

轮桨腿一体两栖机器人爬行步态规划研究

唐元贵^{1,2}, 张艾群¹, 俞建成¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 爬行运动为轮桨腿一体两栖机器人基本运动模式之一. 以机器人爬行运动为研究对象, 分析了两栖机器人爬行运动机理, 并建立了其典型驱动单元的运动学模型; 根据机器人不同爬行运动状态, 提出了基于轮桨和足板不同步态形式的运动规划策略; 采用虚拟样机技术, 对不同爬行状态下的步态规划效果进行了仿真试验分析和验证. 试验结果表明, 在规划的步态下, 轮桨腿一体两栖机器人具有良好的爬行稳定性、转向机动性和越障能力.

关键词: 两栖机器人; 轮桨腿一体化; 爬行运动; 步态规划

中图分类号: TP24

文献标识码: B

Research on Gait Planning of Crawl for Wheel-Propeller-Legged Amphibious Robot

TANG Yuanguai^{1,2}, ZHANG Aiqun¹, YU Jiancheng¹

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

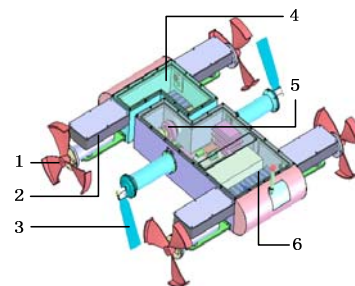
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The crawling movement is one of basic motion modes of the wheel-propeller-legged amphibious robot. The crawling movement is presented as the object in this paper. The motion principle of crawl is analyzed, and the kinematic model of typical driving mechanism is set up. According to various modes of crawl, different motion strategies expressed by kinds of gait are created based on the coordinated relationship between wheel-propellers and legs. In order to test the effects of gait planning in different crawling modes, the simulation researches are carried out by using virtual prototype of the robot. The simulation results prove that the wheel-propeller-legged amphibious robot be endowed with good performance in stability of crawl, flexibility of turning and ability of obstacle negotiation following the planned gaits.

Keywords: amphibious robot; wheel-propeller-leg integration; crawling movement; gait planning

1 引言 (Introduction)

海洋与陆地衔接的极浅水、碎浪带和滩涂地成为近年来海洋科学研究、环境监测和调查等应用的敏感区域^[1], 常规的水下机器人和陆地移动机器人无法满足在该区域的灵活运动和作业需求. 两栖机器人对多变的滩涂地形和复杂的水下环境具有一定的适应能力, 是一种能够在陆地和水中实现特定运动或作业的特种移动机器人. 轮桨腿复合式驱动机构是一种实现两栖机器人多运动模式的有效驱动方式, 能够满足两栖非结构环境下, 机器人在速度、越障、机动性、稳定性等方面的综合运动性能要求^[2]; 利用多目标优化设计理论和方法对机器人爬行和浮游运动性能进行综合优化, 可得到轮桨腿一体两栖机器人驱动机构和载体的结构形式及其几何参数, 其三维模型如图 1 所示.



1. 轮桨 2. 回转关节 3. 足板
4. 前体 5. 载体关节 6. 后体

图 1 轮桨腿一体两栖机器人载体模型

Fig.1 Model of wheel-propeller-legged amphibious robot

爬行和浮游是两栖机器人 2 种典型的运动模式. 在陆地上, 两栖机器人的运动可视为六足爬行, 即在图 2(a)所示的状态下通过轮桨和足板的协调转动实现. 在水中, 两栖机器人通过浮力调节可实现爬行或浮游运动: 爬行运动与陆地爬行相同, 浮游

运动采用轮桨和足板推进的方式，即在图 2(b)所示的状态下，轮桨的旋转和足板的周期性摆动可产生机器人前进所需的推力。可见，在两栖机器人结构形式和几何参数确定后，机器人的爬行和浮游为相对独立的运动形式，且两种运动模式具有不同的运动机理和运动实现形式。

