

文章编号: 1001- 2486(2009) 06- 0100- 06

## 考虑不完全维修的可修串联系统可用度模型\*

谭林, 程志君, 郭波

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 可用度是衡量系统可靠性、维修性水平的一个重要指标。提出一类基于  $\gamma$  劣化过程的可修串联系统的可用度计算方法。该方法从构成系统部件的状态出发, 用  $\gamma$  过程刻画部件的退化失效规律, 同时考虑系统维修效果的不完全性, 在此基础上推导出系统可用度的表达式。最后用一个算例验证了研究模型的合理性。

**关键词:** 可修串联系统; 不完全维修; 可用度;  $\gamma$  过程

**中图分类号:** O213. 2    **文献标识码:** A

## Availability of Series Repairable Systems under Imperfect Repair

TAN Lin, CHENG Zhijun, GUO Bo

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

**Abstract:** Availability, as a scale of the reliability and maintainability level, is an important parameter of repairable system. A method of calculating system availability for series repairable system is studied in the current research. From the states of components, the methodology presented uses a gamma distribution to model the material degradation, and the impact of imperfect maintenance actions on the system reliability is investigated. At last, a numerical example is presented to demonstrate the use of the model.

**Key words:** repairable series system; imperfect repair; availability; gamma process

系统可用度表示系统任意时刻处于可用状态的概率, 是衡量系统可靠性、维修性水平的重要指标, 近年来一直是研究热点之一。但大部分研究都不考虑系统的维修效果或者是假设维修效果为“修复如新”。然而, 在实际情况下, 系统的修理并不能“修复如新”, 修理后的寿命逐渐递减并最终不能再使用, 这种系统被称为退化系统。为了描述“修复非新”的退化系统, Brown 等<sup>[1]</sup> 首先提出一种“不完全维修”模型, 他们认为系统经过维修后, “修复如新”的概率是  $p$ , 最小维修的概率是  $1-p$ 。Pham & Wang 将“不完全维修”模型归纳为 8 种类型<sup>[2]</sup>。“不完全维修”模型对系统的描述更加符合真实情况, 系统经过多次维修后性能不断劣化, 系统修理后的工作寿命越来越短, 系统的维修时间越来越长, 最终系统不能再工作也不能再修理。Lam<sup>[3]</sup> 首先将其用几何过程进行描述。随后, Lam<sup>[4]</sup>、Zhang<sup>[5]</sup>、Wang<sup>[6]</sup> 等将基于几何过程的不完全维修模型进行进一步深入研究。其他关于“不完全维修”的典型模型与方法可以参见 Kijima<sup>[7]</sup>、Martorell<sup>[8]</sup>、Sheu<sup>[9]</sup>、Chiang 和 Yuan<sup>[10]</sup>、Jiang 和 Ji<sup>[11]</sup> 等。

关于考虑不完全维修的可用度模型方面, Lyer<sup>[12]</sup> 针对单部件系统, 基于  $(p, q)$  策略分析不完全维修条件下的可用度模型。Zhao<sup>[13]</sup> 运用交互更新过程描述“不完全维修”并建立串联可修系统的可用度模型, Wang & Pham<sup>[14]</sup> 也用准更新过程描述“不完全维修”的效果, 在此基础上得到系统的可用度模型。上述文献的共同特征是基于寿命分布函数或故障率建立系统的不完全维修模型。而寿命分布反映的是总体在给定的条件下的“平均属性”, 事实上同一个总体中的个体之间由于制造过程、使用保障过程中的“不同经历”而存在差异。从系统的状态出发, 寻找该系统的劣化规律, 在此基础上计算可靠性指标或进行维修决策更符合产品的“个性”。为了刻画系统状态的劣化过程, 随机过程成为常用的工具, 常用的随机过程包括 Markov 过程<sup>[15]</sup>、复合 Poisson 过程、gamma 过程等<sup>[16-18]</sup>。gamma 过程特别适合用于描述单调

