

doi: 10.12194/j.ntu.20191101001

引文格式: 谭学刚, 曹进德. 基于脉冲控制的多智能体系统协同问题研究综述[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2020, 19(1): 1-8.

基于脉冲控制的多智能体系统协同问题研究综述

谭学刚¹, 曹进德^{2*}

(1. 东南大学 自动化学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 数学学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 脉冲控制因其具有鲁棒性强、易实现以及收敛速度快等优点而受到广大研究者的青睐, 并广泛应用于多智能体系统协同控制领域。文章对基于脉冲控制策略的多智能体系统协同控制的研究进展进行较为详细的综述, 着重介绍脉冲控制协议的设计及脉冲序列生成机制; 此外, 对多智能体脉冲协同控制理论在实际中的应用进行了相应的介绍; 最后, 指出多智能体系统脉冲协同控制中几个亟待解决的问题, 并对其理论及应用进行了展望。

关键词: 脉冲控制; 多智能体系统; 协同控制

中图分类号: TP13; TP18

文献标志码: A

文章编号: 1673-2340(2020)01-0001-08

Review on the Recent Advances in the Impulsive Control Strategy Based Coordination of the Multi-agent Systems

TAN Xuegang¹, CAO Jinde^{2*}

(1. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Mathematics, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The impulsive control strategy has attracted the immense research attention due to its excellent performance in terms of the robustness, the simplicity and the convergence, which has widely been utilized to solve the coordinated control problems of multi-agent systems. This paper presents a systematic review on the recent advances in the impulsive control strategy of multi-agent systems, and mainly introduces the design of the impulsive control protocols and the schemes of impulse sequence generation. In addition, the practical applications for the impulsive-control based coordination of multi-agent systems are still introduced. Finally, some open and pressing issues on the distributed impulsive control based coordination of multi-agent systems, their theoretical and application research prospect are provided.

Key words: impulsive control; multi-agent system; coordinated control

随着通信网络及计算机技术的飞速发展, 传统的集中式控制模式已很难适应当前的控制性能的

需求, 而分布式协同控制^[1-3]在降低控制成本、提高系统鲁棒性及控制方式灵活性上有着极大的优势,

收稿日期: 2019-11-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61833005)

第一作者简介: 谭学刚(1986—), 男, 博士研究生。

* 通信联系人: 曹进德(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂网络、动力学分析等。E-mail: jdcao@seu.edu.cn

弥补了集中式控制在这些方面的不足,因此,分布式协同控制被广泛地应用于多智能体系统和复杂网络等领域中。近年来,由于在卫星姿态控制、无人飞行器编队、水下潜航器协同追踪及微电网分布式发电等领域的广泛应用,多智能体分布式协同控制技术引起了广大学者的研究兴趣^[4-6]。

一般而言,智能体具备一定的自组织、通信、计算和推论能力。在现实应用中,智能体可以是传感器、处理器及通信器件的单个设备。每个智能体拥有独立的性能指标,个体间遵循相对独立的行为准则,独立的完成所设定的简单任务,但是更为复杂的任务一般需要由若干个智能体构成的多智能体网络协作完成。智能体之间通过对应的拓扑规则实现信息交互,并在相应设计的控制律作用下完成需要实现的协同目标。在此过程中,控制策略是影响多智能体网络协同控制过程的至关重要的因素,其决定了多智能体网络实现协同任务的性能。在实现多智能体系统协同任务的过程中,诸如自适应控制^[7]、事件驱动控制^[8]、模型预测控制^[9]等协同控制方案为了达到各自的控制目的或性能相继被提出。然而,上述这些控制策略要求控制输入是连续的,并且在网络控制中,节点间的信息交互也需要是实时的。在节约多智能体系统资源和提高系统收敛速度方面还有很大改进空间。

近年来,随着脉冲微分方程等理论的发展,具有状态跳变的系统引起了众多学者的关注。研究者将这种状态跳变的现象称之为脉冲效应。这种跳变具有瞬时性,能够让系统的状态发生突然改变,从而使得系统在瞬间变得稳定或发散。正是由于这种能使系统发生突变的特性,将脉冲作为一种控制手段,在合适的时刻作用于受控对象,能够提升系统收敛速度、增强系统的鲁棒性,因此,脉冲控制策略被广泛应用于实际工程及社会管理等方面,如卫星姿态控制^[10]、货币供应控制^[11]等。

