

doi: 10.7690/bgzdh.2022.06.015

基于 MC 仿真的系统可靠性建模分析

张春华¹, 周泽蕴², 周婷¹, 王贵林¹

(1. 湖南交通工程学院高科技研究院, 长沙 410003; 2. 湖南挚新科技发展有限公司, 长沙 410003)

摘要: 为解决复杂系统可靠性建模分析方法问题, 提出一种利用 MC (Monte-Carlo) 仿真模拟系统可靠性建模分析方法。生成符合要求的单元失效数据样本, 依据单元失效与系统失效的逻辑关系开展系统级虚拟试验, 获得系统失效仿真数据, 并对其进行分析得到系统可靠性指标; 利用 Simulink 对 MC 方法进行模块化实现, 建立图形化可靠性建模分析仿真工具包。通过各种算例对上述方法的有效性进行验证, 结果表明: 基于 MC 仿真的系统可靠性建模分析方法精度与理论结果相当, 且基于 Simulink 实现了图形化工具包, 便于在复杂系统可靠性建模和分析中实际应用。

关键词: 系统可靠性; 可靠性建模; 可靠性分析; Monte-Carlo 仿真; 可靠性仿真

中图分类号: TP391.92 **文献标志码:** A

Analysis of System Reliability Modeling Based on MC Simulation

Zhang Chunhua¹, Zhou Zeyun², Zhou Ting¹, Wang Guilin¹

(1. Academy of Hi-Tech Research, Hunan Institute of Traffic Engineering, Changsha 410003, China;

2. Hunan Zhixin Technology Development Co., Ltd., Changsha 410003, China)

Abstract: In order to solve the problem of complex system reliability modeling and analysis method, a reliability modeling and analysis method based on MC (Monte-Carlo) simulation is proposed. The unit failure data samples meeting the requirements are generated, and the system-level virtual test is carried out according to the logical relationship between unit failure and system failure to obtain the system failure simulation data, and the system reliability index is obtained by statistical analysis of the system failure simulation data. The MC method is modularized by Simulink to establish a graphical reliability modeling and analysis simulation toolkit. The effectiveness of the above method is verified by various examples, and the results show that the accuracy of the system reliability modeling and analysis method based on MC simulation is equivalent to the theoretical results, and the graphical toolkit based on Simulink is realized, which is convenient for practical application in the reliability modeling and analysis of complex systems.

Keywords: system reliability; reliability modeling; reliability analysis; Monte-Carlo simulation; reliability simulation

0 引言

系统可靠性分析将产品视为一个包含基本组成单元、层次性功能结构的系统, 通过基本组成单元的可靠性数据和层次性可靠性模型定量评价产品的可靠性水平^[1]。

针对复杂系统建模分析需求, 文献[2-16]利用 Simulink 工具包建立系统可靠性仿真分析方法, 给出系统的可靠度、故障概率分布、故障概率密度、故障率等可靠性指标, 具有可视化、流程化、层次化的特点, 应用对象涉及冗余系统^[3]、抽油机效率测试系统^[4]、复杂可修系统^[5]、高速列车制动控制系统^[6]、高速列车牵引变流器^[7]、液压系统^[8-10]、定期检修冗余系统^[11]、地下矿山运输提升系统^[12]、轮式移动机器人电机驱动系统^[13]、航天飞行器三冗余系统^[14]、船舶供电系统^[15]、载人电动飞机电推进系

统^[16]。上述研究通过 Simulink 实现了图形可视化的系统可靠性计算, 适用于设计阶段的系统可靠性分析, 并未真正引入数值仿真方法, 无法给出系统的失效分布, 难以结合实际试验数据, 无法应用于研制阶段的可靠性评价。

为兼顾可靠性预计和可靠性评估, 近年来将 MC 随机模拟与 Simulink 工具包相结合的可靠性仿真方法逐渐得到重视。文献[17]围绕多路输出电源系统在核辐射环境下的退化可靠性问题, 采用 Simulink 仿真和 Bootstrap 重抽样相结合的方法对电源组件进行分析和评估。文献[18]在直升机应急漂浮系统传感器模块可靠性研究中, 通过 Simulink 搭建了非同型单元 k/n 表决系统的可靠性模型, 通过模拟与理论计算验证将 MC 模拟应用于可靠性分析的可行性与有效性。

收稿日期: 2022-02-27; 修回日期: 2022-03-28

基金项目: 湖南省自然科学基金(2018JJ2283); 湖南省自然科学基金省市联合基金(2020JJ6092)

作者简介: 张春华(1974—), 男, 重庆人, 博士, 副教授, 从事可靠性试验与评估、加速试验与装备寿命预测、机电系统可靠性建模分析研究。E-mail: chzhang_me@aliyun.com。