\* 收稿日期: 2009- 04- 18

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 谭林(1981-), 男, 博士生。

退化的随机劣化系统,如系统疲劳、磨损、裂纹、锈蚀、腐蚀等自然老化现象<sup>[18]</sup>。

本文研究一类考虑连续检测的随机劣化系统的可用度模型。与目前的研究文献相比,本文从状态出发得到一种随机劣化系统的可用度计算方法,这种基于性能退化数据的可用度建模方法能够放松对系统服从某一特定分布的假设;另外,这种方法考虑系统中不同部件的不同退化规律和维修策略,将与系统看成一个整体相比更加合理。

## 1 模型假设

现在通过下述假定来研究由多个不同部件组成的可修串联系统的可用度模型。

假定1 开始时,系统的各个部件都是新的,当部件的状态超过部件的预防性维修阈值 $\xi_i$ 时立即进行维修。当一个部件进行修理时,其余部件停止工作,不再发生退化,此时系统处于停机状态,当部件修理完毕时,所有部件立即进入工作状态,系统处于工作状态。

假定2 部件进入若干次预防性维修之后进行更换,部件进行更换时,用新的同类型部件进行更换。更换时间不计。

假定3 若两部件同时进行维修时,维修工对先到达阈值 $\xi_i$ 的部件进行维修,处于待修状态的部件等待维修的时间计入维修时间。

假定4  $X_n^{(i)}$  是部件*i*第*n*-1次维修后的工作时间, $Y_n^{(i)}$  是第*n*次维修的时间。 $X_n^{(i)}$  与  $Y_n^{(i)}$  相互独立。

系统运行时,一个部件的时序关系示意图如图1所示。

当部件的状态超过预防性维修阈值 $\xi_i$ 时对部件实施预防性维修(图1中的 $t_1, t_2, t_3$ 时刻)。部件经过维修后不能恢复到刚投入使用时的状态,也就是说维修的效果是不完全的,由于部件状态初始值的变化,部件在维修后的期望工作时间逐渐变小(如图1,  $E[X_1^{(i)}] > E[X_2^{(i)}] > E[X_3^{(i)}] > E[X_4^{(i)}]$ )。维修时间的期望值逐渐变小,假设连续的维修时间序列服从几何过程。

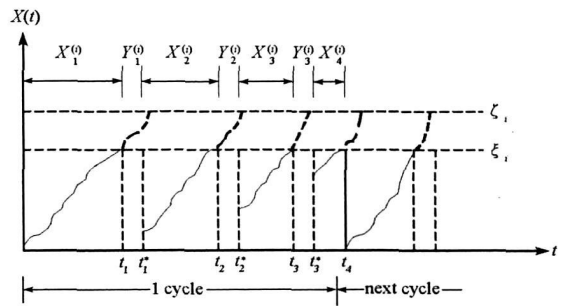


图1 部件的运行时序图

Fig. 1 A possible course of the system life cycle

## 2 系统的退化规律

部件劣化规律用 gamma 过程进行描述。下面首先介绍 gamma 过程的基本形式<sup>[19]</sup>。gamma 密度函数为

$$Ga(x | a, b) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} x^{a-1} \exp(-bx) I_{(0, \infty)}(x) \quad (1)$$

其中,  $a > 0$  为形状参数,  $b > 0$  为尺度参数,  $x \geq 0$ ,  $\Gamma(a) = \int_0^{\infty} t^{a-1} e^{-t} dt$  为 gamma 函数,  $I_{(0, \infty)}(x)$  为示性函数。连续时间随机过程  $\{X(t); t \geq 0\}$  如果满足 (1)  $X(0) = 0$ ; (2) 对于任意  $t \geq 0, \Delta t > 0, \Delta X(t) = X(t + \Delta t) - X(t) \sim Ga(a \Delta t, b)$ ; (3) 对于  $n \geq 1, 0 \leq t_0 < t_1 < \dots < t_n < \infty$ , 随机变量  $X(t_0), X(t_1) - X(t_0), \dots, X(t_n) - X(t_{n-1})$  相互独立, 则  $\{X(t); t \geq 0\}$  为稳态 gamma 过程。由定义可知, gamma 过程为独立增量过程, 样本轨迹是非负单调递增, 因此它可以很好地描述系统劣化趋势的单调过程。

