

基于聚合模糊数的多参数监护仪故障树研究

范莉萍¹, 种银保¹, 郎朗¹, 马建川¹, 肖晶晶¹, 刘香君², 吕思敏¹

1. 陆军军医大学第二附属医院医学工程科, 重庆 400037; 2. 中国人民解放军第32572部队, 贵州 安顺 561000

【摘要】针对多参数监护仪急救医疗设备故障率高,故障现象与故障原因对应复杂,且设备技术图纸缺乏、维修力量薄弱、厂家或第三方维修成本高等因素导致的维修困境,本文提出了基于聚合模糊数的多参数监护仪故障树故障诊断模型。首先,通过分析多参数监护仪的结构组成,建立故障树模型;其次,针对其故障数据缺乏和专家评价主观性的特点,采用聚合模糊数确定底事件故障率,并进行了底事件关键重要度分析;最后,采用Bland-Altman分析确定了本实验研究结果与验证实验结果一致性达到96.88%,证明了本文方法的有效性。本文的研究方法通过结合专家评价法和聚合模糊数弥补了故障数据缺乏和专家评价主观性的不足,适用于过程诊断中故障确定及事前潜在风险识别,为系统可靠性分析及故障诊断提供了思路。

【关键词】多参数监护仪;故障诊断;故障树;聚合模糊数;Bland-Altman分析

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)06-0725-07

Fault tree analysis for multi-parameter monitor based on aggregate fuzzy number

FAN Liping¹, CHONG Yinbao¹, LANG Lang¹, MA Jianchuan¹, XIAO Jingjing¹, LIU Xiangjun², LÜ Simin¹

1. Department of Medical Engineering, the Second Affiliate Hospital of Army Medical University, Chongqing 400037, China; 2. Unit 32572 of the Chinese People's Liberation Army, Anshun, 561000, China

Abstract: In view of the high failure rates of emergency medical equipments such as multi-parameter monitor and its maintenance dilemmas, including complex failure phenomena and failure causes, lack of equipment technical drawings, weak maintenance capabilities, high maintenance costs for manufacturers or third parties, etc., a fault diagnosis model for the fault tree analysis for multi-parameter monitor based on aggregate fuzzy number is proposed in the study. The fault tree model was firstly established by analyzing the structure of multi-parameter monitor; and then considering its lack of fault data and the subjectivity of expert evaluation, aggregate fuzzy number was adopted to determine the failure rate of bottom events, and the critical importance of bottom events was analyzed. Finally, Bland-Altman analysis was used to confirm that the results of this experiment were 96.88% consistent with the results of verification experiments, which proved the effectiveness of the proposed method. The proposed method which makes up for the lack of fault data and the subjectivity of expert evaluation by combining expert evaluation method and aggregate fuzzy number is suitable for fault determination of process diagnosis and prior identification of potential risks, and it also provides an idea for system reliability analysis and fault diagnosis.

Keywords: multi-parameter monitor; fault diagnosis; fault tree; aggregate fuzzy number; Bland-Altman analysis

前言

对现代医学而言,医疗设备的先进性已成为衡量医院现代化水平的重要标志。医疗设备是医疗业务开展过程中至关重要的工具,其资产在医院总资产中占比高,产生的经济效益在医院总效益中占比高。医

疗设备的检查检测结果是医生对患者病情作出正确诊断的重要参考,近几年由于医疗设备故障导致的医疗事故频发。日常工作中当医疗设备出现故障时,由于技术图纸缺乏、工程师短缺,传统的逐点寻迹的维修方法无法从大量故障特征中快速选择出有利于故障诊断的信息,检修效率低下,而聘请厂家或第三方进行维修的成本高,响应速度慢。因此,如何有效降低医疗设备故障率、提高故障检修效率,已成为医院医疗设备管理工作的重要环节。

故障树分析方法自诞生以来,在航天航空、军事装备、医疗卫生故障诊断等领域已成为重要手段。陈洪转等^[1]基于复杂装备批量小、个性化定制、具有不确定性等特点,建立了基于故障树的复杂装备模糊贝

【收稿日期】2021-03-25

【基金项目】国家重点研发计划(2016YFC0103100);军队卫勤专项资助项目(20WQ005)

