

文章编号:1673-0062(2013)01-0046-07

基于故障树分析法的抓头可靠性仿真分析

周其旺¹, 邹树梁^{2*}, 唐德文¹, 刘永霞¹, 王 昆¹

(1. 南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学 核燃料循环技术与装备研究中心, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:首先采用故障树法对送料系统中的抓头部件进行结构功能分析, 建立可靠性框图, 并以“抓料失效”为顶事件, 建立故障树并得到了抓头的最小割集和最小径集; 经过重要度分析, 找出了关键零部件并分析了故障原因, 然后结合计算机辅助故障树分析软件(CAFTA)对其进行仿真模拟, 计算得到抓头的可靠度直方图, 并确立抓头的失效服从指数分布. 针对抓头最小割集中的关键部件提出了抓头护板表面改性和结构设计改进措施, 实验表明原故障基本消除, 系统的可靠性得到较大提高.

关键词:故障树分析; 抓头; CAFTA; 可靠性

中图分类号:TH165; TH6 **文献标识码:**B

The Simulation Analysis of Grab Reliability Based on the Fault Tree Analysis

ZHOU Qi-wang¹, ZOU Shu-liang^{2*}, TANG De-wen¹, LIU Yong-xia¹, WANG Kun¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

2. Nuclear Fuel Cycle Technology And Equipment Research Center, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: A fault tree method was used to analyse the grab's structure and the function of feeding system and the reliability block diagram was presented. Take the grasping failure as top event, the minimum cut sets and minimal path sets were given out and the fault tree was established in the paper. The key parts and cause of the malfunction were found out after the importance analysis of the grab. Emulational simulation was performed with CAFTA, and then the reliability histogram was given out through calculation, and the grab failure was confirmed to be exponentially distributed. According to the key parts of minimal cut sets, this paper proposes improvement measures based on surface modification and structure design. The consequence of the experiment showed that fault was basically eliminated and reliability of the system was greatly improved.

收稿日期: 2012-11-09

基金项目: 国防基础科研基金资助项目(2011GHN02-Z03)

作者简介: 周其旺(1986-), 男, 湖北黄冈人, 南华大学机械工程学院硕士研究生. 主要研究方向: 机械设备可靠性研究. * 通讯作者

key words: fault tree analysis; grab; CAFTA; reliability

0 引言

抓头是乏燃料后处理中间试验厂一种较为关键的设备,该设备在送料系统中起着主导作用,主要由抓取组件的四个抓手组成,用来完成抓取燃料组件进行剪切的过程.目前中试厂送料系统的故障主要有送料不到位、推料剪切失败、抓头掉料等;这些故障导致抓头的使用寿命的降低,会导致整个送料系统的安全性和可靠性降低,同时其长距离抓取组件的环境条件苛刻,在加上系统运动部件多,磨损大,直接影响着整个剪切系统的工作效率和安全性^[1].

目前在特殊环境条件下的机械关键设备的可靠性分析只限于可靠性建模和定性分析算法的研究上.为了找出系统的薄弱环节,改善抓头的设计,提高运行的可靠性,减少不必要的维修费用,有必要对其进行可靠性分析,所以本文试图利用故障树法来对抓头进行可靠性分析,建立故障树,得出最小割集和径集,对相关薄弱环节提出改进

措施,并仿真模拟故障树评价失效分布,这样为建立高可靠性运行的大型后处理厂设备和进行有效的维修提供理论依据.

故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)故障树分析(FTA)技术是美国贝尔电报公司的电话实验室于 1962 年开发的,它是一种图形演绎方法,它可以找到潜在的故障并进行故障诊断.在航空和航天的设计、维修,原子反应堆、大型设备以及大型电子计算机系统中得到了广泛的应用,是分析设备可靠性的有效方法^[2].

1 抓头结构分析及可靠性框图

从公司统计的故障情况来看,送料系统中的抓头部位出现故障较多,即“抓头掉料”故障出现较为频繁,也就是抓头在装料和送料过程中没有抓紧燃料组件,使得组件掉落在装料井或热室内.依据抓头要实现的功能可以得到抓头的功能结构如图 1 所示.

