

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201306024

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/CNKI:23-1538/TP.20131101.1720.005.html>

基于包含原理的多智能体一致性协调控制

马晨, 陈雪波

(辽宁科技大学 电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要:为了考虑在包含原理的概念下多智能体系统的运动一致性,利用包含原理对整体系统的重叠偏差模型进行扩展,对于扩展系统拓扑网络中每一对相邻的智能体,可以将其看作是整体系统重叠关系的一个基本单位。分别对这些智能体对进行一致性控制,再将每一组智能体对的控制率按循环逆序整合起来,并通过包含原理相关条件进行收缩,即可实现原系统的一致性协调控制。该方法可以有效地处理系统拓扑网络的变化,包括智能体数量的增减等情况。

关键词:包含原理;对对分解;多智能体系统;运动一致性;复杂系统;协调控制

中图分类号:TP18 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4785(2014)04-468-06

中文引用格式:马晨,陈雪波. 基于包含原理的多智能体一致性协调控制[J]. 智能系统学报, 2014, 9(4): 468-473.

英文引用格式:MA Chen, CHEN Xuebo. Coordinated control of the consensus of a multi-agent system based on the inclusion principle[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014, 9(4): 468-473.

Coordinated control of the consensus of a multi-agent system based on the inclusion principle

MA Chen, CHEN Xuebo

(School of Electronics and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: Within the concept of the inclusion principle, the motion consistency of a multi-agent system is considered. By using the system inclusion conditions, an overlapping deviation model of the overall system is expanded into a larger space such that each pair of the neighboring agents of the expanded system network topology can be treated as a basic unit of the overall system overlapping, and those pair-wise agents can achieve their own consensus respectively. Then integrate all of the consensus control laws of the agent pairs into the recurrent reverse order, and contract it into the original space according to the relevant inclusion conditions. The locomotion consensus coordinated control of the multi-agent system is constructed in this way. This method may effectively deal with the changes in the topological network of the system, including specific circumstances including the quantity variation of the agents.

Keywords: inclusion principle; pair-wise decomposition; multi-agent system; locomotion consensus; complex system; coordinated control

多智能体的运动一致性在本质上与复杂网络的同步问题非常相似,都是要使网络中各个智能体的状态趋于一个一致的解,除了网络本身的性质对一致性的影响以外,各智能体之间的协调对于改善同

步能力也是非常重要的^[1]。近年来,结合网络一致性的多智能体群集控制一直是控制学者关注的问题,并且得到了许多重要的结论。如文献[2-5]讨论了一致性问题中系统网络拓扑结构的影响;文献[6-8]通过设计一个势能函数来实现多智能体的群集控制;文献[9]提出了同时考虑位移与速度协调的二阶一致性协议。另一方面,包含原理以及由其引

收稿日期:2013-06-14. 网络出版日期:2013-11-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60874017).

通信作者:陈雪波. E-mail: xuebochen@126.com.

申出的对对分解^[10-13],可以充分地利用各子系统间的互联关系,在处理多重重叠互联系统的协调控制时具有独特的优势。包含原理在运动体的协调控制方面有很广泛的应用,如自动车组系统^[13-15]以及无人机编队^[16]等的协调控制。由于前述文献中的系统运动模型是基于相对位置构建的,因而只适合于处理各运动体按链型结构排列的情况。本文将文献^[13-14]中的系统扩展为2个轴向,考虑按网型结构排列的多智能体系统,为其建立一个多重重叠的偏差状态方程,在包含原理的概念下分别为每一组在网络拓扑中相邻的智能体对设计一致性控制状态反馈矩阵,以收缩得到适用于原系统的协调控制器。系统网络拓扑的互联关系主要体现在一致性协调控制器中。

