

12-12-2019

## Analysis on the Mission Reliability for AUV Based on Monte Carlo Method

Li Juan

1. Key Laboratory of Underwater Robotics, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; ;2. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; ;

Kunyu Zhang

2. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; ;

Haibo Li

2. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; ;

Lijuan Yang

3. Jiangnan Shipbuilding (Group) Co. Ltd., Shanghai 201913, China;

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Analysis on the Mission Reliability for AUV Based on Monte Carlo Method

### Abstract

**Abstract:** The high reliability of AUV is the necessary condition for it to complete the task satisfactorily and efficiently within the specified time. Traditional fault tree is very convenient for describing the reliability model of the system, but for large and complex system, this will significantly increase the computation of reliability parameters, thus the calculation is difficult. *Because it to calculate the reliability parameters of complex systems by the traditional fault tree, this paper adopts the method of combining the minimum cut set of fault tree and Monte Carlo method to establish the reliability model for Underwater Autonomous Unmanned Vehicle Systems for minimizing cut set of fault tree, and to analyse the reliability with Monte Carlo's method.* The simulation validates the reliability prediction, distribution and evaluation of AUV.

### Keywords

Autonomous unmanned underwater vehicle, fault tree, minimal cut set, monte carlo method

### Authors

Li Juan, Kunyu Zhang, Haibo Li, Lijuan Yang, and Mengdi Wang

### Recommended Citation

Li Juan, Zhang Kunyu, Li Haibo, Yang Lijuan, Wang Mengdi. Analysis on the Mission Reliability for AUV Based on Monte Carlo Method[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(10): 2131-2137.

## 基于蒙特卡罗法的 AUV 任务可靠性分析

李娟<sup>1,2</sup>, 张昆玉<sup>2</sup>, 李海波<sup>2</sup>, 杨莉娟<sup>3</sup>, 王蒙迪<sup>3</sup>(1. 哈尔滨工程大学 水下机器人技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;  
3. 江南造船(集团)有限责任公司, 上海 201913)

**摘要:** AUV(AUV-Autonomous Underwater Vehicle)有较高可靠度是它能够在规定时间内圆满、高效地完成任务的必要条件。传统的故障树对于描述系统可靠性模型非常方便,但是对于大型复杂系统,可靠性参数的计算量将大幅增加,计算比较困难。针对传统故障树计算复杂系统可靠性参数困难的情况,本文采用故障树最小割集与蒙特卡罗法相结合的方法,建立了水下无人航行器系统可靠性模型,求取故障树最小割集,结合蒙特卡罗方法进行可靠性分析。仿真验证 AUV 的可靠性预计、分配和评估。

**关键词:** 水下无人航行器; 故障树; 最小割集; 蒙特卡罗法

中图分类号: TP114.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 10-2131-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0346

## Analysis on the Mission Reliability for AUV Based on Monte Carlo Method

Li Juan<sup>1,2</sup>, Zhang Kunyu<sup>2</sup>, Li Haibo<sup>2</sup>, Yang Lijuan<sup>3</sup>, Wang Mengdi<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Underwater Robotics, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. Jiangnan Shipbuilding (Group) Co. Ltd., Shanghai 201913, China)

**Abstract:** The high reliability of AUV is the necessary condition for it to complete the task satisfactorily and efficiently within the specified time. Traditional fault tree is very convenient for describing the reliability model of the system, but for large and complex system, this will significantly increase the computation of reliability parameters, thus the calculation is difficult. *Because it to calculate the reliability parameters of complex systems by the traditional fault tree, this paper adopts the method of combining the minimum cut set of fault tree and Monte Carlo method to establish the reliability model for Underwater Autonomous Unmanned Vehicle Systems for minimizing cut set of fault tree, and to analyse the reliability with Monte Carlo's method.* The simulation validates the reliability prediction, distribution and evaluation of AUV.

