

核电站检修主从式水下作业机械手研究^①

王 刚^② * ** 王法承 **** 张星星 *** 杨圣喜 *** 张璐瑶 ***

(* 哈尔滨工程大学水下机器人技术重点实验室 哈尔滨 150001)

(** 哈尔滨工程大学船舶工程学院 哈尔滨 150001)

(*** 哈尔滨工程大学机电工程学院 哈尔滨 150001)

(**** 北京高泰深海技术有限公司 北京 100029)

摘 要 研制了适用于核电站反应堆和乏燃料水池水下作业的六自由度同构型主从式水下机械手。建立了从机械手水动力学模型,针对主从式机械手具有的强非线性,设计了一种基于模糊 PID 控制的主从控制器。采用 dsPACE 半物理仿真平台,搭建了主从式机械手两关节测试系统,验证了主从实时跟随性,为水下作业机械手整机控制奠定基础。实验结果表明主从手关节角度跟随性好,主从手末端位置跟随过程形成的轨迹形状基本一致,大小成比例,证明模糊 PID 控制器能较好地实现主从轨迹跟随,满足位置伺服精度要求。

关键词 核电站检修,主从式,水下作业机械手,水动力学,模糊 PID 控制

0 引 言

目前,核能在许多国家的能源领域中所占比例越来越大,例如法国的核能占总能源的比重高达 80%,日本占 30%,美国占 20%^[1,2],从而使核能安全问题上升到了一个新的高度,特别是 1986 年乌克兰切尔克贝利核泄漏事故及 2011 年日本福岛核电站核泄漏事故发生之后,引发了全世界对核安全的关注。核电站的反应堆和乏燃料水池等具有高放射性,且关键设备多处于高辐射水下环境,屏蔽水层一般不低于 3m,一旦反应堆内部元件损坏,进行维修的人员就直接处于高放射性环境中,其安全风险极高,因此设计专门的作业机器人替代人进行核电站的维护具有重要的现实意义。

目前,发达国家普遍采用主从式机器人技术来解决水下核反应堆和乏燃料池的维护工作。主从式

机器人一般应用于极限作业环境,操作者处于相对安全的环境中操作主机器人,通过摄像头采集的图像信息,获得从手四周的三维环境。主手根据现场环境做适当运动决策,通过控制系统计算分析,使从手跟随运动^[3]。该方法保护了维修操作人员的人身安全,有利于提高作业效率,具有重要的实用价值。美国是最早将主从式遥操作机器人应用到核领域的国家,把具有力反馈的主-从操作机器臂用来输送和清理核反应堆中的核燃料^[4]。在此基础上,又陆续研制了多种核电机机器人,如用于核环境中管道切割的遥操作切割系统^[5]。日本自福岛核事故发生后,更是加快了研究步伐,开发了大量用于关闭反应堆、检测、清除碎物、净化环境等工作的机器人^[6-8]。2013 年千叶工业大学开发的水陆两用核电站机器人“樱花 2 号”,提高了核电站机器人的耐久性等,它参与了福岛第一核电站的废料清理等工作,并实现了陆地和水中工作的自由切换。

① 国家自然科学基金(51409058, 51305088),黑龙江省博士后基金(LBH-Z15035),黑龙江省自然科学基金(E2016017)和民品横向课题(4500088235)资助项目。
② 1983 年生,博士,硕士生导师,讲师;研究方向:水下智能机器人技术,水下作业机具,两栖多足仿生机器人,机器人智能控制,新型机器人机构等;联系人,E-mail: wanggang@hrbeu.edu.cn
(收稿日期:2016-12-26)

随着我国核电站数量的增多,应用于核电站的机器人越来越受到研究人员的关注,如检修蒸汽发生器机器人^[9],以及可用于去污、取样、维修等的遥控移动式机器人^[10]。但针对核反应堆和乏燃料池的高辐射水下作业环境的机器人,特别是可实现水下焊接、安装、更换的主从式机械手,尚存在负载能力小,密封性能低,尺寸、重量大的缺点。