采用极大似然估计方法对 gamma 过程的参数进行统计推断。从 gamma 过程的定义可知

$$\Delta X_j \sim Ga(a \Delta t_j, b) = \frac{(\Delta x_j / b)^{a \Delta t_j - 1}}{b \Gamma(a \Delta t_j)} \exp(-\Delta x_j / b)$$

对数似然函数为

$$\ln L(a, b) = \sum_{i=1}^n (a \Delta t_i - 1) \ln \Delta x_i - a t_n \ln b - \sum_{i=1}^n \ln \Gamma(a \Delta t_i) - \frac{x_n}{b}$$

对数似然函数求偏导:

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln L(a, b)}{\partial a} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i [\ln x_j - \Psi(a \Delta t_j) - \ln b] = 0 \\ \frac{\partial \ln L(a, b)}{\partial b} = \frac{x_n}{b^2} - \frac{a t_n}{b} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\Psi(c)$  为对数 gamma 函数。解上面似然方程组可得相应的估计参数值。

假设部件  $i$  服从退化规律:  $X^{(i)} \sim Ga(x | \alpha_i, \beta_i)$ 。部件经过维修之后, 部件的状态不能恢复到刚开始使用的状态, 因此两次维修之间的工作时间受维修后的起始状态影响, 期望工作时间可用条件概率表示为<sup>[19]</sup>

$$E[X_n^{(i)}] = E[E[X_n^{(i)} | X(t_{n-1}^*)]] = \int_0^{\xi} E[X_n^{(i)} | X(t_{n-1}^*)] f_{X(t_{n-1}^*)}(x) dx \quad (3)$$

其中,  $f_{X(t_{n-1}^*)}(x)$  是  $X(t_{n-1}^*)$  的概率密度函数, 表示部件经过第  $n$  次不完全维修之后的状态初始值, 由图 1 可知,  $X(t_{n-1}^*)$  是一个在  $[0, \xi]$  之间的随机变量。如果劣化规律服从 gamma 过程时, 期望工作时间可表示为

$$E[X_n^{(i)}] = \int_0^{\xi} \int_0^{\infty} \left[ 1 - \frac{\Gamma(a t, \xi/\beta)}{\Gamma(a t)} \right] f_{X(t_{n-1}^*)}(x) dt dx \quad (4)$$

参考文献[20]的做法, 假设  $X(t_{n-1}^*)$  服从 Beta 分布, 那么  $f_{X(t_{n-1}^*)}(x)$  可表示为:

$$f_{X(t_{n-1}^*)}(x) = \frac{1}{\xi} \frac{\Gamma(p_n + q_n)}{\Gamma(p_n) \Gamma(q_n)} \left( \frac{x}{\xi} \right)^{p_n - 1} \left( 1 - \frac{x}{\xi} \right)^{q_n - 1} I(0 \leq x \leq \xi)(x)$$

其中, 模型参数  $p_n > 0$  和  $q_n > 0$  可以根据实际数据用极大似然估计方法确定。

在目前的研究文献中, 维修时间一般假定服从于指数分布, 这种假设便于计算但有一定的局限性。此处我们假设维修时间  $Y_n^{(i)}$  服从几何过程, 几何过程的定义请参考文献[3]。此时  $Y_n^{(i)}$  的分布为:  $G_n^{(i)}(t) = G(b_i^{n-1} t) = 1 - \exp(-b_i^{n-1} \mu_i t)$ 。其中:  $t \geq 0, 0 < b_i \leq 1, \mu_i > 0, \mu_i, b_i$  分别为部件  $i$  的修复率、几何因子。因此,  $Y_n^{(i)}$  的期望可表示为

