自主协同系统的宏观稳定机理研究

茹常剑 魏瑞轩 祁晓明 车军 郭庆

Macroscopic stable mechanism of autonomous cooperative system

Ru Chang-Jian Wei Rui-Xuan Qi Xiao-Ming Che Jun Guo Qing

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, **64**, 100202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.100202
在线阅读 View online: http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.100202
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I10

自主协同系统的宏观稳定机理研究*

茹常剑[1)] 魏瑞轩[1)†] 祁晓明[1)] 车军[2)] 郭庆[1)]

1) (空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

2) (飞行控制一体化技术国家重点实验室, 西安 710065)

(2014 年 9 月 25 日收到; 2014 年 12 月 7 日收到修改稿)

为保证自主协同机群的内聚性, 实现多机的有效沟通和协作, 借鉴蜂王信息素机理, 抽象出跟踪型多无人机自主协同系统的宏观运动特征. 通过构造 Lyapunov 函数, 分析该系统的稳定性, 进而得到系统的稳定性判据. 仿真结果表明: 本文所提的稳定控制机理不仅能够保证自主协同系统的稳定性, 还能够通过调整相关控制参数有效地控制系统规模.

关键词: 无人机, 自主协同系统, 稳定机理

PACS: 02.30.Yy, 05.65.+b **DOI:** 10.7498/aps.64.100202

1 引 言

无人机自主协同系统面临的协同侦察、协同跟踪与协同打击等[1−4]作战任务需求决定了其作战使用方式是多机集群. 为了能够发挥无人机自主能力的队形, 无人机自主协同运动应采用随机队形和柔性队形等. 自主协同队形的随机性和柔性、无人机的自主性必然带来这样的难题: 怎样保证自主协同机群的内聚性, 实现多机的有效沟通和配合.

内聚性是群体自主协同系统的重要属性, 是保证无人机之间有效沟通和协同的基础. 当无人机执行协同任务时, 必须能够及时地形成相对稳定的动态队形[5]. 为了实现稳定的编队控制, 文献 [6] 设计了一种分布式重叠控制律, 用于控制一组互连的无人机. 这里, 为每架无人机 (UAV) 在扩展空间中设计一个反馈控制器, 然后将其转换到原有空间. 文献 [7] 研究了编队飞行系统的航空动力学耦合效应, 基于线性二次型调节器的方法, 在设计控制律时, 将轨迹跟踪控制和编队保持控制一同考虑. 文献 [8] 基于最优控制、导航和势场方法, 研究了如何形成一个编队问题. 从宏观层面而言, 无人机自主协同系统的稳定性取决于协同系统中无人机之间的相对位置关系, 以及这种关系随时间变化的趋势和速率. 为此, 这里弱化无人机的本体特性, 只关注协同系统中无人机的相对位置特性. 此时, 无人机就可以抽象为具有一定自主能力的智能体, 而无人机自主协同系统的稳定控制就转化为多智能体系统的稳定控制.

在多智能体系统稳定性研究方面, Sun[9]采用 LaSalle 不变性原理分析了多智能体动态系统群集运动的稳定性, 并给出了保证群集涌现的充分条件. Das 等[10]提出了一种新的集群动力学应用于自主的多智能体系统, 并构造 Lyapunov 函数分析了系统的稳定性. Monshizadeh 和 Trentlman[11]将多智能体系统认为是一组由线性的子系统构成的系统, 通过降阶的动态特性, 研究了系统的稳定性和同步控制问题. Goodwine 和 Antsaklis[12]提出了一种系统分解的策略, 可以将大系统分解为若干个小系统, 通过设计合适的控制协议, 保证了多智能体机器人系统的稳定性.

此外, 如果多个智能体的位置、速度等随着时间的推移最终趋于一致, 此时可称该多智能体系统是稳定的. 一致性问题[13,14]是当前多智能体协同控制领域的研究热点之一. Su 和 Wang[15]研究

* 中国航空科学基金 (批准号: 20135896027) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: rxwei369@sohu.com

了具有虚拟领导者的多智能体的群集行为, 通过改进 Olfati-Saber 算法, 保证了群集一致性. Xu 等[16]提出了一种分布式的基于观测器的一致性协议, 并采用改进的 Riccati 不等式和 Lyapunov 方法证明了系统的稳定性. Hu 等[17] 采用一种新的对比原理方法研究一类多智能体系统的一致性问题, 并给出了保证系统达到一致的充分条件.

