

模拟生物群体行为的群智能算法

成员：王骏 王小童 黄琬晴 张晏博 梅宇轩 周嘉译

日期：2025-5-27

1 引言

1.1 研究背景

群体智能（Swarm Intelligence, SI）是人工智能领域一个迅速发展的分支，其核心在于通过模拟自然界中分散、自组织的生物群体行为，以实现分布式、去中心化的智能系统。作为新一代人工智能的五大关键智能形态之一，群体智能在民用和军事领域均展现出重要的应用前景。

群体智能的兴起与当前“物超人”时代背景下人机物深度融合的趋势紧密相关。传统的智能计算模式多以“机器为中心”，而群体智能则推动计算范式转向“群体在计算回路”，这意味着智能系统的开发正从封闭和预设走向开放和竞争。这种转变不仅提高了系统的适应性和鲁棒性，也为解决超大规模复杂问题提供了新的途径。

这种范式转变的重要性已获得国家层面的广泛认可。美国国防部高级研究计划局（DARPA）基于群体智能的“进攻性蜂群战术”项目（OFFSET）应“第三次抵消战略”而生，旨在加强复杂环境下的无人作战能力。同样，中华人民共和国国务院在《新一代人工智能发展规划》中明确指出群体智能是人工智能领域的一个新研究方向，科技部也将其列为持续攻关的五大方向之一。这种国家战略层面的重视，不仅揭示了群体智能在未来科技竞争和国家安全中的深远影响力，也预示着该领域将获得大量资源投入，并有望带来颠覆性的技术突破和产业变革。

1.2 问题提出

尽管群智能算法，特别是粒子群优化（PSO）算法，在解决复杂优化问题方面展现出强大的潜力，但在模拟复杂的生物群体行为、应对高维或多模态优化挑战时，仍面临诸多挑战。这些挑战包括但不限于高计算复杂度、易陷入早熟收敛、对参数设置高度敏感、可伸缩性受限以及可能出现过拟合等问题。

1.3 研究现状

近期群智能算法的研究方向主要包括以下几个方面：

- 多智能体系统与优化决策**：通过多智能体协同，解决分布式优化问题，如无人机集群的路径规划和任务分配。
- 无人集群系统**：在无人驾驶、无人机群、无人船等领域，群智能算法用于实现群体协同控制和决策。例如，2024年研究表明，群智能在无人智能集群系统的决策与控制中表现出色，特别是在动态环境下的实时优化。
- 群智联邦学习**：结合联邦学习思想，群智能算法被用于分布式数据处理和隐私保护场景，如智慧城市中的数据共享与优化。
- 开源群智软件**：推动开源社区建设，开发可扩展的群智能算法平台，促进算法的快速迭代与应用。
- 深度学习融合**：将群智能与深度强化学习结合，用于解决大规模组合优化问题，如物流调度和网络优化。2022年研究显示，深度强化学习与群智能的结合显著提高了复杂问题的在线求解能力。

2 粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization Algorithm - PSO)

2.1 研究背景与灵感来源

粒子群优化 (PSO) 算法是一种新兴的优化技术，其思想根植于人工生命和演化计算理论。该算法由电气工程师Russell C. Eberhart和社会心理学家James Kennedy于1995年首次提出。其最初的目的是为了模拟简化的社会模型，特别是观察鸟群觅食行为。

PSO的核心灵感来源于鸟群在寻找食物时的社会和生物行为。在自然界中，鸟群觅食时，每只鸟不仅会记住自己找到的最佳食物位置，还会受到整个鸟群中发现的最佳位置的吸引。这种个体经验与群体智慧的结合，使得整个鸟群能够高效地找到食物来源。PSO算法正是将这种集体协作和信息共享机制映射到优化问题求解中。

算法的早期发展涉及对社会行为的计算机模拟，例如Reynolds和Heppner的鸟群模拟，以及Heppner的“玉米地向量”概念。这些模拟探索了如何通过简单的局部规则实现复杂的群体动态，为PSO的迭代优化机制奠定了基础。PSO的跨学科起源（电气工程与社会心理学）是其独特优势的根源。PSO并非单一学科的产物，而是电气工程师Eberhart和社会心理学家Kennedy跨学科合作的结晶。这种独特的结合使得PSO在设计之初就融入了工程优化思维和社会行为模拟的洞察。社会心理学对群体行为、信息共享和个体决策的理解，为算法的“认知”和“社会”成分提供了理论支撑，使其能够有效模拟复杂适应系统。