$$E[Y_n^{(i)}] = \frac{\mu_i}{b_i^{n-1}} \quad (5)$$

### 3 系统的可用度模型

设  $A(t)$  为更换策略  $M = (N_1, N_2, \dots, N_k)$  下的系统稳态可用度。  $H_m^{(i)}, I_m^{(i)}$  分别为部件  $i$  第  $m-1$  次与第  $m$  次更换之间的工作时间和修理时间 ( $m = 1, 2, \dots$ )。令  $\xi_m^{(i)} = H_m^{(i)} + I_m^{(i)}$  为部件  $i$  第  $m-1$  次与第  $m$  次更换之间的总时间, 显然,  $\{\xi_1^{(i)}, \xi_2^{(i)}, \dots\}$  是更新过程。设  $H^{(i)}(t), I^{(i)}(t)$  分别是部件  $i$  在  $(0, t]$  内的总工作时间与总维修时间,  $n^{(i)}(t)$  是部件  $i$  在  $(0, t]$  内更换新部件次数,  $\phi^{(i)}(t)$  和  $\varphi^{(i)}(t)$  分别是部件  $i$  在最后一次更换部件到  $t$  之间的工作和修理时间。于是有

$$H^{(i)}(t) = H_1^{(i)} + H_2^{(i)} + \dots + H_{n^{(i)}(t)}^{(i)} + \phi^{(i)}(t) \quad (6)$$

$$I^{(i)}(t) = I_1^{(i)} + I_2^{(i)} + \dots + I_{n^{(i)}(t)}^{(i)} + \varphi^{(i)}(t) \quad (7)$$

由  $H_n^{(i)}$  和  $I_n^{(i)}$  的定义可知

$$H_m^{(i)} = \sum_{n=1}^{N_i} X_n^{(i)}, \quad I_m^{(i)} = \sum_{n=1}^{N_i-1} Y_n^{(i)} \quad (8)$$

其中,  $m = 1, 2, \dots, n^{(i)}(t)$ 。根据模型假设, 可得到  $T = H^{(i)}(t) + \sum_{i=1}^k I^{(i)}(t)$ 。从而可以得到系统稳态可用度的表达式为

$$A(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E[H^{(i)}(t)]}{E[H^{(i)}(t) + \sum_{i=1}^k I^{(i)}(t)]} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^k \frac{E[I^{(i)}(t)]}{E[H^{(i)}(t)]}} \quad (9)$$

易知,  $\{H_1^{(i)}, H_2^{(i)}, \dots\}, \{I_1^{(i)}, I_2^{(i)}, \dots\}$  都是更新过程, 部件每次更新时间构成更新过程, 假设部件  $i$  在更新策略  $(N_1, N_2, \dots, N_k)$  下的更新周期为  $T_i$ , 由更新理论可知, 系统的稳态可用度可以看作一个寿命周期内的平均可用度<sup>[21]</sup>, 因此有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E[I^{(i)}(t)]}{E[H^{(i)}(t)]} = \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E[I^{(i)}(t)]}{t}}{\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E[H^{(i)}(t)]}{t}} = \frac{\frac{E[I_1^{(i)}]}{E(T_i)}}{\frac{E[H_1^{(i)}]}{E(T_i)}} = \frac{E[I_1^{(i)}]}{E[H_1^{(i)}]} \quad (10)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E[n^{(i)}(t)]}{E[H^{(i)}(t)]} = \frac{1}{E[H_1^{(i)}]} \quad (11)$$

而由前面的分析结果可知

$$E[H_1^{(i)}] = E\left[\sum_{n=1}^{N_i} X_n^{(i)}\right] = \sum_{n=1}^{N_i} \int_0^{\xi_i} \int_0^{\infty} \left[1 - \frac{\Gamma(\alpha t, \xi_i/\beta_i)}{\Gamma(\alpha t)}\right] f_{X(t_n^*)}(x) dt dx \quad (12)$$

$$E[I_1^{(i)}] = E\left[\sum_{n=1}^{N_i-1} Y_n^{(i)}\right] = \sum_{n=1}^{N_i-1} \frac{\mu_i}{b_i^{n-1}} \quad (13)$$

将上述结果代入  $A(t)$  的计算式, 可以得到式(14)。

$$A(t) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^k \frac{E[I_1^{(i)}]}{E[H_1^{(i)}]}} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^k \left( \sum_{n=1}^{N_i-1} \frac{\mu_i}{b_i^{n-1}} \right) \left\{ \sum_{n=1}^{N_i} \int_0^{\xi_i} \int_0^{\infty} \left[1 - \frac{\Gamma(\alpha t, \xi_i/\beta_i)}{\Gamma(\alpha t)}\right] f_{X(t_n^*)}(x) dt dx \right\}} \quad (14)$$

