

基于经济维修费用的 RCM 决策模型及应用^{*}

黄双华,周双全

(海军工程大学 电子工程学院,武汉 430033)

摘要:通过模拟3种常见故障分布函数——指数分布、威布尔分布、正态分布的蒙特卡洛仿真图,比较3种不同的故障分布对判定预防性维修周期的影响.建立基于经济维修费用的RCM维修决策模型,以经济维修成本最低为目标,以设备的可用度为约束条件,寻求设备的最佳预防性维修时间.采用蒙特卡洛仿真对模型进行求解,实现维修周期和经济维修成本的最优化,并结合某一设备的可靠性框图和数据参数,验证模型的有效性.

关键词:以可靠性为中心的维修;蒙特卡洛;经济维修费用;可用度

中图分类号: E911

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2009)12-0007-03

以可靠性为中心的维修(RCM)是目前国际上通用的用以确定设备预防性维修需求、优化维修制度的一种系统工程过程^[1].近年来,有关RCM的决策建模、效益评价以及计算机辅助维修策略制定受到了人们关注.如文献[2]中给出了RCM中4类可用度的求解方法;文献[3]中对电子装备RCM模型中的维修决策进行了研究;文献[4]中研究了基于广义维修成本的预防性维修周期决策模型,在满足可用度的同时使总维修费用最小.

1 RCM的基本原理

RCM以系统功能与故障分析为基础,在明确系统故障、故障后果以及故障严重程度的前提下,采用现场故障数据统计、专家评估、定量化建模等手段,应用逻辑决策方法作出有针对性的维修决策,以最低的维修成本保持和恢复设备的固有可靠性,使设备维修更具科学性.RCM有利于减少停机时间,提高设备可用度;维修的可控性强;有利于降低维修费用;备件库存易控制.同时,RCM也有许多缺点,主要表现为:实施过程复杂,需要专业的FMECA人员,应用难度大;常常忽视对设备非计划性的临时维修工作;忽视备件供应对维修工作的影响等.

2 蒙特卡洛仿真

通常为获得可靠性数据要做统计试验,这就要求必须进行大量独立重复的试验,这对于大型复杂系统而言,不仅价格昂贵,而且在时间上也不可行.计算机的出现,使人们可以模仿复杂随机系统的行为,通过建立仿真模型,在计算机上进行独立重复试验,通过计算推断得到系统参数的解,这就是蒙特卡洛仿真.

蒙特卡洛仿真的基本思想是:当试验次数足够多时,某一事件出现的频率近似于该事件发生的概率.也就是说蒙特卡洛方法是在计算机上实现抽样方法,用仿真模型

代替实际系统进行大量的试验,目的是力图用大量的抽样试验的统计结果来逼近总体的统计特征^[5].由于产品发生故障的概率是随机的,因此故障发生的时间可以用随机变量来描述,只要产生符合故障发生规律的随机变量就可以用蒙特卡洛仿真来对系统进行仿真计算.

蒙特卡洛仿真属于离散事件仿真范畴,仿真过程中要用随机变量来代表事件中的随机事件进行抽样试验.仿真总体上需要以下步骤:

- 1) 系统分析.通过对实际系统的分析抽样出系统中的具体随机性质的部分.
- 2) 建立仿真模型.建立含有随机变量的数学表达式以表征实际系统的随机性质.
- 3) 仿真运行.编制计算机仿真程序并进行计算.
- 4) 统计推断.通过对计算结果的统计分析得出系统的统计特征.

蒙特卡洛仿真过程见图1^[1].

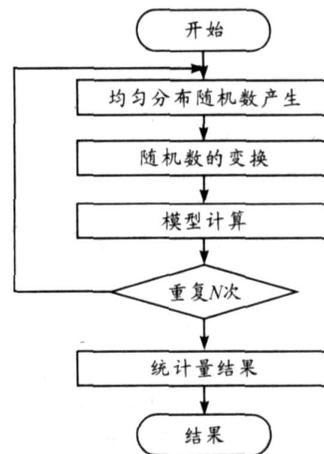


图1 蒙特卡洛仿真过程

* 收稿日期:2009-10-09

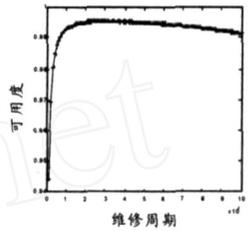
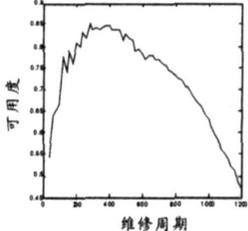
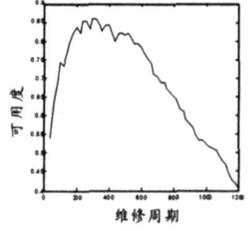
作者简介:黄双华(1968—),男,湖北汉川人,副教授,主要从事海军电子装备综合保障研究;周双全(1985—),男,湖南浏阳人,硕士研究生,主要从事海军电子装备综合保障研究.

