本章目录

一致性与编队控制

第十章 集群协同与博弈对抗

10.1 集群协同基础与控制架构

10.2 一致性与编队控制

10.3 智能博弈与强化学习基础

10.4 单智能体强化学习经典算法

10.5 多智能体强化学习与规模扩展

10.6 集群关键技术与挑战

10.7 RflySim集群框架与接口

10.8 本章实验案例与综合验证

10.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

10.2.1 一阶一致性与收敛条件

教材对应：第10.1.2.3节

10.2.2 位置偏移与动态编队

教材对应：第10.1.2.3节

10.2.3 领导跟随与虚拟结构

教材对应：第10.1.2.4节

10.2.4 虚拟管道与行为组合

教材对应：第10.1.2.4节

10.2.1 一阶一致性与收敛条件：模型与符号

通信图规定一轮计算允许使用哪些状态



$$\mathcal{N}_1 = \{2\}, \quad \mathcal{N}_2 = \{1,3\}, \quad \mathcal{N}_3 = \{2\}$$

邻域： $\mathcal{N}_i$为节点i可通信的邻居集合；本链相邻边权取1。
前置： 第9章图论；无向边表示双向关系，固定拓扑不随时间改变。

假设： 正对称边权、图连通；理想积分模型；无时延、无丢包、无饱和与扰动。

10.2.1 一阶一致性与收敛条件：局部协议

一阶协议让状态沿邻居差的方向调整

$$\mathbf{u}_i = -\sum_{j\in\mathcal{N}_i} a_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) \tag{10.1}$$

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{u}_i \tag{10.2}$$

$a_{ij} > 0$：相邻节点间的控制权重；$\mathbf{x}_i$：状态；$\mathbf{u}_i$：状态变化率。

输入是邻域状态差；输出是本机指令。两侧误差可以抵消，不能逐条误差判断合力。

协议中的负反馈方向决定误差被减小还是被放大。

10.2.1 一阶一致性与收敛条件：矩阵与一致值

拉普拉斯矩阵把局部关系组成全局动力学

$$\dot{\mathbf{x}} = -\mathbf{L}\mathbf{x}, \qquad \mathbf{L} = \mathbf{D} - \mathbf{A} \tag{10.3}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad d > 1: \dot{\mathbf{x}} = -(\mathbf{L} \otimes \mathbf{I}_d)\mathbf{x}$$

$$\lim_{t\to\infty} \mathbf{x}_i(t) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \mathbf{x}_k(0) = \mathbf{c}_0 \tag{10.4}$$

$A = [a_{ij}]$为邻接矩阵；$D = \mathrm{diag}(1,2,1)$为本链度矩阵。
N为节点数，d为单节点维数；I_d为单位阵，$\otimes$为克罗内克积。
c_0为初值平均；固定无向连通图、正对称边权及理想连续模型下成立。

10.2.1 一阶一致性与收敛条件：三节点算例

一步计算：中间节点不动，两端向内调整

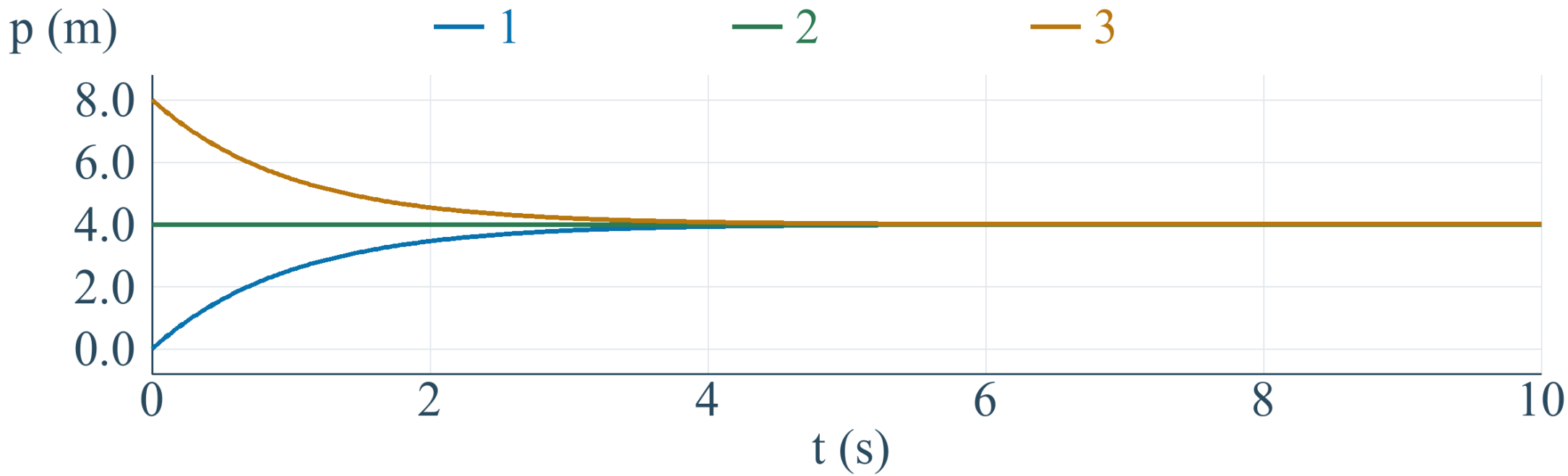
$$\mathbf{p}(0)=[0,4,8]^{\mathsf{T}},\quad \mathbf{u}(0)=-\mathbf{L}\mathbf{p}(0)=[4,0,-4]^{\mathsf{T}}$$

节点	局部速度计算 / (m/s)	0.2 s后位置 / m
1	$-(0-4)=4$	$0+0.2\times4=0.8$
2	$-[(4-0)+(4-8)]=0$	4
3	$-(8-4)=-4$	$8-0.2\times4=7.2$

显式欧拉只作离散计算示例；本图最大特征值为3，步长须小于2/3 s。

10.2.1 一阶一致性与收敛条件：解析响应

完整结果：三个虚拟位置收敛到平均值



图：理想一阶模型的位置一致性解析响应

$$p_1 = 4 - 4e^{-t}, \quad p_2 = 4, \quad p_3 = 4 + 4e^{-t}$$

10.2.1 一阶一致性与收敛条件：收敛与边界

连通性排除多个独立的一致中心

$$V = \frac{1}{2}\|\mathbf{x} - \bar{x}\mathbf{1}\|^2, \qquad \dot{V} = -\mathbf{x}^{\mathsf{T}}\mathbf{L}\mathbf{x} \le 0$$