将脉冲控制应用于多智能体系统协同控制中同样能取得较好的控制效果。由于脉冲效应的瞬时性,智能体间的信息交互及对智能体的控制都在瞬间完成,避免了受控个体在连续控制过程中所引起的资源消耗,并且能够增强多智能体系统干扰的鲁棒性。与前面提及的连续控制方式相比,脉冲控制

在多智能体系统协同控制中具有控制效果好、实现简单、能耗少且成本低等优点。

由于控制性能上的优异特性,脉冲控制策略不断吸引着众多学者对该领域的关注。许多关于多智能体脉冲控制的研究成果不断涌现,使得基于脉冲控制的多智能体协同问题的研究得到极大的发展,相关理论逐渐完善。针对连续时间的多智能体系统,本文将主要关注脉冲协同控制中以下两方面问题:1)脉冲策略的设计;2)多智能体脉冲协同控制的应用。

1 多智能体系统脉冲控制策略设计

脉冲效应作为一种控制策略首先用于解决单个系统的可镇定性问题^[12-13]。近年来,各种脉冲控制方案被不断提出,实现了对不同受控对象的性能要求^[14-16],例如:文献[15]中提出的脉冲反馈控制策略在提升系统收敛速度方面有着明显优势。随着多智能体系统的相关研究受到各领域研究者的关注,脉冲控制也被引入到多智能体协同控制中^[17-24]。由于脉冲的瞬时性,所设计的分布式控制协议并不要求实时获得相关邻居的信息。这就意味着在该种控制方案下,智能体间的连续通信是可以避免的,从而有效地降低了智能体对通信带宽的需求。

考虑由 N 个具有脉冲效应智能体组成的多智能体系统,其动力学方程为

$$\dot{x}_i(t) = f(x_i(t)) + g_i(x_1, \dots, x_N) + \sum_{k=1}^{\infty} h_i(x_1, \dots, x_N)\delta(t - t_k), \quad (1)$$

其中: $x_i(t) \in \mathbb{R}^n$ 表示智能体 i 的状态; $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ 是表示单个智能体动力学行为的连续可微的函数; $g: \mathbb{R}^{nN} \rightarrow \mathbb{R}^n$ 是线性/非线性函数,用于表示智能体 i 与其邻居的耦合关系; $h_i: \mathbb{R}^{nN} \rightarrow \mathbb{R}^n$ 为智能体 i 的控制项; $\{t_k\}_{k=1}^{\infty}$ 表示脉冲时刻序列,满足 $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_k < \dots, \lim_{k \rightarrow \infty} t_k = +\infty$; $\delta(\cdot)$ 为 Dirac 函数,满足

$$\delta(t) = \begin{cases} +\infty, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases}。$$

由于 Dirac 函数的积分特性,即 $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)dt = 1$, 多

智能体网络(1)的状态演化过程可以由脉冲微分方程

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = f(x_i(t)) + g_i(x_1, \dots, x_N), & t \neq t_k \\ x_i(t_k^+) - x_i(t_k) = h_i(x_1, \dots, x_N), & t = t_k \end{cases} \quad (2)$$

来刻画, 其中: $x_i(t_k^+) = \lim_{t \rightarrow t_k^+} x_i(t)$; $x_i(t_k) = \lim_{t \rightarrow t_k^-} x_i(t)$ 。不失一般性, 我们假设 $x_i(t)$ 是左连续的, 即 $x_i(t_k) = x_i(t_k^-)$ 。

在设计脉冲控制方案时, 下面两个问题是我们所关心的: 1) 如何设计控制项 $h_i(x_1, \dots, x_N)$; 2) 如何确定脉冲效应发生的时刻 (即确定序列 $\{t_k\}_{k=1}^{\infty}$)。接下来, 我们将对这两个方面进行详细讨论。

