



基于群体智能的自组织运动控制综述

张 昭, 张天奇

(南京航空航天大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京 211106)

摘 要 文中阐述了群体、群集、群体智能、群体控制以及群体系统等相关概念, 综述了基于群体智能的自组织运动控制的相关研究工作和研究内容, 包括群体控制系统模型的发展历程、群体控制中的各种群集控制策略和控制算法、群体控制系统的系统行为表现以及基于群体控制扩展的各类智能优化算法。最后文中提出了群体自组织运动控制研究的发展趋势。

关键词 群体; 群集; 群体控制; 群体智能; 协同控制; 群体优化算法

中图分类号 TP13; TP18 **文献标识码** A **文章编号** 1007-7820(2019)11-052-06

doi: 10.16180/j.cnki.issn1007-7820.2019.11.011

A Review of Self-Organizing Motion Control Based on Swarm Intelligence

ZHANG Zhao, ZHANG Tianqi

(College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract This paper firstly expounded the related concepts such as swarm, collective, swarm intelligence, swarm control and swarm system, and then reviewed the related research works and contents of self-organized motion control based on swarm intelligence, including the swarm control system model, the various collective control strategies and control algorithms in the swarm control, the system behaviors based on the swarm intelligence and the various intelligent optimization algorithms based on the swarm control extension. Finally, the future development trend of swarm self-organized motion control research was pointed out.

Keywords swarm; collective; swarm control; swarm intelligence; cooperative control; colony optimization algorithm

上世纪七八十年代, 自然界中生物群体的自组织运动现象受到国内外学者的关注, 国内外学者纷纷研究群体内个体间的信息交互、高效的觅食行为以及较为省时省力的运动轨迹等群体特征。生物群体的这种在种群演化过程中由环境选择遗传下来的个体之间通过交流协作达成群体行为一致性的能力, 形成了与简单个体特性截然不同的群体属性甚至群体智能。随着数学、统计学以及计算机学科的发展, 逐渐揭示了群体自组织运动现象以及群体智能产生的奥秘^[1], 国内外学者将这种群体智能的思想应用于协同控制等领域推

动了群体机器人以及群体控制系统的发展。

本文首先给出群体智能以及群集控制的相关概念, 然后分析国内外基于群体智能的自组织运动控制研究现状, 最后给出了群体自主知运动控制研究的未来发展趋势。

1 概念介绍

从生态学上讲, 所谓群体是指为了繁衍生息而集体存在于某一地区的同一种生物的集合。群体是一种系统的表现形式, 该系统由相对独立的多个个体组成, 通过相互之间的近距离直接或间接的信息交流来形成某种统一的群体行为以及执行某种群体任务。通过个体间的信息交流和协同合作, 使得由行为简单且能力有限的个体组成的群体涌现出个体所不具备的复杂的群体特征, 如协调飞行的鸟群、共同抵御外部危险的鱼群、蚁群合作寻找食物、蜂群之间的觅食信息交互以及构建复杂度很高的蜂窝等。鸟群和鱼群通过局部感知的间接信息交流最终实现一致性的群体运动行为。由于没有集中控制, 群体的结构更偏向于松散, 使得个体

收稿日期: 2018-12-03

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX18_0308)

Postgraduate Research & Practice Innovation Programe of Jiangsu Province (KYCX18_0308)

作者简介: 张昭 (1994-), 男, 硕士研究生。研究方向: 计算机网络, 无人系统。张天奇 (1995-), 男, 硕士研究生。研究方向: 计算机网络, 网络虚拟化。

具有极大的灵活性可以根据实际情况自行决定运动轨迹从而达到鸟群飞跃避障物、鱼群躲避捕食者甚至围猎食物等行为。鸟群和鱼群的这些行为是群体自组织运动的典型表现。蜂群和蚁群等之间的信息交流则是利用信息素或具有信息载体能力的舞蹈等外部环境载体,使得行为规则简单且能力有限的分散个体能更快地发现食物,优化了整个群体觅食的路径或时间。从这些群体中产生的复杂行为远远超过个人能力的简单叠加,并显现出智能特性。

