

“蛟龙号”A 架液压系统模糊故障树分析理论研究^{*}

任玉刚^{1,2}, 丁忠军², 李德威², 余建勋³, 刘延俊¹, 于凯本², 湛国林⁴

(1. 山东大学机械工程学院 济南, 250061) (2. 国家深海基地管理中心 青岛, 266061)

(3. 中国舰船研究设计中心 武汉, 430064) (4. 山东拓普液压气动有限公司 济南, 250061)

摘要 为实现“蛟龙号”水面支持液压系统故障准确及时的诊断及排除, 引入故障树分析方法理论, 结合已有的模糊集合法和可能性基础, 提出了一种基于梯形模糊数算术运算的液压系统故障树分析策略, 并结合实际操作经验获得顶事件的故障可能性概率和各底事件的模糊重要度, 综合利用定量概率值、专家经验判断、可靠性大数据等获得了较为精确的故障区间结果, 最后对该结果进行了功能载荷试验验证。经过验证, 故障结果区间能够较为准确地反映故障问题, 为“蛟龙号”载人潜水器水面支持系统的故障分析提供了较好的理论指导和应用借鉴。

关键词 蛟龙号; 液压故障; 模糊故障树分析; 水面支持系统

中图分类号 TH137.7

引言

十八大以来, 我国提出了建设“海洋强国”的战略目标, 为保障国家“海洋强国”以及“一带一路”战略的实施, 海洋装备技术的发展尤为重要。为有效提升海洋实力, 实现海洋强国梦, 我国首台 7 000 m 级“蛟龙号”载人潜水器完成了业务化试验性应用^[1-3], 取得了瞩目的科研成果。“蛟龙号”水面支持系统是用于布放回收“蛟龙号”的一批专用液压装备的总称, 具备大吨位(30 t 级)、大角度(弦外 48°)作业能力, 是“蛟龙号”关键性支撑装备系统。随着应用日益广泛, 其水面支持系统的功能和结构愈加复杂; 同时随着使用时间的增长, 故障率逐年增多。由于系统复杂, 故障点较难快速判断, 且具备偶然突发和随机隐蔽发生等特点, 因而给 A 架系统的故障诊断带来较大挑战。

针对上述问题, 引入了故障树分析法(fault tree analysis, 简称 FTA)^[4]。FTA 是一种复杂的故障分析系统, 具有较好的可靠性和安全性, 是对故障风险评价的一种有效方法^[5]。该方法主要通过将故障事件进行树枝状逐级细化, 同时综合考虑其他有关影响的内在及外部因素, 根据理论建模形成故障树模型。该数学模型既可以用于对整个系统进行定性

分析, 也可以用于对系统的定量分析。根据定量数据判断出系统故障原因, 确定故障发生的概率, 同时联合操作经验、专家组判断, 可以获取较为精确的故障点结果, 对系统故障诊断有较好的实践意义^[6-8]。通过故障树分析理论可以简便明了地实现对故障准确及时的诊断及排除。

1 基于模糊故障树理论的模型构建

1.1 系统原理

“蛟龙号”水面支持系统如图 1 所示, 其主起吊绞车原理如图 2 所示。“蛟龙号”A 形架顶端装备有两套液压马达-三级行星齿轮箱动力配置, 中间与一套绞车卷筒连接, 每台齿轮箱都配有一个弹簧式的需要使用液压进行释放的刹车装置。主起吊绞车的工作速度取决于主泵流速的变化。在控制阀块中, 2 台液压马达是并行工作的。为了使主绞车下降, 需激发电磁铁 S21, 借助 A 口, 液压油从换向阀流向液压马达, 随后通过 B 口再次进入控制阀块。控制阀块下支管的控制油压将平衡阀的卸载截面打开, 并控制载人潜器下降。为了使主绞车起吊, 需激发电磁铁 S20。来自换向阀的油可以自由地通过平衡

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0300704); 海洋公益性行业科研专项资助项目(201405036); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2014EEP007); 深海专项(预研)资助项目(2016ASKJ15); 泰山学者工程专项经费资助项目(tspd20161007)

