

多 AUV 编队控制

陈世健,陈宏,丁贺,范智艺,巩伟杰

(深圳大学 机电与控制工程学院,广东 深圳 518060)

摘要:使用一致性算法 $l-\varphi$ 和虚拟领航跟随结构法研究自主水下机器人的集群编队控制。基于一致性算法 $l-\varphi$ 对各 AUV 所持有的参考信息进行一致性协商而达到状态一致。基于虚拟结构思想,将编队控制问题转化为跟随 AUV 对虚拟领航 AUV 的轨迹跟踪控制,使得各 AUV 相对于虚拟领航者的位置且在有限的时间内确保到达各自的期望位置。通过 Java 的 GUI 编程进行仿真实验来验证控制策略的有效性。

关键词:AUV; 集群编队控制; 一致性算法 $l-\varphi$; 虚拟领航跟随结构

中图分类号:TP15 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)06-0151-04

Multi-AUV Formation Control

CHEN Shijian, CHEN Hong, DING He, FAN Zhiyi, GONG Weijie

(School of Mechanical and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Consistency algorithm $l-\varphi$ and virtual pilot-following structure are used to study the formation control of autonomous underwater vehicles. On the basis of consistency algorithm $l-\varphi$, consistency negotiation is carried out for the reference information held by each AUV to achieve state consistency. Based on the idea of virtual structure, the formation control problem is transformed into the trajectory tracking control following AUV to the virtual pilot AUV, so that each AUV can reach its desired position relative to the virtual pilot within a limited time. The effectiveness of the control strategy is verified through the simulation experiment of GUI programming in Java.

Keywords: AUV; formation control of cluster; consistency algorithm $l-\varphi$; virtual pilot following structure

0 引言

现今,自主式水下航行器(AUV)是对神秘海洋探索的重要工具。多 AUV 系统在水下进行数据采集、环境成像、编队控制和合作围捕等海洋应用领域展现广阔的前景,而水下编队控制是多 AUV 协调控制策略^[1-2]最基础和最重要的研究课题。美国海军研究生院用多 AUV 协调对水下雷区探测清除^[3];刘瑞轩^[4]从任务分配和编队控制探讨多 AUV 的协调控制;许彦营^[5]对多 AUV 的协作提出分布式投标方案。

本文主要研究多 AUV 基于一致性算法和虚拟领航结构的编队控制,采用一致性算法^[6-7]解决位置和姿态的一致性,以虚拟领航结构实现预设队形。首先,AUV 收集拓扑结构中虚拟领航者信息,得到各类误差值,用一致性算法保持其状态一致;其次,以虚拟领航者位置计算各 AUV 期望位置,设计时间限定的跟踪控制律,确保各 AUV 限时内成队。本文使用 5 个 AUV 的通信拓扑结构进行编队仿真,验证本文控制策略的可行性。

1 多 AUV 系统的一致性算法 $l-\varphi$

在多机器人系统中,将单体 AUV 的动态概述为

$$\dot{x}_i(t_k) = u_i(t_k), i \in \mathbf{N} \quad (1)$$

式中: $\dot{x}_i(t_k) = [\dot{x}_i(t_k) \quad \dot{y}_i(t_k) \quad \dot{\theta}_i(t_k)] \in \mathbf{R}^3$; $x_i(t_k)$ 、 $y_i(t_k)$ 、 $\theta_i(t_k)$ 表示 t_k 时刻时 AUV 在世界坐标系下的位置和偏航角; $u_i(t_k)$ 代表 t_k 时刻对 AUV 系统的输入; $\mathbf{N} = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 为多 AUV 的编号集合。

令 $\mathbf{N}_i^{t_k}$ 为 t_k 时刻 AUV 的邻居集; A_{ij} 为多 AUVs 网络拓扑结构,表示 AUV 间的通信状态; a_{ij} 为常数,大于 0,是 AUV 间的邻接影响权重,构成邻接权重 K ,得式(1)的控制输入:

$$u_i(t_k) = \sum_{j \in \mathbf{N}_i^{t_k}} A_{ij} a_{ij} (x_j(t_k) - x_i(t_k))$$