1 包含原理与系统描述

1.1 系统的置换包含原理

系统的包含原理有扩展与收缩2个方面,可以有效地处理系统的重叠互联结构,从而简化复杂系统的分析与设计工作。通过对系统重叠的各个组成部分或子系统近似解耦,可以得到原系统在扩展空间中的对应,并且在满足包含原理相关的条件下,该扩展系统包含了原系统所有的性质。这样一来,可以在扩展空间中为每一个解耦的子系统进行并行且独立的观测器和控制器设计,经过适当的整合后,可以将得到的结果再收缩回原系统空间,进而实现对原系统的重叠分散与一致性协调控制。关于系统包含原理以及重叠互联系统协调控制方面的详细内容请见文献^[10-13]。

考虑一线性定常连续的重叠互联系统,具有 $N(N \geq 3)$ 个子系统:

$$\begin{cases} \mathbf{S} = \{\mathbf{S}_i\} \\ \mathbf{S}_i: \dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}_{ii}\mathbf{x}_i + \mathbf{B}_{ii}\mathbf{u}_i + \sum_N \mathbf{A}_{ij}\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_i = \mathbf{C}_{ii}\mathbf{x}_i \\ i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}_i(t) \in \mathbf{R}^{n_i}$, $\mathbf{u}_i(t) \in \mathbf{R}^{m_i}$ 和 $\mathbf{y}_i(t) \in \mathbf{R}^{l_i}$ 分别是在时间 $t \in \mathbf{R}$ 子系统 \mathbf{S}_i 的状态、输入和输出向量; \mathbf{A}_{ii} 、 \mathbf{B}_{ii} 和 \mathbf{C}_{ii} 是系统 \mathbf{S}_i 的系数矩阵, \mathbf{A}_{ij} 表示子系统 \mathbf{S}_i 与子系统 \mathbf{S}_j 的互联关系。

对于式(1),系统中所有的互联关系都是建立在每一对子系统间的信息结构约束之上的,因而在式(1)中任意选择系统 \mathbf{S} 的一对子系统 \mathbf{S}_i 与 \mathbf{S}_j , 称

$$\mathbf{S}_{ij}: \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}_{ii}\mathbf{x}_i + \mathbf{A}_{ij}\mathbf{x}_j + \mathbf{B}_{ii}\mathbf{u}_i, \mathbf{y}_i = \mathbf{C}_{ii}\mathbf{x}_i \\ \dot{\mathbf{x}}_j = \mathbf{A}_{ji}\mathbf{x}_i + \mathbf{A}_{jj}\mathbf{x}_j + \mathbf{B}_{jj}\mathbf{u}_j, \mathbf{y}_j = \mathbf{C}_{jj}\mathbf{x}_j \end{cases} \quad (2)$$

为系统 \mathbf{S} 的一个基本互联子系统对。在式(2)中,只需要关注特定子系统 \mathbf{S}_i 与 \mathbf{S}_j 之间的互联关系,而这2个子系统与其他任意子系统间的互联关系可以暂时不做考虑,这样可以在很大程度上简化了复杂互联系统的分析工作,又不会损失细节。

重叠互联系统的对对分解需要考虑扩展空间中子系统对 \mathbf{S}_{ij} 的排列顺序,即循环逆序排列,假设系统 \mathbf{S} 具有全网络结构,则有各子系统对按倒序下标循环排列为

$$\mathbf{S}_{ij}: \mathbf{S}_{12}, \mathbf{S}_{23}, \mathbf{S}_{13}, \mathbf{S}_{34}, \mathbf{S}_{24}, \mathbf{S}_{14}, \dots, \\ \mathbf{S}_{(N-1),N}, \mathbf{S}_{(N-2),N}, \dots, \mathbf{S}_{2N}, \mathbf{S}_{1N}$$

这种排列允许系统 \mathbf{S} 中最后一个子系统 \mathbf{S}_N 直接脱离主体系统,或是子系统 \mathbf{S}_{N+1} 直接加入,而不会影响原有的排列顺序,可以用于处理系统间互联关系的变化。循环逆序排列是通过将系统 \mathbf{S} 进行一系列对称置换得到的,在扩展空间中,假设一个具有块维数为 \tilde{N} 的单位矩阵 \mathbf{I} 可以分解为 \tilde{N} 个单位子矩阵,可以定义一对初等置换矩阵

