

# 基于智能决策的水下并联机器人平台应急系统设计

程舟济,徐国华,向先波,曾志林

(华中科技大学 船舶与海洋工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:**水下并联机器人平台深水作业环境复杂,经常面临各种各样的危险,必须装备应急系统,使其在出现故障或险情时能顺利安全回收。采用故障树分析法、模糊专家推理及智能决策技术,设计了一种水下并联机器人平台应急回收系统,该系统根据水下故障级别采取相应的应急回收策略。模拟仿真实验表明,发生故障时该系统能够满足水下并联机器人平台应急安全回收的要求。

**关键词:**水下并联机器人;应急系统;故障树分析法;模糊专家推理;智能决策

中图分类号:TP182

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)05-0056-07

## Emergency System Design for Underwater Parallel Robotic Platform Based on Intelligent Decision Method

CHENG Zhouji, XU Guohua, XIANG Xianbo, ZENG Zhilin

(College of Ship and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** An underwater parallel robotic platform often faces a lot of dangers when it works in deep water with complicated environment. Hence, it is necessary to equip an emergency system to withdraw the underwater platform itself. An emergency withdraw system was designed based on fault tree analysis, fuzzy expert reasoning and intelligent decision techniques. Consequently, the emergency withdraw strategy will be used according to different underwater failure levels. The simulation experiment showed that the underwater parallel robotic platform could be safely withdrawn when any failures happened.

**Key words:** underwater parallel robot; emergency system; fault tree analysis (FTA); fuzzy expert reasoning; intelligent decision

深水作业的水下机器人,由于工作环境复杂且具有不可预知性,通常配备应急回收系统,也称自救系统<sup>[1-2]</sup>。唐荣庆等<sup>[3]</sup>提出抛弃蓄电池、下潜重块和定位信标的方法使机器人浮到水面完成回收任务,但水下机器人从抛负载到升至水面的过程中难以得到有效控制,因而安全回收的难度较大。水下并联机器人平台通过直拉和斜拉钢缆与水底的重力锚相连,在平台遇到故障需要应急回收时,通过控制绞车刹车的松开与闭合,逐步实现缆绳的伸长,使平台受到正浮力作用上浮。

本文研究的水下并联机器人应急系统,首先采用故障树分析法对水下故障进行分类,然后根据模糊专家推理理论及智能决策技术对故障进行分析得出相应的应急决策,从而保证应急情况下,顺利实现平台的安全回收。

收稿日期:2012-08-16

基金项目:2011年华中科技大学自主创新基金项目(基于柔性驱动的三自由度海洋平台设计及位姿控制)

作者简介:程舟济(1989—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事机器人控制方面的研究。

向先波(1978—),男,湖北孝感人,副教授,博士,主要从事机器人控制方面的研究,本文通信作者。

E-mail:xbxiang@hust.edu.cn

# 1 水下并联机器人平台应急系统工作原理

## 1.1 水下并联机器人平台应急系统结构

水下并联机器人外形如图 1 所示,平台主甲板两舷侧各布置一个耐压舱,两个耐压舱内置各种控制器及供电设备。甲板中央位置为试验平台中位,环境参数稳定,适于进行多种水下试验操作。水下并联机器人平台内有高压气舱和进排水舱,通过控制高压气阀,改变舱内的水量来控制平台的自重。在平台的四个角上各有三台张紧绞车,每台绞车通过缆绳连接沉在水底的一个重力锚,四根直拉和八根斜拉缆绳并联固定平台位姿。

水下并联机器人平台应急系统位于平台耐压舱内。其作用是对平台进行循环的故障检测。平台发生故障时,能根据故障信号对故障进行分类,根据故障种类和等级进行智能决策并将决策的结果发送至水上,由水上工作人员按照决策进行操作,使水下并联机器人平台安全上浮至水面。

水下并联机器人平台应急系统结构如图 2 所示,主要分为水上水下两个部分:水上部分主要用于接收水下发送的平台位姿参数以及故障信息,实现平台三维仿真和参数显示,同时接收水下发送的应急决策,水上

