

一种基于蜂拥策略的分布式无人机编队控制方法

王品¹, 姚佩阳¹, 梅权¹, 王娜²

(1. 空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077;

2. 中国人民解放军 94402 部队, 山东 济南 250000)

摘要: 在无人机编队控制中, 传统的主从式集中编队控制方式需要大量信息交互, 对机间通信的要求较高。针对具有虚拟领航者的分布式无人机自组织编队跟踪问题, 运用有界蜂拥算法对无人机模型进行求解。首先, 提出了一种有界控制输入的蜂拥算法, 并对算法的稳定性进行了分析; 其次, 对无人机进行了建模, 提出了虚拟受力点的概念, 并对虚拟受力点进行受力分析, 将算法中的加速度转化成无人机径向速度与偏航速度的更新, 以达到分布式无人机编队自组织以及跟踪虚拟领航者的目的; 最后, 通过仿真验证了算法和模型的有效性。

关键词: 蜂拥; 有界控制输入; 自组织编队; 虚拟受力点

中图分类号: V249; V279

文献标识码: A

文章编号: 1002-0853(2016)02-0042-05

DOI:10.13645/j.cnki.f.d.20160110.003

Distributed formation control method of UAVs based on flocking

WANG Pin¹, YAO Pei-yang¹, MEI Quan¹, WANG Na²

(1. Information and Navigation College, AFEU, Xi'an 710077, China;

2. 94402 Unit of the PLA, Jinan 250000, China)

Abstract: In formation control of UAVs, traditional master-slave formation control method need lots of information interaction, and have high requirement for communication among UAVs. For the distributed self-formation of UAVs with virtual navigator, the UAV model was solved by the flocking algorithm with bounded input. Firstly, a distributed flocking algorithm with bounded input was designed, and stability was given. Then, model was built for UAV, and virtual force point was presented. This paper carried out force analysis of virtual force point to translate the acceleration in the algorithm to the refreshment of UAVs' forward velocity and angular velocity. So, all UAVs could organize the formation themselves and follow virtual navigator. At last, the validity of the algorithm and model was verified by simulation.

Key words: flocking; bounded input; self-organized formation; virtual force point

0 引言

近年来, 无人机(UAV)技术迅速发展, 无人机的应用得到普及。在军事领域中, 无人机广泛应用于侦察、搜索、攻击等任务。

在具有虚拟领航者的无人机编队控制中, 传统的主从式集中控制方式需要大量信息交互, 对通信要求较高, 且计算量大, 算法复杂。在分布式无人机编队中, 无人机根据所能探测到的周边无人机状态决定自身运动状态, 从而自主形成编队并到达目的地。在作战过程中, 无人机往往保持无线电静默, 相比于传统集中式主从控制方式, 分布式控制方式能

够保证编队的隐身性, 无人机只依靠自带有限被动传感器探测信息。在通信受限的情况下如何自组织编队受到广泛关注。因此, 研究分布式无人机的编队形成具有重要意义^[1-4]。

多无人机之间的编队协同是协同控制领域一个较为基本的问题。本文利用蜂拥控制策略解决分布式无人机编队的自组织问题。在自然界中, 蜂拥(flocking)是一种自组织行为, 它可以描述为一个群组自主有序地朝着一个方向移动^[5-11]。蜂拥策略在无人机编队自组织方面的应用具有重要意义。近年来, 生物学、物理学、控制等领域的学者从相应领域探索自然界的蜂拥现象, 取得了丰硕的成果。多智

收稿日期: 2015-07-23; 修订日期: 2015-11-30; 网络出版时间: 2016-01-10 14:09

基金项目: 国家自然科学基金资助(61273048)

作者简介: 王品(1992-)男, 山东莱阳人, 硕士研究生, 研究方向为有人/无人机协同、多智能体系统一致性;

姚佩阳(1960-)男, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 研究方向为指挥控制组织设计及运用。