简化式(1),得式(2):

$$\dot{x}_i(t_k) = AKx(t_k) \quad (2)$$

其中: $\mathbf{x}(t_k) = [x_1(t_k) \quad x_2(t_k) \quad \dots \quad x_n(t_k)]^T$; t_e 为限定时间值。每对 AUV 状态对为 $(x_j(t_k), x_i(t_k))$, 当 $t_k \geq t_e$, $\|x_j(t_k) - x_i(t_k)\| = 0$, 即距离-角度一致。

2 多 AUV 编队控制系统的设计

建立 $x_w O_w y_w$ 世界坐标系、虚拟领航者本体 $x_a O_a y_a$ 坐标系如图 1 所示。

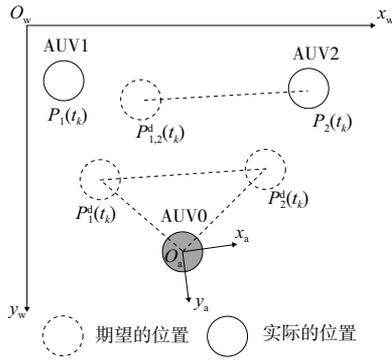


图1 编队控制

定义 $P_i(t_k)$ 为 AUV(i) 在 $x_w O_w y_w$ 坐标系的实际位置, 定义 $P_i^d(t_k)$ 为 AUV(i) 在 $x_w O_w y_w$ 坐标系下相对领航者队形的期望位置, 令 $[x_i, y_i]^T$ 为虚拟领航位置、 $[x_i^f, y_i^f]^T$ 为在 $x_a O_a y_a$ 坐标系下 AUV(i) 几何期望位置偏移量, 则有:

$$P_i^d(t_k) = \begin{bmatrix} X_i^d \\ Y_i^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i^f \\ y_i^f \end{bmatrix}$$

图1中 $P_{1,2}^d(t_k)$ 为 AUV(i) 与领航者失联时, 由邻近 AUV(j) 获取相对 AUV(j) 的期望位置来成队。令 $[X_j, Y_j]^T$ 为跟随者 AUV(j) 在 $x_w O_w y_w$ 坐标系下的位置, $[x_j^f, y_j^f]^T$ 为在虚拟领航 AUV(j) 的 $x_a O_a y_a$ 坐标系下跟随者 AUV(i) 的几何期望位置偏移量, 将 AUV(i) 在 $x_a O_a y_a$ 坐标转换为 $x_w O_w y_w$ 下的坐标:

$$P_{i,j}^d(t_k) = \begin{bmatrix} X_i^d \\ Y_i^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j^f \\ y_j^f \end{bmatrix}$$

构建 AUV(i) 在二维平面下的运动学方程见式(3), $\dot{p} = [\dot{X}_i \ \dot{Y}_i \ \dot{\theta}_i]^T$ 为 AUV(i) 的运动状态; $q_i = [v_i \ \omega_i]^T$ 为控制输入, v_i, ω_i 各为 AUV(i) 的线速度和角速度; 航向角 $\theta_i = \arctan(\dot{y}_i/\dot{x}_i)$ 。

$$\dot{p} = \begin{bmatrix} \dot{X}_i \\ \dot{Y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} q_i \quad (3)$$

AUV(i) 期望跟踪轨迹 $p_i^d = [X_i^d \ Y_i^d \ \theta_i^d]^T$, 期望输入 $\dot{p}_i^d = KAQ_d = [v_i^d \ \omega_i^d]^T$, v_i^d 为期望线速度输入, ω_i^d 为期望角速度输入, $Q_d = [q_1^d \ q_2^d \ \dots \ q_n^d]$ 。AUV(i) 轨迹跟踪反馈控制系统如图2所示。

