

# 基于 Simevents/Stateflow 的矿山运提系统可靠性仿真分析\*

戴剑勇, 陈晓辉

(南华大学 核资源工程学院, 湖南 衡阳市 421001)

**摘要:**为解决地下矿山运输和提升系统的可靠与安全问题,应用离散事件动态系统建模技术、排队论和有限状态机理论,构建了基于 Simevents 和 Stateflow 的地下矿山运提系统可靠性模型及仿真方法。并开展了实例仿真分析与验证,仿真结果表明,该方法能够有效解决运提系统可靠性的预计等问题,建模工作流程化,易操作,具有很强的实用性。

**关键词:**矿山运提系统;可靠性;仿真分析

**中图分类号:**TD529, TD534 **文献标识码:**A

**文章编号:**1005-2763(2015)08-0106-05

DOI:10.13827/j.cnki.kyyk.2015.08.024

**Reliability Simulation Analysis of Transportation and Winding System Based on the Simevents/Stateflow in Underground Mine**

DAI Jianyong, CHEN Xiaohui

(School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

**Abstract:**In order to improve the reliability and security of transportation and winding system in underground mine, reliability modeling and simulation method were put forward for the system based on Simevents and Stateflow, with modeling technology, queuing theory and finite state machines theory for discrete event dynamic system. Furthermore, simulated analysis and verification were carried out in practice. And the results showed that this method can effectively solve the problems of reliability estimation for transportation and winding system, which achieved streamlined modeling, flexible operation and strong practicability.

**Key words:**Transportation and winding system, Reliability, Simulation analysis

## 0 引言

矿山安全生产任务的完成在很大程度上取决于矿井运输提升系统生产能力。随着数字矿山的引入与建设,矿井安全生产趋向于自动化、信息化、智能化、集约化发展之路,并将系统可靠性作为安全管理的重要环节。而运提系统可靠性的高低将会影响到

井下生产工艺的安全稳定及矿山经济效益的提高<sup>[1-2]</sup>。因此,对运提系统可靠性进行分析和研究有着重要的意义。

矿山运提系统可靠性结构很复杂,各组成环节可能服从不同故障分布和维修分布,且一些运提系统可靠性分析的前提条件是即故障即维修,不会产生延误。其常用可靠性分析方法主要应用概率论、可靠性框图和故障树等原理“人一机一环境”系统、缓冲仓环节、维修控制及最优控制等方面进行可靠性分析。由于传统的数学解析法很难得出可靠的数据,而仿真方法确能及时反应系统存在的安全隐患问题。白宪阵等人基于 MAS 方法,构造了单个 Agent 模型,建立了基于单个 Agent 的复杂系统可靠性模型,阐述了仿真模型的运行过程<sup>[3]</sup>。路延廷,林井祥等人就煤矿运输系统可靠性仿真验证,并对运煤系统可靠性进行了优化,提出了改进方案<sup>[4-5]</sup>。目前对于复杂系统的仿真多采用面向过程的编程和有关工具箱相结合的方法<sup>[6-7]</sup>。基于 Matlab 仿真工具箱中的 Simevents<sup>[8]</sup>和 Stateflow<sup>[9]</sup>仿真方法灵活、具有良好的拓展性,是解决运输与提升系统结构复杂性的有效方法,并使得仿真数据更加符合实际<sup>[10-12]</sup>。作者也曾应用 Stateflow 对运提系统设备 Agent 可靠性单独进行仿真,过程较为复杂,特别是在设置维修子系统时自定义事件较多,需设置程序实现<sup>[13]</sup>。因此,应用系统可靠性技术及 Simevents 和 Stateflow 仿真方法可较好实现矿山运提系统经济、安全、可靠运行。

## 1 矿山运提系统可靠性仿真分析

### 1.1 运提系统可靠性仿真参数设计

矿山地下开采中,运提系统是生产工艺比较复杂的系统,它是由运输和提升两大子系统构成,这两

\* 收稿日期:2014-09-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51174116);湖南省自然科学基金项目(10JJ2041)。

