

# 舰船水消防系统战斗损伤的智能重构决策与应用\*

侯岳<sup>1</sup>, 王康勃<sup>2</sup>, 龚立<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 海军工程大学 模拟训练中心, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**针对当前舰船水消防系统监控点信息孤立、智能化决策程度不高的问题,构建了基于节点的水消防系统功能逻辑模型,提出了基于战斗损伤的水消防系统破损隔离重构使用智能决策算法,并据此开发了水消防智能监控系统。案例对比计算和系统测试检验的结果表明,该智能决策算法以及智能监控系统可以有效提升分析决策的速度和精度,显著提高指挥控制的效率,为水消防系统的战斗破损使用提供有效的支撑。

**关键词:**水消防系统;智能重构决策;图论搜索算法;战斗损伤;智能监控系统

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2023)02-065-08

## Warship fire-fighting system intelligent reconfiguration decision-making and its application based on battle damage

HOU Yue<sup>1</sup>, WANG Kangbo<sup>2</sup>, GONG Li<sup>2</sup>

(1. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Simulation Training Center, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of isolated information of monitoring points and low degree of intelligent decision-making in the current warship fire-fighting system, a node-based fire-fighting system functional logic model was constructed. The intelligent decision algorithm of fire-fighting system damage isolation and reconstruction based on combat damage employment was put forward. And the intelligent monitoring system for fire-fighting was developed. Results of case comparison calculation and system inspection show that the intelligent decision-making algorithm and intelligent monitoring system can effectively improve the speed and accuracy of analysis and decision-making and significantly improve the efficiency of command and control, which provides effective support for the water fire fighting system under combat damage condition.

**Keywords:** fire-fighting system; intelligent reconfigurable decision-making; graph searching algorithm; battle damage; intelligent supervisor and control system

舰船水消防系统不仅可为消火栓提供消防用水,也可为喷射泵排水、泡沫灭火、弹库喷淋、雷达火炮冷却、水幕系统等提供工作用水,是舰船最为重要的保障系统之一。由于水消防系统的总管、支管遍布全舰,因而舰船一旦遭受战斗损伤,其破损概率大,用户损失多,特别是在舰船同时发生战斗破损和火灾的情况下,消防人员将面临水消防系统功能恢复与灭火的双重任务。然而由于时间紧迫、灾情复杂,仅仅依靠舰员对水消防系统的战时损伤进行分析、评估以及决策,已无法满足损管需求。因此,迫切需要对传统水消防监控系统进行改进,快速对破损后的失效用户进行分析,快速隔离破损、重构供水路径,提升水消防系统用户管理与损管流程的融合度,提升损管指挥员对水消防系统的损管使用效能<sup>[1-2]</sup>。

美国海军从 DDG51 驱逐舰开始,就开始开展水消防系统的智能监控技术研究<sup>[3]</sup>。经过近 30 年的研究实践,DDG1000 驱逐舰上已部署水消防系统的自动化管理及监控系统<sup>[4]</sup>。据报道,该系统能够将以往几十分钟的处置反应时间缩短至几分钟之内完成,显著提高了损害处置的时效性<sup>[5]</sup>。德国海军在综合监控系统中进一步优化了水消防系统监测对象、控制对象的设计方案,不仅对水消防系统的各类用户进行管理,并且对破损使用方案提供应急处置决策,同时对剩余保障能力进行预测和评估<sup>[6]</sup>。

水消防系统网络拓扑关系复杂、节点状态多样、战斗破损后损伤范围大,因而仅仅依靠人工分析完成隔离重构不仅决策时间长,也容易因考虑不全面无法得出最优方案,导致隔离重构方案实

\* 收稿日期:2021-05-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51409255)

作者简介:侯岳(1982—),男,河南商丘人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:hoyue1982@163.com;

王康勃(通信作者),男,山西晋城人,讲师,博士,E-mail:wangkangbo1989@163.com

施过程冗长且效果不理想。然而,国内水消防系统的监控功能设计简单,仅仅对其设备运行状态进行监测,缺少损管任务驱动的用户管理、剩余用户评估、破损隔离、破损重构等辅助决策功能,无法辅助损管指挥员快速开展水消防系统的破损使用和损管使用,应用功能亟待拓展,智能化水平急需提高<sup>[7]</sup>。

### 1 水消防系统功能逻辑模型

舰船上的水消防系统具有明显的点线特征,所以可以建立图模型。前人基于图模型在多个领域开展了重构算法研究。

在电力输送、通信等民用行业领域,针对网络资源优化配置和设备故障处置,已基于图论分析法对网络重构开展了广泛深入的研究<sup>[8-10]</sup>。战斗损伤下的舰船水消防系统重构相比民用领域重构具有以下特点:任务背景为多区域、大范围战斗破损;任务目标多重,不仅包括防止消防水泄漏,而且需要保障消防用水供应和作战冷却水等供应;为保障舰船生命力和继续执行作战任务,对隔离重构的精细化和时效性要求更高。