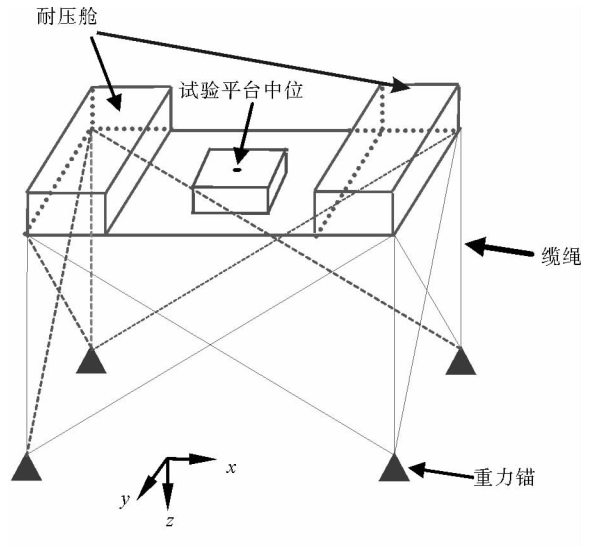


图 1 水下并联机器人平台外形图

Fig. 1 Appearance figure of underwater parallel robotic platform

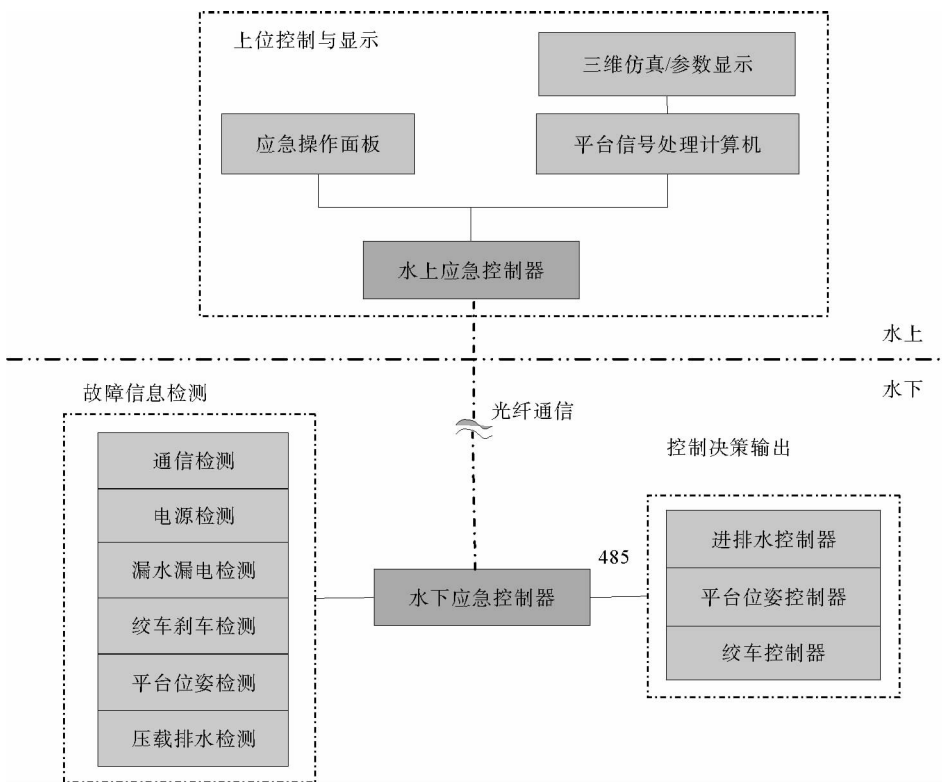


图 2 水下并联机器人平台应急系统结构示意图

Fig. 2 The structure of emergency system of underwater parallel robotic platform

工作人员根据决策,通过应急操作面板控制平台安全回收;水下部分完成故障检测、故障分类、智能决策并发送至水上,接收水上应急回收指令并发送给应急回收执行机构。

### 1.2 水下并联机器人平台故障模式

故障树分析法(fault tree analysis, FTA)是一种将系统故障形成的原因由总体到部件按树枝状逐级细化的分析方法。故障的成因和后果的关系往往具有多层次,并形成一系列的因果链。在故障树分析法中,把系统设备最不希望发生的故障作为故障分析的目标,把这个故障事件称为顶事件,然后找出直接导致顶事件发生的全部直接原因,作为第二级中间事件,依次逐级深追,一直追查至不能再展开或不可深究的最基本因素为止,并称之为底事件。这种由顶事件、中间事件和底事件按照彼此间的关系,用适当的逻辑门自上而下逐级连接起来构成的逻辑关系图即故障树。在系统管理和维修中用其指导故障分析、寻找故障原因、制定维修策略及预防故障的发生很有效<sup>[4]</sup>。

如表 1 及图 3 所示,水下并联机器人平台在水下试验过程中可能遇到的故障主要有:水上水下通信故障、水下供电故障、张紧绞车刹车故障、漏水漏电故障、平台工作深度过深或倾斜程度过大、压载排水故障。在水下并联机器人平台系统中,平台故障作为顶事件,供电故障、通信故障、绞车刹车故障、漏水漏电故障、压载排水故障和平台位姿故障作为中间事件,水面电站失效等 14 项故障作为底事件。各底事件通过或门连接构成中间事件,中间事件用或门连接构成顶事件。

