

引用格式:索良泽,王冬,王红蕾,等.无线网络通信下多无人飞行器编队飞行控制[J].电光与控制,2018,25(9):49-52,100. SUO L Z, WANG D, WANG H L, et al. Flight control of multi-UAV formation based on wireless network communication[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(9):49-52, 100.

无线网络通信下多无人飞行器编队飞行控制

索良泽¹, 王冬², 王红蕾¹, 杨靖¹

(1. 贵州大学, 贵阳 550025; 2. 西北工业大学, 西安 710029)

摘要: 基于无线网络通信的多无人飞行器编队飞行控制容易受到通信中断、数据包冲突等因素的影响,借鉴分布式网络中的令牌环思想提出了一种通信拓扑的切换方法,并引入切换长机的概念。基于一致性理论利用局部相对状态信息设计了分布式控制律,该控制律由两部分组成:一部分是编队对于预设轨迹的跟踪;另一部分是队形的保持。采用双积分动力系统模型进行仿真实验,结果表明所提方法可以实现编队对预定轨迹的跟踪及飞行中的编队保持,即使通信节点故障也能继续保持预设队形,具有较强的鲁棒性。

关键词: 无人飞行器; 编队控制; 分布式控制; 切换拓扑; 一致性

中图分类号: V249 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.09.011

Flight Control of Multi-UAV Formation Based on Wireless Network Communication

SUO Liang-ze¹, WANG Dong², WANG Hong-lei¹, YANG Jing¹

(1. Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710029, China)

Abstract: The flight control of the formation of multiple Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) based on wireless network communication is easily affected by such factors as communication interruption and information collision. Based on a Token-Ring algorithm of distributed network, a method to switch communication topologies is proposed, and a concept of leader switching is introduced. The distributed control law is designed based on the consensus theory and the local relative state information, which is made up of two parts: tracking of the desired trajectory of formation and maintaining of the formation geometry. A double-integrator dynamics system model is used for simulation. The results show that: 1) The proposed method can make the formation implement the desired trajectory tracking and maintain formation geometry in flight; and 2) The designed control system has strong robustness, which can keep the preset formation geometry even when some of the communication nodes fail.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle (UAV); formation control; distributed control; switching topology; consensus

0 引言

随着多无人飞行器协同控制技术的逐步发展,其在搜救^[1]、侦察^[2]、测绘^[3]等方面的研究正日益增多。为了避免设计复杂的大型运输机械结构,可以使用由多个简单机械组成的多机系统来搬运庞大而笨重的物体^[4]。运用多架低续航力的无人飞行器可以降低监测

成本、保证执行任务的冗余度、提高区域搜索的效率^[5-7]。因此,研究多无人飞行器编队飞行控制具有十分重要的现实意义。

在多无人飞行器协同控制研究中,编队控制的主要方法有基于领航-跟随的方法^[8]、基于虚拟结构的方法^[9]、基于行为方式的方法^[10]、基于人工势场的方法^[11]以及基于一致性理论的方法^[12]。而应用这些方法实现编队都要求编队内的无人飞行器共享信息。文献^[13]基于鸽群行为机制从层级结构和领导作用的角度建立了编队的拓扑结构,仿真结构表明在层级拓扑结构下所设计的编队控制器是有效且稳定的,但由于有显式领航者的存在使得编队容易受到头鸽性能的

收稿日期:2018-03-07

修回日期:2018-07-11

基金项目:国家自然科学基金(61640014);贵州大学研究生创新基金(2017066)

作者简介:索良泽(1993—),男,贵州平塘人,硕士生,研究方向为多飞行器协同控制。

影响;文献[14]利用一致性理论设计了分布式编队控制协议并用仿真实验验证了其有效性,但实验中多无人飞行器的通信拓扑是不变的;文献[15]验证了所提控制方法在无向切换通信拓扑下的有效性,但在实际应用中通信拓扑通常是有向的;文献[16]假定通信拓扑是有向和切换的,并在仿真中验证了所构建分布式编队控制器的有效性,但并未考虑信息的传播路由和数据包冲突等问题。事实上,由于无人飞行器编队的通信拓扑通常是不可靠和切换的,并且在分布式结构中缺乏集中式的信息路由调度,因此,编队中所有无人飞行器会享有同样的信道且容易发生数据包冲突和信号干扰等问题,因而可利用部署在无人飞行器上的各类传感器去获取编队所需信息^[17]。这种编队共享信息的方式没有数据冲突等问题,较容易实现无向和切换通信拓扑的结构,但也容易受传感器安装角度、机载传感器技术限制等因素的影响,因此并不常用。

