

端口受控哈密顿方法的电力双推进无人船航向航速控制

吕成兴^{1,2,3,4}, 于海生¹, 周忠海^{2,3,4}, 臧鹤超^{2,3,4}, 张凤丽^{2,3,4}, 张照文^{2,3,4}

(1. 青岛大学 自动化与电气工程学院, 山东 青岛 266071; 2. 齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266033; 3. 山东省海洋环境监测技术重点实验室, 山东 青岛 266033; 4. 国家海洋监测设备工程技术研究中心, 山东 青岛 266033)

摘要: 以电力双推进无人船航速航向控制为主要研究问题, 使用永磁同步电机作为无人船螺旋桨的驱动电机, 采用基于端口受控哈密顿(PCH)方法, 有效的降低了系统损耗, 使无人船驱动系统输出功率得到了优化。仿真结果表明, 系统能较快达到稳定状态, 实现了无人船的速度控制要求, 提升了无人船系统的续航能力。

关键词: 端口受控哈密顿方法; 航速航向控制; 无人船; 永磁同步电机

中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)01-0134-05

DOI: 10.11759/hyqx20171011023

无人船作为多用途的观测平台, 具有隐身性好、操纵灵活、自动驾驶等特点, 适合在各种恶劣环境下, 搭载多种海洋测量传感器用于相关海洋测量领域, 将成为海洋观测领域的一种重要技术手段^[1-2]。

随着通信、人工智能等新兴技术的发展, 各国加大了无人船的研发力度。早在 2000 年美国 MIT 的无人艇研究小组已经针对自主海岸勘探系统设计出“Auto Cat”号双体无人艇。随后国内相关单位也对无人船进行了相应的研究。

无人船需要在复杂的海洋环境中自主航行和作业, 并且作业时要求系统在保持与期望的轨迹跟踪精度同时, 又能够具有良好的机动性能, 对操纵性、控制性能和可靠性均提出了苛刻的要求。目前无人船航向航速的控制方法主要包括: PID 控制、Backstepping 控制、Lyapunov 控制等控制算法。在文献^[3-5]中使用了李雅普诺夫直接法和反步法相结合的方法对无人船的轨迹进行跟踪控制, 张晓杰等^[6]进行了直流电机驱动固定双桨的无人水面艇行运动仿真工作, 万磊等^[7]设计了非完全对称欠驱动无人艇的轨迹跟踪控制器, 实现了非完全对称欠驱动高速无人艇的任意参考轨迹的跟踪控制。

近年来, 具有实际物理意义的互联和阻尼配置无源性控制方法在非线性系统的控制中得到广泛使用^[8-10]。本文以电力双推进无人船自主运动控制为研究对象, 其中航速航向为无人船完成复杂航行任务的关键问题。使用永磁同步电机作为无人船的驱动电机, 采用基于端口受控哈密顿(PCH)方法, 使系统的能量

损耗较小, 有效提高了无人船的电力续航能力。

1 系统硬件平台设计

本文所搭建了 USV 实验平台如图 1 所示。无人船由固定在艇体尾部左右的螺旋桨产生的推力进行驱动, 螺旋桨由永磁同步电机驱动。



图 1 USV 实验研究平台

Fig. 1 The research platform of USV

无人船实验平台硬件包括:

- (1) 嵌入式计算平台, 用于综合处理数据信号和控制信号, 运行控制算法, 向操纵执行机构发送控制信号;

收稿日期: 2017-10-11; 修回日期: 2017-12-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61573203); 国家重点研发计划项目(2016YFC1400802)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China (61573203); National Key Research and Development Program (2016YFC1400802)]

作者简介: 吕成兴 (1983-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事无人船运动控制的研究, 电话: 0532-58628502, E-mail: lcx2033@163.com; 于海生(1963-), 通信作者, 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能变换与电机系统的非线性控制, E-mail: yu.hs@163.com

(2) 传感器测量模块, 用于测量船体的速度、位置、信息以及航向、航姿信息的采集;

(3) 推进驱动模块, 驱动航向、航速控制的执行机构, 如螺旋桨、喷水推进器。

2 系统模型

由于无人艇航行的阻力, 螺旋桨的推力和电动机的特性都是非线性的, 因此所建立的模型也是非线性的。无人船的运动控制主要研究在艏摇、纵荡和横荡 3 个方向上的运动, 我们采用广泛应用的 Fossen^[11-12]动力学和运动学模型分别为(1)和(2):

$$\begin{cases} m_{11}\dot{u} - m_{22}vr + d_{11}u = f \\ m_{22}\dot{v} + m_{11}ur + d_{22}v = 0 \\ m_{33}\dot{r} + (m_{22} - m_{11})uv + d_{33}r = T \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = u\cos\psi - v\sin\psi \\ \dot{y} = u\sin\psi + v\cos\psi \\ \dot{\psi} = r \end{cases} \quad (2)$$

