

中国科学院科学出版基金资助出版

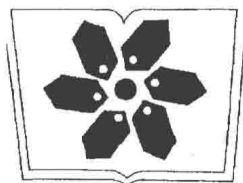
信息科学技术学术著作丛书

烟花算法引论

谭 营 著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

信息科学技术学术著作丛书

烟花算法引论

谭 营 著



感谢国家自然科学基金 (61375119, 61170057, 60875080,
60673020, 61110306107, 61010306001) 和 973 计划 (2015CB352302)
的大力支持

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统描述了作者提出的一种新型群体智能算法——烟花算法,它的产生、算法实现、理论分析、算法改进及其应用,为读者勾勒出了烟花算法的全景图像。主要内容包括:烟花算法的基本原理与实现及其性能分析、收敛性和时间复杂度分析、多种改进算法、混合方法、离散烟花算法、烟花算法的并行化实现,以及几种应用实例。书中重点介绍了烟花算法的参数设定,各种改进方法、并行化实现、与典型群体智能算法的性能对比分析等。书中还包括了烟花算法的最新资料和一些重要算法的流程图,以及源代码的链接,供感兴趣读者参阅和使用。

本书可作为智能科学与计算机科学等专业高年级本科生和研究生的教材,尤其适合作为烟花算法入门参考书,可以满足初学者了解和学习烟花算法的基本要求,也可作为信息、通信、控制、管理、工程技术等相关领域的科技工作者和工程师及感兴趣者的参考材料。

图书在版编目(CIP)数据

烟花算法引论/谭莹著. —北京:科学出版社, 2015
(信息科学技术学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-044085-3

I. 烟… II. 谭… III. 人工智能-算法理论-研究 IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 075248 号

责任编辑:魏英杰/责任校对:郭瑞芝
责任印制:肖 兴/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 4 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2015 年 4 月第一次印刷 印张: 19 3/4 插页: 2

字数: 400 000

定价: 120.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介



谭营，男，1964 年 9 月出生，四川营山人，博士，北京大学教授，博士生导师。他创建并领导北京大学计算智能实验室（CIL@PKU），是烟花算法发明人，2005 年入选中国科学院“百人计划”。

谭营教授主要从事计算智能、群体智能、机器学习与数据挖掘，及其在信息安全中应用的研究工作，是 IEEE 资深会员。主持参与了国家自然科学基金、863 计划、973 计划等项目 30 余项。SCI、EI 收录学术论文逾百篇，出版学术著作 6 部，译著 4 部，主编 Springer 的 LNCS 共 12 卷。获得国家发明专利授权 3 项，获得 2009 年度国家自然科学奖二等奖 1 次、部级科技进步奖 5 次和最佳论文奖。担任国际期刊 IJCIPR 主编、IEEE Trans on Cybernetics 副主编、IEEE Trans on Neural Networks and Learning Systems 副主编等。创立国际群体智能系列会议（ICSI' 2010-2015），并担任主席，同时担任 IEEE 计算智能世界大会（WCCI2014）程序委员会共同主席等。

《信息科学技术学术著作丛书》序

21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代，一场以网络科学、高性能计算和仿真、智能科学、计算思维为特征的信息科学革命正在兴起。信息科学技术正在逐步融入各个应用领域并与生物、纳米、认知等交织在一起，悄然改变着我们的生活方式。信息科学技术已经成为人类社会进步过程中发展最快、交叉渗透性最强、应用面最广的关键技术。

如何进一步推动我国信息科学技术的研究与发展；如何将信息技术发展的新理论、新方法与研究成果转化为社会发展的新动力；如何抓住信息技术深刻发展变革的机遇，提升我国自主创新和可持续发展的能力？这些问题的解答都离不开我国科技工作者和工程技术人员的求索和艰辛付出。为这些科技工作者和工程技术人员提供一个良好的出版环境和平台，将这些科技成就迅速转化为智力成果，将对我国信息科学技术的发展起到重要的推动作用。

