

ARTIFICIAL PHYSICS INSPIRED
SWARM INTELLIGENCE METHOD

谢丽萍 / 著

拟态物理学

启发的群智能方法



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

拟态物理学启发的 群智能方法

ARTIFICIAL PHYSICS INSPIRED SWARM
INTELLIGENCE METHOD

谢丽萍 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书介绍了群体智能理论的主要研究分支和拟态物理学方法的基本概念和思想,结合生物系统和物理系统都具有自组织、自学习和自适应的特性,提出了从拟态物理学这一独特视角研究群体智能,深入介绍了由拟态物理学规律驱动的生物群集行为的建模仿真及稳定性分析,拟态物理学优化算法的框架建立、算法设计、收敛性分析、约束优化问题求解以及群机器人目标搜索。本书系统展现了从拟态物理学的角度构建群集行为模型和群体智能算法的整体思路,以丰富群体智能方法的研究。

本书适合从事智能计算研究和应用的科技工作者和工程技术人员阅读使用,也可供高等院校计算机科学与技术、控制科学与工程、管理科学与工程等相关学科的高年级本科生及研究生参考使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

拟态物理学启发的群智能方法/谢丽萍著. —北京:电子工业出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-121-27925-6

I. ①拟… II. ①谢… III. ①人工智能—研究 IV. ①TP18

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第308189号

策划编辑:徐蔷薇

责任编辑:徐蔷薇 特约编辑:刘广钦

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:北京季蜂印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:720×1 000 1/16印张:15 字数:208千字

版 次:2015年12月第1版

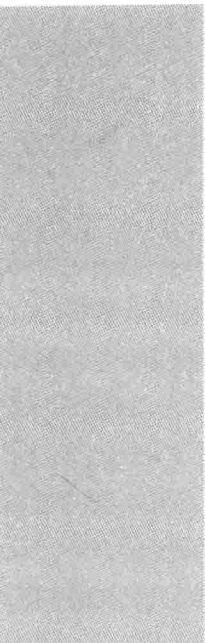
印 次:2015年12月第1次印刷

定 价:49.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。



作者简介

谢丽萍，现为太原科技大学计算机科学与技术学院副教授、硕士生导师。于 2010 年 12 月获得兰州理工大学控制理论与控制工程专业博士学位。主要研究方向为群体智能、进化计算、随机优化等。作为课题负责人先后承担山西省青年科学基金 1 项、国家青年科学基金 1 项，在国内外学术期刊及国际会议上发表论文 30 余篇，其中 20 余篇被 SCI/EI 收录。

前言

大自然是智慧的。蚁群觅食、大雁迁徙、鹿群逃避、蜂群筑巢等，这些群集智能行为通过个体间的简单交互和协作而涌现，是一个复杂动态的自组织、自学习和自适应过程。整个群体没有控制中心，具有稳健性；群体中相互协作的个体是分布的；每个个体的能力有限，具有简单性；个体之间可以通过直接或间接通信进行协作，具有良好的可扩充性；个体具有自学习能力，能自动获取知识；个体依据外部环境的变化进行自组织，从而实现个体的自适应，使得系统能适应外界的变化保持良好的性能。

大自然又是富有规律的。固体的结晶、液体流动时的自觉避障、气体分子的扩散、太阳系各天体有规律的运动等，这些整体行为都遵循一定的物理规律，如万有引力定律、库仑定律、分子间的作用规律等。这些物理规律用来阐释物理系统中的任意两个运动个体（如天体、电荷和分子等）之间存在某种作用力（如引力或斥力），所有个体在其他个体的作用力驱动下运动，从而呈现有规律的物理现象。

自然界的万事万物是相互联系的。生物群体表现出的自组织、自学

习和自适应的智能特性恰恰是自然物理系统所呈现的基本规则。因而，群体智能中的很多问题都可以从自然物理规律中获得解答。因此，从物理学角度思考和阐释生物群集智能的涌现将为研究群体智能提供一种全新的思路。