单坐标下，$\bar{x}$为节点均值，$\mathbf{1}$为全1向量，V衡量偏差能量。

拓扑与条件	特征或结果	能推出什么
固定无向连通链	拉普拉斯特征值：0、1、3	趋于共同的初值平均
删去2与3之间的边	最终状态：2、2、8	只在连通分量内一致
存在时延或切换	不再适用当前固定矩阵模型	须重新核对相应收敛条件

本章目录

一致性与编队控制

第十章 集群协同与博弈对抗

10.1 集群协同基础与控制架构

10.2 一致性与编队控制

10.3 智能博弈与强化学习基础

10.4 单智能体强化学习经典算法

10.5 多智能体强化学习与规模扩展

10.6 集群关键技术与挑战

10.7 RflySim集群框架与接口

10.8 本章实验案例与综合验证

10.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

10.2.1 一阶一致性与收敛条件
教材对应：第10.1.2.3节

10.2.2 位置偏移与动态编队
教材对应：第10.1.2.3节

10.2.3 领导跟随与虚拟结构
教材对应：第10.1.2.4节

10.2.4 虚拟管道与行为组合
教材对应：第10.1.2.4节

10.2.2 位置偏移与动态编队：位置偏移

扣除期望偏移后，一致性形成有间隔的队形

$$\mathbf{v}_i^* = \mathbf{u}_i = -\sum_{j\in\mathcal{N}_i} a_{ij}(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) \tag{10.5}$$

$$\mathbf{u}_i = \dot{\mathbf{x}}_i = -\sum_{j\in\mathcal{N}_i} a_{ij}[(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) - (\boldsymbol{\delta}_i - \boldsymbol{\delta}_j)] \tag{10.6}$$

$$\mathbf{q}_i = \mathbf{x}_i - \boldsymbol{\delta}_i, \quad \mathbf{q}_i \to \overline{\mathbf{q}}(0), \quad \mathbf{x}_i \to \overline{\mathbf{q}}(0) + \boldsymbol{\delta}_i$$

$x_i = p_i$为位置，δ_i为固定世界坐标偏移；单位均为m，输出为m/s。
$\overline{q}(0)$是初始虚拟状态的平均；真实队形中心始终等于原位置平均。
偏移零和时，共同参考$\overline{q}(0)$才与真实队形中心重合。

10.2.2 位置偏移与动态编队：偏移符号

一步计算：减的是相对偏移，不是单机偏移

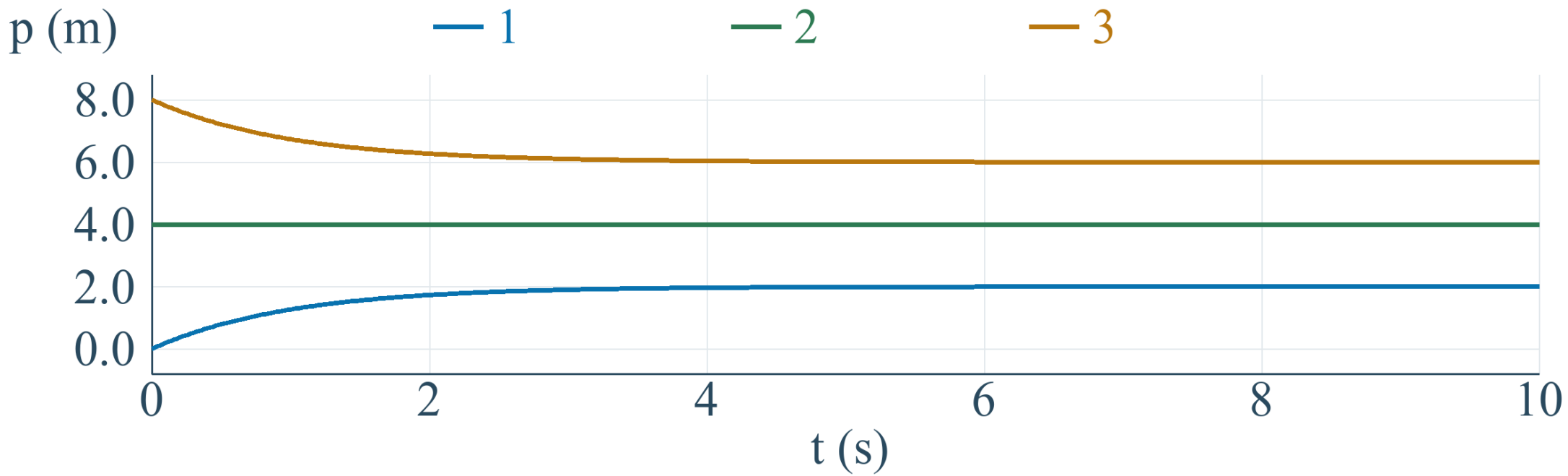
$$\boldsymbol{\delta} = [-2,0,2]^{\mathrm{T}}, \quad \mathbf{q}(0) = \mathbf{p}(0) - \boldsymbol{\delta} = [2,4,6]^{\mathrm{T}}$$

量	节点1的一步结果
实际相对位置	$0 - 4 = -4\ \mathrm{m}$
期望相对偏移	$-2 - 0 = -2\ \mathrm{m}$
正确指令	$-[-4 - (-2)] = 2\ \mathrm{m/s}$
0.2 s后位置	$0 + 0.2 \times 2 = 0.4\ \mathrm{m}$

