doi:10.11887/j.cn.201903019 http://journal.nudt.edu.cn

舰船中央冷却系统多智能体自治控制*

陈于涛,曹诗杰,李东亮,邵钰蟒
(海军工程大学 动力工程学院,湖北 武汉 430033)

摘 要:面向下一代舰船电力推进装置的分布式冷却需求,针对复杂情况下系统自重构与自愈控制问题,提出以某型中央冷却系统为控制对象的多智能体自治控制体系。设计各类智能体的个体结构和多智能体的分布式结构,采用智能体联盟和熟人机制对合同网协作模型进行改进,并优化自动任务分配和故障恢复过程中的多智能体协作流程。在此基础上,设计中央冷却系统原理性装置,建立以多智能体控制系统为核心的自治控制试验研究平台,对控制系统效能进行分析验证。试验结果表明:所设计的多智能体自治控制体系能够自主地完成系统动态重构和故障恢复控制,使电力推进装置中央冷却系统具备自重构和自愈的能力。

关键词:电力推进装置;中央冷却系统;多智能体系统;自治控制
中图分类号:U664.121 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2019)03-119-06

Multi-agent autonomous control approach for marine central cooling system

CHEN Yutao, *CAO Shijie*, *LI Dongliang*, *SHAO Yumang*
(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aimed at the distributed chilling demand of next generation marine electric propulsion plants, the self-reconfiguration and self-healing problem of marine central cooling system, a multi-agent autonomous control framework for a certain type of central cooling system was proposed. The specific structure of individual agent and systematic configuration of agent group was designed. The agent alliance and acquaintance mechanism was adopted to improve contract net cooperation model. The cooperation process of multi-agent system during task allocation and fault recovery was optimized. On this basis, a prototypical apparatus of the central cooling system was designed, the experimental research platform for multi-agent autonomous control system was built, and the performance analysis and verify of control system was carried out. The results show that the designed multi-agent autonomous control architecture implements dynamic reconfiguration and fault recovery process autonomously, and enable marine central cooling system to have the ability of self-reconfiguration and self-healing.

Keywords: electric propulsion plant; central cooling system; multi-agent system; autonomous control

舰船中央冷却系统(Central Cooling System, CCS)是指整个动力系统的各个冷却部位由集中供应的淡水统一冷却,而循环淡水通过中央冷却器由海水集中换热冷却[1-2]。CCS提高了淡水回路的使用效率,大大减少了海水管路的数量,从根本上避免了海水回路对动力系统热交换器和设备的腐蚀,同时降低了对管路材料的要求[3],是未来电力舰船冷却系统的发展方向之一。

舰船电力推进装置系统复杂,运行工况和需要冷却的设备多,且布置分散,运行环境不确定性因素大,对生命力性能的要求越来越高[4-6]。目前越来越多的舰船电力推进装置采用了CCS,但对CCS的控制目标与下一代舰船在复杂情况下的生存能力控制需求并不完全匹配,主要还是以运行的可靠性和节能效果为首要目标[7-8],对CCS任务切换后的自重构能力以及故障发生后的自愈能力的研究较少,距离舰船综合电力系统整体控制目标的需求还有差距。

基于智能体(Agent)的智能控制方法在复杂系统控制领域中的应用近年来已成为研究热点[9-11]。针对CCS的自治控制问题,相对于常规智能控制,基于智能体的自治控制是一个更有效的综合智能控制体系,可以使所建立的控制系统具有足够的智能和较强的生存能力,以适应复杂任务和不确定环境的变化[12-16]。

本文针对电力推进装置CCS的状态重构和故障恢复问题,将智能体自治控制的理论与方法引入CCS控制领域,设计多智能体自治控制体

* **收稿日期**:2018-03-13
基金项目:中国博士后科学基金资助项目(201150M1547)
作者简介:陈于涛(1977—),男,湖北武汉人,副教授,博士,硕士师导师,E-mail:yutao_jack_chen@163.com

系,包括分层拓扑结构和协作运行机理。在此基础上,设计以 CCS 为对象的原型试验装置,并搭建以多智能体控制系统为核心的试验研究平台,对控制系统的性能进行验证与分析。