在作战指挥控制领域,前人针对树型拓扑结构的作战指挥通信网络,开展了毁伤节点的重组研究,以恢复指挥通信能力<sup>[11-13]</sup>。相比于树型结构的作战指挥通信网络,水消防系统呈现总线型、环形和树型结构相混合的、更加复杂的网络结构,如图 1 所示。因此,需要针对水消防系统的网络结构特点,基于舰船战斗损伤开展其隔离重构算法和监控系统研究。

为精准快速地实现破损水消防系统的隔离重构,针对水消防系统的显著特点,本文将各类消防泵、阀门、消防水用户和管路进行图模型的节点建模。该建模方式适用于大型水消防系统结构,便于利用计算机随时根据战时受损状态,对图模型作出调整与更新,使得决策结果更为准确,智能性更强。

水消防系统节点的主要类型及功能逻辑如表 1 所示。

以图 1 所示的双环形水消防系统为例,按照节点法建立的水消防系统图模型如图 2 所示。

使用数学的方法描述图模型的逻辑关系,需要使用以下三个数据表:

- 1) 节点状态关系表。针对表 1 中四种不同类型的节点,记录节点当前所处的状态。
- 2) 节点连接关系表。该表主要记录与每个节点相连的节点数组。

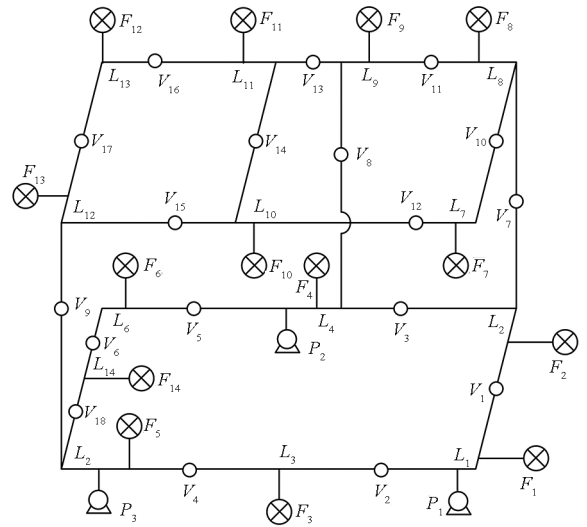


图 1 典型水消防系统结构

Fig. 1 Architecture of fire-fighting system

表 1 水消防系统的节点类型与功能逻辑

Tab. 1 Fire-fighting system node type and functional logic

节点类型	节点含义	节点功能	节点状态分类	节点符号
源节点	消防泵	供水路径的起点	开启、关闭、破损、故障	<i>P</i>
阀门节点	气动、电动、手动阀门等 阀门类型	改变供水路径	开启、关闭、破损	<i>V</i>
用户节点	消火栓、 排水喷射泵、 泡沫灭火装置 等消防水用户	供水路径的终点	开启、关闭、破损	<i>F</i>
管路节点	管路	连接其他节点	完好、破损	<i>L</i>

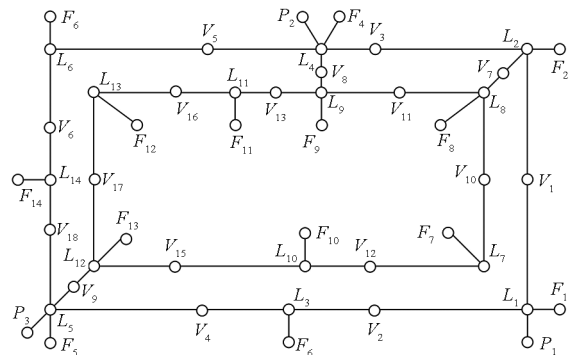


图 2 典型水消防系统图模型

Fig. 2 Graph model of typical fire-fighting system

- 3) 供水路径存储表。在供水路径查询完成后,该表记录各有效用户节点与源节点之间途径

的节点。

## 2 破损水消防系统隔离重构的智能决策算法

### 2.1 供水路径查找算法

水消防系统的工作原理:海水经消防泵加压增速后,沿消防总管及其支管(含阀件)将海水输送到各用户。与此同时,消防水系统正常运行需要根据设计要求保持一定水压。根据水消防系统的工作原理,设定供水路径查找算法的两个假设。

**假设 1:**对于任意消防水用户,当其与消防泵之间的供水路径完好时,其具备工作能力。若水消防系统中的任意设备发生破损,不仅导致消防水会从破损处耗散,而且导致水消防系统失压。因而用户节点与破损节点连通时,会导致用户节点失效,不存在供水路径。

**假设 2:**当阀门处于关闭状态时,阀门两端的消防水无法自由流通。因而处于关闭状态的阀门节点,与相关管路不连通。

根据上述规则,设置当前查询的节点集合为  $A$ ,已查询的节点集合为  $B$ 。如图 3 所示,基于多叉树宽度优先算法,供水路径查找算法设计如下:

第 1 步: $A_1$  为用户节点  $F$  的集合。

第 2 步: $A_2 = L(A_1)$ ,  $B_2 = A_1$ 。若  $A_2$  内有破损的节点,则该用户节点受影响,停止搜索。若无破损的节点,则转入第 3 步。