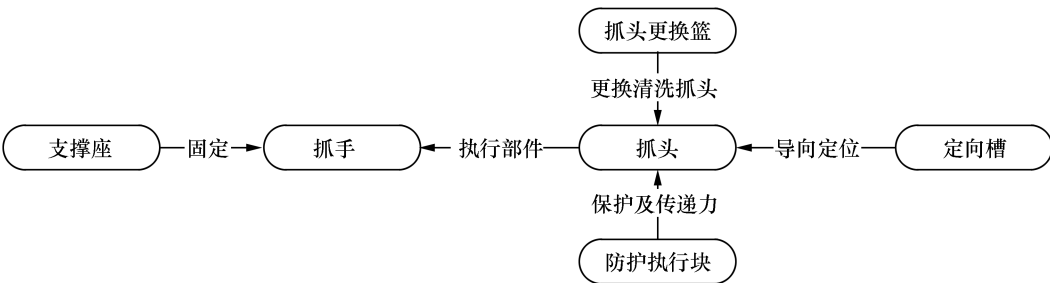


图 1 抓头功能结构图
Fig. 1 Function structure diagram of the grab

抓头是料筒内部抓去组件的一个相当重要的部件,当其抓取组件时首先是锁住机构执行解锁,即由抓头更换篮上的气缸推动楔形块克服弹簧力来打开卡环,其次链条连接机构与抓头上的孔结合,最后气缸拉动楔形块使得卡环和弹簧将该链条柱紧紧锁住,实现抓取组件的下一步动作;抓取

组件完成后执行与此相反的过程,抓取一定数量的组件后要进行抓头更换;执行抓头更换篮命令后使抓头与料筒的承载吊块脱开,吊至相应的位置处.

根据抓头结构功能图可以得到该机构的可靠性框图,如图 2 所示.

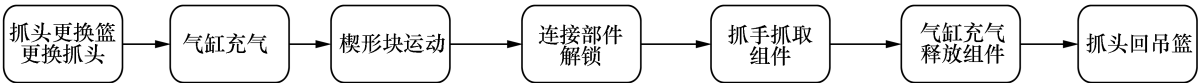


图 2 抓头可靠性框图
Fig. 2 Reliability Block Diagram of the grab

2 故障树分析(FTA)

2.1 建立抓头故障树

为了正确建立抓头部件故障树应该选择好顶事件,确定建树流,处理好产品系统及部件的边界条件. 为此,在得出的抓头可靠性框图的基础上以“抓头抓料失效”为故障树的顶事件,来建立抓头的故障树,并作出如下假设:

- 1) 与抓头连接的其它部件不考虑失效对其故障造成的影响;
 - 2) 不考虑人为环境因素,以免故障树过于庞大和繁琐;
 - 3) 因为部件和组件多为串联系统,故以主要零件代表底事件不再向下发展;
- 根据以上假设,依据可靠性框图 2 对抓头逐一分解,画出如图 3 所示的故障树图.