本书从拟态物理学这一独特视角研究群智能方法，全面详述了作者近年来在群体智能领域的研究成果，是一本总结研究成果的学术专著。本书力图系统地从拟态物理学的角度构建群体行为模型、群体智能算法和群机器人模型，以丰富群体智能方法的研究，为从事相关群体智能和优化方法的科研工作者提供参考。

全书内容分为七章。

第 1 章：绪论，简要介绍了群体智能的主要研究分支，以及拟态物理学方法研究概况；就群体智能相关研究的局限性，提出从拟态物理学的视角开展群体智能方法研究。

第 2 章：从群体行为模型入手，借鉴拟态物理学的思想和概念，详细介绍了生物群体的群集模型和群集觅食模型的构建方法，以及这两种模型的内聚性与稳定性。

第 3 章：鉴于生物群体觅食与优化问题求解的相似性，详细论述了基于拟态物理学方法构造优化算法的可行性，分别介绍了拟态物理学优化算法的概念、基本框架、作用力规则、质量函数及速度上限 $V_{\max}$ 的选择策略。

第 4 章：采用线性系统的稳定性理论和概率论的相关知识论证了拟态物理学优化算法的收敛性和全局收敛性，并对影响拟态物理学优化算法收敛的重要参数 G 给出了定常和自适应两种选择策略。

第 5 章：分别从借鉴群居性生物具有记忆能力、有效利用个体的搜索方向、引入种群多样性，以及引入 PD 控制器等方面探讨了拟态物理学优化算法的几种改进模型。

第 6 章：将拟态物理学优化算法用于求解约束优化问题，分别介绍

了基于约束保持法和基于可行性规则法两种约束处理方法的拟态物理学优化算法。

第7章：详细阐述了将拟态物理学优化算法作为群机器人建模工具，构建全局感知和局部感知的群机器人目标搜索模型。

本书的完成得到了太原科技大学复杂系统与计算智能实验室、工业与系统工程研究所，以及计算机科学与技术学院各位同仁的大力支持，太原科技大学曾建潮教授对本书提出了很多宝贵的建议，在书稿出版过程中，电子工业出版社的徐蔷薇和赵娜编辑提供了多方面的帮助，在此一并致以诚挚的谢意。

本书研究工作得到了国家青年科学基金项目（项目编号：61403271）、国家自然科学基金项目（项目编号：61472269）、山西省青年科学基金项目（项目编号：2011021014-1）和太原科技大学博士后基金项目（项目编号：20142022）的资助，在此谨向有关部门表示深深的感谢并致以敬意。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请各位专家和广大读者给予批评指正。

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	问题的提出	1
1.2	群体智能	5
1.2.1	群体行为模型	7
1.2.2	群体智能算法	12
1.2.3	群机器人	17
1.3	模拟物理学原理的启发式算法	19
1.3.1	模拟退火算法	19
1.3.2	类电磁机制算法	20
1.3.3	中心力算法	22
1.3.4	EM 算法与 CFO 算法异同比较	24
1.4	拟态物理学方法	26
1.4.1	拟态物理学方法基本框架	26
1.4.2	基于拟态物理学方法的群机器人编队	28

1.5 本书篇章结构	30
参考文献	32
第2章 基于拟态物理学的智能群体群集模型	36
2.1 基于拟态物理学的群集模型	37
2.1.1 群集模型建立	37
2.1.2 势函数的存在性	39
2.1.3 参数分析	40
2.2 群集模型的稳定性分析	44
2.2.1 内聚性分析	45
2.2.2 个体行为的稳定性分析	46
2.2.3 实例仿真	47
2.3 群集觅食模型	49
2.3.1 平面环境中的群体行为分析	51
2.3.2 二次函数环境中的群体行为分析	52
2.3.3 高斯环境中的群体行为分析	54
2.3.4 实例仿真	56
参考文献	62
第3章 基于拟态物理学的全局优化算法框架	64
3.1 生物觅食与优化算法的映射关系	64
3.2 拟态物理学优化算法框架	70
3.2.1 初始化种群	71
3.2.2 计算合力	72
3.2.3 个体运动	73
3.2.4 APO 算法流程	74
3.3 作用力规则设计	74