2.2 基本思想

粒子群优化 (PSO) 算法通过模拟群体中粒子（即候选解）在搜索空间中的飞行和协作来寻找最优解。其基本思想是，每个粒子根据自身迄今为止找到的最佳位置（个体最佳，pbest）和整个群体中所有粒子迄今为止找到的最佳位置（全局最佳，gbest）来调整其速度和位置。

2.3 基本原理

- 粒子 (Particle)：在PSO中，每个候选解都被抽象为一个“粒子”。这些粒子在多维搜索空间中“飞行”，并具有位置和速度属性。
- 个体最佳 (pbest)：每个粒子都会记录其在搜索过程中所经历过的最佳位置。这个位置代表了该粒子自身的“经验记忆”或“认知”部分。
- 全局最佳 (gbest)：整个粒子群中所有粒子迄今为止找到的最佳位置。这个位置代表了群体共享的“社会知识”或“社会”部分。
- 迭代优化：算法通过反复迭代过程来寻找最优解。在每一次迭代中，粒子的速度和位置都会根据pbest和gbest进行更新，从而使整个粒子群逐渐向最优解区域移动。
- 信息共享：PSO方法基于的原则是知识不仅在代际之间共享，而且在同代元素之间也进行共享。

2.4 算法介绍

2.4.1 算法定义

速度更新公式：

$$v_i(t+1) = w * v_i(t) + c_1 * r_1 * (pbest_i(t) - x_i(t)) + c_2 * r_2 * (gbest(t) - x_i(t))$$

其中：

- $v_i(t+1)$ ：粒子 i 在 $t+1$ 时刻的速度。
- w ：惯性权重，控制先前速度对当前速度的影响。
- $v_i(t)$ ：粒子 i 在 t 时刻的速度。
- c_1, c_2 ：学习因子（或加速常数），分别调节粒子向个体最优和全局最优方向移动的步长。通常 c_1 和 c_2 是大于 0 的常数。
- r_1, r_2 ：在 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数，用于增加搜索的随机性。

- $pbest_i(t)$ ：粒子 i 截至 t 时刻所经历过的最佳位置（个体最优）。
- $x_i(t)$ ：粒子 i 在 t 时刻的当前位置。
- $gbest(t)$ ：整个粒子群截至 t 时刻所经历过的最佳位置（全局最优）。