**Keywords:** Autonomous unmanned underwater vehicle; fault tree; minimal cut set; monte carlo method

## 引言

自主水下无人航行器 (AUV-Autonomous



收稿日期: 2017-07-20 修回日期: 2017-11-23;  
基金项目: 国家自然科学基金(51609046/E091002),  
中央高校基金(HEUCFM170403), 水下机器人技术重  
点实验室研究基金(614221502061701);  
作者简介: 李娟(1976-), 女, 江苏泰兴, 博士, 副教  
授, 研究方向为水下机器人智能控制。

Underwater Vehicle)是一种新型的、结构复杂的、能在水面或水下执行任务的航行器,目前 AUV 在水文资料收集、海底搜救或打捞、海底施工、水下设备的检查与维护等方面广泛应用。要使 AUV 能够在规定时间内圆满、高效地完成任任务,必须让 AUV 具有较高的可靠度<sup>[1]</sup>。

常用的可靠性分析方法有可靠性框图法、故障树分析法、马尔科夫模型法、蒙特卡罗法等。可靠

<http://www.china-simulation.com>

• 2131 •

性框图法和故障树法已经很成熟,广泛应用于实际工程中,文献[2]通过可靠性框图法对舰船推进系统进行可靠性建模、计算,得到推进系统的可靠度。文献[3]将故障树分析法应用于变电站通信系统,找出影响变电站通信系统可靠性的因素,以便对变电站通信系统进行故障诊断与维护。可靠性框图法和故障树分析法建立的模型是系统某一时刻的静态模型,虽然建模简单,但是建立的模型不能将系统的维修考虑在内,此外对于结构复杂的系统,这两种方法相应可靠性计算量大大增加,计算结果可能不够精确。文献[4]将马尔科夫模型应用于评估电力变压器可靠性,可以为变压器维护维修提供理论支持。马尔科夫模型可以建立可修复系统的可靠性模型,但是计算复杂可修系统的可靠性指标却比较复杂。在可靠性分析过程中,如果系统规模较大难以用或者难以用准确的数学模型描述时,可靠性指标计算需要用到数字仿真方法,一般为蒙特卡罗仿真法,蒙特卡罗法是一种概率模拟方法,也称为随机抽样技术<sup>[5]</sup>。

结合以上可靠性分析法的特点,将故障树和蒙特卡罗方法相结合,采用故障树对 AUV 的某一任

务建立进行可靠性模型,然后应用蒙特卡罗方法对模型进行仿真计算,最后求得 AUV 任务可靠性参数,并分析子系统或部件对任务的影响,为以后提高 AUV 任务可靠性提供理论依据。

## 1 AUV 系统组成及任务剖面

### 1.1 AUV 系统组成

AUV 可以搭载多种任务模块,执行不同的任务,一般 AUV 分为平台总体和任务模块。平台总体包括载体构型与结构、能供与电气系统、推进和操纵系统、任务控制系统、平台控制系统、导航与通信系统、均衡与应急系统。任务模块一般包括侧扫声呐模块、温深盐模块、合成孔径声呐模块和海底地层剖面仪模块等。侧扫声呐模块主要用于探测海底地形扫描,温深盐模块用于测量海水的温度、深度和盐度,合成孔径声呐模块主要用于对水下目标的探测和识别,海底地层剖面仪模块主要用于探测海底地层。AUV 系统组成如图 1 所示。根据 AUV 完成指定任务的可靠度,可以得到如图 2 所示的任务可靠性框图,它表示 AUV 完成指定任务时,各子系统之间的关系。