第  $2n + 1$  步: $A_{2n+1} = A_{2n} - \{a_{2n,i}\}$ ,  $B_{2n+1} = B_{2n} + \{a_{2n,i}\}$ 。 $a_{2n,i}$  为  $A_{2n}$  中处于关闭状态的节点、用户节点和处于故障状态的节点。其中,  $n \geq 1$ 。

第  $2n + 2$  步: $A_{2n+2} = L(A_{2n+1}) - B_{2n+1}$ ,  $B_{2n+2} = B_{2n+1} + A_{2n+1}$ 。若  $A_{2n+2}$  内有破损的节点,则该用户节点失效。若无破损节点,则转入第

$2n + 3$  步。其中,  $n \geq 1$ 。

直至集合  $A$  中仅有源节点时,搜索结束。按顺序依次记录用户节点与源节点之间的节点即为供水路径。

其中,  $L(A)$  表示搜索集合  $A$  内各个节点的所有相邻节点。若  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_m\}$ , 则  $L(A) = L(a_1) \cup L(a_2) \cup \dots \cup L(a_i) \cup \dots \cup L(a_m)$ 。

图 3 中的节点  $a$  表示当前查询节点集合  $A$  中的某个节点。

### 2.2 破损区域的隔离算法

对于破损的水消防系统,为了防止高压消防水的泄漏,需要关闭与所有破损节点相连接的阀门,将破损区域与非破损区域隔离。破损区域隔离需要查找与破损节点连通的源节点、用户节点和阀门节点,然后通过关闭这些节点中未关闭的节点,即可实现破损区域的隔离。

设置当前查询的节点集合为  $A$ ,基于多叉树宽度优先算法,破损区域的隔离算法设计如下:

第 1 步: $A_1$  为破损节点的集合。

第 2 步: $A_2 = L(A_1) - A_1$ 。

第 3 步: $A_3 = A_2 - \{a_{2,i}\}$ 。 $a_{2,i}$  为  $A_2$  中各个处于关闭状态的节点和用户节点。若  $A_3$  中还有管路节点,则转入第 4 步;若无,停止搜索, $A_3$  内的节点即为智能隔离方案中需要关闭的节点,记为集合  $C$ 。

第 4 步: $A_4 = L(A_3) - A_1$ 。

第 5 步: $A_5 = A_4 - \{a_{4,i}\}$ 。 $a_{4,i}$  为  $A_4$  中各个处于关闭状态的节点。 $A_5$  内的节点即为智能隔离方案中需要关闭的节点,记为集合  $C$ 。

为查找智能隔离方案的备用方案,也可继续对管路节点和开启状态的阀门节点的相邻节点开展搜索。

### 2.3 供水路径的重构算法

路径重构方案算法用于查找可开启的源节点和阀门节点。通过将源节点和阀门节点打开,可能会使无消防水供应的用户节点与源节点之间建立供水路径。

路径重构方案生成流程为:递归查找失效的用户节点的所有相邻节点,直至找到源节点;将供水路径上处于关闭状态的阀门打开。在“损伤隔离方案”中设置为关闭状态的源节点和阀门不可重新开启,并删除查找到的用户节点。

根据上述规则,首先设置当前查询的用户节点集合为  $A$ ,已查询的节点集合为  $B$ ,损伤隔离中关闭的节点集合为  $C$ ,路径重构需要打开的阀门

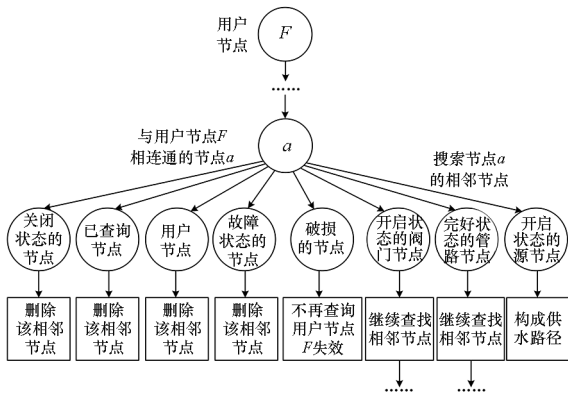


图 3 供水路径查找算法示意图

Fig. 3 Illustration of water supply path searching algorithm

集合为  $D$ 。基于多叉树宽度优先算法,供水路径的重构算法如下<sup>[14-15]</sup> :

第 1 步: $A_1$  为失效的用户节点, $B_1$  为空集, $D_1$  为空集。

第  $n$  步: $A_n = L(A_{n-1}) - B_{n-1} - C$ 。  $B_n = B_{n-1} \cup A_n$ 。  $D_n = D_{n-1} + \{a_{n,i}\}$ 。  $a_{n,i}$  为  $A_n$  中各个处于关闭状态的阀门节点。其中, $n \geq 2$ 。