其中, u 为纵荡速度, v 为横摇速度, r 为艏摇角速度。 x, y 为无人船在笛卡尔坐标系下的纵向位置、横向位置, ψ 为艏向角, m_{ii} 为附加质量的惯性系数, d_{ii} 为在纵荡、横摇、艏摇方向的水动力阻尼系数, f 为推进系统所产生的推力, T 为转向力矩。公式(1)和(2)表述为矩阵形式为:

$$\begin{aligned} M\dot{v} + C(v)v + D(v)v &= \tau \\ \dot{\eta} &= R(\eta)v \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $v = [u, v, r]^T$, $\eta = [x, y, \psi]^T$, $\tau = [f, 0, T]^T$, $M = \text{diag}\{m_{11}, m_{22}, m_{33}\}$, $C(v)$ 为科里奥利力和向心力矩阵, $D(v)$ 为水动力阻尼矩阵。

永磁同步电机驱动螺旋桨所产生的推进力可以表述为^[6]:

$$T_p = K_p \rho \omega^2 d^4 \quad (4)$$

永磁同步电机在 $d-q$ 坐标轴下的数学模型为^[13]:

$$\begin{cases} L_d di_d / dt = -R_s i_d + n_p \omega L_q i_q + u_d \\ L_q di_q / dt = -R_s i_q - n_p \omega L_d i_d - n_p \omega \Phi + u_q \\ J_m d\omega / dt = n_p [(L_d - L_q) i_d i_q + \Phi i_q] - \tau_L \end{cases} \quad (5)$$

隐极式永磁同步电机的内部损耗可以表示为:

$$P_{\text{loss}} = P_{Cu} = \frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2) \quad (6)$$

本文采用基于端口受控哈密顿(PCH)方法, 有效降低了永磁同步电机系统的能量损耗(6), 提升了无人船的电力续航能力。

3 端口受控哈密顿方法的航速航行控制器设计

电力双推进无人船可被看作是一种二端口的能量变换装置, 并且能量守恒, 利用端口受控哈密顿(PCH)控制方法的能量成形、互联配置和阻尼注入来确定该系统的行为。端口受控耗散哈密顿系统模型为^[8]:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \end{bmatrix} = [J(q, p) - R(q, p)] \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial q} \\ \frac{\partial H}{\partial p} \end{bmatrix} + G(q)\tau \\ y = G^T(q) \frac{\partial H}{\partial p} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $q \in \mathbb{R}^n$, $p \in \mathbb{R}^n$ 为状态变量, τ 和 $y \in \mathbb{R}^m$ 为系统输入和输出变量。取无人船系统的哈密顿函数为:

$$\begin{aligned} H(q, p) &= K(q, p) + V(q) \\ &= \frac{1}{2} p^T M^{-1}(q)p + V(q) \end{aligned} \quad (8)$$

为将无人船系统(1)和(2)渐进地稳定在期望的平衡点附近, 构造一个加入控制后的闭环期望能量函数 $H_d(q, p)$, 它在平衡点处取严格极小值, 即寻找反馈控制 τ_{ida} , 使闭环 PCH 系统可被描述为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & M^{-1}M_d \\ -M_d M^{-1} & J_2 - D_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial H_d}{\partial q} \\ \frac{\partial H_d}{\partial p} \end{bmatrix} \\ y_d = G^T(q) \frac{\partial H_d}{\partial p} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $M_d = M_d^T > 0$ 为期望的惯性矩阵, $J_2 = -J_2^T$ 是可以调节的自由参数, D_d 为设计的阻尼矩阵, 并满足 $D_d = GK_v G^T \geq 0$ (其中 $K_v > 0$)。设计闭环系统的哈密顿函数为:

$$H_d(q, p) = \frac{1}{2} p^T M_d^{-1}(q)p + V_d(q) \quad (10)$$

IDA-PBC 控制方法通过寻找反馈控制 τ_{ida} , 使 PCH 系统(7)变为闭环系统(9)的形式。

$$\tau_{ida} = \tau_{es}(q, p) + \tau_{di}(q, p) \quad (11)$$

$$\tau_{es} = (G^T G)^{-1} G^T \left[\frac{\partial H}{\partial q} - M_d M^{-1} \frac{\partial H_d}{\partial q} + J_2 M_d^{-1} p \right] \quad (12)$$