能体的蜂拥行为得到国内外学者的广泛深入研究。1987年,Reynolds提出了蜂拥的Boid模型^[5],包括三条规则:(1)分离(separation),即与邻域内其他智能体避免碰撞;(2)聚合(cohesion),即与邻域内的智能体保持紧凑;(3)速度匹配(alignment),即与邻域内其他智能体保持速度一致。Olfati-Saber针对多智能体中的分裂现象,加入了虚拟领航者^[6]。在文献[6]所提算法中,所有智能体都能接收虚拟领航者的信息,也就是说所有智能体都是信息智能体。但在实际应用中,这个条件很难保证。文献[7]讨论了只有部分智能体为信息智能体的蜂拥控制,并证明了系统的稳定性。

基于以上背景,针对分布式无人机编队的形成与对虚拟领航者的跟踪问题,本文在文献[7]所提蜂拥控制策略的基础上,提出一种有界控制输入的蜂拥算法,并对其稳定性作了数学分析。在二维平面对无人机进行了建模,使具有有界输入的蜂拥算法能够应用于多无人机间的自组织编队控制,最后进行了仿真试验并对比分析验证了其有效性。

1 蜂拥算法描述

1.1 多智能体经典蜂拥控制描述

N 个智能体分布于二维欧氏空间中,假设每个智能体能够探测到半径为 r 范围内的智能体,则智能体系统之间的相互关系可以用无向图 $G(t) = (V, E(t), A)$ 表示。其中, $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ 为无向图 $G(t)$ 的节点集; v_i 代表第 i 个智能体; $E(t) = \{(v_i, p_j)\}$ 为智能体间的边集,若在 t 时刻第 i 个智能体与第 j 个智能体之间能够相互传递信息,则边 (v_i, p_j) 存在。根据无向图 $G(t)$ 可以得出邻接矩阵 $A = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 。当 t 时刻存在边 (v_i, p_j) 时, $a_{ij} = a_{ji} = 1$;否则, $a_{ij} = a_{ji} = 0$ 。无向图的拉普拉斯矩阵定义为 $L(t) = [l_{ij}] (i, j = 1, 2, \dots, N)$,其中 $l_{ii} = \sum_{j=1}^n a_{ij}$, $l_{ij} = -a_{ij} (i \neq j)$ 。

考虑 N 个智能体在二维平面运动,将智能体视为质点,则其动力学方程为:

$$\begin{aligned} \dot{q}_i(t) &= p_i(t), \dot{p}_i(t) = u_i(t) \\ (i &= 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $q_i(t)$ 为 N 个智能体 t 时刻的位置; $p_i(t)$ 为 N 个智能体 t 时刻的速度; $u_i(t)$ 为控制输入。控制输入的具体形式为:

$$u_i(t) = - \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{q_i} \psi_{\alpha}(\|q_j - q_i\|_{\sigma}) + \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(t) (p_j - p_i) + h_i [c_1(q_{\gamma} -$$

$$q_i) + c_2(p_{\gamma} - p_i)] \quad (2)$$

式中: $N_i(t) = \{i\} \cup \{j: a_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, N\}$ 为智能体 i 的邻居集; $A_{ij}(t) = [a_{ij}(t)]$ 为无向图 $G(t)$ 的邻接矩阵。式(2)第1项为人工势能梯度函数项,为实现智能体间的聚集和避撞,即Boid模型中的(1)、(2)条规则。 $q_{ij} = \|q_j - q_i\|$ 为智能体之间实际距离, d 为智能体间的理想距离,当 $q_{ij} = d$ 时,势能 $\psi_{\alpha}(\|q_j - q_i\|_{\sigma})$ 最小; $q_{ij} < d$ 时,智能体之间产生相互排斥的力; $q_{ij} > d$ 时,智能体之间产生相互吸引的力。具体人工势能函数 $\psi_{\alpha}(\|q_j - q_i\|_{\sigma})$ 的构造参见文献[6]。式(2)第2项为速度一致项,实现智能体之间的速度匹配,即Boid模型中的第(3)条规则;第3项为实现对虚拟领航者的跟踪,若第 i 个智能体为信息智能体,则 $h_i = 1$,若不是,则 $h_i = 0$,共有 M 个信息智能体, $M < N$ 。

1.2 经典算法改进

文献[6-7]的蜂拥控制算法,其控制输入 $u_i(t)$ 并无界限,但在实际应用中,控制输入并不能随意取值。本节对控制输入 $u_i(t)$ 加以约束,在协议底层加入矢量约束函数 $f(x)$,如果智能体加速度大小超过最大加速度,则智能体保持原加速度方向,加速度大小归为最大加速度。定义矢量函数 $f(x)$:

$$f(x) = \begin{cases} |u_{\max}|x/|x| & (|x| > |u_{\max}|) \\ x & (|x| \leq |u_{\max}|) \end{cases} \quad (3)$$