文献[18]指出,对于双积分动力系统,在有向切换通信拓扑中,需在每一时刻都含有一簇有向生成树,编队才能形成。然而在实际应用中由于信道占用、通信冲突等问题并不能确保拓扑图中每一时刻都含有一簇有向生成树。所以,在多无人飞行器编队控制中考虑同一信道数据包冲突、信号干扰等问题是极其重要的。

针对上述问题,本文首先提出了一种通信拓扑的切换方法和切换长机的概念;其次,基于一致性理论设计了分布式编队控制律;再次,为提高系统鲁棒性,设计的控制律包含了两个部分,一是个体对于预设轨迹的跟踪,另一部分是队形的保持;最后,通过仿真验证所提方法的有效性。

1 问题描述

考虑一个由 N 架无人飞行器组成的编队集群系统。本文主要研究编队集群系统在二维平面编队的保持和编队对预设航迹的跟踪,因此将无人飞行器看作质点,采用双积分动力系统模型来描述无人飞行器动力学模型^[18-19]。那么无人飞行器 i 的动力学描述为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x_i(t) \in \mathbf{R}^2$, $v_i(t) \in \mathbf{R}^2$ 和 $u_i(t) \in \mathbf{R}^2$ 分别代表无人飞行器 i 的位置、速度和控制输入。

在集群系统编队飞行过程中,无人飞行器需要进行信息交互,其通信拓扑可由有向图 $G = \{V, E, A\}$ 来描述,其中, $V = \{\bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_n\}$ 表示图 G 中节点的集合, $E \subseteq \{(\bar{v}_i, \bar{v}_j) : \bar{v}_i, \bar{v}_j \in V\}$ 表示图 G 中边界的集合, $e_{ij} = (\bar{v}_i, \bar{v}_j)$ 是边集内的元素,表示图的边, $A = [a_{ij}] \in$

$\mathbf{R}^{N \times N}$ 是由非负元素 a_{ij} 构成的邻接矩阵。无人飞行器 i 看作 G 中的节点 \bar{v}_i 。若无人飞行器 i 传递信息给无人飞行器 j ,表示在边集 E 中存在一条边界 $e_{ij} = (\bar{v}_i, \bar{v}_j)$,称无人飞行器 j 为无人飞行器 i 的一个邻居,此时 $a_{ij} > 0$,否则 $a_{ij} = 0$,特别地,有 $a_{ii} = 0$ 。使用图的 Laplacian 矩阵 $L = [l_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 来描述无人飞行器 i 与其相邻无人飞行器 j 之间的关系,其在图论中的定义为 $L = D - A$,其中, D 为有向图 G 的出度矩阵, $D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n)$, $d_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}$ 。

在实际应用中常常要求集群系统以一定的编队按照给定的航迹飞行,因此首先需将给定的航迹解算为关于时间的函数(即给定飞行速度),使每架飞行器得到关于自身的航迹信息。编队飞行轨迹如图1所示。

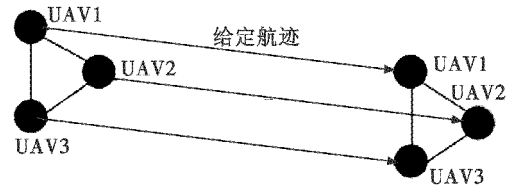


图1 编队飞行轨迹

Fig. 1 Formation flight trajectory

平面内可任取一点作为参考点,不失一般性,取图中飞行器 UAV1 为参考点,飞行器 UAV2 和 UAV3 可通过与飞行器 UAV1 的距离来计算自身的航迹信息。

将给定航迹进行解算,得到无人飞行器的航迹信息,用时间函数 $h_{ix}(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 来表示,其导数用 $h_{iv}(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 来表示,如果有