【作者简介】范莉萍,硕士研究生,研究方向:医疗设备故障智能诊断, E-mail: lipingfan92@163.com

【通信作者】种银保,教授,研究方向:医疗设备故障智能诊断, E-mail: chongyinbao@163.net

叶斯网络推理故障诊断模型,不仅解决了复杂装备结构数据缺乏问题,还适用于故障诊断及风险识别;罗承昆等^[2]针对航空装备体系结构组成复杂的特点,从作战装备、信息支援装备和保障装备3个方面构建航空装备体系机构故障树,分析其结构贡献率评估问题。Shu等^[3]引入故障树分析电动汽车电机控制器可靠性问题,识别了其中最脆弱部件,对整个电机控制器及其部件的可靠性及电动汽车使用寿命进行了估算。刘双亮等^[4]引入故障树分析了内窥镜故障的风险因素,并制定针对性改进措施,显著提高了内窥镜管理质量和患者就诊满意度。故障树通过图形直观演绎的方式,能清晰地表明系统故障产生的各种原因,反应特定条件下故障事件发生的逻辑规律。上述文献表明,故障树及其改进方法对复杂系统可靠性和故障诊断具有较好的能力。

医疗设备多是声、光、电一体化设备,集成度高,故障发生时故障现象与故障原因对应关系复杂,其故障诊断与上述领域故障诊断具有一定的相通性^[5]。而据国家药品监督管理局2018年全国可疑医疗器械不良事件报告显示,多参数监护仪作为重要急救类设备之一,其故障率在有源医疗器械类中占比第一,严重影响了医疗工作质量,高效的故障诊断显得尤为重要^[6]。因此,为解决多参数监护仪故障诊断难题,本文通过分析多参数监护仪结构原理,收集大量相关故障文献,咨询领域专家,建立了基于聚合模糊数的多参数监护仪故障树,能有效提高故障诊断效率,为广大维修工程师和基层医疗机构卫生工作人员提供有效指导。

1 多参数监护仪基本结构原理

多参数监护仪是医院广泛使用的重要急救类医疗设备之一,可用于连续实时监测患者的心电图、血氧饱和度、无创血压、呼吸、脉搏、体温等生命体征参数,具有存储、显示、分析和报警功能,有效提高了医护人员的工作效率,保障了医疗质量^[7-8]。多参数监护仪主要由信号采集、模拟信号处理、数字信号处理、信号的显示记录和报警4部分组成。信号采集部分通过生物电极和传感器采集人体重要生理信号,主要包括心电、无创血压和血氧饱和度等重要生理信号,并转换为电信号。模拟信号处理部分通过模拟电路对采集的信号进行处理,如阻抗匹配、滤波、放大等,可有效减少噪声和干扰信号从而提高信噪比。数字信号处

理部分主要由模数转换器、微处理器、存储器等组成。模数转换器把模拟信号转化成数字信号,存储器存储操作程序、设置信息和临时数据等,微处理器接收来自控制面板的控制信息,执行相应的程序。信号的显示记录和报警部分是人机进行信息交换的友好界面,医生通过键盘输入监测生理参数范围和要求,显示器显示被检测生理参数和波形,记录部分则将生理参数记录保存。当被监测参数超过设定的范围时,声、光报警器发出报警,提醒医务人员及时进行检查或抢救^[9]。多参数监护仪基本结构如图1所示。

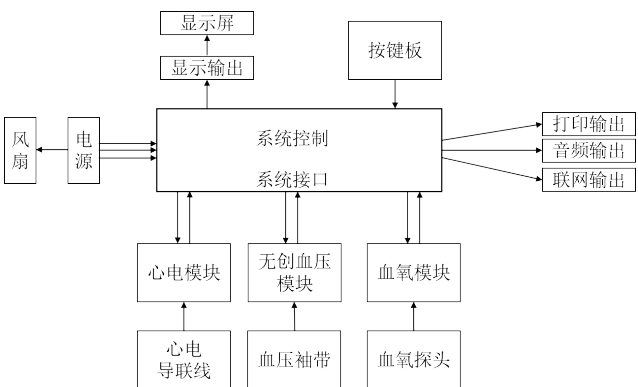


图1 多参数监护仪基本结构图
Fig.1 Principle structure of multi-parameter monitor

2 故障树定性分析

故障树是根据研究对象系统组成、结构原理及功能关系,以逻辑门的形式将故障现象与对应原因事件连接起来,建立的一种分析系统故障的模型^[10]。模型以一定条件下系统最不希望发生的事件为顶事件,逐层分析引起该系统故障的原因,直到找到所有基本故障事件为止。本文以多参数监护仪为研究对象,以“多参数监护仪无法正常工作”为顶事件,在分析其结构原理、检索故障文献及咨询领域专家的基础上建立故障树,如图2所示。