设计控制输入如下:

$$u_i(t) = f\left\{- \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{q_i} \psi_{\alpha}(\|q_j - q_i\|_{\sigma}) + \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(t) (p_j - p_i) + h_i [c_1(q_{\gamma} - q_i) + c_2(p_{\gamma} - p_i)]\right\} \quad (4)$$

定理1:考虑一个具有 N 个智能体的系统,其中 M 个智能体为信息智能体($M < N$)。智能体动力学方程如式(1),控制协议如式(4)。假设系统的初始能量 W 有界,则跟随智能体最终能够跟随虚拟领航者的航行,最终形成稳定群集运动。

证明:定义无人机与虚拟领航者的位置差及速度差为:

$$\hat{q}_{ij} = q_i - q_j, \hat{p}_{ij} = p_i - p_j \quad (5)$$

求导后得:

$$\dot{\hat{q}}_{ij} = \hat{p}_{ij}, \dot{\hat{p}}_{ij} = f(u_i) - \dot{p}_j \quad (6)$$

多无人机间的总势能为:

$$\psi_{\alpha i} = \sum_{j \in N_i} \psi_{\alpha ij}(\|q_{ij}\|_{\sigma}) + h_i \psi_{\alpha il}(\|q_{il}\|_{\sigma}) \quad (7)$$

式(7)第1项为无人机间的势能和,第2项为信息智能体与虚拟领航者间的势能,若第 i 架无人飞机为信息智能体,则 $h_i = 1$,否则 $h_i = 0$ 。

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left[\sum_{\substack{j \in N_i \\ j \neq l}} \psi_{\alpha ij}(\|q_{ij}\|_\sigma) + 2h_i \psi_{\alpha il}(\|q_{il}\|_\sigma) + \right. \\ \left. (p_i - p_l)^T (p_i - p_l) \right] \quad (8)$$

式中: N_i 为第 i 架无人机的邻域。

对能量方程进行求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \sum_{i=1}^N \left[\sum_{\substack{j \in N_i \\ j \neq l}} \dot{q}_i^T \nabla_{q_{ij}} \psi_{\alpha ij}(\|q_{ij}\|_\sigma) + \right. \\ &\quad \left. h_i \dot{q}_i^T \nabla_{q_{il}} \psi_{\alpha il}(\|q_{il}\|_\sigma) + \dot{q}_i^T (f(u_i) - \dot{q}_i) \right] \\ &= \sum_{i=1}^N \dot{q}_i^T \left[\sum_{\substack{j \in N_i \\ j \neq l}} \nabla_{q_{ij}} \psi_{\alpha ij}(\|q_{ij}\|_\sigma) + \right. \\ &\quad \left. h_i \nabla_{q_{il}} \psi_{\alpha il}(\|q_{il}\|_\sigma) + f(u_i) - \dot{q}_i \right] \\ &= - \sum_{i=1}^N \dot{q}_i^T \left[\sum_{j \in N_i} \nabla_{q_{ij}} \psi_{\alpha ij}(\|q_{ij}\|_\sigma) + q_i - f(u_i) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

结合式(3)的分段函数 $f(x)$, 式(9)可简化为:

$$\dot{W} \leq - \sum_{i=1}^N \dot{q}_i^T \dot{q}_i \quad (10)$$

$\dot{W} \leq 0$, 当且仅当 $\dot{q}_i = 0$ 时, $\dot{W} = 0$ 。

取正不变集 $\Omega = \{(\dot{q}_i, \hat{q}_{ij}) \mid W \leq c\}$ 中最大不变集 $\bar{\Omega} = \{(\dot{q}_i, \hat{q}_{ij}) \mid \dot{W} = 0\}$ 。

根据 LaSalle 不变集理论可知, 始于 Ω 内的每个解都会趋于最大不变集 $\bar{\Omega}$ 。由 $\dot{W} = 0$ 可知, 当系统达到稳定 $q_i = q_l$, 最终所有无人机的速度收敛到虚拟领航者的速度, 并且无人机群体内无碰撞, 形成稳定的蜂拥运动。