错误加号会得到6 m/s；在目标间距已经满足时也不会归零。

10.2.2 位置偏移与动态编队：偏移响应

完整结果：同一初值收敛到间距2 m的队形



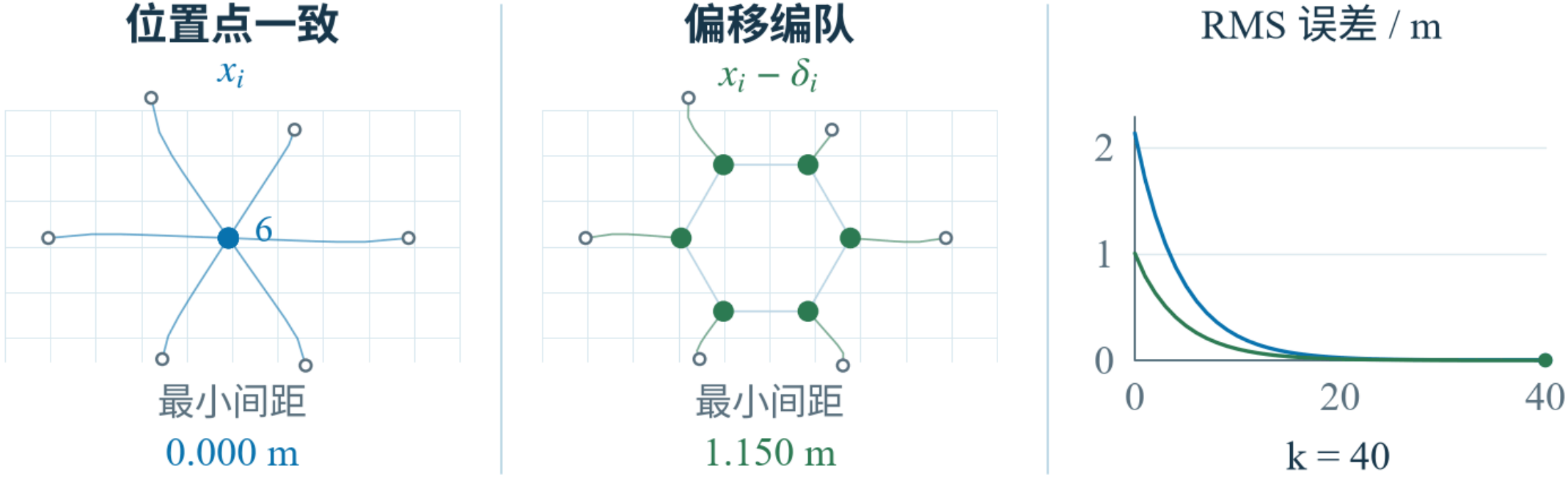
图：扣除偏移后的状态一致，真实位置保持间隔

$$p_1 = 2 - 2e^{-t}, \quad p_2 = 4, \quad p_3 = 6 + 2e^{-t}$$

10.2.2 位置偏移与动态编队：六节点拓扑对照

六节点环：一致性如何形成有限间距队形

固定无向连通环；两图显示真实位置，图顶公式标出各自的一致变量。



图：六节点环的位置一致与偏移编队；与三节点链算例分开。
RMS为相对一致值的均方根误差；k为步数，步长0.2 s。

10.2.2 位置偏移与动态编队：动态编队

二阶协议同时反馈相对位置与相对速度

$$\dot{\mathbf{p}}_i = \mathbf{v}_i, \quad \dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{a}_i = \mathbf{u}_i \tag{10.7}$$

$$\mathbf{a}_i = -\sum_{j\in\mathcal{N}_i} a_{ij}[(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) - (\boldsymbol{\delta}_i - \boldsymbol{\delta}_j) + \gamma(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)] \tag{10.8}$$

p_i, v_i, a_i分别为位置、速度、加速度（m、m/s、$\mathrm{m/s^2}$）。
本式a_{ij}含位置反馈增益（$\mathrm{s^{-2}}$）；$\gamma > 0$为阻尼参数（s）。

结论的条件：固定无向连通图、正对称权重、理想双积分器；无饱和、时延或扰动。

10.2.2 位置偏移与动态编队：二阶计算

一步计算：速度差改变加速度修正量

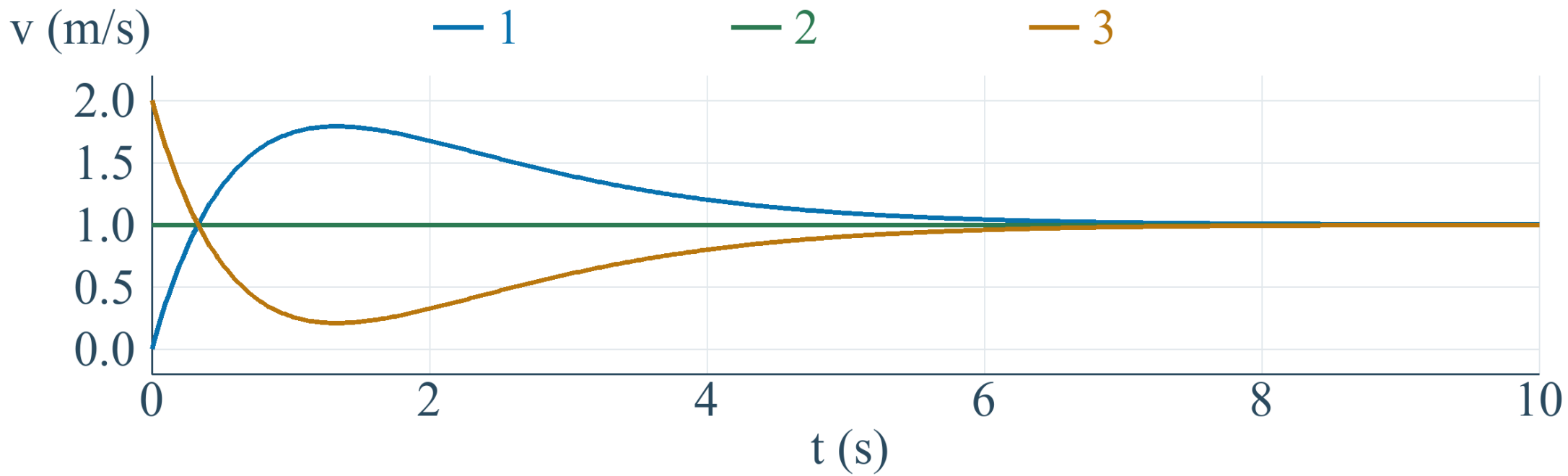
$$\mathbf{p} = [0,4,8]^{\mathrm{T}}, \quad \mathbf{v} = [0,1,2]^{\mathrm{T}}, \quad \gamma = 2$$

节点	初始加速度 / (m/s²)	0.1 s后位置 / m	0.1 s后速度 / (m/s)
1	$-[-2 + 2 \times (-1)] = 4$	0	0.4
2	0	4.1	1.0
3	$-[2 + 2 \times 1] = -4$	8.2	1.6