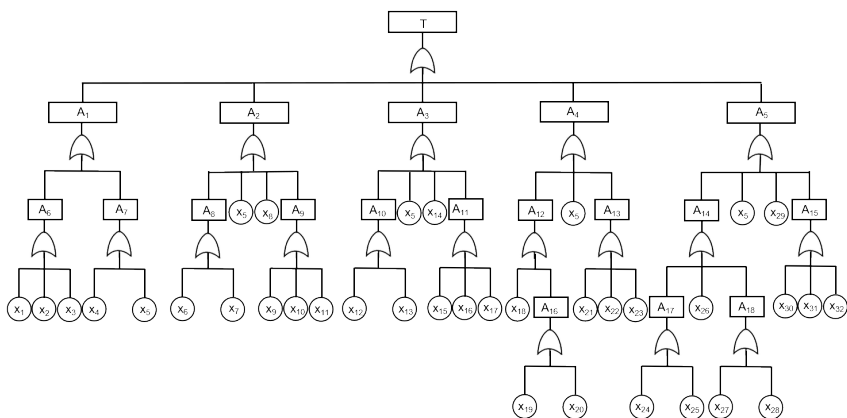


图2中, \wedge 表示故障树中逻辑或门, \square 表示故障树顶事件或中间事件, 其中T表示故障树顶事件, $A_1 \sim A_{18}$ 表示中间事件, \bigcirc 表示故障树中底事件, 即 $X_1 \sim X_{32}$ 表示引起“多参数监护仪无法正常工作”的基本事件。各事件名称见表1。

表1 故障树中代码及故障名称
Tab.1 Event code and fault name in fault tree

代码	故障名称	代码	故障名称
T	多参数监护仪无法正常工作	X_8	心电模块故障
A_1	显示故障	X_9	电极片与导联线接触不良
A_2	心电测量故障	X_{10}	导联线与心电模块接触不良
A_3	血氧饱和度测量故障	X_{11}	心电模块与主控板接触不良
A_4	无创血压测量故障	X_{12}	血氧探头故障
A_5	无法开机	X_{13}	血氧探头延长线故障
A_6	黑屏	X_{14}	血氧饱和度模块故障
A_7	显示屏亮,但不显示参数	X_{15}	血氧探头与延长线接触不良
A_8	心电测量线路附件故障	X_{16}	血氧探头延长线与血氧模块接触不良
A_9	心电测量线路连接故障	X_{17}	血氧饱和度模块与主控板接触不良
A_{10}	血氧饱和度测量线路附件故障	X_{18}	袖带漏气
A_{11}	血氧饱和度测量线路连接故障	X_{19}	血压管漏气
A_{12}	无创血压测量线路附件故障	X_{20}	血压管弯折
A_{13}	无创血压模块故障	X_{21}	气泵故障
A_{14}	多参数监护仪供电故障	X_{22}	电磁阀故障
A_{15}	电路保护	X_{23}	无创血压模块电路板故障
A_{16}	血压管故障	X_{24}	控制电源故障
A_{17}	电源故障	X_{25}	开关电源故障
A_{18}	电源线故障	X_{26}	保险丝熔断
X_1	显示屏故障	X_{27}	电源线损坏
X_2	高压板故障	X_{28}	电源线与插头接触不良
X_3	高压板供电故障	X_{29}	电源开关按钮故障
X_4	显示屏、主控板接触不良	X_{30}	多参数监护仪发生过电流保护
X_5	主控板故障	X_{31}	多参数监护仪发生过电压保护
X_6	电极片失效	X_{32}	多参数监护仪发生短路
X_7	心电导联线损坏		

3 基于聚合模糊数的故障树定量分析

3.1 专家评价法

3.1.1 专家权重确定 不同专家由于学历、工作经历等不同,对同一事件的评判结果可能存在主观差异,为更合理地对专家评判意见进行综合,本文采用层次分析 (Analytical Hierarchy Process, AHP) 法^[11],根据专家职称(1~5分)、学历(1~5分)和工龄(1~5分)3个评判因素,对参与本研究的20名多参数监护仪维修专家(来自医院医学工程科和监护仪生产厂家)进行权重分配,得到专家权重如表2所示。