### 1.3 水下并联机器人平台应急系统工作原理

水下并联机器人平台应急系统使用多种手段检测这些故障和危险,可以得到一些精确的物理量。将这些精确的物理量模糊化,再利用专家经验进行模糊推理,做出应急决策提供给水面操作人员,操作人员通过应急操作面板控制平台应急回收。

水下应急控制器实时采集水上水下通信状况、水下供电状况、张紧绞车刹车状况、压载排水状况、漏水漏电状况、平台工作深度及倾角 6 种输入数据。水下应急控制器收到第一个表示故障的数据 30 s 之后,不再接收输入数据,锁定最终输入的 6 种状态信息并最终依据模糊专家系统做出决策,工作人员按照决策进行应急操作。决策结果及相应的应急操作如表 2 所示。

表 1 水下并联机器人平台故障树事件表

Tab. 1 Fault tree events of underwater parallel robotic platform

| 故障事件代码 | 故障事件名称 | 故障事件代码 | 故障事件名称   |
|--------|--------|--------|----------|
| T      | 平台故障   | X3     | 水下配电失效   |
| A1     | 供电故障   | X4     | 连接电缆失效   |
| A2     | 通信故障   | X5     | 光纤失效     |
| A3     | 绞车刹车故障 | X6     | 网络失效     |
| A4     | 漏水漏电故障 | X7     | 直拉绞车刹车失效 |
| A5     | 压载排水故障 | X8     | 斜拉绞车刹车失效 |
| A6     | 平台位姿故障 | X9     | 漏水故障     |
| B1     | 水上电站故障 | X10    | 漏电故障     |
| B2     | 配电故障   | X11    | 通海阀失效    |
| B3     | 电力传输故障 | X12    | 高压气阀失效   |
| X1     | 水面电站失效 | X13    | 平台倾角过大   |
| X2     | 水上配电失效 | X14    | 平台深度过深   |