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} (h_{ix}(t) - x_i(t)) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (h_{iv}(t) - v_i(t)) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

则称实现了对给定航迹的跟踪。

记编队中飞行器 i 和飞行器 j 之间的距离为 d_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, N$),如果有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_i(t) - x_j(t) - d_{ij}) = 0 \quad (3)$$

则认为实现了编队队形的控制。

由于无人飞行器编队的通信拓扑通常是不可靠且切换的,所以需考虑通信链路间断和数据包冲突等问题。因此,本文的主要研究内容就是在通信不可靠、拓扑切换、信号干扰等条件下设计控制律,使得无人飞行器编队实现对给定航迹的跟踪并保持编队队形。

2 控制律设计

由上文可知,无人飞行器编队飞行中通信拓扑往往是不可靠和不断变换的,这也就引发了信息流的传递问题。而在分布式的编队控制策略中,没有集中式

结构来进行信息流的路由调度,从而容易造成信号干扰和数据包冲突等问题。考虑到在一般情况下,无人飞行器编队的无线通信是在同一信道下进行的,因此很可能发生信号干扰,影响编队控制效果。

本文采用分布式控制律,并借鉴令牌环算法给出一种通信拓扑的切换方法,以避免信号干扰和数据冲突等情况的发生。令牌环算法是分布式网络中的一种典型算法,其特点是在每一时刻都只有令牌持有者拥有当前的通信权,因此可以有效避免信道占用、信号互相干扰等问题。由此便形成了特别的切换通信拓扑结构,如图2所示。

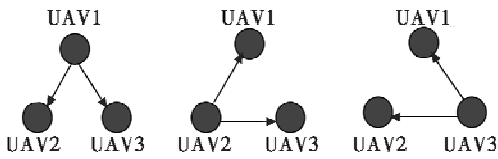


图2 通信拓扑

Fig.2 Communication topologies

由以上通信拓扑可看出,在每一时段长机都不相同,并且在不断切换。由于令牌会不断绕环传递,有向通信拓扑在不断切换,因此本文将每一时段令牌的持有者作为切换长机。采用这种不断切换长机的控制策略可以有效避免信号干扰、数据冲突等情况的发生,并且不像领航一跟随策略那样依赖于长机,此外还可以在令牌每一轮绕环循环过程中充分交换节点的信息,增强系统的鲁棒性。

上一节提到编队内的无人飞行器通过对给定航迹的解算得到自身的期望航迹,由此给出采用切换长机策略设计的分布式编队控制律

$$u_i(t) = \dot{h}_{iv}(t) + (1 - a_{ji})K_1[(h_{ix}(t) - x_i(t)) + (h_{iy}(t) - y_i(t))] + a_{ji}b_iK_2[(x_j(t) - x_i(t) - d_{ji}) + (y_j(t) - y_i(t)) - (h_{jv}(t) - h_{iv}(t))] \quad (4)$$

式中: K_1, K_2 为增益系数; $i = 1, 2, \dots, N$ 。当无人飞行器 i 是切换长机时,则有 $i = j$, 此时 $b_i = 0$, 表示不受邻机状态的影响; 否则 $b_i = 1$, 受到邻机状态的影响。在此, a_{ji} 只取 0 或 1, 特别地, $a_{jj} = 0$ 。

在编队飞行过程中可能会发生节点故障、通信中断等情况,这些情况都可看作长机 j 和僚机 i 不存在通信链路,即式(4)中 $a_{ji} = 0$, 若僚机 i 成功接收到长机 j 信息,则 $a_{ji} = 1$ 。从式(4)控制律中可以看出,只要在时钟同步的条件下,就算通信无法实现,即 $a_{ji} = 0$, 依然能够实现航迹跟踪和队形保持。文献[20]中指出,当无人飞行器之间存在信息耦合时,一致性的过渡过程将有较好的性能表现。此外,在时钟不同步时系统将会有较强的鲁棒性。