《信息科学技术学术著作丛书》是科学出版社在广泛征求专家意见的基础上，经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播网络科学和未来网络技术，微电子、光电子和量子信息技术、超级计算机、软件和信息存储技术，数据知识化和基于知识处理的未来信息服务业，低成本信息化和用信息技术提升传统产业，智能与认知科学、生物信息学、社会信息学等前沿交叉科学，信息科学基础理论，信息安全等几个未来信息科学技术重点发展领域的优秀科研成果。丛书力争起点高、内容新、导向性强，具有一定的原创性；体现出科学出版社“高层次、高质量、高水平”的特色和“严肃、严密、严格”的优良作风。

希望这套丛书的出版，能为我国信息科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时，欢迎广大读者提出好的建议，以促进和完善丛书的出版工作。

中国工程院院士

原中国科学院计算技术研究所所长



前 言

随着人们对生物体的认知与智能的深入研究,现代人工智能的研究步入了一个逐渐摆脱对经典逻辑计算依赖的全新时代,勇敢探索和大力发展的许多新的计算途径和方法。人们在解决一些现实中的实际问题时,经常会碰到一些复杂度很高的困难问题,无法或很难有效予以解决,但是在自然界中的社会性动物和社会性昆虫群体,如鸟群、蚁群、蜂群、鱼群等,却能很巧妙和很自然地解决这些问题。这些自然存在的现象为人们提供了一个良好的契机,通过类比、隐喻等方式,人们发展了大量的元启发式的方法来提高解决复杂困难问题的能力。群体智能正是通过模拟这些自然界中社会性动物的自组织行为而产生的一种高效求解复杂困难问题的新兴计算智能方法,并且已经引起了人们的高度关注。

启发于社会性动物群体,个体通常非常简单,但作为一个群体却能表现出个体不具备的很复杂的集体行为,即群体智能。通过将其用于求解复杂优化问题,发展出了大量的全局优化方法,即群体智能算法。作为一种新兴的演化计算技术,群体智能算法成为计算智能领域广泛关注的热点。近十年来,受各种生物群体和自然现象的激发,通过从不同的途径建立模型,学者已经提出数十种相关群体智能算法,使得群体智能算法的研究如雨后春笋般茁壮发展起来。这些算法共同的特点就是群体中个体之间通过直接或间接的相互协作和相互作用从整体上表现出了复杂的智能行为,具有十分强大的问题求解能力,成为解决复杂困难问题的重要工具。

烟花算法是我在观察现实中的烟花在空中爆炸这一现象,受到启发而提出的一种具有爆炸搜索机制的全局优化求解的新型群体智能算法,它在求解复杂优化问题中表现出了非常优良的性能和很高的效率,已经逐渐获得了业界的高度关注和跟踪研究。通过近5年的发展,已经相继提出了二十余种烟花算法的改进方法、收敛性分析和多项典型应用,逐渐发展成为一种十分有效的群体智能算法。

本书是系统论述烟花算法的第一本学术著作,全面记录了到目前为止作者及其领导的研究团队对烟花算法的重要研究成果,是一本了解并深入认识烟花算法的权威书籍,具有很高的原创性和学术水平,对烟花算法的发展与推广应用都具有十分重要的学术意义和实际价值,也对丰富我国群体智能研究具有重要意义。希望本书的出版可以激发更多的相关研究人员对烟花算法的兴趣,以丰富烟花算法的研究内容,并拓展其应用范围。

本书的目的是从基本原理、算法、理论和应用四个方面,全面系统地介绍烟花算法的研究和发展状况。采用由浅入深的渐进式叙述方法,尽量用浅显和朴实的话

言来介绍这些枯燥和深奥的理论和算法。本书的另一个目的是希望为感兴趣的读者提供一本入门参考书,使他们能够学习和掌握烟花算法的从初级到高级的全面知识,期望能吸引更多的研究人员关注烟花算法,并从事烟花算法的研究和应用,促进我国研究者对烟花算法等新兴群体智能算法的研究,提高我们的研究水平。

本书的特色是以新思想为先导,以算法研究为主线,结合计算机编程的算法实现,系统介绍烟花算法的产生、提出、改进、发展及应用。同时,书中提供了一些重要算法的计算机源程序和标准测试函数集,使新进入烟花算法领域的读者能以更快的速度认识这些重要的烟花算法及其改进算法的特点和性能,并能很快利用学习到的算法来解决遇到的实际问题,从而提高他们对烟花算法研究的兴趣和继续探索的热情。本书提供了到目前为止的有关烟花算法研究的完整参考文献。这些都是研究烟花算法不可或缺的有价值的参考资料。