3.3.1	负指数作用力规则	75
3.3.2	单峰作用力规则	78
3.3.3	线性作用力规则	80
3.3.4	实例仿真	82
3.4	质量函数的选择策略	95
3.4.1	质量函数的性质及构造方法	95
3.4.2	质量函数分类	98
3.4.3	实例仿真	100
3.5	速度上限选择策略	110
	参考文献	112
第 4 章	拟态物理学优化算法收敛性分析	114
4.1	收敛性证明	115
4.2	全局收敛性证明	121
4.3	引力参数设计	125
4.3.1	定常引力参数	127
4.3.2	自适应引力参数	128
4.3.3	实例仿真	131
	参考文献	133
第 5 章	混合拟态物理学优化算法	135
5.1	扩展的 APO 算法	135
5.1.1	EAP0 算法描述	136
5.1.2	EAP0 与 PSO 比较	137
5.1.3	实例仿真	138
5.2	矢量 APO 算法	142
5.2.1	AP0 算法的矢量模型	142

5.2.2	混合一维搜索的 VM-APO 算法	145
5.2.3	混合多维搜索的 VM-APO 算法	147
5.2.4	实例仿真	149
5.3	引入种群多样性的 APO 算法	152
5.4	引入 PD 控制器的 APO 算法	154
5.4.1	标准 APO 模型分析	154
5.4.2	引入后向 PD 控制器的 APO 模型分析	155
5.4.3	引入前向 PD 控制器的 APO 模型分析	157
5.4.4	实例仿真	158
	参考文献	161
第 6 章	拟态物理学优化算法在约束优化问题中的应用	162
6.1	约束优化问题模型	164
6.2	基于约束保持法的 VM-APO 算法模型	164
6.2.1	可行初始解的产生方法	164
6.2.2	混合斐波那契法的 VM-APO 模型	168
6.2.3	混合黄金分割法的 VM-APO 模型	172
6.2.4	实例仿真	173
6.3	基于可行性规则的 APO 算法模型	175
6.3.1	可行性规则一	176
6.3.2	可行性规则二	176
6.3.3	可行性规则三	177
6.3.4	质量函数设计	177
6.3.5	实例仿真	178
	参考文献	182
第 7 章	基于拟态物理学优化算法的群机器人目标搜索	184
7.1	群机器人目标搜索概述	185

7.1.1	通信机制	185
7.1.2	定位方式	186
7.1.3	常见的控制策略	187
7.2	拟态物理学优化算法建模方法	187
7.2.1	群机器人目标搜索到 APO 算法的映射	188
7.2.2	基于 APO 算法的群机器人目标搜索模型	192
7.3	全局感知的群机器人目标搜索	194
7.3.1	环境设置	194
7.3.2	控制策略	196
7.3.3	算法描述	198
7.3.4	仿真实验	200
7.4	局部感知的群机器人目标搜索	203
7.4.1	时变感知域	204
7.4.2	局部感知控制模型	205
7.4.3	算法描述	207
7.4.4	仿真实验	210
	参考文献	214
附录 A	无约束优化典型测试函数	216
附录 B	约束优化标准测试函数	220

1

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出

现实世界问题不断增长的复杂性一直推动着计算机科学家寻找解决问题的有效方法。自然界是无尽灵感的来源。进化算法和基于群体智能的元启发式算法均是求解复杂优化问题的成功范例。进化计算模拟了生物进化过程与机制，以遗传算法为典型代表，其核心思想源于达尔文的优胜劣汰的自然选择学说和孟德尔的遗传变异理论，模拟了生物个体通过繁殖、选择、竞争和变异实现进化，其进化过程是一个适应环境的稳健的优化过程。群体智能算法以蚁群算法、微粒群算法为典型代表，模拟了简单生物个体通过信息交互和相互协作涌现复杂群体智能行为的特性，其过程也是一个适应环境的稳健的优化过程。两者的本质区别在于：