在可靠性仿真建模分析中，建模过程直观、指标输出可视化、模块化可复制、确保分析精度是研究的核心问题。笔者在 MC 方法的基础上提出一种系统可靠性建模分析方法，通过算例对该方法的有效性进行验证，并利用 Simulink 工具包进行模块化实现，建立了可靠性建模分析仿真工具包，最后应用建立的 Simulink 工具包对某电子调速器进行可靠性建模和分析，给出了不同设计方案的可靠性对比分析结果。

1 系统可靠性 MC 仿真方法

1.1 基本方法

MC 方法^[19]是将研究对象当作随机过程，随机

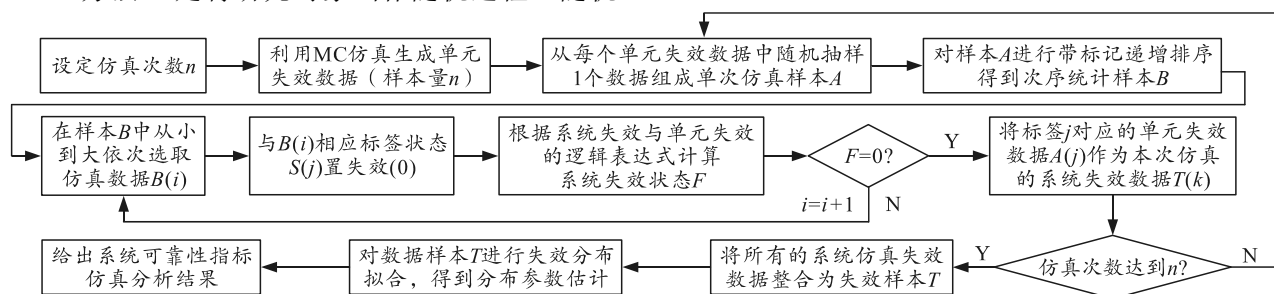


图 1 系统可靠性 MC 仿真方法

1.1.1 单元失效数据仿真

以组成单元的可靠性信息为基础，对单元失效数据进行 MC 仿真，组成单元的可靠性信息可查阅可靠性预计标准，或开展可靠性试验获取。

首先是随机抽样过程模拟。由于随机抽样的实质是样品的抽中概率均等，所以利用计算机生成 n 个 $[0, 1]$ 内均匀分布的随机数 p_1, p_2, \dots, p_n ，作为被抽样单元对应的失效概率。

然后利用反函数法生成被抽样单元的失效数据。将被抽取的随机数 P_i 代入失效分布函数求解失效时间 t_i 。

对指数分布单元：

$$t_i = \theta \ln(1/(1 - p_i))。 \quad (1)$$

式中 θ 为指数分布的平均寿命。

对 Weibull 分布单元：

$$t_i = \eta (\ln(1/(1 - p_i)))^{1/m}。 \quad (2)$$

式中： m 为 Weibull 分布的形状参数； η 为特征寿命。

对于其他分布单元，可依据其失效分布函数进行类似推导。

1.1.2 系统失效数据仿真

从每个组成单元的仿真失效数据中随机抽取 1

生成研究所需数据，通过数值计算达到研究目的的一种模拟方法，广泛应用于传统数学方法或物理试验难以解决的复杂问题。

系统可靠性建模分析是一个典型的随机问题。笔者结合 MC 仿真，提出如图 1 所示的系统可靠性建模分析方法，利用 MC 方法模拟生成符合要求的单元失效数据样本，依据单元失效与系统失效的逻辑关系开展系统级虚拟试验，获得系统失效仿真数据样本，并通过对系统失效仿真数据进行统计分析得到系统可靠性指标。

该方法优势在于可根据需要提高数值仿真的次数，获得足够的系统失效仿真数据样本量，从而确保系统可靠性建模和分析的精度。

个数据，组成系统失效单次仿真数据，结合系统可靠性模型确定系统失效仿真数据。重复此过程，直至达到所需的系统级失效仿真次数 n 。

设： $S(j)$ 为单元状态， F 为系统状态，取值 1 为功能正常，取值 0 为失效。 F 与 $S(j)$ 之间的逻辑关系因系统可靠性模型而异。

对于串联系统模型：

$$F = \prod_j S(j)； \quad (3)$$

对于并联系统模型：

$$F = 1 - \prod_j (1 - S(j))。 \quad (4)$$

对于其他系统模型，可依据模型形式类似推导。

1.1.3 系统可靠性仿真分析

按照可靠性数据统计方法对得到的系统失效仿真数据进行分析，给出系统失效率、系统可靠度等可靠性指标。主要步骤包括分布拟合、分布参数估计、可靠性指标估计等。

1.2 典型算例验证

1.2.1 串联系统

考虑如图 2 所示的串联系统，单元 1 为指数分布单元 ($\theta=2\ 000$ h)；单元 2 为 Weibull 分布单元 ($m=3, \eta=2\ 000$ h)。