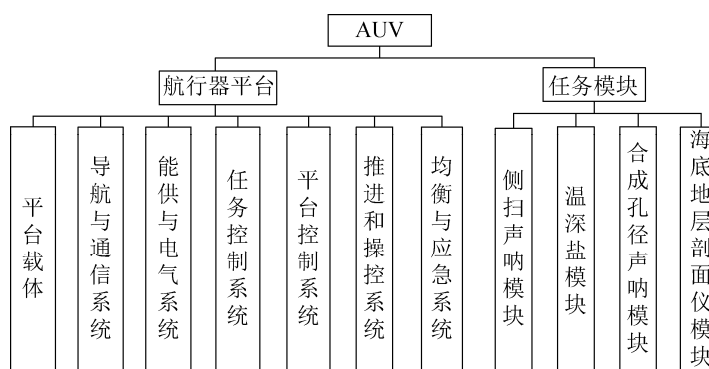


图 1 AUV 系统组成图

Fig. 1 System chart of AUV

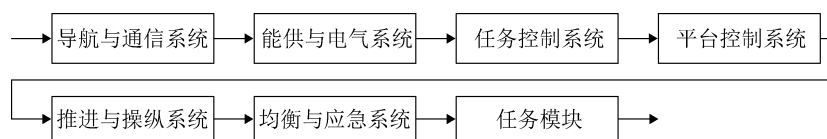


图 2 AUV 任务可靠性框图

Fig. 2 Mission reliability block diagram of AUV

### 1.2 AUV 任务剖面

AUV 任务可靠性是指 AUV 在规定的任务剖面和时间范围内, 完成规定功能的能力。任务剖面是指在完成规定任务时间内, 所经历的事件和环境的时序描述。

根据航行主要使命任务, 考虑侦察任务模块的预期使用方式, AUV 执行的典型任务分为 2 大类, 即一次出航执行单一功能的任务和一次出航执行多个功能的任务。单一功能任务有在水下执行地形扫描任务、测量海水温深盐任务等。多个功能任务有一次出航可在水下分别执行水下地形扫描任务和海底目标探测任务和一次出航可分别执行海水温深盐测量任务和海底地层探测任务等。以地形扫描任务为例, 其任务剖面图如图 3 所示, 地形扫描任务可以分解为 3 个阶段: 航渡阶段、侧扫声呐作业和返航阶段。所以, AUV 地形扫描任务可靠性就是 AUV 在规定的时间内经历航渡、地形扫描作业、返航这几个阶段后, 完成地形扫描任务的能力大小。

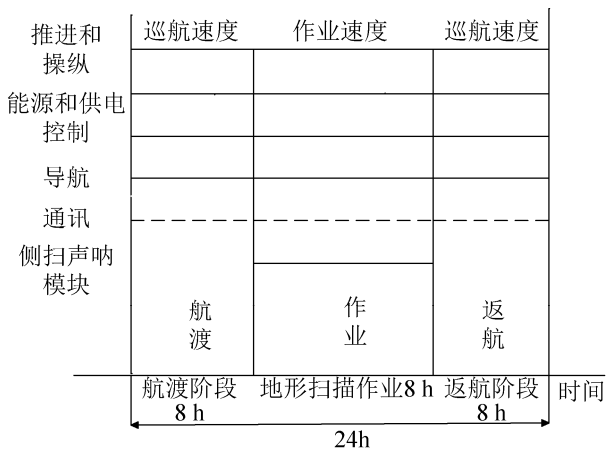


图 3 地形扫描任务剖面图

Fig. 3 Topographic scanning mission profile

航渡阶段: AUV 在规定的时间内到达指定的区域, 这个阶段侧扫声呐模块不工作。

地形扫描阶段: AUV 经过航渡阶段安全地到达指定区域利用侧扫声呐模块进行地形扫描作业, 获取地形信息。

返航阶段: AUV 在完成地形扫描任务后返回

的过程。

## 2 AUV 故障树模型

在进行可靠性分析之前需要建立 AUV 相应的故障树模型以及故障树最小割集。

### 2.1 AUV 推进系统故障树模型

故障树是一种图示模型, 它的构造是使用各种逻辑门按照系统与元件的因果关系组成而成的, 采用演绎法从顶事件出发, 通过中间事件到各个有关的基本事件有机地连成一棵倒置的事件树<sup>[6]</sup>。由于 AUV 是一个结构复杂系统, 为了方便描述故障树建立及最小割集求取方法, 文中以 AUV 推进与操纵系统为例, 其组成主要有左主推进器、右主推进器、艏垂直辅推进器、艉垂直辅推进器、艏水平辅推进器、艉水平辅推进器、升降舵机、方向舵机, 则推进与操纵系统任务可靠性框图如图 4 所示, 从而可以建立推进与操纵系统的故障树, 如图 5 所示, 各事件名称见表 1。