作者简介:戴剑勇(1969—),男,湖南新化人,博士研究生,副教授,研究方向为安全系统工程,Email:daijy13@163.com。

个子系统又是由若干环节、若干部件组成。例如提升系统主要环节有溜井、矿车、提升机、提升钢丝、罐笼、天轮、井架等。系统、子系统、各环节、部件的重要特征参数包括失效分布和修复分布。按照排队理论设置维修系统内部参数,可根据所修子系统的修复分布确定服务时间规律,服务系统容量可根据维修工人数量设置,服务规则通常采用先来先服务(FCFS)规则。运提系统模型仿真参数设计如下:

$$A = T_0 / T_t \quad (1)$$

$$MTBF = T_g / n \quad (2)$$

$$MTTR = T_r / m \quad (3)$$

$$MLDT = (T_f - T_r) / m \quad (4)$$

式中, $A$ 为系统可靠度; $MTBF$ 为系统平均故障间隔时间; $MTTR$ 为平均维修时间; $MLDT$ 为平均延误时间; $T_t$ 为系统运行时间; $T_g$ 为修通工作时间; $T_f$ 为子系统故障时间; $T_0$ 为系统工作时间; $T_r$ 为维修系统维修总时间; $m$ 为维修系统总次数; $n$ 为整个运提系统的故障次数。

### 1.2 运提系统可靠性仿真建模思路

针对现有矿山运提系统可靠性分析的不足,应用 Simevents 和 Stateflow 仿真工具,构建矿山运提系统可靠性分析模型。Simevents 是 DEDS(离散事件动态系统)仿真模块,该工具箱提供了专门的模块来搭建离散事件动态系统模型。Stateflow 是 Matlab/Simulink 建模环境中的一个工具箱,它支持使用流图和状态转换图来开发基于有限状态机理论(Finite State Machine, FSM)的事件驱动系统。鉴于运提系统工艺及可靠性特性,其仿真模型构建实施步骤如下。

Step1:通过 Simevents 中的实体(故障)生成器模块(Generators)、排队模块(Queues Library)及维修模块(Servers Library)来表示子系统运行过程,如某一环节活动过程:“出现故障—等待维修—维修—被修复(正常)—再故障”这一循环过程。

Step2:通过 Stateflow 框图完成整个运提系统的状态转换,通过添加状态(State)、事件(Events)、数据(Date)、动作(Action)来描述各系统的运行及相互之间的转移。运提系统的故障与否主要是由其子系统的故障/正常状态决定。

Step3:通过各子系统与整个运提系统的“故障(fault)”和“正常(good)”事件之间的关系,将分别基于 Simevents 和 Stateflow 的两个模型联系起来,通过整个矿山运提系统运行,输出运提系统的可靠度、

$MTBF$ 、 $MBTR$ 、延误( $MLDT$ )等参数的统计值。

## 2 某矿山实例分析

以湖南某矿山为例,取该矿山运输与提升系统中部分环节来进行实例仿真。运输系统主要有溜井系统、矿车系统、电机车系统和放矿系统等;提升系统主要有提升机系统和操车系统等。图1为湖南某矿山运提系统可靠性框图。

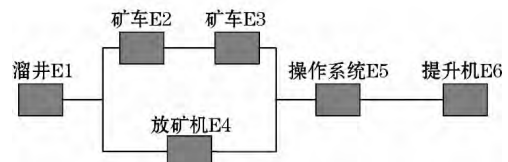


图1 运提系统可靠性框图

系统故障树结构图如图2所示。其组成结构函数为  $S = \{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6\}$ ,各子系统的故障/正常状态分别由相应底事件( $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ )表示,整个运提系统的故障/正常状态由顶事件( $T$ )表示。

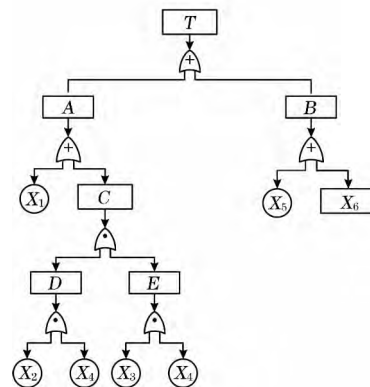


图2 故障树结构图

各环节特征参数见表1。各子系统出现故障之后按照“先到先服务(FCFS)”接受维修。

表1 运提设备故障与维修时间分布类型及参数

环节名称	故障分布函数类别	$F(t)$ 特征参量 $1/\lambda$	维修时间分布函数	$M(t)$ 特征参量 $1/\lambda$
E1	指数分布	227.3	指数分布	2.5
E2	指数分布	416.7	指数分布	3.03
E3	指数分布	322.6	指数分布	2.22
E4	指数分布	204.1	指数分布	3.03
E5	指数分布	123.5	指数分布	2.5
E6	指数分布	163.4	指数分布	2.22

