

文章编号:2095-7386(2016)04-0001-09

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2016.04.001

智能优化算法研究及应用展望

李 智

(武汉轻工大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430023)

摘 要: 针对智能优化算法理论和应用的不断发展,分析了智能优化算法的特点,对蚁群算法、粒子群算法、鱼群算法等7种不同算法的原理、算法过程及应用进行了综述,并对智能算法的进一步发展进行了探讨。

关键词: 智能算法;优化;算法结构;计算过程

中图分类号: TP 18

文献标识码: A

Survey on intelligent optimization algorithms

LI Zhi

(School of Electrical and Electronic Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: According to the development of the theory and application of intelligent optimization algorithm, the article analyzes the characteristics of intelligent optimization algorithm. Seven different algorithms and application process including ant colony algorithm, particle swarm algorithm, swarm algorithm principle etc. are summarized, and the further development of intelligent algorithm has been discussed.

Key words: intelligent optimization algorithms; optimization; algorithm structure; calculation process

1 引言

以模拟自然界生物智能行为为背景的优化算法,如鸟群算法、蚁群算法、蜂群算法、粒子群算法、萤火虫算法等,以固体退火理论及系统稳定性理论为基础的模拟退火算法、Hopfield 神经优化算法,以及遗传算法、免疫算法、禁忌搜索算法等,都可以归结为人工智能优化算法。

之所以称之为智能算法,是因为人脑的智能行为是由大量神经元通过有机组织和协调来实现某一目的,而生物的某些行为如觅食、建立巢穴等也是通过群体协作来实现的,与人类神经元的组织与协调具有高度的相似性。人类的神经元自身简单,其活动是通过各个神经元之间的相互协作和协调完成

的,是个体与群体协作完成任务的完美典范,而生物完成某项任务也是通过个体与群体的有效组织来实现的。

一般而言,个体的行为较为简单,可以用单一的功能函数来描述,而协作是一种个体之间的相互作用,表现为个体之间的通讯能力,这种通讯能力就是我们进行分布式求解的关键所在。因此智能算法具有以下几个特征:个体描述简单,实现方便;个体之间具有广泛分布,如觅食的蚂蚁四处找食;没有预期的目标,具有鲁棒性;个体之间通过通讯来进行合作,寻优范围大。

2 智能算法模型特点

智能优化算法的出发点是模拟自然界生物群体

收稿日期:2016-10-10.

作者简介:李智(1964-),男,教授,博士,E-mail: lizhihb@aliyun.com.

生活时,个体之间的互相交流与合作,利用个体的简单、有限行为扩展到群体的、完成复杂任务的整体能力。因此仿生的算法具有如下特点:从单个生物行为出发,研究其个体行为特征,并采用数学模型进行研究和描述,并不断完善;研究个体之间的通讯行为,形成整体融合,并采用数学模型表示之。考虑到单个生物的限制性,还可以将单个算法与其它算法相结合,形成各种混合型算法。

研究原则一般是从生物群体生活的自然机理着手,通过严格的数学分析与推理,得到生物个体的运动模型,使算法具有严密的理论基础,尽可能地建模准确,算法收敛性快,以及较高的解空间搜索效率。在各种实验过程中,一般没有现行数据或经验,实验者的经验起很大的作用。

由于不同生物个体之间差异较大,个体的功能描述也千差万别,但在优化算法方面有其统一的框架模式,都是基于概率的随机搜索方式,各种不同算法在结构、内容和计算方法等方面具有较大的相似性。可归结为如下主体形式:

Step1:设置参数,初始化种群。

Step2:随机生成可行解,并由此计算其相对应的适应值。

Step3:通过循环比较,选择优化的解和相对应的适应值。

由于不同生物的个体行为数学描述不一,各种算法的新解更新法则也不一样,这一点也可以体现生物的多样性。

3 智能优化算法

3.1 蚁群算法

蚁群算法(Ant Colony Optimization)^[1]是Dorigo受蚂蚁觅食时的通讯机制启发,在上世纪90年代提出的,并采用该算法解决货郎担问题。

该算法思想是:每只蚂蚁觅食时,都在随机的路线上留下信息素,由于信息素具有时间效应,会随着时间的延长而减弱。因此,当某只蚂蚁发现了食物,那么其它蚂蚁就会向这条路线进行聚集,从而导致这条路线上的信息素增多。每只蚂蚁每次随机选择要走的路线为信息素比较浓的路线,也就是就近的路线,这条就近的路线也就是最佳路线。这种算法利用正反馈原理,使得较优的路径能够有较大机会被选择。

与真实的蚂蚁不同,蚁群算法中的蚂蚁被赋予了部分记忆,并且可以感知某些启发信息,这种记忆

并非存储于蚂蚁个体,而是分布在路径上。蚁群通过感知路径上的信息素进行通讯。蚂蚁之间的这种间接通讯方式称为Stigmergy机制,个体之间没有直接信息交换,而是通过改变他们共同存在的环境来进行交互,个体之间又通过环境去影响其它的个体,从而形成正反馈机制。

基本蚁群算法的计算过程^[2]:

Step1:设置参数,初始化路线信息素。

Step2:将 m 只蚂蚁置于各自的初始邻域,随机生成 m 组可行解,并计算其适应度。

Step3:计算各个蚂蚁的适应度,并检查是否为优化解,记下优化解。

Step4:按强度更新信息素。

Step5:检查是否全局优化解,如是优化解,结束;反之,继续迭代,返回Step3。

在蚁群算法的基本原理研究方面,出现了很多改进的算法研究,有参数设置改进的^[3-4],有对收敛性进行改进研究的^[5-7],从而提出了精英策略蚁群算法^[8],最大-最小蚁群算法^[9]等,以及将蚁群算法与其它算法相结合^[10-13],提高了算法的性能和效率。

在研究理论的同时,应用方面的研究也在不断地拓展,采用改进的蚁群算法用于客运专线电力负荷建模与参数辨识^[14],基于模型的子空间聚类与时间段蚁群算法的合同生产批量调度方法^[15],文献[16]将蚁群算法应用于大型灌区节水改造综合评价。文献[17]—[22]将蚁群算法应用于求解覆盖表生成问题、振动筛参数设计、分布式卫星光网络波长路由分配技术和数字微流控生物芯片在线测试路径优化,以及内燃机配汽机构型动力学仿真和煤炭运输。以上诸文献,都有效地解决了科研中存在的问题,证明了该算法应用于实际优化问题求解的可行性。

3.2 粒子群算法

粒子群算法(Particle Swarm Optimization)^[23-24]是Kennedy和Eberhart于1995年提出,是一种源于对鸟群捕食行为的研究而发明的进化计算技术。其出发点是设想有一群鸟在随机搜索一块食物,寻找到该食物的最简单有效的方法,就是搜索距离食物最近的鸟的周围区域,其基本思想是优化问题的每一个解称为一个粒子,定义一个符合度函数来衡量每个粒子的优越程度。每个粒子根据自己和其它粒子的“飞行经验”群游,从而达到从全空间搜索最优解的目的。

基本粒子群算法的计算过程^[25]:

Step1:初始化所有粒子,随机给出初始位置和速度。

Step2:计算每个粒子在当前状态下的适应值,并计算每个粒子的目标值。

Step3:将每个粒子与 Step2 中的计算的适应函数值与自身优化解进行比较,记录下优化解。

Step4:每个粒子的当前状态与群体最好状态进行比较,记录最好者。

Step5:完成上述计算后,再进行新一轮计算,返回 Step2,直至寻优结束。

在粒子群算法的基本原理研究方面,也同样有对参数进行设置和收敛性进行改进的^[26-27]。这些研究对于粒子群算法的应用具有重要意义。

通过算法结合,也可以提高算法收敛速度,文献[28]研究了一种带有被动聚集的粒子群优化算法,在速度更新中增加了随机粒子速度项,以实现加快算法的收敛速度。还有将粒子群算法进行多阶段分解^[29],与混沌算法相结合^[30],与遗传算法相结合^[31],与模拟退火算法相结合^[32]等,文献[33]针对平衡多目标优化的全局搜索和局部寻优的能力,提出一种多策略差分进化的元胞多目标粒子群算法,文献[34]将粒子群算法与布谷鸟算法相结合,提高了动态多种群粒子群(DMS-PSO)算法的全局搜索能力。