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{k(k+1)} &= \\ \text{blkdiag} \left(\mathbf{I}_1, \dots, \mathbf{I}_{k-1}, \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_k \\ \mathbf{I}_{k+1} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{I}_{k+2}, \dots, \mathbf{I}_{\tilde{N}} \right) \\ \mathbf{P}_{k(k+1)}^{-1} &= \mathbf{P}_{k(k+1)}^T = \\ \text{blkdiag} \left(\mathbf{I}_1, \dots, \mathbf{I}_{k-1}, \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_{k+1} \\ \mathbf{I}_k & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{I}_{k+2}, \dots, \mathbf{I}_{\tilde{N}} \right) \end{aligned}$$

式中: \mathbf{I}_k 是对应子系统 \mathbf{S}_k 的单位子矩阵。从而有列组置换矩阵 \mathbf{P} 与行组置换矩阵 \mathbf{P}^{-1} 由一系列相邻列组与行组初等置换矩阵按顺序右累乘与左累乘得到

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \overleftarrow{\Pi}_{i=1}^{N-2} \overleftarrow{\Pi}_{j=1}^{N-i-1} \overleftarrow{\Pi}_{k=1+i(i-1)}^{N(N-j)-i(j+1)} \mathbf{P}_{k(k+1)} \\ \mathbf{P}^{-1} &= \overrightarrow{\Pi}_{i=1}^{N-2} \overrightarrow{\Pi}_{j=1}^{N-i-1} \overrightarrow{\Pi}_{k=1+i(i-1)}^{N(N-j)-i(j+1)} \mathbf{P}_{k(k+1)} \end{aligned}$$

为将系统 \mathbf{S} 扩展成各子系统对 \mathbf{S}_{ij} 按循环逆序排列的扩展系统 $\tilde{\mathbf{S}}_p$, 需要选择系统 \mathbf{S} 的扩展和收缩变换矩阵分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= \text{blkdiag} \left[\underbrace{\mathbf{I}_{n_1} \mathbf{I}_{n_1} \dots \mathbf{I}_{n_1}}_{N-1} \dots \underbrace{\mathbf{I}_{n_N} \mathbf{I}_{n_N} \dots \mathbf{I}_{n_N}}_{N-1} \right]^T \\ \mathbf{U} &= \text{blkdiag} \left[\underbrace{\mathbf{I}_{n_1} \mathbf{I}_{n_1} \dots \mathbf{I}_{n_1}}_{N-1} \dots \underbrace{\mathbf{I}_{n_N} \mathbf{I}_{n_N} \dots \mathbf{I}_{n_N}}_{N-1} \right] / (N-1) \\ \mathbf{R} &= \text{blkdiag} \left[\underbrace{\mathbf{I}_{m_1} \mathbf{I}_{m_1} \dots \mathbf{I}_{m_1}}_{N-1} \dots \underbrace{\mathbf{I}_{m_N} \mathbf{I}_{m_N} \dots \mathbf{I}_{m_N}}_{N-1} \right]^T \\ \mathbf{Q} &= \text{blkdiag} \left[\underbrace{\mathbf{I}_{m_1} \mathbf{I}_{m_1} \dots \mathbf{I}_{m_1}}_{N-1} \dots \underbrace{\mathbf{I}_{m_N} \mathbf{I}_{m_N} \dots \mathbf{I}_{m_N}}_{N-1} \right] / (N-1) \end{aligned}$$

$$T = \text{blkdiag} \left[\underbrace{I_{l_1} I_{l_1} \cdots I_{l_1}}_{N-1} \cdots \underbrace{I_{l_N} I_{l_N} \cdots I_{l_N}}_{N-1} \right]^T$$

$$S = \text{blkdiag} \left[\underbrace{I_{l_1} I_{l_1} \cdots I_{l_1}}_{N-1} \cdots \underbrace{I_{l_N} I_{l_N} \cdots I_{l_N}}_{N-1} \right] / (N-1)$$
(3)