当集合  $A$  为空集时,停止搜索。路径重构需要打开的阀门集合  $D$  即为所求的结果。最终,按照搜索到消防泵的顺序,对重构方案的优先级开展排序。

### 3 破损水消防系统的案例分析

#### 3.1 初始损伤状态设置与消火栓可用性评估

舰船水消防系统的初始状态为:消防泵  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  均处于开启状态;标记为实心圆的阀门  $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_5$ 、 $V_7$ 、 $V_9$ 、 $V_{10}$ 、 $V_{14}$  和  $V_{15}$  处于关闭状态;其余标记为空心圆的阀门处于开启状态。当前水消防系统开展分区使用:消防泵  $P_1$  为消防水用户  $F_1$  和  $F_2$  供水;消防泵  $P_2$  为消防水用户  $F_3$ 、 $F_5$  和  $F_6$  供水。消防泵  $P_3$  为消防水用户  $F_7 \sim F_{13}$  供水。

假设舰船遭受战斗损伤,管路  $L_{11}$ 、 $L_{13}$  和消火栓  $F_{12}$  发生遭受武器攻击爆炸破损,其所在舱室发生火灾,消防泵  $P_3$  受震动冲击发生故障后停止供水,如图 4 所示。

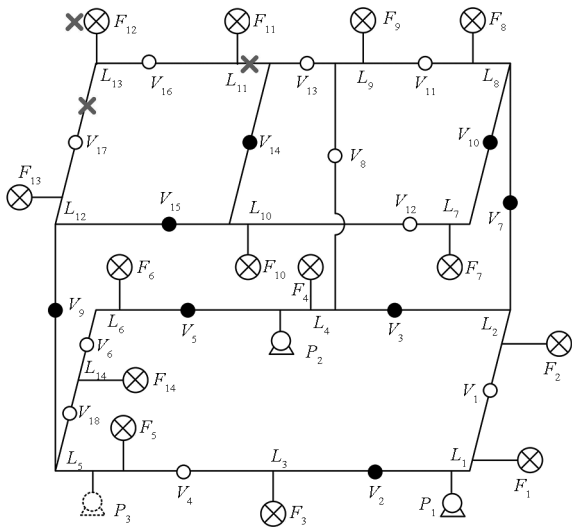


图 4 典型水消防系统损伤案例示意图

Fig. 4 Illustration of typical fire-fighting system damage case

舰船遭受损伤后,基于供水路径查找算法可以得出,当前由于消防水压力严重下降导致  $F_3 \sim F_{14}$  共 12 个消火栓失效。

以消火栓  $F_4$  为例,对供水路径查找开展案例

分析,如图 5 所示。

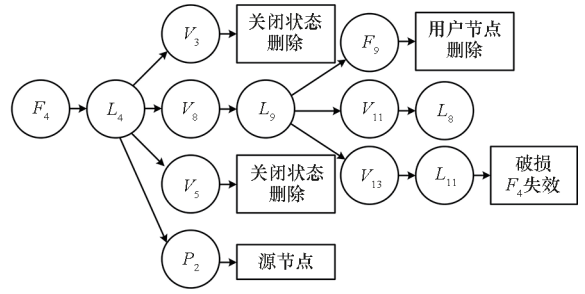


图 5 供水路径查找案例

Fig. 5 Water supply path searching case

#### 3.2 损伤案例破损区域的隔离

为避免破损消防管路漏水,恢复水消防系统压力,并减小消防积水对舰船的不利影响,设置的损伤隔离方案如表 2 所示。其中,智能隔离方案为关闭  $V_{13}$ 、 $V_{16}$  和  $V_{17}$ ,其生成过程如图 6 所示。通过关闭  $V_{13}$ ,图 5 中的消火栓  $F_4$  可恢复使用,具备喷淋降温以限制火灾蔓延的能力。

在隔离方案中设置为关闭状态的阀门不仅包括  $V_{13}$ 、 $V_{16}$  和  $V_{17}$ ,还包括初始状态为关闭的阀门  $V_{14}$ ,即  $C = \{V_{13}, V_{14}, V_{16}, V_{17}\}$ 。

表 2 水消防系统损伤案例隔离方案

Tab. 2 Isolation scheme of fire-fighting system damage case

方案优先级	隔离方案	失效消火栓
1	关闭 $V_{13}$ 、 $V_{16}$ 和 $V_{17}$	$F_5$ 、 $F_6$ 、 $F_7$ 、 $F_{10}$ 、 $F_{11}$ 、 $F_{12}$ 、 $F_{13}$ 、 $F_{14}$
2	关闭 $V_8$	$F_5$ 、 $F_6$ 、 $F_7$ 、 $F_8$ 、 $F_9$ 、 $F_{10}$ 、 $F_{11}$ 、 $F_{12}$ 、 $F_{13}$
3	关闭 $P_2$	$F_4$ 、 $F_5$ 、 $F_6$ 、 $F_7$ 、 $F_8$ 、 $F_9$ 、 $F_{10}$ 、 $F_{11}$ 、 $F_{12}$ 、 $F_{13}$ 、 $F_{14}$