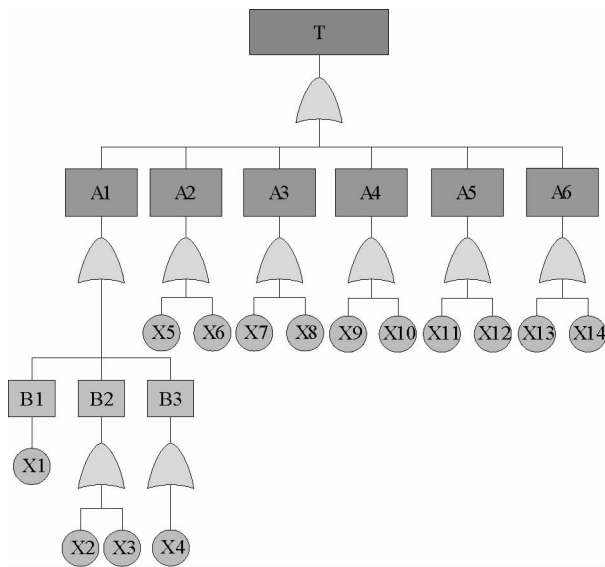


图 3 水下并联机器人平台故障树

Fig. 3 Fault tree of underwater parallel robotic platform

表 2 应急决策表

Tab. 2 Emergence decision table

| 决策   | 故障分类   | 回收措施                                  |
|------|--------|---------------------------------------|
| 决策 1 | 平台正常工作 | 正常回收, 无需应急回收                          |
| 决策 2 | 平台较小故障 | 发送松开绞车刹车指令, 完成平台应急回收                  |
| 决策 3 | 平台偏小故障 | 发送应急排水指令, 完成平台应急回收                    |
| 决策 4 | 平台偏大故障 | 水下自动释放浮标, 水上水下建立连接后发送松开绞车指令, 完成平台应急回收 |
| 决策 5 | 平台较大故障 | 水下自动释放浮标, 水上水下建立连接后发送排水指令, 完成平台应急回收   |

## 2 模糊推理及应急决策

### 2.1 水下并联机器人平台应急系统的模糊专家系统

模糊专家系统就是采用模糊技术处理不确定性问题的一类专家系统, 在水下机器人及水下平台的应急控制中应用较为广泛<sup>[5-8]</sup>。图 4 为模糊专家系统结构框图, 各模块功能如下。