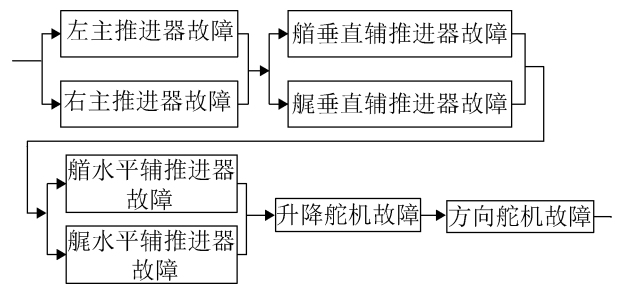


图 4 推进与操纵系统任务可靠性框图

Fig. 4 Mission reliability diagram of propulsion and control system

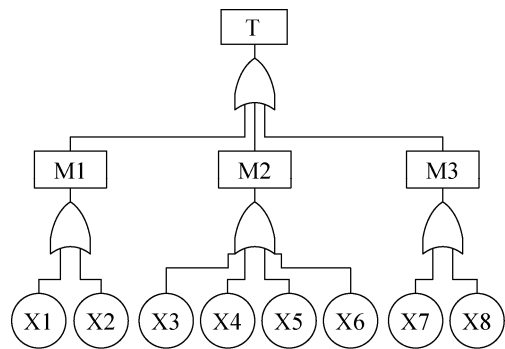


图 5 推进与操纵系统故障树

Fig. 5 Fault tree of propulsion and control system

表 1 故障树事件名称表  
Tab. 1 Event name table of fault tree

事件标号	事件名称
T	推进系统故障
M1	主推进器故障
M2	辅推进器故障
M3	舵机故障
X1	左主推进器故障
X2	右主推进器故障
X3	艏垂直辅推进器故障
X4	艉垂直辅推进器故障
X5	艏水平辅推进器故障
X6	艉水平辅推进器故障
X7	升降舵机故障
X8	方向舵机故障

## 2.2 最小割集

故障树中的一些底事件同时发生时,顶事件必然发生,则这些底事件组成的集合称为故障树的割集。若将割集中所含的底事件任意去掉一个就不再成为割集了,这样的割集就是最小割集。一个最小割集对应一种故障模式。

故障树的最小割集求法通常有两种,即上行法和下行法。下行法的基本方法是对于每一个输出事件,如果它是或门的输出,则将该或门的所有输入事件排成一列;如果它是与门的输出,则将该与门的所有输入事件排在同一行。上行法的思路正好与下行法相反,它是由底事件出发,由下向上逐层对所有结果事件进行处理,最后得到一个顶事件的布尔表达式<sup>[7]</sup>。文中采用下行法求取故障树最小割集,求解过程如表 2 所示。

表 2 下行法求推进系统最小割集  
Tab. 2 Minimum Cut Set of Propulsion System by Downlink Method

步骤	1	2
过程	M1	X1
		X2
	M2	X3
		X4
		X5
		X6
M3	X7	
	X8	

将推进与操纵系统故障作为故障树顶事件 T,从顶事件往下推理,可以找出引起顶事件发生的直接原因有中间事件 M1, M2, M3, 然后再找出引起中间事 M1 发生的直接原因有 X1 和 X2; 同理,引发 M2 的直接原因有 X3、X4、X5 和 X6, 引发 M3 的直接原因有 X7 和 X8; 最后求得的推进与操纵系统故障树最小割集为 {X1}, {X2}, {X3}, {X4}, {X5}, {X6}, {X7}, {X8}。采用同样的方法可以求出导航系统有 4 个最小割集,能供与电气系统有 2 个最小割集,控制系统有 3 个最小割集,通讯系统有 3 个最小割集。