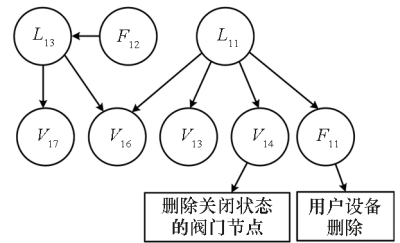


图 6 水消防系统损伤隔离方案生成

Fig. 6 Generation of damaged fire-fighting system isolation scheme

为尽可能减小损伤隔离对消火栓可用性的不利影响,需要采用智能隔离方案。精准设置损伤隔离方案在战损条件下至关重要。例如,消火栓

$F_9$  是可用于对起火舱室的邻舱舱壁喷淋降温,限制火灾蔓延;疏水喷射泵支管  $F_8$  可用于排除舰船消防积水。虽然第2种和第3种隔离方案更为简便,但会使消防水用户  $F_8$  和  $F_9$  失效,对消除消防积水和限制火灾蔓延造成不利影响。

### 3.3 损伤案例供水路径的重构

为进一步限制火灾蔓延,需要使用消火栓  $F_{13}$  对起火舱室的邻舱舱壁喷淋降温,制定路径重构方案,如表3所示。其中,其生成过程如图7所示。

表3 水消防系统损伤案例重构方案

Tab.3 Reconfiguration scheme of fire-fighting system damage case

方案优先级	重构方案	供水路径	途径节点个数
1	开启 $V_2$ 、 $V_9$	$P_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_4 \rightarrow V_9 \rightarrow F_{13}$	3
2	开启 $V_5$ 、 $V_9$	$P_2 \rightarrow V_5 \rightarrow V_6 \rightarrow V_{18} \rightarrow V_9 \rightarrow F_{13}$	4
3	开启 $V_{10}$ 、 $V_{15}$	$P_2 \rightarrow V_8 \rightarrow V_{11} \rightarrow V_{10} \rightarrow V_{12} \rightarrow V_{15} \rightarrow F_{13}$	5
4	开启 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_9$	$P_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_2 \rightarrow V_4 \rightarrow V_9 \rightarrow F_{13}$	4
5	开启 $V_7$ 、 $V_{10}$ 、 $V_{15}$	$P_1 \rightarrow V_1 \rightarrow V_7 \rightarrow V_{10} \rightarrow V_{12} \rightarrow V_{15} \rightarrow F_{13}$	5
6	开启 $V_3$ 、 $V_5$ 、 $V_9$	$P_1 \rightarrow V_1 \rightarrow V_3 \rightarrow V_5 \rightarrow V_6 \rightarrow V_{18} \rightarrow V_9 \rightarrow F_{13}$	6
7	开启 $V_3$ 、 $V_{10}$ 、 $V_{15}$	$P_1 \rightarrow V_1 \rightarrow V_3 \rightarrow V_8 \rightarrow V_{11} \rightarrow V_{10} \rightarrow V_{12} \rightarrow V_{15} \rightarrow F_{13}$	7
8	开启 $V_3$ 、 $V_7$ 、 $V_{10}$ 、 $V_{15}$	$P_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_7 \rightarrow V_{10} \rightarrow V_{12} \rightarrow V_{15} \rightarrow F_{13}$	5

消火栓恢复消防水供应的重构过程分为三个阶段:第一阶段为分析决策阶段;第二阶段为实施重构方案阶段;第三阶段为消防水流经供水路径阶段。为快速有效地恢复消防水供应,最大限度地限制火势蔓延,需要缩短每个阶段所需时间。

为提高损伤水消防重构实施的快速性,应尽可能减少开启阀门的数量,为重构的第二阶段节省时间。8个重构方案的开启阀门平均数量为2.75个。假设每个阀门开启时间相同,根据人工分析方案完成重构所需时间预期比智能重构方案多37.5%。

在重构的第三阶段中,为减少水消防系统管路阀门对消防水供应产生的阻力作用,并缩短完成重构与消火栓恢复供水的间隔时间,应使供水路径的途径节点数最小。

8个重构方案的途径节点平均个数为4.875个,比智能重构方案多62.5%。智能重构方案不仅能够有效保障消火栓所需的消防水压,而且可以明显缩短消防水途径供水路径所需时间。

综上所述,基于计算机技术的智能重构方案不仅可显著缩短分析决策所需时间,而且能够明显减少完成决策到消火栓恢复工作的间隔时间,并提升消火栓的工作性能。

## 4 智能监控系统的设计及开发

目前,舰船水消防系统主要是对消防泵的开启状态、隔离阀的开启状态以及消防管路的水压进行监测和控制。然而,当前离散的监控信息点,与战斗损伤条件下的水消防系统使用决策还不能有效的融合,大量决策依赖于损管队员的经验完成。在紧张的战斗破损场景下,依靠舰员的决策可能会出现准确性不高、决策效率低下、决策方案冗长等延误损管时机的情况。