置换后可得

$$V_p = P_A^{-1} V$$

$$U_p = U P_A$$

$$R_p = P_B^{-1} R$$

$$Q_p = Q P_B$$

$$T_p = P_C^{-1} T$$

$$S_p = S P_C$$

分别满足包含条件 $U_p V_p = I_n$, $Q_p R_p = I_m$ 以及

$S_p T_p = I_l$ 。据此可以给出扩展系统 \tilde{S}_p 为

$$\tilde{S}_p = \{ \tilde{S}_{pi} \}$$

$$\tilde{S}_{pi} : \begin{cases} \dot{\tilde{x}}_{pi} = \tilde{A}_{pi} \tilde{x}_{pi} + \tilde{B}_{pi} \tilde{u}_{pi} + \sum_N \tilde{A}_{pij} \tilde{x}_{pj} \\ \tilde{y}_{pi} = \tilde{C}_{pi} \tilde{x}_{pi}, i = 1, 2, \dots, \tilde{N}, \tilde{N} \geq N \end{cases} \quad (4)$$

其中各系数矩阵分别为

$$\begin{cases} \tilde{A}_p = V_p A U_p + M_A^p \\ \tilde{B}_p = V_p B Q_p + M_B^p \\ \tilde{C}_p = T_p C U_p + M_C^p \end{cases} \quad (5)$$

式中: M_A^p 、 M_B^p 和 M_C^p 分别是系统扩展后的补偿矩阵。文献[12-13]介绍了一组在对分解意义下合适的补偿形式,限于篇幅这里不再赘述。

1.2 多智能体系统的偏差模型和重叠结构分解

考虑用每个智能体位移的变化量和速度的变化量来描述其运动状态,可以写出每个智能体的二阶偏差方程为

$$\begin{cases} \Delta \dot{d}_i = \Delta v_i \\ \Delta \dot{v}_i = -\Delta v_i + u_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (6)$$

为简便起见以下将省略变化量符号,式(6)中 $d_i = [d_{ix} \ d_{iy}]^T$, $v_i = [v_{ix} \ v_{iy}]^T$, $u_i = [u_{ix} \ u_{iy}]^T$, 分别表示智能体 i 在 x 和 y 轴上的位移与速度变化量以及控制输入。

如图1所示,考虑由 $N=20$ 个智能体组成的网型结构系统。容易想象,对于这样的网型拓扑结构,当每一对智能体间的距离均相等时,一定会形成图中正三角形网格的网型结构,即是文献

[8]中定义的 α -lattice。不过,文献[8]的群集算法主要考虑智能体的势能关系,这样一来各智能体对相互距离的判断可能会产生误差,在实际形成的网型拓扑结构中各边的长度可能不会完全相等,即形成准 α -lattice。本文在接下来要介绍的多智能体一致性协调控制将直接考虑各智能体位移和速度的变化量,因而在平稳状态下各智能体间的距离将是完全相等的。

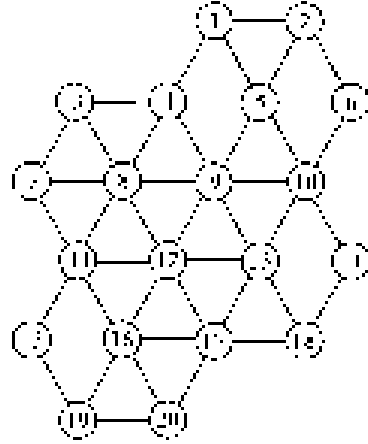


图1 多智能体系统网络拓扑结构, $N=20$

Fig.1 Network topology of a multi-agent system, $N=20$

根据式(6)描述的系统动态建立状态空间模型。选取 $x = [d_1 \ v_1 \ d_2 \ v_2 \ \cdots \ d_{20} \ v_{20}]^T$ 作为系统的状态变量, $u = [u_1 \ u_2 \ \cdots \ u_{20}]^T$ 为各智能体的控制输入, $y = [y_{1d} \ y_{1v} \ \cdots \ y_{20d} \ y_{20v}]^T = [d_1 \ v_1 \ \cdots \ d_{20} \ v_{20}]^T$ 作为系统的输出变量。这样就可以为系统建立一个具有重叠互联结构的动态模型,各智能体间的关联一方面体现在其状态矩阵本身的重叠上,另一方面则是系统的控制输入。

