文章编号:1008-1542(2026)04-0364-11

非合作目标的多智能体预设性能合围控制

张立俊[1],陈　硕[2],李志杰[1],刘　娜[3],王　研[4],路继勇[5],纪玉德[2]

(1.河北科技大学电气工程学院,河北石家庄　050018;
2.河北科技大学理学院,河北石家庄　050018;
3.石家庄铁路职业技术学院基础部,河北石家庄　050062;
4.武警北京总队参谋部,北京　100027;
5.河北科技大学资产与实验室管理处,河北石家庄　050018)

摘　要:为了实现领导智能体对非合作目标的合围控制,提出了一种复合预定时间收敛与预设性能约束的合围控制策略。通过设计预定时间几何中心估计器,使领导智能体能够在用户设定的时间内准确估计出非合作目标智能体的几何中心;在此基础上,结合所设计的速度场和预设性能函数,构建合围控制策略,以驱使领导智能体形成圆弧编队并实现合围,确保非合作目标智能体的几何中心按期望轨迹运动;基于 Lyapunov 稳定性理论,证明所提控制策略能够保证合围误差在预定时间内收敛到预设性能函数内,并通过数值仿真验证所提控制策略的有效性。结果表明,所提控制策略能够在预定时间内实现精确的合围控制,并引导几何中心沿着期望轨迹运动。所提策略不仅使跟踪误差的收敛时间上界不受系统初始状态的影响,而且满足预设性能,可为多智能体系统协同控制提供参考。

关键词:自动控制理论;预设性能控制;预定时间收敛;非合作目标;几何中心估计器;合围控制

中图分类号:TP273　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.7535/hbkd.2026yx04003

Prescribed performance encirclement control of multi-agent systems for non-cooperative targets

Zhang Lijun[1], Chen Shuo[2], Li Zhijie[1], Liu Na[3], Wang Yan[4], Lu Jiyong[5], Ji Yude[2]

(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;
2. School of Science, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;
3. Department of Basic Courses, Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang, Hebei 050062, China;
4. The General Staff, Beijing Armed Police Corps, Beijing 100027, China;
5. Department of Assets and Laboratory Management, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: To achieve encirclement control of non-cooperative targets by leader agents, a cooperative encirclement strategy

收稿日期:2025-10-30;修回日期:2026-03-25;责任编辑:冯民
基金项目:国家自然科学基金(62403183);河北省自然科学基金(F2024208025);河北省教育厅科技计划项目(QN2023052)
第一作者简介:张立俊(1987—),女,河北邯郸人,讲师,博士,主要从事协同控制方面的研究。
通信作者:刘娜,博士研究生。E-mail:liuna900229@163.com

张立俊,陈硕,李志杰,等.非合作目标的多智能体预设性能合围控制[J].河北科技大学学报,2026,47(4):364-374.
Zhang Lijun, Chen Shuo, Li Zhijie, et al. Prescribed performance encirclement control of multi-agent systems for non-cooperative targets [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2026, 47(4): 364-374.

integrating prescribed-time convergence and prescribed performance constraints was proposed. A prescribed-time geometric center estimator was designed, which enabled the leader agents to accurately estimate the geometric center of the non-cooperative target agents within a user-specified time. Building upon this, combined with the designed velocity field and prescribed performance function, an encirclement control strategy was developed. This strategy not only drove the leader agents to form a circular formation for encirclement but also ensured that the geometric center of the non-cooperative target agents moved along the desired trajectory. Based on Lyapunov stability theory, it was rigorously proven that the proposed control strategy guaranteed that the encirclement error converges within the prescribed performance function and within a prescribed time. Numerical simulations validated the effectiveness of the proposed strategy. The results demonstrate that the proposed control strategy achieves precise encirclement control within a prescribed time and guides the geometric center to follow the desired trajectory. The proposed approach not only ensures that the upper bound of the convergence time is independent of the system′s initial state but also satisfies prescribed performance constraints, providing reference for the cooperative control of multi-agent systems.

Keywords: automatic control theory; prescribed performance control; prescribed-time convergence; non-cooperative targets; geometric center estimator; encirclement control

近年来，多智能体的合围控制已成为控制科学领域的热点之一，其广泛应用于野生动物监测、军事监视、轨道服务以及环境保护等方面[1-3]。与包围控制不同的是，“合围”通常针对移动目标，将目标约束或引导至特定区域或轨迹，具有对目标运动的主动干预和引导作用，更强调动态的、封闭性的围捕过程。在合围控制的应用场景中，文献[4]考虑了目标智能体状态未知的情况，基于领导智能体的相对状态信息设计了 2 种具有耦合增益的分布式控制协议，解决了合围控制问题。针对目标智能体是移动的情况，文献[5]提出了一种两阶段合围控制算法。针对多目标情况，文献[6-7]设计了几何中心估计器来准确估计目标的几何中心位置，实现智能体的相对期望位置，以确保在合围多个移动目标时避免碰撞。但是这些研究主要集中在合作目标的合围控制中。而那些不主动配合领导智能体的非合作目标智能体的合围控制更具有一般性[8]。文献[9]提出了非合作目标合围控制是指模拟牧羊犬放牧行为，使领导智能体驱赶目标智能体到达指定区域。“非合作目标的多智能体系统”的核心挑战在于：设计领导智能体的协同控制策略，使其能够在目标不配合甚至抗拒的情况下，仍然实现对目标群的精确合围与引导。

收敛速度对于合围控制任务执行至关重要，尽管有限/固定时间控制具有有效性，但在这些框架下，确切的收敛时间无法提前确定，且往往被高估。相比之下，文献[10]提出的预定时间控制克服了这一局限性。预定时间控制能够在有限时间内实现状态稳定，不受初始条件或其他设计参数的影响。文献[11]提出了一种完全分布式且具有预定时间的控制方法，用于在特定最优约束条件下实现多个智能体系统的共识。文献[12]研究了非线性多智能体系统中具有实际规定时间的模糊二分型时变编队控制问题，通过 5 辆无人地面车辆验证了所提方法的有效性。文献[13]主要研究受输入约束的线性多智能体系统的规定时间协同输出调节问题，设计了基于分布式观测器的有界时变状态控制器和输出反馈协议。文献[14]研究了在遭受拒绝服务攻击的情况下，非线性多智能体系统的预定时间实际一致性问题，采用基于间歇事件触发机制的方法，其所提出的控制策略尤其适用于易受网络攻击的系统，例如微电网、无人机和潜艇系统。

另一方面，瞬态性能也是控制系统的重要性能指标。一般来说，跟踪误差被迫最终收敛到一个大小未知的残差集中[15-16]。为了确保跟踪误差能够实现较高的跟踪精度、较快的收敛速度等性能指标，Bechlioulis 等[17]首次提出了预定性能控制方法。文献[18]提出了一种基于视觉的指令性能控制方法，用于在执行器饱和的情况下使无人机跟踪非合作目标。文献[19]针对一类具有外部干扰的严格反馈非线性系统，提出了一种基于事件触发的鲁棒模糊自适应预设性能有限时间控制策略。文献[20]基于四旋翼飞行器系统，提出了一种基于固定时间自组织神经网络的可调预设性能控制方法。文献[21]针对第二阶领导跟随型多智能体系统，对基于性能的预定时间跟踪误差共识进行了分析。文献[22]全面探讨了输出反馈式性能控制的问题，基于改进的屏障函数，由于初始状态不再受到限制且多智能体系统的状态不可测量，因此性能控制的保守条件得到了放宽。文献[23]提出了一种非光滑的 PPC 策略，该策略能够以非递归的方式直接根据系统模型信息进行设计，与传统的递归方法不同，这种方法有效降低了控制设计过程的复杂性。基于预定时间理论与预定性能理论，设计合适的控制策略，可使系统能够在用户规定的时间内实现系统稳定性和优异的暂态与稳态性

