



Views & Comments

群体智能系统的结构分析

潘云鹤^{a,b}^a Artificial Intelligence Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China^b Zhijiang Lab, Hangzhou 310027, China

1. 群体智能的内涵及特点

人类能演化到今天之先进，既依赖于个体的知识提升，也依赖于群体的结构进步[1]。鉴于后者的重要性，从20世纪后期，计算机科学已开始探索与群体有关的管理计算方法[2]，如多智能体、分布式协同、开源平台等。

21世纪以来，由于互联网、大数据和无人系统等新信息系统[3–4]的大发展，网上组织新群体的潜力迅速增强。智能制造、智能商务、智能交通、数字经济、智能城市的大发展，使得群体智能的机理与算法研究已成为重要的新需求。Wu等[5]已指出，在中国，群体智能将成为AI未来发展的新方向。大规模智能个体通过互联网构架的参与，可以表现出超乎寻常的智慧与能力，是解决开放复杂问题的新途径。所以，Pan [6]将群体智能的研究列为AI 2.0重要的主攻方向之一。

群体智能中的智能群体是指在同一平台上为明确目标而自主行动的一群智能个体。其中，智能个体是一种自主的智能系统，可以是一个人或信息系统。群体智能研究智能群体的系统特点、运行机理与应用技术。群体智能的系统具有如下一般性特点：

(1) **个体具有智能**。每一个体都能感知周围环境并有适应变化的能力，如智能自主地认知、学习、决策、互动等。

(2) **共享平台**。为完成某目标而行动的这群智能个体

皆活动在同一平台上，如某种领域或空间。

(3) **有个体遵循的共同规则**。规则是各个体在平台上行动的约束和行为准则。即使成功的规则也很难消除群体行为中的一切矛盾，但必须能调节那些可预见的妨碍达到目标的重要矛盾。

(4) **开放性**。允许群体的个体数量可随时地增加或减少，即能被随时注册和注销。

(5) **含有共识**。智能群体在共同知识库中存其共识。共识会演变。共识的水平是群体水平的一个体现。

(6) **自动演化**。智能群体会随时间而自动演化。这种演化由群体中智能个体的演化和群体的结构关系演化综合而成。

基于几种组织结构特点，我们可对群体智能系统予以分类。首先，群智系统可按组织中智能个体的类别数量分为单类群智系统和多类群智系统。后者如2类、3类等群智系统。其次，群智系统可按系统中各类之间的关系分类，如双层关系的群智、循环关系的群智等。群智系统的激励和演化机制，会随类别与关系的不同而不同。本文后面几节将分别予以讨论。

2. 单类群智和单层群智系统

单类群智系统是指群体中只包含自主执行任务的一类智能个体。群中各个智能个体按照规则、知识和对周围环

境的感知来决定其行为以及彼此通讯与协调，以完成自己的目标任务。

单类群智的基本结构如图1所示。下面以公路驾车群体为例分析单类群智的运行。

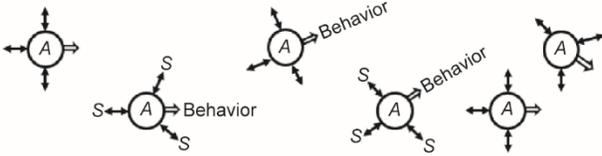


图1. 单类群智系统基本结构。A是智能个体，S是对环境的感知，粗箭头表示A的行为方向。

例1 公路驾车群体：公路驾车群体是一个按照交通规则，以公路系统为平台，由一群因对环境的感知而操控方向、速度、信号等，以求行驶到目的地的车驾所构成的单类群智系统，如图2所示。

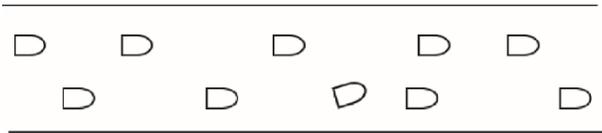


图2. 公路正常车流示意。

单类群智系统的弱点在于个体感知、通讯和控制的局部性，与其行为决策对全局的影响性之间的矛盾。在本例中，这种矛盾在遇到路障与岔岔路口，就会形成拥堵，如图3所示。单类群智过路障拥堵的原因与解决方法分析如下。

