

DOI: 10.11992/tis.201904052

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20191205.1011.004.html>

## 鸽群交互模式切换模型及其同步性分析

邱华鑫<sup>1,2</sup>, 段海滨<sup>1,3</sup>, 范彦铭<sup>4</sup>, 邓亦敏<sup>1</sup>, 魏晨<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国空间技术研究院 钱学森空间技术实验室, 北京 100094; 3. 鹏城实验室, 深圳 518000; 4. 中国航空工业集团公司 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035)

**摘要:** 以原鸽为研究对象, 归纳出其群体归巢机制中的双模式决策原则、模式切换原则与优势个体原则。模拟双模式决策原则设定双模式邻居集合与对齐权重, 模拟模式切换原则设定基于群体轨迹曲率的切换规则, 模拟优势个体原则设定高层级个体集合, 进而建立鸽群交互模式切换模型。基于 LaSalle 不变集理论给出鸽群系统以无碰撞、同步编队抵近目标的条件。采用蒙特卡罗仿真分析不同参数对模型特性的影响, 即不同个体数目、高层级个体数目以及最大速率均可保证模型的同步性。

**关键词:** 鸽群; 群体智能; 群集运动; 异构群体; 层级交互模式; 平等交互模式; 交互模式切换; 同步性

**中图分类号:** TP13; V249.122    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1673-4785(2020)02-0334-10

**中文引用格式:** 邱华鑫, 段海滨, 范彦铭, 等. 鸽群交互模式切换模型及其同步性分析 [J]. 智能系统学报, 2020, 15(2): 334-343.

**英文引用格式:** QIU Huaxin, DUAN Haibin, FAN Yanming, et al. Pigeon flock interaction pattern switching model and its synchronization analysis[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2020, 15(2): 334-343.

## Pigeon flock interaction pattern switching model and its synchronization analysis

QIU Huaxin<sup>1,2</sup>, DUAN Haibin<sup>1,3</sup>, FAN Yanming<sup>4</sup>, DENG Yimin<sup>1</sup>, WEI Chen<sup>1</sup>

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China; 2. QIAN Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 3. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518000, China; 4. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110035, China)

**Abstract:** Taking *Columba livia* as the research object, we summarized the dual-mode decision-making, mode-switching, and dominant individual principles in the homing mechanism of pigeons to establish a pigeon flock interaction pattern switching model. In the model, the neighbor set and alignment weight in dual mode were set by mimicking the dual-mode decision-making principle, the switching rule based on the curvature of the group trajectory was set by mimicking the mode-switching principle, and the collection of higher-rank individuals was set by mimicking the dominant individual principle. On the basis of LaSalle's invariant set theory, the conditions under which the pigeon flock can approach the target with collision-free and synchronous formations are given. Monte Carlo simulation was used to analyze the influence of different parameters on the model characteristics. Results show that the synchronization of the model can be ensured by setting the appropriate number of individuals, number of higher-rank individuals, and maximum velocity.

**Keywords:** pigeon flock; swarm intelligence; collective motion; heterogeneous group; hierarchical interaction pattern; egalitarian interaction pattern; interaction pattern switching; synchronization

收稿日期: 2019-04-22. 网络出版日期: 2019-12-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61803011, 91948204); 中国博士后科学基金资助项目.

通信作者: 段海滨. E-mail: [hbduan@buaa.edu.cn](mailto:hbduan@buaa.edu.cn).

鸟类群体的有组织飞行 (organized flight) 大致可分为两种方式<sup>[1]</sup>: 线性编队 (line formation) 和群集编队 (cluster formation)。水禽等大型鸟类主要

采用线性编队方式飞行,研究此种方式的研究者主要关注线性编队的成因。鸽子、乌鸦等小型鸟类主要采用群集编队方式飞行,研究此种方式的研究者主要关注群集同步的机理<sup>[2-5]</sup>。

采用群集编队方式飞行的鸟类其单体智能水平并不高,但无论群集规模大小,可实现群体同步且迅速的飞行转向。在大型群集编队方面,Ballerini等<sup>[6]</sup>通过立体测量和计算机视觉技术重建同一群体中2 600只欧椋鸟(*European starlings/Sturnus Vulgaris*)的三维位置后发现鸟群个体间交互依赖于拓扑距离(topological distance),而并非大多数理论模型所假设的模式距离(metric distance),即个体与固定数量(6~7只)的邻居进行交互,而非与固定模式距离内的邻居进行交互。在小型群集编队方面,Nagy等<sup>[7]</sup>通过高精度微型全球定位系统(global positioning system, GPS)跟踪记录10只原鸽(*Columba Livia/homing pigeon/domestic pigeon*)的飞行,采用统计物理学方法以系列相关函数定义成对交互中的领导关系,进而发现一个清晰的层级制度:鸽群内个体的平均空间位置与其在层级网络中的飞行领导等级(flight leadership rank)密切相关。从进化角度来说,层级交互模式(hierarchical interaction pattern)比之于平等交互模式(egalitarian interaction pattern)信息传递更快,效率更高<sup>[8]</sup>;此外,具有特定社会结构的层级交互模式可补偿个体导航误差,提高群体导航精度<sup>[9]</sup>;需要说明的是,在不考虑领导者切换的条件下,层级网络可简化为双层领导跟随结构,即仅存在唯一领导者,其余跟随者均以特定时延复制领导者运动,该结构可节约个体运动和通信消耗<sup>[10]</sup>。与仅由攻击和觅食等个体体能特征决定的啄序等级(pecking order rank)不同<sup>[11]</sup>,飞行领导等级是个体不断优化自身利益的结果,亦是领导、学习以及个人能力综合作用的结果<sup>[12]</sup>。个体速度<sup>[13-14]</sup>、路径保真度(route fidelity)<sup>[15]</sup>以及飞行经验<sup>[16-17]</sup>均可能决定成对领导关系,进而影响个体飞行领导层级:个体受前方邻居的影响往往高于后方邻居,即飞行速度慢的个体需要牺牲方向决策权来跟随快速个体;路径差异越小表示路径保真度越高,单飞时保真度高的个体在成对飞行时较易成为领导者;具有更多飞行经验的鸽子以较大概率可处于在飞行领导层级中较高的层级。

综上所述,以群集编队飞行时,鸟群内部存在平等交互和层级交互两种模式。平等交互模式下,鸟类个体交互范围或为固定半径内的邻居个

体,或为最近固定数量的邻居个体,即服从固定邻居范围(fixed neighborhood region, FNR)模型或固定邻居数量(fixed number of neighbors, FNN)模型。层级交互模式下,鸟类个体跟随具有较高飞行领导层级的其他个体进行飞行。为深入研究自由飞行中鸽群两种交互模式的切换关系,Zhang等<sup>[18-19]</sup>基于Nagy等<sup>[7]</sup>记录的鸽群自由飞行实验数据,发现鸽群实际上切换采用上述两种交互模式,即当原鸽个体沿平滑轨迹运动时,其飞行方向趋向跟随邻居平均,而当突然转弯或轨迹曲折时,趋向跟随领导者。

至此,可归纳原鸽归巢机制如下。1) 双模式决策原则:鸽群在迁徙过程中,群体飞行决策采用平等交互模式或层级交互模式,平等交互模式下,原鸽个体的飞行决策彼此间相互影响,层级交互模式下,存在至少一个原鸽个体,会对其交互范围内的其他原鸽个体的飞行决策产生较大影响。2) 模式切换原则:异构原鸽群体的模式切换与鸽群轨迹曲率呈现一定的关联,当鸽群飞行状态不够平稳时,原鸽个体采用层级交互模式,反之采用平等交互模式。3) 优势个体原则:异构原鸽群体内存在可能因某些因素导致的某个或某几个优势原鸽个体,当鸽群处于层级交互模式时,非优势原鸽个体会偏重依赖该类优势个体进行飞行决策。