## 4 算例

为了说明前面提出的问题, 简化计算, 我们不妨用两部串联系统为例对文章模型进行验证。以湖南五凌电力有限公司米坡电厂 1# 机组的给水泵系统为研究对象。该给水泵系统由电机和给水泵两个子系统构成, 根据发电设备状态评估技术及专家意见, 电机的瓦温和给水泵的振动幅值能全面反映各自的状态。因此我们以这两个参数的退化数据作为电机和给水泵的状态参数。从五凌公司提供的状态监测数据中取一部分作为研究的性能退化数据, 如表 1 所示。根据第 3 节提供的方法对退化数据进行拟合, 得到电机和给水泵的两组  $\gamma$  参数值分别为  $(\alpha_1 = 0.218, \beta_1 = 0.75), (\alpha_2 = 0.550, \beta_2 = 0.833)$ 。对于两部串联系统而言, 式(14)变为

$$A(t) = A(N_1, N_2) = 1 \left\{ 1 + \frac{E[I_1^{(1)}]}{E[H_1^{(1)}]} + \frac{E[I_1^{(2)}]}{E[H_1^{(2)}]} \right\} \quad (15)$$

其他的参数设定如下:  $\mu_1 = \mu_2 = 0.8, b_1 = b_2 = 0.9, \xi_1 = 38, \xi_2 = 58$ 。将参数代入式(15), 经过计算可以得到表 2 和图 2 的结果。由图 2 可知, 稳态可用度  $A(t)$  是关于两变量  $(N_1, N_2)$  的单调值, 也就是说, 将时间轴转化为两个部件的维修次数, 随着维修次数的增加, 系统的可用度变小。可以固定其中的一个值, 观察另外一个变量与  $A(t)$  的关系, 例如, 当  $N_1$  取不同的固定值时,  $A(t)$  与  $N_2$  的关系式如图 3 所示。

表 1 给水泵系统状态参数值的变化

Tab. 1 Some data of vibration range value and temperature

| 时间<br>[d] | 状态数据<br>[振动(mm)] | 状态数据<br>[瓦温(°C)] | 时间<br>[d] | 状态数据<br>[振动(mm)] | 状态数据<br>[瓦温(°C)] | 时间<br>[d] | 状态数据<br>[振动(mm)] | 状态数据<br>[瓦温(°C)] | 时间<br>[d] | 状态数据<br>[振动(mm)] | 状态数据<br>[瓦温(°C)] |
|-----------|------------------|------------------|-----------|------------------|------------------|-----------|------------------|------------------|-----------|------------------|------------------|
| 1         | 35.026           | 54.002           | 240       | 37.438           | 57.357           | 400       | 36.205           | 58.005           | 550       | 38.312           | 57.913           |
| 60        | 36.002           | 56.020           | 280       | 37.828           | 57.570           | 440       | 36.367           | 56.337           | 580       | 36.833           | 58.007           |
| 120       | 36.041           | 57.076           | 320       | 38.155           | 57.798           | 480       | 36.775           | 56.549           | 610       | 36.904           | 56.703           |
| 180       | 37.138           | 57.237           | 360       | 36.190           | 57.968           | 520       | 37.647           | 57.225           | 640       | 37.890           | 57.041           |