1 CCS 多智能体控制结构设计

1.1 CCS 结构组成

电力推进装置 CCS 主要由淡水回路、海水回路和控制系统所组成。开式海水回路中来自舷外的低温海水,通过中央冷却器吸收循环淡水中的热量,然后排出舷外。闭式淡水回路是整个 CCS 的主要部分,其中循环淡水负责冷却电力推进装置中的各个发热设备和换热器。

电力推进装置 CCS 淡水回路的基本构成如图 1 所示,包含分布于各个机舱的冷却用户和互为备份的冷却泵组,通过冗余的淡水管路连接在一起,其控制系统需要在各种突发情况下保持良好的控制性能。

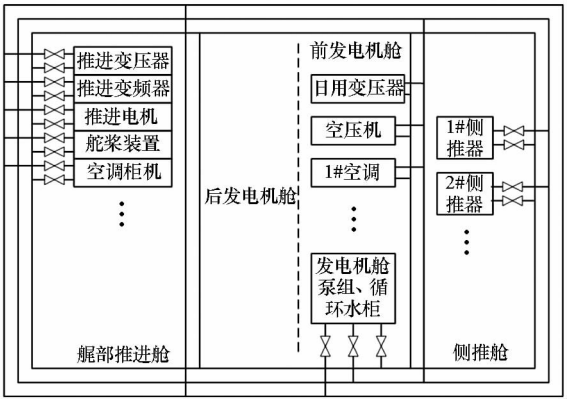


图 1 中央冷却系统构成

Fig. 1 Arrangement of CCS configuration

1.2 多智能体控制结构

根据 CCS 自身的分层拓扑结构形式,采用三层多智能体系统(Multi-Agent System,MAS)来构建电力推进装置 CCS 自治控制结构。所设计的分层 MAS 拓扑结构如图 2 所示,其中 Agent 包括:上层系统级 Agent,负责整个系统的任务分配与协作运行;中间层子系统级 Agent,分为三类,包括资源 Agent、冷却用户 Agent 和管路 Agent,负责各个子系统的任务分配与协作运行;下层部件级泵 Agent,阀门 Agent 负责控制指令的执行和物理设备状态的监视。

在 Agent 内部结构方面,同一层的 Agent 采用相同的内部结构,不同层的 Agent 根据其功能和接口关系采用特有的内部结构。Agent 内部主要包含通信模块、状态诊断模块、决策规划模块、系统能力目录模块以及执行模块等部分。