2 蜂拥算法在无人机上的应用

本节中, 考虑蜂拥算法在分布式无人机编队方面的应用问题。基本思路为: 将控制输入 $u_i(t)$ 在机身坐标系下转化为无人机的径向速度控制项 $V_{li}(t)$ 和偏航角速度控制项 $\omega_i(t)$ 。以此达到控制无人机间的编队以及对虚拟领航者的跟踪目的。

首先, 在机身坐标系中, 将无人机的速度 $V_i(t)$ 分解为无人机机身方向的径向速度 $V_{li}(t)$ 和垂直于机身方向的偏航速度 $V_{\omega i}(t)$ 。然后, 对无人机进行受力分析。假设所有无人机的质量均为 m , 将无人机所受到的作用力 F 分解为沿径向速度 $V_{li}(t)$ 方向的分力 F_{li} 和沿 $V_{\omega i}(t)$ 方向的力 $F_{\omega i}$ 。取逆时针方向为正方向(见图 1)。若对无人机质心 P_i 进行受力分析, 则无法产生使无人机转弯的力矩。因此, 提出虚拟受力点的概念, 从无人机质心起始, 取无人机机身前向方向距离 l 的虚拟点 P_r 作为受力分析点。

无人机的运动方向为 α , 所受合力的方向为 β , 则有:

$$F_{li} = F \cos(\beta - \alpha), F_{\omega i} = F \sin(\beta - \alpha) \quad (11)$$

$$x_{ir} = x_i + l \cos \alpha, y_{ir} = y_i + l \sin \alpha \quad (12)$$

沿机身方向的分力 F_{li} 作用于无人机产生径向加速度 a_{vi} , 垂直于机身方向的分力 $F_{\omega i}$ 作用于无人机将产生偏航加速度 $a_{\omega i}$, 如下式所示:

$$a_{vi} = F_{li}/m, a_{\omega i} = F_{\omega i}/m \quad (13)$$

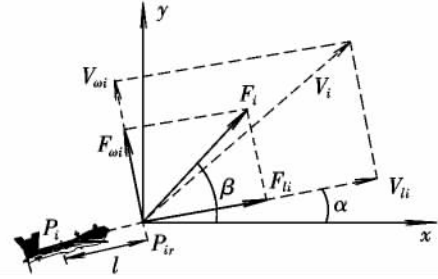


图 1 速度及合力的分解

Fig. 1 Dicomposition of force and velocity

在非常短的时间 Δt 内, 由动量守恒定律可得:

$$F \Delta t = mV(t + \Delta t) - mV(t) \quad (14)$$

将式(14)进行分解可得:

$$\left. \begin{aligned} F_{li} \Delta t &= mV_{li}(t + \Delta t) - mV_{li}(t) \\ F_{\omega i} \Delta t &= mV_{\omega i}(t + \Delta t) - mV_{\omega i}(t) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

因无人机 t 时刻偏航角速度为 $\omega_i(t)$, 所以式(15)转化为:

$$\left. \begin{aligned} F_{li} \Delta t &= mV_{li}(t + \Delta t) - mV_{li}(t) \\ F_{\omega i} \Delta t &= m\omega_i(t + \Delta t)l - m\omega_i(t)l \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

由此可得:

$$\left. \begin{aligned} V_{li}(t + \Delta t) &= \frac{F_{li} \Delta t}{m} + V_{li}(t) \\ \omega_i(t + \Delta t) &= \frac{F_{\omega i} \Delta t}{ml} + \omega_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

从无人机的实际飞行性能考虑, 无人机具有最大平飞速度 V_{\max} 、最小平飞速度 V_{\min} 以及最大偏航角速度 ω_{\max} 。因此径向速度 $V_{li}(t + \Delta t)$ 和偏航角速度 $\omega_i(t + \Delta t)$ 应满足以下约束条件:

$$V_{li} = \begin{cases} V_{\min} \frac{V_{li}(t + \Delta t)}{|V_{li}(t + \Delta t)|} & (|V_{li}(t)| < V_{\min}) \\ V_{li}(t + \Delta t) & (V_{\min} \leq |V_{li}(t)| \leq V_{\max}) \\ V_{\max} \frac{V_{li}(t + \Delta t)}{|V_{li}(t + \Delta t)|} & (|V_{li}(t)| > V_{\max}) \end{cases} \quad (18)$$

$$\omega_i = \begin{cases} \omega_{\max} \frac{\omega_i(t + \Delta t)}{|\omega_i(t + \Delta t)|} & (|\omega_i(t + \Delta t)| > \omega_{\max}) \\ \omega_i(t + \Delta t) & (|\omega_i(t + \Delta t)| \leq \omega_{\max}) \end{cases} \quad (19)$$

