

一种新的可修系统故障率模型

郑锐, 张英芝, 申桂香, 何宇, 邵娜

(吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130022)

摘要:在可修系统总体的故障率函数的基础上, 针对总体中的系统个体, 提出一种新的故障率模型, 文中结合实例给出详细运算过程。理论推导和实际应用表明, 这种故障率模型能够准确、有效地描述系统个体在其寿命周期任意时刻的可靠性状态, 对于该系统个体的可靠性预测和维修策略的制定具有重要的指导意义。

关键词:机床; 故障率; 可修系统; 可靠性预测; 维修策略

中图分类号: TG659 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2009)Sup. 2-0324-04

Research on a new failure rate model of repairable system

ZHENG Rui, ZHANG Yin-zhi, SHEN Gui-xiang, HE Yu, SHAO Na

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on the failure rate function of repairable system collectivity, a new failure rate model that focuses on system unit is presented by this paper, and an example is used to show the operation process. Both the theory and application show that this model could precisely describe the reliability state of system unit in any time of its life time. More over, it has great value in reliability predication and forming maintenance strategy.

Key words: machine tool; failure rate; repairable system; reliability prediction; maintenance strategy

故障率是可靠性研究中的重要特征量^[1], 是表示产品工作到某一时刻后, 在单位时间内发生故障的概率^[2]。在可维修系统的研究中, 故障率曲线的形状往往能揭示某种失效机理或对应于某一特定的使用阶段。

典型的故障率曲线把系统故障分为早期故障期、偶然故障期和耗损故障期。本文利用可修系统总体的大量故障数据, 并在其故障率函数的基础上, 针对系统总体中的系统个体, 提出一种新的故障率模型。这种模型可以更准确、有效地描述系统个体在其寿命周期任意时刻的可靠性状态。

1 新的故障率模型

1.1 设备的故障率函数及其相关概念

可靠性是指系统在规定的环境和运转条件下, 在规定的时间内完成规定的功能的能力。可靠性函数有 4 个基本函数, 它们之间存在转换关系表达式为

可靠性函数

$$R(t) = P\{T > t\} \quad (1)$$

累积分布函数

$$F(t) = P\{T \leq t\} = 1 - R(t) \quad (2)$$

收稿日期: 2008-11-18.

基金项目: “863”国家高技术研究发展计划项目(2007AA04Z402); 国家自然科学基金项目(50875110); “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项项目(2009ZX04001-021-04)(2009ZX04014-011).

作者简介: 郑锐(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 数控装备可信性技术. E-mail: dreamtrace@foxmail.com

通信作者: 申桂香(1957-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向: 数控装备可信性技术. E-mail: shengx@jlu.edu.cn

概率密度函数

$$f(t) = dF(t)/dt = -dR(t)/dt \quad (3)$$

故障率函数

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{t < T < t + \Delta t \mid T > t\}}{\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4)$$

可靠性函数是故障时间的函数,而故障发生时间和故障间隔时间是两种常用的故障时间。本文将综合这两种时间推出一种新的故障率模型。下面给出这两种时间的概念^[3]。

若设备从时刻 T_0 开始工作,在时刻 T_1 发生第一次故障,在时刻 T_2 发生第二次故障。如此继续下去,得到一组随机时间序列: $0 = T_0 < T_1 < T_2 < \dots < T_n < \dots$ 。

故障发生时间是指系统从开始工作到发生故障的时间间隔,即第 i 次故障的故障发生时间为 T_i ,即 $t_i = T_i$ 。故障间隔时间是指相邻两次故障的时间间隔。第 i 次故障的故障间隔时间 t'_i 的表达式为

$$t'_i = T_i - T_{i-1}, i = 1, 2, \dots \quad (5)$$

为了叙述方便,把故障发生时间和故障间隔时间的可靠性基本函数分别记为: $R(t)$ 、 $F(t)$ 、 $f(t)$ 、 $\lambda(t)$ 和 $R^*(t')$ 、 $F^*(t')$ 、 $f^*(t')$ 、 $\lambda^*(t')$ 。故障发生时间的可靠性函数表示的是设备在整个寿命周期内的可靠性状态,而故障间隔时间的可靠性函数表示的是设备修复以后的可靠性状态。