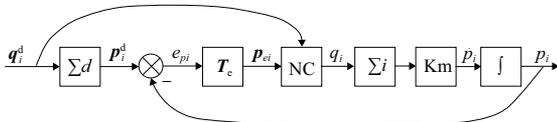


图2 轨迹跟踪控制

图2中: NC 为非线性控制系统; \sum_i 为 AUV(i) 运动学系统; Km 为速度角速度限制器, 避免过大的线速度和角速度, 导致漂移现象。参考系统 \sum_d 的运动学方程为

$$\dot{p}_i^d = \begin{bmatrix} \dot{X}_i^d \\ \dot{Y}_i^d \\ \dot{\theta}_i^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} q_i^d$$

可将机器人 AUV(i) 在 $x_w O_w y_w$ 坐标系下的位姿误差定义为

$$p_{ei} = \begin{bmatrix} x_{ei} \\ y_{ei} \\ \theta_{ei} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i & 0 \\ -\sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i^d - x_i \\ y_i^d - y_i \\ \theta_i^d - \theta_i \end{bmatrix} = T_e \begin{bmatrix} x_i^d - x_i \\ y_i^d - y_i \\ \theta_i^d - \theta_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

该式表示机器人 AUV(i) 从 $x_a O_a y_a$ 坐标系到 $x_w O_w y_w$ 坐标系的转换, T_e 是转换矩阵。对式(4)进行求导, 得到误差的动力学方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_{ei} = \omega_i y_{ei} - v_i + v_i^d \cos\theta_{ei} \\ \dot{y}_{ei} = -\omega_i x_{ei} + v_i^d \sin\theta_{ei} \\ \dot{\theta}_{ei} = \omega_i^d - \omega_i \end{cases} \quad (5)$$

AUV(i) 限时轨迹跟踪问题的运动学模型是通过控制输入 q_i , 使任意初始误差 $[x_{ei}(0) \ y_{ei}(0) \ \theta_{ei}(0)]^T$ 在式(5)的闭环轨迹下, 有限时间内收敛为 0, 即 $\lim_{t_k \geq t_e} \|p_{ei}\| = 0$ 。

3 轨迹跟踪控制器设计

引理1 线性系统 $\dot{x} = n$ 由控制器 $u = \xi_1 x + \xi_2 \text{sgn}(x)$ 在限定时间内镇定, $\xi_1, \xi_2 < 0$ 。

此系统的特征: 假设初始态为 $x(0) \neq 0$, 有状态 $x(t)$, 系统于有限时间 t_x 内, 让 $x(t) = 0$ 。此外, 得 $t_x = -\ln[\xi_2 / (\xi_2 - \xi_1 x_0 \text{sgn}(x))] / \xi_1$ 。

AUV 轨迹跟踪控制器设计的步骤如下:

1) 针对式(4)的偏航角误差状态 θ_{ei} , 设计其一阶系统限定时间约束的控制器:

$$\omega_i = \omega_i^d + k_1 \theta_{ei} + k_2 \text{sgn}(\theta_{ei}) \quad (6)$$

其中: $k_1, k_2 > 0$ 。可得控制器 $\dot{\theta}_{ei} = -k_1 \theta_{ei} - k_2 \text{sgn}(\theta_{ei})$ 。由引理1知, 要使 $\theta_{ei} = 0$, 则其限定稳定时间为 $t_\theta = -\ln[k_2 / (k_2 - k_1 \theta_0 \text{sgn}(\theta_{ei}))] / k_1$, 通过设定参数 k_1, k_2 , 使 $\omega_i = \omega_i^d$ 。

2) 对位置误差状态 (x_{ei}, y_{ei}) 构成的系统进行位置控制器设计。

引理2 对于双积分线性系统 $\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = u$ 能由控制器 $u = -\xi_3 \text{sgn}(x_1) |x_1|^{\alpha_1} - \xi_4 \text{sgn}(x_2) |x_2|^{\alpha_2}$ 在有限时间内使其镇定, 其中 $0 < \alpha_1 < 1, \alpha_2 = 2\alpha_1 / (1 + \alpha_1)$ 。