图1表示的系统状态空间模型为

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{20} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_{20} \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{20} \end{bmatrix} x$$
(7)

式中:

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$i = 1, 2, \dots, 20$$

$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_2 \end{bmatrix}$ 表示出了在系统拓扑网络中相邻的2个智能体所组成的智能体对的基本形式,可以看出,该偏差模型是以一个智能体整体的状态矩阵为重叠部分的。同时比较式(1),这里相当于互联状态矩阵 $\mathbf{A}_{ij} = \mathbf{A}_{ji} = 0$,说明智能体对间的互联作用并不是体现在状态变量的关联上。实际上,按照下文中一致性控制的形式,这个互联作用是体现在系统的控制输入上的。

$$\begin{cases} \mathbf{V} = \text{blkdiag}([I_1 I_1 I_1], [I_2 I_2 I_2], \dots, [I_5 I_5 I_5 I_5 I_5], \dots, [I_{20} I_{20} I_{20}])^T \\ \mathbf{U} = \text{blkdiag}([I_1 I_1 I_1]/3, [I_2 I_2 I_2]/3, \dots, [I_5 I_5 I_5 I_5 I_5]/6, \dots, [I_{20} I_{20} I_{20}]/3)^T, \end{cases} \quad (9)$$

系统输入、输出的扩展和收缩变换矩阵结构与式(9)类似。系统的置换矩阵若要按照定义式来选择稍显不够直观,这里可以参照文献[17]中的式(6),即

$\begin{cases} \mathbf{P}((N_i - j + 1), [j(j-1) - 2(i-1) - 1])_b = \mathbf{I}_i \\ \mathbf{P}([N(j-1) - i + 1], [j(j-1) - 2(i-1)])_b = \mathbf{I}_j \end{cases}$
式中:符号 $\mathbf{P}(m, n)_b$ 表示 \mathbf{P} 中单位子矩阵 \mathbf{I} 的块位置。补偿矩阵的选择可以参照文献[12-13]。这样即可根据式(4)、(5)得到原多智能体系统的扩展系统。

2 多智能体的一致性协调控制

考虑多智能体系统偏差模型(7),控制目标是要使各智能体的位移和速度变化量为0,且整体系统实现运动状态的一致。针对重叠解耦后的扩展系统,以其中的每个子系统对为基本单位,参照文献[9]中提出的二阶一致性协议,可以构造智能体对的一致性控制律为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i &= \mathbf{f}_i^c + \mathbf{f}_i^r = \\ & a_{ij}[-(\mathbf{d}_i - \mathbf{d}_j) - c_i(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)] + (-r_d \mathbf{d}_i - r_v \mathbf{v}_i) \\ & i, j = 1, 2, \dots, N, i \neq j \end{aligned} \quad (10)$$

式中: \mathbf{f}_i^c 是为保证系统运动一致性的实现, \mathbf{f}_i^r 是为保证各智能体的位移与速度变化量为0,各参数 a_{ij} 、 c_i 、 r_d 和 r_v 取合适的值。从而可以把式(11)整理成状态反馈矩阵的形式:

$$\mathbf{K}_{Dij} = \begin{bmatrix} (a_{ij} + r_d)4 & (a_{ij}c_i + r_v)4 & -a_{ij}4 & -a_{ij}c_i \\ -a_{ji}4 & -a_{ji}c_j4 & (a_{ji} + r_d)4 & (a_{ji}c_j + r_v) \end{bmatrix} \quad (11)$$