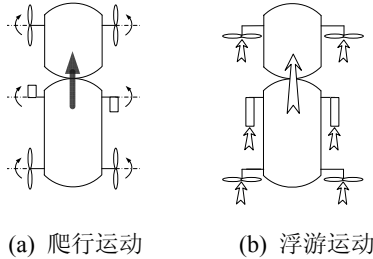


图 2 轮桨腿一体两栖机器人运动模式

Fig.2 Motion modes of wheel-propeller-legged amphibious robot

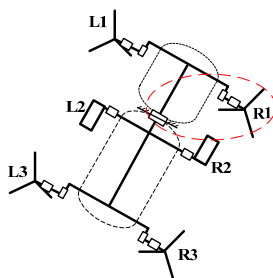
本文以轮桨腿一体两栖机器人为研究对象，研究其爬行状态下轮桨与足板的协调运动，即步态规划问题。分析了两栖机器人爬行运动机理，建立了机器人典型驱动单元的运动学模型；分别对两栖机器人直线爬行、转向爬行和越障爬行运动进行了步态规划研究，提出适于不同爬行状态的运动步态；通过基于虚拟样机技术的运动学仿真试验，对不同爬行状态下的步态规划效果进行了验证。试验结果表明：在规划的步态下，轮桨腿一体两栖机器人具有良好的爬行稳定性、机动性和越障能力，体现了其对非结构环境的适应能力。

2 爬行运动机理 (Motion principle of crawl)

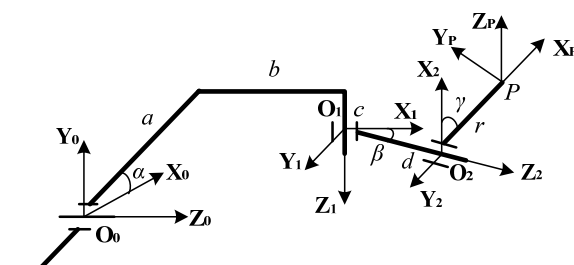
轮桨腿一体两栖机器人在陆地上的运动可视为六足爬行，此时，两栖机器人的轮桨主要发挥轮式腿的功能，足板则可认为是具有单自由度的摆动腿。本文中的两栖机器人各轮桨和足板分别采用独立的驱动装置驱动，通过对轮桨和足板转动周期、相位和角速度的控制，可以使各驱动执行机构在支撑相和悬空相之间有规律地切换，形成基于某一或某些运动性能最优的爬行步态，实现机器人的爬行运动。所谓的步态是指在运动过程中，步行者（人、动物或机器人）的运动执行机构在时间和空间上的协调关系。轮桨腿一体两栖机器人的爬行运动就是通过某种步态规则下的轮桨和足板的周期性转动实现的。

运动学分析是两栖机器人爬行运动规划的基础。根据两栖机器人驱动装置对称性的构形特点，机器人爬行的运动学分析可选择典型的驱动单元为研究对象。在载体关节的作用下，机器人前轮桨模块的运动具有一定的代表性，因此，本文以两栖机器人前右轮桨单元为运动学分析对象，如图 3(a)中椭圆形虚线标出处，它相当于一个具有三个自由度的机械臂，每个关节都是一个转动副。以载体关节处为基础坐标系，利用 D-H 方法建立如图 3(b)所示的坐标系，经坐标变化运算得到轮桨末端坐标变换矩阵的表达式，如式(1)所示。

$${}^0T_p = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_p = \begin{bmatrix} -SaC\gamma - CaC\beta S\gamma & -CaS\beta & -SaS\gamma + CaC\beta C\gamma & P_x \\ CaC\gamma - SaC\beta S\gamma & -SaS\beta & SaC\beta C\gamma + CaS\gamma & P_y \\ -S\beta S\gamma & C\beta & S\beta C\gamma & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$



(a) 两栖机器人运动简图



(b) 右前轮桨模块坐标变换

图 3 轮桨腿一体两栖机器人运动机构模型图

Fig.3 Structure modes of wheel-propeller-legged amphibious robot

上式中， $\mathbf{P} = [P_x, P_y, P_z]^T$ 为两栖机器人前右轮桨末端点 P 在基础坐标系下的三维坐标，其表达式

如式(2)所示。其中，各个关节的转角分别为 α 、 β 和 γ ，各连杆的长度分别为 a 、 b 、 c 、 d 和 r 。

$$\begin{cases} P_x = aC\alpha + cS\alpha - dC\alpha S\beta - rC\alpha C\beta S\gamma - rS\alpha C\gamma \\ P_y = aS\alpha - cC\alpha - dS\alpha S\beta + rC\alpha C\gamma - rS\alpha C\beta S\gamma \\ P_z = b + dC\beta - rS\beta S\gamma \end{cases} \quad (2)$$