本文针对跟踪型多无人机自主协同系统的稳定控制问题展开研究. 在建立跟踪型多无人机自主协同系统的宏观运动模型的基础上, 通过设计合适的 Lyapunov 函数, 分析系统的稳定性, 并得到其稳定性判据, 最后通过构建仿真场景来验证所提稳定机理的有效性.

2 问题描述与建模

当无人机自主协同系统执行协同目标跟踪和毁伤评估时, 多机协同系统有如下位置特征: 1) 聚合特性, 无人机群有保持在固定相对间隔 (该值为可调参数) 的趋势, 当无人机之间的距离大于该距离时, 会产生相互吸引作用, 偏离机群的无人机会自动回归, 以保证无人机之间的信息互通和运动整体性; 2) 排斥特性, 当无人机距离达到规避半径时 (该值为可调参数), 无人机之间产生排斥作用, 以防止碰撞, 当无人机探测到空中威胁时, 威胁源会对无人机产生排斥作用, 以防止无人机与其发生碰撞; 3) 中心牵引特性, 机群整体都围绕一个中心目标 (此对象可能是无人机, 也可能是地面目标等) 作为跟踪对象, 当此中心运动时, 机群跟踪这个运动中心, 呈现类似鱼群的柔性队形, 当此中心静止时, 机群跟踪这个运动中心, 呈现类似蜂群的柔性队形.

我们将具有基于中心牵引特性的交互协同的柔性队形自主协同系统称为跟踪型自主协同系统. 跟踪型自主协同系统的稳定性表征为: 自主协同的机群大小有一个上限, 无人机之间有一个共同的牵引中心, 并在此基础上实现信息、资源等的协同. 鉴于其与蜂群运动的相似性, 这里采用类似蜂王信息素的机理对跟踪型自主协同运动进行建模.

设三维空间中的 M 架无人机有一个需要跟踪的中心 T. 为了便于问题描述, 给出四个假设条件: 1) T 对无人机的吸引因素由子区域 T 的优先级以及以 T 为梯度极值点的函数的剖面决定; 2) B 为环绕无人机的集合, 无人机 i 的位置向量为 $\boldsymbol{x}^i \in \boldsymbol{R}^n$, σ 为吸引或排斥特征的表征函数, $\boldsymbol{x}^q \in \boldsymbol{R}^n$ 为中心 T 的位置; 3) 无人机之间没有吸引力, 有近距离排斥力; 4) 假设 $J_a^q(\boldsymbol{x}_i) < 0$ 表示总体趋势为吸引, $J_a^q(\boldsymbol{x}_i) = 0$ 表示总体趋势为平衡, $J_a^q(\boldsymbol{x}_i) > 0$ 表示在点 y 处总体趋势为排斥.

不失一般性, 这里使用高斯类型的势函数作为表征函数. 假定表征函数为

$$J_a^q(\boldsymbol{x}_i) = -\frac{b_q}{2}\exp\left(-\frac{\|x_i - x_q\|^2}{c_q}\right), \tag{1}$$

其中, b_q 是剖面的幅度参数, c_q 是剖面的伸展参数.

假设剖面中较低的值对应着较高的吸引力, 无人机受到中心 T 的吸引, 朝向 $J_a^q(\boldsymbol{x}_i)$ 值较低的方向运动, 即无人机 i 的位置是沿着 $-\nabla_{\boldsymbol{x}_i} J_a^q(\boldsymbol{x}_i)$ 进行变化的. $J_a^q(\boldsymbol{x}_i)$ 在 x_i 处的梯度为

$$\begin{aligned}&\nabla_{x_i} J_a^q(\boldsymbol{x}_i)\\ =&\frac{b_q}{c_q}(x_i - x_q)\exp\left(-\frac{\|x_i - x_q\|^2}{c_q}\right),\end{aligned} \tag{2}$$

该梯度将使无人机沿着 $-\nabla_{x_i} J_a^q(\boldsymbol{x}_i)$ 方向运动, 即沿着 $-(x_i - x_q)$ 方向进行运动.

为建模无人机的有限身长, 引入一个有限且非常短距离的无限制排斥反馈:

$$J_r^q(x_i) = \begin{cases}\left[\dfrac{c_1^q}{\|x_i - x_q\|^2} - \dfrac{c_2^q}{\|x_i - x_q\|}\right] + \dfrac{(c_2^q)^2}{4c_1^q}, \\ \quad \text{if } \|x_i - x_q\| \leqslant l_r^q = \dfrac{2c_1^q}{c_2^q} \quad x_i \neq x_q, \\ 0, \quad 其他,\end{cases} \tag{3}$$

其中, c_1^q 和 c_2^q 是正常数, l_r^q 是一个非常小的值. 附加标量 $(c_2^q)^2/4c_1^q$ 用于量测剖面, 以避免不连续性.