图 2 由指数和 Weibull 单元组成的串联系统

按照本文中的仿真方法编程对该串联系统开展可靠性建模分析，得到如图 3 所示的结果。其中：仿真抽样次数为 500； R_{Exp} 为指数单元可靠度理论值； R_{Wbl} 为 Weibull 单元可靠性理论值； R_0 为串联系统可靠度理论值； R_{MC} 为串联系统可靠度仿真建模分析结果； R_0 、 R_{MC} 两者非常接近。

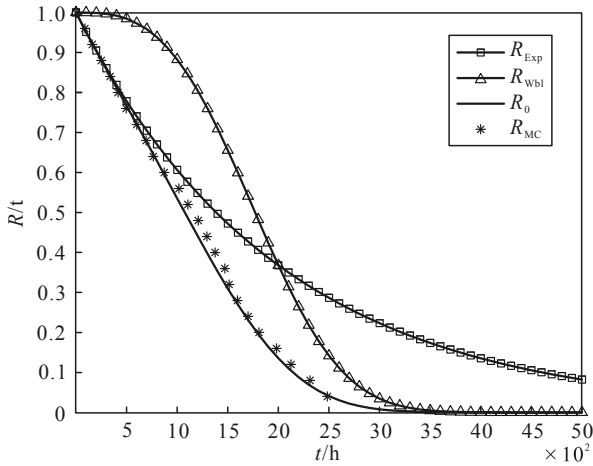


图 3 串联系统可靠性仿真建模分析结果

根据上图进一步设置不同仿真抽样次数，对该串联系统开展可靠性仿真建模分析，得到如图 4 所示的结果。仿真抽样次数分别设定为 50、100、500、1 000、5 000，可以发现：随着仿真次数增加，可靠性建模分析结果与理论值逐渐逼近，具有良好的渐进性。综合仿真计算量与准确性，建议仿真抽样次数设为 1 000 次。

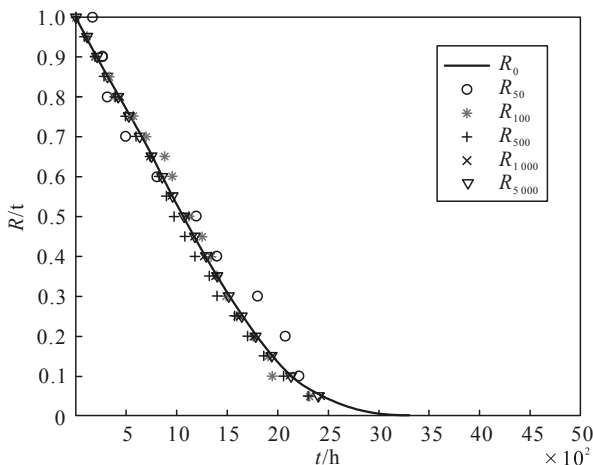


图 4 不同仿真次数对串联系统可靠性分析结果的影响

1.2.2 并联系统

考虑如图 5 所示的并联系统，单元 1 为指数分布单元($\theta=2\ 000\text{ h}$)，单元 2 为 Weibull 分布单元

($m=3, \eta=2\ 000\text{ h}$)。

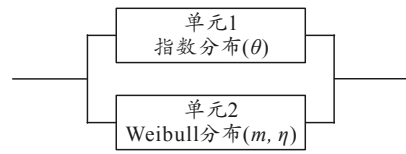


图 5 由指数和 Weibull 单元组成的并联系统

按照笔者的仿真方法编程对该并联系统开展可靠性建模分析，得到如图 6 所示的结果。其中，设定仿真抽样次数为 500； R_{Exp} 为指数单元可靠度理论值； R_{Wbl} 为 Weibull 单元可靠性理论值； R_0 为并联系统可靠度理论值； R_{MC} 为并联系统可靠度仿真建模分析结果； R_0 、 R_{MC} 两者也非常接近。