3 仿真实验

考虑4架无人飞行器在二维平面上的编队飞行控制。给定航迹为余弦曲线,可表示为 $y = \cos x$ 。形成的编队构成一个边长为 2 m 的矩形,如图3所示。

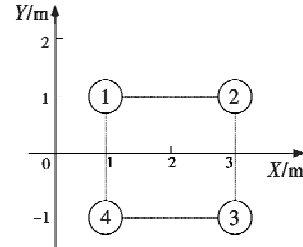


图3 编队图形

Fig.3 Figure of formation

以1和4两个点的中点作为给定航迹的参考点,那么4架无人飞行器可分别解算出自身的期望航迹信息。假设无人飞行器在 X 方向和 Y 方向的运动是解耦的,则如图3所示的编队可将给定航迹解算为如表1所示的期望航迹信息。如果在本文所提的控制律下编队能够跟踪给定航迹并保持队形,那么4架无人飞行器会在平面上画出4条余弦曲线,并保持间距不变。

表1 期望航迹信息

Table 1 Information of desired trajectory

无人机	h_{ix}/m	h_{iy}/m	$h_{iv}/(m \cdot s^{-1})$	$h_{iy}/(m \cdot s^{-1})$
UAV1	t	$\cos t + 1$	1	$-\sin t$
UAV2	$t + 2$	$\cos t + 1$	1	$-\sin t$
UAV3	$t + 2$	$\cos t - 1$	1	$-\sin t$
UAV4	t	$\cos t - 1$	1	$-\sin t$

多无人飞行器系统长机随时间轮换方式为 UAV1→UAV2→UAV3→UAV4→UAV1。每个切换长机保持 5 s 便轮换到下一个。由于编队飞行过程中可能发生节点故障、通信中断等情况,所以系统内的通信链路不一定可靠,在仿真实验中以概率 $p = 0.5$ 表示僚机接收到切换长机信息的成功率。4架无人飞行器的初始状态如表2所示。

表2 无人飞行器初始状态

Table 2 Initial states of UAVs

无人机	x_{ix}/m	x_{iy}/m	$v_{ix}/(m \cdot s^{-1})$	$v_{iy}/(m \cdot s^{-1})$
UAV1	-0.1	0.9	0.1	-0.15
UAV2	2.2	1.5	0.15	0.2
UAV3	1.95	-1.2	0.1	-0.2
UAV4	0.2	-0.7	0.2	0.1

式(4)控制律中的参数设置为 $K_1 = 5, K_2 = 10$ 。当通信成功时,取 $a_{ji} = 1$, 否则 $a_{ji} = 0$ 。无人飞行器之间的距离 $d_{ij} = 2$ m 由给定的编队队形决定。

利用 Simulink 仿真平台进行实验。在上述条件下集群系统编队飞行的轨迹如图4所示。

仿真实验共持续 50 s,图中圆点分别表示在 0 s, 12 s,30 s,42 s,50 s 时 4 架无人飞行器所处的位置,由图中可看出,从初始状态开始经过一小段时间的调整,编队能很好地跟踪给定航迹并形成给定队形,且在航行中一直保持队形不变。