本文在上述原鸽归巢机制分析基础上,建立鸽群交互模式切换模型,模型对应原鸽归巢机制中的双模式决策原则定义了平等交互模式与层级交互模式下的邻居集合与对齐权重,对应模式切换原则定义了由群体轨迹曲率触发的交互模式切换规则,对应优势个体原则将可获知目标位置和速度信息的原鸽个体视为高层级个体。基于LaSalle不变集理论<sup>[20]</sup>给出鸽群系统可避免碰撞、实现速度渐近同步、相对位置趋于期望并抵达目标的条件。以序参量衡量鸽群同步性,以序参量衡量鸽群同步性,采用蒙特卡罗仿真测试个体数目、高层级个体数目、个体最大速率对鸽群抵达目标时间以及序参量的影响。

## 1 鸽群交互模式切换模型

考虑 $N$ 只原鸽在三维欧式空间中飞行,每个原鸽个体 $i$ 可视作一个质点,其动力学模型如式(1)所示:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{v}_i \\ \mathbf{m}_i \dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{u}_i \end{cases}, i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{u}_i \in \mathbf{R}^{D \times 1}$  分别为原鸽个体  $i$  的位置向量、速度向量以及控制输入,  $D$  为上述 3 个向量的维数;  $\|\mathbf{v}_i\|_2 \leq V_{\max}$ ,  $V_{\max} > 0$  为原鸽个体最大速率;  $m_i$  为原鸽个体  $i$  的质量。

定义鸽群中可获知目标  $T$  位置和速度信息的原鸽个体为高层级个体(即优势个体), 即原鸽个体  $i \in \text{Upper}$ , 其中  $\text{Upper}$  为高层级原鸽个体集合, 其可观测目标标识符  $\text{infor}_i=1$ ; 余下原鸽个体为低层级个体, 可观测目标标识符  $\text{infor}_i=0$ , 其中原鸽个体  $i=1, 2, \dots, N$  且  $i \notin \text{Upper}$ 。原鸽个体依据鸽群飞行状态选用不同交互模式: 交互模式标识符  $\text{mode}_i=0$ , 表示原鸽个体处于平等交互模式; 交互模式标识符  $\text{mode}_i=1$ , 表示原鸽个体处于层级交互模式。当群体轨迹曲率  $\bar{K}^t$  较小时, 原鸽个体处于平等交互模式, 当群体轨迹曲率  $\bar{K}^t$  较大时, 原鸽个体处于层级交互模式, 交互模式标识符  $\text{mode}_i$  与群体轨迹曲率  $\bar{K}^t$  间的关系如式(2)所示:

$$\text{mode}_i = \begin{cases} 0, & \bar{K}^t < K_{\text{switch}} \\ 1, & \bar{K}^t \geq K_{\text{switch}} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $K_{\text{switch}}$  为轨迹曲率模式切换阈值。由式(2)可知, 当  $K_{\text{switch}}=0$ , 个体始终处于层级交互模式; 当  $K_{\text{switch}}=\infty$ , 个体始终处于平等交互模式。

原鸽个体在不同交互模式下, 其交互范围并不相同。首先, 定义平等交互模式下原鸽个体  $i$  的邻居集合  $N_i^1$  如式(3)所示:

$$N_i^1(t_k) = \begin{cases} \{j \mid \|\mathbf{x}_{ij}\| \leq R_{\text{comm}}^1 - R_{\text{lim}}^1, j \neq i\}, & k=0 \\ \left\{ j \mid \begin{cases} \|\mathbf{x}_{ij}\| \leq R_{\text{comm}}^1, \\ j \in N_i^1(t_{k-1}), j \neq i \\ \text{or } \|\mathbf{x}_{ij}\| \leq R_{\text{comm}}^1 - R_{\text{lim}}^1, \\ j \notin N_i^1(t_{k-1}), j \neq i \end{cases} \right\}, & k=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $t_k$  为采样时间点, 即满足  $t_{k+1}=t_k+ts$ ;  $j=1, 2, \dots, N$ ,  $\mathbf{x}_{ij}=\mathbf{x}_i-\mathbf{x}_j$  为原鸽个体  $i$  相对于原鸽个体  $j$  的位置向量;  $R_{\text{comm}}^1$  为平等交互模式下最大通信距离,  $R_{\text{lim}}^1 \in (0, R_{\text{comm}}^1)$  为添加个体连接延迟距离。并定义层级交互模式下原鸽个体  $i$  的邻居集合  $N_i^2$  如式(4)所示:

$$N_i^2 = \{j \mid \|\mathbf{x}_{ij}\| \leq R_{\text{comm}}^2, j \neq i, j=1, 2, \dots, N\} \quad (4)$$

式中  $R_{\text{comm}}^2 \geq R_{\text{comm}}^1$  为层级交互模式下最大通信距离。则原鸽个体  $i$  的当前邻居集合  $N_i$  可表示为

$$N_i = \begin{cases} N_i^1, & \text{mode}_i=0 \\ N_i^2, & \text{mode}_i=1 \end{cases} \quad (5)$$

原鸽个体  $i$  依赖邻居交互信息以及目标信息(仅高层级个体可获知), 求取控制输入, 具体如式(6):

$$\mathbf{u}_i = \begin{cases} \mathbf{m}_i \begin{pmatrix} -K^f \sum_{j \in N_i^1} \nabla_{\mathbf{x}_i} V_{ij}^f(\|\mathbf{x}_{ij}\|) \\ -K^T \nabla_{\mathbf{x}_i} V_i^T(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_T\|) \\ -K^V \sum_{j \in N_i} \mathbf{v}_{ij} \end{pmatrix}, & i \in \text{Upper} \\ \mathbf{m}_i \begin{pmatrix} -K^f \sum_{j \in N_i^1} \nabla_{\mathbf{x}_i} V_{ij}^f(\|\mathbf{x}_{ij}\|) \\ -K^V \left( \sum_{j \in N_i \setminus \text{Upper}} \mathbf{v}_{ij} + w \sum_{j \in N_i \cap \text{Upper}} \mathbf{v}_{ij} \right) \end{pmatrix}, & i \notin \text{Upper} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $K^f > 0$ 、 $K^T > 0$ 、 $K^V > 0$  分别为编队控制增益、目标控制增益以及对齐控制增益,  $\mathbf{v}_{ij}=\mathbf{v}_i-\mathbf{v}_j$  为原鸽个体  $i$  相对于原鸽个体  $j$  的速度向量。定义对齐权重  $w$  如式(7)所示:

$$w = \begin{cases} 1, & \text{mode}_i=0 \\ w', & \text{mode}_i=1 \end{cases} \quad (7)$$

式中  $w' \geq 1$  为层级交互模式下对齐权重。编队势场函数  $V_{ij}^f$  定义为

$$V_{ij}^f(\|\mathbf{x}_{ij}\|) = \begin{cases} \frac{1}{2} \|\mathbf{x}_{ij}\|^2 - (R_{\text{desire}})^2 \text{Ln} \|\mathbf{x}_{ij}\|, & 0 \leq \|\mathbf{x}_{ij}\| \leq R_{\text{desire}} \\ \frac{1}{2} \left( R_{\text{desire}} \left( \frac{R_{\text{comm}}^1}{-\|\mathbf{x}_{ij}\|} \right) / (R_{\text{comm}}^1 - R_{\text{desire}}) \right)^2 - \\ R_{\text{desire}} \left( \frac{R_{\text{comm}}^1}{-\|\mathbf{x}_{ij}\|} \right), & R_{\text{desire}} \leq \|\mathbf{x}_{ij}\| \leq R_{\text{comm}}^1 \\ (R_{\text{desire}})^2 \text{Ln} \frac{R_{\text{comm}}^1}{R_{\text{comm}}^1 - R_{\text{desire}}}, & R_{\text{desire}} \leq \|\mathbf{x}_{ij}\| \leq R_{\text{comm}}^1 \end{cases} \quad (8)$$