3.1.2 专家评判语言模糊化 模糊集理论主要用作不确定性问题^[12]。当底事件故障概率难以确定时,专

家评判语言变量的模糊表达可以对底事件发生概率进行有效评估^[13]。为了将专家的评判语言与模糊集理论联系起来,本文引入了“很低”、“低”、“中等”、“高”、“很高”5个语言变量,作为模糊数的评判等级,采用三角模糊数对专家的评判语言进行模糊化处理,对应隶属度函数如式(1)所示:

$$\begin{cases} F_{\text{很低}} = (0, 0, 0.25) \\ F_{\text{低}} = (0, 0.25, 0.5) \\ F_{\text{中等}} = (0.25, 0.5, 0.75) \\ F_{\text{高}} = (0.5, 0.75, 1) \\ F_{\text{很高}} = (0.75, 1, 1) \end{cases} \tag{1}$$

表2 专家权重
Tab.2 Expert weight

专家编号	权重	专家编号	权重	专家编号	权重	专家编号	权重
专家1	0.044 5	专家6	0.057 7	专家11	0.036 1	专家16	0.087 0
专家2	0.056 3	专家7	0.031 7	专家12	0.069 7	专家17	0.044 5
专家3	0.044 5	专家8	0.056 3	专家13	0.029 3	专家18	0.048 0
专家4	0.082 6	专家9	0.048 0	专家14	0.036 1	专家19	0.056 3
专家5	0.036 1	专家10	0.036 1	专家15	0.029 3	专家20	0.069 8

其中, $F_{\text{很低}} = (0, 0, 0.25)$ 表示当某一事件发生故障的可能性被专家评判为很低时, 对应的模糊数为 $(0, 0, 0.25)$, 其他依此类推。

3.2 聚合模糊数计算

由于专家对同一底事件故障概率判断存在差异, 本文采用聚合模糊数的方法获取专家综合评判意见, 将每一名专家对同一底事件判断语言模糊数进行一致性模糊化处理, 可有效降低专家评判意见的主观性差异^[14-15]。

(1) 计算专家评判意见相似度 $S(A_i, A_j)$ 。设专家 E_i 和专家 E_j 对同一事件 A 的评判意见分别 A_i 和 A_j , 则两名专家评判意见相似度为:

$$S(A_i, A_j) = \begin{cases} \frac{f_i}{f_j}, f_i \leq f_j \\ \frac{f_j}{f_i}, f_j \leq f_i \end{cases} \quad (2)$$

其中, f_i 和 f_j 分别代表模糊数 A_i 和 A_j 的效用数^[16], 即若 $A_i = (a_i, b_i, c_i)$, $A_j = (a_j, b_j, c_j)$, 则

$$f_i = \frac{(a_i + 2 \times b_i + c_i)}{4}, f_j = \frac{(a_j + 2 \times b_j + c_j)}{4} \quad (3)$$

(2) 计算专家平均一致性测度 $A(E_i)$ 。首先构造一致矩阵 C :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & S_{12} & \cdots & S_{1k} & \cdots & S_{1j} \\ S_{21} & 1 & \cdots & S_{2k} & \cdots & S_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{k1} & S_{k2} & \cdots & 1 & \cdots & S_{kj} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{j1} & S_{j2} & \cdots & S_{jk} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $S_{ij} = S(A_i, A_j)$, 当 $i = j$ 时, $S_{ij} = 1$ 。

$$A(E_i) = \frac{\sum_{j=1}^n S_{ij}}{n-1} \quad (5)$$

其中, n 代表专家数量, 本文中 $n = 20$ 。

(3) 计算专家 E_i 的相对一致性测度 RC_i :

$$RC_i = \frac{A(E_i)}{\sum_{i=1}^n A(E_i)} \quad (6)$$

(4) 计算专家 E_i 的一致性测度系数 cc_i :

$$cc_i = \alpha W_i + (1 - \alpha) RC_i \quad (7)$$

其中, W_i 表示由表2确定的第 i 位专家的权重, α 由研究者根据研究需要确定, 取值在 $[0, 1]$ 之间, 本文取 $\alpha = 0.5$ 。