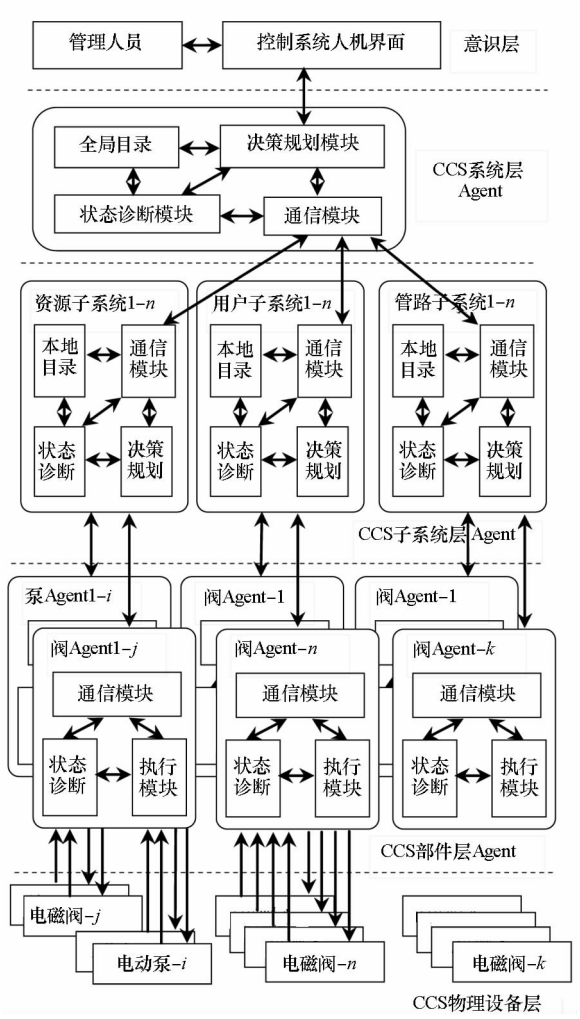


图 2 分布式多智能体系统分层拓扑结构

Fig. 2 Layered topology structure of distributed MAS

从总体上看,所设计的 MAS 拓扑结构的特点在于综合了层次结构与模块结构的优点,是一种混合体系结构。按照 CCS 系统的分层拓扑形式进行 Agent 划分,可以使得 Agent 之间的关系更清晰,各个 Agent 的边界和功能更加易于理解,并且能更好地区分子系统之间的交互信号和子系统内部的交互信号,同时使结构更易于扩展。上层 Agent 可对下层 Agent 进行控制,并负责其下层 Agent 之间的协调与管理。同时可以将该结构中每个子系统 Agent 看作顶层协调控制 Agent 下属的一个模块,而所有属于同一子系统的底层部件 Agent 处于同一模块内,同一层次内子系统 Agent 之间通过模块化的通用接口进行通信,同一子系统所属部件 Agent 之间可以通过通信模块直接通信。因此,这种体系结构克服了层次结构和模块结构各自的不足,简化了系统分解过程和降低了通信网络设计的复杂性,避免了各单个 Agent 过分强调自身任务的重要性而独占资源,从而提高

协作效率和减少通信量。

2　CCS 多智能体自治运行机制设计

2.1　多智能体系统协作模型

在合同网模型的基础上采用 Agent 联盟和熟人机制进行 MAS 协作模型的优化。

基于 Agent 联盟的 MAS 协作模型中,上层系统级 Agent 将任务信息直接发送给中间层“盟主”,并与各个“盟主”进行交互协商,得到该任务的控制策略。相应获取任务的“盟主”根据各自联盟内的各个 Agent 的能力进行任务分配、协商,并最终决定完成任务的方案。Agent 联盟能够充分整合各个 Agent 的能力以及其合作性,减少大量的通信量,使得任务的完成过程更加合理而高效。

MAS 的任务模式对于给定的控制对象来说是有一定规律的,系统运行一段时间后,很多 Agent 会形成一种相对稳定的任务接受模式,即各种任务都由各自相对固定的一些 Agent 来完成。对于某个特定的任务来说,其相对固定完成任务的那些 Agent 即为“熟人”。上层 Agent 接受任务后,先在其“熟人”库中寻找能够完成任务的 Agent,如果找到了目标 Agent,即可立即“建立合同”,完成本任务的分配,如果在“熟人”库中未找到能够完成任务的 Agent,则再以广播的形式将任务信息发送到其他 Agent。这样的协作过程可以进一步提高任务效率。