1.1 脉冲控制协议的设计

一般而言, 针对不同的模型、不同耦合方式, 所设计的脉冲控制协议有所不同。在连续的区间内, 如果系统存在与其他智能体状态耦合的情形, 即当 $t \neq t_k$ 时, $g_i(x_1, \dots, x_N) \neq 0$, 在设计脉冲控制协议时无需再利用其他智能体的状态信息。此时, 只利用自身的状态信息即可实现多智能体的协同控制, 如在文献[23]中, 脉冲项设置为 $x_i(t_k^+) - x_i(t_k) = Gx_i(t_k)$, $t = t_k$, 其中 G 可视为脉冲增益。由于智能体间的耦合在连续区间内存在, 这意味着智能体间需要实时通信, 在降低对通信带宽需求上的优势并不明显。

多数研究者在设计脉冲控制协议时倾向于采用仅在脉冲时刻利用耦合信息的设计思路, 即: 当 $t \neq t_k$ 时, $g_i(x_1, \dots, x_N) = 0$; 当 $t = t_k$ 时, $x_i(t_k^+) - x_i(t_k) = h_i(x_1, x_2, \dots, x_N)$ 。

通常情况下, 脉冲控制协议设计为

$$x_i(t^+) - x_i(t) = \gamma \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_j(t) - x_i(t)), \quad t = t_k, \quad (3)$$

其中: 脉冲增益 γ 一般为常数或常值矩阵; $[a_{ij}]_{N \times N}$ 为多智能体系统通讯拓扑的邻接矩阵。例如: 文献[17, 22]中的控制协议就采用这种设计方式。对于一些动力学特性较为特殊的多智能体系统, 脉冲控制协议的设计形式略有不同。在二阶多智能体系统的同步控制中^[18-19, 25-27], 其脉冲控制协议同时利用了智能体的状态及其变化率 (即状态的导数) 的信息, 并且二者在控制协议中所占权重可以不同。

由于在实际的应用中, 智能体状态的变化率信息是比较难观测的, 因此在文献[21, 28]所设计的脉冲控制协议中, 作者利用上次采样的状态来代替智能体状态的变化率信息。虽然这种方式相当于在脉冲控制协议中引入了时滞信息, 但却降低了获取相关信息的难度, 有利于该方法在实际环境的应用。与之类似, 文献[29-31]给出了基于时滞状态的脉冲控制协议, 即式(3)右边耦合项中的误差 $x_j(t) - x_i(t)$ 由 $x_j(t - \tau(t)) - x_i(t - \tau(t))$ 代替, 其中时变时滞 $\tau(t)$ 一般为有界函数。文献[32]则将式(3)控制协议中的常值脉冲增益推广到服从正态分布的随机情形, 即 $\gamma \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$, 并验证了其有效性。

仅在脉冲时刻利用耦合节点状态信息的脉冲控制策略不仅提升了多智能体系统达到同步的收敛速度, 而且避免了智能体间因连续通信带来资源的消耗。这使得脉冲协同控制方法在多卫星姿态控制、多机器人编队等实际应用领域有巨大潜力。

1.2 脉冲触发策略的设计

在多智能体系统脉冲协同控制中, 触发策略和控制协议都是影响多智能体网络协同控制的重要因素。施加脉冲的时刻及两个连续脉冲控制之间的间隔长短都影响着多智能体完成协同任务的性能。脉冲间隔太短意味着智能体间的通信过于频繁, 不利于节约智能体有限的通信资源。若脉冲间隔太长, 则会导致多智能体系统很难实现协同目标。因此, 为多智能体系统设计合适的触发策略显得尤为必要。在脉冲协同控制中, 决定脉冲时刻主要有基于时间触发方案和基于事件驱动策略。

1.2.1 基于时间触发的脉冲策略

在多智能体系统中, 基于时间触发机制是较早提出的。该策略是一种“被动”触发机制, 脉冲何时发生需要提前设定。脉冲时间序列一般可通过如下方式生成: $t_{k+1} = t_k + h_k$, 其中 h_k 为两次连续脉冲之间的时间间隔。如文献[33-34]中所示, 为了实现协同控制, 两次连续的脉冲间隔应该限制在某一范围内, 也即 $0 \leq t_{k+1} - t_k \leq \bar{h}$ 。另外, 学者提出平均脉冲驻留时间的概念用来描述多智能体系统在任意给定的周期内脉冲次数需要满足的条件^[35]。在