$$\tau_{di} = -K_v G^T \frac{\partial H_d}{\partial p} \quad (13)$$

其中, 通过第一步设计 τ_{es} 使得系统能量成形, 第二步设计 τ_{di} 对系统进行互联配置和阻尼注入。电力双推进无人船数学模型(3)的 PCH 形式可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{0} & K(q) \\ -K^T(q) & -C(p) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & D \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial q} \\ \frac{\partial H}{\partial p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ G(q) \end{bmatrix} \tau \quad (14)$$

$$\begin{aligned} q &\triangleq \eta \\ p &\triangleq Mv \end{aligned} \quad (15)$$

系统的哈密顿函数表示为:

$$\begin{aligned} H(q, p) &= \frac{1}{2} p^T M^{-1}(q) p \\ &= \frac{1}{2} (m_{11} u^2 + m_{22} v^2 + m_{33} r^2) \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix}$, $C(p) =$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix}.$$

无人船数学模型的闭环系统可以表示为如下形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{0} & K(q) \\ -K^T(q) & J_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & D_d \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \frac{\partial H_d}{\partial q} \\ \frac{\partial H_d}{\partial p} \end{bmatrix} \quad (17)$$

公式(17)也可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \end{bmatrix} = [J_d(q, p) - R_d(q, p)] \begin{bmatrix} \frac{\partial H_d}{\partial q} \\ \frac{\partial H_d}{\partial p} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中,

$$J_d(q, p) = -J_d^T(q, p) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & K(q) \\ -K^T(q) & J_2 \end{bmatrix}; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} R_d = R_d^T &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & D_d \end{bmatrix} \geq 0 \\ D_d &= \begin{bmatrix} d_{d1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{d3} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

闭环系统的哈密顿函数为:

$$\begin{aligned} H_d(p, q) &= \frac{1}{2} [m_{11} (u - u_d)^2 + m_{22} v^2 + m_{33} r^2] \\ &\quad + \frac{1}{2} k_\psi (\psi - \psi_d)^2 \end{aligned} \quad (21)$$

定义 u_d 、 ψ_d 分别为期望的航速和航向, k_ψ 为设计

参数且 $k_\psi > 0$, 则系统平衡点为^[5]:

$$[u_*, v_*, r_*, \psi_*]^T = [u_d, 0, 0, \psi_d]^T \quad (22)$$

为了使公式(14)与公式(17)相等, 可以选择参数矩阵:

$$J_2 = -C(p) \quad (23)$$

由公式(11)、(12)和(13)可以得到电力双推进无人船的航速航向控制器为:

$$\begin{cases} f = d_{11}u - d_{d1}(u - u_d) \\ T = k_\psi(\psi_d - \psi) - m_{22}vu_d + d_{33}r - d_{d3}r \end{cases} \quad (24)$$

其中, k_ψ , d_{d1} , d_{d3} 为自由设计参数。

4 稳定性设计

我们选择闭环 PCH 系统的哈密顿函数为李雅普诺夫参考函数 $V = H_d(p, q)$, 将在无人船 $u = u_d$, $\psi = \psi_d$ 和 $v = r = \mathbf{0}$ 时取得系统极小值。计算李雅普诺夫参考函数沿时间轨迹的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{V} = \dot{H}_d(p, q) &= \frac{\partial^T H_d}{\partial p} \dot{p} + \frac{\partial^T H_d}{\partial q} \dot{q} \\ &= -\frac{\partial^T H_d}{\partial p} D_d \frac{\partial H_d}{\partial p} \leq 0 \end{aligned} \quad (25)$$

根据李雅普诺夫稳定性理论和拉萨尔不变集定理, 如果该闭环系统包括在集合, 即 $\{p, q \in \mathbb{R}^n \mid \dot{H}_d(p, q) = \mathbf{0}\}$ 内的最大不变集为 (p_*, q_*) , 则闭环系统在平衡点处是渐进稳定的。

5 仿真结果

电力双推进无人船长 1.2 m, 重量为 17.5 kg, 模型参数经过计算可以得到^[14]:

$$m_{11} = 25.8\text{kg}, m_{22} = 33.8\text{kg}, m_{33} = 2.76\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

$$d_{11} = 12\text{kg/s}, d_{22} = 17\text{kg/s}, d_{33} = 0.5\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$$