然后, 对 (3) 式求微分, 可以得到 $J_r^q(\boldsymbol{x}_i)$ 在 y 处的梯度:

$$\nabla_{x_i} J_r^q(\boldsymbol{x}_i) = \begin{cases}-(x_i - x_q)\left[\dfrac{2c_1^q}{\|x_i - x_q\|^4} - \dfrac{c_2^q}{\|x_i - x_q\|^3}\right], \\ \quad \text{if } \|x_i - x_q\| \leqslant l_r^q \quad x_i \neq x_q, \\ 0, \quad 其他.\end{cases} \tag{4}$$

综合表征函数 (1) 和 (2), 可以得到跟踪型自主协同系统的跟踪中心 T 的总的吸引排斥强度:

$$J^q(\boldsymbol{x}_i) = J_a^q(\boldsymbol{x}_i) + J_r^q(\boldsymbol{x}_i). \tag{5}$$

由于 $J_a^q(\boldsymbol{x}_i)$ 和 $J_r^q(\boldsymbol{x}_i)$ 在 (5) 式中的位置是对称的, 所以 $J^q(\boldsymbol{x}_i)$ 关于距离中心 T 的距离 $\boldsymbol{x}_q$ 是对称的, 只取决于与中心的距离 $\|x_i - x_q\|$. 考虑无人

机之间的安全距离, 与中心T对无人机的排斥情形类似, 可以得到无人机之间的排斥势函数:

$$
J_r^i(\boldsymbol{x}_i)=
\begin{cases}
\left[\dfrac{c_1^q}{\|x_i-x_j\|^2}-\dfrac{c_2^q}{\|x_i-x_j\|}\right]+\dfrac{(c_2^q)^2}{4c_1^q}, \\
\qquad \text{if}\ \|x_i-x_j\|\leqslant l_r^i=\dfrac{2c_1^q}{c_2^q}\quad x_i\neq x_j, \\
0, \quad 其他.
\end{cases}
\tag{6}
$$

然后, 对环绕无人机的运动状态进行建模. 无人机是沿着中心T的总的吸引排斥剖面的负梯度方向运动的, 同时还要考虑到无人机之间的防碰撞. 图1为跟踪型自主协同系统中无人机所受的吸引和排斥关系示意图.

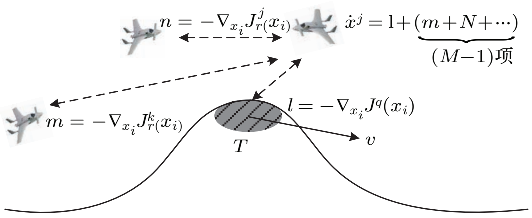

图1　自主协同系统中无人机所受的吸引和排斥关系示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the attractive and repulsive relationship subjected by each UAV among the cooperative system.

不考虑平台的本体运动特性, 基于(2), (4), (5)和(6)式, 建立如下的平台运动方程为

$$
\begin{aligned}
\dot{x}_i=&-\nabla_{x_i}J_r^q(x_i)-\sum_{j\in B,j\neq i}\nabla_{x_i}J_r^j(x_i)\\
=&-g_q(\|x_i-x_q\|)(x_i-x_q)\\
&+\sum_{j\in B,j\neq i}g_i(\|x_i-x_j\|)(x_i-x_j),
\end{aligned}
\tag{7}
$$

其中

$$
g_q(\|x_i-x_q\|)
=\begin{cases}
\dfrac{b_q}{c_q}\exp\left(-\dfrac{\|x_i-x_q\|^2}{c_q}\right)\\
-\left[\dfrac{2c_1^q}{\|x_i-x_q\|^4}-\dfrac{c_2^q}{\|x_i-x_q\|^3}\right], \\
\qquad \text{if}\ \|x_i-x_q\|\leqslant l_r^q, \\
\dfrac{b_q}{c_q}\exp\left(-\dfrac{\|x_i-x_q\|^2}{c_q}\right), \quad 其他,
\end{cases}
\tag{8}
$$

$$
g_i(\|x_i-x_j\|)
=\begin{cases}
\dfrac{2c_1^q}{\|x_i-x_j\|^4}-\dfrac{c_2^q}{\|x_i-x_j\|^3}, \\
\qquad \text{if}\ \|x_i-x_j\|\leqslant l_r^i, \\
0, \quad 其他.
\end{cases}
\tag{9}
$$