这是一步显式欧拉近似；完整结果由连续时间解析解计算。

10.2.2 位置偏移与动态编队：二阶响应

完整结果：速度趋于1 m/s，队形随中心前进



图：二阶编队的速度响应；平均速度始终为1 m/s

$$\bar{p} = 4 + t, \quad \mathbf{p} - \bar{p}\mathbf{1} - \boldsymbol{\delta} = [-1,0,1]^{\mathrm{T}}(2 + 3t)e^{-t}$$

10.2.2 位置偏移与动态编队：扩展边界

移动参考和安全约束要显式加入控制设计

$$\mathbf{u}_i = \dot{\mathbf{r}} - \sum_{j\in\mathcal{N}_i} a_{ij}[(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) - (\boldsymbol{\delta}_i - \boldsymbol{\delta}_j)]$$

移动中心：$r(t)$为参考位置，$\dot{r}(t)$为共同速度前馈，使队形平移。
绝对中心位置仍取决于初始化或锚定。

全程安全：需要检验最小距离、障碍约束、执行器限制及避碰项对稳定性的影响。

进一步扩展：事件触发减少更新；自适应增益、异构分层还需核对各自条件。

本章目录

一致性与编队控制

第十章 集群协同与博弈对抗

10.1 集群协同基础与控制架构

10.2 一致性与编队控制

10.3 智能博弈与强化学习基础

10.4 单智能体强化学习经典算法

10.5 多智能体强化学习与规模扩展

10.6 集群关键技术与挑战

10.7 RflySim集群框架与接口

10.8 本章实验案例与综合验证

10.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

10.2.1 一阶一致性与收敛条件
教材对应：第10.1.2.3节

10.2.2 位置偏移与动态编队
教材对应：第10.1.2.3节

