

蒙特卡洛模拟法在复杂系统可靠性仿真中的应用研究

曾 畅¹, 方 强², 吴 军¹, 朱勇猛¹, 关 静²

(1. 华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 武汉 430074;

2. 中国舰船研究设计中心, 武汉 430064)

摘要:针对蒙特卡洛模拟法应用于复杂系统可靠性仿真分析时遇到的仿真收敛速度慢和精度低等缺陷,建立了复杂系统可靠性仿真模型,使用线性同余发生器抽样产生随机事件,根据事件对任务的影响来推算系统的任务可靠度,并与数学解析方法计算的结果进行对比;结果显示,提出的蒙特卡洛模拟法进行复杂系统可靠性仿真分析时所得到的结果误差在允许范围内,且收敛效果较好。

关键词:蒙特卡洛;复杂系统;可靠性仿真

本文引用格式:曾畅,方强,吴军,等.蒙特卡洛模拟法在复杂系统可靠性仿真中的应用研究[J].四川兵工学报,2015(9):65-68.

Citation format:ZENG Chang, FANG Qiang, WU Jun, et al. Research on Monte Carlo Method in Reliability Simulation of Complex Systems[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015(9):65-68.

中图分类号:TB114

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2015)09-0065-04

Research on Monte Carlo Method in Reliability Simulation of Complex Systems

ZENG Chang¹, FANG Qiang², WU Jun¹, Zhu Yong-meng¹, GUAN Jing²

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

Abstract: In order to deal with slow convergence and low precision defects of Monte Carlo method applied to analyze the reliability of complex systems, a reliability simulation model of a complex system was built. Then a linear congruential generator was used to generate random sampling events. And then, the task reliability of the system was reduced according to the influence of the events on the task. Comparisons were made between simulated results and mathematical results. It was shown that the Monte Carlo method has higher precision and a well-performed convergence.

Key words: Monte Carlo; complex systems; reliability simulation

可靠性是衡量复杂系统性能优劣的关键指标之一,对其进行科学地分析与评价,可以为复杂系统的诊断、改进和维修提供支撑,进而降低因系统故障而引起的各类事故风险。目前,复杂系统可靠性分析方法主要有:基于可靠性框图和

故障树的图形演绎法、基于概率论和马尔可夫链的数学解析法、基于事件和时间的仿真法^[1]。其中,基于可靠性框图和故障树的图形演绎法由于受到 NP 组合爆炸问题的困扰,往往难以得到满意的分析结果;基于概率论和马尔可夫链的数

收稿日期:2015-03-05

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51475189);中央高校基本科研业务费专项资金资助课题

作者简介:曾畅(1989—),男,硕士研究生,主要从事装备综合保障技术研究。

学解析法由于其建模与模型求解较困难,影响了其适用范围;而基于事件和时间的仿真法由于具有应用灵活、直接简单、且易于编程实现等特点,尤其适用于图形演绎法和解析法等难以解决的大型复杂系统可靠性仿真问题,特别是随着计算机信息处理能力的大幅提升,仿真法逐渐成为大型复杂系统可靠性分析的有效手段^[2-5]。

蒙特卡洛模拟法是一种基于随机变量的统计试验或随机模拟方法,它以大数定理为理论基础,以随机数为基本工具,能够处理包含不同寿命分布与可靠性模型的复杂系统可靠性分析问题,且能够反映出系统故障的随机性,因而被广泛应用于可靠性仿真领域^[6]。然而,蒙特卡洛模拟法存在收敛速度慢和仿真精度低等缺陷,前人进行了大量研究来提高仿真收敛速度^[7],而对仿真精度的验证研究较少。为了验证蒙特卡洛模拟法在复杂系统可靠性分析中的仿真结果是否真实可靠,本文采用蒙特卡洛方法模拟复杂系统执行使命任务过程,并将其可靠性仿真结果与解析法计算结果进行对比。

1 复杂系统可靠性分析模型

复杂系统是由众多的分系统、组件和元件按一定方式构成的。由于系统组成结构的庞大,各元件寿命与维修分布及数据形式的多样性,使得复杂系统可靠性分析极为繁琐^[8]。可靠性分析模型是分析复杂系统可靠性最有效手段,为此首先建立了某一复杂系统可靠性分析模型^[9]。如图1所示,该系统是由众多单元通过串联、并联、旁联和冷储备等逻辑形式组成。每个单元即可以表示元件,也可以表示组件或者分系统。 A 表示串联单元, B 表示并联单元, C 表示冷储备单元, D 表示 n 中取 k 表决单元,其中 i, j, m 和 n 为非负整数。分析系统可靠性时,从元件可靠性分析出发,依据系统可靠性分析模型,自下而上依次分析组件、分系统和整个系统的可靠性。