为弥补这一空白,本研究研制了一种适用于核电站反应堆和乏燃料水池水下作业的同构型六自由度主从式水下机械手,而且通过对水下作业机械手进行水动力学建模,根据作业环境状况,设计了一套主从式非线性模糊 PID 闭环控制方案,并通过搭建实验平台进行了控制系统可靠性的验证。

1 主从式水下机械手总体方案设计

1.1 主从式作业流程

主从式水下作业机械手主要由操作者、主手、从手、控制系统、视觉反馈系统等组成,如图 1 所示,其工作流程如下:

- (1)操作者根据视觉反馈信息确定作业任务,操纵主手运动;
- (2)编码器采集主手关节运动信息,经过控制系统处理后,转换为从手关节转角信号,从手根据此信号做跟随运动;
- (3)从手运动过程中,会同时将从手的转角信号、末端力信号反馈给控制系统;
- (4)根据经过处理后的反馈信息,操作者决定下一步动作。

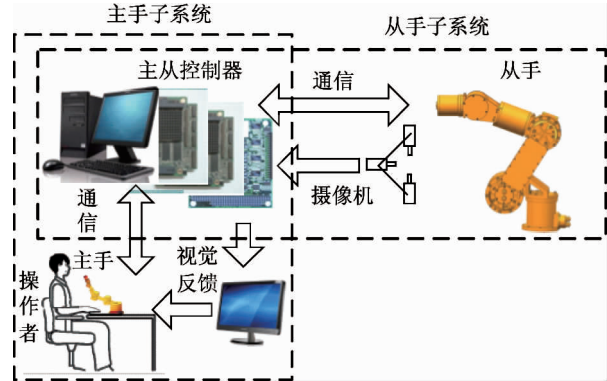


图 1 主从式水下作业机械手系统结构

1.2 主从式水下机械手结构方案

本文采用同构型的结构方案设计的主从式水下机械手,驱动方式为电驱动。

1.2.1 关节传动结构

机械手关节采用电机驱动减速器的传动形式,电机选用响应速度快、力矩输出大的直流力矩电机;减速器采用谐波减速器,具有精度高、传动比大、尺寸小等特点,两者互相配合,可使关节内部结构紧凑,从而实现结构的集成化和小型化。如图 2 所示,各关节内部布局形式一致,驱动装置按照力矩大小选取。

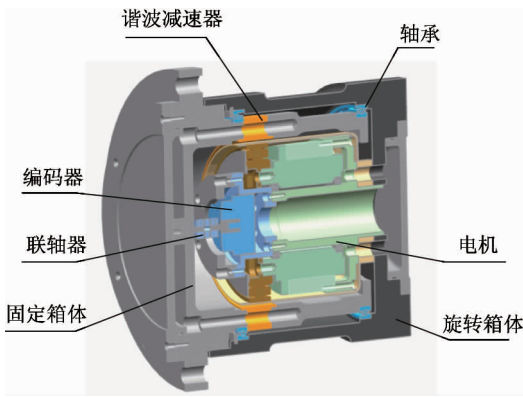


图 2 水密关节结构

结构特点是,关节连杆 A 和 B 分别与固定箱体和旋转箱体连接,谐波减速器的柔轮内嵌直流力矩电机,电机的转子与波发生器相连,谐波减速器的钢轮和柔轮分别于旋转箱体和固定箱体相连。编码器通过螺栓和电机的支架相固连,也相当于和关节连杆 A 固定不动,编码器的轴通过联轴器和旋转箱体相连,这样编码器就可以测量 A 和 B 的相对转角。若柔轮固定,电机带动谐波减速器的波发生器旋转,钢轮跟随运动,连杆 B 相对 A 运动。若钢轮固定,电机带动波发生器旋转时,柔轮跟随运动,使得 A 相对于 B 产生运动。

1.2.2 主手结构

考虑了长时间操作的舒适性,主手的长度要符合常规人手臂的长度,因此最终主手根据从手尺寸按 1:3 缩小设计。主手靠近底部的前三个关节安装驱动机构,可实现力反馈,采用电机驱动谐波减速器的传动形式,电机选择 MaxonRE35,可长时间堵转。