大多数文献中, 为了便于实现, h_k 通常被设置为某一固定常数, 即所谓的周期脉冲控制^[18-19, 28-31]。

由脉冲时刻产生方式可知, 所有智能体共享同一套触发机制, 即 $t_k^1 = t_k^2 = \dots = t_k^N := t_k$ 。虽然智能体的控制协议(3)是分布式的, 仅与自身及其邻居的状态相关, 但网络中所有节点都在相同时刻受到脉冲效应的影响。多数情况下, 在某一脉冲时刻只需要部分智能体受到控制即可。所有智能体同时受控的方式在控制方式的灵活性、节约多智能体系统资源等方面仍有待改进。

1.2.2 基于事件驱动的脉冲策略

与基于时间驱动的控制策略不同, 事件驱动机制是一种基于“需求”的控制方式^[36-37]。当设定的事件发生时(一般为设定的状态误差超过一定阈值时), 智能体间进行相应的信息交互, 并完成自身控制协议的更新。该方法在保证控制性能前提下, 能尽可能降低信息传输频率, 减少系统资源的消耗。

由于在提升系统鲁棒性、容错性以及适应大规模网络等方面的优势, 多智能体系统基于事件驱动的分布式脉冲控制逐渐受到众多学者的关注^[32, 38-42]。在文献[38]给出的基于事件驱动的分布式脉冲控制机制中, 脉冲时间序列由类似驱动条件

$$t_{k+1}^i = \inf\{t : t > t_k^i, f_i(t) \geq 0\} \quad (4)$$

决定, 其中:

$$f_i(t) = \|e_i(t)\|^2 - \frac{\beta}{2} \|p_i(t_k^i)\|^2 - \frac{\eta}{(t - t_0)^2};$$

$$p_i(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_j(t) - x_i(t));$$

$$e_i(t) = p_i(t_k^i) - p_i(t), \eta > 0。$$

由式(4)可知, 每个智能体独立完成对事件的监测, 并在各自驱动条件触发时完成控制协议的更新, 最终实现对多智能体系统异步、非周期的控制。因此, 结合事件驱动的分布式脉冲控制在控制的灵活性、可扩展性及提升实现协同控制的速度等方面具有较大优势, 避免了基于时间触发脉冲控制中表现出的弊端。

应该指出的是, 如同其他事件驱动机制一样, 式(4)中的智能体 i 仍然需要实时监测其邻居的状

态(或者与其邻居进行实时通信), 这必然增加监测(或通信)成本。为了降低监测(或通信)成本, 文献[32]设计了一种基于分布式动态自触发机制的脉冲控制算法, 其触发条件为

$$t_{k+1}^i = \inf\{t \in \mathbb{R} | t > t_k^i \wedge \eta_i(t) + \theta(\hat{\sigma}(\beta \| p_i(t_k^i) \|^2 + e^{-\alpha t}) - \| p_i(t_k^i) \|^2 (e^{\lambda(t-t_k^i)} - 1)) \leq 0\}, \quad (5)$$

其中: $\theta, \beta, \lambda, \alpha > 0; 0 < \hat{\sigma} < 1$ 。

$$\begin{cases} \dot{\eta}_i(t) = -\zeta \eta_i(t) + \hat{\sigma}(\beta \| p_i(t_k^i) \|^2 + e^{-\alpha t}) - \| p_i(t_k^i) \|^2 (e^{\lambda(t-t_k^i)} - 1), & \zeta > 0 \\ \eta_i(t_0) = \eta_{i0} \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

由式(5)和(6)可知, 该触发机制只依赖于当前脉冲时刻的采样信息, 并且下一个脉冲时刻是基于当前脉冲时刻的采样信息计算出来的。虽然该种触发机制在一定程度上增加了自身的计算负担, 但避免了连续通信(或监测)带来的资源消耗。