(5) 综合专家评判意见。

$$P_j = \sum_{i=1}^n cc_i \otimes p_{ij} \quad (8)$$

其中, p_{ij} 为第 i 位专家对底事件 j 的评判意见, P_j 表示 n 名专家对底事件 j 的综合评判意见。得到各底事件的聚合模糊数如表3所示。

3.3 底事件模糊故障率

本文采用聚合模糊数分析底事件, 具有一定的模糊性, 在建立多参数监护仪故障树过程中, 需要获得故障发生的具体概率, 本文采用均值面积法将聚合模糊数转换成模糊可能性分数 (Fuzzy Possibility Score, FPS), 表示底事件的模糊故障率^[17]。若底事件 j 的聚合模糊数为 (a, b, c) , 则去模糊化后得到:

$$f = \frac{(a + 2 \times b + c)}{4} \quad (9)$$

为了将专家对底事件的自然评判语言转化成事件发生的常规概率, 需要将去模糊化后得到的数值 f 进一步转换成模糊故障率 (Fuzzy Failure Rate, FFR)^[18], 计算公式如下:

$$FFR = \begin{cases} \frac{1}{10^c}, & f \neq 0 \\ 0, & f = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中, $c = 2.301 \times [(1 - f)/f]^{1/3}$, 由此求得的 FFR 即为底事件模糊故障率, 如表3所示。

3.4 底事件关键重要度

故障树中, 底事件 X_j 的关键重要度表示底事件 X_j 的模糊故障率所引起的顶事件模糊故障率的变化程度^[19], 定义为:

$$P_c(X_j) = \frac{\partial \ln p}{\partial \ln p(X_j)} = \frac{\partial p/p}{\partial P(X_j)/P(X_j)} \quad (11)$$

结果如表3所示。

表3 底事件聚合模糊数、模糊故障率及关键重要度
Tab.3 Aggregate fuzzy number, fuzzy failure rate and critical importance of bottom events

底事件	聚合模糊数	模糊故障率	关键重要度	底事件	聚合模糊数	模糊故障率	关键重要度
X ₁	(0.313 1, 0.556 0, 0.776 0)	0.007 1	0.034 0	X ₁₇	(0.555 0, 0.800 2, 0.901 2)	0.000 1	0.000 7
X ₂	(0.068 6, 0.228 5, 0.478 5)	0.000 5	0.002 4	X ₁₈	(0.469 1, 0.713 7, 0.856 6)	0.027 9	0.131 2
X ₃	(0.142 7, 0.328 7, 0.578 7)	0.001 4	0.006 8	X ₁₉	(0.183 6, 0.370 7, 0.584 7)	0.017 1	0.081 4
X ₄	(0.166 3, 0.382 3, 0.632 3)	0.002 1	0.010 4	X ₂₀	(0.263 1, 0.555 2, 0.795 5)	0.001 9	0.009 2
X ₅	(0.388 0, 0.606 4, 0.788 8)	0.002 1	0.010 0	X ₂₁	(0.288 0, 0.508 9, 0.737 7)	0.006 7	0.032 2
X ₆	(0.572 3, 0.817 5, 0.942 8)	0.009 6	0.046 1	X ₂₂	(0.079 3, 0.237 0, 0.487 0)	0.005 4	0.026 0
X ₇	(0.075 4, 0.245 5, 0.495 5)	0.032 6	0.152 7	X ₂₃	(0.258 0, 0.493 7, 0.715 6)	0.000 5	0.002 7
X ₈	(0.234 8, 0.426 1, 0.653 8)	0.000 6	0.002 9	X ₂₄	(0.185 8, 0.388 4, 0.638 4)	0.004 7	0.022 5
X ₉	(0.157 1, 0.362 9, 0.605 3)	0.003 1	0.014 9	X ₂₅	(0.120 2, 0.310 8, 0.560 8)	0.002 3	0.011 3
X ₁₀	(0.037 5, 0.138 2, 0.383 3)	0.001 8	0.008 8	X ₂₆	(0.265 6, 0.433 4, 0.647 7)	0.001 2	0.005 7
X ₁₁	(0.582 4, 0.827 6, 0.934 7)	0.000 1	0.000 7	X ₂₇	(0.184 0, 0.377 2, 0.590 6)	0.003 3	0.016 1
X ₁₂	(0.155 5, 0.368 9, 0.618 9)	0.033 9	0.158 4	X ₂₈	(0.177 8, 0.402 4, 0.652 4)	0.002 0	0.009 6
X ₁₃	(0.057 7, 0.238 0, 0.488 0)	0.001 9	0.009 3	X ₂₉	(0.077 9, 0.242 9, 0.492 9)	0.002 5	0.012 1
X ₁₄	(0.182 4, 0.403 6, 0.653 6)	0.000 5	0.002 5	X ₃₀	(0.096 9, 0.281 7, 0.531 7)	0.000 6	0.002 8
X ₁₅	(0.060 9, 0.173 4, 0.423 4)	0.002 5	0.012 3	X ₃₁	(0.047 2, 0.193 8, 0.443 8)	0.000 9	0.004 2
X ₁₆	(0.032 8, 0.137 5, 0.387 5)	0.000 3	0.001 2	X ₃₂	(0.555 0, 0.800 2, 0.901 2)	0.000 3	0.001 5