能。基于动态面控制和反步控制，文献[24-25]分别提出了 2 种具有输出跟踪误差性能保证的规定时间控制方案。文献[26-27]研究了输出跟踪误差具有非对称约束的预定时间控制。尽管这些研究已经取得了一些进展，但是对于多约束、多目标合围控制的研究尚不深入。在实际的合围控制中，既要保证在指定时间内完成任务，又要保证控制过程平滑、无超调、满足安全边界，完美适配非合作目标合围等复杂场景。

在这些研究的启发下，针对非合作目标多智能体系统合围控制问题，提出了一种预设性能、预设时间控制策略。该策略突破了传统方法在收敛时间精确控制、暂态/稳态性能协调以及分布式估计鲁棒性方面的局限。对于非合作目标系统，利用几何中心估计器来调整目标的几何中心至期望轨迹，为每个领导智能体设计合适的控制策略，以实现对非合作目标的合围控制。

1 系统模型与预备知识

1.1 模型建立

针对具有 n 个领导智能体和 m 个目标智能体的合围控制问题，领导智能体和目标智能体的动力学模型分别为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_i=\boldsymbol{v}_i,\\ \dot{\boldsymbol{v}}_i=\boldsymbol{u}_i+\boldsymbol{d}_i,\end{cases}\tag{1}$$

$$\dot{\boldsymbol{r}}_k=\boldsymbol{\omega}_k,\tag{2}$$

式中：$i=1,2,\cdots,n$；$k=1,2,\cdots,m$；$\boldsymbol{x}_i$，$\boldsymbol{v}_i=[\nu_{xi},\nu_{yi}]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{u}_i=[u_{xi},u_{yi}]^{\mathrm{T}}$，分别表示第 i 个智能体的位置、速度和控制输入；$\boldsymbol{d}_i$ 是满足 $\|\boldsymbol{d}_i(t)\|\leqslant D$ 的扰动（D 是一个大于 0 的常数）；$\boldsymbol{r}_k=[r_{xk},r_{yk}]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{\omega}_k=[\omega_{xk},\omega_{yk}]^{\mathrm{T}}$，分别表示第 k 个目标智能体的位置和速度。

1.2 图论相关知识

智能体的通信拓扑图可以用 $\mathcal{G}(\mathcal{V},\varepsilon,\boldsymbol{\mathcal{A}})$ 表示：$\mathcal{V}=\{1,2,\cdots,n\}$，表示 n 个顶点的集合；$\varepsilon\in\mathcal{V}\times\mathcal{V}$，表示连接 2 个顶点边的集合；$\boldsymbol{\mathcal{A}}=[a_{ij}]\in\mathbb{R}^{n\times n}$，表示邻接矩阵。若 $(v_i,v_j)\in\varepsilon$，则 $a_{ij}>0$，否则 $a_{ij}=0$。

1.3 预定性能函数

定义 1[28] 若连续函数 $\rho(t):\mathbb{R}_+\to\mathbb{R}_+$ 满足如下条件：

1) $\rho(t)$ 为正定且严格递减，

2) $\lim\limits_{t\to\infty}\rho(t)=\rho_\infty>0$，$t\in[0,+\infty)$，

则 $\rho(t)$ 被称为一个性能函数。

为了确保跟踪误差的预设性能，定义以下边界函数：

$$\begin{cases}\underline{\boldsymbol{e}}_i=(\underline{\boldsymbol{e}}_{i,0}-\underline{\boldsymbol{e}}_{i,\infty})\exp(-\underline{\ell}_i t)+\underline{\boldsymbol{e}}_{i,\infty},\\ \bar{\boldsymbol{e}}_i=(\bar{\boldsymbol{e}}_{i,0}-\bar{\boldsymbol{e}}_{i,\infty})\exp(-\bar{\ell}_i t)+\bar{\boldsymbol{e}}_{i,\infty},\end{cases}\tag{3}$$

式中 $\underline{\boldsymbol{e}}_{i,0}$，$\underline{\boldsymbol{e}}_{i,\infty}$，$\bar{\boldsymbol{e}}_{i,0}$，$\bar{\boldsymbol{e}}_{i,\infty}$，$\underline{\ell}_i$，$\bar{\ell}_i$ 均为正二维列向量。定义系统跟踪误差为 $\boldsymbol{e}_i=\boldsymbol{x}_i-\boldsymbol{x}_{di}$，$\boldsymbol{x}_{di}$ 是领导智能体的期望位置。

本文的目标是设计合适的控制器，使系统跟踪误差在预定时间内收敛到预设的性能范围内，即：$\underline{\boldsymbol{e}}_i<e_i<\bar{\boldsymbol{e}}_i$。

为了实现控制目标，引入如下假设和引理。

假设 1 假设图 $\mathcal{G}$ 是无向连通的，并且每个目标智能体的信息都至少能被 1 个领导智能体获取。

假设 2 假设所有目标智能体的速度有界，即 $|\dot{\boldsymbol{r}}_k|\leqslant\beta$，$\beta$ 是一个大于 0 的常数。

引理 1[29] 对于 $\forall h>0$，$z\in\mathbb{R}$ 有以下不等式成立：$0\leqslant|z|-z\tanh\left(\dfrac{z}{h}\right)\leqslant 0.278\,5h$。

引理 2[30] 对于奇函数 $\tanh(x)$，有 $\zeta\in\mathbb{R}^n$，$\omega\in\mathbb{R}^m$，$K\in\mathbb{R}^{n\times m}$，$\mathcal{A}=[a_{ij}]\in\mathbb{R}^{n\times n}$，如果 $\mathcal{A}$ 是对称矩阵，那么有：

$$\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}(\boldsymbol{\zeta}_i-\boldsymbol{\zeta}_j)^{\mathrm{T}}\tanh[K(\omega_i-\omega_j)]=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}\boldsymbol{\zeta}_i^{\mathrm{T}}\tanh[K(\omega_i-\omega_j)]。$$

引理 3[17] 对于系统 $\dot{x}=f(x)$，假设存在正定函数 $V(x)$，且常数 $\eta\in(0,1)$，$T_c>0$，满足不等式：

$$\dot{V} \leqslant -\frac{\pi}{\eta T_c}(V^{1-\eta/2}+V^{1+\eta/2}),$$

则称系统是预定时间稳定的，T_c 是用户设定的收敛时间。

2　基于非合作目标的合围控制器的设计

首先，对领导智能体设计几何中心估计器来获取目标智能体的几何中心。其次，当每个领导智能体到达期望位置时，在人工势场的作用下，引导目标智能体的运动方向与所设计的速度场保持一致。最后，基于几何中心估计器，设计预定时间预设性能控制器，实现领导智能体引导目标智能体沿着期望轨迹运动。