3 3种常见故障分布及仿真

在讨论产品寿命、故障或修复时间时,经常使用分布

来描述其随机性. 维修决策模型中常用的概率分布一般有3种. 表1介绍了3种常见故障分布的密度函数、服从这些分布的产品以及3种分布的蒙特卡洛仿真曲线.

表1 3种不同故障分布函数及其仿真

分布函数	密度函数 $f(t)$	服从分布的产品	蒙特卡洛仿真曲线
指数分布	$f(t) = \begin{cases} e^{-t}, & t > 0 \\ 0, & t = 0 \end{cases}$	恒定故障率的部件、由随机高应力导致故障的部件等	
威布尔分布	$f(t) = \begin{cases} -(\frac{t}{\mu})^{\beta-1} e^{-(\frac{t}{\mu})^\beta}, & t > 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$	滚珠轴承、继电器、开关、断路器、齿轮、活门、材料疲劳部件等	
正态分布	$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	绝缘体、半导体器件、金属疲劳部件等	

由表1可以看出,服从指数分布的部件的可用度受维修周期的变化影响不大,而服从威布尔分布和正态分布的设备易受维修周期 T 的影响,这主要是由于指数分布的故障率是恒定不变的,而威布尔等分布的故障率会随着时间慢慢增大,当预防性维修周期很长时,设备故障率将迅速上升,进一步导致设备可用度的降低. RCM 进行维修决策的依据为:在满足设备可用度的前提下,优化预防性维修周期 T ,使得经济维修费用最低.

令 t 为在第 j 次仿真运行中系统的工作时间. 若在 1 个预防维修周期内系统无故障发生,则在 $t = T$ 时进行预防维修;若在 1 个预防维修周期内系统发生 k 次故障,每次故障后立即进行事后维修, t_k 为最后一次故障(第 k 次)修复后,系统重新开始工作至预防维修时的间隔,此时存在关系式

$$t_1 + t_2 + \dots + t_k + T = T$$

进行 N 次仿真,得到设备的可用度为

$$A = \frac{NT}{NT + \sum_{j=1}^N T_{cj} + \sum_{j=1}^N T_{pj}}$$

4 基于经济费用的 RCM 维修决策模型

4.1 可用度模型

图2^[3]中 1~2 表示系统第 j 次仿真运行过程,其中: T 为预防维修周期; t_1, t_2, \dots, t_k 为第 j 次仿真运行中系统寿命的抽样值; c_1, c_2, \dots, c_k 为第 j 次仿真运行中,事后维修时间的抽样值; t_{pj} 为第 j 次仿真运行中预防维修时间的抽样值.

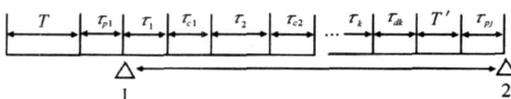


图2 设备运行机制

4.2 设备维修经济费用模型

设备维修费用可表示为

$$C = \frac{C}{\text{总时间}}$$

式中: C 为装备广义维修费用^[4], $C = C_{rep} + C_d + C_s + C_p + C_{pl}$; C_{rep} 为事后维修费用, $C_{rep} = \sum_{i=1}^N n_i C_{rep}(i)$, $C_{rep}(i)$ 为第 i 个部件的一次维修费用, n_i 为第 i 个部件的维修次数, $n_i = \int_0^T f_i(t) dt$; C_d 为设备停工损失, $C_d = d T_s$, d 为设备单位停工时间的损失系数, T_s 为停机时间, $T_s = \sum_{j=1}^N T_{cj} +$

T_{pj} ; C_s 为因部件故障产生的损失, $C_s = \sum_{i=1}^N n_i C_s(i)$; C_p 为系统预防性维修费用, $C_p = \sum_{i=1}^N C_p(i)$; C_{pl} 为部件更换费用, $C_{pl} = \sum_{i=1}^N C_{pl}(i)$; $i(t)$ 为第 i 个部件的故障率.

5 模型应用实例

图 3 为某一设备可靠性构造框图,各零件的预防性维修时间和故障事后维修时间分别服从 $\lambda = 50$ 和 $\lambda = 100$ 指数分布,取 $d = 6 \times 10^2$ 元/h,其他参数如表 2 和表 3 所示,其中 $W(\lambda, \mu)$ 为威布尔分布, $N(\mu, \sigma)$ 为正态分布.