本文提出的故障率模型是在系统总体可靠性分析的基础上针对系统个体提出的。系统总体是系统个体的集合,系统总体中的个体是独立且同分布的。

1.2 新的故障率模型

新的故障率函数是针对系统个体提出的,但它依赖于系统总体的可靠性函数。本文假设已经对系统总体进行了可靠性分析,并分别得到相应的可靠性函数 $R(t)$ 、 $F(t)$ 、 $f(t)$ 、 $\lambda(t)$ 和 $R^*(t')$ 、 $F^*(t')$ 、 $f^*(t')$ 、 $\lambda^*(t')$ 。具体的分析过程请参照文献[4-5]。

下面考虑系统个体 i 。设 t 为在 T_i 之后并且在 T_{i+1} 之前的某时刻,即 $T_i < t < T_{i+1}$ 。因为时刻 t 处在两次故障之间,考虑故障间隔时间的意义,得出系统个体 i 在时刻 t 发生故障的概率为

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{T > t + \Delta t\} - P\{T > t\}}{\Delta t} =$$

$$f^*(t - T_i), T_i < t < T_{i+1} \quad (6)$$

系统个体 i 在时刻 t 的故障率函数 $r(t)$ 为

$$r(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{t < T < t + \Delta t \mid T > t\}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{T > t + \Delta t\} - P\{T > t\}}{\Delta t \cdot P\{T > t\}} = \frac{1}{R(t)} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{T > t + \Delta t\} - P\{T > t\}}{\Delta t} \quad (7)$$

将式(6)带入式(7)可得

$$r(t) = \frac{f^*(t - T_i)}{R(t)}, T_i < t < T_{i+1} \quad (8)$$

令 $\Delta t = t - T_i$,即 Δt 为 t 与 T_i 的时间间隔,则式(8)可以表示为

$$r(t) = \frac{f^*(\Delta t)}{R(t)}, T_i < t < T_{i+1} \quad (9)$$

由式(9)可见, $r(t)$ 是系统总体的可靠性规律在特定的系统个体作用下的结果。对比式(4)和式(9)各自的意义,可得出以下结论:

(1) $\lambda(t)$ 针对的是系统总体。它表示系统开始工作运行到时刻 t 之后的单位时间内发生故障的概率。它是对系统总体的大量故障数据进行分析之后得到的结果,反映的是该类系统在整个寿命周期内的可靠性规律,对于该类系统的设计、改进,乃至可靠性提高具有重要参考意义。

(2) $\lambda^*(t')$ 针对的也是系统总体。它表示系统从故障修复后开始运行时间 t' 之后的单位时间内发生故障的概率。它也是对系统总体的大量故障数据进行分析之后得到的结果,反映的是该类系统在每次故障修复后的可靠性规律。对于该类系统的设计、改进和提高可靠性具有一定的参考意义。

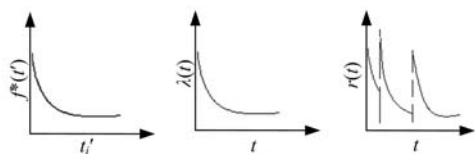
(3) $r(t)$ 针对的是系统个体。它表示特定的系统个体运行到时刻 t 之后单位时间内发生故障的概率。 $r(t)$ 与 $\lambda(t)$ 都能反映系统运行到某个时间之后的可靠性状况,不同的是, $r(t)$ 的对象是同类系统中的特定个体。而且, $r(t)$ 受故障发生时间的影响,在 $t = T_i$ 处已经不再是连续的函数。 $r(t)$ 与 $\lambda^*(t')$ 都能反映系统在故障修复后随时间变化的可靠性情况,区别在于: $\lambda^*(t')$ 认为系统在整个寿命周期内故障发生后的故障率曲线都是确定的,而 $r(t)$ 描述的系统个体的故障率曲线是随着故障发生的时间和所处寿命周期中的时间的不同而变化的。显然 $\lambda^*(t')$ 对系统故障率的描述是不准确的。综上所述, $r(t)$ 是有效利用系

统总体的故障数据,对系统总体的某一系统个体进行可靠性描述的最佳特征量。可以在综合大量系统总体故障数据的基础上,更准确、更有效地描述系统个体在其寿命周期任意时刻的可靠性状态,对当前运行个体的可靠性进行预测,并且可以依照预测结果制定相应的维修策略,更具有针对性地指导该系统个体的维修。