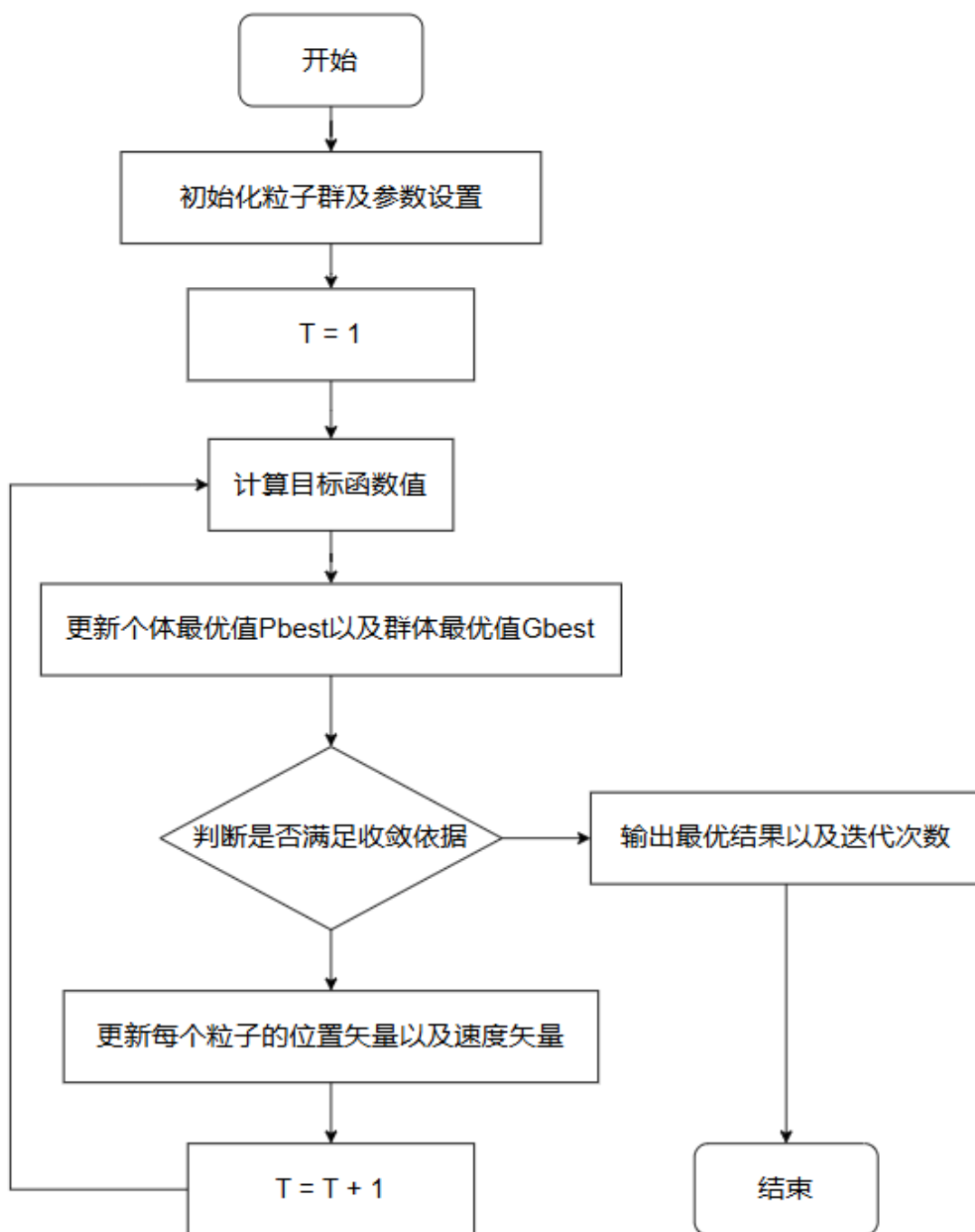
位置更新公式：

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$$

其中：

- $x_i(t+1)$ ：粒子 i 在 $t+1$ 时刻的位置。
- $x_i(t)$ ：粒子 i 在 t 时刻的当前位置。
- $v_i(t+1)$ ：粒子 i 在 $t+1$ 时刻的速度。

2.4.2 算法流程



1. 初始化粒子群:

- 设置粒子数量 N 。
- 在搜索空间内随机初始化每个粒子的位置 x_i 和速度 v_i 。
- 对于每个粒子 i ，将其初始位置 x_i 设为其个体最优位置 $pbest_i$ 。
- 计算每个粒子的适应度值（根据目标函数）。
- 将适应度值最好的粒子的位置设为全局最优位置 $gbest$ 。

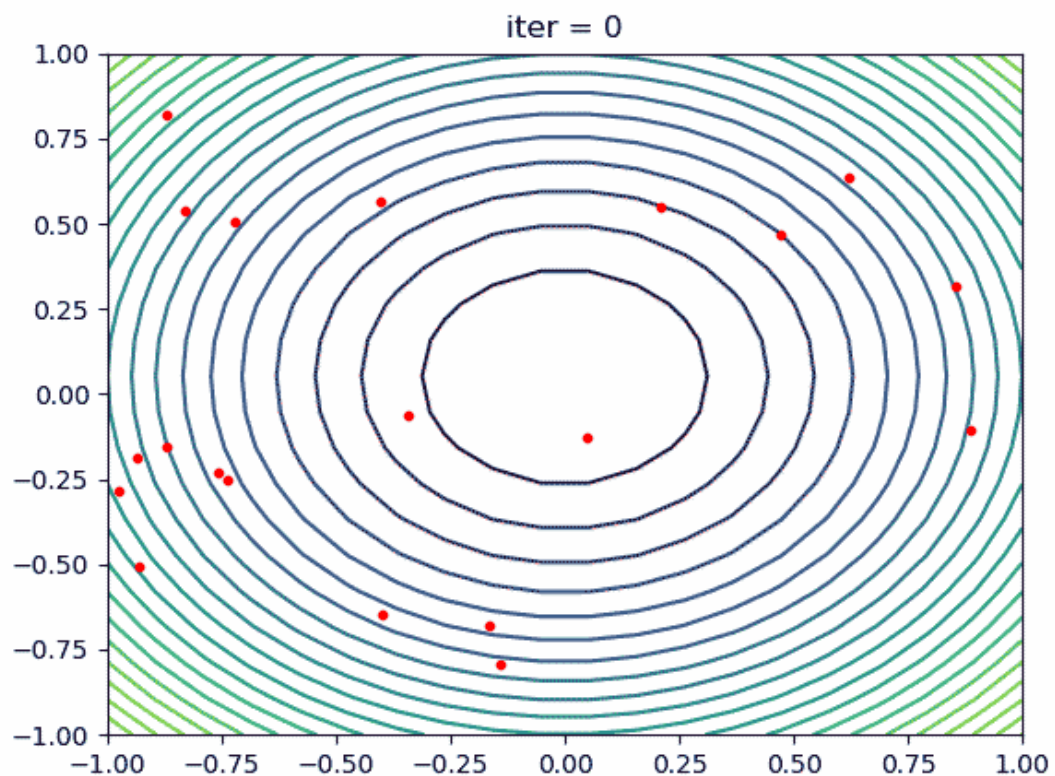
2. 迭代更新:

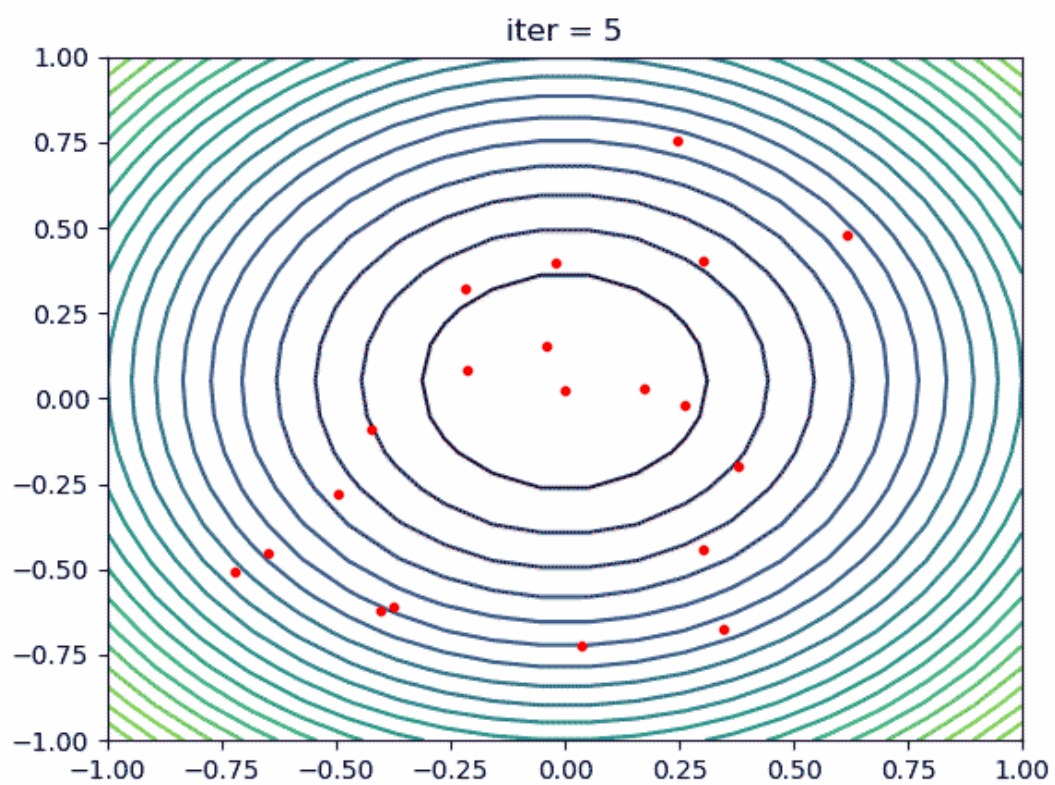
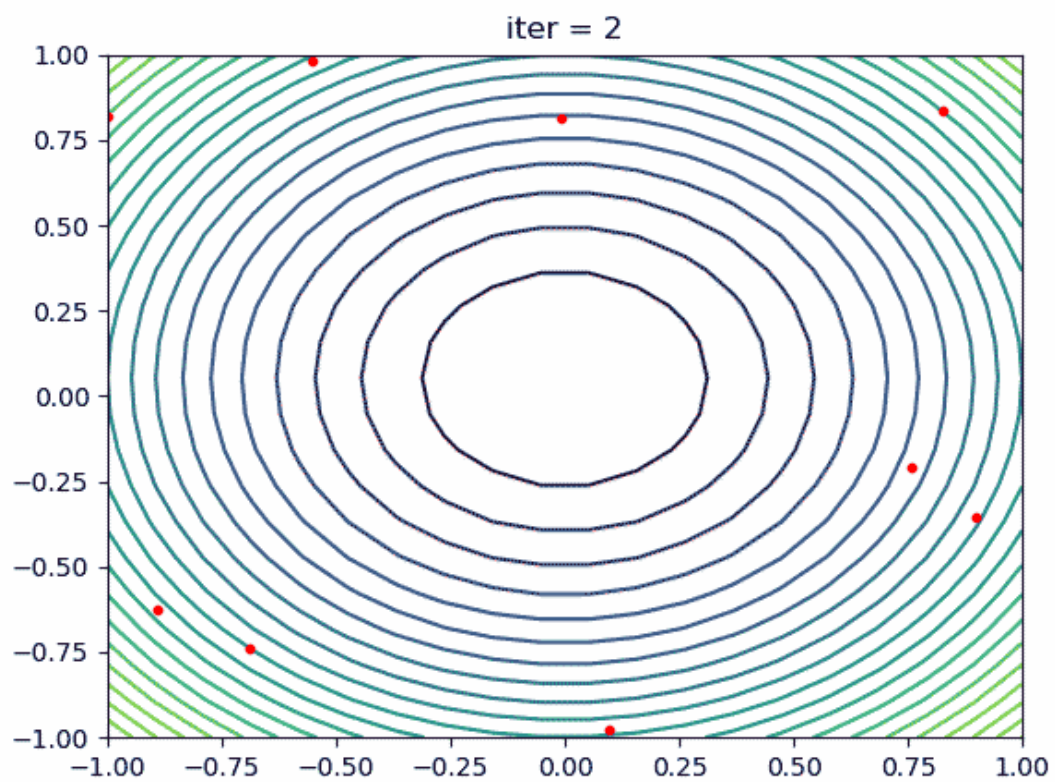
- 对于预设的迭代次数或直到满足终止条件:
 - 对于粒子群中的每个粒子 i :
 - 根据速度更新公式更新粒子的速度 $v_i(t+1)$ 。
 - 根据位置更新公式更新粒子的位置 $x_i(t+1)$ 。
 - （可选）对粒子的位置和速度进行边界检查，防止其飞出搜索空间。
 - 计算粒子 i 在新位置 $x_i(t+1)$ 的适应度值。
 - 如果粒子 i 当前的适应度值优于其 $pbest_i$ 的适应度值，则更新 $pbest_i$ 为当前位置 $x_i(t+1)$ 。
 - 如果粒子 i 当前的适应度值优于全局最优 $gbest$ 的适应度值，则更新 $gbest$ 为当前位置 $x_i(t+1)$ 。
 - 迭代次数 t 增加 1。