群集即群体聚集,描述聚集群体的系统行为和功能,又被称为群集行为(Collective Behavior)^[2]。根据运动特征在群体中表现的不同,自然界中的群集行为又可以分为具有协同合作特征的群体运动如行进(Marching)、结群(Flocking)、群游(Schooling)或放牧(Herding)^[3]以及具有较好团聚效应的集群(Swarms、Messing或Crowding)^[4]。

群体智能受生物界群体中简单生物的相互合作涌现出高级群体行为的现象启发而产生。生物的群集智能具有以下鲜明特点^[5]:(1)控制方式多为分布式控制而非集中式控制;(2)个人间沟通是间接沟通,而不是直接沟通;(3)个体能力有限,行为简单;(4)群体自发形成,系统表现出自组织性。群体的智能性体现在一群简单个体能够通过协作、竞争、交互与学习等方式在缺少全局信息和整体模型的情况下表现出高级和复杂的功能。通过相互协作增强了个体的抗干扰能力,从而提高群体抵御外部打击的潜能,增强整个群体的稳定性,提高整个系统的效能。

群体控制^[6]主要是研究无人系统群体中个体的控制策略,包括研究在群体聚集过程中个体之间分离与聚集的控制、个体间的信息交流机制、整个系统的稳定性与一致性、群体的智能化演变及群体行为等方面。

通常基于群体智能思想对群体系统中的个体施加群集控制策略从而使得系统整体能够表现出个体所不具备的性质^[7-9]。一般意义上的群体系统通常具有以下特征:分布式控制、个体具有自主决策能力、使用局部通信机制。相对于其他系统,群体系统具有更好的自适应性、冗余性、鲁棒性以及可扩展性,但也有不可控、不可预测、不可知以及无最优解等缺点。典型的群体智能系统由一些简单个体组成,通常个体与个体之间以及个体和环境之间会产生局部的信息交流,且个体行为遵循一些特定规则。系统中没有集中控制,但基于局部规则互动的多个个体通常能够表现出智能群体行为。因此,可以借鉴群体智能的涌现现象来实现基于群体智能的无人系统协同控制。在多智能体系

统中采用分布式控制通过直接或间接通信的方式使得整个无人系统具有良好的鲁棒性,一定的自组织性以及开放性。分布式控制相对于集中式控制在效率和鲁棒性方面更具优势,尤其是在局部失效和故障迟钝的场景中。因此,群体智能理论对无人系统的协同控制具有极高的工程应用价值^[10]。

2 基于群体智能的控制研究现状

群体控制的研究通常先根据观察到的群集行为抽象出行为规则模型,然后再利用计算机设计基于模型实现得到的算法,对自然界的群集行为进行仿真以控制群集行为,最终设计无人机器人原型系统来实现群体自组织运动的工程应用。目前,基于群体智能的自组织运动控制的研究内容可以分为系统模型,控制策略,系统行为以及智能优化算法。