为防止自重过大引起主手关节连杆变形,主手后三个关节采用转动副形式以滚动轴承来实现,操作者通过操纵末端手柄控制主手运动,具体如图 3 所示,整套主手长为 400mm,大臂长为 30mm,主手运动范围主要以腕关节为轴的手部运动。

旋转关节 4,5,6 将选择与从手相同型号的编码器,可采集主手关节角信号,而在回转臂处通过设置径向圆柱销孔放置限位圆柱销,一方面起到限位,一方面保护操作者安全,避免主手工作中电机发生失常而伤害操作者。

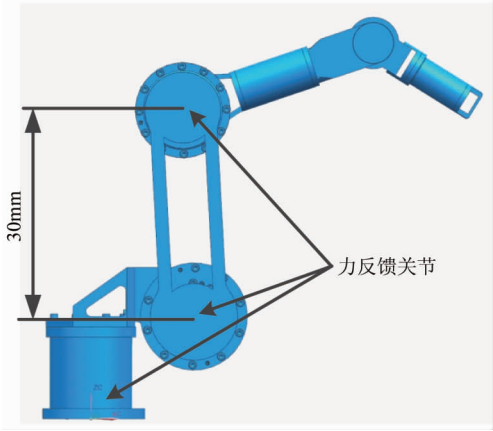


图 3 主机机械手结构图

1.2.3 从手结构

从手是针对作业环境和要求设计的六自由度关节型机器人,如图 4 所示。机械手采用电动驱动形式,模块化水密关节结构,各关节装有编码器,可实现转角检测,末端安装力传感器用于反馈作业过程中的力信息。外壳材料采用 7075 铝合金,分别由腰部旋转关节、大、小臂摆动机构、臂旋转机构、腕部摆动机构和腕部旋转机构组成,各关节转动范围分别

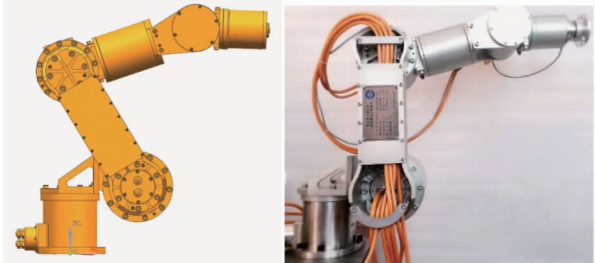


图 4 核电站检修水下从机械手机械结构及实物图

为 ± 160 、 $-60 \sim 150$ 、 $-140 \sim 140$ 、 ± 180 、 $-120 \sim 120$ 、 ± 180 ,可实现大范围作业任务。关节内部采用动、静密封结构,最大作业水深 30m,相关参数如表 1 所示。

表 1 从机械手性能指标

参数名称	数值
末端最大负载(kg)	20
最大伸展距离(m)	1.2
自重(kg)	≤ 60
水下适应能力(MPa)	0.22
末端重复定位精度(mm)	≤ 1
工作环境水质	去离子水
工作环境水温($^{\circ}\text{C}$)	15 ~ 80

1.2.4 主从手尺度映射

根据机械手各关节参数及转动范围,可以获得从手工作空间,如图 5 所示。为更直观地分析工作空间内部尺度,只绘制出从手单侧的工作空间。

由于主从机械手同构,所以工作空间形状一致,大小成比例。对比各类主从映射方法,本文采用关节映射法^[11]完成主从机械手位置和姿态的映射,无须计算正逆运动学,以减小控制系统计算量,加快运算速度。