本书分四个部分共 16 章。第一部分是基础理论,包括第 1 章到第 4 章,第二部分是改进算法研究,包括第 5 章到第 10 章,第三部分是高级研究主题,包括第 11 章到第 13 章,第四部分是烟花算法的应用研究,包括第 14 章到第 17 章。下面简要说明各章的主要内容。

第 1 章为绪论,主要介绍烟花算法产生的动机,烟花算法作为群体智能优化算法的相关术语,烟花算法组成、特点和研究内容。重点介绍烟花算法的研究历史与现状,最后给出烟花算法的未来前景和急需研究的 25 个问题。

第 2 章详细介绍烟花算法,包括烟花算法的提出、基本原理、实现方法,以及烟花算法的各个组成部分,包括爆炸算子、变异算子、映射规则 and 选择策略;给出了烟花算法的框架图、流程图和伪代码;分析了烟花算法的特点和各个因子对算法性能的影响。同时,与遗传算法和粒子群算法等典型群体智能优化算法进行了比较。

第 3 章给出烟花算法的理论分析,包括通过定义烟花算法的马尔可夫随机过程的概念,证明烟花算法的全局收敛性。将烟花算法看成是一个可吸收的马尔可夫过程,对烟花算法的时间复杂度进行了深入分析,进而计算在近似区域内烟花算法的期望收敛时间。所有这些工作为烟花算法的研究提供了理论基础。

第 4 章详细分析各种随机数对烟花算法性能的影响。虽然不同的随机数产生方法在统计上的随机性有差别,但它们对烟花的性能并没有显著的影响。即使是最简单的 LCG 算法也表现的相当好,虽然由 LCG 产生的随机数序列的质量显著不如其他更复杂的算法好。因此,在选择随机数生成器时,我们应该首先考虑效率最高的算法。

第 5 章介绍一种基于适应度函数近似的加速型烟花算法。具体地,本章首先介绍了进化算法加速的一般策略,着重介绍了通过种群位置信息和适应度函数值对解空间的形状进行估计,根据估计的形状获取其精英解,并引入当前的种群中以

加速算法。对于烟花算法,我们针对精英加速策略,详细讨论了抽样策略、抽样样本个数,以及近似估计方法对于加速烟花算法性能的影响。

第6章介绍一种新的计算烟花爆炸数目和烟花爆炸幅度的方法,即通过设计一个转移函数,对烟花爆炸的数量进行控制,并用一个参数动态控制FWA在迭代过程中的开采性和探索性。此外,我们还提出一种新的变异算子,以增强种群的多样性。

第7章分析基本烟花算法的工作机制,主要包括对基本烟花算法工作流程中每个操作算子进行的细致分析。在分析的基础上,指出了基本烟花算法算子中存在的缺陷和性能的不足之处,包括基本烟花算法中的爆炸算子、高斯变异算子、选择算子及映射规则。针对这些性能缺陷提出了改进方法,即增强烟花算法(EFWA)。本章还进一步细致分析和验证了改进算子的效果,证明了增强烟花算法相对于基本烟花算法具有明显的性能优势。

第8章在EFWA中的最小爆炸半径检测策略并没有考虑到算法优化过程中的动态优化的信息。因此,本章针对烟花种群中适应度值最优的烟花,提出了调整适应度值最优烟花的爆炸半径的动态调整策略,从而提出了动态搜索烟花算法(dynFWA),并对其进行了详细的论述和分析。实验表明dynFWA具有良好的优化性能。

第9章介绍一种自适应烟花算法(AFWA)。通过分析FWA和EFWA中计算爆炸半径的机制,使用最优烟花和一个特定的被选出的个体之间的距离作为爆炸半径,我们提出一种自适应爆炸半径,它能够根据搜索结果自适应地调节。通过把这种自适应爆炸半径应用于EFWA,提出一种自适应烟花算法。实验证明,提出的AFWA不仅优于EFWA,也明显优于一些经典的粒子群优化算法,如SPSO2007和SPSO2011。

第10章介绍混合算法。烟花算法通过与其他算法结合而发展出许多新的、高效的混合算法,例如引入差分变异的烟花算法(FWA-DM),引入文化算法后提出的文化烟花算法(CFWA),以及基于生物地理学优化的烟花算法(BBO-FWA)。这些混合算法都提高了烟花算法的优化性能,给发展更为广泛的混合方案指明了方向。