式中  $R_{\text{desire}}$  为个体间期望距离。定义目标势场函数  $V_i^T$  如式(9)所示:

$$V_i^T(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_T\|) = \begin{cases} \frac{\left( \frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_T\|}{-R_{\text{lim}}^2} \right)^2}{2}, & \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_T\| \geq R_{\text{lim}}^2 \\ 0, & 0 \leq \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_T\| < R_{\text{lim}}^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{x}_T$  为目标位置向量;  $R_{\text{lim}}^2$  为个体抵达目标的最大容许误差。

## 2 模型同步性理论分析

本节旨在从理论分析角度对鸽群交互模式切换模型同步性展开研究。首先定义鸽群平等交互模式下的有向图  $\mathcal{G}'=(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ , 若原鸽个体  $j \in N_i^1$ , 则有序点对  $(j, i)$  属于边集  $\mathcal{E}$ 。定义鸽群拉普拉斯矩阵  $\mathbf{L}_N=[l_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$  如式(10)所示:

$$l_{ij} = \begin{cases} -1, & j \in N_i \\ 0, & j \notin N_i, j \neq i \\ |N_i|, & j=i \end{cases} \quad (10)$$

式中  $|A|$  为集合  $A$  中元素数目。

定义仅保留高层级个体间连接以及高层级个体与低层级个体间连接的鸽群伪拉普拉斯矩阵  $L'_N = [l'_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$  如式 (11) 所示:

$$l'_{ij} = \begin{cases} -1, & \text{if } j \in \mathcal{N}_i, i \in \text{Upper} \\ & \text{or } j \in \mathcal{N}_i \cap \text{Upper}, i \notin \text{Upper} \\ 0, & \text{if } j \notin \mathcal{N}_i, i \in \text{Upper} \\ & \text{or } j \notin \mathcal{N}_i \cap \text{Upper}, i \notin \text{Upper} \\ |\mathcal{N}_i \cap \text{Upper}|, & j=i \end{cases} \quad (11)$$

定义鸽群 Lyapunov 函数  $H$  如式 (12) 所示:

$$H = H_1 + H_2 \quad (12)$$

其中势能函数  $H_1$  如式 (13) 所示:

$$H_1 = K^f \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{2} \sum_{j \in \mathcal{N}_i^f} V_{ij}^f(\|\mathbf{x}_{ij}\|) \right) + K^T \sum_{i \in \text{Upper}} (V_i^T(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_T\|)) \quad (13)$$

动能函数  $H_2$  如式 (14) 所示:

$$H_2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{2} \mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i \right) \quad (14)$$

假设 1 鸽群初始拓扑  $\mathcal{G}'(t_0)$  为连通图。

假设 2  $V_{\max} \leq \frac{R_{\text{comm.}}^1 - R_{\text{lim}}^1 - R_{\text{lim}}^3}{2t_s}$ , 其中  $R_{\text{lim}}^3 \in (0, R_{\text{comm.}}^1 - R_{\text{lim}}^1)$  为添加个体联结时原鸽个体间的最小距离。

假设 3 鸽群初始能量  $H(t_0)$  为有限值,  $\mathcal{G}'(t)$  在时刻  $t_q$  发生切换, 其中  $q = 1, 2, \dots$ , 鸽群拓扑相邻两次切换的驻留时间  $t_q - t_{q-1} \geq t_s > 0$ 。

假设 4 鸽群高层级个体集合  $\text{Upper} \neq \emptyset$  且高层级原鸽个体数目  $|\text{Upper}| < N$ 。

引理 1<sup>[21]</sup> 对于一个动态系统  $\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x})$ , 其中  $f(\mathbf{x})$  为连续函数, 若存在一个具有一阶连续偏导数的连续函数  $V(\mathbf{x})$ , 且满足如下条件。

1) 存在正常数  $C$ , 使得集合  $\Omega = \{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^D | V(\mathbf{x}) \leq C\}$  有界;

2) 对于任意的  $\mathbf{x} \in \Omega$ , 有  $\dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0$ ;

则对于  $\forall \mathbf{x}_0 \in \Omega$ , 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\mathbf{x}(t)$  趋向于  $S = \{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^D | \dot{V}(\mathbf{x}) = 0\}$  中的最大不变集。

定理 1 考虑由  $N$  个原鸽个体组成的鸽群系统, 每个原鸽个体动力学模型满足式 (1), 若系统满足假设 1~4, 则在如式 (6) 所示的分布式控制律作用下, 所有原鸽个体间可避免碰撞, 实现速度渐近同步, 相对位置趋于期望, 整个鸽群可实现稳定的编队并抵近目标。

证明 当  $t \in [t_{q-1}, t_q)$ , 对式 (12) 关于时间  $t$  求导, 有:

$$\begin{aligned} \dot{H} = & K^f \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{2} \sum_{j \in \mathcal{N}_i^f} (\mathbf{v}_i^T \nabla_{\mathbf{x}_i} V_{ij}^f(\|\mathbf{x}_{ij}\|) + \mathbf{v}_j^T \nabla_{\mathbf{x}_j} V_{ij}^f(\|\mathbf{x}_{ij}\|)) \right) + \\ & K^T \sum_{i \in \text{Upper}} (\mathbf{v}_i^T \nabla_{\mathbf{x}_i} V_i^T(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_T\|)) + \sum_{i=1}^N (\mathbf{v}_i^T \dot{\mathbf{v}}_i) = \\ & K^f \sum_{i=1}^N \left( \mathbf{v}_i^T \sum_{j \in \mathcal{N}_i^f} \nabla_{\mathbf{x}_i} V_{ij}^f(\|\mathbf{x}_{ij}\|) \right) + \\ & K^T \sum_{i \in \text{Upper}} (\mathbf{v}_i^T \nabla_{\mathbf{x}_i} V_i^T(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_T\|)) + \sum_{i=1}^N (\mathbf{v}_i^T \dot{\mathbf{v}}_i) \end{aligned} \quad (15)$$

将式 (1) 和式 (6) 代入式 (15), 有:

$$\begin{aligned} \dot{H} = & K^f \sum_{i=1}^N \left( \mathbf{v}_i^T \sum_{j \in \mathcal{N}_i^f} \nabla_{\mathbf{x}_i} V_{ij}^f(\|\mathbf{x}_{ij}\|) \right) + \\ & K^T \sum_{i \in \text{Upper}} (\mathbf{v}_i^T \nabla_{\mathbf{x}_i} V_i^T(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_T\|)) + \sum_{i=1}^N \left( \mathbf{v}_i^T \frac{\mathbf{u}_i}{m_i} \right) = \\ & K^f \sum_{i=1}^N \left( \mathbf{v}_i^T \sum_{j \in \mathcal{N}_i^f} \nabla_{\mathbf{x}_i} V_{ij}^f(\|\mathbf{x}_{ij}\|) \right) + \\ & K^T \sum_{i \in \text{Upper}} (\mathbf{v}_i^T \nabla_{\mathbf{x}_i} V_i^T(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_T\|)) + \\ & \sum_{i \in \text{Upper}} \left( \mathbf{v}_i^T \left( -K^f \sum_{j \in \mathcal{N}_i^f} \nabla_{\mathbf{x}_i} V_{ij}^f(\|\mathbf{x}_{ij}\|) - K^T \nabla_{\mathbf{x}_i} V_i^T(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_T\|) - K^V w \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{v}_{ij} \right) \right) + \\ & \sum_{i \in \text{Upper}} \left( \mathbf{v}_i^T \left( -K^f \sum_{j \in \mathcal{N}_i^f} \nabla_{\mathbf{x}_i} V_{ij}^f(\|\mathbf{x}_{ij}\|) - K^V \left( \sum_{j \in \mathcal{N}_i \setminus \text{Upper}} \mathbf{v}_{ij} + w \sum_{j \in \mathcal{N}_i \cap \text{Upper}} \mathbf{v}_{ij} \right) \right) \right) = \\ & -K^V \left( \sum_{i=1}^N \left( \mathbf{v}_i^T \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{v}_{ij} \right) + (w-1) \left( \sum_{i \in \text{Upper}} \mathbf{v}_i^T \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{v}_{ij} + \sum_{i \notin \text{Upper}} \mathbf{v}_i^T \sum_{j \in \mathcal{N}_i \cap \text{Upper}} \mathbf{v}_{ij} \right) \right) = \\ & -K^V \mathbf{v}^T ((L_N + (w-1)L'_N) \otimes I_D) \mathbf{v} \end{aligned} \quad (16)$$

由式 (7) 可知  $w \geq 1$ , 且由  $L_N, L'_N$  均为对称半正定矩阵, 故有:

$$\dot{H} \leq 0, \forall t \in [t_{q-1}, t_q) \quad (17)$$

由式 (3) 可知, 若  $j \in \mathcal{N}_i^f(t_{q-1})$ , 则有  $\|\mathbf{x}_{ij}\| \in [0, R_{\text{comm.}}^1]$ , 并由式 (8) 可知, 当  $\|\mathbf{x}_{ij}\| \rightarrow R_{\text{comm.}}^1$ , 有  $V_{ij}^f(\|\mathbf{x}_{ij}\|) \rightarrow \infty$ 。而由式 (17) 可知:

$$H(t) \leq H(t_{q-1}), \forall t \in [t_{q-1}, t_q) \quad (18)$$

即若  $H(t_{q-1}) < \infty, H(t) < \infty$ 。则由  $H$  在时域上的连续性, 可知:  $j \in \mathcal{N}_i^f(t_{q-1})$ , 均有  $\|\mathbf{x}_{ij}\| < R_{\text{comm.}}^1$ , 并由式 (3) 可知,  $j \in \mathcal{N}_i^f(t_q)$ 。故鸽群系统  $\mathcal{G}'$  内已存在的原鸽个体间拓扑连接在下一切换时刻  $t_q$  时仍然保持, 即若假设 1 成立, 鸽群系统内部始终保持



连通。由式(13)可知, 鸽群 Lyapunov 函数  $H$  在切换时刻  $t_q$  只可能由于  $\mathcal{G}'$  内添加的原鸽个体间拓扑连接而产生能量变化。

由式(3)和假设2可知, 在切换时刻  $t_q, \forall j \in \mathcal{N}_i^1(t_q)/\mathcal{N}_i^1(t_{q-1})$ , 有  $R_{\text{lim}}^3 \leq \|x_{ij}\| \leq R_{\text{comm.}}^1 - R_{\text{lim}}^1$ , 并由式(8)可知:

$$V_{ij}^f(\|x_{ij}\|) \leq V_{\max}^f \quad (19)$$

式中  $V_{\max}^f = \max\{V_{ij}^f(R_{\text{lim}}^3), V_{ij}^f(R_{\text{comm.}}^1 - R_{\text{lim}}^1)\} < \infty$  为添加单条个体间拓扑连接所增加的最大势能。

假设在切换时刻  $t_q$ , 有  $n_q^1$  条个体间拓扑连接添加至  $\mathcal{N}_i^1(t_q)$ 。由假设1可知  $\sum_{k=1}^q n_k^1 \leq (N-1)^2$ 。故由假设3、式(18)及式(19)可知:

$$H(t_q) < H_{\max} = H(t_0) + V_{\max}^f (N-1)^2 < \infty \quad (20)$$

式中  $H_{\max}$  为鸽群 Lyapunov 函数上界。

由式(18)和式(20)可知,  $H < \infty$ , 故所有原鸽个体间可避免碰撞。否则由式(8)可知, 当  $\|x_{ij}\| \rightarrow 0$ , 均有  $V_{ij}^f(\|x_{ij}\|) \rightarrow \infty$ 。

由假设3可知,  $0 < n_q^1 \leq N(N-1) - (N-1) = (N-1)^2$ , 则切换数目  $q \leq q_{\max} < \infty$ , 其中  $q_{\max}$  为最大切换次数。即, 鸽群  $\mathcal{G}'$  最终为固定拓扑。当  $t \in [t_{q_{\max}}, \infty)$ ,  $H$  为连续函数。由式(8)和式(9)可知,  $\dot{H}$  亦连续。定义集合

$$\Omega = \{\bar{x} \in R^{DN}, v \in R^{DN} | H < H_{\max}, H_{\max} > 0\} \quad (21)$$

式中  $\bar{x} = [x_{11}^T, x_{12}^T, \dots, x_{1N}^T, \dots, x_{N1}^T, x_{N2}^T, \dots, x_{NN}^T]^T$ 。

由于  $\mathcal{G}'(t)$  对于  $t \geq 0$  为连通图, 故鸽群中任意两个原鸽个体  $i$  和  $j$  可通过至少一条路径彼此连通, 且路径长度  $\|x_{ij}\| \leq (N-1)R$ 。此外, 由于  $H < H_{\max}$ , 则有  $\|v_i\| < \sqrt{2H_{\max}}$ , 故  $\Omega$  为有界闭集。由于控制输入如式(6)所示的鸽群系统(1)在  $t \in [t_{q_{\max}}, \infty)$  为一个自治系统, 故可由引理1证明鸽群的稳定性, 即对于任意起始于  $\Omega$  的状态轨迹最终将收敛至如式(22)定义的集合的最大不变子集:

$$S = \{\bar{x} \in R^{DN}, v \in R^{DN} | \dot{H} = 0\} \quad (22)$$

此时有

$$\begin{aligned} \dot{H} = & -K^V v^T \left( (L_N + (w-1)L_N') \otimes I_D \right) v = - \\ & K^V \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (v_i - v_j)^2 - \\ & K^V (w-1) \sum_{i \in \text{Upper}} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (v_i - v_j)^2 = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

则式(23)成立当且仅当  $v_1 = v_2 = \dots = v_N = v'$ , 其中  $v'$  为鸽群同步速度, 即鸽群内所有原鸽个体实现速度同步。进而可得  $\|x_{ij}\| = C$ , 且有

$$u_1 = u_2 = \dots = u_N \quad (24)$$

由式(8)可知,  $V_{ij}^f(\|x_{ij}\|) = C$ , 故  $\nabla_{x_i} V_{ij}^f(\|x_{ij}\|) = 0$ 。