两栖机器人前右轮桨末端工作空间是指机器人在关节限位下末端参考点能达到的空间点的集合。机器人工作空间的大小代表了机器人的活动范围，是衡量机器人工作能力的一项重要运动学指标。基于两栖机器人轮桨腿多目标优化设计方法^[2]，并结合机器人主体的尺寸信息，在MATLAB下对机器人前右轮桨工作空间进行分析，得到的仿真结果如图4所示。

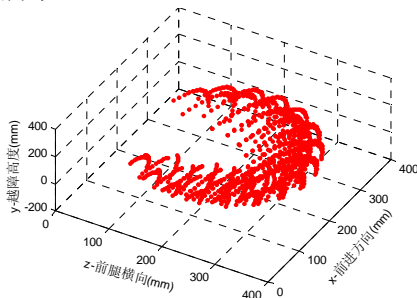


图4 两栖机器人前右轮桨工作空间

Fig.4 Operating space of the right front wheel-propeller

3 爬行步态规划 (Gait planning of crawling movement)

基于轮桨和足板驱动的两栖机器人爬行运动，需要综合考虑机器人运动的合理性、完备性、稳定性以及对环境的适应性等综合评价指标。机器人在不同的爬行状态下采用最优的步态规划策略，实现机器人各驱动机构的协调运动。

3.1 直线爬行步态

直线爬行运动是两栖机器人最简单、最常用的运动方式，根据自然界六足爬行动物的运动特点，轮桨腿一体两栖机器人在直线爬行时采用具有节律运动特点的规则步态。为实现机器人爬行运动时的稳定性，本文参考六足爬行机器人的三角步态，提出基于节律性神经网络步态的“3+3”规则步态。

节律性神经网络步态的具体规则如下：

规则 1：每执行单元末端（轮桨的每个离散腿或足板）的动作以前摆、支撑直到返回原先位置（相对于躯干）为一个动作循环，此动作循环一旦开始，就不会被打断，直至该循环完成；

规则 2：图 3(a)所示的结构图中，L1 中某一离散腿按照前摆—支撑—前摆的规律循环运动，且作为整个网络的节律运动的初始状态；

规则 3：每个执行单元的末端作为一个节点接

受它上一个节点的状态信息，并以落后于上一个节点一拍的相位重复上一节点的运动；

规则 4：图 3(a)所示的结构图中，R1 比 L1 的相位落后 $(N-2)$ 拍， N 是机器人平均落地足的个数，即步态数，取值范围为 $[3,6)$ ，这条规则决定了两侧轮桨腿之间的相位关系。

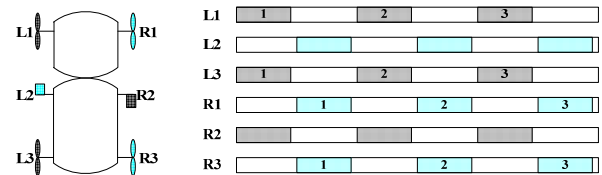


图5 两栖机器人“3+3”步态规划示意图

Fig.5 “3+3” gait planning of the amphibious robot

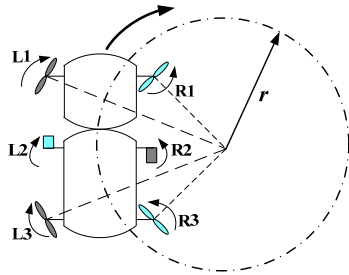
“3+3”规则步态，即 L1-R2-L3 和 R1-L2-R3 各为一组按照规则构成的节律性步态，如图 5 所示。其在一个完整的运动周期内的步态图以状如斑马线的形式表示，其中，轮桨 L1、L3、R1 和 R3 各均布 3 个离散腿，分别以 1、2 和 3 标识，阴影部分表示各轮桨离散足或足板的支撑相，其中有荷因数为 0.4。通过对机器人直线爬行几何模型的分析，可以得到机器人在规划的“3+3”步态下，以机器人质心在垂直方向的位移变化量来表示的机器人稳定性表达式，如式(3)所示。

$$\begin{aligned} \Delta H = R[1 - \cos(\pi\beta_i/n)]/2\cos(\pi\beta_i/n) + \\ R - R\cos[(1-2\beta_i)\pi/2n] \end{aligned} \quad (3)$$