这里, 假定对于所有的$i\in B$, 有$c_1^i=c_1$和$c_2^i=c_2$. 这意味着对于所有的$i\in B$, $g_i(\|y\|)=g(\|y\|)$. B是M架无人机组成的集合. 设中心安全距离为δ_q, 则有

$$
\begin{cases}
g_q(\|x_i-x_q\|)<0, & \text{if}\ \|x_i-x_q\|<\delta_q, \\
g_q(\|x_i-x_q\|)>0, & \text{if}\ \|x_i-x_q\|>\delta_q.
\end{cases}
\tag{10}
$$

3　稳定性分析

本节主要通过构造Lyapunov函数, 分析该系统的稳定性, 得到其稳定判据. 为此, 定义第i架无人机和中心T之间的距离为$e^i=x_i-x_q$. 假设中心T是静止的, 即$\dot{x}_q=0$, 可以得到:

$$
\begin{aligned}
\dot{e}^i=&-g_q(\|e^i\|)e^i\\
&+\sum_{j\in B,j\neq i}g(\|x_i-x_j\|)(x_i-x_j).
\end{aligned}
\tag{11}
$$

构造第i架无人机的Lyapunov函数为: $V_i=\|e^i\|^2/2=e^{i\mathrm{T}}e^i/2$, 并对其沿着运动方向进行微分, 可得

$$
\begin{aligned}
\dot{V}_i=&-g_q(\|e^i\|)\|e^i\|^2\\
&+\sum_{j\in B,j\neq i}g(\|x_i-x_j\|)(x_i-x_j)^{\mathrm{T}}e^i.
\end{aligned}
\tag{12}
$$

由于跟踪型自主协同系统在吸引排斥特征剖面的中央附近处有一个无限的极值点, 当$\dot{x}_i\to 0$时, 有$\dot{V}\to 0$. 于是, 令$\dot{V}$为0 (对应于最终的平衡), 即满足

$$
\begin{aligned}
\dot{V}_i=&-g_q(\|e^i\|)\|e^i\|^2\\
&+\sum_{j\in B,j\neq i}g(\|x_i-x_j\|)(x_i-x_j)^{\mathrm{T}}e^i\\
=&\ 0.
\end{aligned}
\tag{13}
$$

由(13)式可得, 对于所有的i, 都有下式成立:

$$
\begin{aligned}
&g_q(\|e^i\|)\|e^i\|^2\\
=&\sum_{j\in B,j\neq i}g(\|x_i-x_j\|)(x_i-x_j)^{\mathrm{T}}e^i.
\end{aligned}
\tag{14}
$$

基于所构造的Lyapunov函数, 可以得到如下两个关于跟踪型自主协同系统的重要定理.

定理1　对于无人机符合(7)式运动特征的跟踪型自主协同系统中, 如果无人机i在趋于平衡的

过程中处在中心T的排斥范围内, 则当且仅当至少有一个无人机j 在其后方以阻碍其远离中心T, 才能使得在平衡的过程中, $\|e^i\|$趋近于平衡, 无人机环聚在中心T的周围, 系统趋于稳定.

证明 如果$g_q\left(\|e^i\|\right) < 0$(例如$\|e^i\| < \delta_q$), 那么至少有一架无人机$j$, 使$\|x_i - x_j\| < l_r$, 因为对于$\|x_i - x_j\| \geqslant l_r$, 有$g(\|x_i - x_j\|) = 0$], 并且使$(x_i - x_j)^{\mathrm{T}} e^i < 0$. 由于$(x_i - x_j) = (e^i - e^j)$, 则有$(e^i - e^j)^{\mathrm{T}} e^i < 0$, 或$\|e^i\|^2 < e^{j\mathrm{T}} e^i$. 经推导得到

$$\|e^i\| < \gamma_{i,j}\|e^j\| \leqslant \|e^j\|, \tag{15}$$

其中, $\gamma_{i,j}$是e^i和e^j夹角的余弦. 由于$\gamma_{i,j}$是余弦, 且$\|x_i - x_j\| < l_r \leqslant \delta_q$(假定中心$T$的排斥范围不小于无人机的排斥范围), 且$\|e^i\| > \delta_q$, $\|e^j\| > \delta_q$, 所以即使当无人机i和无人机j与中心T并不总是在一条线上, 也有$0.5 < \gamma_{i,j} \leqslant 1$, 且当$\|e^i\|$较大时, $\gamma_{i,j} \approx 1$. 根据余弦定理, 可以得到:

$$\begin{aligned}&\|e^i\|^2 + \|e^j\|^2 - 2\gamma_{i,j}\|e^j\|\|e^i\| \\ &= \|x_i - x_j\|^2 < l_r^2.\end{aligned} \tag{16}$$