美国海军“斯塔克”号的战斗破损处置教训表明,由于美国海军处置破损水消防系统的速度较慢,过了18h后才完成破损管路隔离,最终导致1000t消防水灌入舱内,严重影响了舰船的不沉性<sup>[16-17]</sup>,特别是当时艏部消防管路失压,但是并没有引起舰员注意。如果能够提前隔离艏部破损,就不会造成如此大的进水危险。因此,通过构建智能监控系统,可有效降低舰员的感知负荷、思考负担,提升水消防系统处置的效率<sup>[18]</sup>。

### 4.1 智能监控系统架构设计

设计的智能监控系统如图8所示,包括:信息表现层、信息控制层、智能决策层、信息传输层和信息采集层。

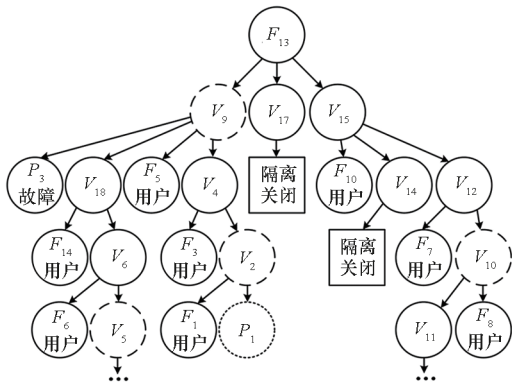


图7 水消防系统重构方案生成案例

Fig.7 Generation case of damaged fire-fighting system reconfiguration scheme

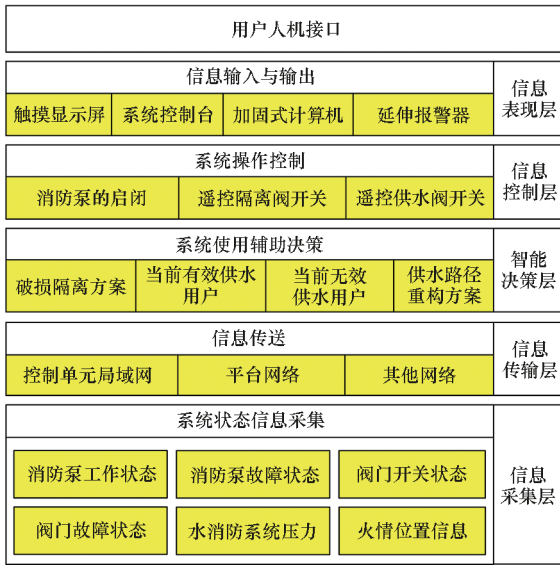


图 8 智能监控系统架构设计

Fig. 8 Architecture design of intelligent supervisor and control system

1) 信息表现层: 主要提供人机交互环境, 提供信息显示和输入方法。

2) 信息控制层。根据生成的决策方案, 分解方案实施与指令操作的映射关系, 产生相关逻辑解算结果或控制指令, 控制消防泵的启闭、隔离阀的开关以及喷水阀的开关。

3) 智能决策层。根据采集的各类信息, 以水消防系统的实战化运用为任务驱动, 基于第 2 节建立的智能决策算法, 提供智能决策方案, 包括: 破损隔离方案, 当前有效(无效)供水用户分析以及供水路径重构方案。

4) 信息传输层。连接信息采集层、信息决策层、信息控制层和信息表现层, 是信息传输和发布的平台。信息传输层主要通过统一的平台网络传输信息, 并辅以必要的现场控制单元局域网等局域网或直连线路。

5) 信息采集层。主要进行水消防系统状态的信息采集, 包括: 消防泵的启停、出口压力等工作状态, 消防泵的故障状态, 隔离阀、供水阀等阀门的开关状态、故障状态, 消防管系压力以及当前火灾舱室等。

### 4.2 智能监控系统的开发

智能监控系统开发的关键是智能决策层, 即软件系统。使用第 2 节构建的各类智能决策算法, 在 Visual Studio. net 开发环境下, 使用 SQL Server 数据库环境, 完成了系统软件的开发。设计的软件功能模块组成如图 9 所示。

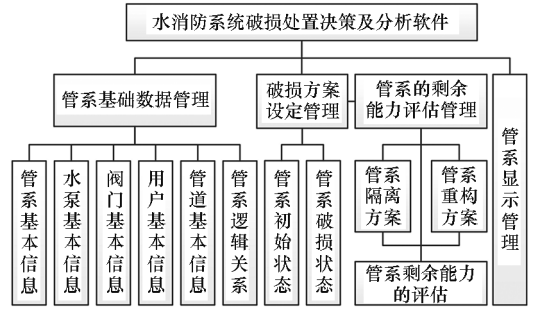


图 9 智能决策软件功能组成

Fig. 9 Functional component of intelligent supervisor and control system

下面以典型的业务使用流程, 介绍该系统的使用模式。

1) 用户首先可以设置水消防系统的初始状态。当舰员发现某段管系破损时, 用户可以点击相应管系的位置, 选择破损的管系设备。设置的初始状态和选择的破损设备与图 4 相同。