2.1 系统模型

1986年Reynolds首次提出了群体运动模型即Boids模型^[11],他用3个简单的启发式规则阐述了现实中鸟群飞行时的群体行为。个体遵循以下的规则通过间接通信和分布式控制就能使鸟群在整体上表现出群体性:(1)聚合,试图与邻居保持联系;(2)分离,与邻居实体保持距离;(3)对齐,试图保持与邻居相同的速度。之后,Vicsek、Couzin以及Cucker和Smale等不断完善和发展了Reynolds的群体运动模型。在Vicsek模型中,个体运动速度大小恒定,而个体附件区域内所有个体运动方向的平均值即为下一步个体的运动方向^[12]。Couzin等^[13]则是将个体感知范围分割为相互独立的吸引区、方向匹配区和排斥区与Reynolds提出的三原则——照应,模型中指出改变不同感知单元的范围群体会表现出不一样的形态。Cucker和Smale^[14]从个体状态互相影响的角度,提出了一种新的群体运动模型,在该模型中用邻接矩阵来说明个体状态的互相影响。Cavagna等^[15]尝试通过提出更一般性的理论来整合以上模型。Olfati-Saber^[16]提出了一个理论框架,通过使用虚拟势场力和图论对Reynolds3条规则完成建模来设计和分析分布式群集算法。文献[17]给出了群体系统的一般框架:粒子(Praticle; $P_1 \cdots P_N$)代表群体中的成员,动态代理(Dynamic Agent; $A_1 \cdots A_N$)的定义为观察环境,然后根据观察到的环境和内部状态再反作用于环境的实体。移动代理(Moving Agent)由动态代理和粒子组成;环境(Environment)包含动态代理之外的所有内容;通过间接或直接的方式通信(Communication)和交互(Interaction)对于提高群体的性能都是十分必要的;加工(Process)则意味着移动代

理感知和控制一切事物的过程。与之前集中于个体物理行为的群体智能研究不同,在动态多智能体系统中采用复杂的决策的研究。该框架根据决策能力将整个系统分为物理部分和个体行为部分两大类,通过集成这两个领域来构建和分析更复杂的群体系统。文献[18]中将群体系统分为3个部分:控制层、移动层、指导层。其中,控制层实现具有分布式计算的级联闭环架构,控制器全局渐近稳定,任何可能的初始条件位置和姿态误差转向零渐近。移动层依赖于各种传感器和估计过滤等来获取系统状态信息。指导层定义四旋翼飞行器群体的协作协议。不同于文献[17]给出的群体系统的一般框架,文献[18]从整个系统的角度将系统从上到下进行分层,是对群体系统框架的另一个角度的描述。

2.2 控制策略

Reynolds 用3个简单的启发式规则阐述了现实中鸟群飞行时的群体行为。Reynolds 提出个体只需要遵循简单的规则通过间接通信和分布式控制就能使鸟群在整体上表现出群体性。Cucker 和 Smale^[14]对个体间的相互作用使用欧几里得距离以及视觉距离来描述,并将距离大小标识作用强度,从个体状态互相影响的角度提出了新的模型。其中,每个个体通过计算其速度和其他个体的差异并取其加权平均值来修正自身的状态,最终使得所有个体的速度趋于一致。Cavagna 等^[15]基于 Vicsek 模型提出惯性自旋模型。在该模型中,Cavagna 将群体中的个体视为流体场中的组成成分,场中同时存在自旋波和密度波。在移动过程中,群体彼此间保持相对稳定的距离,当任何一个个体位置变化后,都会引起其邻居位置的变化,从而导致群体密度的变化,产生一种从内向外的密度起伏,该波动可以视为一种通信手段。因此当一个个体速度发生变化时,其邻居个体将随该个体速度变化而产生变化,类似于磁性材料中的自旋波。Olfati - Saber^[16]通过使用虚拟势场力和图论对 Reynolds 3 条规则建模,提出了一个设计和分析分布式群集控制算法的理论框架。在该模型中,Olfati - Saber 分别引入 α 智能体、 β 智能体和 γ 智能体,分别代表蜂拥行为过程中的个体,障碍物和虚拟领导者。Olfati - Saber 给出在自由空间中的蜂拥控制算法,并证明在存在虚拟领导者时蜂拥控制的稳定性,解决了群体分裂的问题,同时为在障碍物空间中的蜂拥提供了一种理想解决办法。文献[19]通过对 Reynolds 模型、Couzin 模型以及 Olfati - saber 算法的追溯,根据文献[16]中提出的理论框架,结合多无人机环境下实际工程中的需要改进了 Olfati - asber 中具有