收稿日期: 2017-02-21; 修回日期: 2017-05-01

阀的旁通单向阀并借助 B 口到达液压马达,最后通过 A 口再次进入控制阀块中。

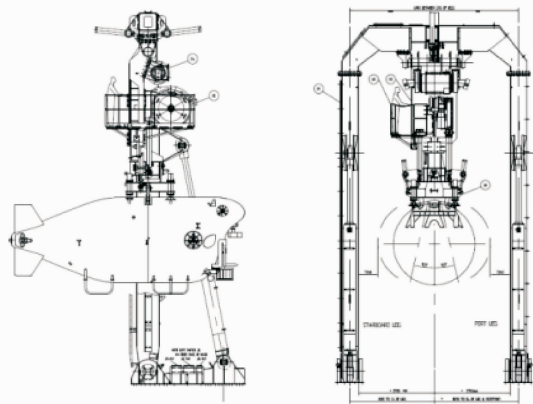


图 1 “蛟龙号”水面支持系统图

Fig. 1 A-frame launch & recovery system for the “Jiaolong” manned submersible

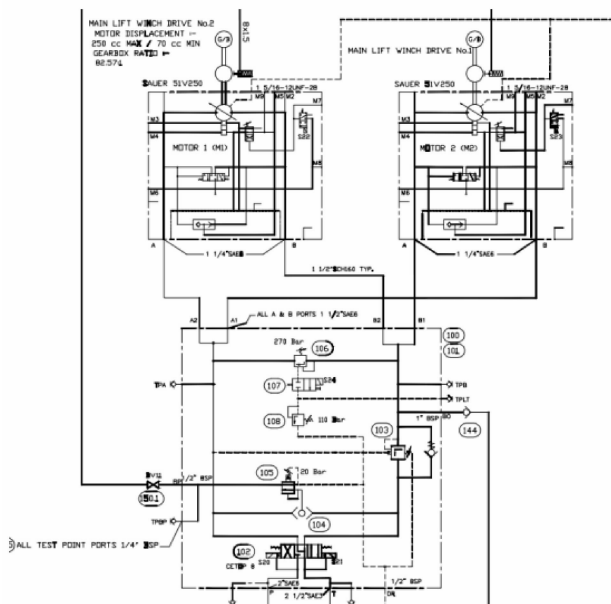


图 2 A 形架提升绞车液压系统原理图

Fig. 2 The principle of main lift winch

齿轮箱制动由一个顺序阀 105 限制,当绞车启动时,压力油通过梭阀提供 2 MPa 左右的压力,开启顺序阀解除齿轮箱上的制动。

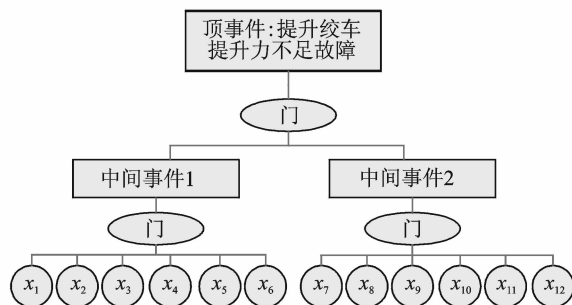
1.2 故障描述

针对大洋 35 航次中水面支持系统出现的故障,

开展了全面维护维修工程,对水面支持系统进行全面深入的检查、测试和修复工作。在维护工程中发现 A 形架提升绞车提升力不足,原主提升绞车在主泵压力 20 MPa 左右时可提升 34 t,但实际检测只能提升 25.6 t。

1.3 故障树模型的建立

综合 A 架系统原理及故障分析,根据模糊故障树分析理论,建立相关故障数学模型。将顶事件记为 T , 中间事件记为 E , 底事件记为 X 。采用上行的数学方法建模,底层 $M_2 = x_7 \cup x_8, M_3 = x_9 \cup x_{10}, M_4 = x_{11} \cup x_{12}$; 中间层 $M_1 = x_5 \cup x_6 \cup M_2 \cup M_3 \cup M_4$; 顶层 $T = x_1 \cup x_2 \cup x_3 \cup x_4 \cup M_1 = \sum_{i=1}^{12} x_i$ 。提升绞车提升力不足故障树如图 3 所示。



x_1 -马达压力泄露; x_2 -溢流阀故障; x_3 -压力油未入马达腔体; x_4 -配流盘卡死; x_5 -马达腔体内系统回油管泄露; x_6 -液压系统压力不足; x_7 -马达电磁换向阀故障; x_8 -齿轮箱内部刹车故障; x_9 -液压刹车开启故障; x_{10} -液压系统泵性能故障; x_{11} -系统未建立压力; x_{12} -液压油变质