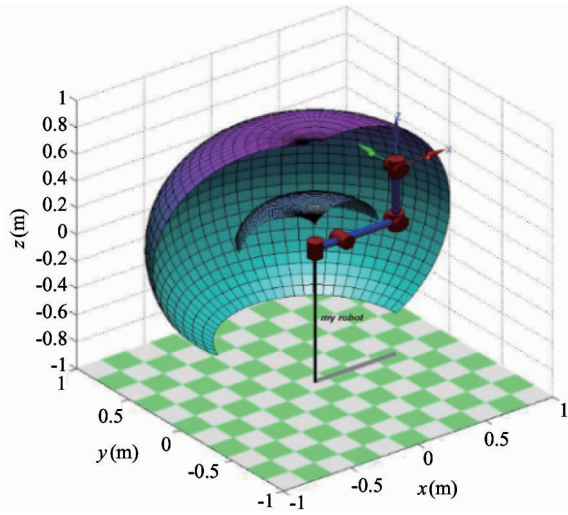


图 5 主从机械手工作空间

考虑到位置和姿态映射的特殊性,本文采用分离式的映射系数。主从手关节映射模型如图 6 所

示。其中 k_1 为位置映射系数、 k_2 为姿态映射系数, θ_i ($i=1,2,\dots,6$) 为关节角。映射系数的取值范围要考虑控制系统的稳定性、动力学性能、末端精度等,上述的从手关节运动速度低,动力学特性不是很显著,因此考虑映射系数时,注重主从工作空间以及对末端的误差精度影响。为了能够使操作者的作业更加便捷,主从对应关系直观,姿态映射设置为1:1,而位置的空间映射根据实际情况而定。在初始阶段,为了调整从手末端位置和姿态,不需要太高的精度,所以运动速度快,主从尺度映射系数 k 取1:1;当从手执行具体作业任务时,要求运动精度高、速度慢,选择较大映射系数, k 取2:1。

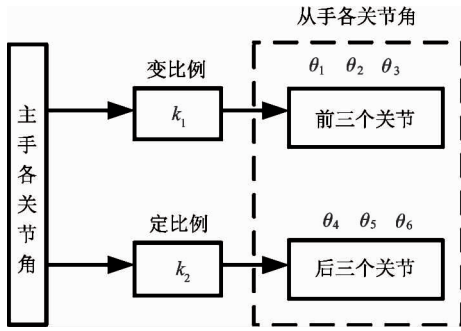


图6 主从手尺度映射模型

2 水下从手动力学建模

从手在水下运动时,各连杆不可避免会受到水阻力、附加质量力及浮力等影响,因此需要考虑水动力因素对从手运动的影响。

假设将从手的各关节臂简化为圆柱体结构,根据切片理论及水动力学可知,其某一切片单元所受到的水阻力和附加质量分别为^[10]:

$$df_D = \frac{1}{2} \rho C_d v^n(x) \|v^n(x)\| D dx \quad (1)$$

$$df_A = \frac{\pi}{4} \rho C_m \frac{dv^n(x)}{dt} D^2 dx \quad (2)$$

式中 ρ 为水密度, C_d 和 C_m 分别为水阻力系数和附加质量力系数, $v^n(x)$ 为机械手连杆表面的法向速度向量, D 为机械手连杆直径, dx 为切片单元厚度。

由于从手的外形规则,浮力的等效作用点与重心基本重合,只是方向相反,大小为

$$f_{Fi} = V_i \rho g \quad (3)$$

式中, V_i 为第 i 个连杆的体积。因此,关节的合力矩为

$$M_f = \int \mathbf{r} \times \mathbf{F}_f dx \quad (4)$$

式中 $\mathbf{r}$ 为关节的作用力在关节坐标系下的矢量, $\mathbf{F}_f$ 为附加质量力和水阻力之和在关节坐标系下的矢量。

综合水动力学对关节力矩的影响,水下机械手动力学模型可以表示为

$$\mathbf{M}(q)\ddot{q} + \mathbf{C}(q,\dot{q})\dot{q} + \mathbf{D}(q,\dot{q})\dot{q} + \mathbf{G}(q) = \boldsymbol{\tau} \quad (5)$$