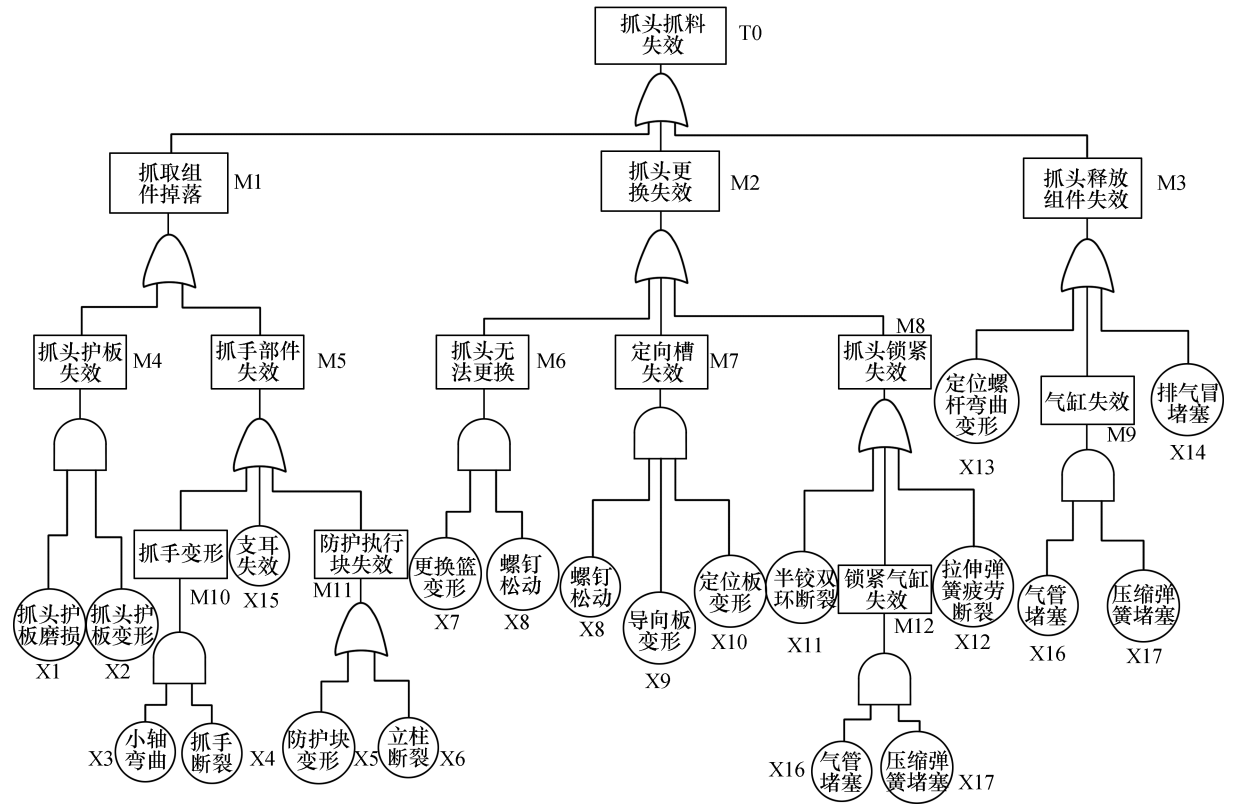


图 3 抓头故障树
Fig.3 The fault tree of grab

图 3 中 T0 为顶事件, M1、M2、M3、M4、M5、M6、M7、M8、M9、M10、M11、M12 为中间事件, X1、X2、X3、X4、X5、X6、X7、X8、X9、X10、X11、X12、X13、X14、X15、X16、X17 为基本事件.

2.2 抓头故障树定性分析

由于抓头部件的运行时间不长,且到目前为止,抓头机械零部件大多数有一定的故障概率,考虑到在这种强辐射的特殊环境下,故障树的分析只针对于故障发生的前、中阶段情况. 采用故障树的定向分析研究所有可能导致抓

头顶事件发生的故障模式,也就是最小割集. 根据最小割集的阶数(最小割集的所含底事件个数)对最小割集进行比较. 通常阶数越低,它的重要性越高^[3]. 采用故障树的下行法(Fussell-vesely 法),即从顶事件逐渐向下,根据逻辑关系分行表示,若是或门,则将输入事件排列不同行,若是与门,则将输入事件排列同一行. 以此分解,直到找到不能再分的基本事件为止. 抓头顶事件分析结果如表 1 所示.

表 1 抓头抓料失效最小割集

Table 1 Minimal cut sets of the the failure of the grabing material

最小割集	一阶最小割集	二阶最小割集	三阶最小割集
组成	X5,X6	X1 X2	X8 X9 X10
	X11,X12	X3 X4	
	X13,X14	X7 X8	
	X15	X16 X17	
个数	7	3	1
所占比率	64%	27%	9%

由最小径集定义可知,若一个最小径集中的所有基本事件都不发生,则顶上事件就不发生,掌握了最小径集,可知要使事故不发生,须控制住哪

几个基本事件能使顶上事件不发生,并可知道有几种控制系统事故的方案^[3]. 依据定义可以得出如表 2 所示的最小径集.

