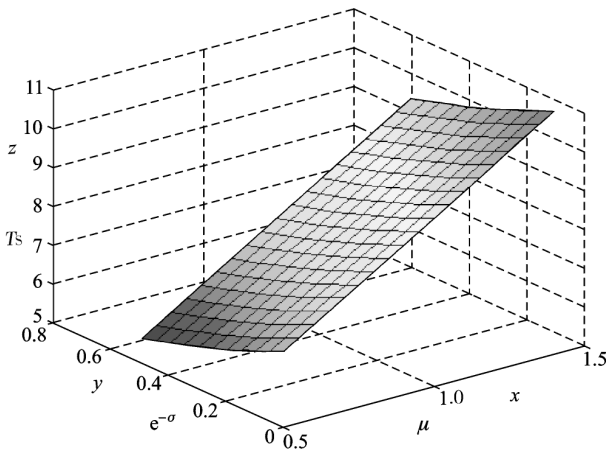


图6 过渡时间 T_s 与 μ, σ 拟合曲面

Fig. 6 Fit surface of transitional time T_s with μ, σ

对系统可靠度与失效时间分布参数的关系进行深入探讨,得到如下结论:

1) 机械系统在其生命周期中,系统的可靠度是变化的,服役初期可靠度变化大,应给予高度关注。

2) 机械系统可靠度变化规律取决于系统中零件的失效时间分布参数。对于零件失效时间为正态分布的机械系统,分布参数 μ 值越大, σ 值越小,系统可靠度的振荡过渡时间越长,但稳态值也将越大。反之,分布参数 μ 值越小, σ 值越大,系统服役年龄的振荡过渡时间越短,稳态值越小。

3) 系统维护中零件平均失效率的变化规律和系统可靠度变化规律是相对应的,最终都趋于平稳状态。系统可靠度越大,系统零件平均失效率越低;反之,系统可靠度越小,系统零件平均失效率越高。

而系统零件瞬时失效率的变化规律与平均失效率的变化规律并不一致,最终都趋于零。

4) 面向维修的机械系统可靠度预测模型构建与仿真研究,为机械系统全生命周期的可靠性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] 白广忱,张春宜. 机械系统整体可靠性优化设计的分解协调法[J]. 机械工程学报, 1999, 35(2): 53 ~ 56
- [2] 吴晓明,赵梅芳,等. 威布尔分布在机床可靠性计算中的应用[J]. 机械工业标准化与质量, 2003, (1): 31 ~ 34
- [3] Gershenson J, Ishii K. Life - cycle service ability design [J]. ASME, Design Theory and Methodology, 1991, 31(12): 127 ~ 134
- [4] 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, (3): 833 ~ 840
- [5] Wang H, Pham H. Some maintenance models and availability with imperfect maintenance in production systems [J]. Annals of Operations Research, 1999, 91(3): 305 ~ 318
- [6] Pham H, Wang H. Optimal (τ, t) opportunistic maintenance of a k - out - of - n: system with imperfect PM and partial failure [J]. Naval Research Logistics, 2000, 47(4): 223 ~ 239
- [7] Shu L H, Flower W C. Reliability modeling in design for remanufacture [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1998, 120(12): 620 ~ 627
- [8] 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 ~ 177
- [9] 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

Study on Reliability Prediction and Simulation for Mechanical System Undergoing Maintenance

Huang Liangpei, Yin Xiyun, Yue Wenhui

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

[Abstract] The mechanical equipment faults result from parts failure in the period of service time. Due to reassembly and maintenance, the reliability model for mechanical equipment is broken, so it is necessary to research

(cont. on p. 80)