借由该引理, 可令 v_i 的控制率表示成

$$v_i = v_i^d \cos\theta_{ei} + \omega_i^d y_{ei} + k_3 \text{sgn}(y_{ei}) |y_{ei}|^{\beta_1} + k_4 \text{sgn}(x_{ei}) |x_{ei}|^{\beta_2} \quad (7)$$

其中: $k_3, k_4 > 0; 0 < \beta_1 < 1; \beta_2 = 2\beta_1 / (1 + \beta_1)$ 。由此可得, 系统的闭环形式为

$$\begin{cases} \dot{x}_{ei} = -k_3 \text{sgn}(y_{ei}) |y_{ei}|^{\beta_1} - k_4 \text{sgn}(x_{ei}) |x_{ei}|^{\beta_2} \\ \dot{y}_{ei} = -\omega_i^d y_{ei} + v_i^d \sin\theta_{ei} \end{cases} \quad (8)$$

因此新得到的式(8), 能在有限的时间内, 使得 $x_{ei} \rightarrow 0, y_{ei} \rightarrow 0$ 。

4 数值仿真

假设某海域有 5 个 AUV,用矩阵 A 表示 AUV 间通信网络拓扑图,第 1 ~ $n-1$ 行为跟随者的相互间通信状况, n 行为虚拟领航者,无需主动去与其他 AUV 通信。邻接权重 K 的设置与 A 有关,若能与领航者通信,则较大权重在与领航者之间;若与领航者失联,则就近搜索其他 AUV 获取位置信息,并加大相对于该 AUV 位置的权重。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.1 定点编队

设定仿真步长 $\Delta T=0.02$ s,仿真时间 5 s。预设 4 s 内,5 个 AUV 的预定状态达到一致,形成了预想的编队形状。

设跟随者 AUV 在 $x_w O_w y_w$ 坐标系下的初始位姿分别为 $(70, 70, -\pi/6)$ 、 $(200, 160, 2\pi/3)$ 、 $(200, 300, \pi/4)$ 、 $(450, 400, -\pi/4)$,虚拟领航者 AUV 的初始位姿为 $(550, 300, \pi/2)$ 、初始角速度为 $(\pi/6)$ rad/s、线速度为 0.5 m/s。仿真开始后,各 AUV 跟踪轨迹路线如图 3 所示,空心圆为各 AUV 的初始位置,大圆点为虚拟领航者,灰色为跟随者,浅灰色为各 AUV 的轨迹。

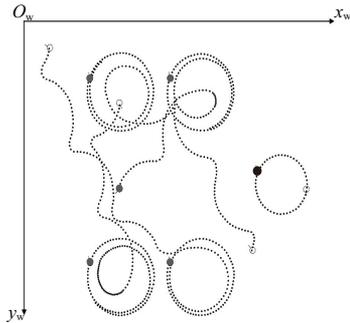


图 3 定点编队路线图

当 $X_i(t) \rightarrow X_i^d(t)$, $i=1,2,3,4$ 时可完成预设的定点编队。由图 4-图 5 知,队形在 3 ~ 4 s 间完成,4 个 AUV 通过网络拓扑结构获取位置信息,与以虚拟领航者为参考的几何位置及角度保持一致,可知在控制律调解下,AUV(i)可在有限时间内跟踪预设期望轨迹,完成定点队形。