10.2.3 领导跟随与虚拟结构
教材对应：第10.1.2.4节

10.2.4 虚拟管道与行为组合
教材对应：第10.1.2.4节

10.2.3 领导跟随与虚拟结构：结构总览

四类结构分别规定参考、约束或行为组织

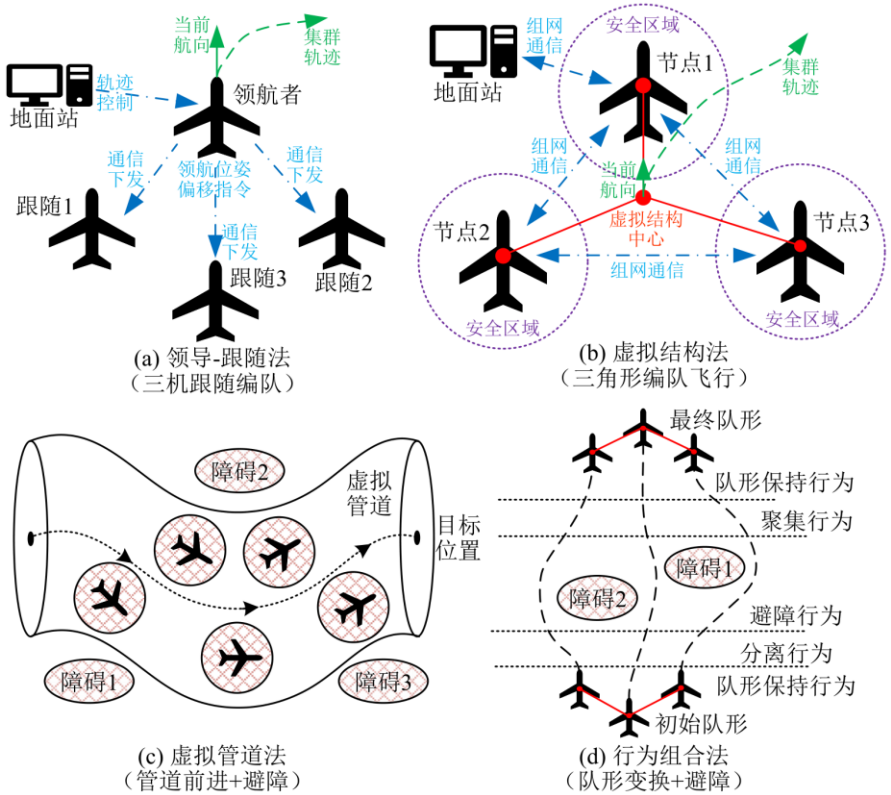


图10.3 编队控制方法分类

领导跟随：参考来自实际领机或前序节点。

虚拟结构：参考来自公共位姿与固定偏移。

虚拟管道：约束来自可行空间与局部间距。

行为组合：指令来自多种行为的融合或切换。

10.2.3 领导跟随与虚拟结构：位姿参考

实际领机与公共虚拟位姿提供两类参考

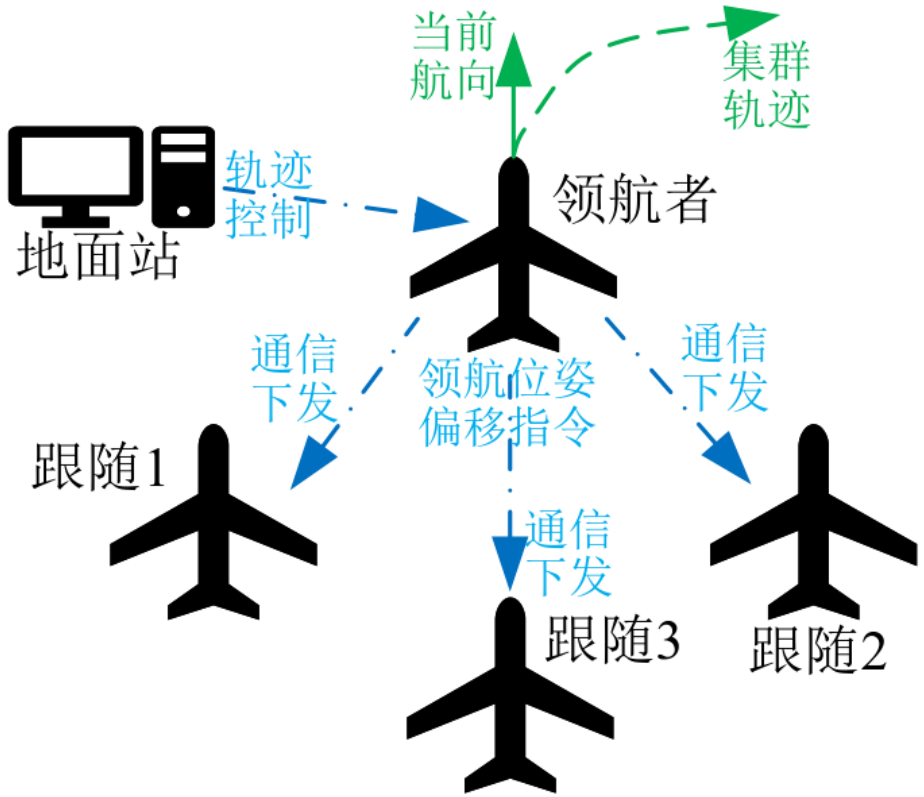


图10.3(a) 领机下发位姿与偏移

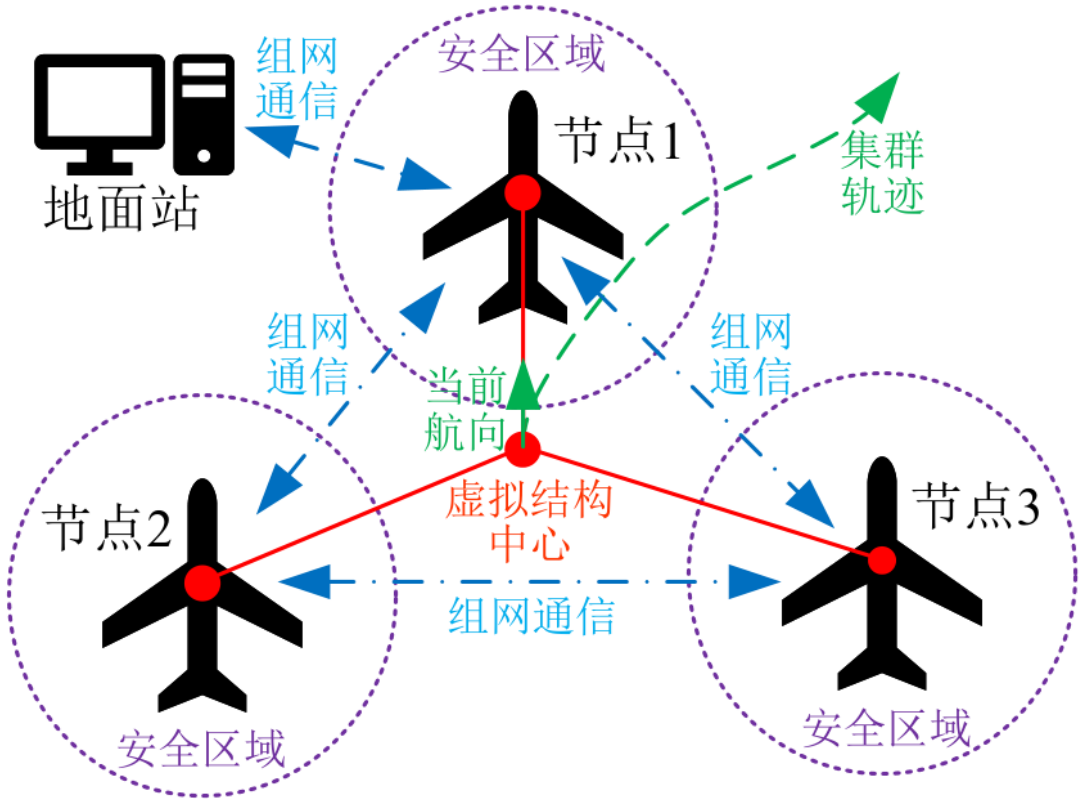


图10.3(b) 公共位姿确定各机目标

10.2.3 领导跟随与虚拟结构：空间与行为

可行空间与行为切换组织不同的运动过程

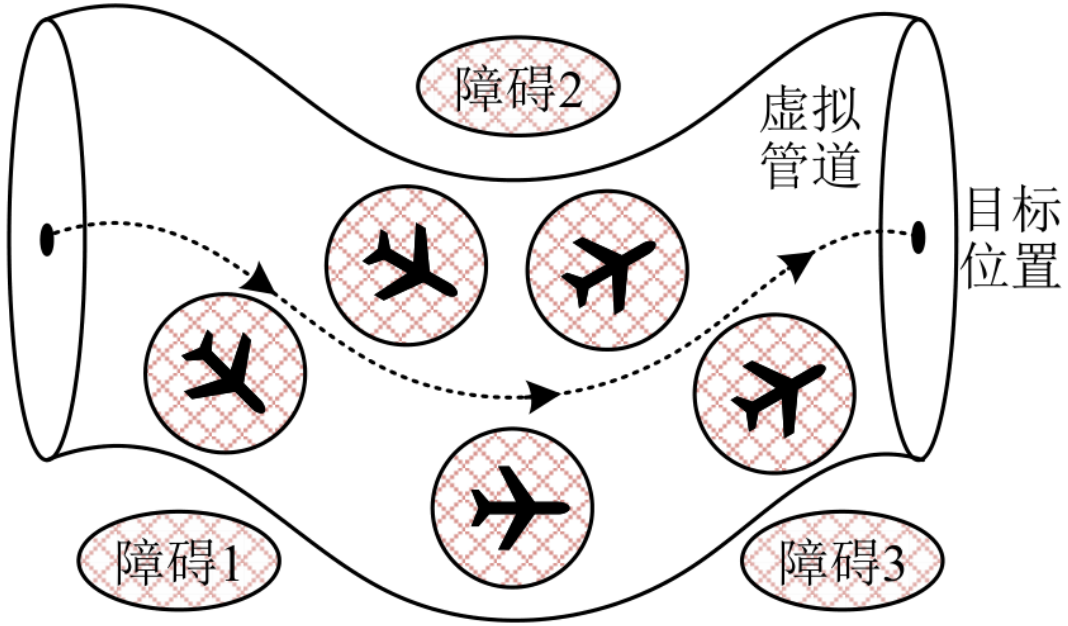


图10.3(c) 沿管道推进并绕过障碍

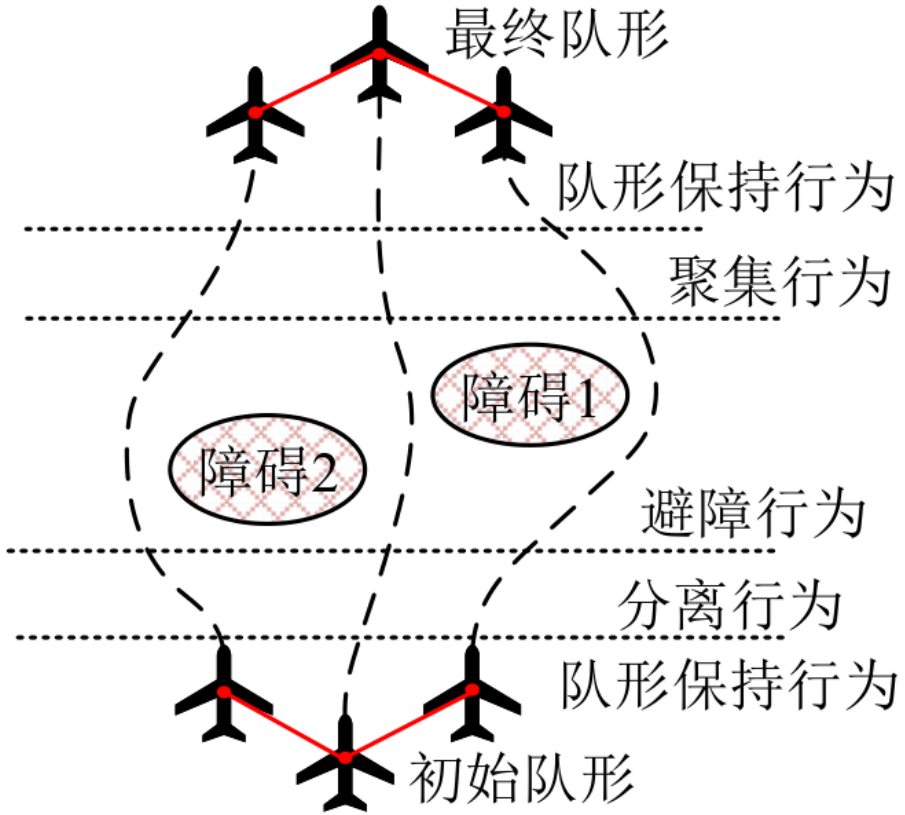


图10.3(d) 按阶段切换行为

10.2.3 领导跟随与虚拟结构：领导跟随

领导者跟随者以领机位置加偏移作为目标

$$\mathbf{u}_i = -b_i[\mathbf{x}_i - (\mathbf{x}_{\text{leader}} + \boldsymbol{\delta}_i)] \tag{10.9}$$

领机位置 → 加上相对偏移 → 本机负反馈跟踪

一步计算：领机5 m，偏移−2 m，本机1 m，增益2 s^{-1}：目标3 m，指令4 m/s。

适用与风险：实现直接；领机故障或状态失效需要备用领机与重选机制。

10.2.3 领导跟随与虚拟结构：锚定与邻域