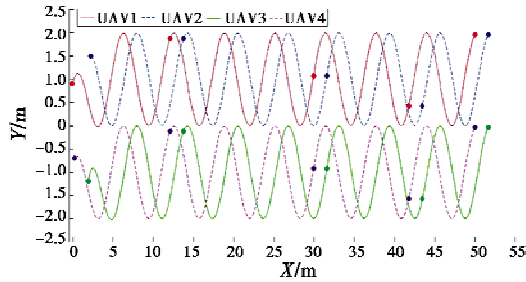


图4 编队飞行轨迹

Fig.4 Flight trajectory of UAV formation

图5为无人飞行器的位置跟踪误差曲线图。

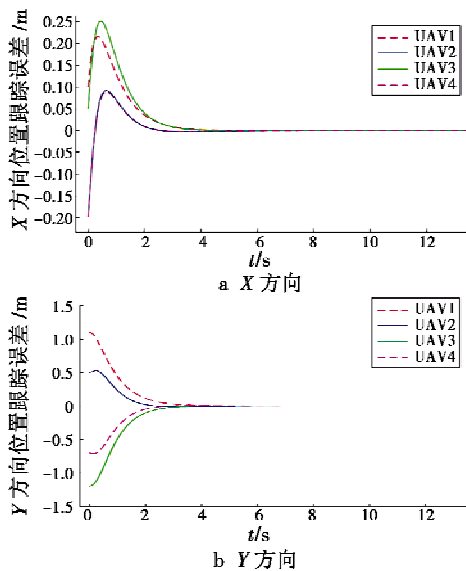


图5 无人飞行器位置跟踪误差

Fig.5 Position tracking error of the UAV

从图中可以看出,无人飞行器编队经过大约 4 s 便可从所设定的初始位置逐渐收敛到期望的轨迹上,使其各自的位置跟踪误差均为 0 m,也使编队能够保持队形按照预定的航迹前进。

图6为无人飞行器速度跟踪误差曲线图。

从图中可以看出,在本文所提控制律的作用下,经过大约 4 s 的加速过程各飞行器便从初始速度逐渐加速至期望的飞行速度,并保持队形间相对速度为 0 m/s,以保证编队队形不发生变化。

由各图可以看出,各项跟踪误差随着时间推移逐渐收敛为 0,表明在所提切换长机控制策略下,无人飞行器从初始条件出发可以逐渐地组成期望编队并保持队形跟踪期望航迹,即使存在通信故障,也能实现编队

稳定飞行的要求。仿真结果验证了本文所提切换长机控制策略的正确性和有效性。

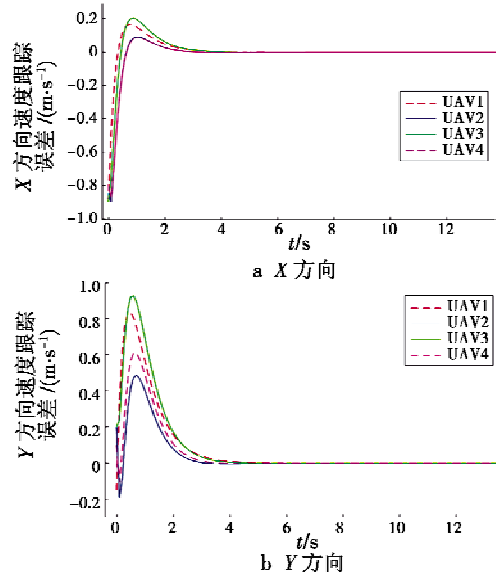


图6 无人飞行器速度跟踪误差

Fig.6 Velocity tracking error of the UAV

4 结论

本文主要研究无线网络通信环境下多无人飞行器在编队飞行中所要面对的通信干扰和信息路由等问题,借鉴分布式网络中令牌环算法提出了基于切换长机的控制策略,并由其明确了通信拓扑的信息路由,可以有效地解决通信干扰和数据冲突等问题。由于长机不断随时间轮换,节点信息能够充分交换,增强了系统的鲁棒性。利用局部相对状态信息设计了系统编队飞行的控制律,该控制律既保证了对期望路径的跟踪又实现了编队队形的稳定,在通信链路不可靠时系统仍然能够有效地跟踪期望路径并保持队形不变。最后,通过仿真验证了所提方法的正确性和有效性。

参考文献

[1] KUMAR V, MICHAEL N. Opportunities and challenges with autonomous micro aerial vehicles[J]. International Journal of Robotics Research, 2012, 31(11):1279-1291.

[2] NIGAM N, BIENIAWSKI S, KROO I, et al. Control of multiple UAVs for persistent surveillance: algorithm and flight test results [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(5):1236-1251.

[3] DERAFA L, BENALLEGUE A, FRIDMAN L. Super twisting control algorithm for the attitude tracking of a four rotors UAV [J]. Journal of the Franklin Institute, 2012, 349(2):685-699.