为了保证脉冲时间序列的单调性, 基于事件驱动和自触发机制的分布式脉冲控制策略都应该保证芝诺行为能够被有效排除。一般而言, 排除芝诺行为的方法有直接法和反证法^[32, 43]。直接法一般是证明任意连续两次触发时间间隔存在常值下界。但多数情况下该常值下界很难直接给出。因此, 多数学者在排除芝诺行为时倾向于用反证法: 先假设存在芝诺行为, 并在随后的证明中得出与之矛盾的结论, 从而证明芝诺行为被有效排除。目前, 在事件驱动控制框架下, 排除芝诺行为的方法较少, 还有待于进一步研究拓展。

2 多智能体系统脉冲协同控制的应用

脉冲控制由于其鲁棒性强、易操作及收敛速度快等特点而获得研究人员的关注, 并广泛应用于通信保密、多机器人编队等领域。在本节中, 我们从以下几方面介绍脉冲协同控制在实际中的应用。

1) 混沌加密。20 世纪 90 年代初, 混沌同步概念首次被提出, 并首次通过主从电子电路实现。在文献[44-45]中, 通过对响应系统施加脉冲效应实现了主从系统的混沌同步。文献[46]通过设计类似于式(3)的分布式脉冲协议实现了一类具有时滞的

Hopfield 耦合神经网络的混沌同步。由于混沌系统生成的混沌信号具有高随机、难预测的特性,因此混沌同步被广泛应用于混沌保密通信领域。文献[47-48]分别通过基于脉冲控制实现了耦合混沌系统同步,并在此基础上设计了基于脉冲采样的混沌保密算法,实现了对图像的加密解密。

2)编队控制。由于网络传输宽带的限制,学者针对连续时间的多智能体系统,利用脉冲采样建模方式,实现了多智能体系统的编队控制^[49-55]。文献[49]利用与文献[21, 28]中类似的分布式脉冲控制协议,实现了二阶多智能体系统的脉冲编队控制;文献[50]讨论了切换通信拓扑下水下多机器人脉冲编队控制问题;文献[53]则利用脉冲机动控制实现了航天器编队飞行;文献[55]提出了一种 N -脉冲反馈控制方法来修正主从航天器间的误差,实现多航天器的编队。

除了上述的应用外,脉冲控制还被广泛应用于工程和生活中的众多方面,如无线通信网络传输^[56]、脑网络疾病治疗^[57]、传染病防控^[58]等领域。

3 总结与展望

由于多智能体自身携带的资源通常是有限的,因此设计高效的控制方法实现多智能体系统的协同控制是众多学者所关注的。相对于传统的连续控制方式,脉冲协同控制策略在减少多智能系统信息传输冗余、降低系统控制成本及对抗外部干扰鲁棒性方面具有独特的优势。作为一个新兴的研究领域,多智能体系统脉冲协同控制仍处于发展阶段,尚有以下问题亟需解决:

1)如何实现基于脉冲控制的有限时间同步?目前,大多数关于具有脉冲效应的多智能体有限时间同步的成果都是依赖于混杂控制的方式实现。脉冲效应只能将多智能体系统达到有限时间同步的时刻提前或者延后,并不对实现同步的有限时间起决定作用(见文献[59-60])。在仅通过脉冲效应实现多智能体系统有限时间同步的理论分析等方面有待解决。

2)如何设计完全分布式的脉冲同步机制?这里的完全分布式是指控制协议、同步判据等都不依赖于拓扑中节点个数及通信拓扑的全局信息(一般指

拉普拉斯矩阵及其特征值信息)。这就是说,即使网络拓扑发生变化,甚至其中节点数目存在增加、减少等情形,所设计的控制律及相关参数仍然适用,无需重新设定。这无疑对智能体动力学特性、脉冲控制策略的设计等提出了更为严苛的要求。

3)目前基于脉冲效应的多智能体系统分布式最优控制相关结论还很少^[61-62],在理论分析方面还有待于深入研究。

总的来说,关于多智能体系统分布式脉冲控制的研究才刚刚起步,仍有许多关键理论和实际相关的问题尚未解决。随着信息物联网、人工智能等高新领域技术的不断突破,以及数学等基础科学的向前发展,多智能体系统分布式脉冲控制理论也将不断地得到丰富完善。