式中 $\mathbf{M}(q)$ 、 $\mathbf{C}(q,\dot{q})$ 、 $\mathbf{G}(q)$ 分别为惯性力项,离心力和哥氏力项以及重力项; $\mathbf{D}(q,\dot{q})$ 表示水作用产生的力矩, $\mathbf{D}(q,\dot{q}) = \boldsymbol{\tau}_F + \boldsymbol{\tau}_D + \boldsymbol{\tau}_A$, 其中 $\boldsymbol{\tau}_F$ 为流体加速度产生的力矩, $\boldsymbol{\tau}_D$ 为水阻力产生的力矩, $\boldsymbol{\tau}_A$ 为附加质量力产生的力矩; $\boldsymbol{\tau}$ 为关节驱动力矩。

3 主从手控制器设计

针对从手工作环境多变、易受干扰等特点,同时为给操作者以直观力感,本文采用了如图7所示的力反射型控制,其中 f_0 代表操作者施加给主手的操作力, f_m 为驱动主手的反馈力, f_e 为从手的负载力, f_s 为驱动从手的力, θ'_M 代表主手转角, θ_L 代表从手动作转角。对从手理论和实际转角求偏差,通过控制器计算,实现从手精确位置控制;从手末端力信号

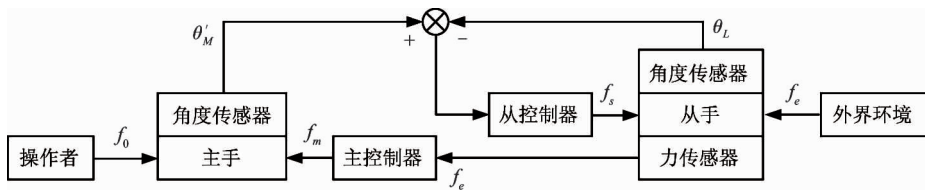


图7 力反射型控制原理图

直接反馈给控制器,计算后传输给主手,给操作者真实的感受。

3.1 控制器算法选择

本文设计的主从式水下作业机械手系统的位置控制算法应根据主从手的运动特性来设计:

(1)式(5)动力学模型复杂,通过数学运算无法精确推导,非线性、强耦合、参数时变,如摩擦力、水的干扰力不易测得;

(2)与以往的自主运动系统不同,操作者时刻参与此系统;

(3)即使将操作者模型加入,而不同的操作者物理特性不同,会形成不同的输入特性。

这些特性表明主从式机械手系统是复杂且非线性的,若采用常规的线性方法控制,效果不理想,而且会影响末端精度。因此为满足任务要求,本文将传统 PID 和模糊控制结合来实现主从机械手控制。其中,单关节位置控制过程如图 8 所示,采用电流及位置双闭环调节模式,电流环由驱动器内部采用 PI 控制器实现,而位置环由运动控制器实现,具有过流、过载和过压保护功能。

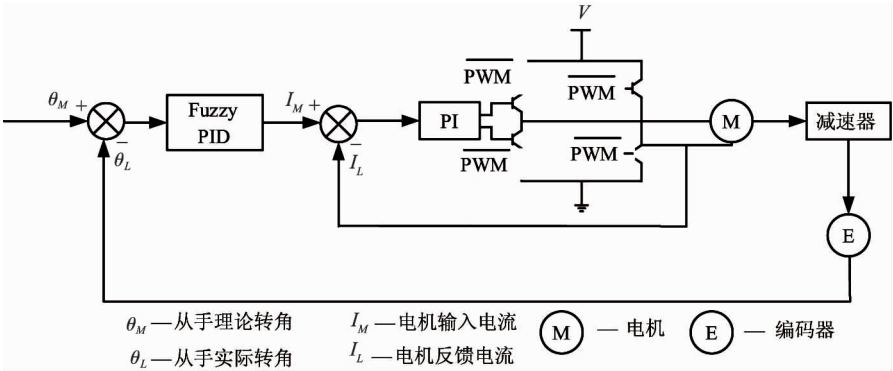


图 8 单关节位置控制框图

3.2 控制器设计

目前常用计算机通过采样前后时刻的差值进行数字 PID 控制,其形式为

$$U(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k - 1)] \tag{6}$$

式中 K_p 、 K_i 和 K_d 分别为比例系数、积分系数和微分系数。

在 PID 控制中,通过调节比例(P)、积分(I)、微分(D)环节来加强系统的鲁棒性,而在此基础上,

Fuzzy 控制通过加入 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 对系数进行微调,可进一步适应外界环境的多变性。模糊规则如表 2 所示,其中 NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB 分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。所有模糊变量采用三角形隶属函数,重叠系数为 0.5,如图 9 所示。当从手与外界产生作用力时,安装在末端的力传感器检测信号,经过 AD 转换,传输给主控制器,驱动力矩电机产生与从手相对应的力觉后,反馈给操作者产生真实临场感。