第11章介绍基于烟花算法的多目标烟花算法及其在农作物施肥的应用。本章针对油作物的精确施肥问题提出了一种高效的多目标烟花优化算法(MOFOA)。在MOFOA中,使用支配强度来评估个体的适应度并用于选择,引入差分进化的操作增强算法的探索能力和多样性。本章为烟花算法在多目标优化问题的研究方向提供了新的视角,除去初始化操作,其他的操作都可以移植到其他多目标问题中去。

第12章介绍我们将烟花算法应用到离散组合优化问题的最新探索工作。这里仅仅介绍了FWA在旅行商问题上的一个简单应用,作为抛砖引玉。本章介绍的离

散烟花算法保留烟花算法的整体框架,借鉴了模拟退火의思想和局部搜索方法对爆炸算子、选择策略和变异算子做了适当的改变,结果也表明离散烟花算法可以有效地求解旅行商问题。

第 13 章介绍基于 GPU 的并行烟花算法 (GPU-FWA)。烟花算法在优化求解过程中需要对目标函数进行大量的评估,这极大地限制了其在某些大规模问题上的应用。烟花算法的内在并行性,使得其可以很好地利用 GPU 多核心、高度并行的特性,获得良好的加速效果。本章首先介绍 GPU 通用计算这一新兴的高性能计算领域,接着在此基础上介绍 GPU-FWA 的算法思想及具体硬件实现。然后,介绍 GPU-FWA 利用 GPU 强大的并行计算能力,大大加速优化过程。同时,由于 GPU-FWA 不需要复杂的数据结构,且易于实现,可以用于求解大规模问题。实验表明, GPU-FWA 不仅在性能上要优于烟花算法和 PSO,而且可以取得上百倍的加速比。

第 14 章介绍将烟花算法等群体智能优化算法应用于非负矩阵分解 (NMF) 问题。NMF 最先是由 Lee 和 Seung 在 1999 年提出,之后被广泛使用在各种大规模数据信息处理过程中。NMF 是通过寻找两个非负低秩矩阵来估计原始目标矩阵。传统的迭代求解算法不能保证得到较优的分解效果,本章介绍我们尝试使用烟花算法等群体智能算法 (包括烟花算法、鱼群算法、遗传算法、粒子群优化算法) 来完成 NMF 计算过程,其效果令人满意。

第 15 章介绍烟花算法在聚类及模式识别中的应用。由于文档聚类在数据挖掘领域具有非常重要的地位,本章首先介绍将烟花算法应用于文档聚类,这不仅是对烟花算法应用领域的拓展,也对文档聚类提供了新视野和新方向。另一方面,垃圾电子邮件的智能检测方法将垃圾电子邮件检测看作一个两类分类问题,通过特征提取和分类两个步骤对垃圾电子邮件进行检测,在该过程中算法参数如何选取对检测性能将产生很大影响。同时,本章介绍了如何利用烟花算法对垃圾电子邮件检测算法进行参数优化。最后,在图像识别方面,基于烟花算法的统一距离度量模型能够给出相对于汉明距离和角度距离度量方法更低的等错误率值。因此,所有这些成果应用表明,烟花算法是一个具有很大潜力的群体智能优化算法。

第 16 章介绍如何在群体机器人系统中引入烟花算法中的爆炸策略用于解决群体机器人多目标搜索问题。我们提出了一个分组爆炸策略 (GES),其中群体将机器人个体的邻域模拟成一次烟花的爆炸,并根据适应值信息调整群中心的位置,以进行下一次的模拟爆炸。这样群体充分利用了分组内的个体协同和分组之间的间接交互。实验表明,相较于现有的基于群体智能的搜索算法,GES 在大多数情况下表现出了更加优秀的性能,尤其是在目标比较稀疏的情况下优势更为明显。

第 17 章介绍烟花算法应用于地球科学中的反演问题。我们知道,反演问题的

复杂性使得基于反演理论建立起来的数值模型高度不适定,而且观测数据通常包括大量的噪声。因此,近年来,地学反演大量运用群体智能优化方法(如 GA、PSO 等)来解决。本章介绍利用烟花算法求解地学反演问题,从实验结果来看,烟花算法能够有效地求解反演问题,其性能优于 GA 及其多个变种,比 PSO 略好或相当。