应用方面的研究不局限于某个领域,在弱信号检测方面^[35],有机半导体 NPB 传输特性辨识方面^[36],延河流域水沙模拟^[37],农业工程项目的优化计算^[38],内燃机零部件的优化设计^[39]。采用改进的粒子群算法应用于 Volterra 模型参数辨识^[40],将非线性系统的辨识问题转化为高维参数空间上的优化问题。

3.3 鱼群算法

李晓磊 2002 年根据鱼群的行为特点,并应用动物自治体的模型,提出了一种自下而上设计的新型的寻优策略——人工鱼群算法(Fish Swarm Optimization)^[41]。该算法模拟鱼群觅食的特性,将鱼的活动分为 3 种行为模式:觅食行为(鱼的基本行为,表现为鱼发现食物并向其方向游动);追尾行为(表现为其它鱼群向发现食物的鱼的方向聚集);聚群行为(由于其它鱼的聚集,形成庞大的鱼群)。鱼群算法通过食物浓度和中心位置处的鱼伙伴数目来确定搜索方向,使鱼向食物浓度高的地方聚集,达到全局优化目的。通过启发式搜索策略,是一种广义领域

搜索算法。

在算法实现过程中,鱼的状态表示待优化问题的解,目标函数用食物密度表示。定义一个拥挤因子描述拥挤程度,当食物较多而又不拥挤时,是最佳觅食环境,当环境拥挤时鱼就离开此环境,游往别处。

基本鱼群觅食算法的计算过程^[42]:

Step1:设置最大尝试次数。

Step2:鱼从一个状态向另一个状态转移,即产生新解。

Step3:比较状态转移前和转移后的适应值,记录下优化值。

Step4:检查终止条件,满足则结束;反之,返回 Step2。

对于追尾行为,当鱼从状态 X_i 转移到状态 X_j 能获得更好的适应值,鱼就从状态 X_j 移动到下一步;反之,返回觅食算法过程。

对于聚群行为,当鱼感知到范围内食物较多,同时又不拥挤,就向鱼群中心移动;反之,返回觅食算法过程。

鱼群算法在理论上也在不断改进,文献[43]通过增加鱼群的协调行为,解决优化问题中方程数多、变量维数高的问题。文献[44]为提高鱼群算法寻优速度,提出了基于视野和步长动态调整思想,并应用于番茄光环境调控管理。文献[45]将蚁群算法与鱼群算法相融合,先应用鱼群算法对搜索空间进行全局搜索,然后以当代全局最优解为基础利用蚁群算法对其领域进行局部搜索,并将该方法应用于水轮机—引水管道系统参数辨识。文献[46]针对鱼群算法收敛速度慢、寻优精度低的缺陷,提出了一种基于参数动态调整的改进鱼群算法。动态调整视野和拥挤因子以提高算法的搜索效率。

3.4 免疫遗传算法

免疫算法^[47]具有抗体多样性、自我调节能力和免疫记忆功能,与遗传算法相结合可以实现优化计算,称之为免疫遗传算法(Immune Genetic Optimization)抗体多样性表现在通过细胞的分裂作用和分化作用,免疫系统产生大量抗体抵御抗原入侵,这种多样性的遗传机理用于搜索优化。自我调节能力是免疫系统具有维持免疫平衡的机制,通过对抗体的抑制和促进,实现自我调节产生必要抗体,这个功能对应算法的局部搜索能力。免疫记忆功能是产生抗体的部分细胞会作为记忆细胞被保留,对今后入侵的同类抗原,相应的记忆细胞会被迅速激发产生大