## 3 基于蒙特卡罗方法 AUV 的可靠性仿真

在可靠性分析中,蒙特卡罗方法特别适用于那些难以用确定性的方法分析的大型复杂系统,蒙特卡罗方法是一种概率模拟方法,其核心是概率论与数理统计中的大数定理,通过大量抽样实验得到问题的近似解,即系统的各种可靠性指标的点估计和统计值的分布函数<sup>[8]</sup>。蒙特卡罗仿真的过程反应了系统寿命发展过程的本质,通过仿真可以使工作人员洞察系统内部单元发生的故障时如何引起系统失效的,使设计人员知道所设计系统的失效模式和薄弱环节。蒙特卡罗方法可以针对可修系统和不可修系统进行仿真设计<sup>[9]</sup>。

### 3.1 仿真原理

由故障树的最小割集可知,当至少有一个最小割集发生的时候,故障树顶事件就发生,所以最先发生的最小割集就是导致系统失效的最小割集<sup>[10-12]</sup>。

设任务持续时间为  $T_m$ ,第  $j$  次仿真系统发生故障的时间为  $T_j$ ,如果(1)式成立,则任务失败;否则,任务成功。

$$T_j < T_m \quad (1)$$

假设建立的系统 S 的故障树有  $k$  个最小割集  $M_i(i=1,2,\dots,k)$ ,第  $i$  个最小割集  $M_i$  包含  $l$  个基本事件  $Z_j(j=1,2,\dots,l)$ ,子系统或基本部件的故障分

布函数  $F_i(t)$  均已知。在求出系统的所有最小割集后, 对每一个最小集中的所有基本部件进行故障时间抽样。

基本部件故障时间抽样方法如下:

(1) 产生  $U(0, 1)$  均匀分布的随机数  $\eta$ 。

(2) 由已知的基本部件的故障分布函数  $F_i(t)$ , 通过  $t_i = F_i^{-1}(\eta)$  可以得出第  $i$  个基本部件的故障时间抽样。

则包含  $l$  个基本事件  $Z_i (i=1, 2, \dots, l)$  的最小割集发生故障的时间  $T_j$  即为  $l$  个基本部件故障时间中的最大时间[9, 10, 11]。

### 3.2 AUV 的蒙特卡罗仿真流程

蒙特卡罗仿真流程图, 如图 6 所示。

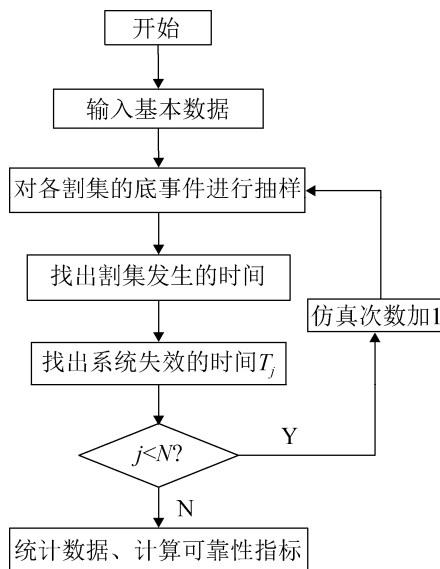


图 6 蒙特卡罗仿真流程图  
Fig. 6 Monte Carlo simulation

本文可靠性仿真流程如下:

(1) 这里需要获取的基本数据有: 仿真总次数  $N$ , AUV 执行某任务时间  $T_m$ , 系统基本事件或子系统的故障分布函数及其参数[12,13,14]。