参考文献:

- [1] REYNOLDS C W. Flocks, herds and schools; a distributed behavioral model[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4):25-34.
- [2] VICSEK T, CZIRÓK A, BEN-JACOB E, et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles[J]. Physical Review Letters, 1995, 75(6):1226.
- [3] JADBABAIE A, LIN J, MORSE A S. Coordination of groups of mobile autonomous 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] REN W, BEARD R W. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(5):655-661.
- [6] 王晓丽,洪奕光.多智能体系统分布式控制的研究新进展[J].复杂系统与复杂性科学,2010,7(2/3):70-81.
- [7] LEWIS F L, ZHANG H W, HENGSTER-MOVRIC K, et al. Cooperative control of multi-agent systems: optimal and adaptive design approaches[M]. London: Springer-Verlag, 2014.
- [8] ZHANG J H, FENG G. Event-driven observer-based output feedback control for linear systems[J]. Automatica,

- 2014, 50(7):1852–1859.
- [9] ZHAN J Y, LI X. Flocking of multi-agent systems via model predictive control based on position-only measurements[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1):377–385.
- [10] KEMIH K, KEMIHA A, GHANES M. Chaotic attitude control of satellite using impulsive control[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2009, 42(2):735–744.
- [11] LI X D, SONG S J. Research on synchronization of chaotic delayed neural networks with stochastic perturbation using impulsive control method[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2014, 19(10):3892–3900.
- [12] YANG T. Impulsive control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(5):1081–1083.
- [13] LI C, FENG G, LIAO X. Stabilization of nonlinear systems via periodically intermittent control[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II:Express Briefs, 2007, 54(11):1019–1023.
- [14] GUAN Z H, CHEN G, UETA T. On impulsive control of a periodically forced chaotic pendulum system[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(9):1724–1727.
- [15] MEDINA E A, LAWRENCE D A. State feedback stabilization of linear impulsive systems[J]. Automatica, 2009, 45(6):1476–1480.
- [16] TAN X G, CAO J D, LI X D. Event-based impulsive control for nonlinear systems and its application to synchronization of Chua's circuit[J]. IMA Journal of Mathematical Control and Information, 2018, 33:1–23.
- [17] GUAN Z H, LIU Z W, FENG G, et al. Synchronization of complex dynamical networks with time-varying delays via impulsive distributed control[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I:Regular Papers, 2010, 57(8):2182–2195.
- [18] GUAN Z H, LIU Z W, FENG G, et al. Impulsive consensus algorithms for second-order multi-agent networks with sampled information[J]. Automatica, 2012, 48(7):1397–1404.
- [19] GE M F, GUAN Z H, HU B, et al. Distributed controller-estimator for target tracking of networked robotic systems under sampled interaction[J]. Automatica, 2016, 69:410–417.
- [20] LU J Q, HO D W C, CAO J D. A unified synchronization criterion for impulsive dynamical networks[J]. Automatica, 2010, 46(7):1215–1221.
- [21] LIU Z W, GUAN Z H, SHEN X M, et al. Consensus of multi-agent networks with aperiodic sampled communication via impulsive algorithms using position-only measurements[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(10):2639–2643.
- [22] HE W L, CHEN G R, HAN Q L, et al. Network-based leader-following consensus of nonlinear multi-agent systems via distributed impulsive control[J]. Information Sciences, 2017, 380:145–158.
- [23] XIONG W J, HO D W C, CAO J D. Impulsive consensus of multi-agent directed networks with nonlinear perturbations[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2012, 22(14):1571–1582.
- [24] LI C J, YU X H, LIU Z W, et al. Asynchronous impulsive containment control in switched multi-agent systems[J]. Information Sciences, 2016, 370/371:667–679.
- [25] ZHANG Q, CHEN S H, YU C C. Impulsive consensus problem of second-order multi-agent systems with switching topologies[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2012, 17(1):9–16.
- [26] LIU J, ZHOU J. Distributed impulsive containment control for second-order multi-agent systems with multiple leaders[J]. Journal of Vibration and Control, 2016, 22(10):2458–2470.
- [27] LIU J, ZHOU J. Distributed impulsive group consensus in second-order multi-agent systems under directed topology[J]. International Journal of Control, 2015, 88(5):910–919.
- [28] WANG Y W, YI J W. Consensus in second-order multi-agent systems via impulsive control using position-only information with heterogeneous delays[J]. IET Control Theory and Applications, 2015, 9(3):336–345.
- [29] WU Q J, XIANG L, ZHOU J. Impulsive consensus seeking in delayed networks of multi-agents[C]//Proceedings of the First International Conference in Swarm Intelligence, June 12–15, 2010, Beijing, China. Berlin:Springer-Verlag, 2010:691–698.
- [30] WU Q J, ZHOU J, XIANG L. Impulsive consensus seeking in directed networks of multi-agent systems with communication time delays[J]. International Journal of Systems Science, 2012, 43(8):1479–1491.
- [31] ZHANG H, ZHOU J. Distributed impulsive consensus for second-order multi-agent systems with input delays[J]. IET