领机锚定项与邻居偏移项承担不同职责

$$\mathbf{u}_i = -b_i[\mathbf{x}_i - (\mathbf{x}_{\text{leader}} + \boldsymbol{\delta}_i)] - \sum_{j\in\mathcal{N}_i} a_{ij}[(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) - (\boldsymbol{\delta}_i - \boldsymbol{\delta}_j)] \tag{10.10}$$

$e_i = x_i - (x_{\text{leader}} + \delta_i)$，$e$为各跟随者误差的堆叠；
L_f为跟随者图的拉普拉斯矩阵。

$$\dot{\mathbf{e}} = -(\mathbf{L}_f + \mathbf{B})\mathbf{e}, \qquad \mathbf{B} = \text{diag}(b_i)$$

静止领机的充分条件：跟随者图固定、无向且连通，至少一个节点能获取领机并具有正锚定增益。
邻域集合不含领机；断开时每个连通分量都需要自己的有效锚定。

10.2.3 领导跟随与虚拟结构：移动参考符号

移动领机：前馈应与目标速度同号

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{x}_i - (\mathbf{x}_L + \boldsymbol{\delta}_i), \qquad \dot{\mathbf{e}}_i = \mathbf{u}_i - \dot{\mathbf{x}}_L$$

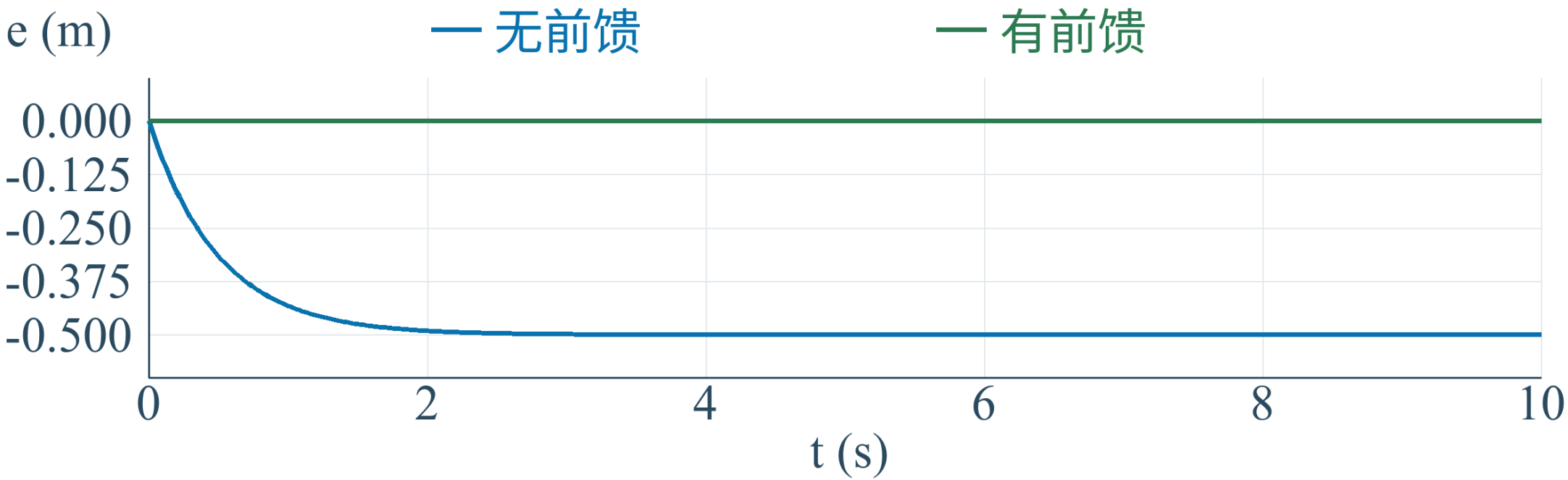
$$\mathbf{u}_i = -b_i \mathbf{e}_i \;\Rightarrow\; \mathbf{e}_{i,ss} = -\dot{\mathbf{x}}_L / b_i$$