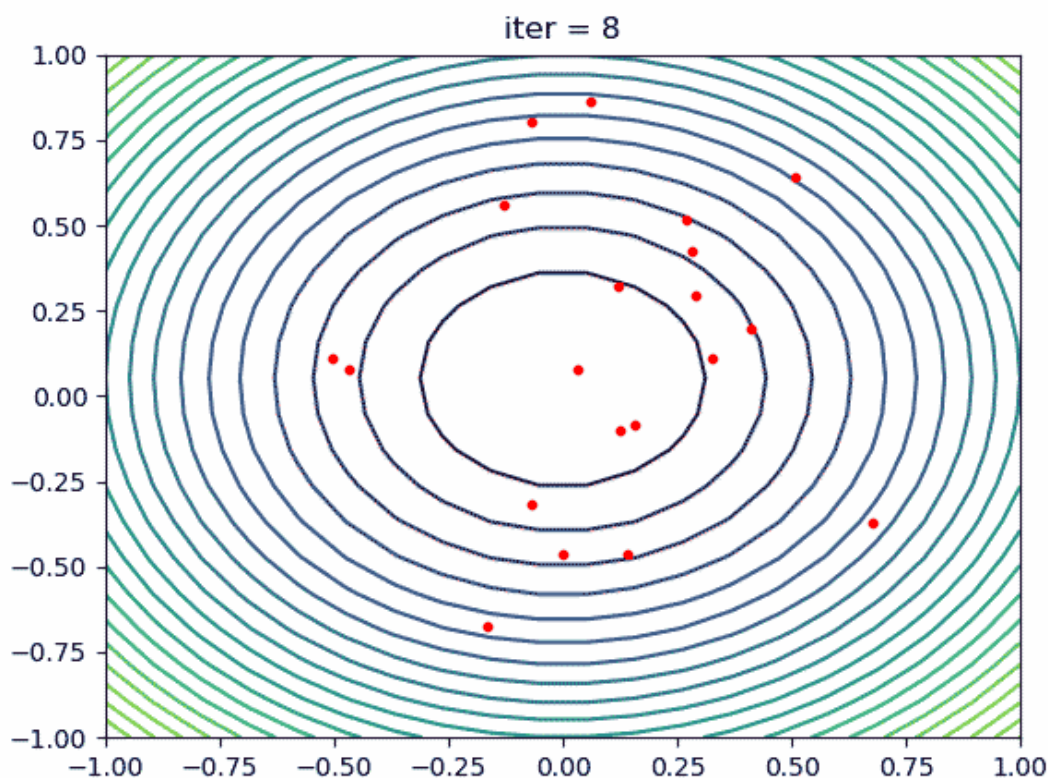
3. 输出结果:

- 当达到最大迭代次数或满足终止条件时，算法结束。
- 全局最优位置 $gbest$ 即为找到的近似最优解，其对应的适应度值为最优值。

2.4.3 算法效果演示







2.5 算法应用

PSO算法因其无需梯度信息、易于实现和对复杂问题处理能力强等特点，在众多领域得到了广泛应用。PSO在“优化”领域的广泛应用，揭示了其作为通用优化工具的强大普适性。PSO的应用横跨多个截然不同的领域，从机器学习和机器人到能源系统、农业和机械设计。这使得PSO能够作为一种通用的、黑箱优化工具，解决各种复杂且难以用传统方法处理的优化问题。

1. 机器学习与数据分析：

- 神经网络训练：PSO可用于训练人工神经网络的权重，例如解决经典的XOR问题。
- 超参数优化：在机器学习模型（如神经网络）中，PSO能够优化超参数以减少预测误差，提高模型性能。
- 特征选择：PSO有助于识别数据集中的最佳变量子集，从而提高模型准确性或可解释。
- 聚类：改进K-means、模糊C均值（FCM）等聚类算法的性能。

2. 机器人技术：

- 路径规划：PSO在移动机器人自主导航和生成平滑路径方面有广泛应用。
- 机器人学习：用于无监督机器人学习任务。
- 多智能体群控制和集体运输：多个机器人协同完成复杂任务，如移动大型物体。

3. 能源系统：

- 尺寸优化：PSO被用于优化混合能源系统（如太阳能光伏系统）的单元尺寸，以实现最佳配置。
- 最大功率点跟踪（MPPT）：在太阳能光伏模块中，PSO有助于高效地跟踪最大功率点，确保最大能量输出。

4. 电力系统：

- 经济调度（ED）：解决电力系统中的经济调度问题，优化发电机组的出力分配。
- 机组组合（UC）：用于计算电力系统的最佳机组组合方案。

5. 图像处理：

- 图像分割：应用于多级阈值方法，并可与隐马尔可夫随机场模型结合以提高图像分割质量。
- 图像增强：开发基于PSO的自动图像增强技术。

3 总结展望

本报告全面探讨了粒子群优化（PSO）算法的理论基础、发展历程、核心原理、应用案例。

群智能作为人工智能领域的一个重要分支，通过模拟自然界中分散、自组织的生物群体行为，实现了分布式、去中心化的智能系统。其核心在于通过简单的局部交互涌现出超越个体能力的集体智慧。粒子群优化算法作为群智能的典型代表，以其简单易实现、无需梯度信息等优势，在机器学习、机器人、能源系统、电力系统、图像处理、农业工程和机械设计等多个领域展现出强大的优化能力。该算法通过粒子个体经验（pbest）和群体经验（gbest）的动态平衡来指导搜索，并已发展出多种变体和改进策略以克服原始算法的局限性。

然而，群智能算法仍面临诸多挑战，包括高计算复杂度、早熟收敛、参数敏感性、可伸缩性、收敛速度慢、过拟合以及理论基础不足等。这些挑战并非孤立存在，而是相互关联，要求研究者采取系统性的方法来寻求综合解决方案。