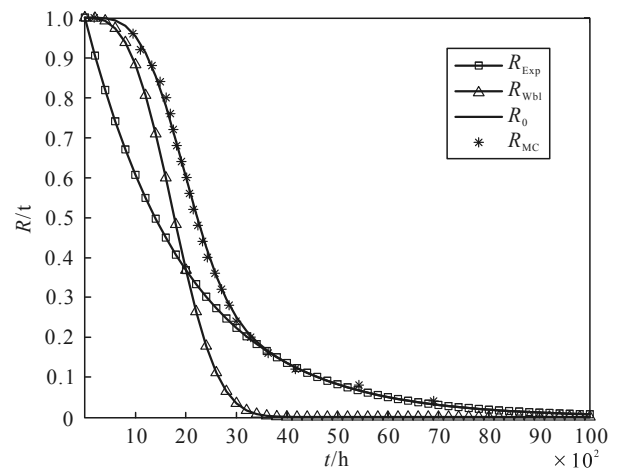


图 6 并联系统可靠性仿真建模分析结果

根据上图进一步设置不同仿真抽样次数，对该并联系统开展可靠性仿真建模分析，得到如图 7 所示的结果。仿真抽样次数分别设定为 50、100、500、1 000、5 000，可以发现：随着仿真次数增加，可靠性建模分析结果与理论值逐渐逼近，具有良好的渐进性。综合仿真计算量与准确性，同样建议仿真抽样次数设为 1 000 次。

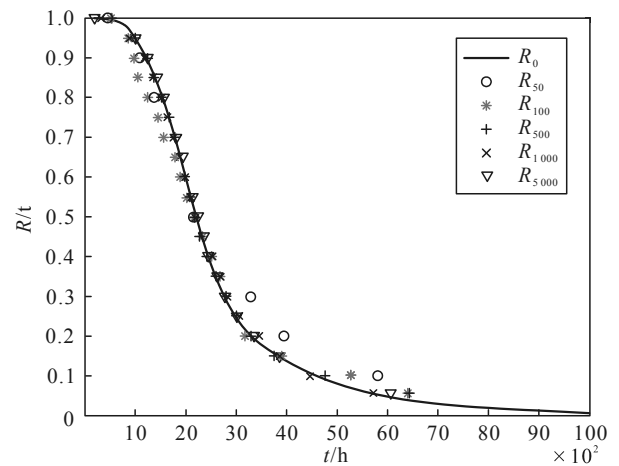


图 7 不同仿真次数对并联系统可靠性分析结果的影响

2 系统可靠性仿真的 Simulink 实现

2.1 Simulink 模块化实现

在 Simulink 可视化仿真工具的基础上, 采用子系统封装, 建立单元失效数据仿真、系统可靠性建模仿真、系统可靠性仿真分析等仿真模块, 实现可靠性 MC 仿真图形化应用环境。在此基础上, 无需大量书写程序, 只需通过简单直观的图形操作, 就可构造复杂系统仿真模型, 开展复杂系统可靠性仿真分析, 使得可靠性建模过程更加直观, 并且提高了复杂系统可靠性建模分析的效率。

2.1.1 单元失效数据仿真模块

笔者以常用的指数分布单元、Weibull 分布单元为例, 阐述利用 Simulink 工具实现单元失效数据可视化仿真模块的方法和过程, 其他分布类型的单元模块均可照此实现。

2.1.1.1 指数分布单元仿真模块

如图 8 所示, 该模块由 [0, 1] 均匀分布随机数生成器 (Uniform Random Number)、常量输入模块 (Constant)、向量合成器 (Mux)、函数定义模块 (Fcn)、数据输出端口 (Out) 组成。

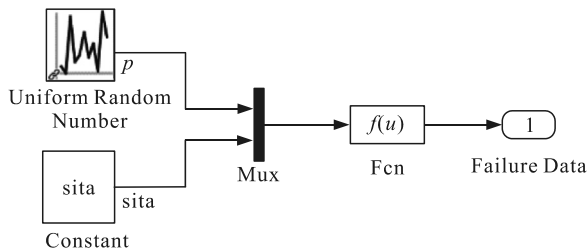


图 8 指数分布单元仿真模块

随机数生成器用于生成抽样失效概率 P_i , 最小值设置为 0, 最大值设置为 1。设置采样时间为 0.1 s, 仿真时间 100 s, 则仿真抽样次数为 1 000 次。常量输入模块用于输入指数分布单元的平均寿命 θ , 命名为参数 sita, 仿真时通过弹出对话框输入。向量合成器将 P_i 和 θ 合成为向量 u , $u(1)=P_i$, $u(2)=\theta$ 。函数定义模块用于求解失效时间 t_i , 设置 $f(u)=u(2)*(-\log(1-u(1)))$ 。输出端口用于输出生成的指数分布单元失效仿真数据。

2.1.1.2 Weibull 分布单元仿真模块

如图 9 所示, 该模块由 [0, 1] 均匀分布随机数生成器 (Uniform Random Number)、2 个常量输入模块 (Constant)、向量合成器 (Bus Creator)、函数定义模块 (Fcn)、数据输出端口 (Out) 组成。