由假设4可知, 存在  $i \notin \text{Upper}$ 。由式(6)可知, 当  $i \notin \text{Upper}$  时,  $u_i = 0$ 。由式(25)可知  $u_1 = u_2 = \dots = u_N = 0$ , 故有

$$u = \begin{bmatrix} \left( \begin{array}{c} -K^f \sum_{j \in \mathcal{N}_1^1} \nabla_{x_1} V_{1j}^f(\|x_{1j}\|) \\ -\text{infor}_1 K^T \nabla_{x_1} V_1^T(\|x_1 - x_T\|) \\ -K^f \sum_{j \in \mathcal{N}_2^1} \nabla_{x_2} V_{2j}^f(\|x_{2j}\|) \\ -\text{infor}_2 K^T \nabla_{x_2} V_2^T(\|x_2 - x_T\|) \\ \vdots \\ -K^f \sum_{j \in \mathcal{N}_N^1} \nabla_{x_N} V_{Nj}^f(\|x_{Nj}\|) \\ -\text{infor}_N K^T \nabla_{x_N} V_N^T(\|x_N - x_T\|) \end{array} \right) \end{bmatrix} = 0 \quad (25)$$

即鸽群内所有原鸽个体将会收敛至固定的几何构型。且由假设4可知, 鸽群中的高层领导者可抵达至距目标点  $x_T$  距离为  $R_{\text{lim}}^2$  的区域内。表明所有原鸽个体间相对位置趋于期望, 整个鸽群可实现稳定的编队并抵近目标。

### 3 模型同步性仿真分析

本节通过仿真实验进一步研究鸽群交互模式切换模型中不同参数(包括原鸽个体数目  $N$ 、高层级原鸽个体数目  $|\text{Upper}|$  以及个体最大速率  $V_{\max}$ )对鸽群系统同步性的影响。设定  $N$  个原鸽个体的初始位置向量随机分布在满足  $0 \leq x_i^1 \leq 20 \text{ m}$  且  $-10 \text{ m} \leq x_i^2 \leq 10 \text{ m}$  的方形区域内, 初始位置向量  $v_i = [10 \text{ m/s}, 0]$ , 目标位置向量  $x_T = [50 \text{ m}, -50 \text{ m}]$ , 随机指定  $|\text{Upper}|$  个原鸽个体作为高层级个体。设定采样时间  $t_s = 0.05 \text{ s}$ , 最大仿真时间  $T_{\max} = 50 \text{ s}$ , 当鸽群抵达目标点时, 即当原鸽个体与目标点平均距离  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|x_i - x_T\|$  小于或等于群体抵达目标的最大容许误差  $R_{\text{lim}}^5$  时, 仿真停止, 停止时间为  $T_a$ , 可将  $T_a$  认定为鸽群抵达目标点所用时间。

依照所建模型进行仿真, 设定层级交互模式下最大通信距离  $R_{\text{comm.}}^2 = R_{\text{comm.}}$ , 平等交互模式下最大通信距离  $R_{\text{comm.}}^1 = r_c R_{\text{comm.}}$ , 其中  $r_c$  为平等交互距离占比, 余下仿真参数设置如表1所示。图1给出了鸽群抵近目标点的仿真运动轨迹, 图中五角星表示目标, 圆形表示鸽群初始位置, 三角形表示鸽群终了位置, 实线表示高层级原鸽个体的运动轨迹, 虚线表示非高层级原鸽个体的运动轨迹, 由图可见, 鸽群可在高层级原鸽个体引领下抵达目标点。图2给出了鸽群内原鸽个体与目标点的平均距离随时间  $t$  的变化曲线, 由图可见鸽群在高层级原鸽个体引领下逐渐趋近目标点, 并

在时间  $t=2.6$  s 时抵达目标点, 图中虚线在横轴上的对应点即为鸽群抵达目标点所用时间  $T_a$ 。

表 1 鸽群交互模式切换模型参数设置

Table 1 Parameters of the pigeon flock interaction pattern switching model

名称	数值
个体数目 $N$	10
个体最大速率 $V_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$	20
高层级个体数目 $ \text{Upper} $	1
轨迹曲率模式切换阈值 $K_{\text{switch}}/\text{m}$	0.002
最大通信距离 $R_{\text{comm}}/\text{m}$	30
编队控制增益 $K^f$	0.5
目标控制增益 $K^T$	10
对齐控制增益 $K^V$	0.5
个体间期望距离 $R_{\text{desire}}/\text{m}$	10
添加个体连接延迟距离 $R_{\text{lim}}^1/\text{m}$	0.1
个体抵达目标的最大容许误差 $R_{\text{lim}}^2/\text{m}$	10
个体抵达目标的最大容许误差 $R_{\text{lim}}^5/\text{m}$	20
层级交互模式下对齐权重 $w'$	5
平等交互距离占比 $r_c$	0.7

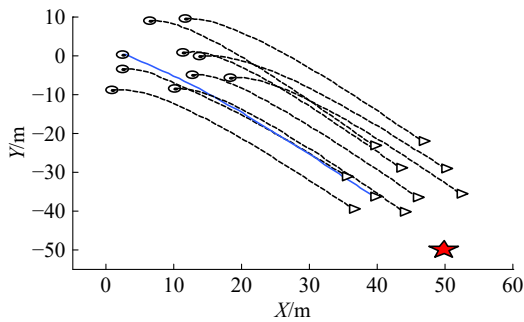


图 1 鸽群逼近目标点的仿真运动轨迹

Fig. 1 Motion trajectory of the pigeon flock approaching the target

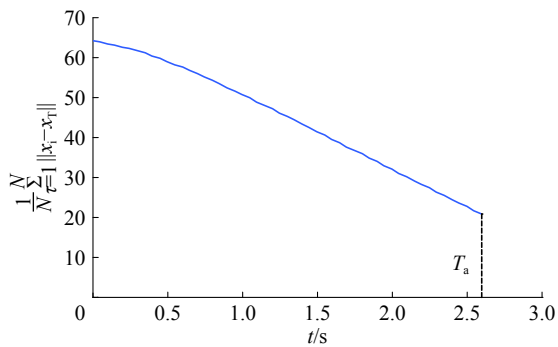


图 2 鸽群与目标点距离

Fig. 2 Distance between the pigeon flocks and the target

为衡量鸽群系统群集运动的同步程度, 采用平均归一化速度的绝对值作为序参量 (order parameter), 具体如下<sup>[22-24]</sup>:

$$V_a = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N v_i^* \right| \quad (26)$$

当鸽群内部原鸽个体归一化速度  $v_i^*$  近乎随机分布时, 序参量  $V_a$  接近为 0, 此时鸽群处于混乱的无序状态; 当鸽群内部原鸽个体归一化速度  $v_i^*$  完全相同, 序参量  $V_a$  为 1, 此时鸽群处于完全同步状态。由此可见, 序参量  $V_a$  作为衡量鸽群系统群集运动同步程度的指标, 其值越大, 鸽群同步程度越高。图 3 给出了鸽群序参量  $V_a$  随时间  $t$  的变化曲线, 图中实线为鸽群序参量  $V_a$  的变化曲线, 由图可见, 由于仿真初始参数设定, 序参量  $V_a$  初值为 1, 仿真开始后鸽群同步程度首先陡然下降至最低值  $V_a^{\min}$  (如图 3 中点划线所示), 约为 0.932 5 处, 而后逐步回升趋近于 1, 变化过程中序参量平均值  $V_a^{\text{mean}}$  (如图 3 中虚线所示) 保持在 0.957 8, 鸽群同步程度较高。