量抗体,对应算法加快搜索速度,提高算法总体搜索能力。

免疫遗传算法的计算过程^[48]:

Step1:随机产生初始父代种群,根据先验知识抽取疫苗。

Step2:若当前群体包含最佳个体,记录,结束计算;反之,继续。

Step3:对于目前父代种群进行交叉、变异操作,得到新的种群。

Step4:对新的种群进行免疫选择操作,得到新一代父本,返回 Step2。

免疫算法的理论研究和应用也在不断进行,蔡自兴等^[49]对免疫算法的产生、发展和作用机理进行了研究,比较了不同免疫算法的设计方法及其优劣,并讨论了免疫算法的种类。在免疫算法收敛性方面,洪露等^[50]运用随机过程相关理论,对实数编码免疫算法的收敛速度估计进行了研究和分析。文献[51]将免疫算法与贝叶斯优化算法相结合,利用免疫算法的导向性变异,对贝叶斯网络产生的解进行变异,提高了种群中个体的适应度。戚玉涛等^[52]将基于 Pareto 支配关系的局部下山算子和差分算子引入免疫多目标优化算法之中,提出了一种求解多目标问题的 Memetic 免疫优化算法。LIU 等^[53]也提出了动态多目标免疫启发算法。

免疫算法的应用面很广,左兴权等^[54]将线性规划与免疫算法结合,进行双行设备布局设计。文献[55]采用免疫算法对推测多线程中线程划分参数进行优化,文献[56]采用先验知识疫苗接种的方法,提出一种基于动态抗体记忆库的免疫优化算法,提高了算法的求解精度。

3.5 Hopfield 神经网络优化算法

Hopfield 神经优化网络 (Hopfield Neural Network Optimization)^[57]是一个反馈型网络,其重要特点是其具有稳定状态,当网络达到稳定状态时,就是它的能量函数达到最小值的时候。

Hopfield 神经网络用于求解优化问题,就是源于该神经网络能量函数的极小点对应于系统的稳定平衡点,求解问题的优化解即转化为求解系统的稳态输出,也就是对应神经网络能量函数的极小点。Hopfield 神经网络优化算法模型参考文献[58]。

文献[59]对 Hopfield 神经网络所存在的极小值问题及缺乏学习能力的问题,提出了一种学习算法。将决定约束条件权值大小的系数作为学习参数,通过修正参数,提高了收敛性。文献[60]对联想记忆

神经网络的特性进行了分析,基于双向联想存储器原理,对自联想记忆 Hopfield 模型进行了扩展,建造了适合于求解模式识别问题的异联想记忆 Hopfield 神经网络模型结构。

Hopfield 神经网络计算过程:

Step1:将优化问题数学模型与 Hopfield 神经网络动态方程有机结合,建立目标函数与能量函数对应关系。

Step2:初始化网络参数,设置初值。

Step3:求出目标函数所对应的能量函数。

Step4:检查系统输出值,满足要求;结束,反之,重新更新神经元矩阵,返回 Step2。

Hopfield 神经网络优化计算不同于生物群体计算,是一种以电路起振直至稳态输出的工作方式,是基于系统稳定性的一种分析方法,具有并行计算的特点。

Hopfield 神经网络应用涉及到各个行业,文献[61]、文献[62]分别将该算法应用于钢铁的混匀矿配比和铁道运输,文献[63]提出了一种幅值相位连续多值复数 Hopfield 神经网络算法,解决统计量算法盲检测多进制振幅键控信号的缺陷,文献[64]研究了时滞 Hopfield 神经网络的全局指数稳定性问题。

Adnene 等在文献[65]中,研究了一个新的具有时变时滞和分布时滞 Hopfield 神经网络的全局指数稳定性,通过采用适当的 Lyapunov 函数,得到指数收敛时一些时滞相关的充分条件。余刃等^[66]将 Hopfield 神经网络应用于核动力装置异常运行状态监测,韩广等^[67]提出一种基于拉格朗日乘子法的 Hopfield 神经网络优化方法,解决前置反硝化污水处理过程的优化控制问题。