2.2　多智能体系统协作流程

根据所设计的改进合同网协作模型,MAS 的协作流程如图 3 所示,包括任务分配和故障恢复两种基本情况。

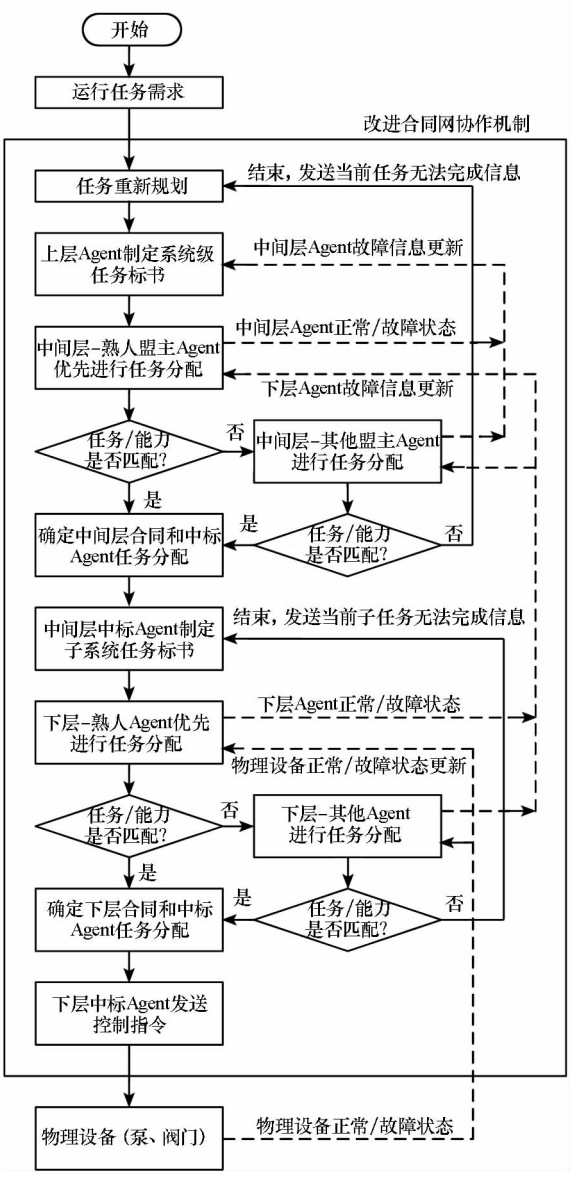


图 3　多 Agent 系统协作流程图

Fig. 3　Cooperation process of multi-agent system

在自动任务分配过程中,上层系统级 Agent 根据运行任务需求制定任务标书,将任务分解成不同的子任务给中间层盟主 Agent。首先采用熟人机制,然后再比较任务能力值的大小,最后与各个中间层盟主 Agent 签订任务合同。定义中间层 Agent 对各个子任务的熟悉度函数为:

$$f(x,y)=\frac{x}{y+1}\qquad x,y\in N\qquad(1)$$

式中:x 为累计完成任务的次数,y 为累计任务失败的次数。

当任务分配开始时,上层 Agent 首先比较各个中间层 Agent 对于各个子任务的熟悉度,选择熟悉度较高且不为 0 的至多两个中间层 Agent 进行任务招标,再比较被招标的中间层 Agent 的能力值,选择完成任务能力值较高的一个作为完成指定任务的联盟对象。中间层 Agent 分配子任务后,在本子系统中采用相同的方法确定完成子任务的下层部件级 Agent,最终由下层 Agent 中的执行模块完成控制指令的执行。若在改进合同网协商过程中,根据当前 Agent 的任务/能力状态无法完成给定任务的分配,则将信息反馈给上一层级的 Agent,重新进行任务规划。

按照这种协作方式,整个 MAS 可以完成运行任务的自动分解和智能分配与执行。

在故障恢复过程中的 MAS 协作过程与任务分配情况不同,其协作流程如图 3 虚线部分所示。

故障恢复过程是从下层部件级 Agent 故障感知开始,通过通信模块将物理设备故障状态和自身任务/能力信息发送给中间层的子系统盟主 Agent,后者根据当前状态重新进行任务规划。若中间层

Agent 能够通过子系统内部协作完成故障恢复,则 MAS 只进行局部调整,对其他子系统的 Agent 工作不产生影响。若中间层 Agent 无法恢复故障,则通过通信模块将故障协作请求发送给上层系统级 Agent,在整个系统范围内进行重新规划和故障恢复任务/能力匹配,完成故障恢复标书的制定与任务分配。通过这种协作方式,MAS 能够完成故障状态的智能恢复和系统运行状态的自动重构。

3 试验研究平台设计

3.1 结构体系

针对 CCS 自治控制的研究需要,以淡水回路为对象设计原型试验装置。总体思路是保持 CCS 的拓扑结构和功能不变,采用小型化的元部件代替实际系统中原有的设备与部件,增加对管路泄漏进行模拟和控制的阀门。

具体的实现方式包括:①采用小功率泵组模拟实际的 CCS 淡水冷却泵组;②采用电磁阀和流量计模拟电力冷却用户,通过测量流量计的流量来分析对冷却用户的冷却效果;③增加模拟管路泄漏的手动阀门,以及对管路泄漏进行控制的电磁阀。整个原型试验装置包含 37 个电磁阀、68 个管路三通、21 个流量计和 6 个故障阀。

此外,采用以工控机和数据采集和驱动板卡为核心的控制系统硬件,以及以多 Agent 自治控制模型算法为核心的控制系统软件,结合原型试验装置建立综合的试验研究平台,其总体结构如图 4所示。

3.2 试验设计

试验装置有 4 种运行工况,包括工况 1 航行,工况 2 进出港,工况 3 锚泊,以及工况 4 动力定位。表 1 所示是该装置在不同的运行工况中所属电力设备的工作情况和对 CCS 的冷却需求。

为了验证所设计的电力推进装置 CCS 多 Agent 自治控制模型和算法的有效性,设计了相应的试验内容,试验项目、试验内容和试验设置见表 2。

试验项目包括 4 种类型,分别是运行工况切换、设备故障恢复、管路泄漏恢复以及多种情况并发的复杂运行情况,包含了 CCS 在运行过程中可能遇到的各种情况,可以对多 Agent 自治控制系统的有效性进行全面验证。