2.1　几何中心估计器设计

在合围初始阶段，为领导智能体设计几何中心估计器 $\boldsymbol{c}_i$：

$$\boldsymbol{c}_i=\boldsymbol{\varphi}_i+\frac{n}{m}\sum_{k\in\mathbb{R}_i^H}\frac{1}{N_k^A}\boldsymbol{r}_k, \tag{4}$$

$$\dot{\boldsymbol{\varphi}}_i=\alpha\sum_{j=1}^{n}a_{ij}\tanh(\boldsymbol{c}_j-\boldsymbol{c}_i)-\beta_1\cdot\mathrm{sig}^{1-\eta}(\boldsymbol{c}_i-\bar{\boldsymbol{c}})-\beta_2\cdot\mathrm{sig}^{1+\eta}(\boldsymbol{c}_i-\bar{\boldsymbol{c}}), \tag{5}$$

式中：$i,j=1,2,\cdots,n$；$k=1,2,\cdots,m$；$\boldsymbol{\varphi}_i$ 为估计器的中间状态；$\bar{\boldsymbol{c}}=\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\boldsymbol{c}_p$，为目标智能体的几何中心；$\mathbb{R}_i^H$ 为与领导智能体 i 相互通信的目标智能体的集合；N_k^A 为能够获取第 k 个目标智能体状态信息的领导智能体的数量；$\beta_1\geqslant\frac{\pi}{\eta T_{c1}}\cdot\frac{1}{2^{1-\eta/2}}$，$\beta_2\geqslant\frac{\pi}{\eta T_{c21}}\cdot\frac{1}{2^{1+\eta/2}}$，均为设计参数。

2.2　速度场设计

在合围过程中，通过人工势场模拟目标智能体向领导智能体移动的排斥力。人工势场函数为

$$U=k_p\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\|\boldsymbol{d}_i\|}, \tag{6}$$

式中：k_p 为人工势场强度；$\boldsymbol{d}_i=\boldsymbol{x}_i-\boldsymbol{c}_i$，为第 i 个领导智能体与目标智能体几何中心的距离。根据目标智能体动力学性质，可以得到目标智能体的控制速度：

$$\boldsymbol{\omega}_k=\dot{\boldsymbol{r}}_k=\frac{\partial U}{\partial r_k}=-k_p\sum_{i=1}^{n}\frac{\boldsymbol{d}_i}{\|\boldsymbol{d}_i\|^3}。 \tag{7}$$

当领导智能体都到达期望位置时，将目标智能体的运动方向调整至速度场的方向。考虑如下期望轨迹：

$$Y_d:\boldsymbol{y}(t)=[x_d(t),y_d(t)]^{\mathrm{T}}。 \tag{8}$$

设计所需要的速度场：

$$\boldsymbol{V}_{ti}=\lambda_1\dot{\boldsymbol{y}}+\lambda_2\boldsymbol{e}_t, \tag{9}$$

式中 $\boldsymbol{V}_{ti}=[e_{xi},e_{yi}]^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{c}_i-\boldsymbol{y}$；$\dot{\boldsymbol{y}}$ 为目标智能体的几何中心指向轨迹切线方向的分量；e_t 为目标指向它朝向轨迹运动方向的分量；λ_1 和 λ_2 取决于目标到轨迹的距离。给出 λ_1 和 λ_2 的定义如下：

$$\begin{cases}\lambda_1=1-\tanh(\mu F(e_x,e_y)),\\ \lambda_2=1+\tanh(\mu F(e_x,e_y)),\end{cases} \tag{10}$$

式中 $F(e_x,e_y)=ae_x^2+be_y^2$，a、b、μ 是大于 0 的常数。

2.3　合围控制器设计

最终的控制目标是设计预定性能控制器，使得多智能体系统能够在用户设定的时间内完成对目标智能体的合围，形成以目标智能体的几何中心为圆心、R 为半径的圆弧，从而引导目标智能体的几何中心沿着期望轨迹运动，合围误差最终收敛到预设性能函数边界内，即：$\underline{\boldsymbol{e}}_i<\boldsymbol{e}_i(t)<\bar{\boldsymbol{e}}_i$，对于所有 $t\geqslant T_c$ 均成立。

为了得到领导智能体的期望位置 $\boldsymbol{x}_{di}$，考虑几何关系：$\boldsymbol{x}_{di}=\boldsymbol{c}_i+R\boldsymbol{g}(\varphi_i)$，$\boldsymbol{g}(\varphi_i)=[\cos(\varphi_i),\sin(\varphi_i)]^{\mathrm{T}}$，$\varphi_i$ 表示水平方向与第 i 个合围智能体和目标智能体的几何中心的连接线所形成的夹角。当 φ_i 和半径 R 确定时，领导智能体的期望位置就可以确定。

定义转换后的位置误差和速度误差：

$$\begin{cases} \boldsymbol{z}_{i1}=\dfrac{1}{2}\ln\left(\dfrac{\underline{\boldsymbol{e}}_i(t)+\boldsymbol{e}_i}{\bar{\boldsymbol{e}}_i(t)-\boldsymbol{e}_i}\right), \\ \boldsymbol{z}_{i2}=\boldsymbol{v}_i-\boldsymbol{\alpha}_i, \end{cases} \tag{11}$$

式中 $\boldsymbol{\alpha}_i$ 为虚拟控制律。

对 $\boldsymbol{z}_{i1}$ 求导可得：$\dot{\boldsymbol{z}}_{i1}=\boldsymbol{\rho}_i\dot{\boldsymbol{e}}_i-\bar{\boldsymbol{\omega}}_i$，其中，$\boldsymbol{\rho}_i=\dfrac{\underline{\boldsymbol{e}}_i+\bar{\boldsymbol{e}}_i}{2(\underline{\boldsymbol{e}}_i+\boldsymbol{e}_i)(\bar{\boldsymbol{e}}_i-\boldsymbol{e}_i)}$，$\bar{\boldsymbol{\omega}}_i=\dfrac{(\underline{\boldsymbol{e}}_i+\bar{\boldsymbol{e}}_i)\boldsymbol{e}_i}{2(\underline{\boldsymbol{e}}_i+\boldsymbol{e}_i)(\bar{\boldsymbol{e}}_i-\boldsymbol{e}_i)}$。

虚拟控制器：

$$\boldsymbol{\alpha}_i=\rho_i^{-1}(\rho_i\dot{\boldsymbol{x}}_{di}+\bar{\boldsymbol{\omega}}_i-k_{11}\cdot\mathrm{sig}^{1-\eta}(\boldsymbol{z}_{i1})-k_{12}\cdot\mathrm{sig}^{1+\eta}(\boldsymbol{z}_{i1})-\rho_i\boldsymbol{z}_{i2}), \tag{12}$$

式中：$\mathrm{sig}^{\alpha}(z)=|z|^{\alpha}\mathrm{sign}(z)$；$k_{11}\geqslant\dfrac{\pi}{\eta T_{c21}}\cdot\dfrac{1}{2^{-\eta/2}}$；$k_{12}\geqslant\dfrac{\pi}{\eta T_{c21}}\cdot\dfrac{1}{2^{\eta/2}}$。

设计合围控制器：

$$\boldsymbol{u}_i=\boldsymbol{z}_{i1}-DI_2+\boldsymbol{\alpha}_i-k_{21}\mathrm{sig}^{1-\eta}(\boldsymbol{z}_{i2})-k_{22}\mathrm{sig}^{1+\eta}(\boldsymbol{z}_{i2}), \tag{13}$$

式中：$k_{21}\geqslant\dfrac{\pi}{\eta T_{c22}}\cdot\dfrac{1}{2^{-\eta/2}}$；$k_{22}\geqslant\dfrac{\pi}{\eta T_{c22}}\cdot\dfrac{1}{2^{\eta/2}}$。