### 2.1 构造运提系统的仿真模型

整个系统的仿真模型由两部分组成,如图3所

示,两个框图主要通过 good 事件与 fault 事件相互联系。

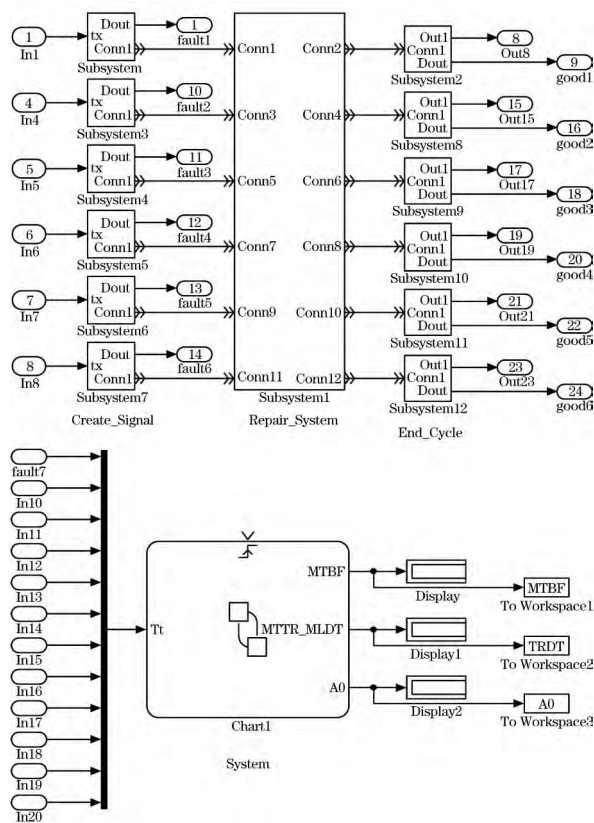


图3 系统仿真框图

## 2.2 构造 Simevents 框图

Simevents 框图由 3 部分组成:产生随机故障的 Create\_Signal 框图,提供维修服务的 Repair\_System 框图与使故障恢复到工作状态并结束循环的 End\_Cycle 框图。

封装模块 Create\_Signal 主要作用是生成不同环节故障状态。该封装模块内部如图 4 所示,当仿真开始时,基于时间实体发生器模块随机生成一个符合相关故障分布的实体,然后实体经过“Path Combiner”来到“Set Attribute”,对实体赋予 3 个属性 FT、MT 和 TY;基于时间的信号发生器模块中的参数按表 1 所列出的分布类型参数进行设置,生成 FT(故障时间间隔)和 MT(维修时间);实体类型 TY 直接在“Set Attribute”中设置;随后,实体到达“Inifnite Attribute”;最后,实体经过“FT”个单位后,离开“Inifnite Server”进入 Repair\_Server 框图,同时由于“Inifnite Attribute”的“Number of entities departed # d”属性发生变化,通过“Signal—Based Function—Call Event Generator”生成表示各相关

环节故障情况事件,并通过输出端口 Out 传送给 Stateflow 框图;实体依靠来自 End\_Cycle 框图信号触发“Event—Based Entity Generator”产生实体。

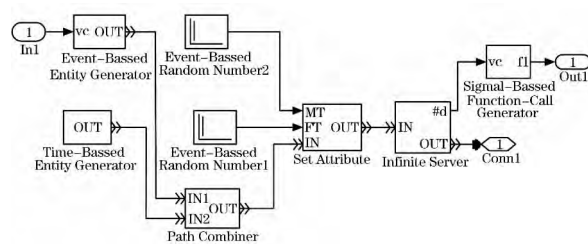


图4 E1 环节的 Create\_Signal 框图

封装模块 Repair\_System 主要是用来描述不同环节故障之后通过排队等待维修及维修完成这一系列活动。该封装模块内部如图 5 所示,实体通过“路径结合器模块”(该模块产生参数 MLDT)进入“队列模块”按照先到先服务进行排队。实体从上一模块流出后便进入“服务器模块”(该模块产生参数 MTTR)接受维修服务;接着将实体分类再发送下一端口。