3.6 模拟退火算法

模拟退火算法 (Simulated Annealing Optimization)^[68]思想最早由 Metropolis 在 1953 年提出,1983 年 Kirkpatrick 等成功将退火思想引入组合优化领域。该算法应用于优化问题的求解,其出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般优化问题的相似性^[69]。

模拟退火算法是一种启发式随机搜索算法,与其它随机搜索不同,退火算法引入了物理系统退火过程的自然机制。在计算过程中,即接受好的适应值,也接受差的适应值,只不过是接受差值的概率随着温度的降低而逐渐减小,从而使得算法过程中跳出局部优化解而获得全局优化解,提高了算法求取

全局优化的可靠性。

模拟退火算法思想来源于固体退火过程,当固体加热到一定高的温度,让其徐徐降温。降温过程中,固体内粒子渐趋有序,在每个温度都达到平衡态,最后在常温时达到基态,内能最小。根据 Metropolis 准则,从一随机给定解开始,然后由类似物理过程中的温度这样一个参数控制从解的邻域随机产生一新解,算法持续进行“产生新解—判断—接受或舍弃”的迭代过程,对应着固体从高温趋于常温的平衡过程。经过大量的解变换后,可以得到给定控制参数值时优化问题的相对最优解。然后减小控制参数的值,重复执行迭代过程,当系统平衡时,其状态对应于优化问题的整体最优解。

模拟退火算法的计算过程^[70]:

Step1:随机给定一个初始解,设置一个初始温度。

Step2:检查温度是否达到常温,是,保留优化值和适应值,结束;反之,随机从邻域产生新解,计算适应值。

Step3:将所计算的适应值与前次计算比较,如优于前次,则保留;反之,放弃。

Step4:徐徐降低温度,返回 Step2。

在模拟退火算法理论的研究与改进方面,主要有与其它算法相结合的研究。比如与遗传算法的结合^[71],与蚁群算法的结合^[72],与粒子群算法的结合^[73]等。

应用领域比较广泛,用于工业设计方面,比如文献[74]对汽车悬架刚度参数进行了优化设计,使得悬架系统固有频率配置更加合理,主要方向的解耦率增大。文献[75]对机载车辆气囊缓冲系统的特性与参数进行了优化设计,降低了机载车辆降落的最大加速度,吸收增加了气囊的能量。类似的研究和应用还有很多,可参见其它文献。

3.7 禁忌搜索算法

禁忌搜索算法(Tabu Search Optimization)^[76]是模拟人的思维的一种智能搜索算法,由 Glover 提出,其原理是利用人们对已经搜索的地方不会立即再搜索。因此,算法中增加了记忆的因素,对已经搜索过的进行记录和选择,以指导下一步搜索方向。在算法实现过程中,这一原理用 tabu 表来表述,tabu 表保存最近若干迭代过程中所实现的移动,避免了重复搜索。

禁忌搜索算法同遗传算法、蚁群算法一样,也是随机搜索算法,但由于其自身特性,它的搜索过程不

但具有非确定性,而且具有避免陷入局部优化而收敛全局优化的能力。

禁忌搜索算法包括求解域、禁忌表、禁忌长度、候选集合、评价函数、特赦规则等。禁忌对象可以是解的变化、向量的变化和目標值变化中的一种,禁忌长度是被禁对象不允许选取的迭代次数,候选集合由领域中的一些元素组成,评价函数是候选集合元素选取的一个评价公式,候选集合的元素通过评价函数来选取。

算法从某一个初始解开始,估计该解的目标函数值,设定好备选解集,如果最好的移动不是被禁忌的,或者是被禁忌的但满足特赦条件,那么就选择该移动,并把该备选解作为新的当前解。反之,选择不被禁忌的最好移动所对应的备选解作为当前解。重复以上过程,计算结束后得到的最好解就作为禁忌搜索算法解决该问题的最终解。