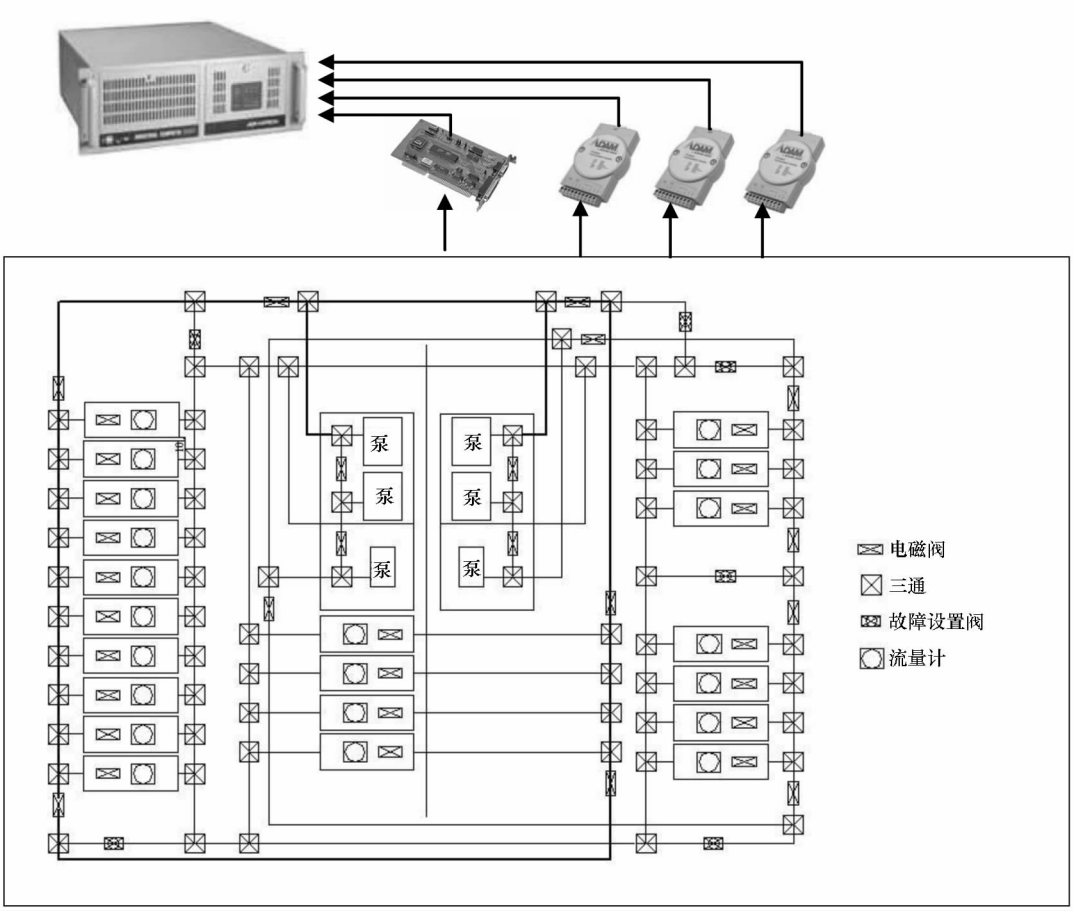


图 4 多 Agent 控制系统试验研究平台原理图

Fig. 4 Arrangement principle of experimental research platform for multi-agent control system

表 1　电力推进装置设备运行状态和冷却需求

Tab. 1　Operation state and chilling demand of electric propulsion plants

设备	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
艏侧推舱侧推器	×	×	×	○
前发电机舱设备	○	○	○	○
后发电机舱设备	○	×	×	○
艉部推进舱设备	○	○	×	○
前舱 CCS 泵组	×	×	○	×
后舱 CCS 泵组	○	○	×	○

注: × 表示不工作,不需要冷却; ○ 表示工作,需要冷却。

表 2　试验项目和内容列表

Tab. 2　List of test items and contents

试验项目	试验内容	试验设置
运行工况切换	工况 1 到工况 2	
	工况 1 到工况 3	
设备故障恢复	单个泵故障	后舱泵组大泵故障
	多个泵故障	后舱泵组大泵、小泵同时故障
	泵与阀同时故障	后舱泵组大泵、高压回路阀门故障
管路泄漏恢复	高压冷却回路泄漏	高压回路 A 点泄漏
	低压冷却回路泄漏	低压回路 D 点泄漏
复杂运行情况	设备故障 + 管路泄漏	后舱泵组大泵、小泵同时故障,高压回路 A 点泄漏
	设备故障 + 管路泄漏 + 工况切换	后舱泵组大泵、小泵同时故障,高压回路 A 点泄漏,工况 2 到工况 3