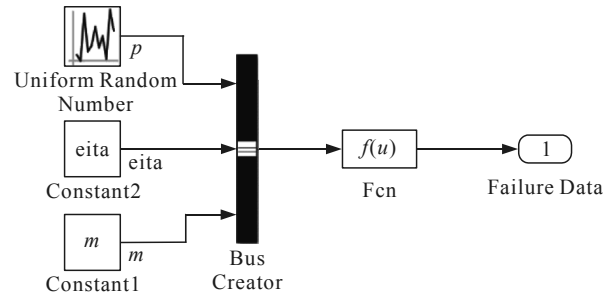


图 9 Weibull 分布单元仿真模块

随机数生成器用于生成抽样失效概率 P_i , 最小值设置为 0, 最大值设置为 1。设置采样时间为 0.1 s, 仿真时间 100 s, 则仿真抽样次数为 1 000 次。常量输入模块用于输入特征寿命 η 和形状参数 m , 命名为参数 eita 和 m , 仿真时通过弹出对话框输入。向量合成器将 P_i 和 θ 合成为向量 u , $u(1)=P_i$, $u(2)=\eta$, $u(3)=m$ 。函数定义模块用于求解失效时间 t_i , 设置 $f(u)=u(2)*(-\log(1-u(1)))^{1/u(3)}$ 。输出端口用于输出生成的 Weibull 分布单元失效仿真数据。

2.1.2 系统可靠性建模仿真模块

笔者以常用的串联系统、并联系统模型为例, 阐述利用 Simulink 工具实现系统可靠性建模可视化仿真模块的方法和过程, 其他类型的系统模型均可照此实现。

2.1.2.1 串联系统建模仿真模块

如图 10 所示, 该模块由 2 个数据输入端口 (In)、减法器 (Subtract)、选择开关 (Switch)、数据输出端口 (Out) 组成。

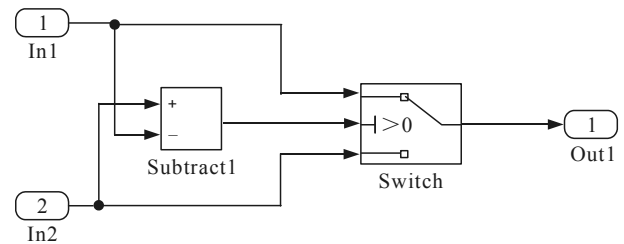


图 10 串联系统建模仿真模块

数据输入端口用于输入被串联的 2 个单元的失效数据, 当单元数多于 2 时, 通过迭代方式实现所有单元串联。减法器用于判断 2 路数据的大小, 结合选择开关将较小的单元失效数据输出到端口, 生成串联系统的失效仿真数据。

2.1.2.2 并联系统建模仿真模块

如图 11 所示, 该模块由 2 个数据输入端口 (In)、减法器 (Subtract)、选择开关 (Switch)、数据输出端口 (Out) 组成。

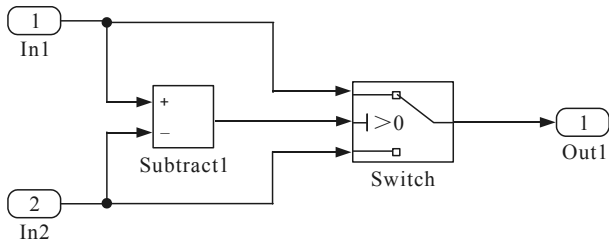


图 11 并联系统建模仿真模块

数据输入端口用于输入被并联的 2 个单元的失效数据，当单元数多于 2 时，通过迭代方式实现所有单元并联。减法器用于判断 2 路数据的大小，结合选择开关将较大的失效数据输出到端口，生成并联系统的失效仿真数据。

2.1.3 系统可靠性仿真分析模块

该模块直接采用数据输出模块 (To Workspace)，用于寄存系统仿真生成的所有失效数据，并命名为 T.DATA。

仿真结束后，利用程序直接读取 T.DATA 并进行所需的统计分析，给出系统可靠性仿真分析结果。

2.2 可靠性仿真模块验证

2.2.1 并串联系统

考虑如图 12 所示的并串联系统，单元 1 和 3 为指数分布单元 ($\theta=2\ 000\text{ h}$)，单元 2 和 4 为 Weibull 分布单元 ($m=3, \eta=2\ 000\text{ h}$)。

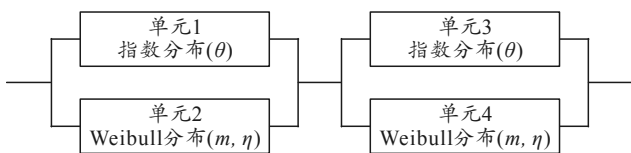


图 12 由指数和 Weibull 单元组成的并串联系统

利用笔者建立的 Simulink 可视化工具模块开展该并串联系统的可靠性仿真建模分析，相应的系统仿真模型如图 13 所示，并得到如图 14 所示的结果。其中： R_0 为并串联系统可靠度理论值， R_{MC} 为并串联系统可靠度 MC 仿真结果，两者非常接近。