表 2 抓头抓料失效最小径集

Table 2 Minimal path sets of the the failure of the grabing material

最小径集													最小径集												
1	X1	X7	X16	X3	X9	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	18	X1	X7	X16	X4	X8	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6
2	X1	X7	X16	X3	X10	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	19	X1	X7	X17	X3	X9	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6
3	X2	X7	X16	X3	X9	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	20	X1	X7	X17	X3	X10	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6
4	X1	X7	X16	X4	X9	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	21	X2	X7	X17	X3	X9	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6
5	X2	X7	X16	X3	X10	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	22	X1	X8	X17	X3	X9	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6
6	X1	X7	X16	X4	X10	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	23	X1	X7	X17	X4	X9	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6
7	X2	X8	X16	X3	X9	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	24	X2	X7	X17	X3	X10	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6
8	X2	X7	X16	X4	X9	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	25	X1	X8	X17	X3	X10	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6
10	X1	X8	X16	X4	X9	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	26	X1	X7	X17	X4	X10	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6
11	X2	X8	X16	X3	X10	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	27	X2	X8	X17	X3	X9	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6
12	X2	X7	X16	X4	X10	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	28	X2	X7	X17	X4	X9	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6
13	X1	X8	X16	X4	X10	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	29	X2	X8	X17	X3	X10	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6
14	X2	X8	X16	X4	X9	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	30	X2	X7	X17	X4	X10	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6
15	X2	X8	X16	X4	X10	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	31	X1	X8	X17	X4	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	
16	X2	X7	X16	X3	X8	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	32	X1	X7	X17	X3	X8	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6
17	X1	X8	X16	X3	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6		33	X2	X8	X17	X4	X13	X14	X5	X15	X11	X12	X6	

根据上述表 1 和表 2 的数据计算结果,分析结果如下的改进方案:

1)抓头抓料失效故障树中有 6 个一阶最小割集,占有所有最小割集体的 60%;最小径集总共分析出了 33 种控制事故发生的方案;

2)为了提高抓头的可靠性,应尽可能的减少一阶最小割集基本事件的发生;

3)事故发生率尽量控制在最低点,如改进锁

紧机构设计、改善立柱和防护执行快表面改性;

4)料筒对抓头的定位改为主臂滑槽、传力机构和锁紧机构三位一体的结构.

2.3 抓头故障树结构重要

结构重要程度是基本事件影响顶事件发生的重要程度. 分析方法主要有两种,一种是求出结构重要度系数,另外一种是根据最小割集和最小径集可排出结构重要度的顺序. 据表 1 和表 2 分

析结果可以得出抓头最小割集的结构重要程度如下示:

$I(13) = I(14) = I(5) = I(15) = I(11) = I(12) = I(6) > I(8) > I(2) = I(7) = I(1) = I(16) = I(17) = I(3) = I(4) > I(10) = I(9)$

即定位螺杆变形 = 排气冒堵塞 = 防护快变形 = 支耳失效 = 半铰双环断裂 = 拉伸弹簧疲劳断裂 = 立柱断裂 > 螺钉松动 > 抓头护板变形 = 更换篮变形 = 抓头护板磨损 = 气管堵塞 = 弹簧卡住 = 小轴弯曲 = 抓手断裂 > 定位板变形 = 导向板变形.

3 抓头可靠性预测分析

借助计算机辅助故障树分析软件(简称 CAF-TA)来对其可靠性进行预测,分析过程直接以所建立的故障树为分析模型,采用了面向对象设计思想,以蒙特卡罗方法为理论精髓,将故障树模型的建立、分析和后处理等功能集中在一个图形化管理平台上.可实现包含多态事件的单调或非单调系统的可靠性预测分析任务^[4-11].

3.1 可靠性预测模型的建立

将图 3 建立的故障树模型输入到 CAFTA 中(如图 4),若机械零部件服从指数分布,则有故障树的模型导入成功后,进行相关的设定,设置如图 5 所示.

3.2 可靠性数据分析结果

经过查阅机械抓头相关文献资料,大多数疲劳寿命分布具有不确定性,所以需要对总体分布做出大致的估计^[12],根据对参数的估计和计算可

靠度的对比得到直方图与指数分布函数的拟合情况如图 6,图 7 所示.