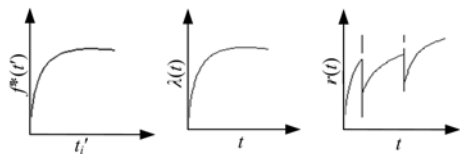
1.3 $r(t)$ 的两种典型情况

(1)如果 $f^*(t')$ 是单调递减的函数, $r(t)$ 在 T_i 时刻迅速升高,然后逐渐下降。 $f^*(t')$ 、 $\lambda(t)$ 、 $r(t)$ 的曲线示意图,如图 1(a)所示。由图 1(a)可以看出, $f^*(t')$ 单调递减的情况下,故障的维修会给系统带来更高的故障率。正如文献[6]所说的:“经常修理或者定期大修,不一定会防止设备故障发生,反而可能将初期的高故障率引入稳定的系统中,增加设备的高故障率”。因此,以可靠性为中心的维修(RCM)认为:除非故障后果极为严重,必须采取某种措施预防故障,以降低后果的影响,否则对于后果较轻的故障需要放弃预防维修的策略。这种维修策略某种情况下是合理的。

(2)如果 $f^*(t')$ 是单调递增的函数, $r(t)$ 在 T_i 时间迅速减小,然后逐渐上升。此时,故障的维修会减少系统的故障率。 $f^*(t')$ 、 $\lambda(t)$ 、 $r(t)$ 的曲线示意图,如图 1(b)所示。



(a) $f^*(t')$ 为单调递减函数



(b) $f^*(t')$ 为单调递增函数

图 1 $f^*(t')$ 、 $\lambda(t)$ 、 $r(t)$ 的曲线

Fig.1 Curve of $f^*(t')$ 、 $\lambda(t)$ 、 $r(t)$

2 故障率模型的应用

本文以现场采集的 20 台可修设备一年多的故障数据为基础,研究其这一阶段的故障率曲线变化规律,具体试验数据见表 1。通过对其故障时间和故障间隔时间分别进行参数估计,得到可靠性基本函数。其中,故障时间服从威布尔两重

分段函数分布,故障间隔时间服从两参数威布尔分布。本文按照需求仅仅给出 $r(t)$ 、 $\lambda(t)$ 和 $f^*(t')$ 的函数表达式以及 $\lambda(t)$ 和 $f^*(t')$ 的曲线图(图 2 和图 3)。

表 1 可修设备的故障数据

Table 1 Failure data of some repairable device

编号	故障发生时间(h)					
1	2320	2494	3083	3334		
2	2160	2445	2817	2964		
3	2881	3191	3911			
4	1871	2163	2307	2881		
5	827	973	1160	2507		
6	253	293	1227	1280		
7	555	1245	1560	2240	3376	3857
8	1261	1456	2836	3915		
9	526	635	826	1456		
10	870	1650	1710			
11	1380	1560	1710	1890		
12	1098	1658	3658			
13	951	1594	1903	2555		
14	212	1048	1072	1218	1352	1810 2088 2407
15	2465	2865	3115			
16	222	395	432	1072	1341	1604 1765 3658
17	45	71	92	1035	1740	2058 2811
18	33	74	245	488		
19	285	1098	1233	1235	1311	1979 2406 2901
20	191	312	379	541	1196	1301 1885 2205
	2258	2688	3152	3261	3689	
31	286	465	2499			

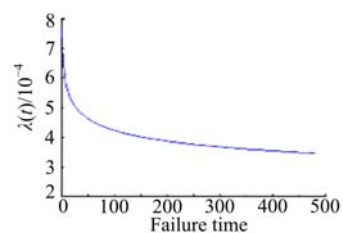


图 2 $\lambda(t)$ 的曲线图

Fig.2 Curve of $\lambda(t)$

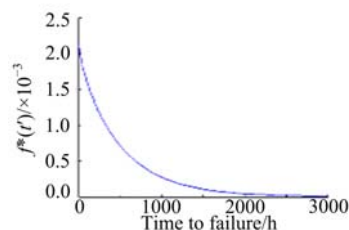


图 3 $f^*(t')$ 的曲线图

Fig.3 Curve of $f^*(t')$

$$r(t) = \begin{cases} \exp \left[- \left(\frac{t}{3221.7} \right)^{0.97} \right], & 0 \leq t < 687 \text{ h} \\ 0.91 \exp \left[- \left(\frac{t}{1959.3} \right)^{1.66} \right], & t \geq 687 \text{ h} \end{cases} \quad (10)$$