3.5 顶事件及中间事件模糊故障率

在故障树分析中,顶事件故障率根据最小割集表达式计算所得^[20]。由于本文中多参数监护仪故障树最小割集中底事件相互独立,可根据独立事件概率计算公式获得顶事件模糊故障率^[19]。即顶事件模糊故

障率:
$$p = 1 - \prod_{j=1}^{j=32} (1 - p_j)$$

(12)
其中, p_j 表示最小割集中底事件 X_j 的模糊故障率。结果如表4所示。

表4 顶事件及中间事件模糊故障率
Tab.4 Fuzzy failure rates of top and middle events

故障事件	模糊故障率	故障事件	模糊故障率	故障事件	模糊故障率	故障事件	模糊故障率	故障事件	模糊故障率
T	0.171 0	A ₄	0.060 3	A ₈	0.041 9	A ₁₂	0.046 3	A ₁₆	0.019 0
A ₁	0.013 1	A ₅	0.019 6	A ₉	0.005 0	A ₁₃	0.012 6	A ₁₇	0.007 0
A ₂	0.049 3	A ₆	0.008 9	A ₁₀	0.035 7	A ₁₄	0.013 4	A ₁₈	0.005 3
A ₃	0.041 0	A ₇	0.004 2	A ₁₁	0.002 9	A ₁₅	0.001 8	-	-

4 实验验证及一致性分析

4.1 实验验证

方法1:另选择10名多参数监护仪维修专家,根据本文所述方法对多参数监护仪故障树进行定量分析,获得底事件模糊故障率如表5所示。
方法2:计算机检索中国知网数据库,以“监护仪”和“故障”作为篇名检索词,检索范围为“学术刊”,检索时间为2015年1月1日~2020年12月31日。按照检索策略共检索得文献138篇,按照研究对象纳

入排除标准进行阅读筛选后,剩余文献115篇,总结故障505例,以相对故障率分析底事件故障情况(相对故障率=某一底事件故障例数/总故障例数),获得所有底事件的相对故障率如表5所示。
4.2 一致性分析
本研究采用MedCalc_19.6.3统计软件对3次实验所得底事件模糊故障率(或相对故障率)进行统计学分析。采用Bland-Altman方法分析验证方法所得结果与本实验所得结果之间的一致性,见图3。

表5 两种验证方法所得底事件故障率

Tab.5 Bottom event failure rates obtained by two verification methods

底事件	方法1	方法2	底事件	方法1	方法2	底事件	方法1	方法2	底事件	方法1	方法2
X ₁	0.004 5	0.055 4	X ₉	0.001 1	0.019 8	X ₁₇	0.000 0	0.017 8	X ₂₅	0.001 1	0.035 6
X ₂	0.000 3	0.027 7	X ₁₀	0.001 0	0.019 8	X ₁₈	0.023 6	0.071 3	X ₂₆	0.000 3	0.013 9
X ₃	0.001 6	0.007 9	X ₁₁	0.000 2	0.017 8	X ₁₉	0.018 0	0.053 5	X ₂₇	0.004 8	0.013 9
X ₄	0.000 4	0.039 6	X ₁₂	0.033 2	0.083 2	X ₂₀	0.001 9	0.005 9	X ₂₈	0.003 8	0.017 8
X ₅	0.002 1	0.025 7	X ₁₃	0.000 8	0.041 6	X ₂₁	0.007 2	0.055 4	X ₂₉	0.002 0	0.019 8
X ₆	0.003 4	0.053 5	X ₁₄	0.000 1	0.045 5	X ₂₂	0.004 6	0.057 4	X ₃₀	0.000 5	0.000 0
X ₇	0.026 9	0.079 2	X ₁₅	0.000 2	0.019 8	X ₂₃	0.001 1	0.017 8	X ₃₁	0.000 9	0.000 0
X ₈	0.000 4	0.035 6	X ₁₆	0.000 1	0.027 7	X ₂₄	0.003 9	0.005 9	X ₃₂	0.000 1	0.013 9