2) 系统将通过智能化的推理决策, 生成隔离方案, 并将控制信息点提供给用户, 以实施快速的隔离。如图 10 所示, 破损隔离实施后, 软件将自动分析供水有效的用户以及供水失效的用户。

3) 如图 11 所示, 系统能够根据损伤隔离方案分析得出可以通过重构恢复供水能力的消防水用户。同时用户根据需要选择急需恢复供水能力的消防水用户, 并查看智能重构的方案。系统在界面上同时生成控制点表, 用户可以在界面上进行遥控操作, 实现快速的重构, 并查看重构后的供水路径。

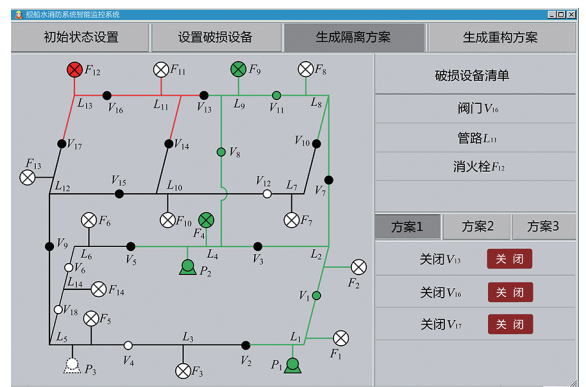


图 10 智能监控系统生成隔离方案界面

Fig. 10 Isolation scheme generating interface of intelligent supervisor and control system

其中, 图 10 和图 11 中的界面按照表 4 规定的颜色对水消防系统设备的状态进行标记。消防泵处于故障状态时, 其边框为虚线。

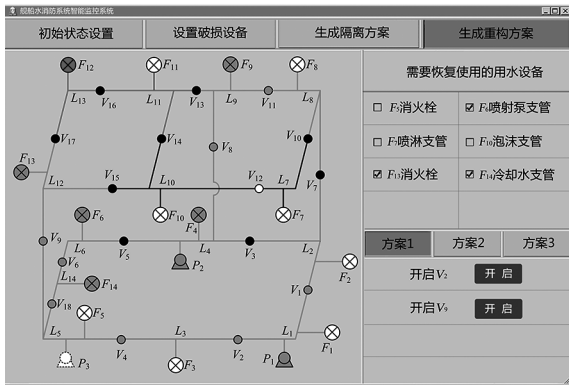


图 11 智能监控系统生成重构方案界面

Fig. 11 Reconfiguration scheme generating interface of intelligent supervisor and control system

表 4 水消防系统设备颜色含义

Tab. 4 Color implication of fire-fighting system equipment

颜色	阀门	消防泵	管路	用户
红色	破损	破损	破损	破损
绿色	开启且有水	开启	有消防水	开启
黑色	关闭	—	完好且无消防水	—
白色	开启且无水	关闭	—	关闭

该智能监控系统以智能辅助决策软件为中心,将监测点、控制点按照任务驱动的方式进行有机融合,明显减轻了舰员现场分析的压力,提高了操作控制的效率,提升了分析决策的速度和精度,为水消防系统的战斗破损使用提供了有效的支撑。

针对某训练船型开发了水消防智能监控系统,并对智能辅助决策效能进行了测试和检验。针对表 5 中的 6 个破损模式,分别统计了舰员耗时以及系统耗时,并进行了比较分析。从测试效果表可以看出,该智能监控系统能够显著减小破损水消防系统隔离和重构的时间,为紧张的消防工作提供了有效的保障。

### 5 结论

舰船水消防系统是保证舰船生命力的关键系统之一。目前,舰船水消防系统的使用决策以及监测控制等相关研究,主要针对平时未破损的情况开展。然而,在海战环境中,舰船水消防系统受损概率大,如果隔离重构不及时、不精准、不全面,

表 5 智能监控系统效能测试表

Tab. 5 Effectiveness tests of intelligent supervisor and control system

序号	破损水消防系统使用科目	平均耗时比值 (舰员/系统)
1	单点破损,管路隔离	8 : 1
2	两点破损,管路隔离	14 : 1
3	单点破损,失效用户的评估	13 : 1
4	两点破损,失效用户的评估	19 : 1
5	单点破损,隔离方案的制定	12 : 1
6	两点破损,隔离方案的制定	23 : 1

会给舰船安全和继续遂行作战任务造成严重影响。本文针对水消防系统网络连接特点,基于多叉树宽度优先搜索,构建了基于战斗损伤的水消防系统破损使用智能决策算法,解决了水消防系统损伤隔离和路径重构的关键问题。通过案例计算,验证了该模型不仅可以使决策结果更加准确、有效,而且可有效节省分析决策时间和隔离重构实施时间。

通过构建智能决策算法,开发了水消防系统智能监控系统。该智能监控系统不仅有利于将损伤隔离控制在最小范围,而且能够最大限度地发挥水消防系统供水保障能力,为快速恢复破损水消防系统提供了一种新手段,推广应用前景广阔。

然而,该智能监控系统的研究前提是水消防系统的破损对象是已知的,如何在破损对象不明确的情况下,开展智能化的损伤预报依然是今后需要研究的问题。

### 参考文献 (References)

[1] PARK D K, SHIN Y H, CHUNG J H, et al. Development of damage control training scenarios of naval ships based on simplified vulnerability analysis results [J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2016, 8(4): 386 - 397.