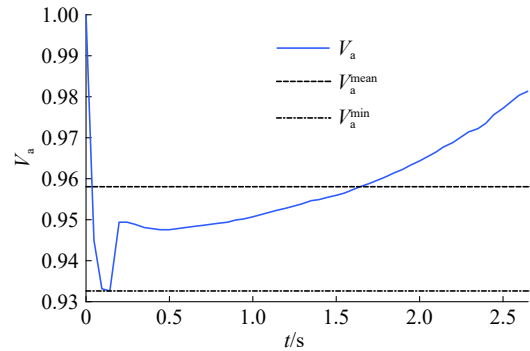


图 3 鸽群序参量

Fig. 3 Order parameter of pigeon flocks

### 3.1 原鸽个体数目

首先, 研究原鸽个体数目  $N$  对鸽群归巢群集运动同步性参数的影响。原鸽个体数目  $N$  取值集合为  $\{4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31\}$ , 除原鸽个体数目  $N$  外, 其余仿真参数设置如表 1 所示。为消除随机因素可能引起的仿真实验偏差, 每组仿真实验共独立重复进行 100 次。图 4 给出了 100 次独立重复仿真实验后, 鸽群归巢群集运动同步性参数随原鸽个体数目  $N$  变化的平均统计结果。图 4(a) 中横轴为仿真时间  $t$ , 纵轴为原鸽个体与目标点平均距离  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|x_i - x_T\|$ , 不同个体数目  $N$  对应的原鸽个体与目标点平均距离  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|x_i - x_T\|$  随时间  $t$  变化曲线在图中以不同线型进行刻画。图 4(b) 中横轴为原鸽个体数目  $N$ , 纵轴为鸽群抵达目标点所用时间  $T_a$ 。由图 4(a) 和 (b) 可见, 当原鸽个体数目  $N$  小于某一阈值 ( $\dots$ ) 时, 原鸽个体数目  $N$  对鸽群抵达目标点所用时间  $T_a$  几乎无影

响,而当大于该阈值后,鸽群抵达目标点所用时间  $T_a$  随原鸽个体数目  $N$  增加而增大。图 4(c) 中横轴为仿真时间  $t$ ,纵轴为鸽群序参量  $V_a$ ,不同个体数目  $N$  对应的鸽群序参量  $V_a$  随时间  $t$  变化曲线在图中以不同线型进行刻画。图 4(d) 中横轴为原鸽个体数目  $N$ ,纵轴为鸽群序参量  $V_a$ ,圆形标记线和方形标记线分别代表序参量平均值  $V_a^{\text{mean}}$  和序参量最小值  $V_a^{\text{min}}$  随原鸽个体数目  $N$  的变化曲线。由图 4(c) 和 (d) 可见,当原鸽个体数目  $N$

小于某一阈值 ( $N=10$ ) 时,鸽群序参量平均值  $V_a^{\text{mean}}$  和序参量最小值  $V_a^{\text{min}}$  均随原鸽个体数目  $N$  增大而升高,而当大于该阈值后,鸽群序参量平均值  $V_a^{\text{mean}}$  先保持平稳后出现些许下降,而鸽群序参量最小值  $V_a^{\text{min}}$  随原鸽个体数目  $N$  增加而减小。综上所述,当鸽群群体规模较大时,群体虽可趋近目标并实现速度同步,但趋近速度以及同步效果均会出现不同程度的折损。

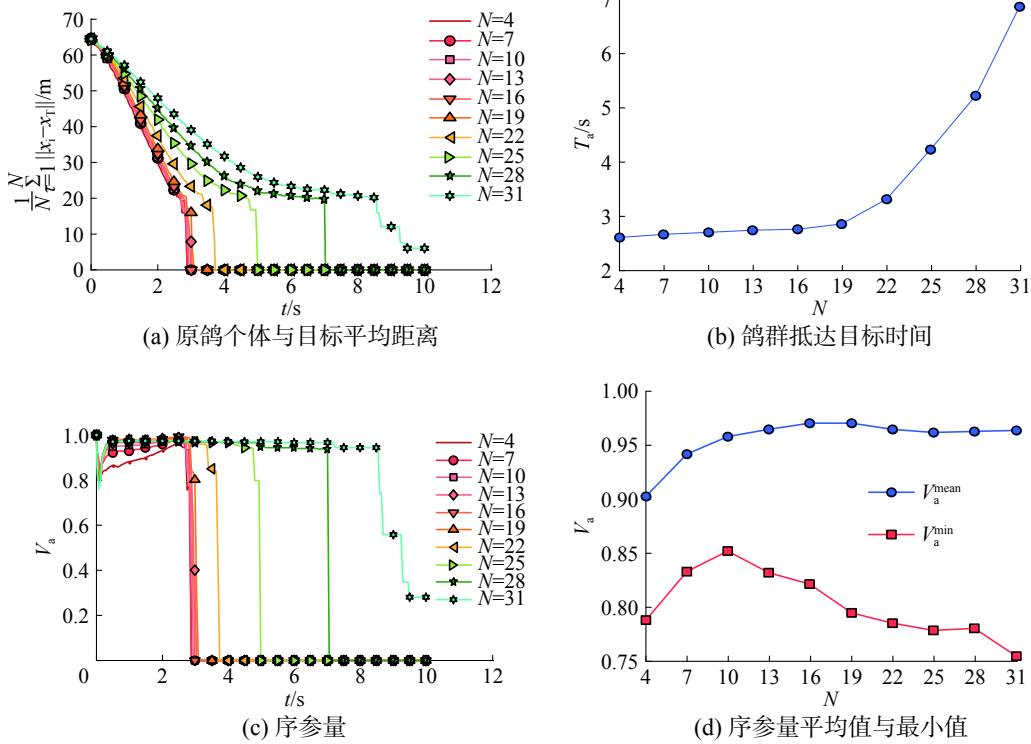


图 4 鸽群同步性参数随原鸽个体数目的变化曲线

Fig. 4 Curves of synchronization parameters of pigeon flocks with the number of individuals

### 3.2 高层级原鸽个体数目

其次,研究高层级原鸽个体数目  $|Upper|$  对鸽群归巢群集运动同步性参数的影响。高层级原鸽个体数目  $|Upper|$  取值集合为  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ ,除高层级原鸽个体数目  $|Upper|$  外,其余仿真参数设置如表 1 所示,每组仿真实验共独立重复进行 100 次。图 5 给出了 100 次独立重复仿真实验后,鸽群归巢群集运动同步性参数随高层级原鸽个体数目  $|Upper|$  变化的平均统计结果。图 5(a) 中横轴、纵轴设定与图 4(a) 相同,不同高层级原鸽个体数目  $|Upper|$  对应的原鸽个体与目标点平均距离  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|x_i - x_T\|$  随时间  $t$  变化曲线在图中以不同线型进行刻画。图 5(b) 中横轴为高层级原鸽个体数目  $|Upper|$ ,纵轴为鸽群抵达目标点所用时间  $T_a$ 。由图 5(a) 和 (b) 可见,鸽群抵达目

标点所用时间  $T_a$  随高层级原鸽个体数目  $|Upper|$  增加而下降。图 5(c) 中横轴、纵轴设定与图 4(c) 相同,不同高层级原鸽个体数目  $|Upper|$  对应的鸽群序参量  $V_a$  随时间  $t$  变化曲线在图中以不同线型进行刻画。图 5(d) 中纵轴以及标记线设定与图 4(d) 相同,横轴为高层级原鸽个体数目  $|Upper|$ 。由图 5(c) 和 (d) 可见,鸽群序参量平均值  $V_a^{\text{mean}}$  和序参量最小值  $V_a^{\text{min}}$  均随高层级原鸽个体数目  $|Upper|$  增大而下降。综上所述,当鸽群中引入较多的高层级个体时,虽会加速鸽群向目标点的趋近,但鸽群同步效果会出现一定程度的下降。

### 3.3 个体最大速率

最后,研究个体最大速率  $V_{\max}$  对鸽群归巢群集运动同步性参数的影响。除原鸽个体最大速率  $V_{\max}$  外,其余仿真参数设置如表 1 所示,原鸽个体最