群智能算法的发展将聚焦于提升其自主性、适应性、效率和普适性。研究方向将包括增强个体智能以促进群体智慧的真正涌现，实现更高水平的智能化和自主化系统（如无人机在复杂环境中的自适应飞行）。同时，通过并行化、混合模型、自适应参数调整机制、快速聚合方法以及正则化等技术，将有效缓解当前算法的局限性。更重要的是，群智能与深度学习、量子计算、边缘计算和区块链等前沿技术的深度融合，将为该领域带来新的突破，使其能够应对更具挑战性的复杂优化和决策问题，并在物联网、智能城市、智慧医疗等新兴应用场景中发挥更大作用。

4 分工说明

分工	成员
论文撰写	王骏
图表制作	王骏、王小童
资料搜集	王骏、王小童
PPT制作	王骏、黄琬晴、张晏博、梅宇轩、周嘉译
PPT汇报	黄琬晴、张晏博、梅宇轩、周嘉译

5 参考文献

[1] 《群体智能：新一代人工智能的五大智能形态之一》，<https://www.secrss.com/articles/47899>；《群体智能算法综述》，<http://www.tup.tsinghua.edu.cn/upload/books/yz/088949-01.pdf>；《Swarm intelligence mimics the collective behavior of natural systems like ant colonies and bird flocks》，<https://library.fiveable.me/swarm-intelligence-and-robotics/unit-1/definition-principles-swarm-intelligence/study-guide/QmkQBeEQnvs1olWD>；《Swarm intelligence: A survey of model classification and applications》，<https://www.sciopen.com/article/10.1016/j.cja.2024.03.019?issn=1000-9361>.

[2] 《群体智能：新一代人工智能的五大智能形态之一》，<https://www.secrss.com/articles/47899>；《Swarm intelligence mimics the collective behavior of natural systems like ant colonies and bird flocks》，<https://library.fiveable.me/swarm-intelligence-and-robotics/unit-1/definition-principles-swarm-intelligence/study-guide/QmkQBeEQnvs1olWD>；《Swarm intelligence in nature showcases how simple organisms achieve complex tasks through collective behavior》，<https://fiveable.me/swarm-intelligence-and-robotics/unit-1/swarm-intelligence-nature/study-guide/aggCFstTeMgJtkY8>；《Swarm Intelligence (SI) is defined as a collective behavior that emerges from the interaction between individuals within a group》，<https://www.sciopen.com/article/10.1016/j.cja.2024.03.019?issn=1000-9361>.

[3] 《群智能算法面临的挑战与未来增强方向》, https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2025/07/itmconf_icsice2025_05008.pdf; 《传统PSO算法的局限性及其改进技术》, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10537715/>; 《Brief review on particle swarm optimization: Limitations & future directions》, https://www.researchgate.net/publication/289676227_Brief_review_on_particle_swarm_optimization_Limitations_future_directions; 《Particle swarm optimization (PSO) algorithms have shown promise in optimizing the tap weights of the equalizer》, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10537715/>.

[4] 《群智能算法面临的挑战与未来增强方向》, https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2025/07/itmconf_icsice2025_05008.pdf; 《传统PSO算法的局限性及其改进技术》, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10537715/>; 《本文提出一种新的粒子群优化算法 (P S O- E W D), 主要改进体现在 2 个方面》, <http://www.engineering.org.cn/sscae/CN/Y2004/V6/I5/87>; 《Particle swarm optimization (PSO) algorithms have shown promise in optimizing the tap weights of the equalizer》, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10537715/>.

[5] 《Brief review on particle swarm optimization: Limitations & future directions》, https://www.researchgate.net/publication/289676227_Brief_review_on_particle_swarm_optimization_Limitations_future_directions; 《群智能算法面临的挑战与未来增强方向》, https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2025/07/itmconf_icsice2025_05008.pdf.

[6] 《Swarm Intelligence (SI) is defined as a collective behavior that emerges from the interaction between individuals within a group》, <https://www.sciopen.com/article/10.1016/j.cja.2024.03.019?issn=1000-9361>; 《Swarm intelligence mimics the collective behavior of natural systems like ant colonies and bird flocks》, <https://library.fiveable.me/swarm-intelligence-and-robotics/unit-1/definition-principles-swarm-intelligence/study-guide/QmkQBeEQnvs1olWD>.