(2) 针对执行任务建立相应的故障树, 求取最小割集, 对每一个最小割集中的所有底事件进行时间抽样, 设第  $j$  次第  $i$  个最小割集发生故障时间为  $T_{ij}$ 。所有最小割集的故障时间中值最小的即为系统

失效时间, 记第  $j$  次仿真系统失效时间为  $T_j$ ,  $T_j = \min\{T_{1j}, T_{2j}, \dots, T_{kj}\}$  ( $k$  为最小割集的个数)。记第  $j$  次仿真, 成功次数为  $A_{sj}$ , 若  $T_j < T_m$ , 则此次仿真任务失效,  $A_{sj}=0$ ; 否则此次任务成功,  $A_{sj}=1$ 。

(3) 判断仿真是否继续。如果第  $j$  次仿真次数满足  $j \leq N$ , 则继续进行(2), 否则进行(4), 仿真流程图见图 6。

(4) 统计仿真数据, 计算可靠性参数。

1) 任务成功次数:  $A_s$

$$A_s = \sum_{j=1}^N A_{sj} \quad (2)$$

2) 任务失败次数:  $A_f$

$$A_f = N - A_s \quad (3)$$

3) 任务成功概率:  $D$

$$D = \frac{A_s}{N} \quad (4)$$

4) 平均故障间隔时间:  $MTBF$

$$MTBF = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^k T_{ji}}{A_f} \quad (5)$$

5) 基本部件的模式重要度:  $W_N(Z_i)$

$$W_N(Z_i) = \frac{N1}{N2} \quad (6)$$

$N1$ : 基本部件  $Z_i$  失效引起的系统失效次数;

$N2$ : 系统失效总次数。

## 4 仿真与结果分析

文中以 AUV 地形扫描任务为例, 地形扫描任务的故障树如图 7 所示。T 表示地形扫描任务失败, B1 表示推进与操纵系统故障, B2 表示导航系统故障, B3 表示电源系统故障, B4 表示控制系统故障, B5 表示通讯系统故障, X1 到 X20 是各基本部件故障, 基本部件的寿命分布类型及参数见表 3。其中, 失效分布函数类型均为指数分布。设地形扫描任务总时间 24 h, 仿真次数为 15 000, 将仿真总次数  $N$ 、任务总时间和各基本部件的寿命分布及参数输入到编写的程序中, 得到如下可靠性数据。

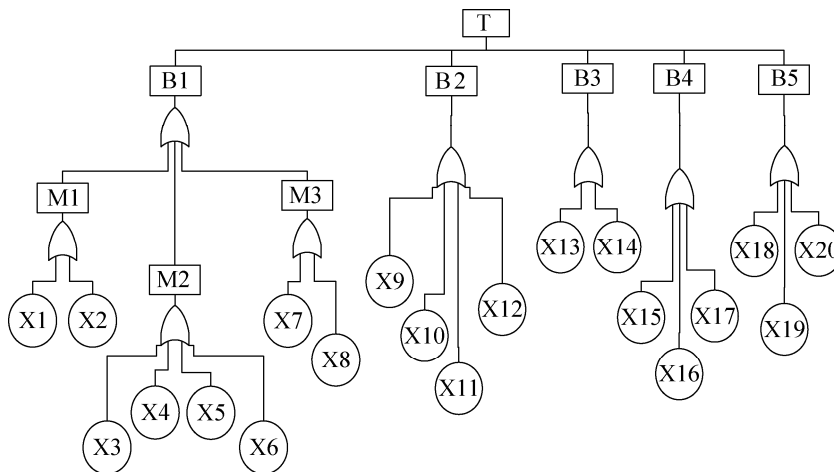


图 7 地形扫描任务故障树  
Fig. 7 Fault tree of terrain scan task

表 3 各基本部件失效分布类型及参数  
Tab. 3 Failure distribution types and parameters of basic components