通过选择合适的控制增益 k_{11}、k_{12}、k_{21} 和 k_{22}，所设计的控制器使领导智能体引导目标智能体沿着期望轨迹运动。

注释 1 k_{11}、k_{12}、k_{21} 和 k_{22} 为待设计的正控制增益。在定理 1 和定理 3 中，将给出满足预定时间收敛的下界条件。实际应用中，在满足该下界的前提下，可根据具体系统的物理约束（如速度、输入限幅）和性能要求，对这些增益参数进行调节。

注释 2 本文所考虑的合围形状为圆弧，由合围半径和非合作目标智能体的几何中心决定。合围半径根据实际的场景设计，几何中心是通过所设计的几何中心估计器估计得到的。通过提出合围控制器使领导智能体到达期望位置，然后根据人工势场的作用使领导智能体引导非合作目标智能体几何中心沿着期望轨迹运动。若要形成椭圆或其他队形，需要重新定义每个领导智能体的期望位置和相位角的更新律。例如，对于椭圆队形 $\boldsymbol{x}_{di}(t)$，可定义为 $\boldsymbol{x}_{d_0}+[a(t)\cos(\theta_i(t)),b(t)\sin(\theta_i(t))]^{\mathrm{T}}$，其中 $a(t)$，$b(t)$ 为时变半轴长，$\theta_i(t)$ 为相位角。只要 $\boldsymbol{x}_{di}(t)$ 是光滑且有界的，本文的控制器结构和稳定性分析思路仍可适用。对于动态变化的合围队形，还需要设计改变队形的触发函数。

3 稳定性分析

定理 1 对于领导智能体系统(1)和目标智能体系统(2)，满足假设 1 和假设 2，$\mathcal{G}$ 是无向连通的，当 $\alpha>\beta(N-1)$，$\beta_1\geqslant\dfrac{\pi}{\eta T_{c1}}\cdot\dfrac{1}{2^{1-\eta/2}}$，$\beta_2\geqslant\dfrac{\pi}{\eta T_{c21}}\cdot\dfrac{1}{2^{1+\eta/2}}$时，所设计的几何中心估计器(4)能够在预定时间 T_{c1} 内估计到非合作目标智能体的几何中心。

证明 定义几何中心估计器的误差信号为 $\boldsymbol{e}_{ci}(t)=\boldsymbol{c}_i-\dfrac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\boldsymbol{c}_p$，$\boldsymbol{e}_c=[\boldsymbol{e}_{c1}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{e}_{c2}^{\mathrm{T}},\cdots,\boldsymbol{e}_{cn}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$，选取李雅普诺夫函数：

$$V_1=\frac{1}{2}\boldsymbol{e}_c^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_c=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\|\boldsymbol{e}_{ci}\|^2。 \tag{14}$$

对式(14)求导得：

$$\dot{V}_1=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{e}_{ci}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{e}}_{ci}=$$

$$\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{e}_{ci}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{\varphi}}_i+\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\boldsymbol{c}_i-\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\boldsymbol{c}_p\right)^{\mathrm{T}}\times\left(\frac{n}{m}\sum_{k\in\mathbb{R}_i^H}\frac{1}{N_k^A}\dot{\boldsymbol{r}}_k-\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\dot{\boldsymbol{c}}_p\right)\right]=$$

$$\underbrace{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\boldsymbol{c}_i-\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\boldsymbol{c}_p\right)^{\mathrm{T}}\times\dot{\boldsymbol{\varphi}}_i\right]}_{\dot{V}_{11}}+\underbrace{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\boldsymbol{c}_i-\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\boldsymbol{c}_p\right)^{\mathrm{T}}\times\frac{n}{m}\sum_{k\in\mathbb{R}_i^H}\frac{1}{N_k^A}\dot{\boldsymbol{r}}_k\right]}_{\dot{V}_{12}}+\underbrace{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\boldsymbol{c}_i-\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\boldsymbol{c}_p\right)^{\mathrm{T}}\times\left(-\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\dot{\boldsymbol{c}}_p\right)\right]}_{\dot{V}_{13}}=$$

$\dot{V}_{11}+\dot{V}_{12}+\dot{V}_{13}$。

对于 $\dot{V}_{11}$，根据引理 2，有：

$$\dot{V}_{11}=\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\boldsymbol{c}_i-\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\boldsymbol{c}_p\right)^{\mathrm{T}}\times\dot{\boldsymbol{\varphi}}_i\right]=$$
$$\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{c}_i-\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\boldsymbol{c}_p)^{\mathrm{T}}\times[\alpha\sum_{j=1}^{n}a_{ij}\tanh(\boldsymbol{c}_j-\boldsymbol{c}_i)-\beta_1\cdot\mathrm{sig}^{1-\eta}(\boldsymbol{c}_i-\bar{\boldsymbol{c}})-\beta_2\cdot\mathrm{sig}^{1+\eta}(\boldsymbol{c}_i-\bar{\boldsymbol{c}})]=$$
$$\alpha\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}(\boldsymbol{c}_i-\sum_{p=1}^{n}\boldsymbol{c}_p)^{\mathrm{T}}\tanh(\boldsymbol{c}_j-\boldsymbol{c}_i)-\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{e}_{ci}^{\mathrm{T}}\times[\beta_1\cdot\mathrm{sig}^{1-\eta}(\boldsymbol{c}_i-\bar{\boldsymbol{c}})-\beta_2\cdot\mathrm{sig}^{1+\eta}(\boldsymbol{c}_i-\bar{\boldsymbol{c}})]=$$
$$-\frac{\alpha}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}(\boldsymbol{c}_i-\boldsymbol{c}_j)\tanh(\boldsymbol{c}_j-\boldsymbol{c}_i)-\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{e}_{ci}^{\mathrm{T}}\times[\beta_1\cdot\mathrm{sig}^{1-\eta}(\boldsymbol{c}_i-\bar{\boldsymbol{c}})-\beta_2\cdot\mathrm{sig}^{1+\eta}(\boldsymbol{c}_i-\bar{\boldsymbol{c}})]。\tag{15}$$

根据引理 1，式(15)可进一步写为

$$\dot{V}_{11}\leqslant-\frac{\alpha}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}\parallel\boldsymbol{c}_i-\boldsymbol{c}_j\parallel-\beta_1\sum_{i=1}^{n}\parallel\boldsymbol{e}_{ci}\parallel^{2-\eta}-\beta_2\sum_{i=1}^{n}\parallel\boldsymbol{e}_{ci}\parallel^{2+\eta}+\delta_1,\tag{16}$$

式中 $\delta_1=\dfrac{0.278\ 5\alpha}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}>0$，是一个常数。

对于 $\dot{V}_{12}$，有：

$$\dot{V}_{12}=\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\boldsymbol{c}_i-\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\boldsymbol{c}_p\right)^{\mathrm{T}}\times\frac{n}{m}\sum_{k\in\mathbb{R}_i^H}\frac{1}{N_k^A}\dot{\boldsymbol{r}}_k\right]\leqslant$$
$$\frac{n\beta}{m}\sum_{i=1}^{n}\parallel\boldsymbol{e}_{ci}\parallel\sum_{k\in\mathbb{R}_i^H}\frac{1}{|N_k^A|}\leqslant$$
$$\frac{n\beta}{m}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\parallel\boldsymbol{e}_{ci}\parallel\parallel N_k^A\parallel\leqslant$$
$$\beta\sqrt{2V_1}。\tag{17}$$