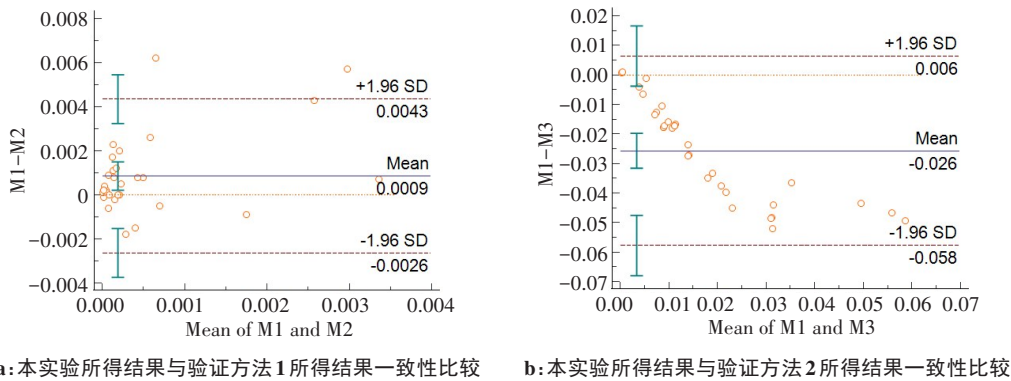


图3 两种验证方法所得结果与本实验所得结果的一致性分析

Fig.3 Consistency of the results obtained by 2 methods with those obtained by the proposed method

M1、M2、M3 分别表示本实验、验证方法1、验证方法2所得底事件故障率;Mean of M1 and M2 表示本实验与验证方法1所得底事件故障率的平均数;Mean of M1 and M3 表示本实验与验证方法2所得底事件故障率的平均数

Bland-Altman 方法主要是通过图形直观地体现不同方法所得结果之间的一致性,以两组结果的差值作为纵轴,平均数作为横轴,并能标注出两种方法所得结果差值的平均数和95%的波动范围。

本研究采用95%作为一致性界限,即当两种方法所得结果的差值在一致性界限之间时,认为两组结果的一致性较好。图3a、图3b分别为本实验与验证方法1、验证方法2所得结果之间的一致性情况。在图3a中,有93.75%的数据(30组数据)处于一致性界限内,图3b中,有100%的数据处于一致性界限内,综合两次验证实验,实验结果的一致性达到96.88%。因此认为验证实验结果与本研究实验结果的一致性较好,本文的研究方法有效可靠。

5 讨论

本文通过分析多参数监护仪结构原理、检索文献及咨询专家等,建立了多参数监护仪故障树,通过对故障树的定量分析,获得了多参数监护仪故障发生概率及重要度大小,能有效指导其维修工作,提高故障检修效率,并为多参数监护仪的预防性维护提

供参考。本文的研究方法通过结合聚合模糊数和专家评价法,解决了传统故障树故障诊断数据缺乏和专家评价主观性的问题,既适用于故障过程诊断中的故障分析,也适用于系统潜在风险的识别,为系统风险分析及故障诊断提供了参考。

下一步将围绕如何实现多参数监护仪故障智能诊断的总目标,基于多参数监护仪故障树,补充故障信息、扩充故障知识库,设计故障诊断专家系统,为实现多参数监护仪故障智能诊断提供平台和依据。

【参考文献】

[1] 陈洪转,赵爱佳,李腾蛟,等. 基于故障树的复杂装备模糊贝叶斯网络推理故障诊断[J/OL]. 系统工程与电子技术: 1-17. [2021-02-09]. CHEN H Z, ZHAO A J, LI T J, et al. Fuzzy bayesian network reasoning fault diagnosis for complex equipment based on fault tree [J/OL]. Systems Engineering and Electronics: 1-17. [2021-02-09].

[2] 罗承昆,陈云翔,何桢,等. 基于故障树分析的航空装备体系结构贡献率评估方法[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(1): 155-162. LUO C K, CHEN Y X, HE Z, et al. Evaluation method of aviation equipment architecture contribution based on fault tree analysis[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(1): 155-162.