(1) **影响驾驶员行为的因素。**这些因素包括该车的目标方向；该车对路、车、标志等的环境感知；该路交通规则；该车驾驶者的经验，如对变化的兴趣、疑惑、慌张等。

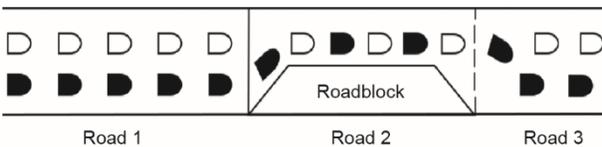


图3. 公路有路障时车流状态。Road 1：双车道；Road 2：出现路障时，双车道变为单车道；Road 3：绕过路障时，恢复双车道。

(2) **发生路障而不堵车的条件分析。**设公路为双车道，如Road 1所示。路障发生前，车流匀速行驶，车速为 s_1 ，Road 2出现路障，变成单车道，车速变为 s_2 。设：①公路可用车道数为 W 车道；②每条道上行驶车辆的分布密度为 $N \cdot \text{km}^{-1}$ ；③每条道上车辆以 $s \text{ km} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度匀速行驶；④每条车道截面的车流密度 $D = sN \cdot \text{min}^{-1}$ ；⑤交通规

则已指出了车速 s 时最小安全车距，由此亦可算出 s 时的最大车分布密度 N_{\max} 。

有路障而不改变车流通畅的条件为：

$$D_2 \cdot W_2 = D_1 \cdot W_1 \quad (1)$$

式中， D_1 和 D_2 分别为Road 1和Road 2中每条车道的车流密度； W_1 和 W_2 分别为Road 1和Road 2中的可用车道数。

$$s_2 \cdot N_2 \cdot W_2 = s_1 \cdot N_1 \cdot W_1 \quad (2)$$

式中， N_1 和 N_2 分别为Road 1和Road 2中行驶车辆的分布密度。

Road 2路障使 $W_2 < W_1$ （在图3中 $W_2/W_1 = 0.5$ ），要保持车流照常畅通，须使 $s_2 \cdot N_2 > s_1 \cdot N_1$ ，即必须加大车分布密度 N_2 或加大车速 s_2 。如果A段的行车分布密度已近 N_{\max} ，则只能使 $s_2 > s_1$ ，在双车道缩小成单车道时，要求 $s_1 \geq 2 \times s_2$ 。但对于人类驾驶而言，是很难做到在并道和绕过路障时，大幅提速。

(3) **单层群智系统的局限性。**在双轨Road 1变单轨Road 2处，人类驾驶员由于互动的无序和对环境的不解，反而降低车速。在Road 2绕行路障时，驾驶员会因分神而减速。通常的方法是在公路车道突然变少处专设交警指挥行车并道，以求有序进行。此时公路上就包含了执行两类任务的个体：行车和警员。该群智系统从单类群智系统变成了双类群智系统。由于此类群智系统中交警也未掌握全局信息，故交警的设置虽能使并道之处有序，但不能解决Road 2因并道而减速甚至拥堵的问题。此时只有掌握全局性的信息，才能做到最佳协调。因为此种群智系统中，各类都由只掌握局部信息的智能个体构成，都属同一层次，故称其为单层群智系统。由上述分析可见，单层群智系统的局限性来自于对全局信息掌握的缺乏。

3. 双层群智系统的结构

双层智能群体系统能更有效地协调。其系统中含有两类智能群体：一类从事目标行动，一类从事全局调度。这种含全局调度类和目标行动类的多类群智系统因调度与行动的上下级关系，故被称为双层群智。其一般模型如图4所示。

因为全局协调者掌握全局信息，所以双层群智在处理突发事件时能显示优越性，如车路网就是双层群智。在图3所示的路障通过中，智能道路能发挥全局调度者的作用，车路网调控所发出的自动驾驶操作指令不但能令Road 1和Road 2交接处有序并道，也能令车速 s_2 提高一倍。

上述分析也指出，在智能交通中，发展智能自动驾驶

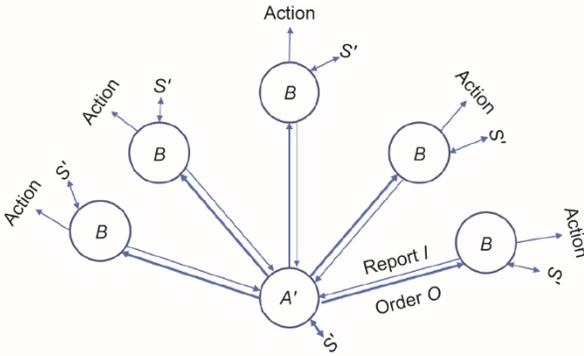


图4. 具有全局协调者的双层群智系统基本结构。 A' 为全局协调者。它应有全局认知能力和特殊情况下的调度能力。 B ：目标执行者。 B 之间也可通讯，以分享信息，协调行动。一般情况下， B 自主执行目标；特殊情况下， B 执行 A' 的调度指令。 I 指针：报告信息流，由 B 到 A' ； O 指针：调度信息流，由 A' 到 B ； S 指针：感知与通讯信息流。