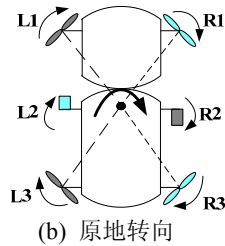
3.2 转向爬行步态

两栖机器人前后轮桨单元分别由独立的回转关节驱动，因此，两栖机器人的转向爬行运动可通过轮桨回转关节的辅助实现。同直线爬行运动类似，两栖机器人的转向爬行仍为平面运动。为了保证机器人运动的稳定性，运动过程中采用直线爬行时的“3+3”规则步态，可以实现机器人定点转向的运动要求。

图 6 为两栖机器人分别实现以 r 为回转半径和原地转向运动（以右转为例）的运动示意图。图(a)所示的转向运动，各执行单元的末端旋转方向一致，仍按照直线爬行时“3+3”规则步态实现转向爬行（可忽略内外执行机构侧转速相同而引起的位移差）；图(b)所示的原地转向运动中，同侧的执行单元具有相同的旋转方向，此时“3+3”步态的规则不变，即仍按照图 5 的节律性规则步态运动，需要调整的仅是内侧执行单元的旋转方向。



(a) 以半径 r 为回转半径



(b) 原地转向

图 6 两栖机器人转向爬行运动示意图
Fig.6 Turning movement of the amphibious robot

3.3 越障爬行步态

越障性能体现两栖机器人对非结构环境的适应能力，越障高度和越障时的稳定性是衡量轮桨腿一体两栖机器人越障性能的 2 个主要指标。根据载体关节是否参与越障，将机器人越障爬行步态划分为基本越障步态和高级越障步态。

3.3.1 基本越障步态

轮桨腿一体两栖机器人驱动机构的结构形式能够满足机器人对较低障碍物（本文将障碍物简化为具有一定高度的垂直障碍）的跨越要求。基本越障步态是指机器人载体关节不参与越障，仅通过轮桨和足板的协调运动实现对相对较低障碍物的跨越，如图 7 所示。此时两栖机器人载体可视为刚体，其最大越障高度可通过几何分析得到：

$$H_{max} = h + R \sin(\beta/2) \quad (4)$$

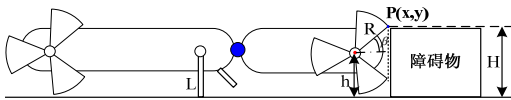


图 7 两栖机器人基本越障状态示意图

Fig.7 Basic obstacle negotiation of the amphibious robot

根据机器人的越障过程，其基本越障步态规划如下：

(1) **前轮桨遇到障碍物至足板遇到障碍物：**随着机器人重心的升高，足板无法支撑地面，此时机器人主要采用基于前后轮桨的四足爬行，定义此时的步态为“2+2”越障步态，即L1-R3和R1-L3的两组

相位差为1拍的爬行步态。其在1个完整的运动周期内（假设该时间段的时长大于1个运动周期）的步态如图8所示。

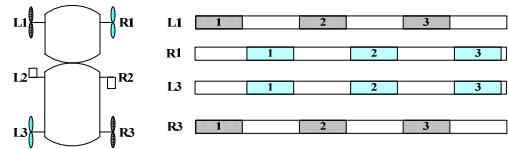


图 8 “2+2”基本越障步态示意图

Fig.8 “2+2” basic obstacle negotiation gait

(2) **机器人重心升高至障碍物高度，即足板抵达障碍物位置：**足板发挥支撑—爬行的作用，机器人恢复直线爬行时的“3+3”规则步态，完成越障动作。

3.3.2 高级越障步态

当遇到垂直高度较大的障碍物时，两栖机器人需要在载体关节的辅助下，完成对障碍物的跨越，如图 9，称此时的爬行步态为高级越障步态。在此状态下，可将机器人的两前轮腿视为具有“攀登”功能的工作臂，机器人整体的稳定性主要通过后四足实现。通过几何分析可知，此时机器人最大越障高度为