表 2 $\Delta k_p/\Delta k_i/\Delta k_d$ 模糊规则表

$\Delta k_p / \Delta k_i / \Delta k_d$		E							
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
EC	NB	PB NB PS	PB NB NS	PM NM NB	PM NM NB	PS NS NB	ZO ZO NM	ZO ZO PS	
	NM	PB NB PS	PB NB NS	PM NM NB	PS NS NM	PS NS NM	ZO ZO NS	NS ZO ZO	
	NS	PM NB ZO	PM NM NS	PM NS NM	PS NS NM	ZO ZO NS	NS PS NS	NS PS ZO	
	ZO	PM NM ZO	PM NM NS	PS NS NS	ZO ZO NS	NS PS NS	NM PM NS	NM PS ZO	
	PS	PS NM ZO	PS NS ZO	ZO ZOZO	NS PS ZO	NS PS ZO	NM PM ZO	NM PB ZO	
	PM	PS ZO PB	ZO ZO NS	NS PS PS	NM PS PS	NM PM PS	NM PB PS	NB PB PB	

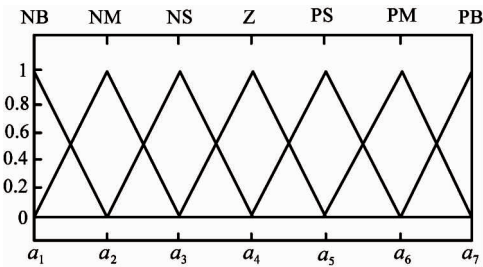


图9 $e, ec, \Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 隶属规则

4 主从跟随实验分析

4.1 实验平台

主从手跟随实验平台由 dsPACE 半物理仿真系统、电机驱动器、两关节主手和从手等组成,如图 10 所示。本文通过主从机械手 2,3 两关节的跟随实验,来验证结构设计和控制器算法的正确性。

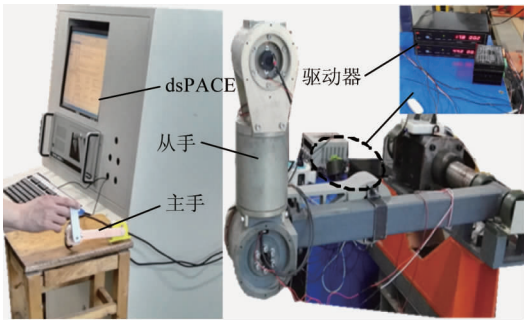


图10 主从手跟随实验平台

4.2 主从跟随特性实验

实验过程:将主、从手编码器、电机、电机驱动器与 dsPACE 半物理仿真系统连接,启动 dsPACE 仿真平台,在 MATLAB/Simulink 上运行已搭建好的控制系统模型,通过操纵主手并在 Control Desks 上在线调节参数、观测跟随情况,如图 11 所示。

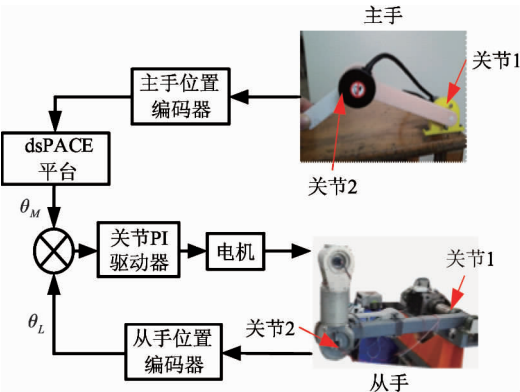


图11 主从跟随原理图

图 12 为主从手 1,2 关节跟随曲线。通过运动学求解得到主从手末端位置跟随曲线,如图 13 所示。由主从手跟随特性曲线可知,主从手关节角度跟随性较好,主从手末端位置跟随过程形成的轨迹形状基本一致,大小成比例。表明本文设计的模糊 PID 控制方法能较好地实现主从轨迹跟随,满足位置伺服精度要求。

