

复杂空间约束下多智能体预设时间一致性控制

杨 柳¹ 尤龙龙¹ 宋文龙¹ 黄建平¹ 梁 野¹ 吴立刚²

摘 要 多智能体系统在执行任务过程中需规避障碍、分布式交互信息, 以保证作业的安全性、可靠性, 使得其作业空间受到防碰撞及障碍躲避的安全区域和通信连通性保持的智能体间有限相对位置的约束. 为此, 研究在上述复杂空间约束下的多智能体预设时间一致性控制问题. 根据智能体与障碍物之间的安全距离, 区分多智能体系统作业过程为障碍规避模式及协同作业模式进行全作业过程描述. 在障碍规避模式, 除传统的智能体间及与障碍物碰撞安全距离约束外, 设计有通信距离约束的避障控制律, 保障在复杂空间障碍环境协同穿越情况下的作业安全性, 以及穿越障碍物后的分布式通信连通性, 防止协同避障后部分智能体断联、中断协同作业任务. 在协同作业模式, 针对传统有限时间稳定相关方法的收敛时间依赖系统初值的缺陷, 提出含时变增益的预设时间控制器设计方法, 实现在协同避障后初值不确定情况下的收敛时间预设, 提高了多智能体系统作业的可靠性. 最后, 以二阶多智能体系统为例进行数值仿真, 验证了提出方法的有效性.

关键词 多智能体系统; 预设时间控制; 连通性保持; 避障控制; 一致性控制

引用格式 杨柳, 尤龙龙, 宋文龙, 黄建平, 梁野, 吴立刚. 复杂空间约束下多智能体预设时间一致性控制. 自动化学报, 2026, 52(9): 2118–2129

DOI 10.16383/j.aas.c250747 **CSTR** 32138.14.j.aas.c250747

Prescribed-time Consensus Control for Multi-agent Systems Under Complex Spatial Constraints

YANG Liu¹ YOU Long-Long¹ SONG Wen-Long¹ HUANG Jian-Ping¹ LIANG Ye¹ WU Li-Gang²

Abstract During the task execution, multi-agent systems (MAS) are required to avoid obstacles and exchange information in a distributed manner, so as to ensure operational safety and reliability. Consequently, the workspace of MAS is constrained by safety regions for collision and obstacle avoidance, as well as by limited relative position among agents that maintain communication connectivity. To address these challenges, this paper investigates the prescribed-time consensus control problem for MAS under the aforementioned complex spatial constraints. Based on the safe distance between agents and obstacles, the entire operational process is described by dividing it into two distinct modes, including the obstacle avoidance mode and the cooperative operation mode. In the obstacle avoidance mode, in addition to the traditional safety distance constraints for inter-agent and agent-obstacle collisions, an obstacle avoidance control law with communication distance constraints is designed. Such that the operational safety is ensured when cooperatively traversing complex spatial obstacle environments and preserves distributed communication connectivity after the obstacles are passed, thereby preventing agent disconnection and interruption of cooperative operational tasks after cooperative obstacle avoidance. As for the cooperative operation mode, to overcome the limitation of traditional finite-time stable methods whose convergence time depends on initial system conditions, a prescribed-time controller design method with time-varying gain is proposed, which achieves prescribed convergence time under uncertain initial conditions following cooperative obstacle avoidance, thus enhancing the operational reliability of MAS. Finally, numerical simulations are performed to verify the effectiveness of the proposed method, where a second-order MAS is taken as an example.

Keywords multi-agent systems; prescribed-time control; connectivity maintenance; obstacle avoidance control; consensus control

Citation Yang Liu, You Long-Long, Song Wen-Long, Huang Jian-Ping, Liang Ye, Wu Li-Gang. Prescribed-time consensus control for multi-agent systems under complex spatial constraints. *Acta Automatica Sinica*, 2026, 52(9): 2118–2129

收稿日期 2025-12-30 录用日期 2026-03-31

Manuscript received December 30, 2025; accepted March 31, 2026

国家自然科学基金 (62503105, 62403118, 62320106001), 国家重点基础研究发展计划 (2021YFC22022500), 黑龙江省重点研发计划项目 (2025ZX04A01), 黑龙江省自然科学基金 (ZD2025F003) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (62503105, 62403118, 62320106001), National Key R&D Program of China (2021YFC22022500), the Key R&D Program of

Heilongjiang Province (2025ZX04A01), and Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (ZD2025F003)

本文责任编辑 李繁斌

Recommended by Associate Editor LI Fan-Biao

1. 东北林业大学控制与信息工程学院 哈尔滨 150040 2. 哈尔滨工业大学航天学院 哈尔滨 150001

1. College of Control and Information Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040 2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

多智能体系统 (multi-agent systems, MAS) 凭借其多机信息共享、强鲁棒性及大范围协同作业能力, 已广泛应用于协同制导^[1]、联合救援^[2]及低空物流^[3]等领域. 一致性控制是多智能体系统通过分布式协作实现群体行为同步的基本方法, 也是上述各类联合作业任务的基础^[4]. 然而, 在实际作业环境中, MAS 的协同性能往往受到通信距离有限与环境障碍复杂造成的双重作业空间约束. 一方面, 受限于机载通信设备的功率与带宽, 智能体间的有效通信范围有限, 若在演化过程中无法维持通信拓扑的连通性, 将导致信息孤岛, 直接致使协同任务失败; 另一方面, 复杂环境中的障碍物避障需求将使得可行安全作业空间复杂多样, 迫使智能体频繁调整运动轨迹, 这种避障行为往往与维持队形一致性的目标相冲突, 且极易引发通信链路断裂.

在避障过程中, 现有研究多基于人工势场^[5]或梯度控制^[6]方法保持系统连通性. 具体而言, 基于智能体相对距离设计吸引或排斥势场函数, 或是设计连通性梯度项保证智能体之间链路的连通和避免过近碰撞. 然而, 当作业空间中出现不可避免的大小不同、位置复杂分布的障碍物时, 多智能体系统将不得不改变当前队形进行障碍物规避. 为规避障碍产生的斥力往往会导致群组分散, 若多智能体的安全作业空间未考虑其通信连通性维护机制, 累积的相对位置偏差甚至可能快速突破通信阈值, 导致部分智能体断联. 此外, 避障机动会导致智能体的一致性收敛过程被反复打断, 使得系统在避障结束后收敛过程的动态性能变得不可预测.

为保证系统快速收敛, 部分研究基于几何齐次性理论或加幂积分器技术进行控制器设计, 通过引用状态误差的分数幂项构建非线性反馈律^[7-10], 但其理论收敛时间上界严重依赖于系统的初始状态. 在复杂空间约束下, 智能体频繁规避障碍后的空间位置 (即重新开始一致性的初值) 具有高度不确定性, 这导致基于有限时间控制理论的系统达到稳态的时间无法人为给定, 难以满足对时效性要求严苛的任务需求. 相比之下, 预设时间控制 (prescribed-time control) 理论允许用户根据任务需求预先给定收敛时间, 且该时间与系统初值无关^[11-13]. 尽管文献^[14-16]探讨了理想无障碍环境下的预设时间一致性, 但在复杂障碍协同规避、多智能体连通性保持等复杂空间约束下的预设时间收敛一致性控制方法仍鲜有报道.

鉴于此, 本文针对智能体间通信距离有限、障碍物/智能体安全距离保持等复杂作业空间约束, 进行多智能体预设时间一致性控制问题研究. 考虑

到协同作业过程中需进行障碍物规避动作, 根据智能体与障碍物间的安全距离将整个作业过程分为障碍规避模态和协同作业模态. 在障碍规避模态, 提出空间通信距离约束下的多智能体避障控制律, 从而保持协同越障期间多智能体系统的连通性, 有效避免了多智能体系统穿越障碍后可能出现的部分智能体失联的问题; 在协同作业模态, 设计收敛时间与初值无关的多智能体系统时变增益预设时间一致性控制律, 保证在多智能体系统复杂障碍规避后重新进行协同一致控制时, 系统初值未知、不确定情况下的收敛时间人为可控, 并进行二阶多智能体系统的数值仿真, 验证了本文方法的有效性.

1 问题描述

考虑一个由 N 个智能体构成的 MAS, 智能体之间的通信关系由一个无向图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A}, L)$ 描述, 其中集合 $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示节点集, $\mathcal{E} \subseteq \{(i, j) \in \mathcal{V} \times \mathcal{V}\}$ 表示边集, 智能体 i 和 j 可进行信息交互, 那么边 $(i, j) \in \mathcal{E}$, 由智能体 i 的邻接智能体组成的集合 $\mathcal{N}_i = \{j \in \mathcal{V} | (i, j) \in \mathcal{E}\}$. 此外, 将智能体 i 探测范围内的障碍物集合定义为 $\mathcal{N}_i^o$. 记与 $\mathcal{G}$ 相关的加权邻接矩阵 $\mathcal{A} = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$, 若边 $(i, j) \in \mathcal{E}$, 则 $a_{ij} > 0$, 否则 $a_{ij} = 0$, 与之相关的加权拉普拉斯矩阵 $L = [l_{ij}] = \text{diag}\{\zeta_i\} - \mathcal{A} \in \mathbf{R}^{N \times N}$, 其中 $\zeta_i = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}$, 且该矩阵是半正定的.