即可得到扩展系统的状态反馈控制矩阵为

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{K}}_D &= \text{blkdiag}(\mathbf{K}_{D12}, \mathbf{K}_{D34}, \mathbf{K}_{D14}, \dots, \mathbf{K}_{D16,20}) \\ \tilde{\mathbf{u}}_p &= -\tilde{\mathbf{K}}_D \tilde{\mathbf{x}}_p \end{aligned} \quad (12)$$

需要注意的是,根据文献[12-13],在整合扩展

根据图1所示的网络结构,扩展系统中各子系统对的循环逆序可以写成

$$\begin{aligned} S_{ij}: & S_{12}, S_{34}, S_{14}, S_{45}, S_{25}, S_{15}, S_{56}, S_{26}, S_{37}, S_{78}, \\ & S_{48}, S_{38}, S_{89}, S_{59}, S_{49}, S_{9,10}, S_{6,10}, S_{5,10}, S_{8,11}, S_{7,11}, \\ & S_{11,12}, S_{9,12}, S_{8,12}, S_{12,13}, S_{10,13}, S_{9,13}, S_{13,14}, S_{10,14}, \\ & S_{11,15}, S_{15,16}, S_{12,16}, S_{11,16}, S_{16,17}, S_{13,17}, S_{12,17}, S_{17,18}, \\ & S_{14,18}, S_{13,18}, S_{16,19}, S_{15,19}, S_{19,20}, S_{17,20}, S_{16,20}. \end{aligned} \quad (8)$$

这样,根据式(3)可以选择系统状态的扩展和收缩变换矩阵为

系统控制矩阵时需要考虑整体系统的信息结构,即需要参照由包含原理得到的扩展系统状态矩阵的信息结构,对控制矩阵进行补偿。这里由于系统的状态矩阵中对应的信息结构约束项为0,从而相应的协调补偿器也为0。

然后需要根据包含原理相关条件将扩展系统的协调控制器(12)收缩回原空间,由文献[12-13]有

$$\mathbf{R}_p \mathbf{K} = \tilde{\mathbf{K}}_D \mathbf{V}_p$$

即此时原系统的协调控制矩阵 \mathbf{K} 可以由扩展系统的控制矩阵 $\tilde{\mathbf{K}}_D$ 收缩得到。

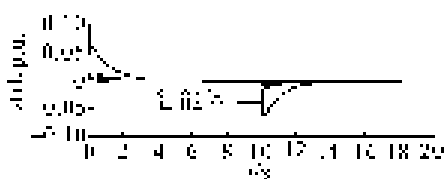
实际上,考虑基于包含原理得到的一致性控制律 $\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}$, 其基本结构与常规的一致性协议如文献[4, 9]中提到的是相同的,差别仅在于每一路控制输入整体的系数上。这主要是因为常规的一致性协议使用系统网络的 Laplacian 矩阵来描述网络拓扑结构,而该矩阵在构造时是以网络中各节点的互联项作为基准单位,而本文的描述方式是以该节点本身作为基准单位,二者相差的系数恰好是节点所含的互联项的数目。

3 仿真示例

首先考虑图1所示的多智能体系统,各智能体仅能与存在信息结构约束的其他智能体进行信息交换,即是在一致性控制律(10)中, i 与 j 需要满足 S_{ij} 存在于子系统的循环逆序排列里。系统的重叠偏差模型如式(7),设智能体1在 $1 \leq t \leq 10$ s 内在 x 轴和 y 轴上均受到一个正单位的扰动,控制律中各参数在整个仿真过程中是固定的,分别为 $a_{ij} = 10$, $c_i = 1$, $r_d = r_v = 10$,使用 MATLAB 仿真如图2。