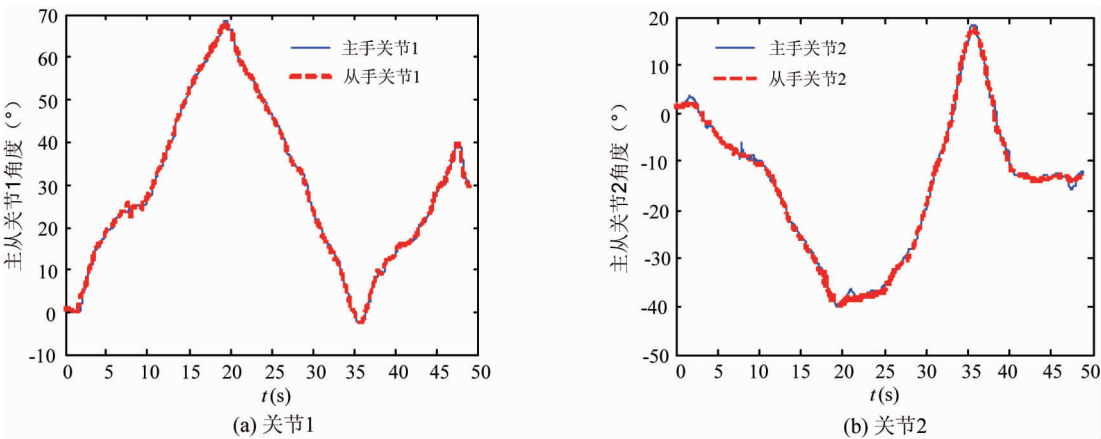


图12 主从手 1,2 关节跟随特性曲线

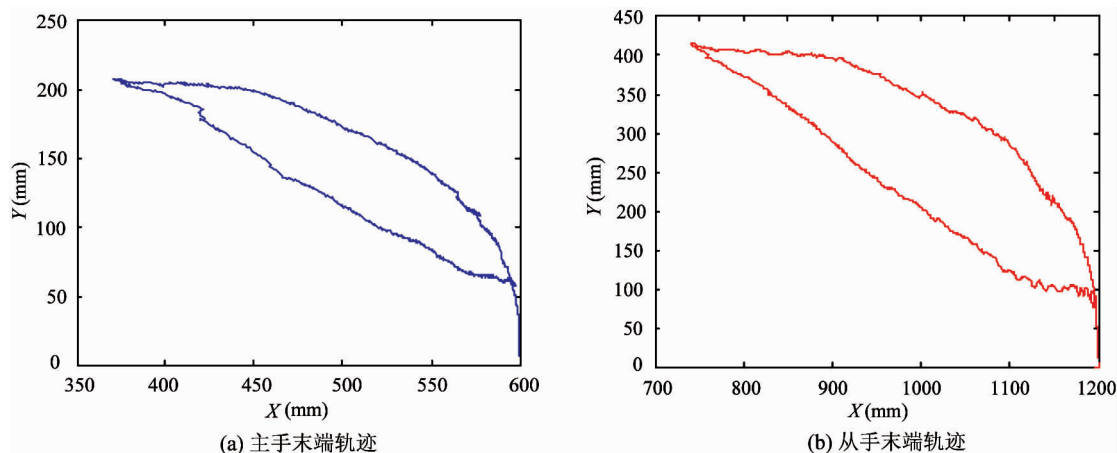


图 13 主从手末端轨迹

5 结 论

针对核电站反应堆和乏燃料水池放射性高和水下作业困难等问题,设计了一种主从式水下六自由度机械手,并利用三维建模搭建了主从式机械手的本体模型。通过分析主从尺度映射、水动力学以及从手的作业环境,设计了一种基于模糊 PID 控制的主从控制系统。最后通过搭建主从手半物理仿真实验平台,验证了主从跟随特性,实验结果进一步证明了本文设计的 Fuzzy-PID 控制方法能较好实现实时主从轨迹跟随,满足位置伺服精度要求。