虚拟领导者的蜂拥算法,通过添加对虚拟领导控制输入的反馈项,使各无人机节点可以准确追踪上变速的虚拟领导者,证明了算法控制下的系统是李雅普诺夫稳定的,并通过实验对比揭示改进算法的有效性。此外,文献[20]将 Q - Learning 用于小型固定翼 UAV 群集,提出了 Q 群集算法来解决强化学习问题,但是加速其学习过程还有很长的路要走。

2.3 系统行为表现

Saffiotti^[21]等通过借鉴群体自组织行为过程中间接通信机制即 Stigmergy 思想实现人机互动。Stigmergy 思想也被用于机器人搬运物品^[22]以及机器人的点到点的移动^[23]等。单素素^[24]借鉴群体自组织移动中体现的协同合作的特点,研究了水下仿生机器鱼的队形形成、保持和避障等问题。文献[25]通过引入 Stigmergy 思想实现群体内部的协同控制。Ting Lan^[26]等采用基于行为的建模方式将个体的行为分为随机游走、障碍避免、物体拾取和物体放下等来界定在不同情景下个体应采取的行为。在 Ting Lan 等的工作中,个体在仿真时并不是一个质点,而是具备了一定大小且受转向角度约束的趋于实际的机器人。Ouarda Zedadra 等^[27]通过使用可改变的颜色来标识食物源的食物数量和距离来实现个体之间的间接通信,从而完成复杂的觅食任务。Ouarda Zedadra 通过采取有穷状态机的方式给出在不同情境下,个体所应采取的行为,如在家、寻找食物、选择下一步、拾取食物、擦除路径、着色、返回等等。2011 年,Hauert 等^[28]结合协同控制和迁徙(Migration)概念,促成了小型集群固定翼无人机自主飞行控制。2014 年,Vasarhelyi 等^[29]采用了群集行为的模型,利用了 GPS 和 XBee 模块提供的信息,首次在室外完成分布式无人机的群集自主飞行。2015 年,Saska^[30]完成了在预定轨迹上无人机群体的探测任务,无人机之间仅依靠视觉传感器进行相对定位,不存在任何形式的通信。Tang Y^[31]等通过使用热成像等视觉辅助的方式在无 GPS 和无通信的情况下实现无人机群体运动。文献[32]通过采用分布式事件触发机制,通过周期性地对传感器数据采样来实现多智能体的群集性,该研究致力于节省有限的通信带宽。文献^[33]在多智能体群集行为的研究基础上提出了变异策略的概念,并探索了突变对系统性能的影响。

2.4 智能优化算法

截止到目前为止,众所周知的人工群体有浮游植物、蚁群和粒子群等。Dorigo M^[34]等借鉴蚂蚁在移动轨迹上留下信息素从而优化觅食移动轨迹的群体现象提出蚁群算法用来解决诸如旅行商问题等 NP 难问题。

1995 年 Kennedy J^[2] 和 Eberhart R C^[35] 等提出了粒子群算法,其基本思想是粒子在搜索空间中总是被局部最有吸引力的点吸引而最终演化得到全局的最优解。类似的智能优化算法有蜂群优化算法(Bee colony Optimization Algorithm, BOA)^[36], 鱼群优化算法(Fish school Optimization Algorithm, FOC)^[37],狼群优化算法(Wolf pack Optimization Algorithm, WOA)^[38]等。Lai N 等^[39]提出了一种基于迁移机制的混合粒子群优化算法,通过引入迁移机制可以在算法进入局部最优状态后及时跳出。此外,在迁移机制中使用拓扑迁移,可以提高算法的搜索能力。郭乐欣^[40]等结合强化学习和群体智能理论提出了基于群体智能的多步回溯强化学习算法使得在保证较好全局寻优的能力同时,算法收敛速度也得到了极大的提高。Hein D 等^[41]提出了模糊粒子群强化学习(FPSRL)方法,该方法可以仅通过在模拟模型上训练参数来构造模糊 RL 策略,解决了增强学习中禁止在线学习的问题,系统可以相对容易的根据先前生成的默认策略动态的转换样本进行建模。Podgorelec V 等^[42]通过群体智能来优化深度学习神经网络的参数设置并将其应用于钓鱼网站的检测中,提高了检测的准确度和检测效率。Rjoub G 等^[43]在面对 NP 完全的云环境中的调度问题时,结合了群体智能优化算法和机器学习通过多准则决策来优化系统性能,指导云选择调度技术从而最小化给定任务集的完工时间,提高了负载均衡调度的性能。Yang Q 等^[44]提出了基于水平的学习群优化器(LLSO)来解决大规模优化问题。Yang Q 等引入了基于水平的学习策略,该策略根据其适合度值将粒子分成多个级别,并以不同的级别处理不同级别的粒子。然后,设计一种新的样本选择策略,从当前群中两个不同的更高级别中随机选择两个主要粒子,以指导粒子的学习。