本书中的绝大部分内容都是我和我指导的博士后、博士生和硕士生的研究成果。他们包括朱元春博士、Andreas Janeczek 博士、刘建华博士、裴岩博士、张鹏涛博士、郑忠阳博士、肖忠民硕士、周游硕士、何文睿硕士,以及博士生郑少秋、丁科、余超、李骏之、米古月、胡巍巍,硕士生杨翔、刘浪。感谢他们的情和辛苦工作,有他们的帮助和努力才使得烟花算法的研究能够进展得如此的迅速和完善,并且具有可喜的发展前景。

另外,在本书初稿的整理中,郑少秋、余超、丁科、郑忠阳、李骏之和徐威迪等同学都发挥了非常重要的作用,参与了部分书稿的整理工作,同时,米古月和胡巍巍也参与了部分工作,我与他们的共同努力和艰苦工作才将这些分散在各种学术论文中的研究成果整理成目前的状态。这里也给予他们最为特别的感谢。

接着,还要感谢浙江理工大学的郑宇军副教授及其领导的团队,感谢他无私地提供并授权我们使用他们在烟花算法方面的最新研究成果,保证了本书的完整性。

真诚地感谢每一个给予过我帮助的人。

本书相关的科研工作和内容得到了国家自然科学基金(61375119, 61170057, 60875080, 60673020, 61110306107, 61010306001)和 973 计划(2015CB352302)的大力支持,在此表示衷心的感谢。

另外,感谢中国科学院科学出版基金对本书出版的资助。

由于作者水平有限,书中难免会出现一些错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

最后,希望本书的出版有助于推动我国在群体智能算法方面的深入研究与广泛应用。



2015 年 3 月于北京大学燕园

目 录

《信息科学技术学术著作丛书》序

前言

第一部分 基础理论

第 1 章 绪论	3
1.1 起源与动机	3
1.2 烟花算法属于群体智能优化算法研究范畴	4
1.3 烟花算法的组成与研究内容	5
1.4 优点与特色	7
1.5 研究历史与现状	8
1.6 未来发展方向	10
1.7 未来五年内需要研究的 25 个问题	11
1.8 小结	12
第 2 章 烟花算法	13
2.1 引言	13
2.2 烟花算法的组成	15
2.3 烟花算法的实现	17
2.4 基本烟花算法特点分析	22
2.5 影响算法性能的因素分析	24
2.6 烟花算法与遗传算法和粒子群优化算法的比较	26
2.7 实验结果及分析	29
2.8 小结	32
第 3 章 烟花算法的理论分析	33
3.1 随机模型	33
3.2 全局收敛性	34
3.3 时间复杂度的基本理论	36
3.4 时间复杂度分析	40
3.5 小结	43
第 4 章 随机数对烟花算法性能的影响	44
4.1 引言	44

4.2	随机数产生器	45
4.3	实验设定	47
4.4	实验结果与分析	49
4.5	小结	56

第二部分 改进算法研究

第 5 章	基于适应度函数值估计的烟花算法	59
5.1	进化计算算法加速策略	59
5.2	基于适应度函数值估计的烟花算法	62
5.3	实验	64
5.4	性能分析及讨论	66
5.5	小结	71
第 6 章	构造型烟花算法	72
6.1	对烟花算法各组成部分的改进	72
6.2	实验	77
6.3	小结	80
第 7 章	增强烟花算法	81
7.1	对基本烟花算法的分析	81
7.2	增强烟花算法	82
7.3	实验	89
7.4	小结	95
第 8 章	动态搜索烟花算法	96
8.1	引言	96
8.2	增强烟花算法简介	97
8.3	增强烟花算法最小爆炸半径检查策略	99
8.4	动态搜索烟花算法	100
8.5	实验	106
8.6	小结	110
第 9 章	自适应烟花算法	112
9.1	引言	112
9.2	对 FWA 和 EFWA 中爆炸半径的分析	112
9.3	自适应爆炸半径	113
9.4	自适应烟花算法	120
9.5	实验	121