考虑上述 MAS, 设第 i 个智能体的动力学方程为:

$$M_i \ddot{x}_i + B_i \dot{x}_i = f_i \quad (1)$$

其中, x_i 、 $\dot{x}_i$ 与 $\ddot{x}_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 分别表示智能体 i 的位置、速度与加速度; $M_i = \text{diag}\{m_i\}$ 和 $B_i = \text{diag}\{b_i\}$ 分别为智能体 i 的质量矩阵与阻尼矩阵, m_i 、 $b_i \in \mathbf{R}^+$; f_i 为系统的控制输入. 当设定该系统跟踪一条期望轨迹 x_d 时, 上述 MAS 可转化为如下的轨迹跟踪误差系统:

$$M_i \ddot{e}_i + B_i \dot{e}_i = F_i \quad (2)$$

式中, $e_i = x_i - x_d$ 为智能体 i 与期望轨迹之间的位置跟踪误差; $F_i = f_i - M_i \ddot{x}_d - B_i \dot{x}_d$, 设计 $f_i = \sigma(u_1^i + M_i \ddot{x}_d + B_i \dot{x}_d) + (1 - \sigma)u_2^i$, 其中 $\sigma \in \{0, 1\}$ 为切换信号, u_1^i 和 u_2^i 为待设计控制输入. 该切换控制策略的逻辑如下: 在无障碍条件 ($\sigma = 1$) 下, MAS 由控制器 u_1^i 驱动, 于预设时间内实现一致性收敛; 在避障条件 ($\sigma = 0$) 下, 控制器切换至 u_2^i , 以保持系统通信连通性为前提, 实现多智能体的协同避障. 针对系统 (2) 在无障碍条件下的运动, 预设时间一致性定义如下:

定义 1. 如果系统 (2) 中的任意两个相邻智能体 i, j 满足

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow t_0 + T_u} d_{ij} \rightarrow d_l, \quad \dot{x}_i \rightleftharpoons \dot{x}_j \rightarrow \dot{x}_d, \quad t_0 < t < t_0 + T_u \\ d_{ij} = d_l, \quad \dot{x}_i = \dot{x}_j = \dot{x}_d, \quad t \geq t_0 + T_u \end{cases}$$

其中, $d_{ij} = \|x_i - x_j\|$ 为两个相邻智能体之间的距离; d_l 为智能体间目标距离; $\rightarrow, \rightleftharpoons$ 分别代表趋近于某个值和双向趋近; t_0 是系统 (2) 进入预设时间一致性控制模式的初始时刻; T_u 为用户自定义预设时间, 满足 $0 < T_p < T_u < \infty$, T_p 表示物理可行时间下限, 则称系统 (2) 关于时间 T_u 预设时间一致稳定.

引理 1^[17]. 考虑系统 (2), 令 $V(t) = E(\dot{e}(t), t) + E(d(t), t)$ 为系统 (2) 的能量函数, 其中, $E(\dot{e}(t), t) > 0$, $E(d(t), t) > 0$ 分别为与智能体追踪速度误差相关的动能函数及与智能体间距离相关的势能函数; $\dot{e}(t)$ 和 $d(t)$ 分别是智能体和期望速度之间的跟踪误差和相邻智能体之间的距离. 如果存在一个具有下界的时变函数 $\kappa(t) > \kappa^* \in \mathbf{R}^+$ 使得

$$\begin{cases} V(t) = 0, & E(\dot{e}(t), t) = 0 \text{ 且 } E(d(t), t) = 0 \\ V(t) > 0, & E(\dot{e}(t), t) \neq 0 \text{ 或 } E(d(t), t) \neq 0 \\ \dot{V}(t) \leq -\kappa(t)V(t) - 2\frac{\dot{\delta}(t)}{\delta(t)}V(t), & t \in [t_0, t_0 + T_u) \\ \dot{V}(t) = 0, & t \in [t_0 + T_u, \infty) \end{cases}$$

其中,

$$\delta(t) = \begin{cases} \frac{T_u^h}{(T_u + t_0 - t)^h}, & t \in [t_0, t_0 + T_u) \\ 1, & t \in [t_0 + T_u, \infty) \end{cases}$$

以及

$$\dot{\delta}(t) = \begin{cases} \frac{h}{T_u} \delta(t)^{1+\frac{1}{h}}, & t \in [t_0, t_0 + T_u) \\ 0, & t \in [t_0 + T_u, \infty) \end{cases}$$

式中, $2 < h \in \mathbf{R}^+$. 需要注意的是 $\delta^{-q}(t) (q > 0)$ 在 $[t_0, t_0 + T_u)$ 上单调递减, $\delta^{-q}(t_0) = 1$, 且

$$\lim_{t \rightarrow (t_0 + T_u)^-} \delta^{-q}(t) = 0$$

那么系统 (2) 关于时间 T_u 预设时间一致稳定.

证明. 将上述第三个不等式两端同乘 $\delta^2(t)$, 可得到

$$\delta^2(t)\dot{V}(t) \leq -\kappa(t)\delta^2(t)V(t) - 2\delta(t)\dot{\delta}(t)V(t)$$

进一步可得

$$\frac{d(\delta^2(t)V(t))}{dt} = \delta^2(t)\dot{V}(t) + 2\delta(t)\dot{\delta}(t)V(t) \leq -\kappa^*\delta^2(t)V(t)$$

进而可得

$$\delta^2(t)V(t) \leq e^{-\kappa^*(t-t_0)}\delta^2(t_0)V(t_0)$$

最后可得

$$V(t) \leq \frac{\delta^2(t_0)}{\delta^2(t)}e^{-\kappa^*(t-t_0)}V(t_0)$$

由于 $\delta^2(t_0) = 1$, $\lim_{t \rightarrow t_0 + T_u} \delta^{-2}(t) = 0$, 因此, 当 $t \rightarrow t_0 + T_u$ 时, $V(t) = 0$. 由 $t \in [t_0 + T_u, \infty)$, $\dot{V}(t) = 0$ 推出 $V(t) = 0$. 设计 $V(t)$, 使得 $E(\dot{x}(t), t) = 0$ 时, 有 $\dot{x}_i \rightarrow \dot{x}_d$, $\dot{x}_j \rightarrow \dot{x}_d$, $E(d(t), t) = 0$ 时, $d_{ij} \rightarrow d_l$. 因此, 根据定义 1 可得系统 (2) 关于时间 T_u 预设时间一致稳定. $\square$

引理 1 中的参数 h 决定了预设时间一致性控制器的控制强度. 当 h 取值较大时, 控制强度显著增加, 系统能更快地实现一致性, 但可能导致系统的不稳定性, 其响应曲线会呈现较为“陡峭”的变化; 反之, 当 h 取值较小时, 系统的稳定性显著提升, 从而使响应曲线呈现出较为“平缓”的趋势.

在多障碍物环境中, 若仅考虑 MAS 的一致性, 可能导致智能体与障碍物或其他智能体发生碰撞; 完全独立的避障行为则可能破坏智能体之间的通信连通性. 因此, 亟须解决 MAS 连通性保持约束下的协同避障控制问题.

引理 2^[18]. 令 $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, N$ 表示拉普拉斯矩阵 L 的特征值, 将 N 个特征值按照 $0 = \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_N$ 升序排列, 那么图 $\mathcal{G}$ 是连通的, 当且仅当 $\lambda_2 > 0$ (λ_2 称为费德勒特征值).