3 未来发展趋势

尽管对基于群体智能的自组织运动控制的研究已有了诸多成果,但是仍然有一些问题需要继续研究。以下总结了一些研究方向和发展趋势:

(1) 基础理论模型的发展。群体自组织运动系统模型自 2007 年以来发展近乎停滞,现有工作基本全是基于 Reynolds 模型。能否结合当前最新发现的相关自然界群体运动机制,建立更为高效和准确的群集运动模型和智能决策模型将是群体自组织移动控制的突破点;

(2) 异构群体的自组织运动控制。当前工作多为同类智能体之间的协同控制研究。在实际生活中往往

存在多种不同功能的智能体之间的相互配合,因而研究异构群体行为模型是十分重要的;

(3) 学习、迁移等机制与群体运动模型的融合。自然界中生物客观存在的学习和迁移能力使得生物群体能表现出更高的智能性从而涌现出更加复杂的群体行为。通过引入学习与迁移机制,可以增强个体的智能性,提高群体的自适应性,丰富群体行为的表达;

(4) 大规模群体自组织运动控制研究。在以往的工作中,群体的规模通常维持在 100 以内,未来的机器人群体有可能提升到上千台的协同合作。现有理论在上千台时是否仍能保持较好的群体表现,以及群体自组织控制模型在大规模场景中是否有新的变化都是值得研究的内容;

(5) 基于群体智能自组织运动控制理论的实际应用。多智能体系统是未来无人系统发展的方向,它能够用较低的消耗和高效的性能执行单无人机器人难以执行的任务。随着科技的发展,基于群体智能自组织运动控制理论将会有广阔的民用以及军用的应用场景。

4 结束语

本文介绍了群体智能的研究现状,并对群体智能相关概念进行了阐述。群体智能分布式的本质特征对于大规模集群的自组织控制具有重要意义,其简单的控制规则更适合未来无人系统集群化的趋势。通过以上对群体智能相关研究的介绍,可以看出群体智能在自组织控制方面仍具有广阔的前景,并且具有较大的发展和突破空间。

参考文献

- [1] 黄天云. 群体机器人系统的群集自组织运动控制[D]. 大连:大连理工大学,2015.
Huang Tianyun. Control for self-organized collective motions of swarm robotic systems[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [2] Parrish J K, Edelstein-Keshet L. Complexity, pattern, and evolutionary trade-offs in animal aggregation[J]. Science, 1999, 284(5411): 99-101.
- [3] Reynolds C W. Flocks, Herds, and Schools: a distributed behavioral model[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4): 25-34.
- [4] Winston M L. The biology of the honeybee[J]. Quarterly Review of Biology, 1987, 27(2): 239-243.
- [5] Kennedy J. Swarm intelligence[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 2001.