- Control Theory and Applications, 2013, 7(16):1978–1983.
- [32] TAN X G, CAO J D, RUTKOWSKI L, et al. Distributed dynamic self-triggered impulsive control for consensus networks: the case of impulse gain with normal distribution[J]. IEEE Transactions on Cybernetics: Early Access, 2019:1–11. DOI:10.1109/TCYB. 2019. 2924258.
- [33] JI Y, LIU X M. Unified synchronization criteria for hybrid switching-impulsive dynamical networks[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2015, 34(5):1499–1517.
- [34] ZHANG W B, TANG Y, WU X T, et al. Synchronization of nonlinear dynamical networks with heterogeneous impulses[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2014, 61(4):1220–1228.
- [35] TANG Y, XING X, KARIMI H R, et al. Tracking control of networked multi-agent systems under new characterizations of impulses and its applications in robotic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2):1299–1307.
- [36] 许文盈, 曹进德. 基于事件驱动机制的多智能体系统协调控制研究综述[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(4):395–400.
- [37] XU W Y, HO D W C. Clustered event-triggered consensus analysis: an impulsive framework[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11):7133–7143.
- [38] TAN X G, CAO J D, LI X D. Consensus of leader-following multiagent systems: a distributed event-triggered impulsive control strategy[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(3):792–801.
- [39] HAN Y Y, LI C D, ZENG Z G. Asynchronous event-based sampling data for impulsive protocol on consensus of non-linear multi-agent systems[J]. Neural Networks, 2019, 115:90–99.
- [40] XU Z Q, LI C D, HAN Y Y. Impulsive consensus of nonlinear multi-agent systems via edge event-triggered control [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2019:1–10.
- [41] ZHU W, ZHOU Q H, LI Q D. Asynchronous consensus of linear multi-agent systems with impulses effect[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2020, 82:105044.
- [42] YAO X Y, DING H F, GE M F, et al. Event-triggered synchronization control of networked Euler-Lagrange systems without requiring relative velocity information[J]. Information Sciences, 2020, 508:183–199.
- [43] WEN G H, CHEN M Z Q, YU X H. Event-triggered master-slave synchronization with sampled-data communication[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2016, 63(3):304–308.
- [44] WU X F, NIE Z. Complex projective synchronization in drive-response stochastic complex networks by impulsive pinning control[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2014, 2014:1–8.
- [45] FENG G Z, CAO J D. Master-slave synchronization of chaotic systems with a modified impulsive controller[J]. Advances in Difference Equations, 2013, 2013:24.
- [46] SUN W, AUSTIN F, LÜ J, et al. Synchronization of impulsively coupled complex systems with delay[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2011, 21(3):033123.
- [47] KADIR A, AILI M, SATTAR M. Color image encryption scheme using coupled hyper chaotic system with multiple impulse injections[J]. Optik, 2017, 129:231–238.
- [48] HU B, GUAN Z H, XIONG N X, et al. Intelligent impulsive synchronization of nonlinear interconnected neural networks for image protection[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(8):3775–3787.
- [49] WANG Y W, LIU M, LIU Z W, et al. Formation tracking of the second-order multi-agent systems using position-only information via impulsive control with input delays [J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 246:572–585.
- [50] HU Z L, MA C, ZHANG L X, et al. Formation control of impulsive networked autonomous underwater vehicles under fixed and switching topologies[J]. Neurocomputing, 2015, 147:291–298.
- [51] QI R, XU S J, XU M. Impulsive control for formation flight about libration points[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 35(2):484–496.
- [52] GAIAS G, D'AMICO S. Impulsive maneuvers for formation reconfiguration using relative orbital elements[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2015, 38(6):1036–1049.
- [53] PERNICKA H J, CARLSON B A, BALAKRISHNAN S N. Spacecraft formation flight about libration points using impulsive maneuvering[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(5):1122–1130.
- [54] KIM D Y, WOO B, PARK S Y, et al. Hybrid optimization for multiple-impulse reconfiguration trajectories of satellite