大速率  $V_{\max}$  取值集合为  $\{5 \text{ m/s}, 10 \text{ m/s}, 15 \text{ m/s}, 20 \text{ m/s}, 25 \text{ m/s}, 30 \text{ m/s}, 35 \text{ m/s}, 40 \text{ m/s}, 45 \text{ m/s}\}$ , 每组仿真实验共独立重复进行 100 次。

图 6 给出了 100 次独立重复仿真实验后, 鸽群归巢群集运动同步性参数随原鸽个体最大速率  $V_{\max}$  变化的平均统计结果。

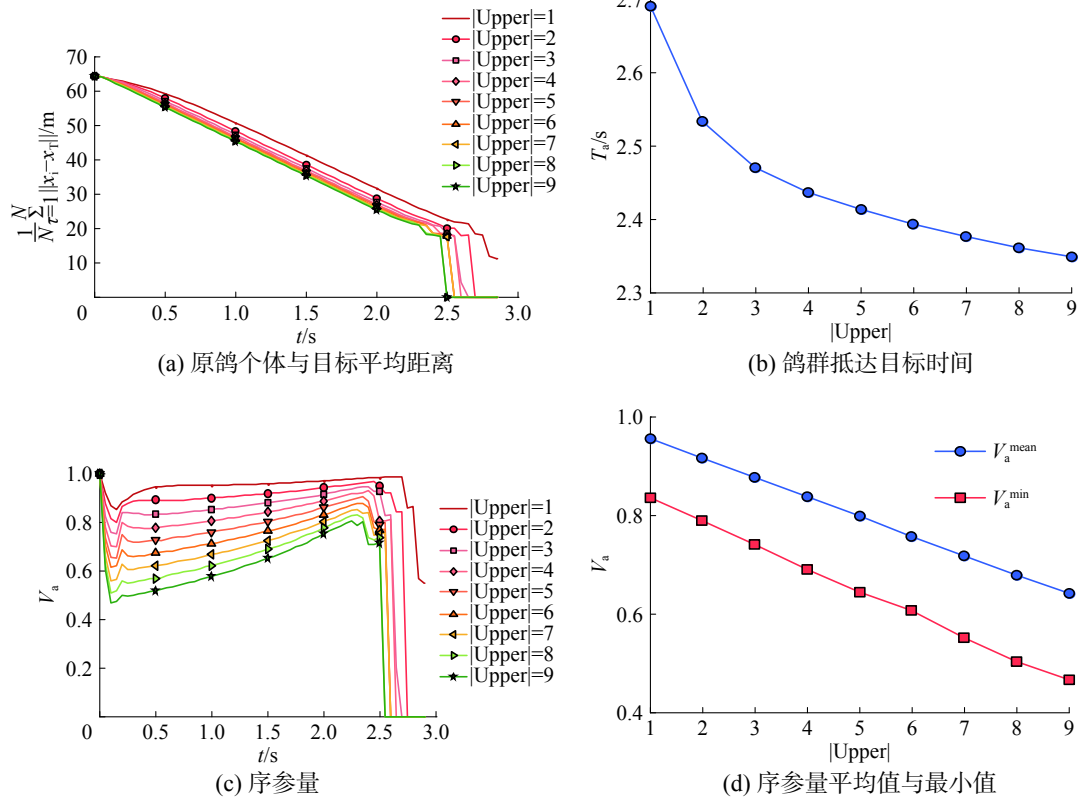


图 5 鸽群同步性参数随高层级原鸽个体数目的变化曲线

Fig. 5 Curves of synchronization parameters of pigeon flocks with the number of higher-rank individuals

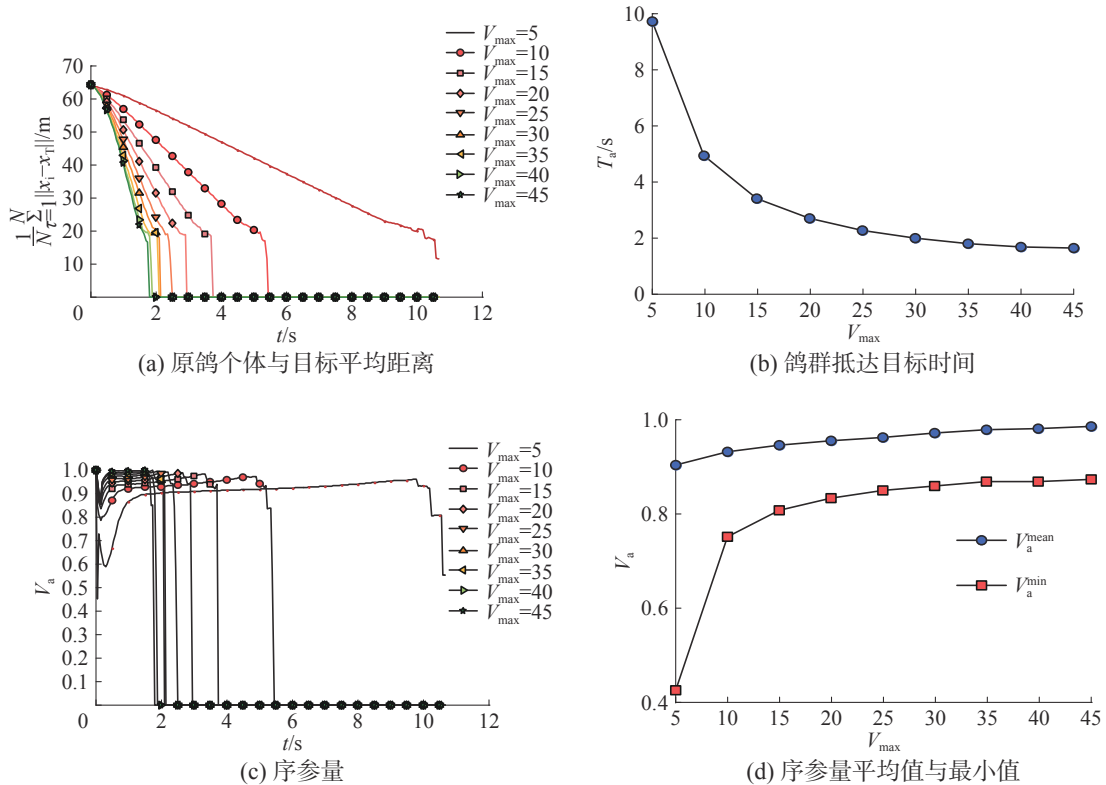


图 6 鸽群同步性参数随原鸽个体最大速率的变化曲线

Fig. 6 Curves of synchronization parameters of pigeon flocks with the maximum rate of individuals



图 6(a) 中横轴、纵轴设定与图 4(a) 及图 5(a) 相同, 不同个体最大速率  $V_{\max}$  对应的原鸽个体与目标点平均距离  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_T\|$  随时间  $t$  变化曲线在图中以不同线型进行刻画。图 6(b) 中横轴为原鸽个体最大速率  $V_{\max}$ , 纵轴为鸽群抵达目标点所用时间  $T_a$ 。由图 6(a) 和 (b) 可见, 当原鸽个体最大速率  $V_{\max}$  小于某一阈值 ( $V_{\max} < 35 \text{ m/s}$ ) 时, 鸽群抵达目标点所用时间  $T_a$  随原鸽个体最大速率  $V_{\max}$  增加而下降, 而当大于该阈值后, 原鸽个体最大速率  $V_{\max}$  对鸽群抵达目标点所用时间  $T_a$  几乎无影响。图 6(c) 中横轴、纵轴设定与图 4(c) 及图 5(c) 相同, 不同个体最大速率  $V_{\max}$  对应的鸽群序参量  $V_a$  随时间  $t$  变化曲线在图中以不同线型进行刻画。图 6(d) 中纵轴以及标记线设定与图 4(d) 及图 5(d) 相同, 横轴为原鸽个体最大速率  $V_{\max}$ 。由图 6(c) 和 (d) 可见, 鸽群序参量平均值  $V_a^{\text{mean}}$  和序参量最小值  $V_a^{\text{min}}$  均随原鸽个体最大速率  $V_{\max}$  增大而上升, 但当原鸽个体最大速率  $V_{\max}$  大于某一阈值  $V_{\max} \geq 20 \text{ m/s}$  时, 上升趋势不再显著。综上所述, 提升原鸽个体机动能力, 有助于改善鸽群同步效果, 但当原鸽个体机动能力达到一定程度时, 改善效果不再显著。