图 3 提升绞车提升力不足故障树

Fig. 3 The fault tree of Hoist lifting

根据计算得出共有 12 个积合项,故可获得 12 个 1 阶最小割集,分别为 $\{x_1\}, \{x_2\}, \dots, \{x_{12}\}$ 。其中对于“或”门结构的故障树模型,根据理论得出每个部件的结构重要度均为 2^{1-n} 。

2 模糊故障分析

2.1 分析步骤

进行量化估算,获取顶事件的发生概率,得到底事件对顶事件的重要度。由于各底事件可能获得的有效信息较少,使得估算的精度较低,因此引入模糊集合及可能性理论。创建计算模型,通过模型运算计算顶事件的故障几率以及底事件对顶事件的重要程度^[9-10],获取较为精确的结果,其流程如图 4 所示。

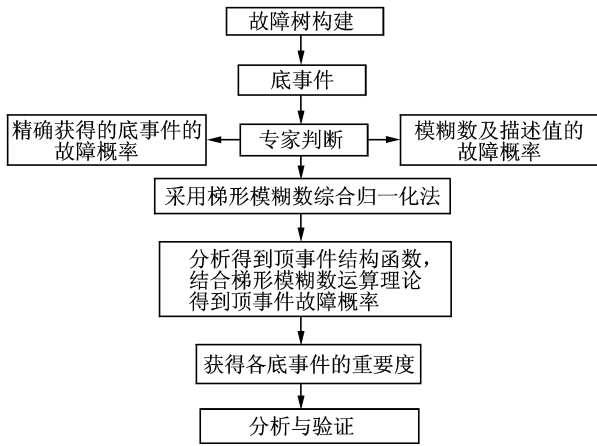


图 4 模糊故障树分析流程图

Fig. 4 The flow chart of fuzzy fault tree

针对故障程度模糊数的概述,根据以往经验按照轻、中、重故障进行文字描述,故可以规化为 0, 0.5 及 1 的数学模型数据。综合比较各种模糊数学模型的隶属函数,分析得出梯形模糊函数较为简便和直接,符合操作实际,故笔者采用梯形模糊数进行建模,如图 5 所示。

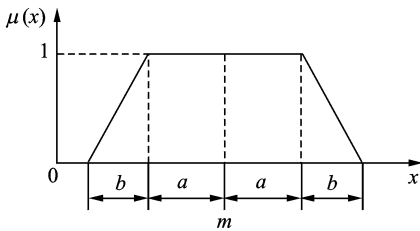


图 5 模糊数的隶属函数

Fig. 5 The membership function of fuzzy number

2.2 计算过程

采用专家判断法,利用强制比较赋予不同的权值进行测算,最后根据专家意见进行加权平均计算^[11]。专家组由 n 位组成,故存在 N 项影响因素,将各因素细分为 s 个级别,指定权系数集为 $\{W_i\}$,级别权系数集为 $\{W_{ij}\}$,故在第 i 个项目上,首位专家得分

$$A_{ij}^l = \sum_{j=1}^s W_{ij} B_{ij} \quad (1)$$

其中: i 为项目序列, $i = 1, 2, \dots, N$; j 为级别序列, $j = 1, 2, \dots, s$; l 为专家序列, $l = 1, 2, \dots, n$ 。

首位专家意见的重要度为

$$r_1 = \sum_{i=1}^N A_{ij}^l W_i \quad (2)$$

根据理论,专家组意见的重要度之和为 1,则首位专家意见重要度数学模型归化后为

$$R_i = r_1 / \sum_{l=1}^n r_l \quad (3)$$

第 n 位专家对 k 事件的加权平均模糊数 M_k 为

$$M_k = R_1 M_{k1} \oplus R_2 M_{k2} \oplus R_3 M_{k3} \oplus \dots \oplus R_n M_{kn} \quad (4)$$