$$H_{Max} = h + a \sin \alpha + R \sin(\beta/2) \quad (5)$$

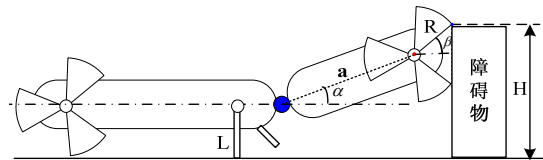


图 9 两栖机器人高级越障状态示意图

Fig.9 Advanced obstacle negotiation of the amphibious robot

根据机器人的越障过程，高级越障步态规划如下：

(1) **前轮桨接触障碍物至攀登到障碍物之上：**机器人在载体关节的驱动下“抬起”两个前轮桨攀登障碍物，中间一对足板与后两轮桨支撑机器人的主体，形成“4+2”越障步态，即两前轮腿采用相同相位的旋转步态；后四足以“2+2”步态，即 L2-R3 和 R2-L3 相位差为 1 拍的爬行步态运动。其中前后轮腿的运动周期一致，但较 L3 相位相差 1/2 拍。其在一个完整的运动周期内（假设该时间段的时长大于一个运动周期）的步态图如图 10 所示。

(2) **前轮桨攀登至障碍物上后：**机器人载体关节反方向旋转使两个前轮桨发挥支撑作用，机器人整体呈“足弓”形状，在向前的牵引力作用下，机

机器人以“2+2”步态前行至足板,跨越到障碍物上,机器人恢复直线爬行时的“3+3”规则步态,完成越障行为。

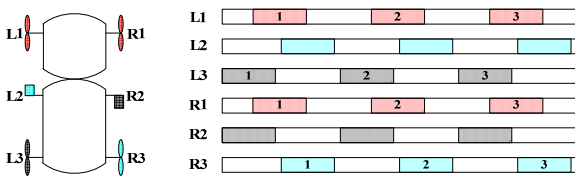
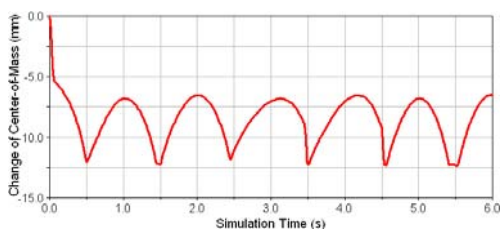


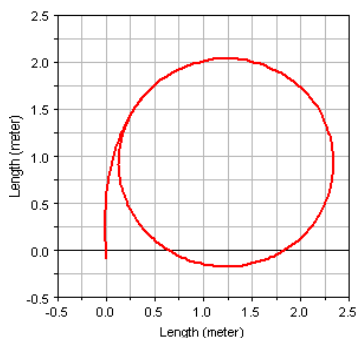
图10 “4+2”高级越障步态示意图

Fig.10 “4+2” advanced obstacle negotiation gait

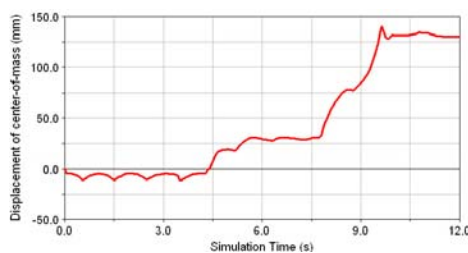
4 虚拟样机试验 (Experiment of virtual prototype)