对于 $\dot{V}_{13}$，有：

$$\dot{V}_{13}=\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\boldsymbol{c}_i-\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\boldsymbol{c}_p\right)\left(-\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\dot{\boldsymbol{c}}_p\right)\right]=-\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\dot{\boldsymbol{c}}_p[\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{c}_i-\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\boldsymbol{c}_p]=$$
$$-\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\dot{\boldsymbol{c}}_p[\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{c}_i-\sum_{p=1}^{n}\boldsymbol{c}_p]=0。\tag{18}$$

当 $\alpha>n(n-1)\beta$，$\beta_1\geqslant\dfrac{\pi}{\eta T_{c1}}\cdot\dfrac{1}{2^{1-\eta/2}}$，$\beta_2\geqslant\dfrac{\pi}{\eta T_{c21}}\cdot\dfrac{1}{2^{1+\eta/2}}$时，根据式(16)－式(18)，$\dot{V}_1$ 可进一步写为

$$\dot{V}_1\leqslant-\beta_1\sum_{i=1}^{n}\parallel\boldsymbol{e}_{ci}\parallel^{2-\eta}-\beta_2\sum_{i=1}^{n}\parallel\boldsymbol{e}_{ci}\parallel^{2+\eta}+\beta\sqrt{2V_1}+\delta_1\leqslant$$
$$-\frac{\pi}{\eta T_c}[V_1^{1-\frac{\eta}{2}}+V_1^{1+\frac{\eta}{2}}]+\delta,\tag{19}$$

式中 $\delta=\delta_1+\beta\sqrt{2V_1}$，是一个有界项。

由于 $\mathcal{G}$ 是无向连通的，则有 $\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{\varphi}_i=0$。将式(4)进行两端求和有 $\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{c}_i=\dfrac{n}{m}\sum_{k=1}^{m}\boldsymbol{r}_k$，因此可以得到 $\lim\limits_{t\to\infty}\parallel\boldsymbol{c}_i-\dfrac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}\boldsymbol{r}_k\parallel=0$。根据引理 3，领导智能体可以在预定时间 T_{c1} 内获取目标智能体的几何中心。

定理 2　当领导智能体已经到达各自的期望位置，设计速度场 $\boldsymbol{V}_{ti}=\lambda_1\dot{\boldsymbol{y}}+\lambda_2\boldsymbol{e}_{ti}$，$\lambda_2/\lambda_1>0$ 时，则目标智能体几何中心的线速度方向与速度场的方向一致，即 $\dot{\boldsymbol{c}}_i=(1/\lambda)\boldsymbol{V}_{ti}$。

证明　考虑候选李雅普诺夫函数：

$$\boldsymbol{V}_0=\frac{1}{2}\boldsymbol{e}_t^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_t=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{e}_{ti}^2。\tag{20}$$

对 V_0 求导可得：

$$\dot{V}_0=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{e}_{ti}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{e}}_{ti}=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{e}_{ti}^{\mathrm{T}}(\dot{\boldsymbol{c}}_i-\dot{\boldsymbol{y}})=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{e}_t^{\mathrm{T}}[(\alpha\lambda_1-1)\dot{\boldsymbol{y}}-(1/\lambda_1)\lambda_2\boldsymbol{e}_t], \tag{21}$$

则：$\dot{V}_0=-(\lambda_2/\lambda_1)\boldsymbol{e}_t^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_t\leqslant 0$。证明定理 2 的合理性。

定理 3 对于领导智能体系统(1)与非合作目标智能体系统(2)，满足假设 1 和假设 2，当 $k_{11}\geqslant\frac{\pi}{\eta T_{c21}}\cdot\frac{1}{2^{-\eta/2}}$，$k_{12}\geqslant\frac{\pi}{\eta T_{c21}}\cdot\frac{1}{2^{\eta/2}}$，$k_{21}\geqslant\frac{\pi}{\eta T_{c22}}\cdot\frac{1}{2^{-\eta/2}}$，$k_{22}\geqslant\frac{\pi}{\eta T_{c22}}\cdot\frac{1}{2^{\eta/2}}$时，所设计的合围控制策略(13)能够在预定时间 T_{c2} 内保证领导智能体与非合作目标智能体的几何中心的误差收敛到预设性能函数范围内，其中，$T_{c2}=T_{c1}+T_{c21}+T_{c22}$。

证明 定义位置误差：$z_{i1}=\frac{1}{2}\ln\left(\frac{\boldsymbol{e}_i(t)+\boldsymbol{e}_i}{\bar{\boldsymbol{e}}_i(t)-\boldsymbol{e}_i}\right)$，选取李雅普诺夫函数：

$$V_{21}=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}z_{i1}^2。 \tag{22}$$

对 V_{21} 求导可得：

$$\dot{V}_{21}=\sum_{i=1}^{n}z_{i1}\dot{z}_{i1}=\sum_{i=1}^{n}z_{i1}(\rho_i\dot{\boldsymbol{e}}_i-\bar{\boldsymbol{\omega}}_i)=$$
$$\sum_{i=1}^{n}z_{i1}(\rho_i(z_{i2}+\alpha_i-\dot{\boldsymbol{x}}_{di})-\bar{\boldsymbol{\omega}}_i)。 \tag{23}$$

将虚拟控制器(12)代入式(23)，有：

$$\dot{V}_{21}=\sum_{i=1}^{n}z_{i1}(\rho_i(z_{i2}+\alpha_i-\dot{\boldsymbol{x}}_{di})-\bar{\boldsymbol{\omega}}_i)=$$
$$\sum_{i=1}^{n}z_{i1}[\rho_i(z_{i2}+\rho_i^{-1}(\rho_i\dot{\boldsymbol{x}}_{di}+\bar{\boldsymbol{\omega}}_i-k_{11}\cdot\mathrm{sig}^{1-\eta}(z_{i1})-k_{12}\cdot\mathrm{sig}^{1+\eta}(z_{i1})-\rho_i z_{i2})-\dot{x}_{di})-\bar{\boldsymbol{\omega}}_i]=$$
$$\sum_{i=1}^{n}-z_{i1}z_{i2}-k_{11}\|z_{i1}\|^{2-\eta}-k_{12}\|z_{i1}\|^{2+\eta}。 \tag{24}$$

定义速度误差：$z_{i2}=v_i-\alpha_i$，选取李雅普诺夫函数：

$$V_2=V_{21}+\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}z_{i2}^2。 \tag{25}$$

对式(25)求导可得：

$$\dot{V}_2=\dot{V}_{21}+\sum_{i=1}^{n}z_{i2}\dot{z}_{i2}=$$
$$\sum_{i=1}^{n}z_{i2}(\dot{z}_{i2}-z_{i1})-k_{11}\|z_{i1}\|^{2-\eta}-k_{12}\|z_{i1}\|^{2+\eta}=$$
$$\sum_{i=1}^{n}z_{i2}(u_i+d_i-\dot{\alpha}_i-z_{i1})-k_{11}\|z_{i1}\|^{2-\eta}-k_{12}\|z_{i1}\|^{2+\eta}。 \tag{26}$$