例如获取“马达压力泄露”底事件结果,根据上述方法选择 15 位有经验的专家组成专家组进行主观判断^[12]。根据式(5),综合应用截集法或代数运算法,获得 15 位专家意见的平均模糊数 Y 为

$$Y = R_1 \otimes VL \oplus R_2 \otimes L \oplus \dots \oplus R_{15} \otimes M = [0.096\ 2, 0.163\ 3, 0.210\ 9, 0.309\ 7]$$

平均模糊数 Y 的关系函数为

$$\mu_r(x) = \begin{cases} \frac{x - 0.096\ 7}{0.061} & (0.096\ 7 < x \leq 0.162\ 2) \\ 1 & (0.162\ 2 < x \leq 0.210\ 9) \\ \frac{0.310\ 9 - x}{0.09} & (0.210\ 9 < x \leq 0.310\ 9) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (5)$$

由于不同的隶属函数可以由同一个模糊数表示,因此很难对最终的结果进行比较。为解决上述问题,将模糊数规划成一个清晰值的模糊可能性值(fuzzy probability score,简称FPS),其涵义指专家组成员对事件发生可能性的信任度^[13],并界定获得的模糊集集合为 f ,其中获得最大值和最小值公式为

$$f_{\max}(x) = \begin{cases} x & (0 \leq x < 1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

$$f_{\min}(x) = \begin{cases} 1 - x & (0 \leq x < 1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

模糊数 Y 的左右模糊可能性值分别为

$$FPS_L(Y) = \sup_x [\mu_r(x) \wedge f_{\min}(x)] = 0.838\ 9$$

$$FPS_R(Y) = \sup_x [\mu_r(x) \wedge f_{\max}(x)] = 0.281\ 4$$

因此,模糊数 Y 的模糊可能性值为

$$FPS_T(Y) = \frac{[FPS_R(Y) + 1 - FPS_L(Y)]}{2} = 0.217\ 6$$

考虑到一部分底事件发生概率已经明确,另一部分一般是由模糊集理论和专家判断法相结合确定。为了确保一致性,笔者采用模糊失效率(fuzzy failure rate,简称FFR)^[14]的建模策略,计算公式为

$$FFR = \begin{cases} 10^{-k} & (FPS \neq 0) \\ 0 & (FPS = 0) \end{cases}$$

$$K = [(1 - FPS)/FPS]^{1/3} \times 2.301$$

综合上述得到模糊数 Y 的模糊失效率 $FFR = 3.018\ 1 \times 10^{-4}$,即“马达压力泄露”的发生概率为 $3.018\ 1 \times 10^{-4}$ 。其他同理可计算出其余底事件的

FFR, 根据“或”门获得顶事件的发生概率

$$q_{OR} = (a_{OR}, b_{OR}, c_{OR}, d_{OR}) = 1\Theta \prod_{i=1}^n (1\Theta q_i) = 1\Theta \prod_{i=1}^n [1 - \prod_{j=1}^n (1 - a_j)],$$

$$[1 - \prod_{i=1}^n (1 - b_i)], [1 - \prod_{i=1}^n (1 - c_i)], [1 - \prod_{i=1}^n (1 - d_i)] \quad (6)$$