前者强调“优胜劣汰”的自然选择，仅考虑到个体之间的竞争，适应值较差的个体会被适应值较好的个体取代而淘汰；而后者强调个体的“学习”与个体间的相互“协作”，个体通过感知和信息交互来协同完成任务。相比之下，个体通过遗传进化对智能的形成和推动远不及通过学习和协作所涌现的智能来得快。显然，群体智能计算在解决复杂优化问题方面具有突出的优势。

群体智能（Swarm Intelligence）起源于对自然界群居性生物自组织行为的观察和研究。群居性生物令人惊奇之处在于：尽管单个个体行为简单、能力有限，却能与邻近同伴交互协作涌现出诸如觅食、筑巢、迁徙、御敌等复杂集体行为，使整个群体呈现一种协调、有序的自组织状态。群体智能正是建立在对这些大量简单生物涌现的群体行为的认知基础之上，是一群简单自治智能体涌现出的集体智能。它能够在没有集中控制且对全局环境不了解的情况下完成很多复杂任务，这为寻找复杂的分布式问题求解方案提供了很好的启发。群体智能经过短短十几年的发展已引起了多个学科领域研究人员的关注，目前已经成为人工智能、经济、社会、生物等交叉学科的热点和前沿领域。群体智能以其简单性、灵活性、分布性和健壮性的特点，在组合优化、通信网络、知识发现、机器人等研究领域展现出优异的性能和巨大的发展潜力。

自 1999 年，Bonabeau 等人将群体智能的定义扩展为任何启发于群居性昆虫群体和其他动物群体的集体行为而设计的算法和分布式问题解决装置^[1]以来，学术界分别从生物学、数学、机器人学及计算机科学等角度，对群体智能的三个重要方面〔群体行为模型、群体智能算法和分布式装置（或群机器人）〕开展了许多研究工作。群体行为模型的研究，包括对生物群体行为的建模与仿真，典型的建模方法有欧拉法、拉格朗日法和基于仿真的方法；群智能算法研究包括微粒群算法、蚁群算法和蜜蜂算法等；分布式装置的研究，是有关工程领域自动或半自动智能群体的协调合作行为的动态性能和控制问题的研究，即利用群体智能特有

的分布式特点,结合机器人等先进设备,设计和研究带有一定自组织能力的装置系统,其研究方法分别有启发于生物系统、物理系统和社会系统的方法。群体智能这三方面的研究不是孤立进行的,它们相互影响、相互促进。群体行为模型的研究是构建群体智能理论的基础和关键,也是群智能计算和分布式装置研究的动力和源泉,许多工程系统的开发都将会从包括生物群体行为的建模、生物个体之间协作规则的制定和生物群体动态特性的分析等理论的研究中获益。群体智能算法的研究和应用是整个群体智能理论研究的核心,可以作为群体行为建模和分布式装置协调控制的工具。而分布式装置研究则可为生物群体行为的涌现机制产生新的理解和认识。由此可见,群体行为模型的研究,无疑对群体智能的理论构建和实际应用都具有重要意义。

然而,由于认知水平所限,人类对群体智能的本质还缺乏深刻的认识,至今仍未完全弄清群体智能行为涌现的内在机制。群居性生物个体之间究竟遵循怎样的交互和协作规律,以涌现群体智能行为?这一核心问题的探索为群体智能研究提供了广阔的发展空间。

在生物系统中,群集智能行为通过个体间的简单交互和协作而涌现,是一个复杂动态的自组织、自学习和自适应过程。整个群体没有控制中心,具有稳健性;群体中相互协作的个体是分布的;每个个体的能力有限,具有简单性;个体之间可以通过直接或间接通信进行协作,具有良好的可扩充性;个体具有自学习能力,能自动获取知识;个体依据外部环境的变化进行自组织,从而实现个体的自适应,使得系统能适应外界的变化保持良好的性能。生物系统这种自组织、自学习和自适应的智能特性恰恰是自然物理系统所呈现的基本规则。因而,群体智能中的很多问题都可以从自然物理规律中获得解答。因此,从物理学角度思考和阐释生物群集智能的涌现将为研究群体智能提供了一种全新的思路。