将所设计的合围控制器(13)代入式(26)，可得

$$\dot{V}_2\leqslant\sum_{i=1}^{n}[-k_{11}\|z_{i1}\|^{2-\eta}-k_{12}\|z_{i1}\|^{2+\eta}-k_{21}\|z_{i2}\|^{2-\eta}-k_{22}\|z_{i2}\|^{2+\eta}]\leqslant$$
$$-\frac{k_{11}}{2}(2V_{21})^{1-\eta/2}-\frac{k_{12}}{2}(2V_{21})^{1+\eta/2}-\frac{k_{21}}{2}(2V_{22})^{1-\eta/2}-\frac{k_{22}}{2}(2V_{22})^{1+\eta/2}。 \tag{27}$$

当 $k_{11}\geqslant\frac{\pi}{\eta T_{c21}}\cdot\frac{1}{2^{-\eta/2}}$，$k_{12}\geqslant\frac{\pi}{\eta T_{c21}}\cdot\frac{1}{2^{\eta/2}}$，$k_{21}\geqslant\frac{\pi}{\eta T_{c22}}\cdot\frac{1}{2^{-\eta/2}}$，$k_{22}\geqslant\frac{\pi}{\eta T_{c22}}\cdot\frac{1}{2^{\eta/2}}$时，有：

$$\dot{V}_2\leqslant-\frac{\pi}{\eta T_{c21}}V_{21}^{1-\eta/2}-\frac{\pi}{\eta T_{c21}}V_{21}^{1+\eta/2}-\frac{\pi}{\eta T_{c22}}V_{22}^{1-\eta/2}-\frac{\pi}{\eta T_{c22}}V_{22}^{1+\eta/2}\leqslant 0, \tag{28}$$

根据引理 3 可得，合围误差 e_i 可以在预定时间 $T_{c2}=T_{c1}+T_{c21}+T_{c22}$ 内收敛到预定性能函数内。

注释 3 收敛时间 T_{c2} 是用户预先设定的常数，与 T_{c21} 和 T_{c22} 有关，与控制增益 k_{11}，k_{12}，k_{21}，k_{22} 的大

小无关，所以改变 k_{11}、k_{21} 不会影响收敛时间。当 $k_{11}\geqslant\frac{\pi}{\eta T_{c21}}\cdot\frac{1}{2^{-\eta/2}}$，$k_{12}\geqslant\frac{\pi}{\eta T_{c21}}\cdot\frac{1}{2^{\eta/2}}$，$k_{21}\geqslant\frac{\pi}{\eta T_{c22}}\cdot\frac{1}{2^{-\eta/2}}$，$k_{22}\geqslant\frac{\pi}{\eta T_{c22}}\cdot\frac{1}{2^{\eta/2}}$时，系统才能在预定时间 T_{c2} 内收敛。

4　仿真验证

为验证所提控制策略的可行性和有效性，考虑一个由 4 个领导智能体和 6 个目标智能体组成的合围控制系统。领导智能体的网络通信拓扑结构如图 1 所示。领导智能体获取目标智能体信息的通信拓扑图如图 2 所示。

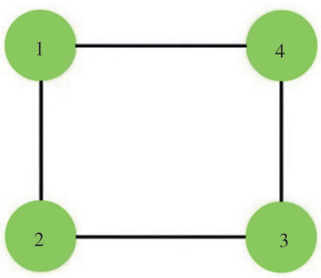


图 1　领导智能体通信拓扑图

Fig. 1　Communication topology graph among leader agents

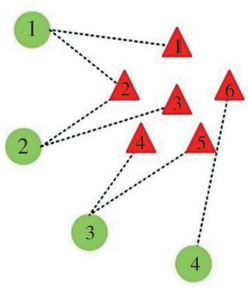


图 2　领导智能体获取目标智能体通信拓扑图

Fig. 2　Topology diagram of leader agent obtaining the target agent communication

期望轨迹的参数方程为 $Y_d:\boldsymbol{y}=[\frac{1}{2}t,\frac{\sqrt{3}}{2}t]^{\mathrm{T}}$。目标智能体的初始位置为 $\boldsymbol{r}_1(0)=[-0.5,-3]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{r}_2(0)=[1,1]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{r}_3(0)=[1,-2]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{r}_4(0)=[2,-4]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{r}_5(0)=[2,1]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{r}_6(0)=[3,-3]^{\mathrm{T}}$。领导智能体的初始位置为 $\boldsymbol{x}_1(0)=[2,-5]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{x}_2(0)=[2,-4]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{x}_3(0)=[1,-2]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{x}_4(0)=[3,-3]^{\mathrm{T}}$。人工势场和速度场的参数为 $\kappa_p=8$，$a=b=1.5$。性能函数为 $\underline{\boldsymbol{e}}_i(t)=(-0.3\exp(-0.05t)+0.2)\boldsymbol{I}_2$，$\bar{\boldsymbol{e}}_i(t)=(0.3\exp(-0.05t)+0.2)\boldsymbol{I}_2$，合围半径 $R=2$。将预定的收敛时间设定为 $T_{c1}=5$ s，$T_{c21}=2.5$ s，$T_{c22}=2.5$ s。控制器参数：$\beta_1=1.0$，$\beta_2=1.0$，$\eta=0.5$，$k_{11}=3$，$k_{12}=1/3$，$k_{21}=3$，$k_{22}=1/3$。

图 3 绘制了几何中心估计器所估计的目标智能体的几何中心、估计几何中心与期望轨迹图。由图可知，几何中心估计器可以在预设时间 $t=3<T_{c1}=5$ s 内估计出目标智能体的几何中心，并且目标智能体的几何中心沿着期望轨迹运动。图 4 是分别截取 $t=2$ s、$t=6$ s 时，领导智能体、目标智能体以及目标几何中心的位置图。由图可知，领导智能体在预定时间内对目标智能体形成了一个圆形合围。图 5 展示了领导智能体和目标智能体几何中心的误差图。由图可知，当时间 $t=6<10$ s 时，实现了预定时间的合围控制。图 6 为领导智能体与目标智能体的轨迹图。

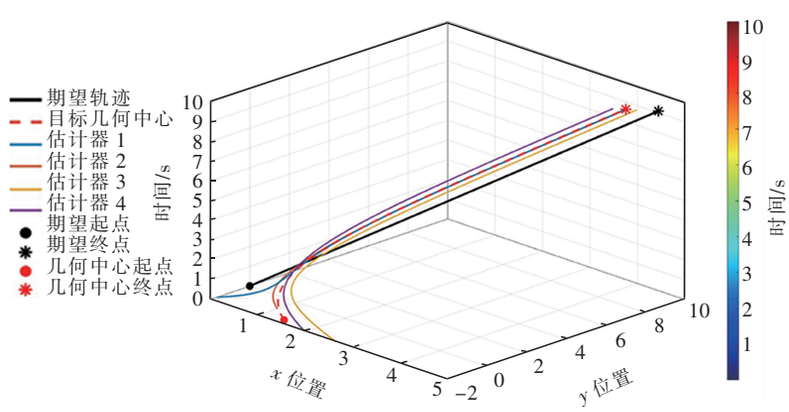


图 3　目标智能体几何中心与估计的几何中心以及期望轨迹图

Fig. 3　Graph of the target agent geometric center, estimated geometric center and desired trajectory