结合无人机建模过程,以及上一节中给出的改进蜂拥算法,可以使无人机只依据探测范围内的无人机信息以及虚拟领航者的信息达到自组织编队的目的。

3 仿真分析

假设在 $[(0, 50) \text{ m}, (0, 50) \text{ m}]$ 的范围内均匀分布有 20 架无人机,每架无人机能够探测到半径 20 m 内的无人机,无人机编队间理想距离为 10 m,取无人机最大加速度为 1 m/s^2 ,质量为 20 kg,最大速度为 20 m/s,最小速度为 2 m/s,最大偏航角速度为 2 rad/s 。每架无人机的初始速度大小在 $[2, 20] \text{ m/s}$ 间均匀分布,速度方向在 $[1, 1/2\pi]$ 间均匀分布。虚拟领航者横向和纵向速度均为 10 m/s,初始坐标为 $(50 \text{ m}, 50 \text{ m})$,时间间隔 $\Delta t = 0.01 \text{ s}$, P_i 与 P_r 之间的距离 $l = 0.1 \text{ m}$ 。仿真结果如图 2 ~ 图 6 所示。

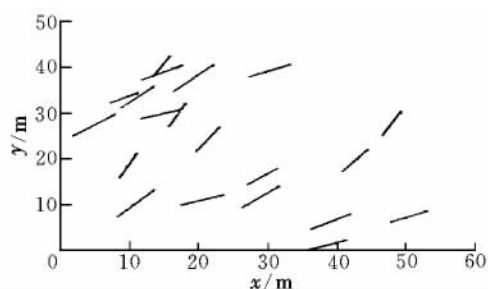


图2 $t = 0 \text{ s}$ 时刻无人机运动状态
Fig. 2 The state of UAVs with $t = 0 \text{ s}$

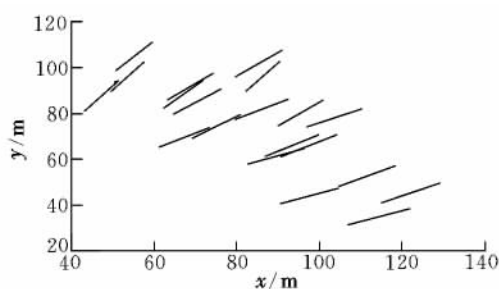


图3 $t = 5 \text{ s}$ 时刻无人机运动状态
Fig. 3 The state of UAVs with $t = 5 \text{ s}$

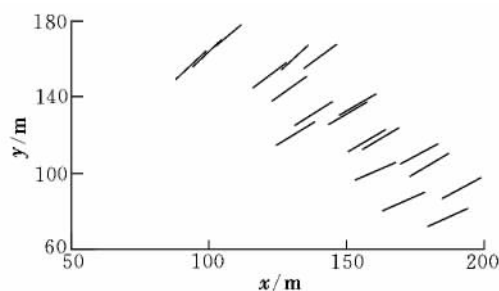


图4 $t = 10 \text{ s}$ 时刻无人机运动状态
Fig. 4 The state of UAVs with $t = 10 \text{ s}$

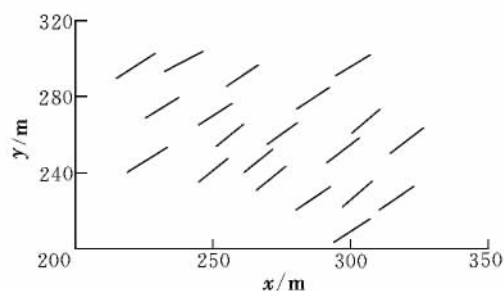


图5 $t = 20 \text{ s}$ 时刻无人机运动状态
Fig. 5 The state of UAVs with $t = 20 \text{ s}$

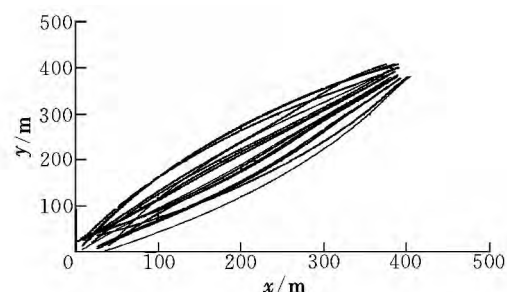


图6 无人机在二维空间的运动轨迹
Fig. 6 Two-dimensional flocking for UAVs

仿真结果表明,基于以上分布式算法与无人机模型,可以使无人机跟随虚拟领航者轨迹运动,并且无人机之间能够形成稳定的编队。验证了具有有界控制输入的蜂拥算法和无人机模型的有效性与合理性。

4 结束语

本文基于虚拟势场与一致性相结合的蜂拥策略,控制无人机的编队组织和对领航者的跟踪。与传统的集中式主从编队控制方法相比,该策略只需部分无人机能够接收领航者信息,其余无人机根据自身所探测到的邻域信息就能达到跟踪虚拟领航者的目的,具有结构简单、所需信息量小等优点。

参考文献:

- [1] 洪晔, 缪存孝, 雷旭升. 基于长机-僚机模式的无人机编队方法及飞行实验研究[J]. 机器人, 2010, 32(4): 505-509.
- [2] Sun N P. An alternative flocking algorithm with additional dynamic conditions [C]//Ninth International Conference on Broadband and Wireless Computing. Guangdong: IEEE, 2014: 491-496.
- [3] Samaneh H S. Semi-flocking algorithm for motion control of mobile sensors in large-scale surveillance systems [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 45(1): 129-135.

- [4] 吴文海, 许丽, 王奇. 小型无人直升机建模与鲁棒控制研究[J]. 飞行力学, 2013, 31(6): 526-529.
- [5] Low D J. Following the crowd [J]. Nature, 2000, 407(6803): 465-466.
- [6] Reza O S. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory [J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2006, 51(3): 401-420.
- [7] Su H S, Wang X F, Lin Z L. Flocking of multi-agents with a virtual leader [J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2009, 54(2): 293-307.