自然界很多富有规律的整体行为,如固体的结晶、液体流动时的自觉避障、气体分子的扩散、太阳系各天体有规律的运动等,这些整体行

为都遵循一定的物理规律，如万有引力定律、库仑定律、分子间的作用规律等。这些物理规律用来阐释物理系统中的任意两个运动个体（如天体、电荷和分子等）之间存在某种作用力（如引力或斥力），这一作用力与个体的质量，以及与其他个体的距离等信息有关，所有个体在其他个体对其作用力的驱动下运动，从而呈现有规律的物理现象。

物理学原理和规律通过研究任意两个运动个体之间的物理作用力揭示了自然界所呈现的有规律的物理现象。那么，群居性生物个体之间是否也存在一种“虚拟”物理作用力，并在这种“虚拟”物理作用力的作用下，涌现出其特有的群体行为呢？也就是说，群居性生物所涌现的群体智能行为可否用物理学原理和规律加以阐释和建模是非常值得研究的问题。

本书从拟态物理学的角度思考和阐释生物群集智能的涌现，为研究群体智能提供一种全新的思路。拟态物理学 (Physicomimetics or Artificial Physics, AP)^[2] 是美国怀俄明州立大学的 Spear WM 等人提出的一种模拟物体间存在虚拟力作用，以及物体运动遵循牛顿力学定律的方法。拟态物理学框架实现了从群机器人系统到物理系统的映射，机器人被抽象为在二维或三维空间运动的微粒。每个微粒都有质量、速度和位置属性。微粒在空间中的连续运动用多个极小离散时间片断内的位移量近似描述。拟态物理学将传统的物理分析技术用于群体行为的预测，期望其表现类似于固态、液态或气态物质的特性。该方法通过制定个体间的简单虚拟作用力规则涌现群体的复杂行为，实现整个系统分布式复杂控制，为分布式群机器人系统控制提供了一条有效途径。目前，该方法主要应用于群机器人的编队、覆盖和避障等问题的研究。

从行为上看，生物群集行为和群机器人行为具有许多相同之处。两者都是由简单个体组成的群体，单个个体无智能特性，个体行为受群体内部其他个体的影响，个体之间通过某种交互机制相互协作，整体表现出智能特性，所有个体共同完成某项单个个体难以完成的任务。本书采

用拟态物理学方法对生物群体的群集行为进行建模与仿真研究,从拟态物理学的视角阐释群居性生物个体之间的交互和协作机制,启发和构造了一种基于拟态物理学的优化算法,为求解复杂优化问题开辟了新的途径。

1.2 群体智能

“群体智能”一词最早出现在有关元胞机器人控制^[3]一文中,用于描述众多简单机器人像机体细胞那样通过与相邻个体交互产生自组织。群居性生物群体普遍存在于自然界中,如鸟群、鱼群、蚂蚁、蜜蜂等,这些群体中没有领导者协调众多个体的行为,也没有整体部署,尽管单个个体行为能力有限,却能与邻近同伴交互协作完成诸如觅食、筑巢、迁徙、御敌等复杂集体智能行为,使整个群体呈现一种协调、有序的自组织状态。这种自组织本质上是全局形式的,却完全是由局部信息交互产生的。个体通过交互能够使个体获得的信息远比通过自身感官所取得的多。个体根据获得的环境和邻近同伴的信息改变自身的行为模式以适应环境,使得整个群体涌现出单个个体所不具备的能力和特性。

群体智能的思想就是建立在对这些大量简单生物个体涌现的群体行为认知基础上,可被定义为一群简单自治智能体(Agent)涌现出的集体智能^[4]。这些自治智能体与其所处环境构成了一个完整的系统,整个系统中没有领导者,也没有集中控制机制,每个智能体可被看做一个子系统,其行为与其他成员相对独立,仅有有限的能力和为,可以从环境中获取信息,通过与环境和其他成员交互,并协作涌现自组织。此类系统中的个体具有相同的控制结构,可以互相替换,而且个体单元的增减不需要系统外部重新组织,大大增强了系统的灵活性和稳健性^[5]。

Mark Millonas 针对如何采用计算机构建具有合作行为的群集人工生