运行工况切换和故障恢复试验,主要检验自治控制系统的快速任务分配和状态重构能力。管路泄漏恢复和复杂运行情况试验,主要检验自治控制系统的分布式智能和自愈能力。

4　试验分析

以复杂运行情况为例,对多 Agent 自治控制系统的控制过程和效果进行分析。试验设置为进出港工况,后舱泵组大泵、小泵同时故障,同时高压回路 A 点泄漏。

4.1　控制过程分析

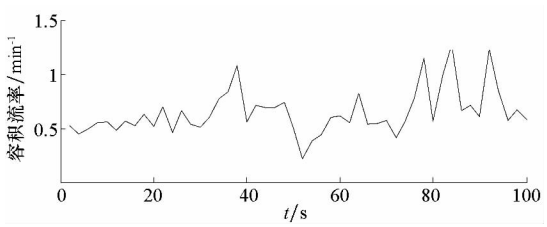
在故障状态重构的过程中,需要将后舱泵组切换到前舱泵组运行,并对高压回路中的管路泄漏情况进行故障恢复。故障涉及高压冷却回路子系统和后舱泵组子系统,其中前者的故障可以由子系统 Agent 内部解决,而后者的故障处理则需要系统级 Agent 来协调解决。

控制过程中的多 Agent 系统协作过程如下: 管路泄漏故障发生后,高压冷却回路中下层 22、32 号电磁阀 Agent 组合的能力值从 3 降为 0,同时下层 Agent 将故障信息发送到中间层 Agent,后者根据反馈的 3 个 Agent 组合所提供的能力值大小,确定 23、25 号电磁阀 Agent 组合(能力值为 2)与 24、33 号电磁阀 Agent 组合(能力值为 1)的 4 个电磁阀打开,确定 22、32 号电磁阀 Agent 组合(能力值为 0)的 2 个电磁阀关闭。下层的 6 个电磁阀 Agent 接收到指令后,按照要求执行电磁阀的开关动作,完成对管路泄漏的故障恢复。

后舱泵组大泵和小泵发生故障后,下层 Agent 将故障信息发送到中间层资源 1Agent,后者所属子系统的内部协作无法完成故障恢复,将故障信息继续发送到上层系统级 Agent。上层 Agent 接收到故障信息后重新进行任务分配,确定由中间层资源 2Agent 提供冷却水的供应,资源 2Agent 完成任务分解后,由相应的下层 Agent 执行控制动作,打开前舱泵组的大泵与小泵。

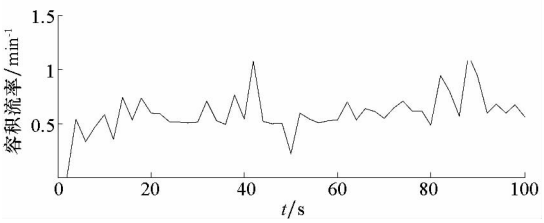
4.2　控制效果分析

在进出港工况中,需要冷却的用户是艉部推进舱的 10 个电力设备和前发电机舱的 4 个电力设备,以艉部推进舱的 8 号冷却用户与前发电机舱的 18 号冷却用户为监视对象,其故障前后的容积流率值变化如图 5 所示。由图可以看到在第 50 s 发生故障后,8 号和 18 号用户的冷却水供应突然减少,控制系统迅速做出反应,及时发出故障恢复的指令,使 CCS 的运行状态自动重构,用户的冷却流量得到恢复。整个故障恢复过程能够在没有人员干预的情况下自动完成,表明控制系统具有足够的实时性、智能性和鲁棒性。