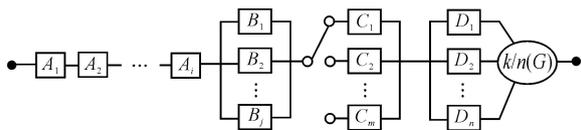


图1 复杂系统可靠性分析模型示例

对于图1所示的复杂系统,设串联单元、并联单元、冷储备单元和表决单元的可靠度分别为 $R_A(t)$ 、 $R_B(t)$ 、 $R_C(t)$ 、 $R_D(t)$,则整个系统的可靠度 $R(t)$ 为

$$R(t) = R_A(t) \cdot R_B(t) \cdot R_C(t) \cdot R_D(t)$$

其中,串联单元的可靠度 $R_A(t)$ 为 $R_A(t) = \prod_{k=1}^i R_{A_k}(t)$;并联单元的可靠度 $R_B(t)$ 为 $R_B(t) = 1 - \prod_{k=1}^j (1 - R_{A_k}(t))$;设冷储备单元中 m 个元件均服从指数分布,故障率为 λ ,则冷储备单元可靠度 $R_C(t)$ 为 $R_C(t) = \sum_{k=0}^{m-1} \frac{(\lambda t)^k}{k!} \exp(-\lambda t)$;表决

$$\text{单元的可靠度 } R_D(t) = \sum_{j=k}^n \{R_i^j [1 - R_i(t)]^{n-j}\}。$$

若已知系统组成元件的可靠性参数(如失效分布和失效率等),则可以求出每个元件的可靠度,进而根据系统组成单元的逻辑关系,可以推算出系统的可靠度。由此可见,即使在对冷储备系统进行简化的情况下,利用数学方法对复杂系统进行可靠性分析依然十分繁杂。为此,本文将运用蒙特卡洛模拟法对复杂系统进行可靠性分析。

2 基于蒙特卡洛模拟法的复杂系统可靠性仿真

复杂系统可靠性仿真的分析对象是一类典型的离散事件系统。离散事件系统是指系统状态仅在离散时间点上发生变化的系统,引起系统状态变化的行为称为“事件”,这类系统是由事件驱动的;事件往往发生在随机时间点上,故称其为随机事件^[10]。其中,事件包括故障事件和维修事件,即单元运行过程中发生的故障现象与相对应的维修活动,时间包括单元发生故障的时间及其维修消耗的时间。基于蒙特卡洛模拟法的复杂系统可靠性仿真基本原理是模拟系统运行时产生的故障事件和维修事件,系统组成元件的故障及其维修活动将会直接或间接地影响到系统的正常运行,依据这些事件对系统的影响来统计分析系统可靠性水平。如前所述,蒙特卡洛模拟法是一种应用随机数来进行计算机模拟的方法,此方法使用随机数发生器对系统进行随机抽样,通过对样本值的统计,求得待研究系统的某些参数^[11]。若已知设备单元的寿命分布和维修分布的类型与参数,便可抽样产生相应的随机事件,具体方法如下:

假设系统某一组成单元的可靠性分布类型为指数分布, $R(t) = \exp(-\lambda t)$,其中 λ 为故障率。采用直接抽样方法,可以得到系统在执行某一任务期间该组成单元发生故障的一组时间序列,即

$$\begin{cases} T_i = T_{i-1} - \frac{1}{\lambda} \ln(1 - \eta_i) \\ T_0 = 0, i = 1, 2, \dots, N \end{cases}$$

其中, N 表示总的仿真次数, T_i 表示第 i 次抽样时所得的故障时刻, η_i 表示在 $[0, 1]$ 区间上均匀分布的随机数。 η_i 是由线性同余发生器产生的,其递推公式为

$$\begin{cases} \eta_i = \frac{x_i}{m} \\ x_i = (ax_{i-1} + c) \bmod m \end{cases}$$

其中: x_i 为产生的伪随机数; x_0 为初值; m 为模数; a 为乘数; c 为增量;且 x_0, m, a 和 c 皆为非负整数。

通过上述方法,可以抽样得到系统的故障事件和维修事件,再经过大量的随机抽样得到仿真所需要的事件集合,称为随机事件表,由此对系统进行可靠性分析,具体步骤如下:

步骤1:选择合适的随机数发生器,基于单元的故障与维修分布,利用随机数抽样得到单元的故障事件和维修事件。在系统任务时间内,按照故障发生时间和优先级排列事件,

构成可靠性分析所需要的故障事件表和维修事件表;

步骤2:从初始化的系统时钟开始,扫描处理故障事件表和维修事件表。根据单元与任务的逻辑关系,判断其发生故障和实施维修是否会引起任务失败,在单元执行任务期间,若其累计失效时间超过预设值,则任务失败;

步骤3:记录每一次仿真的结果,进行 N 次仿真时,若任务失败次数为 F ,则系统的任务可靠度近似值为 $R = 1 - F/N$;为保证仿真精度, N 至少取2 000次。

3 实例分析

为验证运用蒙特卡洛模拟法进行系统可靠性仿真的可行性,以某型舰船电气系统为对象分析其在1年内(约8 640 h)执行巡航任务的可靠性。首先,通过分析该系统的组成结构、功能原理和任务剖面等,建立图2所示的系统可靠性分析模型。

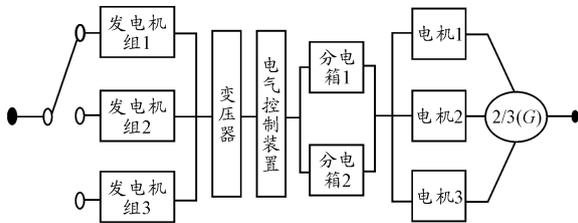


图2 某型舰船电气系统可靠性分析模型

在调研和查阅资料基础上,得到表1所示的系统组成单元的可靠性和维修性分布类型及其参数等。需要指出:指数分布虽然不能作为机械零件功能参数的分布规律,但是它可以近似地作为高可靠性的复杂部件、机器或系统的失效分布模型,已经在部件或机器的整机试验中得到广泛的应用。为此,假定系统组成单元的可靠性与维修性分布皆为指数分布。

表1 单元的可靠性和维修性分布函数及参数

单元名称	可靠性分布		维修性分布	
	类型	参数/h	类型	参数/h
发电机组1	指数分布	10 000	指数分布	24
发电机组2	指数分布	10 000	指数分布	24
发电机组3	指数分布	10 000	指数分布	24
变压器	指数分布	7 940	指数分布	5
电气控制装置	指数分布	10 000	指数分布	8
分电箱1	指数分布	10 000	指数分布	3
分电箱2	指数分布	10 000	指数分布	3
电机1	指数分布	8 400	指数分布	3
电机2	指数分布	8 840	指数分布	3
电机3	指数分布	8 120	指数分布	3

采用数学解析法推算该系统的任务可靠度。如图2所示,整个系统是由4个分系统串联而成,即冷储备系统(发电机组)、串联系统(变压器和电气控制装置)、并联系统(分电箱)和表决系统(电机)。设4个分系统的可靠度分别为 $R_1(t)$ 、 $R_2(t)$ 、 $R_3(t)$ 和 $R_4(t)$ 。根据各组成单元的可靠性分布及参数,结合系统可靠性分析模型,推算出整个系统的任务可靠度为

$$R(8\ 640) = R_1(8\ 640)R_2(8\ 640)R_3(8\ 640)R_4(8\ 640) = 0.942\ 9 \times 0.617\ 8 \times 0.665\ 3 \times 0.376\ 8 = 0.146\ 1$$

采用蒙特卡洛模拟法来推算该系统的任务可靠度。设置仿真次数 N 为5 000,选择线性同余发生器产生随机数,得到系统的故障事件与维修事件,经系统仿真,计算出系统任务可靠度,如图3所示。

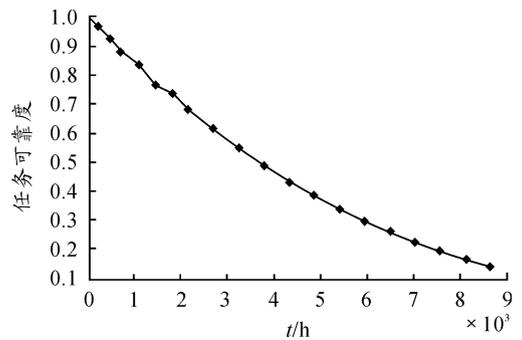


图3 任务可靠度随时间的变化趋势

选取该系统任务期间内的6个时间点进行分析,采用仿真法计算得到任务可靠度,并与数学解析法得到的任务可靠度进行对比,对比结果如表2所示。由此可见,本文提出的方法具有较高的可信性。