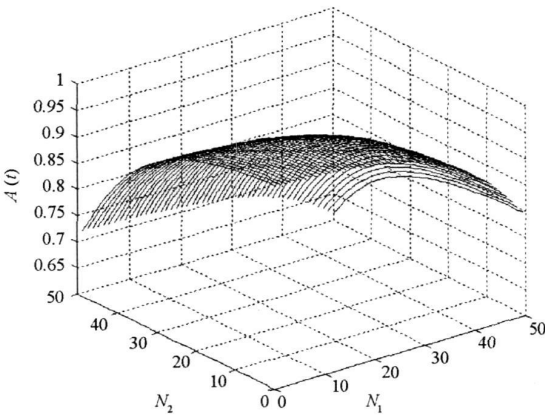


图2 策略 $(N_1, N_2)$ 下的可用度

Fig. 2 The plots availability against  $(N_1, N_2)$

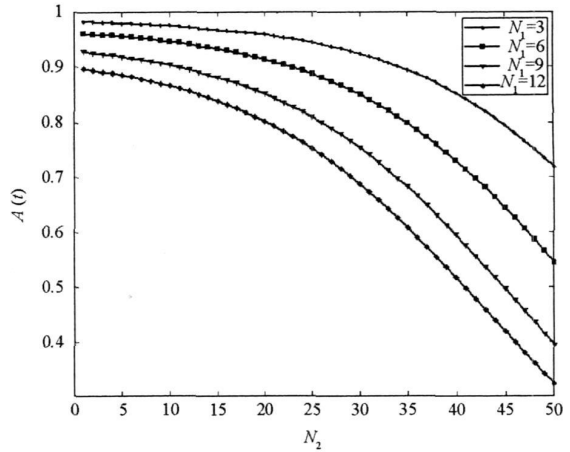


图3  $N_2$ 与可用度的关系

Fig. 3 The plots availability against  $N_2$

相反, 如果设定一定的可用度目标值, 则可以根据可用度得到系统维修更换策略。比方说, 如果规定系统的可用度不能低于 0.98, 由表 2 可知, 部件的最晚更换时机是 $(N_1 = 3, N_2 = 3)$ 。

表2 策略 $(N_1, N_2)$ 下的可用度(部分)

Tab. 2 The values of availability under  $(N_1, N_2)$

| $N_1/N_2$ | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1         | 0.9821 | 0.9817 | 0.9813 | 0.9808 | 0.9803 | 0.9798 | 0.9793 | 0.9787 |
| 2         | 0.9815 | 0.9811 | 0.9807 | 0.9802 | 0.9798 | 0.9792 | 0.9787 | 0.9781 |
| 3         | 0.9808 | 0.9804 | 0.9800 | 0.9796 | 0.9791 | 0.9786 | 0.9781 | 0.9775 |
| 4         | 0.9801 | 0.9798 | 0.9793 | 0.9789 | 0.9784 | 0.9779 | 0.9774 | 0.9768 |
| 5         | 0.9794 | 0.9790 | 0.9786 | 0.9782 | 0.9777 | 0.9772 | 0.9767 | 0.9761 |
| 6         | 0.9786 | 0.9782 | 0.9778 | 0.9774 | 0.9769 | 0.9764 | 0.9759 | 0.9753 |
| 7         | 0.9778 | 0.9774 | 0.9770 | 0.9765 | 0.9761 | 0.9756 | 0.9750 | 0.9744 |

## 5 结束语

本章研究了不完全维修条件下串联可修系统的可用度模型。在目前类似问题的研究文献中, 一般都是将系统看成一个整体来处理, 本文探讨一种考虑部件连续检测的可用度计算方法。该方法采用 gamma 过程刻画部件的退化规律, 为了描述维修效果的“不完全性”, 将维修后的状态初始值设定为随机变量, 维修时间服从几何过程, 这种模型更符合系统的实际情况。然后建立系统长期运行的稳态可用度模型。最后, 给出一个算例, 验证了本文提出模型的正确性和可操作性。

## 参考文献:

[1] Brown M, Proschan F. Imperfect Repair [J]. Application Probability, 1983, 20: 851- 859.  
 [2] Pham H, Wang H. Imperfect Maintenance [J]. European Journal of Operational Research, 1996, 94: 425- 438.  
 [3] Lam Y. A Note on the Optimal Replacement Problem [J]. Advances in Applied Probability, 1988, 20: 479- 482.  
 [4] Lam Y. A Geometric Process Maintenance Model with Preventive Repair [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 182: 806- 819.  
 [5] Zhang Y L, Wang G J. A Bivariate Optimal Replacement Policy for a Multistate Repairable System [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007, 92: 535- 542.  
 [6] Wang G J, Zhang Y L. An Optimal Replacement Policy for a Two-component Series System Assuming Geometric Process Repair [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2007, 54: 192- 202.  
 [7] Kijima M. Some Results for Repairable System with General Repair [J]. Journal of Applied Probability, 1989, 26: 89- 102.