汽车+车路网的双层群智系统才能有效解决交通堵塞问题。

双层智能能用于很多领域，如灵活协调的无人车间、知识库开放建设系统、协力行动的无人机群等。随使用领域不同，其上层调度的机理也不同。

例2 知识吸纳型双层群智：为自动建设知识库而组织智能群体提供知识的双层群智系统。其结构如图5所示。

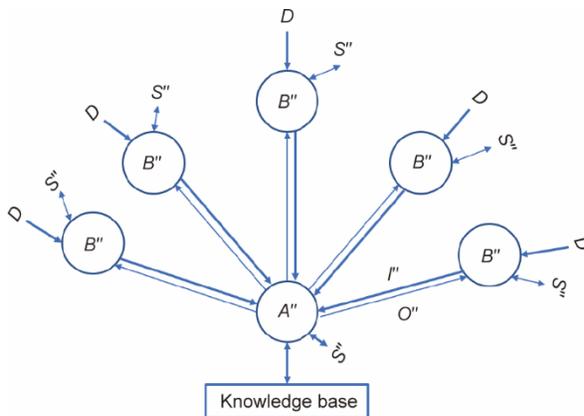


图5. 知识吸纳型双层群智的基本结构。 A'' ：知识库管理者； B'' ：知识提供者； D ：数据流； I'' ：提供知识信息流； O'' ：知识库反馈信息流。此例中 A'' 类智能体与 B'' 类智能体的关系是全局工作者与局部工作者的关系。但 A'' 不能调度 B'' 的行为，只能调度 B'' 所提供的知识。 S'' ：感知与通讯信息流。

在大数据智能领域[6]，解决很多问题的核心技术都指向知识库建设。例如，联邦学习，知识词典的建设，供应网、营销网、创新网的建设与优化等，都能使用知识吸纳型的双层群智。

按照任务与分工不同，双层群智系统中的全局信息掌握者 A 可选不同的调度策略。角色 A'' 如是强势的，此时结构就变为“计划执行型”，其决策调度重心集中于 A'' ；角色 A'' 如是弱势的，此时结构就变为“协作行动型”，其

决策调度重心分布于 B'' ，此时，通信与感知信息流 S'' 的重要性和 B'' 的自主决策计算强度就会增加。

Science 2016年的论文“群体之力量”(*The Power of Crowds*) [7]认为：结合群体智慧与机器性能来解决快速增长难题时，群智计算按难易程度分为三种类型：实现任务分配的众包模式(Crowdsourcing)、较复杂支持 workflows 模式的群智(Complex workflows)以及最复杂的协同求解问题的生态系统模式(Problem solving ecosystem)。在此三类调度计算中， A'' 的角色分别是强势的、中势的、弱势的。

4. 循环群智系统的结构

循环群智系统是指含有资源可在各类群体间循环的群智系统。其中最重要的是供需循环群智系统。当今被成功应用的平台服务系统就是供需循环的群智系统。其运作机理是构建服务的基本平台，吸引服务提供者与服务使用者双方在平台上自主配对，以形成服务与资金等资源的循环。其基本结构见图6。

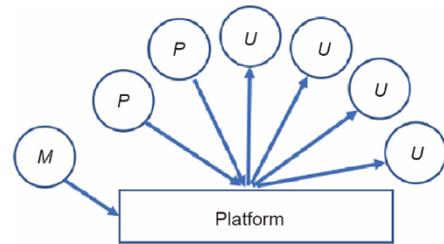


图6. 供需类循环群智基本结构。 M 为服务平台构建与维护者； P 为服务提供者，如电商平台上的商家； U 为服务使用者。图中箭头方向表示产品供给等服务流向，反方向则表示资金的流向。

图6中，服务可向细分发展，例如，电商平台上从提供产品发展了提供金融服务、物流服务、广告服务等。 P 的细深分类，会形成更好的服务生态，对 M 、 P 、 U 的发展均更有利。

循环群智系统有广泛的用途。例如，电商交易平台、手机APP、金融产品推销平台等，均为此类群智系统运作成功的范例。

例3 如果用结构的角观察，可以发现，市场经济也是平台服务型的供需循环群智结构。图7是“经济学原理”[8]所示的市场经济结构模型。

对照图6，图7模型中缺乏市场平台的建构和维护者 M' ，此角色应由政府扮演。世界上已有多个政府成功扮演了角色 M' 。有角色 M' 的市场经济群智结构如图8所示。

角色 M' 能使用法律与规则保障市场循环的公正，使

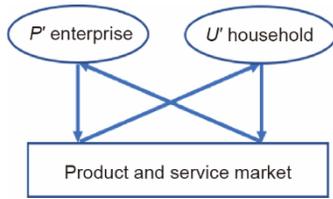


图7. 市场经济的供需循环群智系统的结构。其中，企业 P' 、家庭 U' 在商品与劳力市场中交易，实现供需循环。图中的箭头方向代表商品与服务提供流向，资金则流向箭头的反方向。