- formation flying[J]. *Advances in Space Research*, 2009, 44(11):1257-1269.
- [55] ANDERSON P V, SCHAUB H. *N*-impulse formation flying feedback control using nonsingular element description [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, 37(2):540-548.
- [56] MERZ R, BOUDEC J Y, VIJAYAKUMARAN S. Effect on network performance of common versus private acquisition sequences for impulse radio UWB networks[C]//*Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, September 24-27, 2006, Waltham, MA, USA. New York:IEEE Xplore, 2006:375-380.
- [57] WEINTRAUB D, KOESTER J, POTENZA M N, et al. Impulse control disorders in Parkinson disease:a cross-sectional study of 3090 patients[J]. *Archives of Neurology*, 2010, 67(5):589-595.
- [58] GAO S J, TENG Z D, XIE D H. The effects of pulse vaccination on SEIR model with two time delays[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2008, 201(1/2):282-292.
- [59] YANG X S, LAM J, HO D W C, et al. Fixed-time synchronization of complex networks with impulsive effects via nonchattering control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(11):5511-5521.
- [60] LI X D, HO D W C, CAO J D. Finite-time stability and settling-time estimation of nonlinear impulsive systems[J]. *Automatica*, 2019, 99:361-368.
- [61] GUAN Z H, HU B, CHI M, et al. Guaranteed performance consensus in second-order multi-agent systems with hybrid impulsive control[J]. *Automatica*, 2014, 50(9):2415-2418.
- [62] CHEN L J, SUN J T. Distributed optimal control and L_2 gain performance for the multi-agent system with impulsive effects[J]. *Systems and Control Letters*, 2018, 113:65-70.

(责任编辑:仇慧)

作者简介:



曹进德,《南通大学学报(自然科学版)》名誉主编,东南大学首席教授、校学术委员会副主任、校务委员会委员、理学部主任、数学学院院长、江苏省工业与应用数学学会理事长、江苏省高校数学学科联盟理事长、江苏省运筹学会副理事长、江苏省网络群体智能重点实验室主任、国家自然科学基金重点项目负责人、江苏省首届十佳研究生导师、江苏省高校创先争优先进个人、江苏省高校“青蓝工程”科技创新团队负责人、享受国务院特殊津贴。2019年当选国际系统与控制科学院院士并荣获国际Obada奖,2018年当选欧洲科学与艺术院院士,2017年当选巴基斯坦科学院院士并荣获首届全国创新争先奖,2016年当选为欧洲科学院院士,2015年当选IEEE Fellow。连续入选Thomson Reuters/Clarivate Analytics全球高被引用科学家(覆盖工程学、计算机科学和数学3个领域)。

曹进德院士长期从事复杂网络与复杂系统、神经动力学与优化、多智能体系统研究,先后主持国家自然科学基金8项,教育部博士点基金3项,项目成果作为国家自然科学基金项目成果巡礼写入国家自然科学基金委2009年年度报告。已在SIAM J.、IEEE Trans.、Nonlinearity等刊物发表论文数篇,ESI高被引论文79篇,H-指数为97。2006—2015年间6篇论文入选中国百篇最具影响优秀国际学术论文。先后担任IEEE Trans. Neural Networks、IEEE Trans. Cybernetics和Neural Networks等16种SCI权威学术期刊的编委。