(a) 8 号用户

(a) No. 8 user



(b) 18 号用户

(b) No. 18 user

图 5 故障恢复过程中冷却水流量变化曲线

Fig. 5 Volume flow rate curve of chilling water during fault recovery process

5 结论

本文针对舰船电力推进装置中央冷却系统的状态重构和故障恢复问题,设计了与之对应的多智能体自治控制体系,包括分层控制结构和改进合同网协作模型,优化了自治运行机制。在此基础上,建立了基于原型试验装置和多智能体控制系统的综合试验研究平台,并对控制系统的性能开展试验研究和验证。试验结果表明:所设计的多智能体自治控制体系,具有自主协商、自动任务分解、状态快速重构以及故障自动处理的特点。能够自主完成系统动态重构和故障恢复控制,使电力推进装置中央冷却系统具备自重构和自愈的能力。

参考文献(References)

[1] 董威, 刘富斌, 田志定. 电力推进舰船中央冷却系统优化设计可行性分析[J]. 船舶, 2004, 15(5): 38 – 42.
DONG Wei, LIU Fubin, TIAN Zhiding. Feasibility analysis on optimum design of central cooling system of electric propulsion plant for warship[J]. Ship & Boat, 2004, 15(5): 38 – 42. (in Chinese).

[2] 万新斌. 某船多机舱辅助设备中央冷却系统设计[J]. 船舶, 2016, 27(4): 63 – 67.
WAN Xinbin. Central cooling system design of auxiliary equipment for multi engine room ship [J]. Ship & Boat, 2016, 27(4): 63 – 67. (in Chinese)

[3] 涂环. ENGARD 型船舶中央冷却水系统建模与仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
TU Huan. Modelling and simulation of ENDARD marine central cooling system [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)

[4] 庞科旺. 船舶电力系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
PANG Kewang. Designing of shipboard power system [M]. Beijing: China Machine Press, 2010. (in Chinese)

[5] 马伟明. 舰船综合电力系统中的机电能量转换技术[J]. 电气工程学报, 2015, 10(4): 3 – 10.
MA Weiming. Electromechanical power conversion technologies in vessel integrated power system[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(4): 3 – 10. (in Chinese)

[6] Sulligoi G, Vicenzutti A, Menis R. All electric ship design: from electrical propulsion to integrated electrical and electronic power systems [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2(4): 507 – 521.

[7] 唐强. 船舶中央冷却系统仿真与智能控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
TANG Qiang. Study on simulation and intelligent control of marine central cooling system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)

[8] 田志定, 李刚, 刘春, 等. 电力推进舰船中央冷却控制装置优化设计研究[J]. 上海造船, 2011, 87(3): 52 – 54.
TIAN Zhiding, LI Gang, LIU Chun, et al. Study on optimized design of central cooling system for integrated electric propulsion vessel[J]. Shanghai Shipbuilding, 2011, 87(3): 52 – 54. (in Chinese)

[9] 郝会成, 姜维, 李一军, 等. 基于 Multi-Agent 敏捷卫星动态任务规划问题[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(1): 53 – 59.
HAO Huicheng, JIANG Wei, LI Yijun, et al. Research on agile satellite dynamic mission planning based on multi agent[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(1): 53 – 59. (in Chinese)

[10] Habib H F, Youssef T, Cintuglu M H, et al. Multi-agent based technique for fault location, isolation, and service restoration [J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 2017, 53(3): 1841 – 1851.

[11] 李猛, 梁加红, 李石磊. 一种改进的多智能体碰撞避免行为[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(3): 92 – 98.
LI Meng, LIANG Jiahong, LI Shilei. An improved collision avoidance behavior of multiple agents [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(3): 92 – 98. (in Chinese)

[12] 陈于涛, 陈林根, 曾凡明, 等. 复杂动力管路系统多 Agent 自治控制结构研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 76 – 80.
CHEN Yutao, CHEN Lingen, ZENG Fanming, et al. Multi-agent control architecture for complex marine power piping system [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2013, 41(6): 76 – 80. (in Chinese)

[13] Vokrinek J, Komenda A, Pechoucek M. Abstract architecture for task-oriented multi-agent problem solving [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2011, 41(1): 31 – 40.

[14] Garcia C, Cárdenas P, Puglisi L, et al. Design and modeling of the multi-agent robotic system: SMART [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60(2): 143 – 153.

[15] Daneshfar F, Bevrani H. Multi-agent system in control engineering: a survey [J]. Journal of Control Science and Engineering, 2009, 23(3): 5.

[16] Scherer T, Cohen J. The evolution of machinery control systems support at the naval ship systems engineering station[J]. Naval Engineers Journal, 2011, 123 (2): 85 – 109.