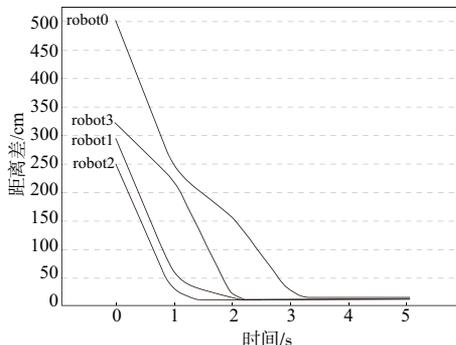


图 4 定点编队位置误差图

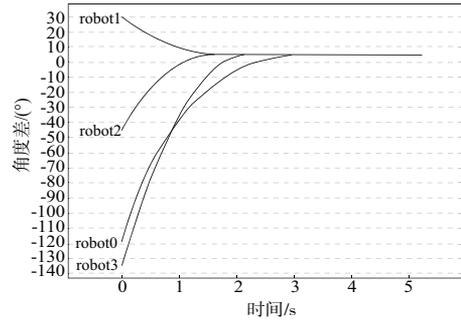


图 5 定点编队偏航角误差图

4.2 横排编队

设定仿真步长 $\Delta T=0.02$ s,仿真时间 5 s。预设 5 s 内,使得 5 个 AUV 的预定状态达到一致,形成了预想的编队形状。

设各 AUV 的初始值,4 个跟随者 AUV 在 $x_w O_w y_w$ 坐标系下的初始位姿分别为 $(40, 50, -\pi/6)$ 、 $(50, 120, 2\pi/3)$ 、 $(300, 130, \pi/4)$ 、 $(500, 60, -\pi/4)$,限速 5 m/s。虚拟领航者 AUV 的初始位姿为 $(250, 100, \pi/2)$ 、初始角速度为 0 rad/s 和线速度 0.5 m/s,中间段做正弦移动,再恢复直线。仿真开始后,各 AUV 的跟踪轨迹路线如图 6 所示,空心圆为各 AUV 的初始位置,大圆点为虚拟领航者,灰色为跟随者,浅灰色为各 AUV 的轨迹。

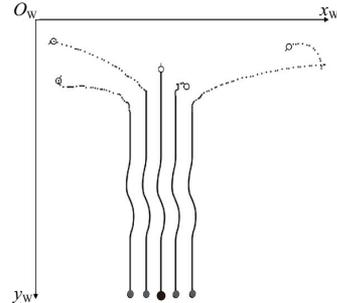


图 6 横排编队路线图

由图 7-图 8 知,队形在 2 ~ 3 s 间完成编队,4 个 AUV 通过网络拓扑结构获取位置信息,与以虚拟领航者为参考的几何位置及角度保持一致。同时,中间队形变换未造成太大影响。由此可知在控制律调解下,AUV(i)在有限时间内跟踪上预设期望轨迹,完成横排队形移动控制。

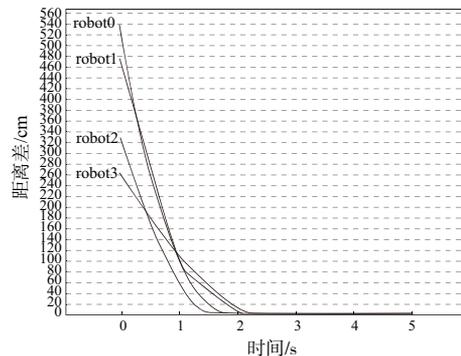


图 7 横排编队位置误差图

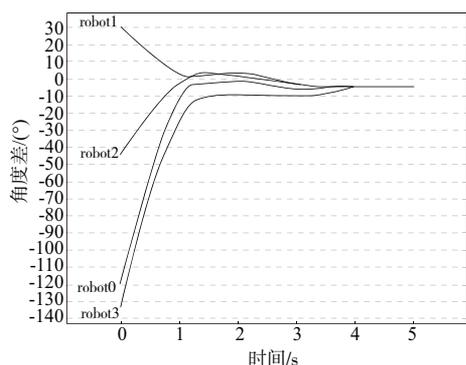


图8 横排编队偏航角误差图

5 结语

本文针对二维平面内多 AUV 控制系统的编队问题进行研究,选用渐近一致性算法和虚拟领航结构法来解决编队问题,完成了定点编队及横排编队控制,验证了控制策略

的可行性。将本课题研究的控制器应用到多 AUV 系统在三维的 6 自由度编队是今后的研究重点。

参考文献:

- [1] 林伟民. 多移动机器人协同控制策略的研究[D]. 天津:天津职业技术师范大学,2019.
- [2] 刘兆清. 无人水面舰艇的协同编队控制策略研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2018.
- [3] HEALEY A. Application of formation control for multiple vehicle robotic minesweeping[J]. Proceedings of the IEEE CDC-2001, 2001: 325-332.
- [4] 刘瑞轩. 多水下机器人协调控制研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2018.
- [5] 许彦营. 多水下机器人通信及协调方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.
- [6] 李宗刚,赵振乾,葛立明,等. 基于二阶一致性算法的多仿生机器人鱼分布式编队控制[J]. 控制与决策,2019,34(1): 31-42.
- [7] 韩宗亭. 多智能体系统一致性问题研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2018.