2.2.2 串并联系统

考虑如图 15 所示的串并联系统，单元 1 和 3 为指数分布单元 ($\theta=2\ 000\text{ h}$)；单元 2 和 4 为 Weibull 分布单元 ($m=3, \eta=2\ 000\text{ h}$)。

利用 Simulink 可视化工具模块开展该串并联系统的可靠性仿真建模分析，相应的系统仿真模型如图 16 所示，得到如图 17 所示的结果。其中： R_0 为串并联系统可靠度理论值； R_{MC} 为串并联系统可靠

度 MC 仿真结果，两者非常接近。

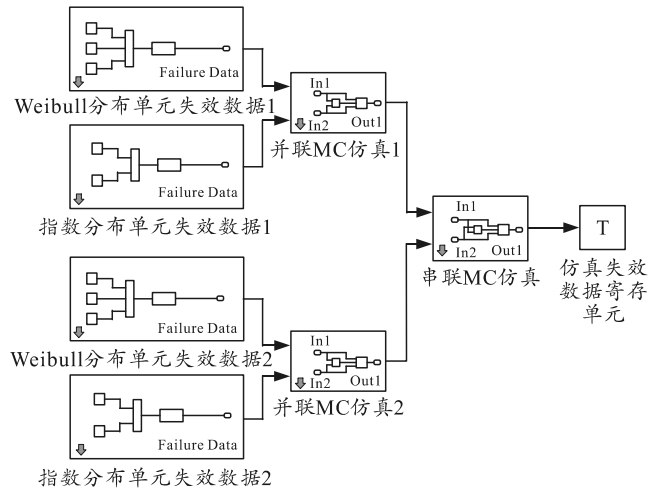


图 13 并串联系统 Simulink 仿真模型

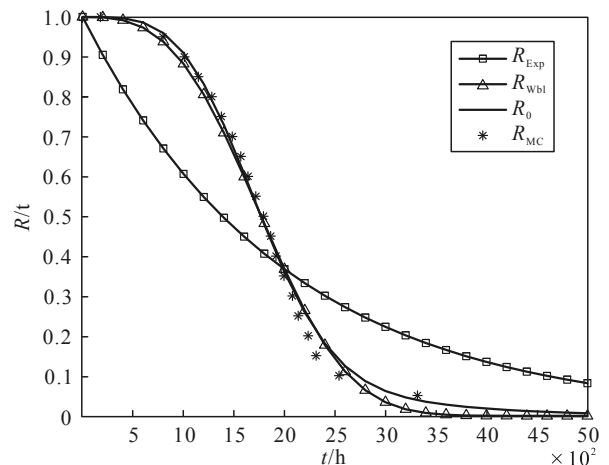


图 14 并串联系统可靠性仿真结果

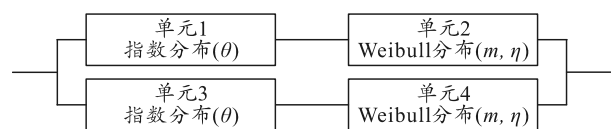


图 15 由指数和 Weibull 单元组成的串并联系统

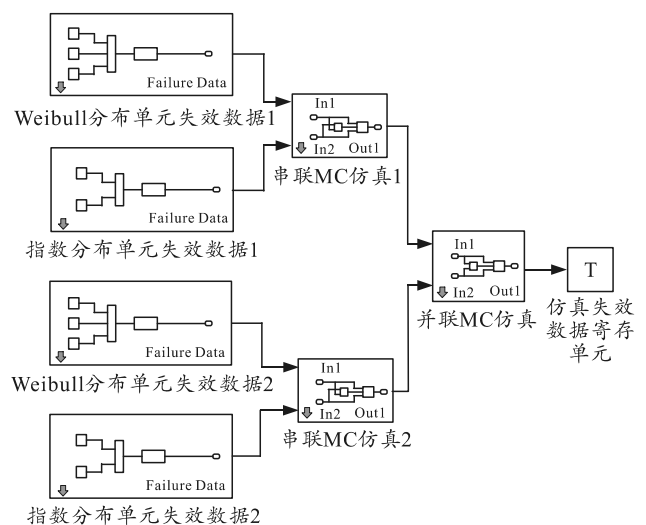


图 16 串并联系统 Simulink 仿真模型

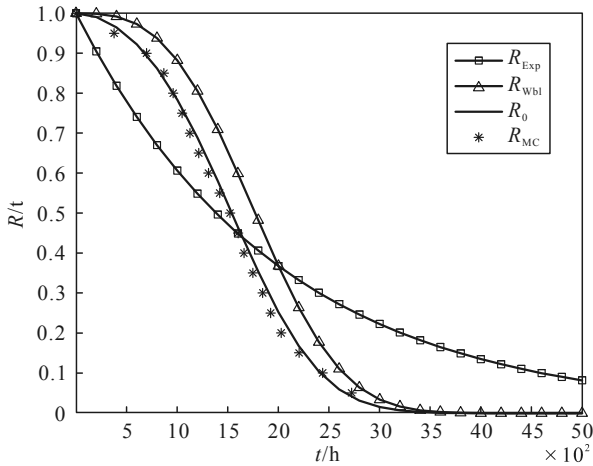


图 17 串并联系统可靠性仿真结果

3 应用案例：电子调速器可靠性仿真

电子调速器具有稳态调速精度高、动态调速性能好等特点，被广泛应用于舰船柴油机控制系统，其可靠性对于舰船动力系统的稳定运行具有决定性作用。笔者以电子调速器为例说明文中方法的工程应用。

电子调速器的可靠性模型为串联模型，如图 18 所示。为提高使用可靠度，对其中的转速传感器和转速控制器进行冗余设计，得到可靠性优化设计方案，相应的可靠性模型如图 19 所示。

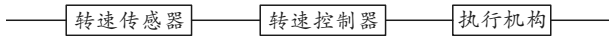


图 18 电子调速器可靠性模型

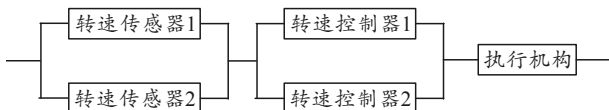


图 19 电子调速器冗余设计可靠性模型

文献[20-21]对电子调速器在冗余设计前后的 2 种方案进行了可靠性建模分析，其中单元失效数据来源于 GJB/Z 299B—98。在分析冗余系统可靠性时，将并联单元失效率近似为串联单元的 2/3，并且假设单元与系统失效均为指数分布。从理论角度分析，在指数分布单元组成的系统中，如果引入了并联结构，则系统失效将不再服从指数分布。