由于$\gamma_{i,j} \leqslant 1$, 于是有

$$\|e^i\|^2 + \|e^j\|^2 - 2\|e^j\|\|e^i\| < l_r^2. \tag{17}$$

由于$\|e^i\| < \|e^j\|$, 故从(17)式可以得到

$$\|e^j\| - \|e^i\| < l_r. \tag{18}$$

根据(15)和(18)式, 可以得到

$$\|e^i\| < \|e^j\| - \|e^i\| + l_r. \tag{19}$$

由几何关系可知, 无人机i后方存在至少一架无人机j在邻近排斥范围内, 会阻碍其远离中心T. 由于定理1的证明过程可逆, 所以结论成立.

证毕.

定理2 对于无人机符合(7)式运动特征的跟踪型自主协同系统中, 如果无人机i 在趋于平衡的过程中远离中心T, 则当且仅当至少有一个无人机j在其前方以吸引其趋近中心T, 才能使得在平衡的过程中, $\|e^i\|$趋近于平衡, 无人机环聚在中心T的周围, 系统趋于稳定.

证明 如果$g_q\left(\|e^i\|\right) > 0$(例如$\|e^i\| > \delta_q$), 则等式右边为正. 通过类似的推理可知, 至少有一架无人机j, 使得$\|x_i - x_j\| < l_r$, 且有$\left(x^i - x^j\right)^{\mathrm{T}} e^i > 0$成立. 通过与定理1中的类似分析过程, 可以得到

$$\|e^i\| > \gamma_{i,j}\|e^j\|. \tag{20}$$

对e^j使用余弦定理, 可以得到:

$$\begin{aligned}\|e^j\|^2 &= \|e^i\|^2 + \|x_i - x_j\|^2 - 2\left(x_i - x_j\right)^{\mathrm{T}} e^i \\ &> \left(\|e^i\| - \|x_i - x_j\|\right)^2.\end{aligned} \tag{21}$$

由于$\|e^i\| > \delta_q$, $\|x_i - x_j\| < l_r$, 假设$\delta_q \geqslant l_r$, 则有$\|e^i\| > \|x_i - x_j\|$, 所以可得

$$\|e^j\| > \|e^i\| - \|x_i - x_j\| > \|e^i\| - l_r. \tag{22}$$

结合不等式(20)和(22), 可以得到:

$$\|e^i\| - l_r < \|e^j\| < \frac{1}{\gamma_{i,j}}\|e^i\|. \tag{23}$$

由几何关系可知, 无人机i前方存在至少一架无人机j, 会阻碍其远离中心T. 由于定理2的证明过程可逆, 所以结论成立.

证毕.

根据定理1和定理2, 可以推断出: 对于散布在中心T周围的无人机, 会在两个机理的作用下, 最终形成围绕中心T的稳定的自主协同系统. 因此, 定理1和定理2不仅给出了自主协同系统的稳定性判据, 也给出了其稳定性条件.

4 仿真与结果分析

首先研究跟踪型自主协同运动的稳定性.

假定有20架无人机执行目标跟踪任务. 无人机的速度范围为$[50, 100]$ m·s^{-1}. 无人机安全距离$l_r = 200$ m, 即在有机间吸引力时$c_1/c_2 = 200$. 目标在外部环境形成的特征由高斯函数表征, 如图2所示, 切图中的箭头为剖面梯度, 函数梯度值在靠近波峰附近较大, 但在峰顶附近又较小.