**故障检测模块:**接收各控制器、传感器输入的 6 种信息, 并立即传递给模糊化模块。

**模糊化模块:**接收故障检测模块发送的故障信号, 进行模糊化处理, 发送给模糊数据库模块。

**模糊数据库模块:**将初始输入信息、模糊专家系统推理过程中的中间信息以及模糊专家系统的最终结论储存起来。模糊知识库将专家总结出来的求解应急问题的规则方法、知识与事实储存起来。

**解模糊模块:**依据模糊专家系统的初始输入信息及知识经验, 按照一定的模糊推理策略处理水下并联机器人平台遇到的问题故障, 做出适当的应急决策发送给应急控制系统。

**应急控制系统:**根据接收到的应急决策, 完成相应操作。

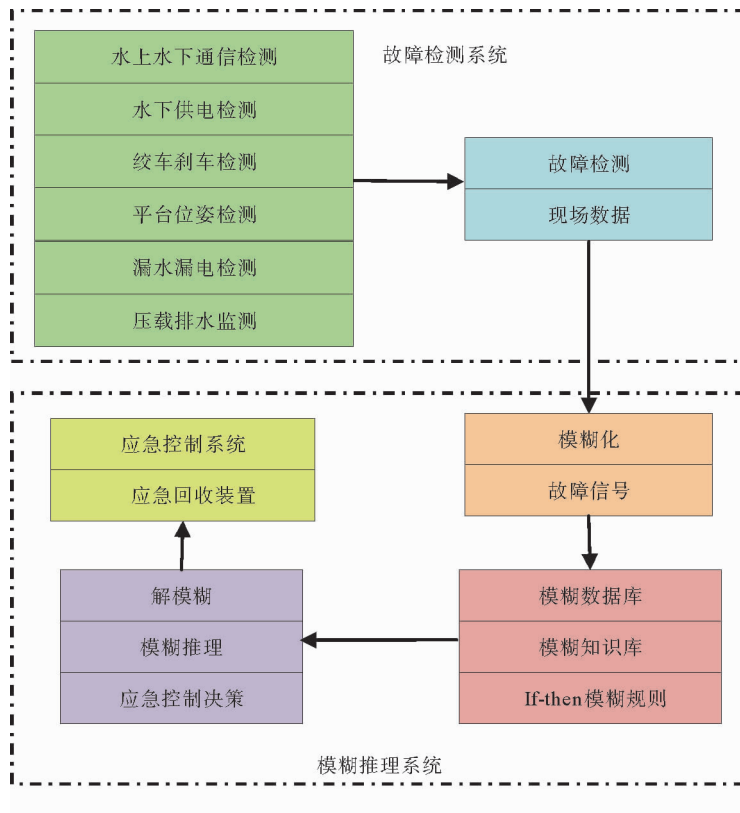


图 4 水下并联机器人平台应急系统的模糊专家系统结构框图

Fig. 4 Structural block diagram of fuzzy expert system for emergence system of underwater parallel robotic platform

## 2.2 输入变量的模糊化

水下并联机器人平台应急系统的模糊专家系统中,首先要对输入的 6 个变量做模糊化处理,而分别确定其模糊隶属函数是输入变量模糊化处理的关键。由于水下并联机器人平台在深水试验成本高,每次获得的实验数据较少,且目前无合适的“客观”尺度,所以采用专家确定法。水下并联机器人平台模糊专家系统的输入变量有 6 个:水上水下通信状况、水下供电状况、张紧绞车刹车状况、压载排水状况、平台工作深度和平台倾斜度、漏水漏电状况。以水下供电状况输入变量的取值为例进行分析。

水下变压器变压后的电压 370~390 V 时,水下各设备工作正常,此范围电压为正常电压;水下变压器变压后的电压低于 370 V 时,水下各设备不能正常工作,此时电压为低压;电压高于 390 V 时,水下各设备不能正常工作,甚至可能烧坏,此时电压为高压。电压检测装置将低于 350 V 的电压当作 350 V 处理,将高于 410 V 的电压当作 410 V 处理。因此水下供电状况的取值为{低压,正常,高压}。

论域  $UGD$  表示供电状况,  $UGD = \{\text{低压, 正常, 高压}\}$ ;

论域  $UTX$  表示通信状况,  $UTX = \{\text{正常, 故障}\}$ ;

论域  $USC$  表示刹车状况,  $USC = \{\text{正常, 故障}\}$ ;

论域  $UPS$  表示高压排水状况,  $UPS = \{\text{正常, 故障}\}$ ;

论域  $UWZ$  表示平台位姿状况,其取值  $UWZ = \{\text{安全, 危险}\}$ ;

论域  $ULSLD$  表示漏水漏电状况,其取值  $ULSLD = \{\text{正常, 故障}\}$ 。

取论域  $U$  表示水下并联机器人平台工作状况,  $U = \{UTX, UGD, USC, UPS, UWZ, ULSLD\}$ ,以  $U$  上的模糊集  $R$  表示水下并联机器人平台的危险状况,隶属度  $CHULI = \mu_R(u), u \in U$  表示危险系数,根据  $CHULI$  的大小选择应急决策,如表 3 所示。

分析完成后,使用 MATLAB 模糊逻辑工具箱变量的隶属度函数编辑器建立 6 个变量的模糊隶属函数。此时,即可将输入的传感器信号和控制器信号模糊化处理。图 5 为平台工作深度的模糊隶属函数,图 6 为模糊推理系统,图 7 为模糊专家系统规则库。

表 3 危险系数表

Tab. 3 Risk coefficient table

| 决策   | 危险程度        | 处理值                    |
|------|-------------|------------------------|
| 决策 1 | 平台无危险,可继续工作 | $CHULI = 0 \sim 0.2$   |
| 决策 2 | 平台存在较小危险    | $CHULI = 0.2 \sim 0.4$ |
| 决策 3 | 平台存在偏小危险    | $CHULI = 0.4 \sim 0.6$ |
| 决策 4 | 平台存在偏大危险    | $CHULI = 0.6 \sim 0.8$ |
| 决策 5 | 平台存在较大危险    | $CHULI = 0.8 \sim 1.0$ |