(下转第 100 页)

- 2014, 11(1):103-110.
- [9] BERNARDI S, CAMPOS J, MERSEGUER J. Timing-failure risk assessment of UML design using time Petri net bound techniques [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2011, 7(1):90-104.
- [10] CABASINO M P, LAFORTUNE S, SEATZU C. Optimal sensor selection for ensuring diagnosability in labeled Petri nets[J]. *Automatica*, 2013, 49(8):2373-2383.
- [11] LIME D, ROUX O H. Model checking of time Petri nets using the state class timed automaton[J]. *Discrete Event Dynamic Systems*, 2006, 16(2):179-205.
- [12] 刘君,袁化成,郭荣伟. 内并联式 TBCC 进气道模态转换过程流动特性分析 [J]. *宇航学报*, 2016, 37(4):461-469.
- [13] DARBY R. The dynamic response of pressure relief valves in vapor or gas service[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(6):1262-1268.
- [14] 鲁峰,黄金泉,吕怡秋,等. 基于非线性自适应滤波的发动机气路部件健康诊断方法[J]. *航空学报*, 2013, 34(11):2529-2538.
- [15] ZAFER N, LUECKE G R. Stability of gas pressure regulators [J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2008, 32(1):61-82.
- [16] 徐志鹏,王宣银,罗语溪. 滑阀先导式高压气动减压阀结冰特性[J]. *航空学报*, 2009, 30(5):819-824.
- [17] 叶丹丹,罗继亮. 部分可观 Petri 网结构信息在故障诊断中的应用[J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(3):366-373.
-
- (上接第 52 页)
- [4] KUBE C R, ZHANG H. The use of perceptual cues in multi-robot box-pushing[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996:2085-2090.
- [5] CASBEER D W, KINGSTON D B, BEARD R W, et al. Cooperative forest fire surveillance using a team of small unmanned air vehicles[J]. *International Journal of Systems Sciences*, 2006, 37(6):351-360.
- [6] BREAD R W, MCLAIN T W, GOODRICH M A, et al. Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(6):911-922.
- [7] 吴青坡,周绍磊,尹高扬,等. 多无人机协同区域覆盖搜索算法的改进[J]. *电光与控制*, 2016, 23(1):80-84.
- [8] BAYEZIT I, FIDAN B. Distributed cohesive motion control of flight vehicle formations[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(12):5763-5772.
- [9] BELTA C, KUMAR V. Abstraction and control for groups of robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, 20(5):865-875.
- [10] LAWTON J R T, BEARD R W. A decentralized approach to formation maneuvers[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, 19(6):933-941.
- [11] MASTELLONE S, STIPANOVIC D, GRAUNKE C R, et al. Formation control and collision avoidance for multi-agent non-holonomic systems;theory and experiments[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2008, 27(1):107-126.
- [12] REN W. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2007, 1(2):505-512.
- [13] 邱华鑫,段海滨,范彦铭. 基于鸽群行为机制的多无人机自主编队[J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(10):1298-1304.
- [14] DONG X W, YU B C, SHI Z Y, et al. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles;theories and applications[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2015, 23(1):340-348.
- [15] DONG X W, ZHOU Y, REN Z, et al. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles with switching interaction topologies[J]. *Control Engineering Practice*, 2016(46):26-36.
- [16] 刘伟,周绍磊,祁亚辉,等. 有向切换通信拓扑下多无人机分布式编队控制[J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(10):1422-1427.
- [17] CARPENTER J R. Decentralized control of satellite formations[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2002, 12(2/3):141-161.
- [18] REN W. Second-order consensus algorithm with extensions to switching topologies and reference models [C]//*Proceedings of the American Control Conference*, New York: IEEE, 2007:1431-1436.
- [19] REN W. On consensus algorithms for double-integrator dynamics[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(6):1503-1509.
- [20] REN W. Multi-vehicle consensus with a time-varying reference state [J]. *System and Control Letters*, 2007, 56(7/8):474-483.