- [6] 程代展,陈翰馥. 从群集到社会行为控制[J]. 科技导报, 2004,22(8):4-7.
Cheng Daizhan, Chen Hanfu. From swarm to social behavior control[J]. Science & Technology Review, 2004, 22(8):4-7.
- [7] Simon Garnier, Jacques Gautrais, Guy Theraulaz. The biological principles of swarm intelligence[J]. Swarm Intelligence, 2007,1(1):3-31.
- [8] Calvin W H. The emergence of intelligence[J]. Scientific American, 1994, 271(4):100-7.
- [9] Dorigo M, Birattari M, Blum C, et al. Ant colony optimization and swarm intelligence[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2004, 49(8):767-771.
- [10] 肖人彬. 群集智能特性分析及其对复杂系统研究的意义[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2006, 3(3):10-19.
Xiao Renbin. Analysis of characteristics of swarm intelligence and its significance to the research of complex system[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2006, 3(3):10-19.
- [11] Reynolds C W. Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model[C]. New York: ACM SIGRTAPH Compute Graphics, 1987, 21(4):25-34.
- [12] Vicsek T, Czirok A, Ben-Jacob E, et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles[J]. Physical Review Letters, 2006, 75(6):1226-1237.
- [13] Couzin I D, Krause J, James R, et al. Collective memory and spatial sorting in animal groups[J]. Journal of Theoretical Biology, 2002, 218(1):1-11.
- [14] Cucker F, Smale S. Emergent behavior in flocks[J]. IEEE Trans Autom Control, 2007, 52(5):852-863.
- [15] Cavagna A, Giardina I, Grigera T S, et al. Silent flocks: constraints on signal propagation across biological groups[J]. Physical Review Letters, 2015, 114(21):218-221.
- [16] Olfati Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(3):401-420.
- [17] Schutter B D, Babuska R, Vanast J. A general modeling framework for swarms[C]. Hong Kong: Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2008.
- [18] Furci M, Casadei G, Naldi R. An open-source architecture for control and coordination of a swarm of micro-quadrotors[C]. Denver: International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2015.
- [19] 曹玉琪. 多无人机安全通信距离的协同控制策略研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.
Cao Yuqi. Research of cooperative control based on multiple UAVs secure communication distance[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016.
- [20] Hung Shaoming, Givigi S N. A Q-learning approach to flocking with UAVs in a stochastic environment[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 47(1):186-197.
- [21] Khaliq A A, Pecora F, Saffiotti A. Children playing with robots using stigmergy on a smart floor[C]. Toulouse: Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced and Trusted Computing, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People, and Smart World Congress, 2017.
- [22] Khaliq A A, Saffiotti A. Stigmergy at work: Planning and navigation for a service robot on an RFID floor[C]. Seattle: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015.
- [23] Khaliq A A, Pecora F, Saffiotti A. Point-to-point safe navigation of a mobile robot using stigmergy and RFID technology[C]. Daejeon: International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2016.
- [24] 单素素. 仿生机器鱼队形控制的仿真研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2014.
Shan Susu. Simulation research on formation control of bionic robot fish[D]. Qingdao: Qingdao University, 2014.
- [25] Lan Ting, Liu Shirong, Yang S X. Collective cooperation inspired by stigmergy strategy[C]. Dalian: Intelligent Control and Automation, 2006.
- [26] Zedadra O, Seridi H, Jouandeau N, et al. Design and analysis of cooperative and non cooperative stigmergy-based models for foraging[C]. Calabria: IEEE, International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, 2015.
- [27] Hauert S, Leven S, Varga M, et al. Reynolds flocking in reality with fixed-wing robots: Communication range vs. maximum turning rate[C]. San Francisco: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems, 2011.
- [28] Vasarhelyi G, Viragh C, Somorjai G, et al. Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots[C]. Chicago: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014.
- [29] Virágh, Csaba, Vásárhelyi, et al. Flocking algorithm for autonomous flying robots[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2014, 9(2):025012.
- [30] Saska M. MAV-swarms: unmanned aerial vehicles stabilized along a given path using onboard relative localization[C]. Denver: Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2015.
- [31] Tang Yazhe, Hu Yuchao, Cui Jingqiang, et al. Vision-aided Multi-UAV autonomous flocking in GPS-denied environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1):616-626.
- [32] Fang Chaohai, Zhang Yijun, Huang Shen. Distributed event-