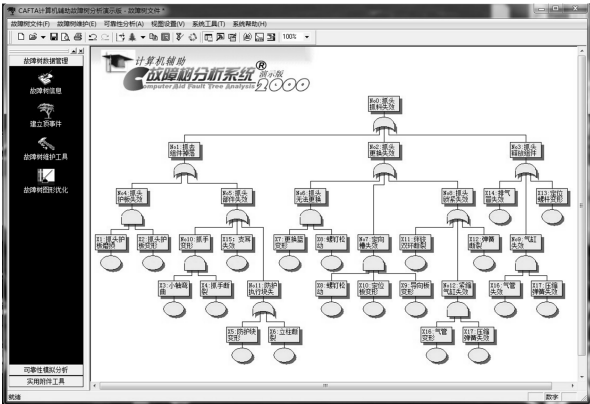


图 4 故障树 CAFTA 模型

Fig.4 The fault tree CAFTA model



图 5 故障树参数运行设置

Fig.5 The Run set for FTA analysis

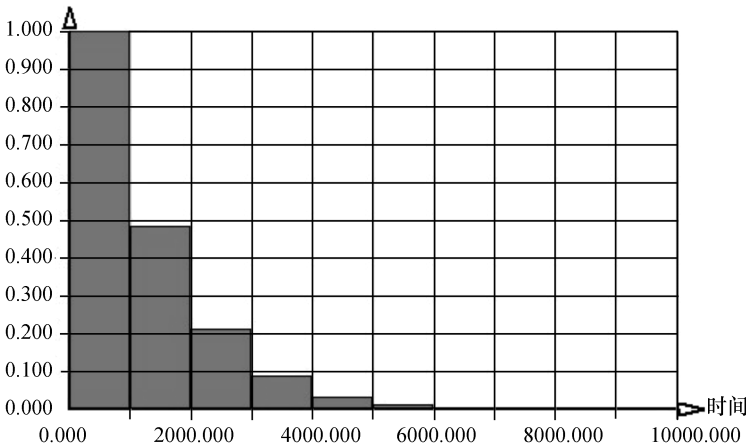


图 6 可靠度直方图

Fig.6 The reliability of histogram

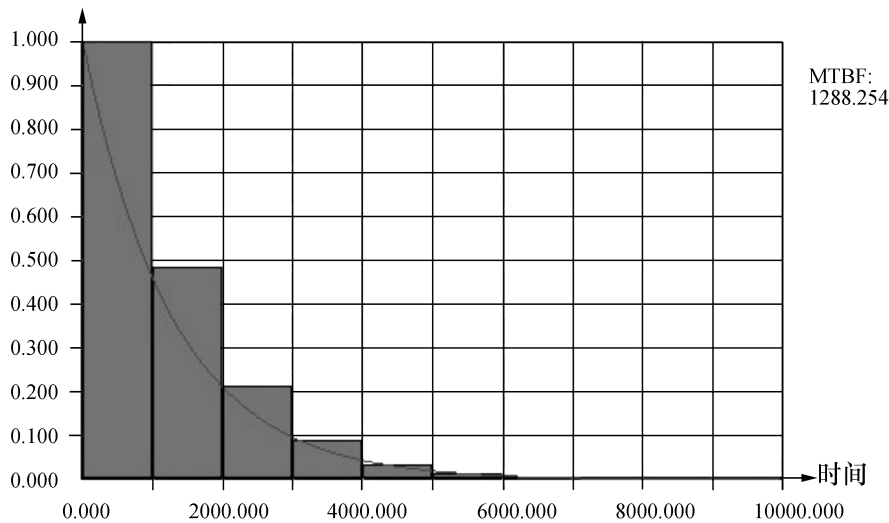


图 7 指数分布拟合图

Fig. 7 Exponential distribution fitting figure

失效数据的拟合是对故障树寿命分布参数做一个估计计算,并对寿命分布进行非参数的估计以获得总体的分布规律.在一定的置信度下,选取

置信区间的置信水平为 0.1,0.05,0.01.因此失效密度的置信区间计算报告如表 3 所示.