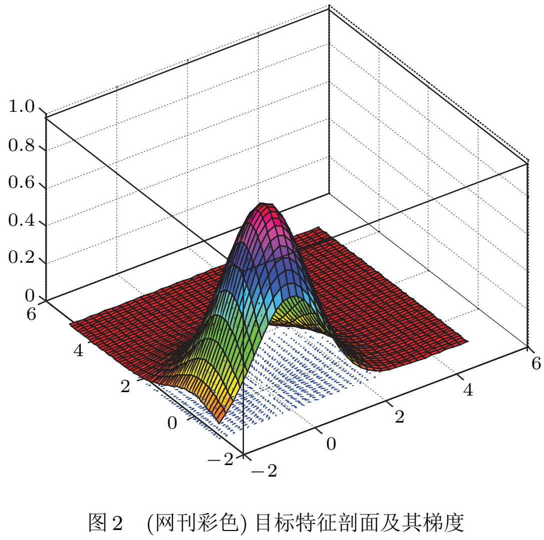

图2 (网刊彩色) 目标特征剖面及其梯度

Fig. 2. (color online) Feature section of the target and its gradient.

跟踪型自主协同系统的中心有一个安全距离 δ_q, 设 $\delta_q = 1000$ m. 当无人机进入这个距离内时, 中心会给其一个巨大的排斥力, 驱使其远离. 因此, 外部环境给无人机的作用力是这样的: 当与中心距离大于 δ_q 时, 环境作用力按照图2计算, 为吸引力; 当与中心距离不小于 δ_q 时, 中心会在图2中剖面形成的吸引力上加载一个强排斥力, 环境形成的合力为排斥力.

无人机受到的外部环境的总作用力见图3, 较好地体现了上述特征. 图4为无人机的运行轨迹. 无人机的运动具有很强的随机性, 但不会无限制地脱离中心目标. 同时, 参与自主协同飞行的无人机会保持在相对目标 δ_q 的距离之外. 因此, 随机运动的无人机既没有脱离控制范围, 也能规避碰撞, 故系统是稳定的.

其次研究几个关键参数对搜索型自主协同系统稳定规模的影响.

采用上述对两个参数 $\delta_q, l_r(c_1/c_2)$ 的赋值, 依次变换其中一个参数, 检验该参数的变化对自主协同运动稳定规模的影响. 图5为中心目标安全距离 δ_q 的变化对系统规模的影响, 结果表明系统稳定时的平均规模会随着 δ_q 的增大而增大. 图6为无人机安全距离 l_r 的变化对系统规模的影响, 结果表明系统稳定时的平均规模会随着 l_r 的增大而增大.

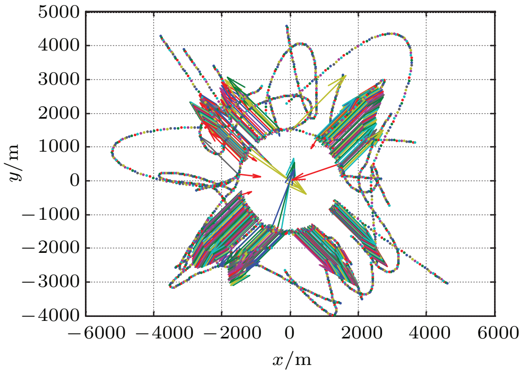

图3 (网刊彩色) 自主协同系统中无人机所受的总的环境应力

Fig. 3. (color online) Total environmental force subjected by each UAV among autonomous cooperative system.

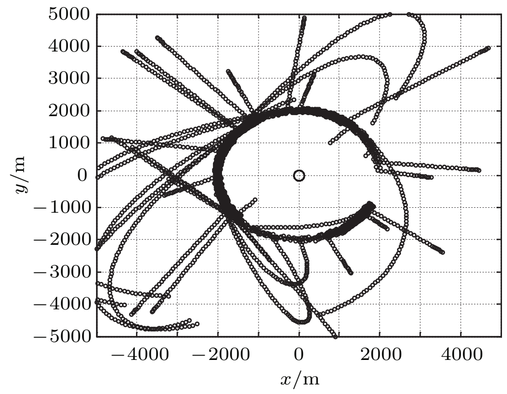

图4 自主协同系统中无人机的运动轨迹

Fig. 4. Motion trajectory of each UAV among the autonomous cooperative system.