(a) 智能体位移偏差曲线



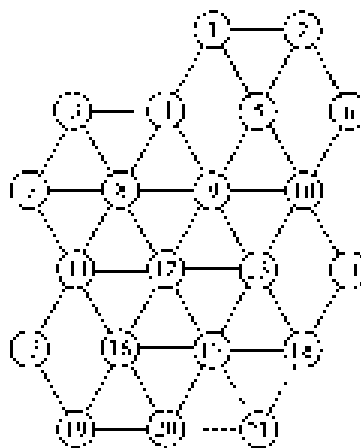
(b) 智能体速度偏差曲线

图2 $N=20$ 时多智能体系统的响应曲线Fig.2 Response curves of the multi-agent system, $N=20$

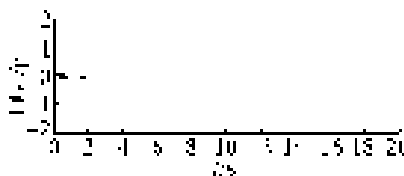
图2中 $\|\Delta d\| = (\Delta d_{ix}^2 + \Delta d_{iy}^2)^{1/2}$, $\|\Delta v\| = (\Delta v_{ix}^2 + \Delta v_{iy}^2)^{1/2}$, 表示智能体位移与速度偏差的矢量合成, 图中的负值表示与原矢量方向相反。可以看出, 该系统在扰动的作用下是有差的: 由于扰动是作用在智能体1上, 该智能体的位移和速度变化量的响应曲线波动幅度都相对较大; 智能体2、4和5与智能体1直接相连, 受扰动的影响也很明显, 不过响应曲线的波动相对要小很多, 并且波动幅度是随着智能体2、4和5各自与其他智能体相关联的程度的增加而递减的, 说明在这样的网络化结构中, 相关联的智能体可以分担扰动造成的影响, 这对实现整体系统的协调稳定具有重要意义。与此同时, 在扰动作用消失后系统可以很快地调节回原平衡位置。这样的结果说明本文提出的方法是有效的。另一方面, 由于本文的方法应用了置换包含原理, 其中各个子系统对的循环逆序排列可以应对系统网络的拓扑结构变化, 尤其是有子系统脱离或是加入整体系统的情况。文献[17-18]针对子系统的添加, 通过构造一对列组、行组结构变换矩阵来描述系统网络结构的变化。这里考虑向图1所示的网络中加入一个新的智能体, 其位置可以是任意的, 不失一般性, 假设系统在添加后依然具有各智能体间距离相等的网络拓扑结构, 形成的系统网络拓扑如图3所示。智能体21的加入相当于为系统增加了 $S_{20,21}$ 、 $S_{18,21}$ 以及 $S_{17,21}$ 3个子系统对, 排在原系统中子系统循环逆序式(8)的末尾。根据文献[17-18]的相关内容, 针对这个信息结构约束的添加过程可以构造相应的添加矩阵, 从而得到结构变化后应用于系统包含的置换矩阵和扩展、收缩矩阵。考虑文章篇幅, 具体的添加过程这里不再赘述。

假设系统经调节后处于平稳运行状态, 智能体21的加入将分别给智能体17、18和20一个正单位的扰动, 智能体21本身受到一个负单位的扰动, 控制律中各参数不变。仿真结果如图4, 这里各智能体所受扰动为瞬时值, 因而速度变化量的调节时间很短。智能体17、18和20在系统网络中的地位和作用很接近, 其位移与速度变化量的响应曲线也很相似, 并且与智能体21的响应曲线变化方向相反,

其他智能体的响应曲线波动依然是按照其各自的互联情况不同而有一定的差别, 这与图2显示的结果是基本一致的。以上仿真结果表明, 在网络拓扑结构改变的情况下, 系统仍然可以很快地调节回平衡位置。