利用笔者建立的 Simulink 可视化工具对该电子调速器在冗余设计前后的可靠性进行仿真建模分析，单元失效率设置如表 1 所示，见参考文献[20]。

表 1 电子调速器的单元失效率 $10^{-6}/h$

单元名称	转速传感器	转速控制器	执行机构
失效率	6.845	34.513	14.151

系统仿真模型分别如图 20、21 所示，得到的系统可靠度仿真结果如图 22 所示。其中： R_0 为串联

系统可靠度； R_1 为冗余设计后的系统可靠度。表明冗余设计以后的电子调速器可靠性得到了大幅度改进，从而定量验证了可靠性优化设计的有效性。

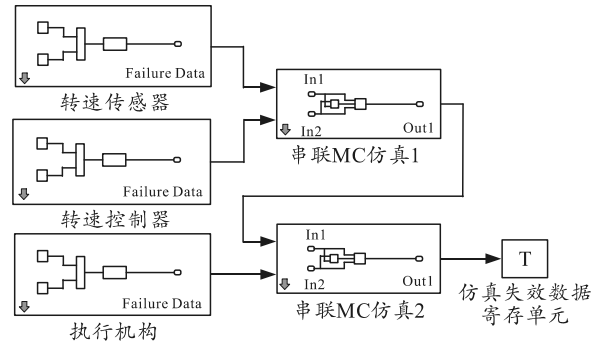


图 20 电子调速器串联系统仿真模型

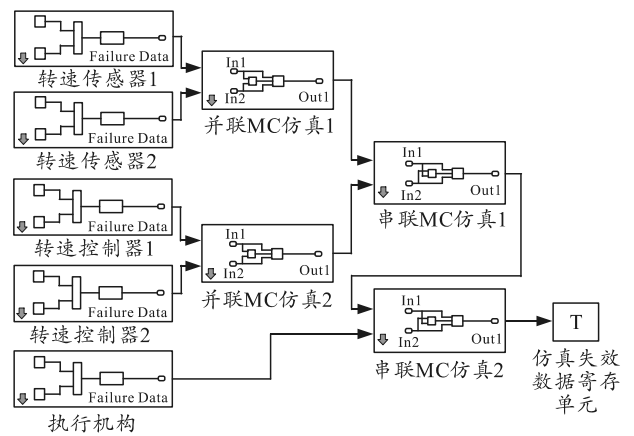


图 21 电子调速器冗余设计仿真模型

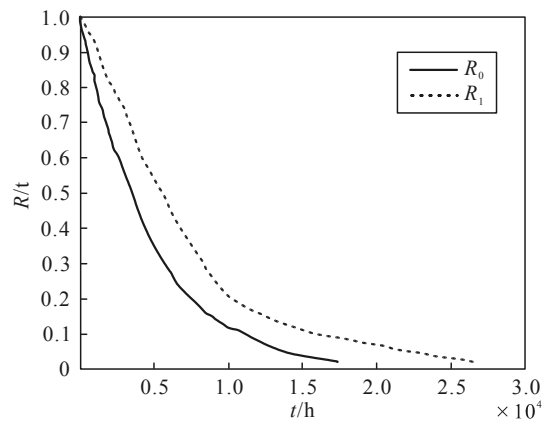


图 22 电子调速器冗余设计前后可靠性仿真结果

由于笔者建立的可靠性仿真建模分析方法不需要假设系统失效服从指数分布，且无需对并联单元进行失效率计算上的近似，所以本文中给出的系统可靠度将更加接近实际值。在上述可靠性仿真的基础上，还可进一步进行数值计算，得到该电子调速器的其他可靠性指标。

4 结束语

笔者在 MC 方法的基础上提出一种系统可靠性

仿真建模分析方法,利用 Simulink 对方法进行模块化实现,建立了可靠性仿真建模分析工具,并应用建立的方法和工具对某电子调速器进行可靠性建模分析,给出了冗余设计前后不同设计方案的可靠性预计结果。

1) 通过应用算例对方法和工具进行验证,得出的可靠性分析结果与理论结果完全吻合,证明该方法和工具的有效性。

2) 将方法应用于某电子调速器可靠性建模分析,演示了实际工程应用的流程,其结果定量验证了电子调速器可靠性优化设计方案。

3) 该方法应用直观,建模过程可视化,具有模块化可复制的特点,便于在复杂系统可靠性建模分析中进行实际应用。

参考文献:

- [1] 陈循,陶俊勇,张春华,等. 机电系统可靠性工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 56-68.
- [2] 栗亚林,张国辉,陈正荣. 基于 Matlab 语言的系统可靠性仿真[J]. 重庆通信学院学报, 2005, 24(2): 104-108.
- [3] 彭博,马昕晖,杨洋. 基于 Simulink 的冗余系统可靠性仿真[J]. 兵工自动化, 2007, 26(11): 37-39.
- [4] 王艳. 抽油机效率测试系统可靠性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [5] 吕学志,于永利,陈立勇,等. 基于 Simulink 的复杂可修系统的建模与仿真方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2009, 23(4): 15-20.