为使 λ_2 的大小能反映智能体间及智能体与障碍物之间的距离变化, 以此来保证系统的连通性及避障功能, 针对系统 (2) 设计如下加权邻接矩阵 $A = [a_{ij}]$:

$$a_{ij} = \alpha_{ij}(d_{ij}) \prod_{s \in \mathcal{N}_i^o} \alpha_{is}(d_{is}^o) \prod_{s \in \mathcal{N}_j^o} \alpha_{js}(d_{js}^o)$$

其中,

$$\alpha_{ij}(d_{ij}) = \begin{cases} 0, & d_{ij} \geq d_{\max} \\ \frac{1}{2}(1 + \cos(d_{ij}\gamma_{11} - \gamma_{12})), & d_l \leq d_{ij} < d_{\max} \\ \frac{1}{2}(1 - \cos(d_{ij}\gamma_{21} - \gamma_{22})), & d_{\min} \leq d_{ij} < d_l \\ 0, & d_{ij} < d_{\min} \end{cases}$$

式中, $\gamma_{11} = \pi/(d_{\max} - d_l)$; $\gamma_{12} = \gamma_{11}d_l$; $\gamma_{21} = \pi/(d_l - d_{\min})$; $\gamma_{22} = \gamma_{21}d_{\min}$; $d_{\max}$ 和 $d_{\min}$ 分别表示智能体间最大通信距离及最小安全距离.

$$\alpha_{is}(d_{is}^o) = \begin{cases} 1, & d_{is}^o \geq d_{\max}^o \\ \frac{1}{2}(1 - \cos(d_{is}^o \gamma_{31} - \gamma_{32})), & d_{\min}^o \leq d_{is}^o < d_{\max}^o \\ 0, & d_{is}^o < d_{\min}^o \end{cases}$$

式中, $\gamma_{31} = \pi/(d_{\max}^o - d_{\min}^o)$; $\gamma_{32} = \gamma_{31}d_{\min}^o$; x_s^o 为第 s 个障碍物的位置, 则 $d_{is}^o = \|x_i^o - x_s^o\|$ 表示智能体 i 和障碍物 s 之间的距离; $d_{\max}^o$ 和 $d_{\min}^o$ 分别表示智能体可以监测到障碍物的最大距离及与障碍物之间的最小安全距离。

根据上述的定义和引理, 针对系统 (2) 给出本文的主要目标: 1) 设计控制器 u_1 , 使得系统 (2) 在无障碍物环境中, 任意两个相邻智能体 i, j 满足定义 1 中的条件, 并通过引理 1 中所定义的能量函数 $V(t)$ 进行验证; 2) 设计控制器 u_2 , 使得系统在多障碍物环境中能够在保持智能体间通信连通性的前提下, 实现有效的协同避障。

2 切换控制器设计与稳定性分析

在本节中, 将基于前述研究目标设计切换控制器 F_i . 针对系统 (2) 在无障环境下的情形, 设计控制器 u_1 (即 $\sigma = 1$ 时), 以使系统在预设时间 T_u 内实现预设时间一致性. 当系统检测到障碍物时, 设计控制器 u_2 (即 $\sigma = 0$ 时), 保证系统在保持连通性的条件下实现柔性避障。

2.1 预设时间一致性控制器 u_1 设计

为确保系统 (2) 中任意两个相邻智能体在预设时间 T_u 内满足定义 1 中的条件, 即二者速度趋于一致并收敛至 $\dot{x}_d$, 且智能体间距离趋于期望值 d_l , 针对智能体 i 设计控制器 u_1^i 如下:

$$u_1^i = -p_v^i(t)f_i^v - p_p^i(t)\nabla_i P_{ij} - p_b^i(t)\dot{e}_i \quad (3)$$

其中,

$$\begin{cases} f_i^v = k_v \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\dot{e}_i - \dot{e}_j) \\ P_{ij} = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \frac{\alpha(d_{ij} - d_l)^2}{d_{\max} - d_{ij}} \end{cases}$$

式中, $k_v, \alpha \in \mathbf{R}^+$ 为任意正实数; u_1^i 中的 $\nabla_i P_{ij}$ 为 P_{ij} 对 x_{ij} 求微分, 即

$$\begin{aligned} \nabla_i P_{ij} &= \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \frac{\partial P_{ij}}{\partial d_{ij}} \frac{\partial d_{ij}}{\partial x_{ij}} = \\ &\sum_{j \in \mathcal{N}_i} \frac{\alpha(d_{ij} - d_l)(2d_{\max} - d_{ij} - d_l)(x_i - x_j)}{d_{ij}(d_{\max} - d_{ij})^2} \end{aligned}$$

控制力 $\nabla_i P_{ij}$ 驱使相邻智能体间距离趋于目标距离;

控制力 f_i^v 保证相邻智能体间速度的一致性; $p_v^i(t)$ 、 $p_p^i(t)$ 以及 $p_b^i(t)$ 均为与 T_u 相关的待设计时变参数, 保证系统 (2) 在预设时间 T_u 内的一致性. 值得注意的是, 所设计的势能函数 P_{ij} 具有如下性质:

1) 相邻两个智能体之间的势能相等, 即

$$P_{ij}(x_{ij}) = P_{ji}(x_{ji})$$

2) 势能函数 P_{ij} 对 x_{ij} 和 x_{ji} 分别求微分满足

$$\nabla_i P_{ij} = -\nabla_j P_{ji}$$

3) 由于本文所考虑的通信拓扑图 $\mathcal{G}$ 为无向图, 若 $j \in \mathcal{N}_i$ 则 $i \in \mathcal{N}_j$. 令

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\nabla_i P_{ij})^T (\dot{x}_i - \dot{x}_j)$$

由于

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\nabla_i P_{ij})^T \dot{x}_j &= \sum_{j=1}^N \sum_{i \in \mathcal{N}_j} (\nabla_i P_{ij})^T \dot{x}_j = \\ &\sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\nabla_j P_{ji})^T \dot{x}_i \end{aligned}$$

因此, 可以得到 $S = 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\nabla_i P_{ij})^T \dot{x}_i$.

2.2 基于连通性保持避障控制器 u_2 设计

在多障碍物环境下, 为了保证系统在保持连通性的条件下实现柔性避障, 根据引理 2 所述, 设计 λ_2 依赖的势能函数 $P_\lambda = k_p \coth(\lambda_2 - \xi)$ ^[19], 其中, $\xi \in \mathbf{R}^+$. 该势能函数保证了系统的费德勒特征值 λ_2 始终大于 ξ . 当参数 ξ 增大时, 其所对应的多智能体系统的连通性会增强, 但其拓扑结构的可变化空间会随之减少. $k_p > 0$ 为通信拓扑的刚度参数, 用于调节系统拓扑结构的灵活度. k_p 值越大, 拓扑结构越趋于刚性, 越不易发生改变; k_p 值越小, 拓扑结构则越柔性, 在维持系统连通性的前提下, 拓扑重构的灵活性越高, 适应性越强. 针对智能体 i 设计控制器 u_2^i 如下:

$$u_2^i = -f_i^v - f_i^\lambda \quad (4)$$

其中, f_i^v 与控制器 u_1^i 中 f_i^v 表达式相同;

$$f_i^\lambda = \frac{\partial P_\lambda(t)}{\partial x_i} = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \frac{\partial P_\lambda(t)}{\partial x_{ij}} + \sum_{s \in \mathcal{N}_i^o} \frac{\partial P_\lambda(t)}{\partial x_{is}^o}$$

由于 $\lim_{\lambda_2 \rightarrow \xi} P_\lambda(t) \rightarrow +\infty$, 因此 f_i^λ 能够保证多智能体在躲避障碍物的过程中 $\lambda_2 > \xi > 0$.

2.3 切换控制器 F_i 设计

设计切换控制器 $F_i = \sigma u_1^i + (1 - \sigma)u_2^i$, 当多智

能体系统中的任一智能体检测到障碍物时, 系统将进入避障模式, 即 $\sigma = 0$. 为了保证系统在切换模式下的稳定性, 需保证系统的能量不会在切换过程中累计增加^[20-23]. 假设系统在一致性控制模式下开始运动, 在无障碍环境下的能量函数为 $V_1(t)$, 在多障碍物环境下的能量函数为 $V_2(t)$, 且 $\dot{V}_1(t) \leq 0$, $\dot{V}_2(t) \leq 0$. 假设系统第 k 次从一致性模式进入避障模式的时刻为 t_k , 系统的能量从 $V_1(t_k^-)$ 切换至 $V_2(t_k)$, 且 $V_2(t_k) = V_1(t_k^-) + \Delta V_{t_k}$, 其中, t_k^- 是第 k 次切换发生的瞬间, 此时系统还处于一致性模式; $V_1(t_k^-)$ 是 $V_1(t)$ 在跳变时刻 t_k 的能量值; ΔV_{t_k} 为跳变时刻能量的变化值. 如果 $\Delta V_{t_k} \leq 0$, 则系统在检测不到障碍物后, 即可切换回一致性控制模式; 当 $\Delta V_{t_k} > 0$ 时, 为了保证系统的稳定性, 系统从避障模式切换回一致性模式需满足如下两个条件: 1) 系统检测不到障碍物; 2) 驻留时间 T_k 需满足 $V_1(t_{k-1} + T_{k-1}) \geq V_1(t_k + T_k)$, 其中 $V_1(t_{k-1} + T_{k-1})$ 为第 $k-1$ 次从避障模式进入一致性模式时系统的初始能量值. 在该设定下, 避免了能量的不断累积而导致的系统不稳定性. 因此, 只需保证在控制器 u_1 和 u_2 的作用下, 系统的能量函数 $V_1(t)$ 和 $V_2(t)$ 满足 $\dot{V}_1(t) \leq 0$ 和 $\dot{V}_2(t) \leq 0$ 及上述的切换条件即可保证系统的稳定性.