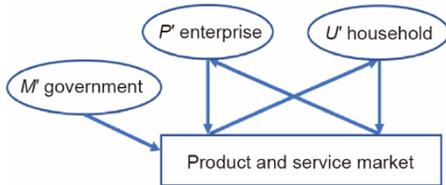


图8. 市场经济的双层循环群智结构。

用全局信息去调节与优化市场，如中央银行、科学研究、教育与文化发展等。由于 M' 角色与 P' 、 U' 角色具有上下关系，因此这种具有 M' 、 P' 、 U' 类的市场经济模型属于双层循环群智系统结构。

这种双层循环群智结构可能会成为经济学研究的有趣方向。

5. 激励机制与演化机制

在本节中，我们将介绍群智系统的激励和演化机制，并证明它们会随着不同类型和关系的变化而变化。

5.1. 激励机制

在群智行为中，单类群智系统按完成任务的效率而有自然激励，双层群智系统如有人类因素参与，激励机制必不可少，因为它能提高群体的工作效率。

不同结构的群智系统适用于不同任务，因此采用不同的激励机制。

(1) 用于调度行动的双层群智适用于指挥系统，如行政、军队等群体的应用。其激励方法常采用教育、奖励或处罚。

(2) 用于知识吸纳的双层群智适用于知识汇聚系统，如知识库、数据库建设等。此类系统容易计算工作量，故常使用按绩奖励。

(3) 供需循环群智适用于平台经济。重要的是此类结构的激励机制与前两类不同。因为该结构中的供方与需方之间互为激励，所以，这是一种自激励机制，故供需循环群智常能以较低的成本，而获得较高的工作效率和发展速度。

5.2. 演化机制

群智系统的演化机制是指系统会随时间而改变结构，积累知识，表现出进步。其机制可分两类。

5.2.1. 各智能体内部演化机制，如自学习、自改革

如图8所示的例子中，企业 P' 的生产过程自动化、管理改革等。家庭 U' 的家庭成员增减，受教育水平提高，消费与就业理念改变等。

5.2.2. 智能体之间关系的演化机制

如图8所示的例子中，智能体间关系演化机制有：

(1) 智能体种类增减，如增加供应链上的材料或零部件制造类企业；服务链上的金融、物流或商务类企业等。参与者种类的增加，常表明系统的专业化分工水平提高。如电商平台系统，服务提供者 P' ，可分解出 P_1' 卖家、 P_2' 快递、 P_3' 金融服务、 P_4' 广告、 P_5' 用户画像、 P_6' 设计……更多种类的参与者能形成更高水平的服务，并改善协作生态。

(2) 平台细分的增减，如增加技术市场、旅游市场、进出口市场、培训市场等。市场平台细分的增加，对 P' 、 U' 两类智能体的发展均有直接促进作用。

(3) 调控者 M' 对全系统发展的前瞻性深层次支持，如办大学、高职院校、研究机构、医院、会展、图书馆、博物馆、经济科技数据中心与智库等，对 P' 、 U' 两类智能体发展有间接的、前瞻性的促进作用。

6. 结论

在本文中，我们分析了不同类别的群智系统结构的一般特征。具体而言，我们全面讨论了三种重要群智系统的结构、机制和实例。同时，我们指出了群智系统的激励和演化机制应该根据不同的类别进行调整。

References

- [1] Surowiecki J. The wisdom of crowds. Anchor: Doubleday; 2005.
- [2] Li W, Wu W, Wang H, Cheng X, Chen H, Zhou Z, et al. Crowd intelligence in AI 2.0 era. Front Inform Technol Electron Eng 2017;18(1):15–43.
- [3] Frankel F, Reid R. Big data: distilling meaning from data. Nature 2008; 455(7209):30.
- [4] Huang HM, Pavek K, Novak B, Albus J, Messin E. A framework for autonomy levels for unmanned systems (ALFUS). In: Proceedings of the AUVSI's Unmanned Systems North America; 2005 Jun 28–30; Baltimore, MD, USA; 2005. p. 849–63.
- [5] Wu F, Lu C, Zhu M, Chen H, Zhu J, Yu K, et al. Towards a new generation of artificial intelligence in China. Nat Mach Intell 2020;2(6):312–6.
- [6] Pan Y. Heading toward artificial intelligence 2.0. Engineering 2016; 2(4): 409–13.
- [7] Michelucci P, Dickinson JL. The power of crowds. Science 2016; 351(6268): 32–3.
- [8] Mankiw NG. Principles of economics. Mason: Cengage Learning; 2014.