- [6] 王飞. 200 km/h 列车制动控制单元可靠性分析[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- [7] 康劲松,陈艳平. 高速列车牵引变流器的故障机制及可靠性模型[J]. 机电一体化, 2013, 19(9): 89-94.
- [8] 贾文彬. VMC650 五轴联动(立式)数控加工中心液压系统可靠性评价[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [9] 候惠萍,刘混举,牛卫兵. 基于故障树的掘进机液压系统可靠性仿真分析[J]. 液压与气动, 2013(4): 79-82.
- [10] 候惠萍. 阀控调速型液力耦合器的可靠性分析研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [11] 胡宁,张三梯,黄进永. 定期检修系统的可靠性建模与仿真[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2014, 32(2): 17-21.
- [12] 陈晓辉. 地下铀矿山运输提升系统可靠性研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2015.
- [13] 张志威. 基于 STM32 嵌入式系统的电机驱动控制与可靠性分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [14] 刘克亚,刘经宇,杨峰,等. 基于 1553B 总线三冗余飞行控制系统设计与可靠性研究[J]. 计算机测量与控制, 2018(1): 124-128.
- [15] 姜海龙,陈金萌,周祥龙,等. 某工程船供电系统可靠性仿真分析[J]. 船电技术, 2018, 38(11): 23-27.
- [16] 李玉峰,宁昭义. 电动飞机电推进系统可靠性建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(1): 58-63.
- [17] 刘杰. 辐照环境下电源系统的退化分析及可靠性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [18] 郭星,孙建红,李名琦,等. 直升机应急漂浮系统传感器模块可靠性分析[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 532-539.
- [19] 张春华. 步降应力加速寿命试验的理论和方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002.
- [20] 刘志刚,宋恩哲,孙军,等. 电子调速器可靠性设计研究[J]. 船舶工程, 2005, 27(6): 56-58.
- [21] 邱爱华,陆平,宋恩哲,等. 基于 CAN 总线的电子调速器可靠性设计[J]. 应用科技, 2005, 32(5): 55-57.