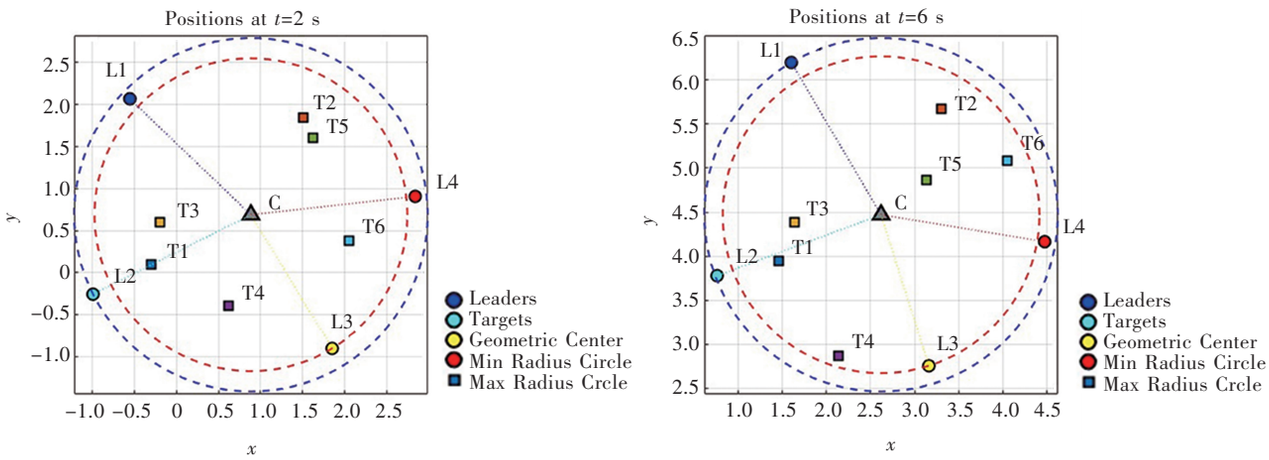


图 4 $t=2$ s 和 $t=6$ s 时领导智能体对目标智能体形成的圆形合围图

Fig. 4 Graph of the circular encirclement formed by the leader agents around the target agent at $t=2$ s and $t=6$ s

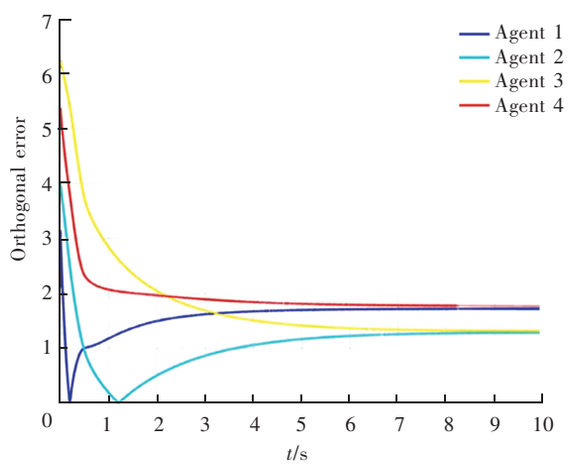


图 5 领导智能体与目标智能体几何中心误差图

Fig. 5 Error graph of the geometric center between the leader agents and the target agents

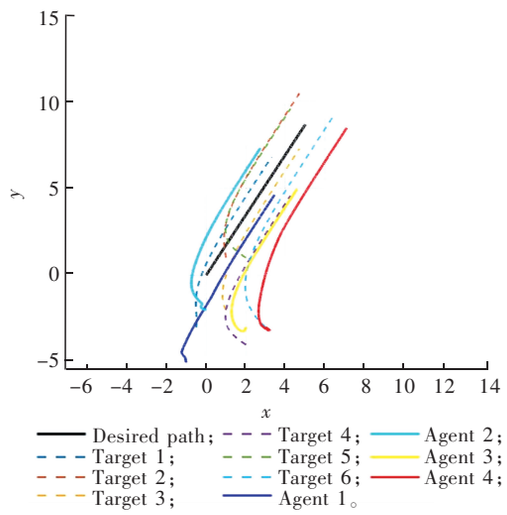
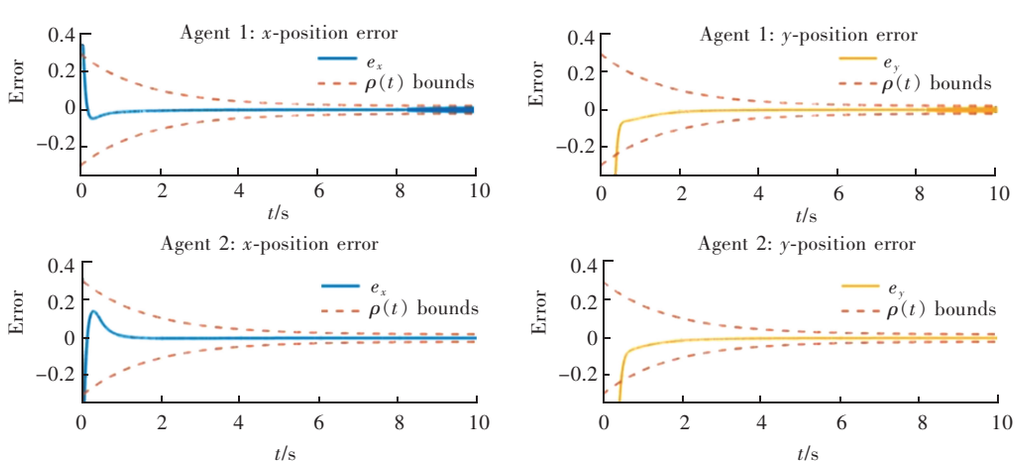


图 6 领导智能体与目标智能体的运动轨迹图

Fig. 6 Trajectory diagram of the leader agents and the target agents

由图 6 可知，领导智能体能够引导目标智能体沿着期望轨迹移动，所有目标智能体的轨迹都处于领导智能体的轨迹范围内，这表明已经完成了合围任务。图 7 分别绘制了这 4 个领导智能体与期望轨迹的误差变化曲线，可以看出合围误差收敛到性能函数范围内，验证了非合作目标合围的预设性能控制的有效性。



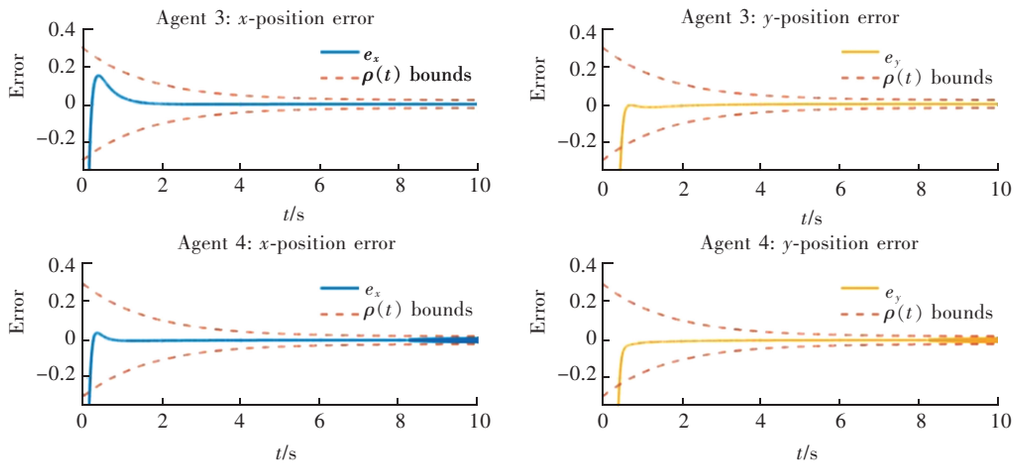


图 7　领导智能体与期望轨迹的误差图

Fig. 7　Error between the leader agent and the desired trajectory

5　结　语

针对非合作目标智能体系统的预设性能合围控制问题，设计了预定时间几何中心估计器，该估计器使领导智能体能在预定时间内估计非合作目标智能体的几何中心。结合人工势场提出了复合预定时间收敛与预设性能约束控制策略，保证了合围误差在预定时间内收敛到预定性能函数范围内，避免了传统控制中出现的剧烈振荡或收敛过慢问题。研究结果为实际应用如无人机编队、目标驱赶等场景提供了新的控制思路。