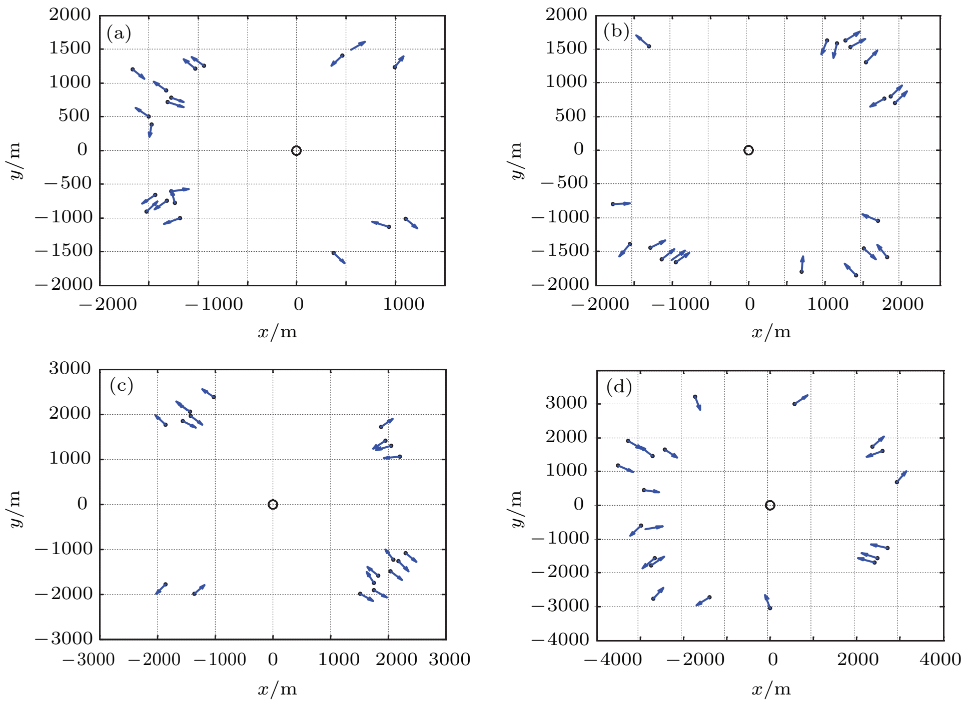

图5 δ_q 变化对系统规模的影响 (a) $\delta_q = 1500$; (b) $\delta_q = 2000$; (c) $\delta_q = 2500$; (d) $\delta_q = 3000$

Fig. 5. Effect on the scale of system due to the change of δ_q: (a) $\delta_q = 1500$; (b) $\delta_q = 2000$; (c) $\delta_q = 2500$; (d) $\delta_q = 3000$.

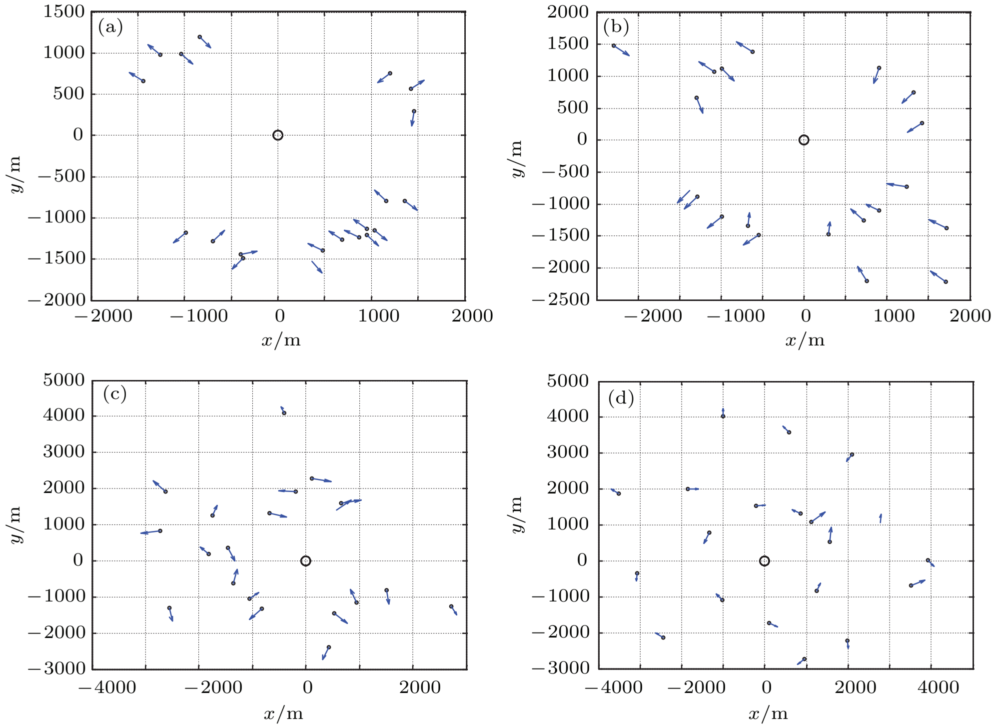

图 6 l_r 变化对系统规模的影响 (a) $l_r = 100$; (b) $l_r = 200$; (c) $l_r = 400$; (d) $l_r = 600$

Fig. 6. Effect on the scale of system due to the change of l_r: (a) $l_r = 100$; (b) $l_r = 200$; (c) $l_r = 400$; (d) $l_r = 600$.