收稿日期:2020-10-26

(上接第 142 页)

结果显示,变磁链 SVPWM-DTC 策略不仅能够大幅降低电机转矩脉动,同时也有效降低了功率器件的开关损耗以及定子绕组的铜耗,使位置控制系统具有良好的动、静态性能。

参考文献:

- [1] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- [2] 理文祥. 高性能无速度传感器直接转矩控制系统的研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2012.
- [3] 解良,刘思贝,姚文熙,等. 基于空间矢量的同步磁阻电机直接转矩控制[J]. 机电工程,2017,34(10):1156-1161.
- [4] 郑大伟. 永磁同步电机无传感器直接转矩滑模控制研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2019.
- [5] 李晓光. 开关磁阻电机转矩算法研究[D]. 石家庄:河北科技大学,2016.
- [6] 林诚才,张月玲,肖逢. 基于 DTC 的开关磁阻电机平稳起动的研究[J]. 计算机仿真,2015,32(9):180-184.
- [7] 桑徐阳,颜钢锋,王远东,等. 一种改进的四相开关磁阻电机直接转矩控制策略研究[J]. 机电工程,2019,36(1):60-65.
- [8] 陈建龙. 基于模糊控制的开关磁阻电机转矩脉动抑制方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [9] 王子煜,邓福军. 基于模糊理论的开关磁阻电机直接转矩控制[J]. 大连交通大学学报,2013,34(2):97-100,116.
- [10] 霍东亮. 基于滑模变结构的开关磁阻电机直接转矩模糊控制[D]. 大连:大连交通大学,2018.
- [11] 刘烈焜. 矿用自卸车的开关磁阻电机驱动系统研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2016.
- [12] 刘勇智,鄱成龙,林博闻,等. 基于自适应二阶终端滑模的 SRM 直接转矩控制[J]. 北京航空航天大学学报,2018,

44(10):2043-2051.

- [13] 高旭东. 电动汽车用开关磁阻电机低转矩脉动控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- [14] 孟庆阳. 基于 DSP 的开关磁阻电机直接转矩控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- [15] 徐爽. 开关磁阻电机低转矩脉动控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2017.
- [16] 许爱德,樊印海,李自强. 空间电压矢量下 SRM 转矩脉动最小化[J]. 电机与控制学报,2010,14(1):35-40,46.
- [17] 许爱德,张文,何昆仑,等. 磁链无差拍控制的开关磁阻电机转矩脉动抑制[J]. 电机与控制学报,2019,23(8):57-66.
- [18] 刘占千. 开关磁阻电机转矩脉动抑制方法研究[D]. 成都:西华大学,2017.
- [19] 周颖,边敦新,熊立新. 基于模糊自适应的开关磁阻电机变磁链研究[J]. 水电能源科学,2018,36(10):173-176,205.
- [20] 胡春龙. 开关磁阻电机直接转矩控制调速系统研究[D]. 西安:西安科技大学,2015.
- [21] 陈金文,杨明发. 基于转速磁链特性的开关磁阻电机直接转矩控制[J]. 电气传动,2014,44(8):7-10.
- [22] 颜宁,曹鑫,张蕾,等. 基于直接转矩控制的开关磁阻电机模型预测控制方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(18): 5446-5453,5544.
- [23] CHEOK A D, FUKUDA Y. A new torque and flux control method for switched reluctance motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2002,17(4):543-557.
- [24] 何昆仑. 开关磁阻电机转矩脉动抑制策略研究[D]. 大连:大连海事大学,2017.
- [25] 刘畅. 基于滑模变结构的同步电机 SVM 直接转矩控制的研究[D]. 济南:山东大学,2008.

收稿日期:2020-11-30