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{0.97}{3221.7} \left(\frac{t}{3221.7} \right)^{-0.03}, & 0 \leq t < 687 \text{ h} \\ \frac{1.51}{1959.3} \left(\frac{t}{1959.3} \right)^{0.66}, & t \geq 687 \text{ h} \end{cases} \quad (11)$$

$$f^*(t') = \frac{0.97}{515.2} \left(\frac{t'}{515.2} \right)^{-0.03} \exp \left[- \left(\frac{t'}{515.2} \right)^{0.97} \right] \quad (12)$$

下面以 20 号设备为例,介绍本文故障率模型的应用。

由表 1 可得,20 号设备有 4 个故障发生时间,分别为 31、286、465 和 2499 h。结合式(9)~式(12),可得 20 号设备在其寿命运行期间的故障率函数为:

$$r(t) = \begin{cases} \frac{0.97}{3221.7} \left(\frac{t}{3221.7} \right)^{-0.03} & [0,31) \\ \frac{0.97}{515.2} \left(\frac{t-31}{515.2} \right)^{-0.03} \exp \left[\left(\frac{t}{3221.7} \right)^{0.97} - \left(\frac{t-31}{515.2} \right)^{0.97} \right] & [31,286) \\ \frac{0.97}{515.2} \left(\frac{t-286}{515.2} \right)^{-0.03} \exp \left[\left(\frac{t}{3221.7} \right)^{0.97} - \left(\frac{t-286}{515.2} \right)^{0.97} \right] & [286,465) \\ \frac{0.97}{515.2} \left(\frac{t-465}{515.2} \right)^{-0.03} \exp \left[\left(\frac{t}{3221.7} \right)^{0.97} - \left(\frac{t-465}{515.2} \right)^{0.97} \right] & [465,687) \\ \frac{0.97}{515.2 \times 0.91} \left(\frac{t-465}{515.2} \right)^{-0.03} \exp \left[\left(\frac{t}{1959.3} \right)^{1.66} - \left(\frac{t-465}{515.2} \right)^{0.97} \right] & [687,2499) \\ \frac{0.97}{515.2 \times 0.91} \left(\frac{t-2499}{515.2} \right)^{-0.03} \exp \left[\left(\frac{t}{1959.3} \right)^{1.66} - \left(\frac{t-2499}{515.2} \right)^{0.97} \right] & [2499, \infty) \end{cases}$$

故障率曲线如图 4 所示。

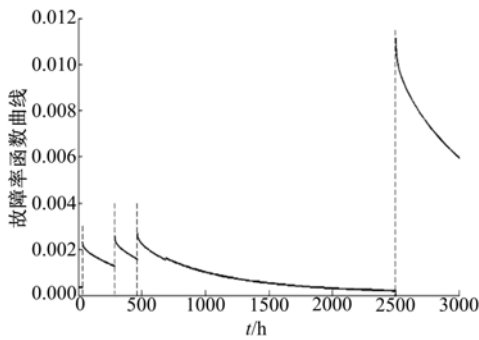


图 4 20 号设备的故障率曲线
Fig. 4 Failure rate curve of No 20 device

3 结束语

本文在可修系统总体的故障率函数的基础上,针对总体中的系统个体,提出一种新的故障率模型,文中结合实例给出详细运算过程。理论推导和实际应用表明,这种故障率模型能够准确、有效地描述系统个体在其寿命周期任意时刻的可靠性状态,这对于该系统个体的可靠性预测和维修策略的制定具有重要的指导意义。

参考文献:

[1] 孙进康, 郦正能. 可修复系统故障率分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(5): 578-581.
Sun Jin-kang, Li Zheng-neng. Failure-rate analysis of repairable systems[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(5): 578-581.

[2] 吴波, 丁毓峰, 黎明发. 机械系统可靠性维修及决策模型[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006, 12

[3] 徐安, 乔向明. 基于更新理论的复杂设备故障率表达[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(3): 359-362.
Xu An, Qiao Xiang-ming. Failure rate expression of complex equipment based on renewal theory[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2006, 36(3): 359-362.

[4] 蒋仁言, 左明健. 可靠性模型与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

[5] 蒋仁言. 威布尔模型族——特性、参数估计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[6] John Moubray. 以可靠性为中心的维修[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.