- triggered flocking control of nonlinear multi-agent systems [C]. Jinan: Chinese Automation Congress, 2017.
- [33] Dai Yating, Cheng Lei, Yu Qiuyue, et al. Analysis and control of multi-agent flocking system containing mutations [C]. Kunming: 9th International Conference on Modelling, Identification and Control, 2017.
- [34] Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G. Swarm intelligence: from natural to artificial systems [M]. Oxford: Oxford University Press, Inc., 1999.
- [35] Kennedy J. Particle swarm optimization [C]. Perth: ICNN – International Conference on Neural Networks, 2002.
- [36] Lethbridge M R, Strauss J C. A novel dispersal algorithm in individual-based, spatially-explicit population viability analysis: A new role for genetic measures in model testing [J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 68(3): 83–97.
- [37] Yao Nian L, Ying Hong L, Bing Bing Z, et al. Artificial fish school algorithm for optimal power flow problems [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering & Energy, 2006, 25(4): 30–34.
- [38] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69(3): 46–61.
- [39] Lai N, Han F. A hybrid particle swarm optimization algorithm based on migration mechanism [C]. Dalian: International Conference on Intelligent Science & Big Data Engineering, 2017.
- [40] 郭乐欣, 张孝顺, 谭敏, 等. 基于群智能强化学习的电网最优碳-能复合流算法 [J]. 电测与仪表, 2015, 54(1): 1–7.
- Guo Lexing, Zhang Xiaoshun, Tan Min, et al. Multi-objective optimal carbon-energy combined-flow algorithm of power grid based on swarm intelligence reinforcement learning [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 54(1): 1–7.
- [41] Hein D, Hentschel A, Runkler T, et al. Particle swarm optimization for generating fuzzy reinforcement learning policies [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2017, 65(1): 87–98.
- [42] Vrbanić, Grega, Fister I, et al. Swarm intelligence approaches for parameter setting of deep learning neural network: case study on phishing websites classification [C]. New York: Proceedings of the 8th International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics, 2018.
- [43] Rjoub G, Bentahar J. Cloud task scheduling based on swarm intelligence and machine learning [C]. Prague: IEEE International Conference on Future Internet of Things & Cloud, 2017.
- [44] Yang Qiang, Chen Weineng, Li Yun, et al. A level-based learning swarm optimizer for large scale optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2018, 22(4): 578–594.
- (上接第 46 页)
- [13] 杜慧琦, 刘玥, 刘博, 等. IEEE1588v2 时钟同步技术在战术信息系统中的应用 [J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(11): 125–129.
- Du Huiqi, Liu Yue, Liu Bo, et al. Application of IEEE1588v2 clock synchronization technology in tactical information system [J]. Computer Applications and Software, 2017, 34(11): 125–129.
- [14] Yin H, Fu P, Qiao J, et al. The implementation of IEEE 1588 clock synchronization protocol based on FPGA [C]. Houston: IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I²MTC), 2018.
- [15] Esquembri S, Sanz D, Barrera E, et al. Hardware timestamping for an image acquisition system based on FlexRIO and IEEE 1588 v2 standard [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 63(1): 228–235.
- [16] 李文辉, 简献忠, 肖儿良. 变电站实时监控系统中的千兆以太网传输设计 [J]. 电子科技, 2018, 31(1): 16–19, 33.
- Li Wenhui, Jian Xianzhong, Xiao Erliang. Design of gigabit Ethernet transmission in real-time monitoring system of substation [J]. Electronic Science and Technology, 2018, 31(1): 16–19, 33.
- [17] 陈凯, 唐清善, 李亚捷, 等. 基于 FPGA 的千兆以太网传输实现方案 [J]. 电子科技, 2017, 30(6): 102–104, 108.
- Chen Kai, Tang Qingshan, Li Yajie, et al. Implementation scheme of gigabit Ethernet transmission based on FPGA [J]. Electronic Science and Technology, 2017, 30(6): 102–104, 108.