基本部件代码	基本部件名称	特征参数( $\times 10^{-6}$ )
X1	左主推进器故障	$\lambda_1=5$
X2	右主推进器故障	$\lambda_2=5$
X3	艏垂直辅推进器故障	$\lambda_3=5$
X4	艉垂直辅推进器故障	$\lambda_4=5$
X5	升降舵机故障	$\lambda_5=5$
X6	方向舵机故障	$\lambda_6=5$
X7	艏水平辅推进器故障	$\lambda_7=5$
X8	艉水平辅推进器故障	$\lambda_8=5$
X9	测高声呐故障	$\lambda_9=1.5$
X10	GPS 接收机故障	$\lambda_{10}=8.5$
X11	惯性导航仪故障	$\lambda_{11}=2$
X12	避碰声呐故障	$\lambda_{12}=6$
X13	仪表电池组故障	$\lambda_{13}=10.5$
X14	动力电池组故障	$\lambda_{14}=22.5$
X15	使命自主控制计算机故障	$\lambda_{15}=18$
X16	作业任务管理计算机故障	$\lambda_{16}=18.5$
X17	控制与导航计算机故障	$\lambda_{17}=16$
X18	数传电台故障	$\lambda_{18}=3.4$
X19	无线 AP 故障	$\lambda_{19}=5$
X20	通讯定位声呐故障	$\lambda_{20}=4.6$

- (1) 任务成功概率  $D$  为 0.937。
- (2) 系统平均故障间隔时间  $MTBF$  为 328.45 h。
- (3) 由图 8 可以看出仿真次数与地形扫描任务可靠度的关系。当仿真次数达到 12 000 左右以后，地形扫描任务可靠度趋于平稳，最后稳定在某一值附近，贴近工程实际。

可靠度的关系。当仿真次数达到 12 000 左右以后，地形扫描任务可靠度趋于平稳，最后稳定在某一值附近，贴近工程实际。

(4) 由表 4 中的数据可以得出作业任务管理计算机、使命自主控制计算机、控制与导航计算机、动力电池组的模式重要度相对较大，因此它们是 AUV 系统的相对薄弱环节，所以应该着重加以改善，以提高系统可靠性。

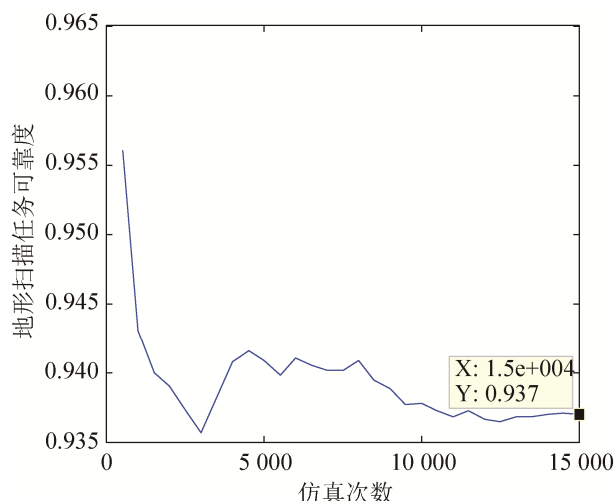


图 8 地形扫描任务可靠性仿真  
Fig. 8 Reliability simulation of topographic scan mission



表 4 基本部件模式重要度  
Tab. 4 Mode importance of basic parts

基本部件代码	$W_M(Z_i)$	基本部件代码	$W_M(Z_i)$
X1	0.032 5	X11	0.012 5
X2	0.031 2	X12	0.038 4
X3	0.030 5	X13	0.053 6
X4	0.032 8	X14	0.084 3
X5	0.033 4	X15	0.072 5
X6	0.031 3	X16	0.074 0
X7	0.034 2	X17	0.063 1
X8	0.031 6	X18	0.022 3
X9	0.007 4	X19	0.030 6
X10	0.495 6	X20	0.028 8

## 5 结论

文中以 AUV 推进系统为例, 分析其故障树模型和最小割集, 并且研究了最小割集与蒙特卡罗相结合的数字方针方法, 通过实例验证了该方法的可行性, 为 AUV 的可靠性预计、分配和评估提供了简单、行之有效的依据。

## 参考文献:

[1] 徐玉如, 李彭超. 水下机器人发展趋势[J]. 自然杂志, 2011, 33(3): 125-133.  
Xu Yuru, Li Pengchao. Underwater robot development trend [J]. Natural Journal, 2011, 33(3): 125-133.