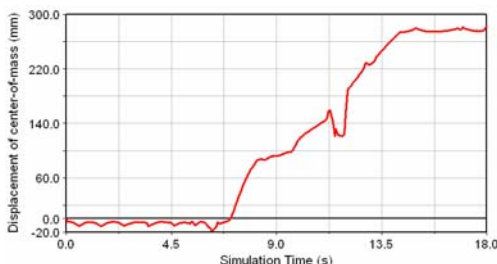
(a) “3+3”直线爬行步态的稳定性



(b) 定点转向爬行



(c) 基本越障步态下的相对越障高度



(d) 高级越障步态下的相对越障高度

图11 基于步态规划的虚拟样机爬行性能

Fig.11 Crawl performance of virtual prototype under gait planning

在ADAMS软件环境下建立轮桨腿一体两栖机器人的虚拟样机模型及其仿真环境,对机器人在步态规划下的爬行性能进行仿真试验研究。

直线爬行状态下,机器人采用基于节律性神经网络的“3+3”规则步态,旨在保证机器人爬行运动的稳定性.在试验中,机器人的稳定性以虚拟样机质心在垂直方向的变化量来表示,其在2个运动周期内的仿真结果见图11(a).可见,基于“3+3”步态规划的机器人直线爬行具有良好的稳定性;图11(b)为两栖机器人以回转半径为1.1 m进行定点转向爬行运动的仿真结果.结果表明在规则步态和回转关节的辅助下,机器人可以灵活完好的实现定点转向运动;图11(c)~(d)分别为基本越障步态和高级越障步态下,两栖机器人的相对越障高度及其越障过程中稳定性的仿真试验结果:在保证机器人稳定性良好的前提下,机器人能够跨越相对高度分别为140 mm和280 mm的垂直障碍物。

5 结论 (Conclusion)

爬行运动是轮桨腿一体两栖机器人能够实现的基本运动模式之一.本文以轮桨腿一体两栖机器人为研究对象,对基于轮桨和足板的陆地六足爬行运动规划问题进行了研究.分析了两栖机器人爬行运动的机理,建立了两栖机器人典型驱动单元的运动学模型;分别对两栖机器人基本爬行运动和越障爬行运动进行了步态规划研究,提出适于不同爬行状态的运动步态;采用基于虚拟样机技术的运动学仿真试验方法,对不同爬行状态下的步态规划效果进行了验证.试验结果表明,在规划的步态下,轮桨腿一体两栖机器人具有良好的爬行稳定性和越障能力,体现出了其对非结构环境的适应能力。

参考文献 (References)

- [1] Boxerbaum S. Design of an autonomous amphibious robot for surf zone operation: Part I Mechanical design for multi-mode mobility[C]//IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 24-28.
- [2] 唐元贵, 张艾群, 俞建成, 等. 两栖机器人轮桨腿驱动机构多目标优化设计[J]. 机器人, 2009, 31(3): 276-280.
Tang Yuanguai, Zhang Aiqun, Yu Jiancheng, et al. Multi-objective optimization design for the wheel-propeller-leg driving mechanism of an amphibious robot[J]. Robot, 2009, 31(3): 276-280.
- [3] Georgiades C. AQUA: An aquatic walking robot[C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and

- Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 3525-3531.
- [4] Hashimoto K. Realization by biped leg-wheeled robot of biped walking and wheel-driven locomotion[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 2970-2975.
- [5] Michaud F. A leg-track-wheel robot[C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 2553-2558.
- [6] Ali S, Moosavian A, Mozdbaran A. Dynamics and motion planning of a wheel-legged mobile robot[C]//IEEE International Conference on Control Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 581-586.
- [7] 于涌川, 原魁, 邹伟. 全驱动轮式机器人越障过程模型及影响因素分析[J]. 机器人, 2008, 30(1): 1-6.
Yu Yongchuan, Yuan Kui, Zou Wei. Dynamic model of allwheel-drive mobile robot climbing over obstacles and analysis on its influential factors[J]. Robot, 2008, 30(1): 1-6.
- [8] Lacagnina M, Muscato G, Sinatra R. Kinematics, dynamics and control of a hybrid robot wheeleg[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2003, 45(3/4): 161-180.

作者简介:

唐元贵 (1980—), 男, 博士生. 研究领域为水下机器人优化设计与运动规划.

张艾群 (1959—), 男, 研究员, 博士生导师. 研究领域为水下机器人技术.

(上接第 9 页)

- [4] 冯培梯. 系统辨识[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2004.
Feng Peiti. System identification[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2004.
- [5] 刘轩黄. 最小二乘递推算算法和 Kalman 滤波算法[J]. 华东交通大学学报, 1998, 15(2): 62-68.
Liu Xuanhuang. Recursive least squares algorithm and Kalman filter algorithm[J]. Journal of East China Jiaotong University, 1998, 15(2): 62-68.
- [6] 赵正业. 潜艇火控原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
Zhao Zhengye. Principles of submarine fire control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003
- [7] Arulampalam S. A comparison of recursive style angle-only target motion analysis algorithms[R]. DSTO-TR-0917, 2000.

作者简介:

陈华雷 (1986-), 男, 硕士生. 研究领域: 机器人控制.

刘开周 (1976-), 男, 博士, 副研究员. 研究领域: 机器人控制, 系统仿真, 虚拟现实等.