## 4 结论

具备群居性的鸟类, 历经长期演化, 在防御、繁殖、觅食、社群、节律、攻击等行为中均体现出共识自主性, 涌现出具备无中心、简单和自组织特点的群体智能<sup>[25]</sup>。本文以原鸽为研究对象, 归纳出原鸽归巢机制中的双模式决策原则、模式切换原则与优势个体原则, 并基于上述原则建立鸽群交互模式切换模型。

基于 LaSalle 不变集理论, 给出鸽群系统实现同步的条件, 具体如下: 首先亦定义包括势能函数和动能函数在内的鸽群 Lyapunov 函数, 基于 Lyapunov 稳定性理论证明鸽群 Lyapunov 函数值在平等交互模式有向图相邻切换区间内递减; 由鸽群编队势场函数以及原鸽个体平等交互模式下邻居集合的特殊设定, 可得鸽群 Lyapunov 函数值在平等交互模式有向图切换时刻增加有限; 继而可知鸽群 Lyapunov 函数存在上界, 同时由鸽群编队势场函数特殊设定可知原鸽个体间不会发生碰撞; 进而基于 LaSalle 不变集理论, 可证鸽群内所有个体可实现速度同步, 并可收敛至固定的几何构型, 同时抵达目标。由蒙特卡罗仿真结果可见, 若鸽群系统满足假设条件, 不同原

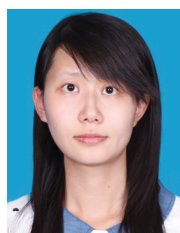
鸽个体数目、高层级原鸽个体数目以及个体最大速率下, 鸽群系统同步性均可得到保障, 且可抵达目标。

## 参考文献:

- [1] BAJEC I L, HEPPNER F H. Organized flight in birds[J]. *Animal behaviour*, 2009, 78(4): 777–789.
- [2] REN Jiaping, SUN Wanxuan, MANOCHA D, et al. Stable information transfer network facilitates the emergence of collective behavior of bird flocks[J]. *Physical review E*, 2018, 98(5): 052309.
- [3] SAINZ-BORGO C, KOFLER S, JAFFE K. On the adaptive characteristics of bird flocks: small birds form mixed flocks[J]. *Ornitología neotropical*, 2018, 29: 289–296.
- [4] CHEN Duxin, LIU Xiaolu, XU Bowen, et al. Intermittence and connectivity of interactions in pigeon flock flights[J]. *Scientific reports*, 2017, 7(1): 10452.
- [5] CHEN Duxin, XU Bowen, ZHU Tao, et al. Anisotropic interaction rules in circular motions of pigeon flocks: an empirical study based on sparse Bayesian learning[J]. *Physical review E*, 2017, 96(2): 022411.
- [6] BALLERINI M, CABIBBO N, CANDELIER R, et al. Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: Evidence from a field study[J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2008, 105(4): 1232–1237.
- [7] NAGY M, ÁKOS Z, BIRO D, et al. Hierarchical group dynamics in pigeon flocks[J]. *Nature*, 2010, 464(7290): 890–893.
- [8] ZAFEIRIS A, VICSEK T. Advantages of hierarchical organization: from pigeon flocks to optimal network structures[C]//*Proceedings of Research in the Decision Sciences for Global Business: Best Papers from the 2013 Annual Conference*. New Jersey, United States, 2015: 281–282.
- [9] FLACK A, BIRO D, GUILFORD T, et al. Modelling group navigation: transitive social structures improve navigational performance[J]. *Journal of the royal society interface*, 2015, 12(108): 20150213.
- [10] CHEN Zhiyong, ZHANG Haitao, CHEN Xi, et al. Two-level leader-follower organization in pigeon flocks[J]. *EPL (Europhysics letters)*, 2015, 112(2): 20008.
- [11] NAGY M, VÁSÁRHELYI G, PETTIT B, et al. Context-dependent hierarchies in pigeons[J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2013, 110(32): 13049–13054.
- [12] BIRO D, SASAKI T, PORTUGAL S J. Bringing a time-depth perspective to collective Animal Behaviour[J]. *Trends in ecology & evolution*, 2016, 31(7): 550–562.

- [13] PETTIT B, PERNA A, BIRO D, et al. Interaction rules underlying group decisions in homing pigeons[J]. *Journal of the royal society interface*, 2013, 10(89): 20130529.
- [14] PETTIT B, ÁKOS Z, VICSEK T, et al. Speed determines leadership and leadership determines learning during pigeon flocking[J]. *Current biology*, 2015, 25(23): 3132–3137.
- [15] FREEMAN R, MANN R, GUILFORD T, et al. Group decisions and individual differences: route fidelity predicts flight leadership in homing pigeons (*Columba livia*)[J]. *Biology letters*, 2010, 7(1): 63–66.
- [16] FLACK A, PETTIT B, FREEMAN R, et al. What are leaders made of? The role of individual experience in determining leader-follower relations in homing pigeons[J]. *Animal behaviour*, 2012, 83(3): 703–709.
- [17] WATTS I, PETTIT B, NAGY M, et al. Lack of experience-based stratification in homing pigeon leadership hierarchies[J]. *Royal Society open science*, 2016, 3(1): 150518.
- [18] ZHANG Haitao, CHEN Zhiyong, VICSEK T, et al. Route-dependent switch between hierarchical and egalitarian strategies in pigeon flocks[J]. *Scientific reports*, 2014, 4(1): 5805.
- [19] CHEN Duxin, VICSEK T, LIU Xiaolu, et al. Switching hierarchical leadership mechanism in homing flight of pigeon flocks[J]. *EPL (Europhysics letters)*, 2016, 114(6): 60008.
- [20] 陈杰, 方浩, 辛斌. 多智能体系统的协同群集运动控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [21] KHALIL H K. *Nonlinear systems*[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- [22] VICSEK T, CZIRÓK A, BEN-JACOB E, et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles[J]. *Physical review letters*, 1995, 75(6): 1226–1229.
- [23] 罗琪楠. 基于鸽群行为机制的多无人机协调围捕及验证 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2017.
- [24] LUO Qi'nan. Research on cooperative control and pursuit-evasion strategy of multi-UAV based on pigeon behavioral mechanisms[D]. Beijing: Beihang University, 2017.
- [25] 段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.

#### 作者简介:



邱华鑫, 博士后, 主要研究方向为群体智能、无人机自主控制。



段海滨, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无人机集群自主控制、计算机仿生视觉与智能感知、仿生智能计算理论及应用。主持国家自然科学基金重点项目等课题, 出版专著 3 部, 发表学术论文 200 余篇。



范彦铭, 研究员, 博士生导师, 航空工业首批首席专家, 主要研究方向为先进飞行器控制律设计与实现、无人机自主飞行控制。主持国家级研究项目 10 余项, 获国家科技进步二等奖、国防科技进步特等奖, 发表学术论文 30 余篇。