表2 任务可靠度计算结果对比分析

时间点/h	解析法	仿真法	误差/%
192	0.970 3	0.961 2	0.93
720	0.889 9	0.891 0	0.12
1 440	0.783 7	0.768 6	1.9
2 160	0.687 8	0.680 8	1.0
4 320	0.434 5	0.430 0	1.0
8 640	0.146 0	0.142 2	2.4

为验证仿真结果的收敛性,对该系统在8 640 h时的任务可靠性进行了重复仿真。由图4可知,仿真结果服从正态分布,任务可靠度的均值为0.142 2,其在置信水平为0.95时的置信区间为(0.138 4, 0.146 0)。由此可见,本文提出的方法收敛性较好。

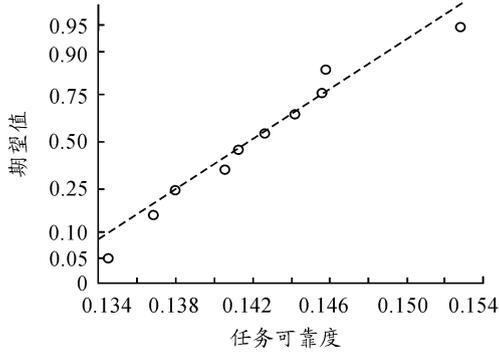


图4 仿真结果的正态分布检验

4 结束语

本文基于蒙特卡洛模拟法,对复杂系统执行使命任务的过程进行模拟,使用线性同余发生器抽样得到其组成单元的故障时间和维修时间,依此分析该系统的任务可靠性。通过结果对比可以发现,使用蒙特卡洛模拟法得到的可靠性仿真结果误差较小,收敛性也较好;从数据方面证实了基于蒙特卡洛法的复杂系统可靠性仿真原理,也可以进一步推广到舰船更复杂的系统之中,对舰船可靠性进行评估和改进。

参考文献:

- [1] 张玉涛,唐俊,张明清. 基于蒙特卡罗方法的可靠性仿真过程模型研究[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(7): 1374-1377.
- [2] 刘钦文,赵品伦. 基于蒙特卡罗的系统任务可靠性分析方法[J]. 可靠性与环境适应性理论研究,2013,5(31): 17-22.

- [3] 贺晓,刘芸江,刘梅,等. 一种蒙特卡罗方法的改进方案[J]. 中国科技论文,2014,9(1):71-75.
- [4] 董艳秋,田敬博. 蒙特卡洛法结构可靠性分析[J]. 黑龙江工程学院学报,2010,24(1):27-30.
- [5] 廖敏辉,柴光远. 蒙特卡洛模拟法在液压系统可靠性设计中的应用[J]. 机床与液压,2013;41(11):194-196.
- [6] 罗莲. 基于 AHP 与模糊综合评判法在城市轨道交通线网规划中的应用[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2014,31(4):46-50.
- [7] 喻华,魏来生. 改进的故障树 monte-carlo 数字仿真[J]. 车辆与动力技术,2006(3):35-37.
- [8] Land E H, McCann J J. Lightness and Retinex theory [J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(1): 1-11.
- [9] 张国志. 复杂系统可靠性研究[D]. 北京:北京工业大学,2009.
- [10] 潘丰旻,江明,周加文. 基于 NS2 的优先级队列管理算法设计[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2014, 31(11):45-49.
- [11] 冯三营,裴丽芳. 复杂系统可靠性的模拟算法研究[J]. 洛阳师范学院学报,2009,28(2):21-24.
- [12] 刘丽娜. 基于遗传算法的库存仿真及优化[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- [13] 周月阁,叶雪荣,翟国富. 基于性能退化和 Monte Carlo 仿真的系统性能可靠性评估[J]. 仪器仪表学报,2014, 5(5):1185-1191

(责任编辑 唐定国)

(上接第 55 页)

- [5] 茅云升. 潜艇内部人-机-环境系统的多级模糊综合评判[J]. 武汉:武汉理工大学学报,2004(3):322-325.
- [6] 李雪梅. 灰色关联分析与 GM(1,1) 模型优化的研究与应用[D]. 南京:南京航空航天大学,2011:11-22.
- [7] 胡莹. 基于灰色-层次关联分析法的电子政务绩效评估研究[D]. 合肥:安徽理工大学,2011:30-56.

- [8] 温正. Matlab8.0 从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社,2013:203-268.
- [9] 曹瑞昌,吴建明. 多序列迭加生成值的合理性判断[J]. 计算机工程与应用,2003(26):76-78.

(责任编辑 唐定国)