本文设计的主从式水下机械手解决了普通机械手无法在核电站复杂环境下作业的问题,控制系统实现了多变环境自适应问题,为核电站机器人的研究提供了新思路。为更方便直接地实现最优控制,今后的研究会更关注将机械系统与控制系统紧密结合,制定最佳模糊规则和自适应参数。

参考文献

- [1] Dittmar M. Nuclear energy: status and future limitations. *Energy*, 2012, 37(1): 35-40
- [2] Jasper J M. Nuclear politics: Energy and the State in the United States, Sweden, and France. Princeton: Princeton University Press, 2014
- [3] Vertut, Jean, ed. Teleoperation and Robotics: Applications and Technology. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013
- [4] Mazumdar A, Lozano M, Fittery A, et al. A compact, maneuverable, underwater robot for direct inspection of nuclear power piping systems. In: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Saint Paul, USA, 2012. 2818-2823
- [5] Nagatani K, Kiribayashi S, Okada Y, et al. Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots. *Journal of Field Robotics*, 2013, 30(1): 44-63
- [6] Furuta T, Yoshida T, Nishimura T, et al. Development of the exploring robot toward future indoor surveillance missions in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Nippon Robotto Gakkai-Shi*, 2014, 32(2): 92-97
- [7] Kawatsuma S, Fukushima M, Okada T. Emergency response by robots to Fukushima-daiichi accident: summary and lessons learned. *Industrial Robot*, 2012, 39(5): 428-435
- [8] 徐文福,毛志刚. 核电站机器人研究现状与发展趋势. *机器人*, 2011, 33(6): 758-767
- [9] Liu Q, Wang G, Dong Y, et al. A novel nuclear station inspection robot. In: Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology (ICIST), Shenzhen, China, 2014. 678-681
- [10] Pan E, Guan D, Xu W, et al. Control system of a small intelligent inspection robot for nuclear power plant use. In: Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, Lijiang, China, 2015. 837-842
- [11] Jia H, Jiang Y X, Sun P, et al. Design of a novel force feedback master manipulator. In: Proceedings of the

IEEE International Conference on International Federation
of Automatic Control, Tianjin, China, 2015. 1444-1449

Study on a master-slave underwater manipulator for nuclear power plant servicing

Wang Gang^{* **}, Wang Facheng^{****}, Zhang Xingxing^{***}, Yang Shengxi^{***}, Zhang Luyao^{***}

(^{*} National Key Laboratory of Science and Technology on Autonomous Underwater Vehicle,
Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(^{**} College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(^{***} College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(^{****} COTEC Offshore Engineering Solutions, Beijing 100029)

Abstract

A 6-DOFs homogeneous master-slave underwater manipulator was designed for servicing of nuclear power plant reactors and spent fuel storage pools. A separated scale mapping model was built for the master-slave manipulator. A hydrodynamic model for the underwater manipulator was established based on the slice theory. A master-slave controller based on fuzzy-PID was designed for the manipulator according to its strong non-linearity. Finally, a two-joint test system for the master-slave manipulator was set up by using the dsPACE semi-physical simulation platform to verify the real-time tracking performance of the manipulator so as to lay the foundation for the whole machine control of multi-drive underwater manipulators. The experimental results showed that the master-slave manipulator was well in tracking capability, and the shape of the terminal trajectory of the master manipulator was nearly the same as that of the slave manipulator, and they were proportional in size, showing that the preferable position tracking and the high accuracy of position servo can be achieved when using the fuzzy-PID controller.

Key words: nuclear power plant servicing, master-slave, underwater manipulator, hydrodynamics, fuzzy-PID control