注 1. 在作业场景中存在动态障碍物时, 可以根据多智能体当前速度, 进行动态障碍避障模式激活时间估计. 通过对动态障碍物进行有限时域内的运动预测, 构建涵盖预测时域内所有可能的障碍物碰撞风险区域, 从而通过高频观测与预测将动态避障问题转化为有限时间内的静态避障问题, 基于本文所提方法实现动态障碍物规避.

2.4 稳定性分析

本节将针对系统 (2) 在不同模式下的动态行为, 分别构造能量函数 $V_1(t)$ 和 $V_2(t)$, 并基于 Lyapunov 稳定性理论证明系统的稳定性. 首先, 分析无障碍环境下系统在一致性控制器作用下的运动情形, 给出使系统满足预设时间一致性的控制器设计条件. 以下两个引理将为该稳定性定理的证明提供有效支撑.

引理 3^[19]. 对于向量 $a = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T \in \mathbf{R}^N$ 和向量 $b = [b_1, b_2, \dots, b_N]^T \in \mathbf{R}^N$, 有 $a^T(a-b) \geq \frac{1}{2}a^Ta - \frac{1}{2}b^Tb$.

引理 4^[24]. 对于向量 $a = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T \in \mathbf{R}^N$ 和向量 $b = [b_1, b_2, \dots, b_N]^T \in \mathbf{R}^N$, 有 $a^Tb \leq \frac{\varepsilon}{2}a^Ta + \frac{1}{2\varepsilon}b^Tb$, 其中 $\varepsilon \in \mathbf{R}^+$ 是大于零的任意实数.

定理 1 将给出系统 (2) 在预设时间 T_u 内实现

一致稳定时, 控制器增益所需满足的充分条件.

定理 1. 针对系统 (2), 如果控制器 $u_1^i = -p_v^i(t) \times f_v^i - p_p^i(t) \nabla_i P_{ij} - p_b^i(t) \dot{e}_i$, $i = 1, 2, \dots, N$ 的控制器增益满足

$$\begin{cases} p_v^i(t) = \psi_i(t) \\ p_p^i(t) = \theta_i(t) + (2 - \theta_i(t))c_i(t)\psi_i(t) \\ p_b^i(t) = (k_c^i(t)\psi_i(t) + k_a^i(t)) \end{cases}$$

其中,

$$\theta_i(t) = d_{ij} - d_l + 2$$

$$\psi_i(t) = \frac{\delta(t)}{\delta(t)} = \begin{cases} \frac{h}{T_u + t_0 - t}, & t \in [t_0, t_0 + T_u) \\ 0, & t \in [t_0 + T_u, \infty) \end{cases}$$

$$c_i(t) = \frac{4\varepsilon(d_{\max} - d_{ij})}{(2d_{\max} - d_{ij} - d_l)d_{ij}}$$

$$k_a^i(t) = \frac{\varepsilon}{2}(d_l - d_{ij})\beta_i(t) + \kappa_i(t)\frac{1}{2}m_i$$

$$k_c^i(t) = \frac{\varepsilon}{2}(d_l - d_{ij})c_i(t)\beta_i(t) + m_i$$

式中, m_i 为第 i 个智能体的质量;

$$\begin{cases} \beta_i(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \frac{\alpha(d_{ij} - d_l)(2d_{\max} - d_{ij} - d_l)}{d_{ij}(d_{\max} - d_{ij})^2} \\ \kappa_i(t) = \frac{1}{2\varepsilon} \frac{(2d_{\max} - d_{ij} - d_l)d_{ij}}{d_{\max} - d_{ij}} \end{cases}$$

那么, 系统 (2) 在控制器 $u_1 = [u_1^1, u_1^2, \dots, u_1^N]^T$ 的作用下关于时间 T_u 预设时间一致稳定.

证明. 构造能量函数 $V_1(t)$ 为

$$V_1(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} M_i \dot{e}_i^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} P_{ij}$$

为了方便书写, 下面的证明过程中省略了时间 t . 上式两端同时对时间 t 求导, 可得

$$\dot{V}_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \dot{e}_i^T M_i \ddot{e}_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \nabla_i P_{ij}^T (\dot{x}_i - \dot{x}_j)$$

根据系统 (2) 中 $M_i \ddot{e}_i$ 的表达式, 可推得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \dot{e}_i^T (-B_i \dot{e}_i - p_v^i f_v^i - p_p^i \nabla_i P_{ij} - \\ & p_b^i \dot{e}_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \nabla_i P_{ij}^T (\dot{e}_i - \dot{e}_j) \end{aligned}$$

根据控制器增益的表达式及势能函数 P_{ij} 的性质 (3), 进一步可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \dot{e}_i^T (-B_i \dot{e}_i - \psi_i f_i^v - (k_c^i \psi_i + \\ & k_a^i) \dot{e}_i - (\theta_i + (2 - \theta_i) c_i \psi_i) \nabla_i P_{ij}) + \\ & 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \nabla_i P_{ij}^T \dot{x}_i = \\ & - \sum_{i=1}^N \dot{e}_i^T B_i \dot{e}_i - \psi_i k_v \sum_{i=1}^N \dot{e}_i^T \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\dot{e}_i - \\ & \dot{e}_j) - \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \dot{e}_i^T (\theta_i + (2 - \theta_i) c_i \psi_i) \beta_i (x_i - \\ & x_j) - k_c^i \psi_i \sum_{i=1}^N \dot{e}_i^T \dot{e}_i - k_a^i \sum_{i=1}^N \dot{e}_i^T \dot{e}_i + \\ & 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \nabla_i P_{ij}^T \dot{e}_i \end{aligned}$$

由引理 3 中 $a^T(a - b) \geq \frac{1}{2}a^T a - \frac{1}{2}b^T b$ 可得

$$\begin{aligned} -\psi_i k_v \sum_{i=1}^N \dot{e}_i^T \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\dot{e}_i - \dot{e}_j) \leq \\ -\frac{1}{2} \psi_i k_v \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \|\dot{e}_i\|^2 + \\ \frac{1}{2} \psi_i k_v \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \|\dot{e}_j\|^2 \leq 0 \end{aligned}$$

因此, 有

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq & - \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \dot{e}_i^T (\theta_i + (2 - \theta_i) c_i \psi_i) \beta_i (x_i - \\ & x_j) - k_c^i \psi_i \sum_{i=1}^N \dot{e}_i^T \dot{e}_i - k_a^i \sum_{i=1}^N \dot{e}_i^T \dot{e}_i + \\ & 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \dot{e}_i^T \beta_i (x_i - x_j) \end{aligned}$$

根据引理 4 中 $a^T b \leq \frac{\varepsilon}{2} a^T a + \frac{1}{2\varepsilon} b^T b$, 可推得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq & \sum_{i=1}^N \frac{\varepsilon}{2} (2 - \theta_i) \beta_i \|\dot{e}_i\|^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \frac{1}{2\varepsilon} (2 - \\ & \theta_i) \beta_i d_{ij}^2 + \sum_{i=1}^N \frac{\varepsilon}{2} (2 - \theta_i) c_i \psi_i \beta_i \|\dot{e}_i\|^2 - \\ & k_c^i \psi_i \sum_{i=1}^N \dot{e}_i^T \dot{e}_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \frac{1}{2\varepsilon} (2 - \\ & \theta_i) c_i \psi_i \beta_i d_{ij}^2 - k_a^i \sum_{i=1}^N \dot{e}_i^T \dot{e}_i \end{aligned}$$

进一步整理, 可得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq & \sum_{i=1}^N \left(\frac{\varepsilon}{2} (2 - \theta_i) \beta_i - k_a^i \right) \dot{e}_i^2 + \\ & \sum_{i=1}^N \left(\frac{\varepsilon}{2} (2 - \theta_i) c_i \beta_i - k_c^i \right) \psi_i \dot{e}_i^2 + \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \frac{1}{2\varepsilon} (2 - \theta_i) \beta_i d_{ij}^2 + \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \frac{1}{2\varepsilon} (2 - \theta_i) c_i \psi_i \beta_i d_{ij}^2 \quad (5) \end{aligned}$$

将 c_i 、 k_a^i 、 k_c^i 和 θ_i 代入式 (5) 中, 有

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq & -\kappa_i \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N M_i \dot{e}_i^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} P_{ij} \right) - \\ & 2\psi_i \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N M_i \dot{e}_i^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} P_{ij} \right) \end{aligned}$$