表 3 可靠度直方图计算报告

Table 3 Reliability histogram calculation report

编号	起始时间	终止时间	失效密度	置信区间 (a = 0.01)	置信区间 (a = 0.05)	置信区间 (a = 0.1)
1	0.00	1 000.00	1.000	(1.000,1.000)	(1.000,1.000)	(1.000,1.000)
2	1 000	2 000.00	0.488	(0.475,0.501)	(0.478,0.497)	(0.479,0.496)
3	2 000	3 000.00	0.215	(0.204,0.225)	(0.207,0.223)	(0.208,0.221)
4	3 000	4 000.00	0.088	(0.081,0.096)	(0.083,0.094)	(0.084,0.093)
5	4 000	5 000.00	0.032	(0.028,0.037)	(0.029,0.036)	(0.030,0.035)
6	5 000	6 000.00	0.014	(0.011,0.017)	(0.012,0.016)	(0.012,0.016)
7	6 000	7 000.00	0.005	(0.003,0.007)	(0.004,0.006)	(0.004,0.006)
8	7 000	8 000.00	0.001	(0.001,0.003)	(0.001,0.002)	(0.001,0.002)
9	8 000	9 000.00	0.001	(0.000,0.001)	(0.000,0.000)	(0.000,0.001)
10	9 000	10 000.00	0.000	(0.000,0.001)	(0.000,0.000)	(0.000,0.001)

其表中计算还得到系统 MTBF = 1288.254,水平 0.01,0.05,0.1 的置信区间为:(1287.954,1288.554),(1288.025,1288.482),(1288.062,1288.445).服从指数分布的可靠度 $R(t) = e - \lambda t = 1/e = 0.368$,其中 $\lambda = 1/t$,得到的可靠度基本上和拟合图的得到的可靠度相近,因此可以认为寿命分布服从指数分布;平均无故障时间为1 288.254 h.

4 结 论

文中利用故障树分析方法对乏燃料后处理送料系统中的抓头潜在故障进行分析,确定了各个零部件的故障模式,揭示了影响抓头的可靠性主要因素,找到系统的薄弱环节,确定了抓头系统寿命分布,

并提出改进抓头具体措施:卸掉定位销改为

主臂滑槽结构定位,将护板改为方形焊接结构并对其表面改性.对改进后的结构进行试验验证故障基本上消除,改进后的抓头结构对操作的安全性提高和故障诊断具有重要意义.为乏燃料后处理建立高效、稳定、可靠的后处理厂提供可行的理论依据.

参考文献:

- [1] 杨宏悦,吴华,欧阳立华,等.剪切机送料系统的可靠性分析研究[J].核标准计量与质量,2010(1):8-13.
- [2] 宋维.基于故障树技术的中国实验快堆核级循环冷却水系统可靠性分析及局部动态问题研究[D].北京:中国原子能科学研究院,2007.
- [3] 潘璘玲.最小割集与最小径集在事故树分析中的作用[J].安全与健康,2003(10S):31-33.
- [4] 周爱萍,王显会,宋子健.基于故障树分析法的大型特种车辆液压系统的可靠性仿真分析[J].机床与液压,2011,39(19):151-154.
- [5] 何卫东,郭洪亮,李永华,等.大功率风电机用变桨距减速器的故障树分析[J].电网技术,2011,30(20):15-20.
- [6] Cheng C H, Mon D L. Fuzzy system reliability analysis by confidence interval[J]. Fuzzy sets and systems, 1993, 56(1):29-35.
- [7] He Guo, XU Jian-mao, ZHANG Wen-cai. Research on maintaining monitor and control system using the theory of FTA[J]. Journal of naval university engineering(China), 2000(4):45-48.
- [8] 宋维.基于故障树技术的中国实验快堆核级循环冷却水系统可靠性分析及局部动态问题研究[D].北京:中国原子能科学研究院,2007.
- [9] 吴凤凤.我国核工业可靠性工作现状与思考[J].质量与可性,2011(1):19-24.
- [10] 何国伟,戴慈庄.可靠性数据收集与分析[M].北京:国防工业出版社,1995:161-165.
- [11] 王丽娟.钻井液固控系统的研究及可靠性分析[D].北京:中国石油大学,2011.
- [12]