[2] 田奕洋, 邱金水, 刘伯运. 基于图论的舰船水消防系统故障诊断顺序确定方法[J]. 中国舰船研究, 2011, 6(4): 72 - 74.  
TIAN Y Y, QIU J S, LIU B Y. The faults diagnosis order method based on graph theory of ship water fire-fighting system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2011, 6(4): 72 - 74. (in Chinese)

[3] SHIFFLER M E. Development of a zonal architecture fire main system for combatant ships [J]. Naval Engineers Journal, 1993, 105(3): 31 - 44.

[4] 黄义勇, 黄清海, 李志奎, 等. 新一代多用途驱逐舰 DDG - 1000 工程控制系统分析[J]. 船海工程, 2013, 42(4): 89 - 94, 98.

- HUANG Y Y, HUANG Q H, LI Z Q, et al. Study on the engineering control system of new generation destroyer DDG - 1000[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2013, 42(4): 89 - 94, 98. (in Chinese)
- [5] GEERTSMA R, BADON GHIJIBEN N, MIDDELDORP E, et al. Development of fire-fighting & damage control automation that enables future crew reduction [J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 8(17): 69 - 85.
- [6] MARTIN S, OTTOF F. Integrated monitoring and control system for German navy K130 corvettes [C]//Proceedings of the 14th International Ship Control Systems Symposium, 2009: 57 - 59.
- [7] 侯岳, 浦金云, 崔鲁宁. 舰艇受损消防系统消防能力评估及抢修决策智能化系统研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2009, 33(2): 337 - 340.
- HOU Y, PU J Y, CUI L N. Research on intelligent system of capability evaluation and emergency repair plan for damaged ship fire fighting system[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2009, 33(2): 337 - 340. (in Chinese)
- [8] 王骏东, 杨军, 裴洋舟, 等. 基于知识图谱的配电网故障辅助决策研究[J]. *电网技术*, 2021, 45(6): 2101 - 2112.
- WANG J D, YANG J, PEI Y Z, et al. Distribution network fault assistant decision-making based on knowledge graph[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(6): 2101 - 2112. (in Chinese)
- [9] 李文君, 段登伟, 朱雨, 等. 基于 5G 通信模式下的配电网自愈保护应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(24): 152 - 159.
- LI W J, DUAN D W, ZHU Y, et al. Application of distribution network protection based on a 5G end-to-end communication mode [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24): 152 - 159. (in Chinese)
- [10] 杨文, 王钺, 石金明, 等. 基于多跳位置估计的无线光自组网拓扑重构[J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(2): 452 - 457.
- YANG W, WANG Y, SHI J M, et al. Topology reconfiguration of wireless optical ad hoc networks based on multi-hop location estimation [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42(2): 452 - 457. (in Chinese)
- [11] 田旭光, 朱元昌, 罗坤, 等. 基于复杂网络理论的指挥控制
- 制系统自适应重构模型[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(1): 91 - 96.
- TIAN X G, ZHU Y C, LUO K, et al. Adaptive reconstruction model for command and control system under information age based on complex network theory[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(1): 91 - 96. (in Chinese)
- [12] 胡斌, 黎放. 多种攻击策略下无标度网络修复策略[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(1): 86 - 89.
- HU B, LI F. Repair strategies of scale-free networks under multifold attack strategies [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(1): 86 - 89. (in Chinese)
- [13] 贾珺, 吴元立, 贺筱媛, 等. 作战协同关系超图模型[J]. *国防科技大学学报*, 2015, 37(3): 185 - 190.
- JIA J, WU Y L, HE X Y, et al. Operation cooperative relation modeling based on hypergraphs [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2015, 37(3): 185 - 190. (in Chinese)
- [14] 赵桓. 基于供水管网建模的 DMA 技术及漏失量估算研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.
- ZHAO H. Research on DMA technology and leakage estimation based on water supply network modeling [D]. Qingdao: Qingdao Technology University, 2022. (in Chinese)
- [15] 杨浩志. 基于复杂网络的城市供水管网 DMA 分区及水力安全可靠性评价[D]. 天津: 天津理工大学, 2022.
- YANG H Z. Partition of DMAs in urban water distribution systems based on complex network and hydraulic safety and reliability evaluation [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [16] MEHLS M D. Propagation of fire generated smoke in shipboard spaces[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2000.
- [17] VARELAS G. Evaluation of modern navies' damage control and firefighting training using simulator platforms [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2011.
- [18] 陈晨, 陈韬, 胡兴刚, 等. GIS 技术在舰船损管监控系统的实现及应用[J]. *船海工程*, 2022, 15(5): 22 - 25.
- CHEN C, CHEN T, HU X G, et al. Implementation and application of GIS technology on the shipboard damage control system[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2022, 15(5): 22 - 25. (in Chinese)