根据模糊数归一法, 综合采纳人为经验估算, 最终得出估算结果如表 1 所示。

表 1 底事件发生概率

Tab. 1 Probability of bottom events

编号	底事件	评价结果	归化结果
x_1	马达压力泄露	(0, 0, 0.1, 0.2)	(0, 0, 0.000 015 9, 0.000 220)
x_2	电磁溢流阀故障	(0.108 0, 0.165 8, 0.224 4, 0.323 9)	(0.000 022 1, 0.000 112, 0.000 321, 0.001 149)
x_3	油液未进入马达腔体	(0.000 6, 0, 0.000 8, 0.001)	(0.000 6, 0.000 8, 0.000 8, 0.000 1)
x_4	配流盘卡死	(0, 0, 0.1, 0.2)	(0, 0, 0.000 016 6, 0.000 221)
x_5	马达腔体内系统回油管泄露	(正态模糊数 $M=0.000 15$)	(0.000 05, 0.000 14, 0.000 15, 0.000 25)
x_6	液压系统压力不足	0.000 15	(0.000 15, 0.000 15, 0.000 15, 0.000 15)
x_7	马达电磁换向阀故障	(正态模糊数 $M=0.000 15$)	(0.000 05, 0.000 14, 0.000 15, 0.000 25)
x_8	齿轮箱内部刹车故障	0.000 1	(0.000 1, 0.000 1, 0.000 1, 0.000 1)
x_9	液压刹车开启故障	0.000 01	(0.000 01, 0.000 01, 0.000 01, 0.000 01)
x_{10}	液压系统泵性能故障	(0.6, 0.6, 0.7, 0.8)	(0.006, 0.009 8, 0.019 1, 0.034 5)
x_{11}	系统未建立压力	0.000 3	(0.000 3, 0.000 3, 0.000 3, 0.000 3)
x_{12}	液压油变质性能下降	0.000 2	(0.000 2, 0.000 2, 0.000 2, 0.000 2)

2.3 分析结果

认为各底事件因素彼此独立, 依照顶事件 T 的真值函数(见式(1)), 估算出对应顶事件概率模糊数 $q_T = (0.006 71, 0.012 84, 0.021 65, 0.041 05)$ 。

采用二位数 0 或 1 对故障树底事件的模糊数进行描述。根据上面提及的重要度描述, 引入模糊重要度的概念, 即定义可度量底事件对顶事件重要程

度大小的指标。根据定义部件 i 的模糊重要度公式

$$FI_i \equiv E(P_{T_{i1}} - P_{T_{i0}}) = \frac{\int_0^1 x^{\mu_{P_{T_{i1}}}} dx \int_0^1 x^{\mu_{P_{T_{i0}}}} dx}{\int_0^1 \mu_{P_{T_{i1}}} dx \int_0^1 \mu_{P_{T_{i0}}} dx} \quad (7)$$

其中: $P_{T_{i1}} = p(p_{x_1}, p_{x_2}, \dots, p_{x_{i-1}}, 1, p_{x_{i+1}}, \dots, p_{x_n})$; $P_{T_{i0}} = p(p_{x_1}, p_{x_2}, \dots, p_{x_{i-1}}, 0, p_{x_{i+1}}, \dots, p_{x_n})$; $P_{T_{i1}}$, $P_{T_{i0}}$ 代表 i 在 $x_i = 1$ 或 $x_i = 0$ 时顶事件 FFR 的值。

以此类推各底事件估算出的重要度值如表 2 所示。

表 2 底事件的模糊重要度

Tab. 2 Fuzzy importance of bottom events

编号	底事件	模糊重要度
x_1	马达压力泄露	0.583 81
x_2	电磁溢流阀故障	0.583 76
x_3	油液未进入马达腔体	0.582 42
x_4	配流盘卡死	0.583 45
x_5	马达腔体内系统回油管泄露	0.583 51
x_6	液压系统压力不足	0.584 61
x_7	马达电磁换向阀故障	0.583 71
x_8	齿轮箱内部刹车故障	0.584 56
x_9	液压刹车开启故障	0.584 62
x_{10}	液压系统泵性能故障	0.582 71
x_{11}	系统未建立压力	0.582 36
x_{12}	液压油变质, 性能下降	0.581 34

由表 2 中重要度大小可知, 该系统容易发生液压系统压力不足、齿轮箱内部刹车故障和液压刹车开启故障。采用模糊故障树理论, 定量计算出系统顶事件出现几率, 从而可采用量化的方式快速、简便、多方面确定危险(关键)底事件对顶事件发生的危害重要度。采用上述方法既可以评价系统的可靠性, 指导整个系统的设计, 又可以通过量化指标获得大体的故障点, 为复杂系统的维护维修及改良提供依据, 有效指导维护保障工作。

3 故障试验验证

根据模糊故障树分析结果, 采用对比验证法, 对重要度较高的几个诊断点进行了重点排查。

1) 针对故障分析概率较大的液压刹车开启故障, 对刹车机构的 105 顺序阀进行了检测, 调大 105 阀 1/4 圈, 操纵按钮提升动作, 观察其压力表压力, 调完后发现提升力无效果, 故障排除。