[2] 杨卫英. 某舰主推进系统任务可靠性研究[J]. 船舶, 2005(5): 41-43.  
Yang Weiyang. Study on mission reliability of a ship's main propulsion system[J]. Ship, 2005(5): 41-43.

[3] 韩小涛. 故障树分析法在变电站通信系统可靠性分析中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 51-54.  
Han Xiaotao. Application of Fault Tree Analysis in Reliability Analysis of Substation Communication System[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 51-54.

[4] 廖瑞金. 应用马尔科夫模型评估电力变压器可靠性[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 322-328.  
Liao Ruijin. Application of Markov Model to Evaluate Power Transformer Reliability[J]. High Voltage Technology, 2010, 36(2): 322-328.

[5] 王圣金. 基于蒙特卡罗仿真的液压系统动态可靠性研究[D]. 南京: 东南大学, 2006: 34-41.  
Wang Shengjin. Dynamic reliability of hydraulic system based on Monte Carlo simulation[D]. Nanjing: Southeast University, 2006: 34-41.

[6] Lee W S, Grosh D L, Tillman F A, et al. Fault tree analysis, methods, and applications - a review[J]. IEEE Transactions on Reliability(S0018-9529), 2009, R-34(3): 194-203.

[7] 古莹奎, 张全新, 梁玲强, 等. 基于 BDD 考虑共因失效的多阶段任务系统可靠性分析方法[J]. 机械设计与研究, 2017(2): 9-13.  
Gu Yingkui, Zhang Quanxin, Liang Lingqiang, et al. Multi-stage task system reliability analysis method based on BDD considering common cause failure[J]. Mechanical design and research, 2017(2): 9-13.

[8] 曾声奎. 可靠性设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 87-92.  
Zeng Shengkui. Reliability design and analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 87-92.

[9] 卫军胡. 蒙特卡罗方法在系统工程中的应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 34-55.  
Wei Junhu. Monte Carlo method in the application of systems engineering[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007: 34-55.

[10] Vesely W E. Reliability and Fault Tree Applications at the NRTS[J]. Nuclear Science IEEE Transactions on(S0018-9499), 1976, 18(1):472-480.

[11] Bian X Q, Mou C H, Yan Z P, et al. Simulation Model and Fault Tree Analysis. IEEE International Conference on Mechatronics an Automation (S2152-7431), 2009, 15(12): 4452-4457.

[12] 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]. 电子产品可靠性与环境试验, 2013, 31(5): 17-22.  
Liu Qinwen, Zhao PinLun. Monte Carlo based system task reliability analysis method[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2013, 31(5): 17-22.

[13] 孟礼, 武小悦. 基于 OBDD 的可修航天测控系统任务可靠性分析[J]. 航空动力学报, 2016, 31(5): 1065-1072.  
Meng Li, Wu Xiaoyue. Mission Reliability Analysis of Repairable Space Measurement and Control System Based on OBDD[J]. Journal of Aerodynamics, 2016, 31(5): 1065-1072.

[14] 冯嘉珍, 张建国, 贾庆轩, 等. 机械臂运动轨迹可靠性分析的自更新响应面法[J]. 北京邮电大学学报, 2017(4): 39-44.  
Feng Jiazhen, Zhang Jianguo, Jia Qingxuan, et al. Self-renewing response surface method for reliability analysis of manipulator trajectory[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017(4): 39-44.