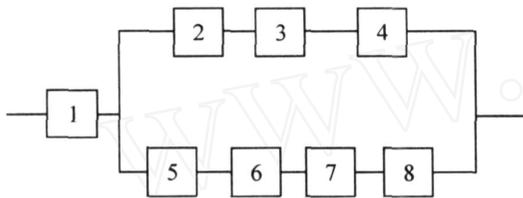


图 3 设备可靠性框图

表 2 零件寿命分布特征参数 h

零件	分布参数
1	$W(\lambda = 1\ 500, \mu = 2)$
2,3	$W(\lambda = 1\ 000, \mu = 2)$
4	$N(\mu = 1\ 000, \sigma = 80)$
5,6	$N(\mu = 2\ 500, \sigma = 150)$
7,8	$W(\lambda = 2\ 000, \mu = 2)$

表 3 零件维修参数 ($\times 10^3$ 元)

零件	$C_{rep}(i)$	$C_p(i)$	$C_s(i)$	$C_{pl}(i)$
1	2	1	$N(\mu = 8, \sigma = 1)$	20
2,3	3	1	$N(\mu = 10, \sigma = 1)$	30
4,5	2	1	$N(\mu = 6, \sigma = 1)$	20
6	5	2	$N(\mu = 15, \sigma = 1)$	50
7	3	1	$N(\mu = 12, \sigma = 1)$	30
8	2	1	$N(\mu = 6, \sigma = 1)$	20

仿真结果如图 4,5 所示. 设该设备运行允许的最低可用度为 0.8. 由图 4 可知,满足可用度要求的维修周期必须在点 A ($T = 231$ h)和点 C ($T = 768$ h)之间,点 B ($T = 362$ h)设备可用度达到最大值为 0.89. 图 5 是设备经济维修费用与维修周期的关系图. 图中对应的 A, B, C 3 点的费用分别为 5.83×10^3 元/h, 3.75×10^3 元/h 和 2.17×10^3 元/h. 在 B 和 C 之间寻求的最低费用点 D ($T = 748$ h),此时设备的经济维修费用最低,为 2.13×10^3 元,此时设备的可用度为 0.81. 因此,该设备的最优维修周期为 748 h.

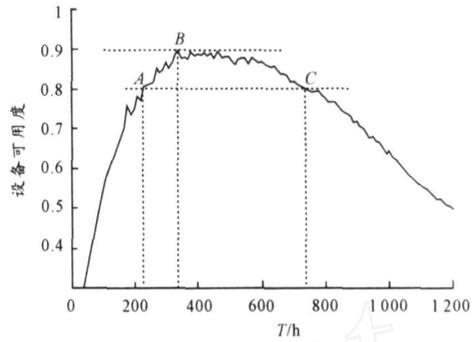


图 4 设备可用度与维修周期优化

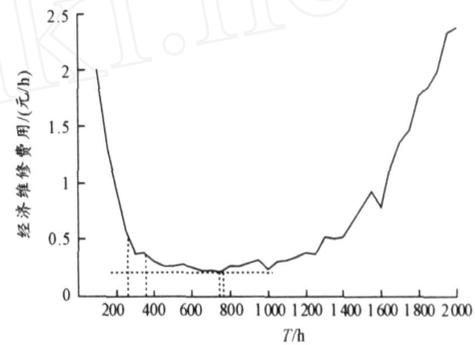


图 5 经济维修费用与维修周期优化

6 结束语

以可靠性为中心的维修 (RCM) 在保证设备一定可用度的同时,给我们提供了判定预防性维修周期的方法,它既解决了事后维修的被动性,又解决了定时维修带来的盲目性,最大限度地节约了维修经费. 本文中提出了经济维修费用周期决策模型,利用蒙特卡洛方法由计算机仿真求解,得到最适宜的预防性维修周期,并利用某设备的维修数据验证了该方法实施的有效性,希望本文中提供的模型能为 RCM 的实施提供新的途径.

参考文献:

- [1] 甘茂治,康建设,高崎. 军用装备维修工程学[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [2] 贾希胜. 以可靠性为中心的维修决策模型[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [3] 韩东,李石磊. 基于可用度的电子装备预防维修周期研究[J]. 机械工程学院学报,2008(5):12-14.
- [4] 苏春,黄苗. 以可靠性为中心的维修成本优化模型及其应用[J]. 机械科学与技术,2007(12):1556-1559.
- [5] 史慧会,曲小钢. 蒙特卡罗方法在热传导方程中的应用[J]. 重庆工学院学报:自然科学,2008,22(11):101-103.