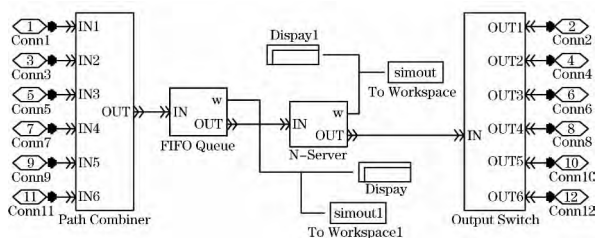


图5 Repair\_Server 框图

封装模块 End\_Cycle 主要作用是结束本次循环,激发下一循环。其内部的结构见图 6,实体进入“Entity”销毁,“Number of entities arrived # a”选项打开,其参数变化会改变会激发下一循环的开始;同时该参数与“Signal—Base Function—Call Events Generator”共同生成触发 Stateflow 框图的子系统“工作(work)”事件。

## 2.3 构造 Stateflow 框图

向之前的 Simevents 模型中添加 Chart 模块(System)。对 Chart 添加 State 框图:溜井 E1,矿车 E2,电机车 E3,放矿机 E4,操车系统 E5,提升机 E6,运提系统 Sys。

然后为 System 框图添加数据、事件和函数。由 System 框图的输出数据有:  $A_0$ , MTBF, MTTR\_MLDR。整个模型 Sys 框图主要以 Simevents 生成的 good 和 fault 等 12 个事件作为输入事件。Sys 框图的函数为真值表 Isok。

各子系统有着类似的内部构造,例如 E1 内部构造如图 7 所示。E1 的默认状态为 On,即正常工作状态;子系统每次故障都有故障参数  $Tr$  会自动加 1,并通过真值表向整个系统发送对应的“GOOD/FAULT”事件。

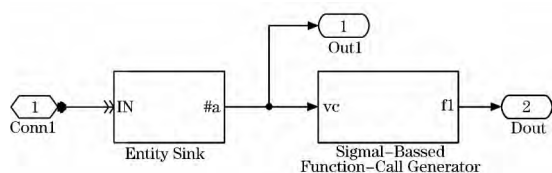


图 6 End\_Cycle 框图

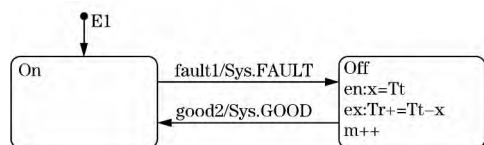


图 7 E1 框图

System 框图会根据各子系统  $E_i$  的 On / Off 作出相应整个运提系统的故障状态,内部构造如图 8 所示。

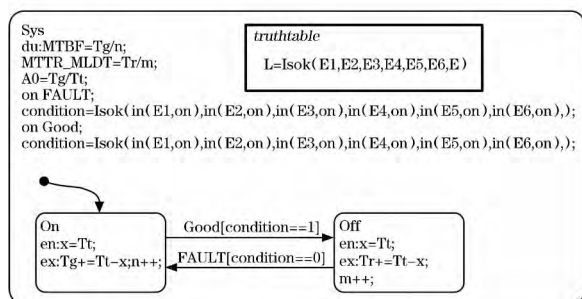


图 8 System 框图

仿真模拟的过程中会根据式(1)~式(4)计算相关参数。

通过分析故障树的最小割集为  $\{X1\}, \{X5\}, \{X6\}, \{X2, X4\}, \{X3, X4\}$ 。最小割集和真值表相关定义容易得出,可将故障树的最小割集转化为 Stateflow 软件中的真值表函数(truth table)“ $E = Isok(E1, E2, E3, E4, E5, E6)$ ”,如表 2 所示。