综上可知, 本文所提面向自主协同跟踪系统的宏观稳定控制机理是有效的, 并且可以通过相关参数有效控制系统稳定时的规模.

5 结 论

本文研究了跟踪型自主协同系统的宏观稳定控制问题, 通过构造Lyapunov函数分析了系统的稳定性, 得到了系统的两个稳定性判定定理. 数值仿真验证了所提稳定控制机理不仅可以实现跟踪型自主协同系统的稳定性, 而且还可以通过相关参数有效地控制系统稳定时的规模.

参考文献

[1] No T S, Kim Y, Tahk M J, Jeon G E 2011 *Aerosp. Sci. Technol.* **15** 431

[2] Pablo L, Seng K G, Eva B P, Gonzalo P 2014 *Inform. Sci.* **282** 92

[3] Manathara J G, Sujit P B, Beard R W 2011 *J. Intellig. Robot. Syst.* **62** 125

[4] Sun T Y, Huo C L, Tsai S J, Yu Y H, Liu C C 2011 *Expert Syst. Appl.* **38** 10036

[5] Zhang B C, Liu W Q, Mao Z L 2014 *Automatica* **50** 809

[6] Stipanovic D M, Inalhan G, Teo R, Tomlin C J 2004 *Automatica* **40** 1286

[7] Giulietti F, Innocenti M, Napolitano M, Pollini L 2005 *Aerosp. Sci. Technol.* **9** 68

[8] Paul T, Krogstad T, Gravdahl J 2008 *Simul. Modell. Practice Theory* **16** 1453

[9] Sun Y G 2013 *Nonlinear Analysis: Real World Applications* **14** 1075

[10] Das S, Goswami D, Mukherjee S 2014 *Engin. Appl. Artific. Intellig.* **30** 189

[11] Monshizadeh N, Trentelman H L 2013 *Syst. Control Lett.* **62** 1

[12] Goodwine B, Antsaklis P 2013 *Automatica* **49** 3158

[13] Ji L H, Liao X F 2013 *Chin. Phys. B* **22** 040203

[14] Xie Y Y, Wang Y, Ma Z J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 040202 (in Chinese) [谢媛艳, 王毅, 马忠军 2014 物理学报 **63** 040202]

[15] Su H S, Wang X F 2009 *IEEE Trans. Autom. Control* **54** 293

[16] Xu X L, Chen S Y, Huang W, Gao L X 2013 *Neurocomputing* **118** 334

[17] Hu H X, Liu A D, Xuan Q, Yu L, Xie G M 2013 *Syst. Control Lett.* **62** 1125

Macroscopic stable mechanism of autonomous cooperative system*

Ru Chang-Jian[1)] Wei Rui-Xuan[1)†] Qi Xiao-Ming[1)] Che Jun[2)] Guo Qing[1)]

1) (*Institute of Aeronatics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China*)

2) (*Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, FACRI, Xi'an 710065, China*)

(Received 25 September 2014; revised manuscript received 7 December 2014)

Abstract

The cohesiveness of autonomous cooperative system is the basis of achieving the effective communication and cooperation among the multiple vehicles. Therefore, the biosphere mechanism of queen mandibular pheromone is used for reference in this paper, to abstract the macro motion characteristic of multiple unmanned aerial vehicles autonomous cooperative tracking system. Then, some Lyapunov functions are constructed to analyze the stability of this system, thus obtaining its judgment criterion of stability. Finally, the simulation is given to verify the effectiveness of the proposed stable mechanism. The results show that the proposed stable mechanism not only can ensure the stability of autonomous cooperative system, but also can control the scale of this system effectively by adapting some relevant control parameters.

Keywords: autonomous cooperative system, unmanned aerial vehicle, stable mechanism

PACS: 02.30.Yy, 05.65.+b **DOI:** 10.7498/aps.64.100202

* Project supported by the National Aviation Science Foundation of China (Grant No. 20135896027).

† Corresponding author. E-mail: rxwei369@sohu.com