即

$$\dot{V}_1 \leq -\kappa_i V_1 - 2\psi_i V_1$$

由于 $\kappa_i = (2d_{\max} - d_{ij} - d_l)d_{ij}/(2\varepsilon(d_{\max} - d_{ij})) > (d_{\max} - d_l)d_{\min}/(2\varepsilon(d_{\max} - d_{\min})) = \kappa_i^* \in \mathbf{R}^+$, 根据引理 1 证明可知, 当 $t \rightarrow t_0 + T_u$ 时, 有 $V_1(t) = 0$. 当 $t \in [t_0 + T_u, \infty)$ 时, 有

$$\dot{V}_1 \leq -\kappa_i V_1 \leq 0$$

那么有

$$\dot{V}_1 = 0, \quad t \in [t_0 + T_u, \infty)$$

当 $V_1(t) = 0$ 时, 需满足 $\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} M_i \dot{e}_i^2 = 0$ 和 $\sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} P_{ij} = 0$, 即当 $t \rightarrow t_0 + T_u$ 时, 有 $d_{ij} \rightarrow d_l$, $\dot{x}_i \rightarrow \dot{x}_j \rightarrow \dot{x}_d$; 当 $t > t_0 + T_u$ 时, 有 $d_{ij} = d_l$, $\dot{x}_i = \dot{x}_j = \dot{x}_d$. 根据定义 1, 系统 (2) 关于时间 T_u 预设时间一致稳定. $\square$

系统 (2) 在控制器 u_2 的作用下将转变为系统 (1), 且 $f_i = u_2^i$. 定理 2 将给出系统 (1) 在避障控制器作用下稳定的充分条件.

定理 2. 针对系统 (1), 如果控制器 $u_2^i = -f_i^v - f_i^\lambda$, $i = 1, 2, \dots, N$ 的控制器增益满足

$$k_v > 0, \quad k_p > 0$$

那么, 系统 (1) 在控制器 $u_2 = [u_2^1, u_2^2, \dots, u_2^N]^T$ 的作用下稳定.

证明. 构造能量函数 $V_2(t)$ 为

$$V_2(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} M_i \dot{x}_i^2 + P_\lambda$$

函数两边同时对时间 t 求导, 可得

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 = & \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \dot{x}_i^T M_i \ddot{x}_i + \left(\sum_{i=1}^N \frac{\partial P_\lambda(t)}{\partial x_i} \right)^T \dot{x}_i = \\
& \sum_{i=1}^N \dot{x}_i^T (-f_i^v - B_i \dot{x}_i - f_i^\lambda) + \\
& \left(\sum_{i=1}^N \frac{\partial P_\lambda(t)}{\partial x_i} \right)^T \dot{x}_i = \\
& \sum_{i=1}^N \dot{x}_i^T \left(-k_v \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\dot{x}_i - \dot{x}_j) - \right. \\
& \left. B_i \dot{x}_i - \frac{\partial P_\lambda(t)}{\partial x_i} \right) + \left(\sum_{i=1}^N \frac{\partial P_\lambda(t)}{\partial x_i} \right)^T \dot{x}_i = \\
& - \sum_{i=1}^N \dot{x}_i^T \left(k_v \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\dot{x}_i - \dot{x}_j) - B_i \dot{x}_i \right) \leq \\
& - \sum_{i=1}^N \dot{x}_i^T B_i \dot{x}_i \leq 0
\end{aligned}$$

□

3 数值仿真

本节通过一个由三个智能体构成的二阶多智能体系统, 对所提出控制方法的有效性进行验证. 设定系统的通信拓扑如图1所示, 三个智能体之间均可进行信息通信; 智能体的质量 $m_i = 2 \text{ kg}$, 阻尼系数 $b_i = 1.2 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, 智能体间期望距离 $d_i = 8 \text{ m}$, 最大通信距离 $d_{\max} = 12 \text{ m}$.

首先考虑无障碍约束的情况, 验证系统在不同初始状态、不同预设时间条件下, 所设计的控制方法均可保证系统的预设时间稳定性. 考虑三个智能体的初始位置为 $x_1 = [15.0; 5.0] \text{ m}$, $x_2 = [10.0; 3.0] \text{ m}$, $x_3 = [13.5; 0] \text{ m}$; 预设时间 $T_u = 20 \text{ s}$; 初始速度为 $\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = \dot{x}_3 = [0; 0] \text{ m/s}$; 控制器参数势能增益 $\alpha = 2$, 时间函数指数 $h = 2.1$, 协调系数 $\varepsilon = 0.14$, 速度增益 $k_v = 6$; 系统所追踪轨迹速度 $\dot{x}_d = [2; 0] \text{ m/s}$. 图2给出了系统(2)在控制器 u_1 作用下, 智能体间距离及每个智能体的速度变化. 在上述参数设定保持不

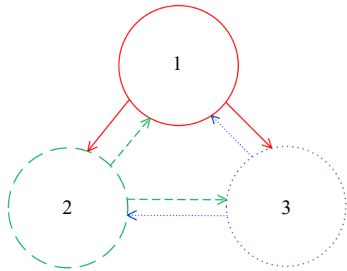
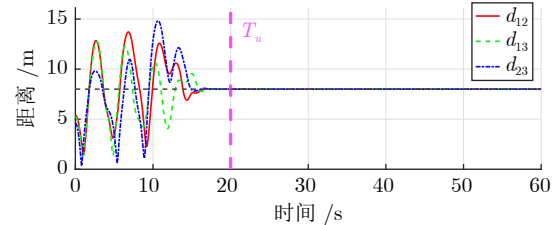


图1 多智能体系统通信拓扑

Fig.1 Communication topology of multi-agent systems

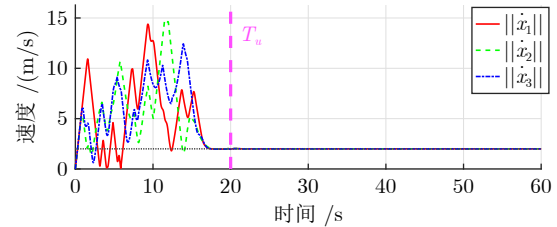
变的前提下, 仅将系统的预设时间调整为 $T_u = 12 \text{ s}$, 由图3可知, 系统仍能在该预设时间内实现距离与速度的一致性收敛.

考虑系统的初始速度不为零的情况, 重新设定三个智能体的初始位置为 $x_1 = [16.0; 5.0] \text{ m}$, $x_2 = [18.0; 5.0] \text{ m}$, $x_3 = [14.0; 2.4] \text{ m}$; 智能体的初始速度分别为 $\dot{x}_1 = [6; 0] \text{ m/s}$, $\dot{x}_2 = [0; 3] \text{ m/s}$, $\dot{x}_3 = [0; 6] \text{ m/s}$;



(a) 智能体间距离变化轨迹

(a) Inter-agent distance variation trajectories

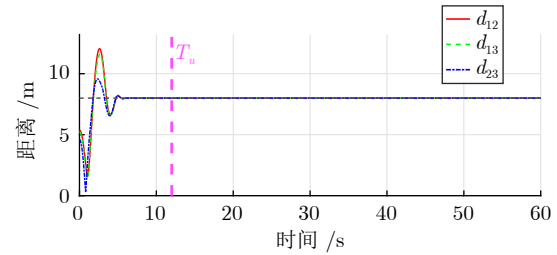


(b) 智能体速度变化轨迹

(b) Agent velocity variation trajectories

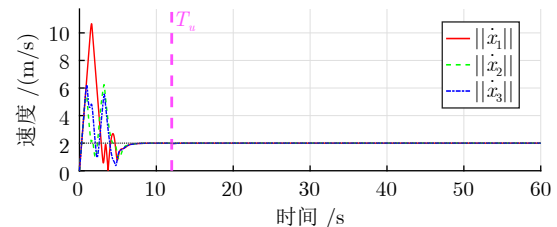
图2 智能体间距离和速度变化轨迹 ($T_u = 20 \text{ s}$)

Fig.2 Inter-agent distance and velocity variation trajectories ($T_u = 20 \text{ s}$)



(a) 智能体间距离变化轨迹

(a) Inter-agent distance variation trajectories



(b) 智能体速度变化轨迹

(b) Agent velocity variation trajectories

图3 智能体间距离和速度变化轨迹 ($T_u = 12 \text{ s}$)

Fig.3 Inter-agent distance and velocity variation trajectories ($T_u = 12 \text{ s}$)

控制器参数 $\alpha = 2$, $h = 4$, $\varepsilon = 0.14$, $k_v = 3$; 预设时间 T_u 依然设定为 20 s. 在该参数设定下, 图 4 给出了智能体间距离及每个智能体速度的变化轨迹. 根据仿真结果可以得出, 当智能体的初始状态不改变时, 修改预设时间 T_u 仍能使系统达到一致性. 当智能体初始状态改变时, 对控制参数进行合理的调整可以使系统在预设时间内达到一致性.