图3 向系统中加入一个智能体, $N=21$ Fig.3 Add one more agent to the former system, $N=21$ 

(a) 智能体位移偏差曲线



(b) 智能体速度偏差曲线

图4 $N=21$ 时多智能体系统的响应曲线Fig.4 Response curves of the multi-agent system, $N=21$

4 结束语

本文在包含原理的概念下考虑多智能体系统的运动一致性问题。通过对系统重叠偏差方程进行扩展、为每个智能体对单独设计控制律、再将结果整合并收缩这样的过程, 可以实现原系统的一致性协调控制。区别于之前的工作, 本文解决了在2个运动轴向上应用包含原理进行系统重叠分解的问题。文中各智能体间距离相等的网型结构是有现实意义的, 在动车组的队形保持或多机器人系统的群集控制中均有应用价值。另一方面, 不只是本文提到的一致性, 基于置换包含原理的对对分解也同样适用于处理更加复杂的控制算法以及网络结构的动态变化。

参考文献:

- [1] 段志生, 黄琳. 几类协调控制问题及其应用[J]. 控制工程, 2010, 17(suppl): 1-8.
DUAN Zhisheng, HUANG Lin. Several harmonic control problems and their applications[J]. Control Engineering of China, 2010, 17(suppl): 1-8.
- [2] JUSTH E W, KRISHNAPRASAD P S. A simple control law for UAV formation flying, 2002-38[R]. Institute for System Research, University of Maryland, 2002.
- [3] JADBABIE A, LIN J, MORSE A S. Coordination of groups of mobile agents using nearest neighbor rules[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(6): 988-1001.
- [4] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [5] OLFATI-SABER R, FAX J A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215-233.
- [6] TANNER H G. Flocking with obstacle avoidance in switching networks of interconnection vehicles[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. [S.l.], 2004: 3006-3011.
- [7] TANNER H G, JADBABAIE A, GAPPAS G J. Flocking in fixed and switching networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(5): 863-868.
- [8] OLFATI-SABER R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(3): 401-420.
- [9] REN W, ATKINS E. Distributed multi-vehicle coordinated control via local information exchange[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2007, 17(10/11): 1002-1033.
- [10] CHEN X B, STANKOVIC S S. Decomposition and decentralized control of systems with multi-overlapping structure[J]. Automatica, 2005, 41: 1765-1772.
- [11] CHEN X B, STANKOVIC S S. Overlapping decentralized approach to automatic generation control of multi-area power systems[J]. International Journal of Control, 2007, 80: 386-402.
- [12] CHEN X B, XU W B, HUANG T Y, et al. Pair-wise decomposition and coordinated control of complex systems[J]. Information Science, 2012, 185: 78-99.
- [13] 陈雪波. 系统包含原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 12-17.
- [14] 陈雪波. 车组距离与速度偏差系统的建模与仿真[C]//第20届中国控制会议论文集. 大连, 中国, 2001: 553-558.
CHEN Xuebo. Modeling and simulation for car-string velocity and distance bias systems[C]//Proceedings of the 20th China Control Conference. Dalian, China; 2001: 553-558.
- [15] STANKOVIC S S, STANJEVIC M J, SILJAK D D. Decentralized suboptimal LQG control of a platoon of vehicles[C]//The 7th Balkan Conference on Operational Research. Constanta, Romania, 2005: 12-15.
- [16] STIPANOVIC D M, INALHAN G, TEO R, et al. Decentralized overlapping control of a formation of unmanned aerial vehicles[J]. Automatica, 2004, 40: 1285-1296.
- [17] CHEN X B, MA C. Coordinated control of a four-area power system under structural perturbation[C]//The 9th Asian Control Conference. Istanbul, Turkey, 2013: 14-17.
- [18] 马晨, 陈雪波. 互联系统的动态信息结构约束[J]. 系统科学与数学, 2013, 33(11): 1301-1320.
MA Chen, CHEN Xuebo. Dynamic of interconnected system information structure constraints[J]. Journal of System Science and Mathematical Science, 2013, 33(11): 1301-1320.

作者简介:



马晨,男,1988年生,硕士研究生,主要研究方向为复杂系统、复杂网络等。发表学术论文5篇。



陈雪波,男,1960年生,教授,博士生导师,中国自动化学会过程控制专业委员会委员,主要研究方向为复杂系统、群集智能等。主持多项国家及省部级科研基金项目。发表学术论文多篇,出版学术专著1部。