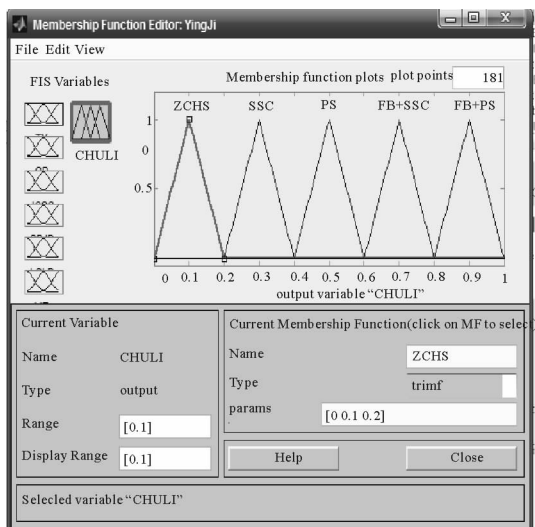


图 5 模糊隶属函数界面图

Fig. 5 The interface diagram of fuzzy membership functions

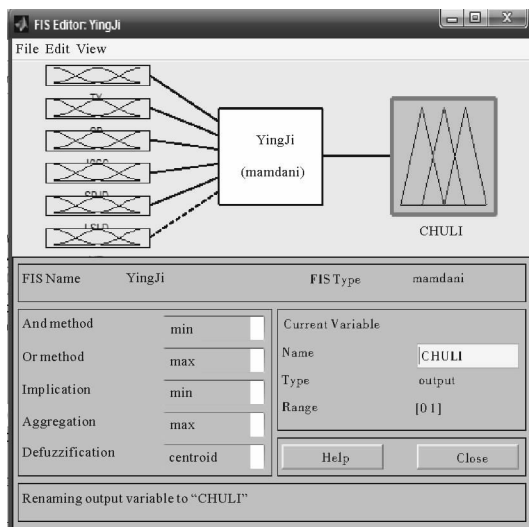


图 6 模糊推理系统界面图

Fig. 6 The interface diagram of fuzzy inference system

### 2.3 模糊知识库的建立

水下并联机器人平台应急系统的模糊专家系统 6 个变量分别对应有 2,3,2,2,2,2 个取值,根据组合原理,总共有  $2 \times 3 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 96$  条规则,依据专家经验,删除矛盾的规则并合并可以合并的规则,得到精简的规则如表 4 所示,其中空格表示对应的输入变量取任意状况。将表 4 中的规则存储至模糊知识库。

表 4 水下并联机器人平台应急系统的模糊专家系统决策规则表

Tab. 4 The rule table of fuzzy expert system for emergence system of underwater parallel robotic platform

| 序号 | 水上水下通信状况 | 水下供电状况 | 张紧绞车刹车状况 | 压载排水状况 | 平台工作深度及倾角 | 漏水漏电状况 | 决策结果 |
|----|----------|--------|----------|--------|-----------|--------|------|
| 1  | 正常       | 正常     | 正常       | 正常     | 安全位姿      | 正常     | 决策 1 |
| 2  | 故障       | 正常     | 正常       |        |           |        | 决策 4 |
| 3  | 故障       | 高/低    | 正常       |        |           |        | 决策 4 |
| 4  | 正常       | 高/低    | 正常       |        |           |        | 决策 4 |
| 5  | 故障       | 正常     | 故障       | 正常     |           |        | 决策 5 |
| 6  | 故障       | 高/低    | 故障       | 正常     |           |        | 决策 5 |
| 7  | 正常       | 高/低    | 故障       | 正常     |           |        | 决策 5 |
| 8  | 正常       | 正常     | 故障       | 正常     |           |        | 决策 3 |
| 9  | 正常       | 正常     | 正常       |        | 安全位姿      | 故障     | 决策 2 |
| 10 | 正常       | 正常     | 正常       |        | 危险位姿      | 正常     | 决策 2 |
| 11 | 正常       | 正常     | 正常       |        | 危险位姿      | 故障     | 决策 2 |
| 12 | 正常       | 正常     | 故障       | 正常     | 安全位姿      | 故障     | 决策 3 |
| 13 | 正常       | 正常     | 故障       | 正常     | 危险位姿      | 正常     | 决策 3 |
| 14 | 正常       | 正常     | 故障       | 正常     | 危险位姿      | 故障     | 决策 3 |