$$\mathbf{u}_i = \dot{\mathbf{x}}_L - b_i \mathbf{e}_i \;\Rightarrow\; \dot{\mathbf{e}}_i = -b_i \mathbf{e}_i$$

一步核对：领机速度1 m/s，增益2 s^{-1}，当前误差−1 m。
正确前馈得到3 m/s；错误减号仅得1 m/s，此时误差不会立即减小。

10.2.3 领导跟随与虚拟结构：领机响应

完整结果：相对队形保持不等于零跟踪误差



图：匀速领机跟随误差；有、无参考速度前馈对比

$$v_L = 1,\ b = 2,\ e(0) = 0: \quad e_{\text{no ff}} = -0.5(1 - e^{-2t}), \quad e_{\text{ff}} = 0$$

10.2.3 领导跟随与虚拟结构：虚拟结构

虚拟结构用公共位姿生成各机的期望位置

$$(\mathbf{x}_{\mathrm{vs}}, \mathbf{R}) \in \mathbb{R}^3 \times \mathrm{SO}(3) \tag{10.11}$$

$$\mathbf{x}_i^{\mathrm{des}} = \mathbf{x}_{\mathrm{vs}} + \mathbf{R}\boldsymbol{\delta}_i \tag{10.12}$$

中心位置与旋转 → 旋转固定偏移 → 生成各机参考位置

$\mathbf{x}_{\mathrm{vs}}$：世界坐标中心；$\mathbf{R}$：结构坐标到世界坐标的旋转。

$\boldsymbol{\delta}_i$：结构坐标中的固定偏移；中心取质心时，偏移之和为零。

10.2.3 领导跟随与虚拟结构：虚拟结构误差

跟踪误差趋零后，刚体相对关系才被实现

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_i^{\mathrm{des}} = \mathbf{x}_i - (\mathbf{x}_{\mathrm{vs}} + \mathbf{R}\boldsymbol{\delta}_i) \tag{10.13}$$

$$\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j \to \mathbf{R}(\boldsymbol{\delta}_i - \boldsymbol{\delta}_j), \quad \forall i, j \in \mathcal{V} \tag{10.14}$$

$$\mathbf{u}_i = \dot{\mathbf{x}}_{\mathrm{vs}} + \dot{\mathbf{R}}\boldsymbol{\delta}_i - k\mathbf{e}_i \;\Rightarrow\; \dot{\mathbf{e}}_i = -k\mathbf{e}_i$$

$k > 0$为跟踪增益（s^{-1}）；$\dot{x}_{\mathrm{vs}}$与$\dot{R}\delta_i$分别补偿平移与转动。
前馈需要一致的时钟与参考；跟踪误差、通信中断和饱和会破坏理想几何关系。

10.2.3 领导跟随与虚拟结构：旋转算例

一步计算：先旋转偏移，再叠加中心位置

$$\mathbf{x}_{\mathrm{vs}} = \begin{bmatrix} 10 \\ 5 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\delta}_i = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}_i^{\mathrm{des}} = \begin{bmatrix} 10 \\ 5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9 \\ 7 \end{bmatrix} \ \mathrm{m}$$

$$\mathbf{x}_i = \begin{bmatrix} 8.6 \\ 7.2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} -0.4 \\ 0.2 \end{bmatrix}, \quad -2\mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} 0.8 \\ -0.4 \end{bmatrix} \ \mathrm{m/s}$$

对照错误：只加未旋转偏移会得到$(12, 6)$ m，不能表示旋转后的同一结构。

10.2.3 领导跟随与虚拟结构：虚拟结构结果

完整结果：误差衰减与刚体间距分别可复算

$$\mathbf{e}_i(t) = \begin{bmatrix} -0.4 \\ 0.2 \end{bmatrix} e^{-2t}, \qquad \|\mathbf{e}_i(t)\| = \sqrt{0.2}\, e^{-2t}$$

时刻 / s	横向误差 / m	纵向误差 / m	误差模 / m
0	−0.4000	0.2000	0.4472
1	−0.0541	0.0271	0.0605
2	−0.0073	0.0037	0.0082
4	−0.00013	0.00007	0.00015

理想解析结果；真实实现还需核对时钟、定位、前馈精度与执行约束。

10.2.3 领导跟随与虚拟结构：例程关联

现有虚拟结构例程体现“中心轨迹加偏移”

实验入口：10.RflySimSwarm/2.AdvExps/
e1.MatCentCtrlUAVsSim/7.RflyUdpSimpleVirStruct

$$\mathbf{c}(t) = [0.75\cos(0.15t),\ 0.5\sin(0.3t)]^{\mathsf{T}}, \quad \mathbf{p}_i^* = \mathbf{c} + \mathbf{d}_i$$

节点	例程偏移 / m	零时刻目标 / m
1	(0, 1)	(0.75, 1)
2	(1, 0)	(1.75, 0)
3	(−1, 0)	(−0.25, 0)

本页为源码静态代入；这些偏移相对参考点定义，不强称参考点为质心。

本章目录

一致性与编队控制

第十章 集群协同与博弈对抗

10.1 集群协同基础与控制架构

10.2 一致性与编队控制

10.3 智能博弈与强化学习基础

10.4 单智能体强化学习经典算法

10.5 多智能体强化学习与规模扩展

10.6 集群关键技术与挑战

10.7 RflySim集群框架与接口

10.8 本章实验案例与综合验证

10.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

10.2.1 一阶一致性与收敛条件

教材对应：第10.1.2.3节

10.2.2 位置偏移与动态编队

教材对应：第10.1.2.3节

10.2.3 领导跟随与虚拟结构

教材对应：第10.1.2.4节

10.2.4 虚拟管道与行为组合

教材对应：第10.1.2.4节

10.2.4 虚拟管道与行为组合：虚拟管道

虚拟管道规定可行区域，不固定每一对间距

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_{\text{tube},i} + \mathbf{u}_{\text{rep},i} \tag{10.15}$$