[3] SHU X, GUO Y F, YANG H, et al. Reliability study of motor controller

- in electric vehicle by the approach of fault tree analysis [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 121: 105165.
- [4] 刘双亮, 何飞云, 陈静, 等. 故障树分析法在内窥镜故障分析与改进中的应用[J]. 中医药管理杂志, 2020, 28(14): 171-172.
- LIU S L, HE F Y, CHEN J, et al. Application of fault tree analysis method in endoscope fault analysis and improvement[J]. Journal of Traditional Chinese Medicine Management, 2020, 28(14): 171-172.
- [5] 向逾, 赵安. 基于故障树理论的Dash4000监护仪故障检修方法研究[J]. 医疗卫生装备, 2017, 38(3): 32-34.
- XIANG Y, ZHAO A. Dash4000 monitor failure reconditioning method based on fault tree theory[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2017, 38(3): 32-34.
- [6] 陈庆. 多参数监护仪安全风险[J]. 中国医学装备, 2016, 13(10): 29-33.
- CHEN Q. Safety risks assessment of the multi-parameter physiological monitor [J]. China Medical Equipment, 2016, 13(10): 29-33.
- [7] 种银保. 临床工程师规范化培训教程[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 113-115.
- CHONG Y B. Standardized training course for clinical engineers[M]. Beijing: Science Press, 2017: 113-115.
- [8] 孙遥, 李大鹏, 郑峰. 多参数心电监护仪无创血压校准及质量控制应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(8): 951-955.
- SUN Y, LI D P, ZHENG F. Noninvasive blood pressure calibration and quality control application of multi-parameter ECG monitor [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(8): 951-955.
- [9] 景维斌. 医用多参数监护仪的结构原理与故障排除方法探究[J]. 中外医疗, 2007, 26(20): 46-47.
- JING W B. Study on the structure principle and troubleshooting methods of medical multi-parameter monitors [J]. China Foreign Medical Treatment, 2007, 26(20): 46-47.
- [10] 王彤, 赵野, 陈杰. 基于模糊关联的汽车驱动桥系统故障树分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(11): 2716-2722.
- WANG T, ZHAO Y, CHEN J. Fault tree analysis of automobile drive axle system based on fuzzy grey correlation theory [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(11): 2716-2722.
- [11] 雷柏茂, 李江燕, 梁佩博, 等. 基于模糊综合评判和层次分析法的中子管故障风险评估[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(11): 2247-2256.
- LEI B M, LI J Y, LIANG P B, et al. Risk assessment of neutron tube failure based on fuzzy comprehensive evaluation and analytic hierarchy process[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(11): 2247-2256.
- [12] 颜炯, 万涛, 李浩松, 等. 计及不确定性因素的配电网网架规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 76-81.
- YAN J, WAN T, LI H S, et al. Distribution network planning considering the uncertainties [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 76-81.
- [13] 罗航. 故障树分析的若干关键问题研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011: 129-131.
- LUO H. Research on some key issues of fault tree analysis[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011: 129-131.
- [14] 于文杰, 郭国平, 吴兵. 基于模糊故障树的长江LNG船舶装卸作业风险预测[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(5): 46-53.
- YU W J, GUO G P, WU B. Risk prediction of LNG ships during loading/unloading in the Yangtze river based on fuzzy fault tree[J]. Traffic Information and Safety, 2019, 37(5): 46-53.
- [15] KUMAR M, KAUSHIK M. System failure probability evaluation using fault tree analysis and expert opinions in intuitionistic fuzzy environment[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 67(2): 104236.
- [16] 赵灵睿, 王蕾, 张炯. 基于AHP-GA和三角模糊数的废旧汽车变速箱可重用性评价方法研究[J]. 现代制造工程, 2020(10): 120-127.
- ZHAO L R, WANG L, ZHANG J. Fuzzy evaluation method of reusability for scrapping gearbox based on AHP-GA and triangle fuzzy number[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(10): 120-127.
- [17] 兰蓉, 范九伦. 三角模糊数上的完备度量及其在决策中的应用[J]. 系统工程学报, 2010, 25(3): 313-319.
- LAN R, FAN J L. Completeness metric on triangular fuzzy numbers and its application in decision making [J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(3): 313-319.
- [18] LIN C T, WANG M J. Hybrid fault tree analysis using fuzzy sets[J]. Reliab Eng Syst Safety, 1997, 58(3): 205-213.
- [19] 杨莎莎. 基于故障树的直流充电桩故障诊断专家系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 14-15.
- YANG S S. Research on fault diagnosis expert system of DC charging pile based on fault tree[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019: 14-15.
- [20] 何艳, 张果, 朱弋, 等. 基于熵权的TOPSIS模型的多参数监护仪故障树分析[J]. 医疗卫生装备, 2020, 41(3): 79-83.
- HE Y, ZHANG G, ZHU Y, et al. Multi-parameter monitor fault tree analysis by using TOPSIS based on entropy weight [J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2020, 41(3): 79-83.

(编辑: 薛泽玲)