控制器参数选择 $k_\psi = 5000$, $d_{d1} = 500$, $d_{d3} = 2000$ 。当 $t = 0\text{s}$ 时刻, 系统期望平衡点为 $[u_*, v_*, r_*, \psi_*]^T = [0.8, 0, 0, 1]^T$, 在 $t = 15\text{s}$ 时刻, 期望状态平衡点变为 $[u_*, v_*, r_*, \psi_*]^T = [1, 0, 0, 1.2]^T$ 。由图 2 和图 3 可以看出, 所设计的控制器可以实现对纵荡速度和艏向角的快速跟踪。由图 4 可以看出, 横摇速度、艏摇角速度在系统平衡点处趋向于零。

损耗随时间变化曲线如图 5 所示, 与廖煜雷等在文献[5]提出李雅普诺夫直接法和反步法相结合得到的航速航向控制器进行能耗对比, 可以得到 PCH 控制器的能量损耗较小。

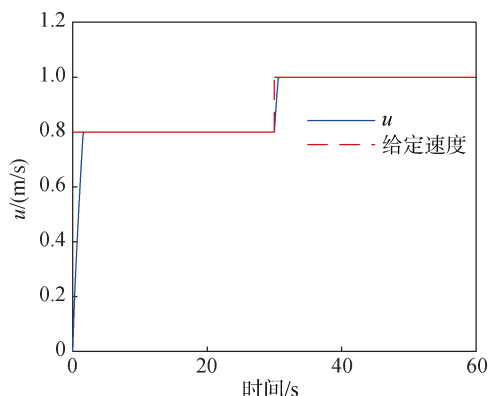


图 2 纵荡速度跟踪曲线

Fig. 2 The tracking curve of surge speed

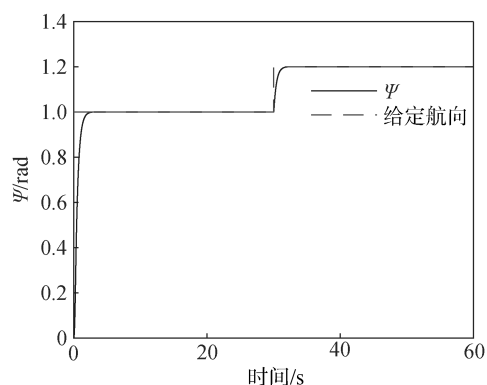


图 3 艏向角跟踪曲线

Fig. 3 The tracking curve of heading angle

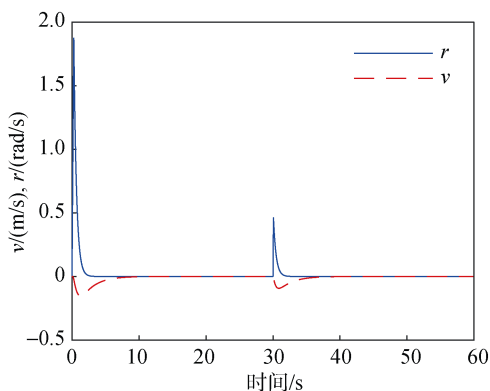


图 4 横摇速度、艏摇角速度跟踪曲线

Fig. 4 The tracking curves of sway speed and yaw speed

6 结论

本文研究了基于端口受控哈密顿方法的电力双推进无人船航向、航速控制方法, 将电力双推进无人船看作是二端口的能量变换装置, 并且能量守恒, 利用端口受控哈密顿(PCH)控制方法的能量成形、互联配置和阻尼注入来确定该系统的行为。采用基于

端口受控哈密顿(PCH)方法, 使系统的能量损耗较小, 有效提高了无人船的电力续航能力。通过试验平台的仿真系统进行仿真及优化设计, 为进一步的试验研究提供了理论基础。

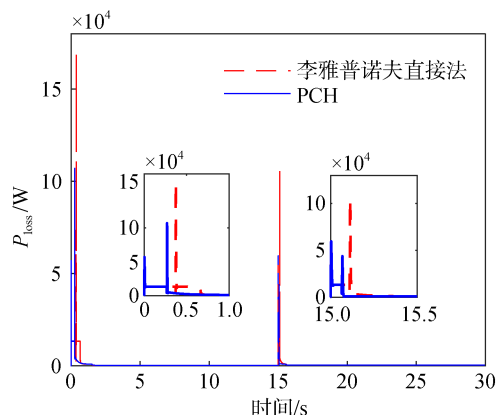


图 5 损耗随时间变化曲线

Fig. 5 The energy dissipation curves of the USV

参考文献:

- [1] Liu Z, Zhang Y, Yu X, Yuan C. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges[J]. Annual Reviews in Control, 2016, 41: 71-93.
- [2] 金久才, 张杰, 邵峰, 等. 一种海洋环境监测无人船系统及其海洋应用[J]. 海岸工程, 2015, 34(3): 87-92. Jin Jiucui, Zhang Jie, Shao Feng, et al. An unmanned surface vehicle for ocean environment monitoring and its oceanic application[J]. Coastal Engineering, 2015, 34(3): 87-92.
- [3] Klinger W B, Bertaska I R, von Ellenrieder K D, et al. Control of an unmanned surface vehicle with uncertain displacement and drag[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2017, 42(2): 458-476.
- [4] Dong Z, Wan L, Li Y, et al. Trajectory tracking control of underactuated USV based on modified backstepping approach[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2015, 7(5): 817-832.
- [5] Liao Y, Pang Y, Wan L. Combined speed and yaw control of underactuated unmanned surface vehicles[C]// Proceedings of the international asia conference on informatics in control automation and robotics, Wuhan, China: IEEE, 2010: 157-161.
- [6] 张晓杰, 冯海涛, 熊亚洲, 等. 一种双电力推进无人水面艇的非线性建模、仿真和实验[J]. 船舶工程, 2012, 34(2): 39-42, 56. Zhang Xiaojie, Feng Haitao, Xiong Yazhou, et al. Nonlinear modeling, simulating and experiment of an unmanned surface vehicle driven by twin electric thrusters[J]. Ship Engineering, 2012, 34(2): 39-42, 56.

- [7] 万磊, 董早鹏, 李岳明, 等. 非完全对称欠驱动高速无人艇轨迹跟踪控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(10): 95-103.
Wan Lei, Dong Zaopeng, Li Yueming, et al. Trajectory tracking control of incomplete symmetry underactuated USV at high speed[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(10): 95-103.
- [8] Ortega R, Schaft A v d, Maschke B, et al. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems[J]. Automatica, 2002, 38(4): 585-596.
- [9] Yu H, Yu J, Wu H, et al. Energy-shaping and integral control of the three-tank liquid level system[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 73(4): 2149-2156.
- [10] Yu H, Yu J, Liu J, et al. Nonlinear control of induction motors based on state error PCH and energy-shaping principle[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 72(1-2): 49-59.
- [11] Fossen T I. Marine control systems: guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles[M]. Trondheim: Marine cybernetics, 2002.
- [12] Fossen T I. A Nonlinear unified state-space model for ship maneuvering and control in a seaway[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2005, 15(9): 2717-2746.
- [13] 于海生, 赵克友, 郭雷, 等. 基于端口受控哈密顿方法的 PMSM 最大转矩/电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 82-87.
Yu Haisheng, Zhao Keyou, Guolei, et al. Maximum torque per ampere control of PMSM based on port-controlled hamiltonian theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 82-87.
- [14] Do K D, Pan J. Robust path-following of underactuated ships: Theory and experiments on a model ship[J]. Ocean Engineering, 2006, 33(10): 1354-1372.

Speed and heading control of unmanned surface vehicles system based on port-controlled hamiltonian (PCH) control method

LÜ Cheng-xing^{1, 2, 3, 4}, YU Hai-sheng¹, ZHOU Zhong-hai^{2, 3, 4}, ZANG He-chao^{2, 3, 4}, ZHANG Feng-li^{2, 3, 4}, ZHANG Zhao-wen^{2, 3, 4}

(1. College of Automation and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 2. Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266033, China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Environmental Monitoring Technology, Qingdao 266033, China; 4. National Engineering and Technological Research Center of Marine Monitoring Equipment, Qingdao 266033, China)

Received: Oct. 11, 2017

Key words: Port-controlled Hamiltonian; speed and heading control; unmanned surface vehicle; permanent magnet synchronous motor

Abstract: This study investigates the speed and heading control problem of unmanned surface vehicles. Permanent magnet synchronous motor serves as the propeller for unmanned surface vehicles. To control their speed, a control strategy based on port-controlled Hamiltonian system is proposed to reduce the system energy consumption. Simulation results show that the controller can achieve a fast dynamic response and greatly minimize energy loss. In addition, the proposed control strategy enhances the endurance of an unmanned surface vehicle.

(本文编辑: 康亦兼)