2) 针对故障分析概率较大的系统压力不足问题进行了理论计算及实际测量, 对 106 阀(27 MPa)、70 阀(18 MPa)、71 阀(12 MPa)、72 阀

(25 MPa)、60 阀(27 MPa)都进行了系统的压力监测,并与出厂试验数据及理论计算数据进行比对,发现系统压力没有不足情况,故障排除。

具体验证工作如图 6 所示,原出厂时的试验压力值如图 7 所示。

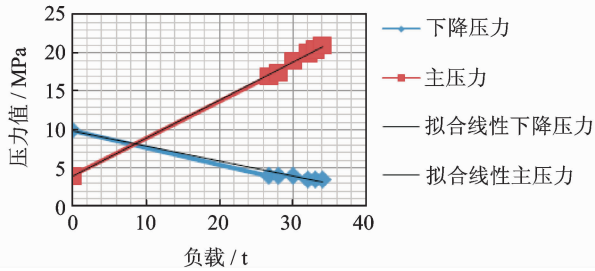


图 6 试验测试压力值

Fig. 6 The test pressure value

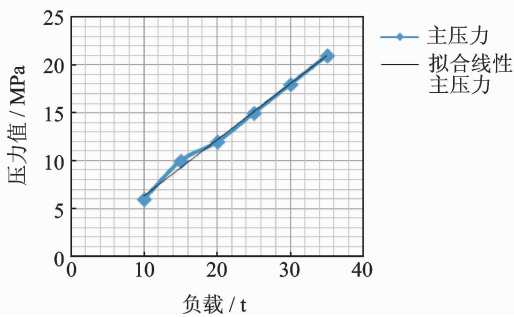


图 7 出厂试验压力值

Fig. 7 The test pressure value of the original factory

对系统压力损失理论进行了计算。压力损失是由管路的损失 Δp_1 、管路局部损失 Δp_2 和阀件局部损失 Δp_3 叠加而成,总的压力损失为 $\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3$ 。

$$\Delta p_1 = \frac{\lambda l}{d} \frac{v^2}{2} \rho \quad (8)$$

$$\Delta p_2 = \zeta \frac{v^2}{2} \rho \quad (9)$$

$$\Delta p_3 = \Delta p_n \left(\frac{q_v}{q_{vn}} \right)^2 \quad (10)$$

其中: l 为管道长度(m); d 为管道内径(m); v 为液流平均速度(m/s); ρ 为油密度(kg/m^3); λ 为阻力系数; ζ 为局部阻力系数; q_{vn} 为阀额定流量(m^3/s); q_v 为通过阀的实际流量(m^3/s); Δp_n 为阀的额定压力损失(Pa)。

根据现场试验测量,结合出厂试验数据及理论计算可得出以下结论:a. 主泵压力与负载是线性关系,同时二者存在确定压降值,即 5t 负载差为 3 MPa 压力差;b. 实时监测主泵压力与末端(编号 TPB)处有 1 MPa 的压降,压降可能是由于管路较长且高度差所

致;c. 可排除由于系统压力问题造成提升力不足。

3) 针对故障分析概率较大的齿轮箱刹车故障问题,对齿轮箱进行了重新拆检,如图 8 所示。通过与出厂照片反复比对后发现,提升绞车齿轮箱在维修完毕装配过程中多安装了 4 套刹车弹簧(大+小)。经过反复计算,确认由于多出的刹车弹簧,原有液压弹力不足以完全打开刹车,造成了 4t 力的损失。



图 8 齿轮箱刹车故障验证

Fig. 8 Hoist maintenance

最后,针对之前的分析和故障排除,对 A 形架进行了全面的功能载荷试验验证,在技术责任专家及劳氏船级社见证下,开展了 40.8 t 静态载荷试验,34 t 动态操作试验及提升绞车 34 t 提升力与 30 t 刹车试验,如图 9 所示。