把精简后的规则输入 MATLAB 的规则编辑器,就可以生成模糊推理所需的规则库,从而建立模糊知识库,如图 7 所示。

### 2.4 模糊专家系统仿真结果

如图 8(a)所示,随机取 6 个输入变量的值分别为 0.7,390,0.9,0.5,0.5,0.5,分别代表水上水下通信有偏大故障、水下供电偏高、张紧绞车刹车故障、平台位姿正常、漏水漏电检测正常、压载排水正常,程序输出值为  $CHULI=0.9$ ,对应决策 5,进行释放浮标和排水回收的操作,符合表 4 所示的第 6 条规则,也满足实际情况的要求。工作人员依照此决策结果进行对应的应急操作,从而使水下并联机器人平台安全回收。

图 8(b)为假设其他故障对平台无影响时,绞车刹车故障与水上水下通信故障联合作用下的应急决策曲面图。根据曲面图可得出应急回收决策:当绞车刹车故障和通信故障值处于 0~0.5,即绞车刹车与通信故障较小或未发生时, $CHULI$  值在 0~0.2,无需应急回收操作;当绞车

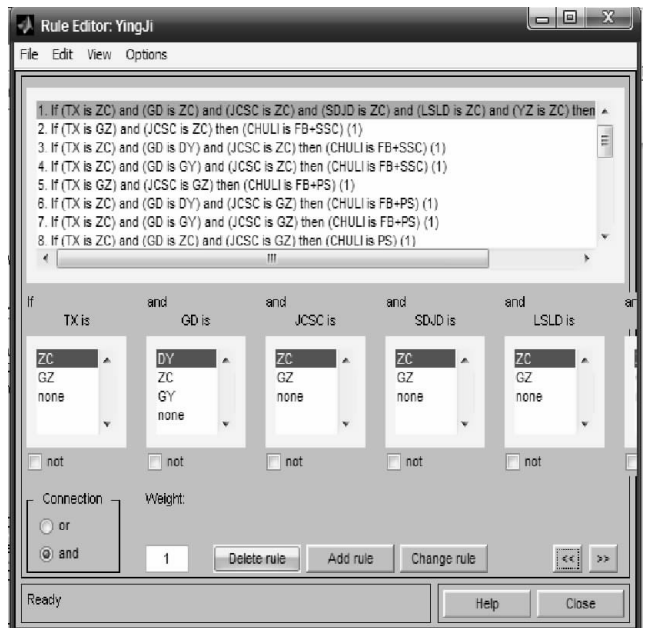


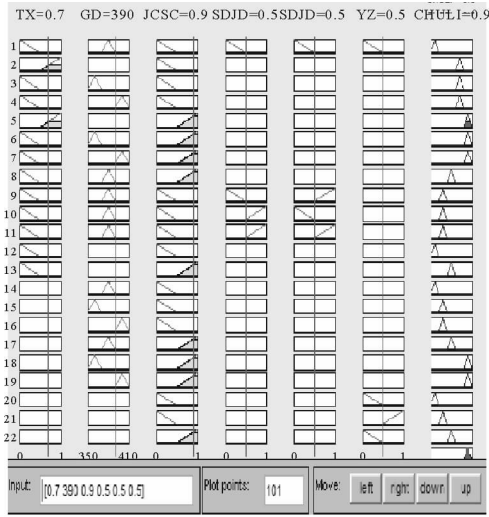
图 7 模糊专家系统规则库界面图

Fig. 7 The interface diagram of rule base of fuzzy expert system

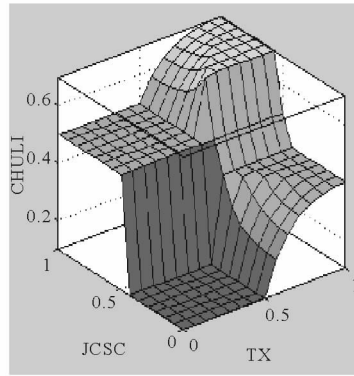
刹车回收操作;当绞车

刹车故障在 0.5~1.0 或通信故障在 0.5~1.0 时,CHULI 值在 0.2~0.8,需要进行应急回收操作。符合表 4 所述规则,也满足实际情况的要求。