通过仿真进一步验证, 复杂障碍约束条件下的多智能体系统在上文所设计切换控制器 F_i 作用下, 可实现预设时间一致性控制与避障控制的多次切换, 同时保证系统的连通性和稳定性. 参数设定如下: 假设智能体的初始位置和初始速度不变, 即 $x_1 = [16.0; 5.0]$ m, $x_2 = [18.0; 5.0]$ m, $x_3 = [14.0; 2.4]$ m, $\dot{x}_1 = [6; 0]$ m/s, $\dot{x}_2 = [0; 3]$ m/s, $\dot{x}_3 = [0; 6]$ m/s; 初始时间 $t_0 = 0$ s, 预设时间 $T_u = 20$ s; 智能体质量为 $m_i = 2$ kg, 阻尼系数分别为: $b_1 = 1.0$ N·s/m, $b_2 = 1.6$ N·s/m, $b_3 = 1.1$ N·s/m; 智能体间期望距离 $d_i = 8$ m, 最大通信距离 $d_{\max} = 12$ m, 智能体检测到障碍物的最大距离 $d_{\max}^o = 8$ m, 与障碍物之间的最小安全距离 $d_{\min}^o = 4$ m. 本文设计 5 个障碍物, 其位置分别为: Obs1 = [40; 50] m, Obs2 = [76; 72] m, Obs3 = [65; 39] m, Obs4 = [84; 31] m, Obs5 = [110; 15] m. 当任意一个智能体与任意一个障碍物的距离小于等于 8 m 时系统将进入避障模式. 令系统的跟踪轨迹运动速度 $\dot{x}_d$ 为随时间变化的分段常值, 图 5 ~ 图 10 给出了 $\dot{x}_d$ 在不同取值下的六条追踪轨迹和三维图.

图 11 和图 12 是以图 5 和图 8 为例的智能体间

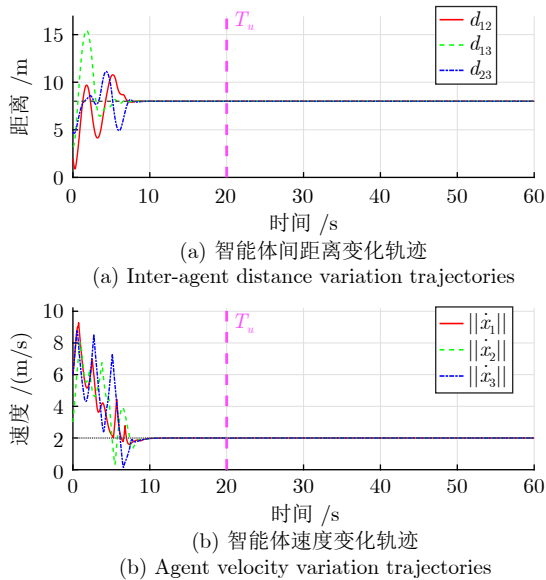


图 4 智能体间距离和速度变化轨迹 (初始速度变化)

Fig.4 Inter-agent distance and velocity variation trajectories (initial velocity change)

距离和速度变化轨迹. 图中蓝色部分 OA 表示系统处于避障模式.

考虑到实际的工程应用场景中, 系统参数往往难以精确测量. 为了验证所提出控制策略在模型参数不确定情况下的鲁棒性, 在下面的仿真中考虑智能体质量和阻尼的测量存在偏差的情况.

设定控制器的名义质量与阻尼分别为 $M_i = 2$ kg, $B_i = 1.2$ N·s/m, 而多智能体系统实际执行任务过程中的参数为 $M_i = 2(1 + 20\% \times rand)$ kg 和 $B_i = 1.2(1 - 20\% \times rand)$ N·s/m, $rand$ 为 0 ~ 1 范围内的随机数.

同时, 考虑到有外界因素的干扰, 在一致性控制律中加入了模拟风速的扰动项 $d(t)$ 来模拟不同方向的风速. $d(t) = [d_x(t), d_y(t)]$, 其中 $d_x(t) = 1.2 \times \sin(2t)$, $d_y(t) = 1.2 \cos(2t)$.

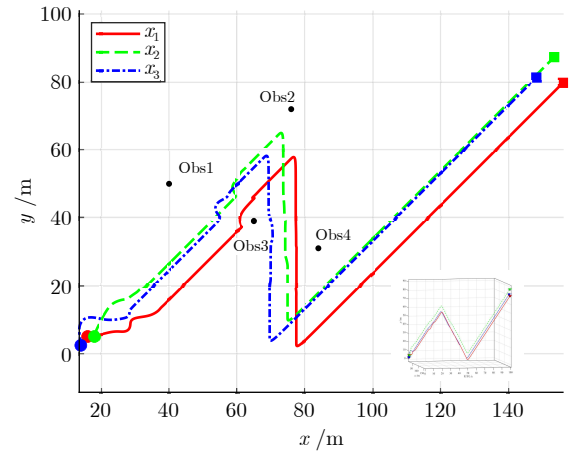


图 5 智能体运动轨迹 (N 字形轨迹)

Fig.5 Motion trajectories of agents (N-shaped trajectory)

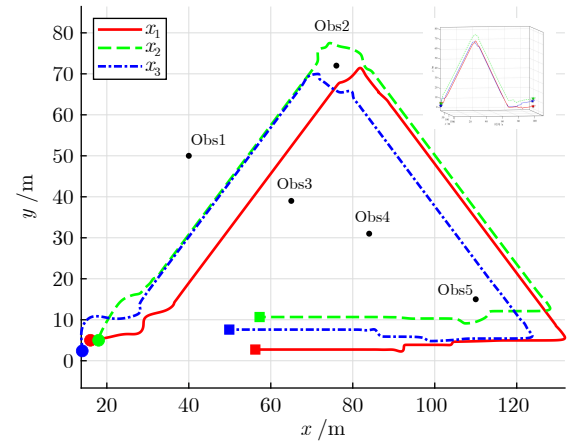


图 6 智能体运动轨迹 (三角形轨迹)

Fig.6 Motion trajectories of agents (triangular trajectory)

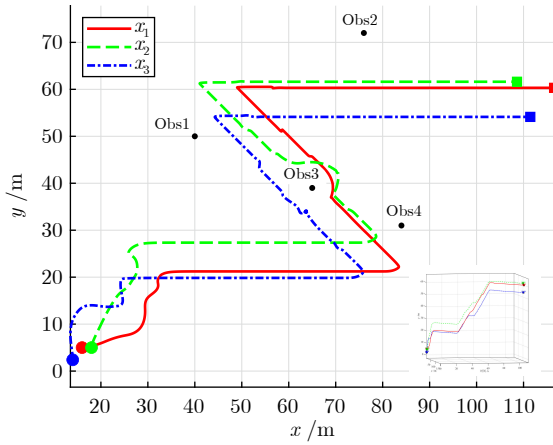


图 7 智能体运动轨迹 (Z 字形轨迹)
Fig.7 Motion trajectories of agents
(Z-shaped trajectory)

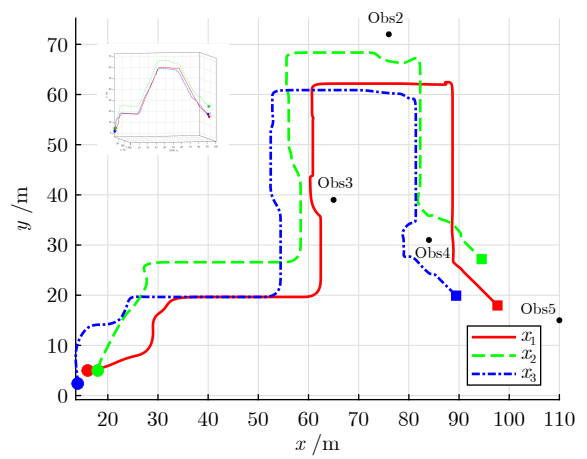


图 10 智能体运动轨迹 (凸形轨迹)
Fig.10 Motion trajectories of agents (convex trajectory)