图 9 试验验证

Fig. 9 Experimental verification

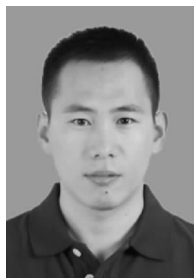
4 结束语

“蛟龙号”水面支持 A 形架液压系统关系到潜器布放与回收的成败。由于海上条件恶劣,技术保障手段有限,且要保证在布放回收极短的时间内整个系统运行稳定,这给技术人员带来了极大的挑战。

因此,能否在短时间内完成 A 形架液压系统故障分析和排查是一个急需解决的实际应用课题。笔者从实际应用角度出发,引入模糊故障树理论,对液压系统可靠性进行有效评估。通过模糊集合论、多种模糊数等算法,规一化给出一个定量概率值,再综合利用专家经验判断、可靠性大数据等可以获得一个较为精确的故障区间,具有较大的灵活性和适应性。随着海洋战略的开展和大型海洋装备的服役,快速、可靠的 A 形架液压系统故障分析手段研究将越来越广泛。

参 考 文 献

- [1] 刘峰. 深海载人潜水器的现状与展望[J]. 工程研究, 2016(2):172-178.
Liu feng. Technical status and development trend of the deep-sea manned submersible[J]. Journal of Engineering Studies, 2016(2):172-178. (in Chinese)
- [2] 刘保华, 丁忠军, 史先鹏, 等. 载人潜水器在深海科学考察中的应用研究进展[J]. 海洋学报, 2015(10): 1-9.
Liu Baohua, Ding Zhongjun, Shi Xianpeng, et al. Progress of the application and research of manned submersible used in deep sea scientific investigations[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015(10):1-9. (in Chinese)
- [3] 徐芑南, 张海燕. “蛟龙号”载人潜水器的研制及应用[J]. 科学, 2014(2):11-13.
Xu Qinan, Zhang Haiyan. Research and application of Jiaolong manned submersible[J]. Science, 2014(2): 11-13. (in Chinese)
- [4] Smits J G. Piezoelectric micropump with 3 valves working peristaltically [J]. Sensors Actuators A, 1990, 21 /23:203-206.
- [5] Dong Yuhua, Yu Datao. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, 18(2): 83-88.
- [6] 姚成玉, 陈东宁, 王斌. 基于 T-S 故障树和贝叶斯网络的模糊可靠性评估方法[J]. 机械工程学报, 2014(2): 193-201.
Yao Chengyu, Chen Dongning, Wang Bin. Fuzzy reliability assessment method based on T-S fault tree and Bayesian network[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014(2):193-201. (in Chinese)
- [7] 张义民, 肖洁, 李常有. 数控车床进给系统基于模糊理论的故障树分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015(7): 37-40.
Zhang Yimin, Xiao Jie, Li Changyou. Fault tree analysis of ETC36 CNC lathe feed system based on fuzzy theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015(7):37-40. (in Chinese)
- [8] Menten A, Helvacioğlu I H. An application of fuzzy fault tree analysis for spread mooring systems[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(2):285-294.
- [9] Mannsann R. Hydraulic components for general industry [R]. Loht am Main, Germany; Mannsann Rexroth, 1998.
- [10] Jiang Hongyuan, Yang Hukun, Wang Yang, et al. Research on the microfluidics control method based on the EOF technology[J]. Materials Science Forum, 2006, 532/533:65-68.
- [11] Huang Hongzhong, Tong Xin, Zuo Ming. Posbist fault tree analysis of coherent systems[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 84(2): 141-148.
- [12] Dong Yuhua, Yu Datao. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, 18(2):83-88.
- [13] Hagam H W, Fujishima K. Digging control system for hydraulic system[J]. Mechatronics, 2001, 11:665-676.
- [14] Onisawa T. An Approach to human reliability in man-machine systems using error possibility [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1988, 27(2): 87-103.



第一作者简介:任玉刚,男,1987年6月生,工程师。主要研究方向为深海技术装备设计及诊断等。曾发表《Analysis of the kinematic model for cylindrical parts in double-sided lapping process》(《International Journal of Nanomanufacturing》2014, Vol. 10, No. 3)等论文。
E-mail: ytrenyugang@163.com

通信作者简介:刘延俊,男,1965年7月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为智能检验与控制、流体动力与控制(机电液气一体化)。
E-mail: lyj111ky@163.com