- [8] Pedrami R. Control and analysis of energetic swarm systems [C]//Proceedings of the American Control. New York: IEEE, 2007: 1894-1899.
- [9] Reynold C W. Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model [J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 25-34.
- [10] Liu Y, Passino K M, Polycarpou M. Stability analysis of one-dimensional asynchronous swarms [J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2003, 48(10): 1848-1854.
- [11] 娄柯, 齐斌, 穆文英, 等. 基于反馈控制策略的多智能体蜂拥控制 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(10): 1758-1763.

(编辑: 方春玲)

(上接第 31 页)

- [5] Lou Yiming, Christofides P D. Optimal actuator/sensor placement for nonlinear control of the Kuramoto-Sivashinsky equation [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(5): 737-745.
- [6] Chen K K, Rowley C W. H_2 optimal actuator and sensor placement in the linearised complex Ginzburg-Landau system [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 18(6): 241-260.
- [7] Alterman Z, Karal F C. Propagation of elastic waves in layered media by finite-difference methods [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(1): 367-398.
- [8] Barmish B R. New tools for robustness of linear systems [M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1992.
- [9] Carcione J M. The wave equation in generalized coordinates [J]. Geophysics, 1994, 59(3): 1911-1919.
- [10] Morton K W, Mayers D F. Numerical solution of partial differential equation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [11] Ackermann J, Bartlett A, Kaesbauer D, et al. Robust control: systems with uncertain physical parameters [M]. London: Springer, 1993.
- [12] Anderson B D O, Moore J B. Optimal control: linear quadratic methods [M]. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1990.
- [13] Skogestad S, Postlethwaite I. Multivariable feedback control: analysis and design [M]. second edition. Chichester: Wiley, Chichester, 2005.
- [14] Katsuhiko Ogata. Modern control engineering [M]. fifth edition. New Jersey: Prentice Hall, 2009.

(编辑: 方春玲)