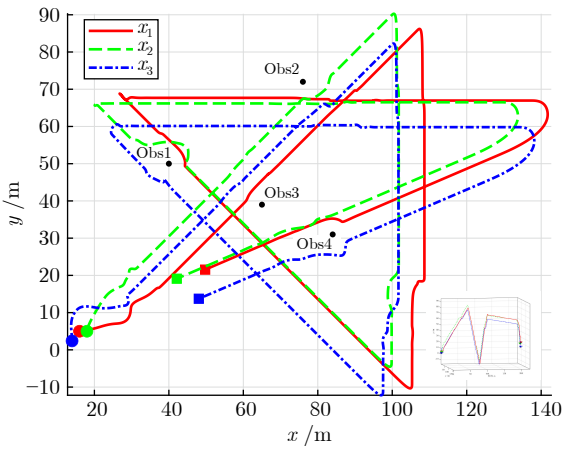
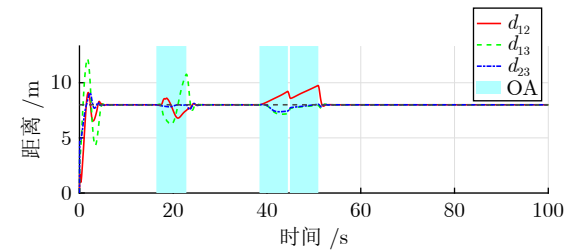
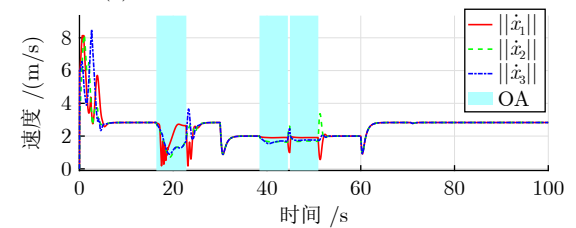


图 8 智能体运动轨迹 (五边形轨迹)
Fig.8 Motion trajectories of agents
(pentagonal trajectory)



(a) 智能体间距离变化轨迹
(a) Inter-agent distance variation trajectories



(b) 智能体速度变化轨迹
(b) Agent velocity variation trajectories

图 11 N 字形轨迹的智能体间距离和速度变化轨迹

Fig.11 Inter-agent distance and velocity variation trajectories of N-shaped trajectory

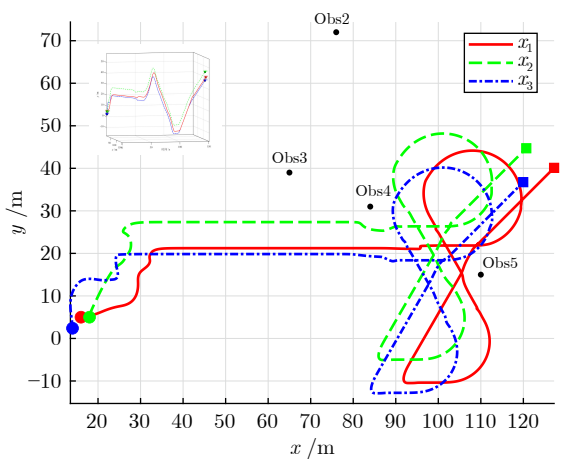


图 9 智能体运动轨迹 (8 字形轨迹)
Fig.9 Motion trajectories of agents
(figure-eight trajectory)

图 13 和图 14 展示了在上述外部干扰下, 系统仍能在预设时间 T_u 内实现预设时间一致性, 且误差能够被限制在极小的界限内.

为验证基于代数连通度势能函数的全局连通性保持方法在避障条件下的优越性能, 我们在相同参数配置下, 引入基于距离势能函数的局部连通性保持方法^[25] 作为对照, 对系统进行控制仿真. 如图 15 所示, 在避障过程中, 基于距离势能函数的控制方法导致智能体发生断联, 而本文提出的基于代数连通度 λ_2 的势能方法能够始终维持 $\lambda_2 > 0$, 有效保证了系统在避障过程中的全局连通性, 从而显著提升了系统在复杂环境下的运行可靠性.

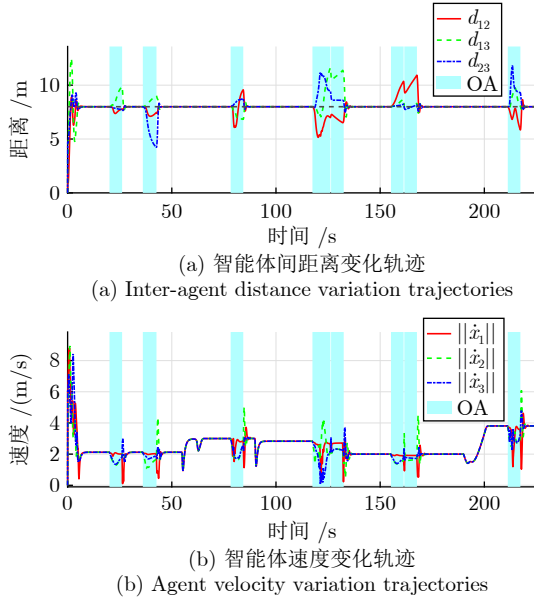


图 12 五边形轨迹的智能体间距离和速度变化轨迹
Fig.12 Inter-agent distance and velocity variation trajectories of pentagonal trajectory

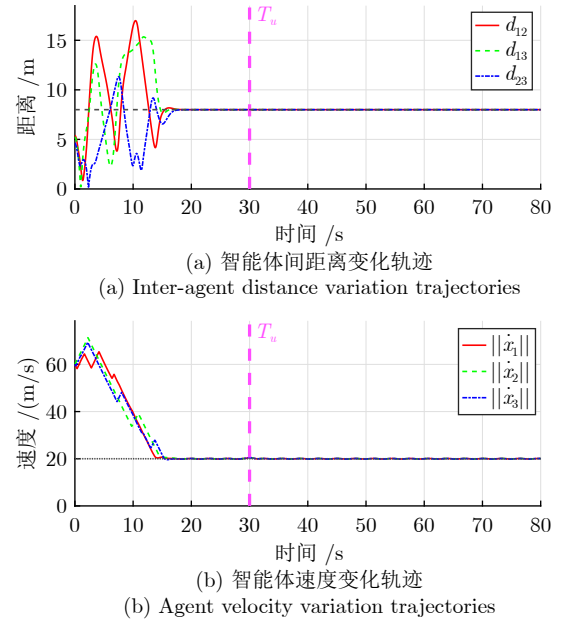


图 14 智能体间距离和速度变化轨迹 (外部干扰下)
Fig.14 Inter-agent distance and velocity variation trajectories (under external disturbances)

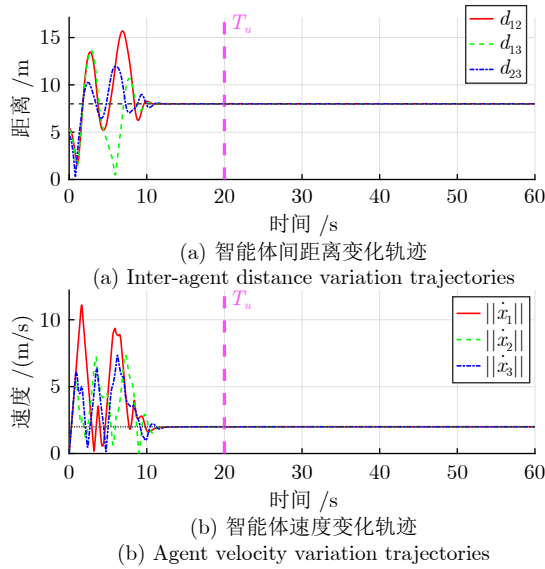


图 13 智能体间距离和速度变化轨迹 (参数扰动下)
Fig.13 Inter-agent distance and velocity variation trajectories (under parameter perturbations)

4 结束语

本文研究了多智能体系统在有障碍作业空间中, 通信连通性及安全距离保持等复杂空间约束下的预设时间一致性控制问题. 充分考虑多智能体与障碍物之间距离变化, 将作业过程分为障碍规避模式及协同作业模式以描述作业过程中的协同避障及一致性队形保持过程. 在障碍规避模式充分考虑了

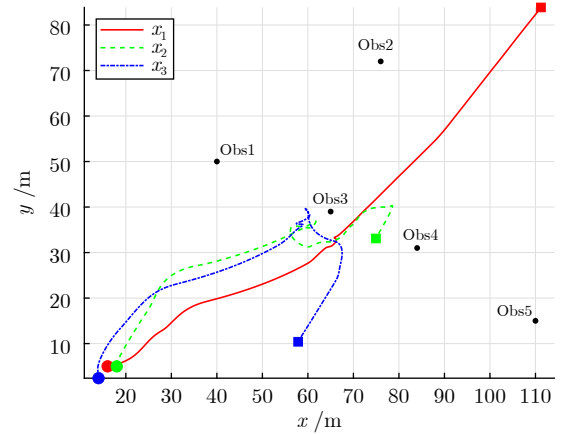


图 15 智能体运动轨迹 (基于距离势能函数)
Fig.15 Motion trajectories of agents (based on distance potential function)

智能体碰撞及失联风险, 提出了基于连通性保持势能函数的协同避障控制律, 既保证了多智能体协同越障过程的安全性, 又避免了避障后部分智能体失联的不利情况出现. 针对协同越障后多智能体系统初始状态难以预估, 在协同作业模式提出了收敛时间不依赖于初始状态的时变增益预设时间一致性控制器, 提高了避障后多智能体一致性协同作业的快速性、收敛时间的可控性. 利用一个二阶多智能体系统验证了本文方法的有效性. 本研究也可进一步拓展至更高维度多智能体系统、通信时延及有向拓扑等复杂条件下的协同避障控制问题.