管道中心线与前进方向 → 导航项：推进并修正横向偏差

机间距离与边界距离 → 排斥项：修正危险接近与越界趋势

适用前提：管道可行、定位可信、控制可执行；狭窄区还要处理拥堵与让行。

10.2.4 虚拟管道与行为组合：管道算例

显式欧拉一步近似：推进与侧向修正

二维直管道：x为前进方向坐标，y为横向坐标，中心线$y = 0$，半宽2 m。
速度理想执行；暂不加入动态障碍。

$$\mathbf{u}_{\text{tube}} = (1, -0.5y), \quad \mathbf{u}_{\text{rep}} = (0, -\max(y - 1, 0)), \quad y \geq 0$$

$$y = 1.5: \quad \mathbf{u} = (1, -0.75) + (0, -0.5) = (1, -1.25)\ \text{m/s}$$

$$\Delta t = 0.2\ \text{s}: \quad (x^+, y^+) = (x + 0.2, 1.25)\ \text{m}$$

下半管道采用对称修正；本特例不代表一般人工势场都能保证安全。

10.2.4 虚拟管道与行为组合：管道结果

连续反馈解析结果：侧向误差分段衰减

$$y(t)=\begin{cases}\dfrac{2}{3}+\dfrac{5}{6}e^{-1.5t}, & 0\le t\le t_c\\ e^{-0.5(t-t_c)}, & t>t_c\end{cases},\quad t_c=\frac{\ln 2.5}{1.5}$$

时刻 / s	前进位置 / m	横向位置 / m
0	0	1.500
1	1	0.823
4	4	0.184
10	10	0.009

t_c为y降至1 m、排斥项归零的时刻；狭窄段仍需通行规则。

10.2.4 虚拟管道与行为组合：行为模块

六类基本行为可以组成不同任务过程

聚集	目标跟踪	队形保持
靠近邻域中心	朝任务目标运动	维持相对结构
避障	**速度匹配**	**分离**
修正危险运动	协调运动节奏	维持安全间隔

行为树（BT）或有限状态机（FSM）负责管理调用、优先级与切换条件；几何控制器可作为其中一个行为。

10.2.4 虚拟管道与行为组合：融合规则

行为融合可以加权、仲裁，也可以事件切换

$$\mathbf{u}_i = \sum_{k=1}^{m} w_k \mathbf{u}_i^{(k)}, \qquad \sum_{k=1}^{m} w_k = 1 \tag{10.16}$$

融合方式	规则	需要检查
加权叠加	同量纲向量乘权重后相加	抵消、尺度差异和饱和
优先级仲裁	满足触发条件时选择高优先行为	条件是否正确、是否出现抖动
事件驱动切换	按阶段与状态切换控制器	切换时的连续性与稳定性

10.2.4 虚拟管道与行为组合：融合算例

显式欧拉一步近似：两个行为相互削弱

$$u_g = 2 - x, \quad u_s = -1, \quad w_g = 0.6, \quad w_s = 0.4$$

$$x = 0: \quad u = 0.6 \times 2 + 0.4 \times (-1) = 0.8 \ \mathrm{m/s}$$

$$\Delta t = 0.2 \ \mathrm{s}: \quad x^+ = 0.16 \ \mathrm{m}$$

u_g为趋向2 m目标的速度，u_s为恒定分离速度-1 m/s。
本反例在分离项恒定区间内采用理想速度执行，用于检查合成效果。

10.2.4 虚拟管道与行为组合：融合结果

连续反馈解析结果：闭环停在非目标平衡点

$$\dot{x} = 0.8 - 0.6x, \quad x(0) = 0 \Rightarrow x(t) = \frac{4}{3}(1 - e^{-0.6t})$$

时刻 / s	实际位置 / m	到目标2 m的误差 / m
0	0	2
2	0.932	1.068
6	1.297	0.703
10	1.330	0.670

静止不等于到达；安全行为与任务行为的组合需要自己的验收判据。

10.2.4 虚拟管道与行为组合：结构选择

四类方法按任务约束选择，也可以组合使用

方法	主要约束或参考	优势与主要边界
领导者跟随者	领机状态＋相对偏移	实现直接；依赖领机与状态可得性
虚拟结构	公共位姿＋结构坐标偏移	几何清楚；依赖同步与跟踪精度
虚拟管道	空间可行域＋局部安全关系	允许变形；需处理狭窄段拥堵
行为组合	多模块融合与阶段切换	组织灵活；合成后性质需再验证

练习与讨论

练习：检查一致值、偏移符号与移动误差

问题一：三节点初值为1、3、8，固定无向链1-2-3、理想一阶协议。求一致值，并说明删去2与3之间的边后的结果。

问题二：实际相对位置−5 m，期望相对偏移−3 m，边权1。求该边的速度贡献。

问题三：领机速度1.2 m/s，增益0.6 s^{-1}，无前馈。求稳态误差并写出修正方法。

参考要点

参考答案：四米、正二与负二分别表示什么

答案一： 连通时平均值$(1+3+8)/3=4$；节点3断开后得到2、2、8。

答案二： $-[-5-(-3)]=+2\ \mathrm{m/s}$；代入目标相对位置时指令应为零。

答案三： 稳态误差为$-2\ \mathrm{m}$；加入同号参考速度前馈，仍保留负比例误差反馈。

$$u_i = 1.2 - 0.6e_i \quad \Rightarrow \quad \dot{e}_i = -0.6e_i$$

本节小结

本节小结：每个队形结论都有模型与条件

一致性：先确定图、边权、模型和更新条件，再讨论是否收敛及收敛到哪里。

编队：扣除偏移后求一致；动态参考需要速度或更高阶前馈。

结构：实际领机、虚拟刚体、可行管道与行为融合解决不同组织问题。

易错点：目标间距不代表过程安全；加权相加不继承各行为的全部性质。

控制律、参考生成和安全约束需要在同一个闭环中共同检查。