表 2 Isok 真值表

参数	决策 1	决策 2	决策 3	决策 4	决策 5	决策 6
e1	0	—	—	—	—	—
e2	—	—	—	0	—	—
e3	—	—	—	—	0	—
e4	—	—	—	0	0	—
e5	—	0	—	—	—	—
e6	—	—	0	—	—	—
e	0	0	0	0	0	1

表 2 中,  $e1, e2, e3, e4, e5, e6$  为真值表的输入参数,分别表示子系统 E1, E2, E3, E4, E5, E6 的状态,故障状态 0,正常状态取 1;  $e$  为整个运提系统的故障(0)/正常(1)状态。

## 2.4 仿真结果分析

向系统中输入基本参数后,将维修人数设置为不同的值,分别对模型进行约 6 万个仿真时钟,最终得出可靠性数据如表 3 所示。得出的数据比较符合该矿井的实际运行情况。从数据还可以看出:随着维修单元的的增加,系统可靠性提高,维修延误率下降,但过多的维修单元导致其利用率降低,造成资源浪费。因此矿山应该配备适当的维修人员。这里所得出的数据会有一定误差,主要原因有:现实矿山环境中影响因素较多,比如天气因素、人为因素管理等,所以会忽略一些次要因素;模型运行所用数据较少,也会产生一定误差。

表 3 仿真结果

统计参数	维修单元		
	1	2	3
可用度 $A_0$	0.8907	0.9114	0.9244
$MTBF/h$	570.5	548.0	540.7
$MTTR/h$	24.208	16.752	16.405
$MLDT/h$	0.7455	0.6677	0.0299
$MTTR\_MLDT/h$	25.65	18.418	16.610
维修单元利用率	0.4149	0.2587	0.2065

## 3 结 论

本文根据地下矿山生产安全系统特性,应用一种图形语言构造基于 Simevents 和 Stateflow 的运提可修系统可靠性模型,并进行了仿真模拟,得出较为符合实际的可靠性数据,产生了较好的效果与实践价值。该方法将建模过程与编程过程结合在一起,流程化,易操作,是一种较为实用的方法。此外,还可进一步将运提系统各环节更加细化,各环节故障分布函数多元化,可靠性框图复杂化等方面拓展可靠性仿真分析,为其它企业生产安全系统可靠性仿真提供重要的理论指导与参考价值。

### 参考文献:

- [1] 左秀峰,韩伯棠,何世伟,等. 矿井运提系统可靠性模型[J]. 系统工程理论与实践,2005(3):133-138.
- [2] 张光剑. 地下矿山提升运输系统可靠性及影响因素研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2008:2-4.
- [3] 白宪阵,曹军海,王绪智. 面向复杂系统可靠性仿真的 Agent 设计与验证[J]. 系统仿真学报,2012,24(10):2193-2196.

- 
- [4] 路延廷,林井祥. 基于秩和检验的矿井运煤系统可靠性仿真验证[J]. 煤炭技术,2011,30(8):16-17.
- [5] 林井祥. 矿井运煤系统可靠性优化研究[J]. 矿冶,2013,22(1):6-10.
- [6] 薛定宇,等. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真建模[M]. 北京:清华大学出版社,2011:342-347.
- [7] 黄雪梅. 基于 Mtlab 统一环境的生产线混杂系统建模与分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2013(5):9-15.
- [8] 孙晓峰,等. 基于 Matlab/Simevents 的网络仿真研究[J]. 电脑知识与技术,2007(23):1254-1269.
- [9] 吕学志,等. 基于 Stateflow 的复杂可修系统的建模与仿真方法[J]. 指挥控制与仿真,2009,31(6):71-75.
- [10] 邓立杰,等. 基于排队论的维修工具配置模型研究[J]. 计算机与数字工程,2014,42(2):207-209.
- [11] A. Apate. Modeling system architecture and resource constraints using discrete event simulation[EB/OL]. <http://www.math-work.cn>, 2012-06-20.
- [12] 曹利锋,邹树梁,等. 基于 VC++ 与 MATLAB 的故障树分析系统[J]. 计算机技术与发展,2014,24(1):77-80.
- [13] 戴剑勇,陈刚. 铀矿山运提系统设备 Agent 可靠性仿真设计与验证[J]. 矿业开发与研究,2014,34(2):96-99.