参考文献

- 1 Lǔ Jin-Hu, Yu Jiang-Long, Dong Xi-Wang. New progress in cooperative guidance for aircraft swarm system. *Acta Automatica Sinica*, 2025, **51**(4): 727–743
(吕金虎, 于江龙, 董希旺. 飞行器集群协同制导新进展. 自动化学报, 2025, **51**(4): 727–743)
- 2 Lei C J, Wu S H, Yang Y, Xue J Y, Zhang Q Y. Joint trajectory and communication optimization for heterogeneous vehicles in maritime SAR: Multi-agent reinforcement learning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, **73**(9): 12328–12344
- 3 Wang Y, Wang J J, Zhu R J, Wang Z Y, Xin P J, Pan P. Distributed knowledge-enhanced multi-agent reinforcement learning for internet of drones. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, **12**(21): 44166–44176
- 4 Gao Chen, He Xiao, Zhou Dong-Hua. Fault-tolerant consensus control of multi-agent systems based on PI structure. *Acta Automatica Sinica*, 2025, **51**(3): 570–576
(郜晨, 何潇, 周东华. 基于 PI 结构的多智能体系统容错一致性控制. 自动化学报, 2025, **51**(3): 570–576)
- 5 Mu C X, Peng J W. Learning-based cooperative multiagent formation control with collision avoidance. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, **52**(12): 7341–7352
- 6 Fang H, Wei Y, Chen J, Xin B. Flocking of second-order multiagent systems with connectivity preservation based on algebraic connectivity estimation. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, **47**(4): 1067–1077
- 7 Ding C, Ma L, Ding S H. A new adaptive second-order sliding mode controller design for nonlinear systems with multiple uncertainties. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2023, **33**(3): 1438–1455
- 8 Zou A M. Finite-time output feedback attitude tracking control for rigid spacecraft. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, **22**(1): 338–345
- 9 Tang R Q, Yang X S, Wen G H, Lu J Q. Finite-time synchronization of fractional-order memristive fuzzy neural networks: Event-based control with linear measurement error. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2024, **36**(5): 8205–8214
- 10 Li Xiao-Hua, Hu Li-Yao. Prescribed performance finite-time H_∞ tracking control for a class of p -normal form nonlinear systems. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(12): 2870–2880
(李小花, 胡利耀. 一类 p 规范型非线性系统预设性能有限时间 H_∞ 跟踪控制. 自动化学报, 2021, **47**(12): 2870–2880)
- 11 Li Z Q, Wang Y J, Song Y D, Ao W. Global consensus tracking control for high-order nonlinear multiagent systems with prescribed performance. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, **53**(10): 6529–6537
- 12 Ni J K, Liu L, Tang Y, Liu C X. Predefined-time consensus tracking of second-order multiagent systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, **51**(4): 2550–2560
- 13 Ning B D, Han Q L, Zuo Z Y, Ding L, Lu Q, Ge X H. Fixed-time and prescribed-time consensus control of multiagent systems and its applications: A survey of recent trends and methodologies. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, **19**(2): 1121–1135
- 14 Liu Y, Li Y M. Prescribed-time formation control for unmanned surface vehicle systems under switching topology. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024, **9**(9): 5750–5760
- 15 Zeng D H, Zeng B W, Liu Y C, Zhao J, Cai C T. Practical prescribed-time trajectory tracking control for marine surface vehicles. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2024, **71**(12): 4899–4903
- 16 Yang Y, Yang T Q, Zhou S C, Sun W, Wu D F. Prescribed-time extended state observer-based bipartite formation control of vehicle multi-agent systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2025, **22**: 2174–2185
- 17 Wang Y J, Song Y D. Leader-following control of high-order multi-agent systems under directed graphs: Pre-specified finite time approach. *Automatica*, 2017, **87**: 113–120
- 18 Sabattini L, Chopra N, Secchi C. Decentralized connectivity maintenance for cooperative control of mobile robotic systems. *The International Journal of Robotics Research*, 2013, **32**(12): 1411–1423
- 19 Yang L, Constantinescu D, Wu L G. Passivity-based connectivity maintenance of teleoperated multi-robots under DoS attacks. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2025, **22**: 10484–10493
- 20 Zhu Y Z, Zheng W X. Multiple Lyapunov functions analysis approach for discrete-time-switched piecewise-affine systems under dwell-time constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, **65**(5): 2177–2184
- 21 Long L J, Wang F L, Chen Z Y. Global event-triggered funnel control of switched nonlinear systems via switching multiple Lyapunov functions. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2024, **54**(11): 6731–6741
- 22 Yang Ke-Xin, Li Yong-Qiang, Hou Zhong-Sheng, Feng Yu. Asymptotically stabilization for general nonlinear systems based on multiple Lyapunov functions. *Acta Automatica Sinica*, 2025, **51**(1): 197–209
(杨可馨, 李永强, 侯忠生, 冯宇. 基于多李雅普诺夫函数的一般非线性系统渐近镇定. 自动化学报, 2025, **51**(1): 197–209)
- 23 Liang Y, Zhang L X, Wang X R. Antibump switched LPV control with delayed scheduling for morphing aircraft. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, **60**(4): 5010–5023
- 24 Wu Jin-Wa, Liu Yong-Hua, Su Chun-Yi, Lu Ren-Quan. Adaptive command filtered control of strict feedback systems with uncertain control gains. *Acta Automatica Sinica*, 2024, **50**(5): 1015–1023
(吴锦娃, 刘勇华, 苏春翌, 鲁仁全. 具有不确定控制增益严格反馈系统的自适应命令滤波控制. 自动化学报, 2024, **50**(5): 1015–1023)
- 25 Yang Y, Constantinescu D, Shi Y. Passive multiuser teleoperation of a multirobot system with connectivity-preserving containment. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, **38**(1): 209–228



杨 柳 东北林业大学控制与信息工程学院副教授。2022 年获得哈尔滨工程大学博士学位。主要研究方向为多智能体系统分布式协同控制与多目标一致优化控制。

E-mail: yangl1991@hotmail.com

(YANG Liu Associate professor at the College of Control and Information Engineering, Northeast Forestry University. She received her Ph.D. degree from Harbin Engineering University in 2022. Her research interests include distributed cooperative control of multi-agent systems and multi-objective consensus optimal control.)



尤龙龙 东北林业大学控制与信息工程学院硕士研究生。主要研究方向为多智能体系统分布式协同控制。

E-mail: youll941461131@nefu.edu.cn

(YOU Long-Long Master student at the College of Control and Information Engineering, Northeast Forestry University. His main research interest is distributed cooperative control of multi-agent systems.)



宋文龙 东北林业大学控制与信息工程学院教授. 主要研究方向为林草智能装备技术, 林草智能机器人及智能控制系统, 林业信息监测.

E-mail: wlsong139@126.com

(**SONG Wen-Long** Professor at the College of Control and Information

Engineering, Northeast Forestry University. His research interests include intelligent equipment technology for forest and grassland, intelligent forest and grassland robots and intelligent control systems, and forestry information monitoring.)



黄建平 东北林业大学控制与信息工程学院副教授. 主要研究方向为植物病虫害智能监测, 林业信息处理, 林下自主无人系统.

E-mail: jphuang@nefu.edu.cn

(**HUANG Jian-Ping** Associate professor at the College of Control and

Information Engineering, Northeast Forestry University. His research interests include intelligent monitoring of plant diseases and insect pests, forestry information processing, and autonomous unmanned systems under forest.)



梁野 东北林业大学控制与信息工程学院副教授. 2023 年获得哈尔滨工业大学博士学位. 主要研究方向为飞行器动力学建模与控制, 切换系统. 本文通信作者.

E-mail: liangye@nefu.edu.cn

(**LIANG Ye** Associate professor at

the College of Control and Information Engineering, Northeast Forestry University. He received his Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2023. His research interests include modeling and control for flight dynamics, and switched systems. Corresponding author of this paper.)



吴立刚 哈尔滨工业大学航天学院教授. 主要研究方向为非连续动态系统, 机器视觉与智能检测, 自主智能无人系统.

E-mail: ligangwu@hit.edu.cn

(**WU Li-Gang** Professor at the

School of Astronautics, Harbin Institute of Technology. His research interests include discontinuous dynamical systems, machine vision and intelligent detection, and autonomous intelligent unmanned systems.)