本文主要针对非合作目标多智能体之间是合作关系的合围控制问题进行研究，未来还需完善更复杂通信情况（如智能体之间存在合作竞争关系）下的合围控制，以提升算法在多场景中的适应性。

参考文献/References：

[1] 郝英，路继勇，刘鑫，等. 互联非线性时滞系统的分散式自适应跟踪控制[J]. 河北科技大学学报，2024，45(3)：252-264.
Hao Ying，Lu Jiyong，Liu Xin，et al. Decentralized adaptive tracking control for interconnected nonlinear time delay systems[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology，2024，45(3)：252-264.

[2] 贾亚鹏，赵琦，郑元世. 异质多智能体系统的合围控制[J]. 控制与决策，2024，39(7)：2267-2274.
Jia Yapeng，Zhao Qi，Zheng Yuanshi. Enclosing control of heterogeneous multi-agent systems[J]. Control and Decision，2024，39(7)：2267-2274.

[3] Li Zhijun，Li Jianxun，Kang Yu. Adaptive robust coordinated control of multiple mobile manipulators interacting with rigid environments[J]. Automatica，2010，46(12)：2028-2034.

[4] Li Zhongkui，Ren Wei，Liu Xiangdong，et al. Distributed containment control of multi-agent systems with general linear dynamics in the presence of multiple leaders[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control，2013，23(5)：534-547.

[5] Xu Bowen，Zhang Haitao，Meng Haofei，et al. Moving target surrounding control of linear multiagent systems with input saturation[J]. IEEE Transactions on Systems，Man，and Cybernetics：Systems，2022，52(3)：1705-1715.

[6] Hasanzadeh M，Tang Shuxia. Distributed dynamic encirclement control for first-order multi-agent systems with communication delay[C]//2024 American Control Conference(ACC). Toronto：IEEE，2024：1000-1005.

[7] Hu Binbin，Zhang Haitao，Wang Jun. Multiple-target surrounding and collision avoidance with second-order nonlinear multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2021，68(8)：7454-7463.

[8] Chen Yanjie，Zhang Zhixing，Wu Zheng，et al. Multiple mobile robots planning framework for herding non-cooperative target[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering，2024，21(4)：7363-7378.

[9] Vaughan R，Sumpter N，Henderson J，et al. Experiments in automatic flock control[J]. Robotics and Autonomous Systems，2000，31(1/2)：109-117.

[10] Song Yongduan，Wang Yujuan，Holloway J，et al. Time-varying feedback for regulation of normal-form nonlinear systems in prescribed finite time[J]. Automatica，2017，83：243-251.

[11] Cui Qian，Song Yongduan，Wen Changyun. Prescribed time consensus control of multiagent systems with minimized time-varying cost function[J]. IEEE Transactions on Automatic Control，2024，69(5)：3381-3388.

[12] Xuan Shuxing，Liang Hongjing，Li Tieshan，et al. Practical prescribed-time bipartite time-varying formation control for multiagent systems with adaptive self-triggered[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering，2025，22：16838-16850.

[13] Zhou Jiaxin, Tian Yuan, Li Yan, et al. Prescribed-time cooperative output regulation by bounded observer-based time-varying protocols [J]. IEEE Access, 2025, 13: 114756-114771.

[14] Xu Xuening, Yu Zhiyong, Jiang Haijun, et al. Prescribed-time practical consensus of nonlinear multi-agent systems subject to dos attacks via event-triggered mechanism[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2025, 22: 14525-14537.

[15] Xu Bin, Sun Fuchun. Composite intelligent learning control of strict-feedback systems with disturbance[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 48(2): 730-741.

[16] Bu Xiangwei, Lei Humin. A fuzzy wavelet neural network-based approach to hypersonic flight vehicle direct nonaffine hybrid control[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 94(3): 1657-1668.

[17] Bechlioulis C P, Rovithakis G A. Robust adaptive control of feedback linearizable MIMO nonlinear systems with prescribed performance [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(9): 2090-2099.

[18] Sun Peng, Zhu Bing, Li Siqi. Vision-based prescribed performance control for UAV target tracking subject to actuator saturation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(1): 2382-2389.

[19] Sun Kangkang, Qiu Jianbin, Karimi H R, et al. Event-triggered robust fuzzy adaptive finite-time control of nonlinear systems with prescribed performance[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021, 29(6): 1460-1471.

[20] Liu Haitao, Zheng Hongji, Zhang Yuan, et al. Fixed-time self-structuring neuron network-based adjustable prescribed performance control for a quadrotor UAV with input saturation[J]. IEEE Access, 2024, 12: 2474-2489.

[21] Zhou Yingjiang, Yang Huan, Jiang Guoping, et al. Prescribed-time consensus for multi-agent systems based on prescribed performance [C]//2023 35th Chinese Control and Decision Conference(CCDC). Yichang: IEEE, 2023: 5279-5284.

[22] Li Zhijie, Wang Xiaofei, Guo Hao, et al. Distributed output feedback prescribed performance control for high-order nonlinear multi-agent systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2025, 22: 12730-12740.

[23] Ge Jing, Cao Zhongkun, Mao Jianliang, et al. Finite-time prescribed performance control for nonlinear systems with mismatched disturbances: an alternative nonrecursive design approach and application to PMSM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(5): 5333-5343.

[24] Cheng Long, Zhao Feng, Chen Xiangyong, et al. Adaptive event-triggered tracking control for nonlinear systems with prescribed performance: a time-domain mapping approach[J]. Journal of the Franklin Institute, 2024, 361(9): 106876.

[25] Li Yichen, Ma Ruicheng, Tian Xiaoyi. Prescribed-time tracking with prescribed performance for a class of strict-feedback nonlinear systems[J]. Journal of the Franklin Institute, 2024, 361(4): 106638.

[26] Sun Zongyao, Li Jiaojiao, Wen Changyun, et al. Adaptive event-triggered prescribed-time stabilization of uncertain nonlinear systems with asymmetric time-varying output constraint[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2024, 69(8): 5454-5461.

[27] Wan Quan, Fan Tianpeng, Li Zhongguo, et al. Event-triggered prescribed-time tracking for uncertain nonlinear systems with unknown control gain and output constraints[J]. Journal of the Franklin Institute, 2024, 361(7): 106765.

[28] Muñoz-Vázquez A J, Sánchez-Torres J D, Jiménez-Rodríguez E, et al. Predefined-time robust stabilization of robotic manipulators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(3): 1033-1040.

[29] Polycarpou M M, Ioannou P A. A robust adaptive nonlinear control design[C]//1993 American Control Conference. San Francisco: IEEE, 1993: 1365-1369.

[30] Ren Wei, Beard R W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control: theory and applications[M]. London: Springer London, 2008: 85-86.