9.6 讨论	122
9.7 小结	123
第 10 章 混合算法	124
10.1 引言	124
10.2 带差分变异的烟花算法	124
10.3 差分演化与烟花算法的混合算法	132
10.4 文化烟花算法	133
10.5 基于生物地理学优化的烟花算法	134
10.6 小结	136

第三部分 高级主题

第 11 章 多目标烟花算法	139
11.1 基本概念	139
11.2 施肥问题	140
11.3 多目标烟花算法	142
11.4 实验和讨论	146
11.5 小结	155
第 12 章 求解 TSP 的离散烟花算法	156
12.1 旅行商问题	156
12.2 离散烟花算法	158
12.3 实验结果及其分析	171
12.4 与传统算法比较	174
12.5 小结	174
第 13 章 基于 GPU 的并行烟花算法	176
13.1 引言	176
13.2 GPU 通用计算	177
13.3 基于 GPU 的烟花算法及实现	194
13.4 GPU-FWA 的算法实现	199
13.5 实验分析	201
13.6 小结	205

第四部分 应 用

第 14 章 非负矩阵分解	209
14.1 引言	209

14.2	相关工作	210
14.3	低秩估计	211
14.4	基于群体智能算法的非负矩阵计算算法	213
14.5	实验设置	217
14.6	实验结果和讨论	219
14.7	小结	225
第 15 章	聚类 and 模式识别应用	226
15.1	烟花算法在文档聚类中的应用	226
15.2	垃圾邮件检测算法参数优化	231
15.3	图像识别	237
15.4	小结	243
第 16 章	群体机器人多目标搜索问题	244
16.1	引言	244
16.2	多目标搜索问题定义	247
16.3	分组爆炸策略	250
16.4	算法分析	256
16.5	实验结果	257
16.6	小结	260
第 17 章	地学反演问题	261
17.1	引言	261
17.2	反演问题	261
17.3	实验	265
17.4	小结	267
参考文献		268
附录		282
附录 A	测试函数集	282
附录 B	资源	292
附录 C	术语列表	294
附录 D	符号列表	296
索引		299

第1章 绪论

第一部分

基础理论

第1章 绪 论

1.1 起源与动机

记得小的时候在四川老家,每逢一年中最重要的节日春节到来时,我都会邀上几位要好的小伙伴或同学一起到空旷的操场或人烟稀少的街道上,尽情燃放一种在空中爆炸的爆竹花炮。有时,几个小伙伴还会一起进行比赛,看看谁的爆竹扔得高、放得响,在空中燃放出最美丽的图像。这些都是伴随着我们儿时快乐和美好的时光,在我儿时的脑海里留下了很深的印迹。

2006年春节,我来北京大学任教将近一年了。在这段时间里,我对进化计算投入了较多的精力,进行了深入的研究。因此,在这段时间不管在干什么和遇到什么新鲜的事物都会看看它们是否与进化计算能联系上。恰好在这一年春节期间,北京将禁放烟花爆竹的规定改为限放,首都市民都迫切地期待着除夕之夜的到来,盼望着过一个更加热闹和欢庆的春节。这年的除夕之夜,北京的天空尽情地开放,市民们都争相燃放。人们燃放出了大量绚丽多彩的礼花,将漆黑的夜空照得亮如白昼,五彩斑斓的烟花,燃放出各种美丽的图像,激发了我内心深处的儿时回忆,心情无比的畅快和愉悦。

此时,我的脑海里突然将烟花的爆炸图像与进化计算中随机搜索建立起了联系,产生了一种可以用像烟花爆炸图像一样的方式来对问题解空间进行有效搜索的新方式。通过模拟烟花爆炸的方式来进行多点同时爆炸式搜索,这也许是一种高效的搜索方式,是有别于现有其他方法的新型搜索方法,从而有了研究这种爆炸搜索方式的想法,当时为其取名烟花算法 (fireworks algorithm, FWA)。

虽然烟花算法这个名称比较直观和简洁,但是由于它没有直接与优化等求解问题建立直接的联系,此后有些研究人员有时也用其他别称来称呼我们的烟花算法,如烟花优化算法、烟花爆炸算法、烟花爆炸优化算法、烟花爆炸搜索算法、爆炸搜索方法等。尽管有这些不同的别称,这里统一采用原始的名称烟花算法,以免混淆。