- [8] Martorell S, Sanchez A, Serradell V. Age-dependent Reliability Model Considering Effects of Maintenance and Working Conditions [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1999, 64: 19– 31.
- [9] Sheu S H, Yeh R H, et al. A Bayesian Perspective on Age Replacement with Minimal Repair [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1999, 65: 55– 64.
- [10] Chiang J H, Yuan J. Optimal Maintenance Policy for a Markovian System under Periodic Inspection [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 71: 165– 172.
- [11] Jiang R, Ji P. Age Replacement Policy: A Multi-attribute Value Model [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 76: 311– 318.
- [12] Lyer S. Availability Results for Imperfect repair [J]. Sankhya: the Indian Journal of Statistics, 1992, 54(2): 249– 259.
- [13] Zhao M. Availability for Repairable Components and Series System [J]. IEEE Transactions Reliability, 1994, 43(2): 329– 334.
- [14] Wang H, Pham H. Availability and Maintenance of Series Systems Subject to Imperfect Repair and Correlated Failure and Repair [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174: 1706– 1722.
- [15] 刘元生, 张传富, 张童, 等. 基于 Markov 链的分布式仿真系统最佳检查点间隔研究[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(5): 73– 77.
- [16] Grall A, Berenguer C, Dieulle L. A Condition-based Maintenance Policy for Stochastically Deteriorating Systems [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 76: 167– 180.
- [17] Bloch-Mercier S. A Preventive Maintenance Policy with Sequential Checking Procedure for a Markov Deteriorating System [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 147: 548– 576.
- [18] Van Noortwijk J M, Van der Weide J A M, et al. Gamma Processes and Peaks over-threshold Distributions for Time dependent Reliability [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007, 92: 1651– 1658.
- [19] Kallen M J, Van Noortwijk J M. Optimal Maintenance Decisions Under Imperfect Inspection [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 90: 177– 185.
- [20] Liao H T, Elsayed A, Chan L Y. Maintenance of Continuously Monitored Degrading Systems [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 175: 821– 835.
- [21] Ross S M. Stochastic Process[M]. 2<sup>nd</sup> ed., New York, Wiley, 1996.

(上接第 76 页)

## 4 结论

本文针对空间刚柔耦合动力学系统的多目标优化控制问题, 提出基于最小时间和最少耗能的多目标优化控制模型; 应用 MOEA/D 针对 rest-to-rest 空间机动问题仿真分析了柔性结构系统机动的多目标优化控制问题。本文的研究成果可以应用于刚柔耦合航天器的姿态机动优化设计之中, 具有一定的工程应用价值。

## 参考文献:

- [1] 马兴瑞, 王本利, 苟兴宇. 航天器动力学——若干问题进展及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] Singh G, Kabanha P T, McClarnoch N H. Planar Time-optimal Control, Rest-to-rest Slewing of Flexible Spacecraft [J]. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1989, 12(1): 71– 81.
- [3] Wie B, Sinha R, Sunkel J, et al. Robust Fuel and Time-optimal Control of Uncertain Flexible Space Structures[C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 1993: 939– 948.
- [4] Hartmann R, Singh T. Fuel/Time Optimal Control of Flexible Space Structures[C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 1995: 91– 101.
- [5] Sunar M, Kahraman R. A Comparative Study of Multiobjective Optimization Methods in Structural Edesign [J]. Turk. J. Engin. Environ. Sci., 2001(25): 69– 78.
- [6] Mainenti I, DeSouza L C G, Sousa F L D, et al. Satellite Attitude Control Using the Generalized Extremal Optimization with a Multi-objective Approach [C]// Proceedings of COBEM, 2007.
- [7] 黄敏, 陈国龙, 郭文忠. 基于表现型共享的多目标粒子群算法研究 [J]. 福州大学学报, 2007, 35(3): 365– 368.
- [8] Zhang Q, Li H. MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006.
- [9] Singh T. Fuel/Time Optimal Control of the Benchmark Problem [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1995, 18(6): 1225– 1230.
- [10] 崔逊学. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.