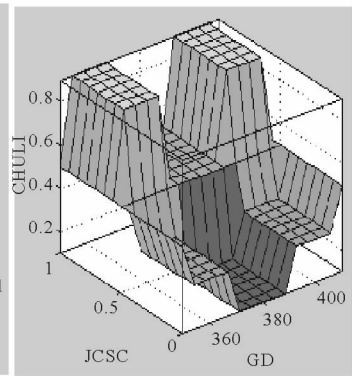
图 8(c)为假设其他故障对平台无影响,绞车刹车故障与供电故障联合作用下的应急决策曲面图。观察曲面图可得出应急回收决策:当绞车刹车故障处于 0~0.5 且供电值在 370~380 时,即绞车刹车与供电正常工作时,CHULI 值在 0~0.2,无需应急回收操作;当绞车故障处于 0~0.5 且供电值在 350~370 或 390~410 时,CHULI=0.2~1.0,需要进行应急回收操作。符合表 4 所述规则,也满足实际情况的要求。



(a) 输入变量取值  
(a) Input value



(b) 刹车与通信故障应急决策曲面图  
(b) Emergency decision for brake and communication fault



(c) 刹车与供电故障应急决策曲面图  
(c) Emergency decision for brake and power fault

图 8 模糊专家系统仿真结果图

Fig. 8 The simulation results of fuzzy expert system

### 3 结论

结合水下并联机器人平台应急系统的研制,提出了一种结合故障树分析法、模糊专家系统和智能决策方法的应急回收系统。与常规的自救系统相比,该系统具有控制逻辑清晰、系统结构完整和回收方案多样化等优点。最后,利用 Matlab 模糊工具箱对应急决策模糊专家系统进行仿真分析,得到了预期的应急决策结果,从而为水下并联机器人平台的应急系统设计奠定了理论基础。

#### 参考文献:

[1]徐国华,段国强.智能水下机器人自救模糊专家系统研究[J].中国造船,2004(12):271-275.  
XU Guohua,DUAN Guoqiang. Fuzzy expert system of AUV self-rescue[J]. Ship Building of China,2004(12):271-275.

[2]向先波,徐国华,蔡涛.水下机器人智能自救系统[J].华中科技大学学报:自然科学版,2006,34(7):111-114.  
XIANG Xianbo,XU Guohua,CAI Tao. Intelligent self-rescue system for underwater vehicles[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology:Natural Science Edition,2006,34(7):111-114.

[3]唐荣庆,黄智裕,张希贤.“探索者”号自治式水下机器人抛载系统的研制[J].海洋工程,2001(2):85-87.  
TANG Rongqing,HUANG Zhiyu,ZHANG Xixian. The emergency jettison system of AUV “Explorer”[J]. The Ocean Engineering,2001(2):85-87.

[4]曾声奎,赵廷弟.系统可靠性设计分析教程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2001:117-118.

[5]刘有才,刘曾良.模糊系统专家原理与设计[M].北京:北京航空航天大学出版社,1995:10-12.

[6]ZADEH L A. Fuzzy sets and fuzzy information-granulation theory[M].北京:北京师范大学出版社,2000:9-10.

[7]RAMOT D,FRIEDMAN M,LANGHOLZ G,et al. Complex fuzzy logic[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2003,11(4):450-461.

[8]DE BITETTO P A. Fuzzy logic for depth control of unmanned undersea vehicles[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering,1995,20(3):242-248.