禁忌搜索算法的计算过程^[77]:

Step1:初始化,产生新解,并对在禁忌搜索过程中涉及到的参数进行初始化。

Step2:循环,产生备选解集(邻域),计算各个备选解的目标函数,并根据目标函数值、禁忌状态和特赦条件选择一个备选解。

Step3:从当前解移动到该备选解,作为新的当前解,将新的当前解装入 tabu 表,使其保持一个禁忌周期的禁忌状态。

Step4:检查是否满足特赦规则,满足,将满足特赦规则解记为当前解,更新 tabu 表;反之,将非禁忌表对应的优化解记为当前解,更新 tabu 表,返回 Step2。

对于禁忌搜索算法的理论和改进研究方面,陈晓峰^[78]等针对量子智能算法对高维函数的优化时存在容易陷入局部最优的问题,提出了量子禁忌搜索算法,提高了算法收敛速度。潘郁^[79]等针对

$1|fuzzy|\min\sum_{i=1}^n C_i$ 模型的特点,设计带有惩罚项的分段线性适应度函数,以规避解的不可行性。并且,取不同的禁忌长度,观察禁忌搜索状态随迭代步数的移动轨迹,得到了较好的计算参数组合。钱洁^[80]等在量子进化算法中融合禁忌搜索算法思想,采用一种量子自适应邻域映射机制,且禁忌表的禁忌长度可随量子态动态调整,这些策略较好地解决了集中性和多样性搜索的矛盾。文献[81]针对产品质量和路径的多目标自动化立体仓库调度优化问题,为平衡解的收敛性和多样性,提出一种改进的多目

标禁忌搜索算法。

在算法组合研究方面,文献[82]提出一种禁忌搜索与改进微粒群算法的混合优化策略,在解决目标分配问题时具有优良的优化性能和时间性能。文献[83]将禁忌搜索算法与模拟退火算法相结合,应用于求解多峰复杂函数,根据函数复杂度自适应调整步长控制参数,然后根据调整后步长求得函数的粗糙解,在此基础上再使用初始步长求得全局最优解。

4 结束语

智能优化算法发展至今已有20余年,其理论的研究和探讨还在不断深入,应用领域也在不断拓宽,显示其广泛的用途和强大的生命力。从发展的角度看,智能计算将不仅仅只是功能模仿,更重要的是使得研究对象与实际存在具有相同的特性,这将是一个全新的研究理念,也是一个漫长的研究过程。

随着人工智能理论的不断深入研究,还将有更多更新的算法被挖掘,新概念、新理论、新方法、新技术不断涌现。单从算法角度来看,主要深入研究和探讨的主要是以下几个方面:

(1)深化现有算法的理论研究,比如在算法收敛性、算法涉及到的参数设定等方面,同时拓展新的算法领域,积极寻找新的理论基础。

(2)在改进现有算法的同时,不断地将不同算法进行融合,取长补短,提高算法的数学理论基础分析。

(3)在研究算法理论的同时,将算法广泛应用于不同行业优化设计,并在实际运用中发现问题和不足,并提出解决方法。

总之,智能优化算法还有大量的工作要做,例如具备普遍意义的数学理论分析还显得不足,还有很多潜在的符合算法的理论没有被发现。这一切使得智能优化算法的研究与应用将成为一个具有实际意义的研究课题。

参考文献:

- [1] Colormi A, DORIGO M, MANIEZZO V. Distributed Optimization by Ant Colonies [C]. Proceedings of the First European Conference on Artificial Life. 1991:134-142.
- [2] 李智,常晓萍,秦建华. 蚁群算法在空间太阳能热动力系统优化中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(25):294-298.
- [3] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORMI A. Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 1996, 26(1): 29-41.
- [4] BOTEE M, BONABEAU E. Evolving Ant Colony Optimization [J]. Advances in Complex Systems, 1998, 1(2):149-159.
- [5] STUTZLE T, DORIGO M. A Short Convergence Proof for a Class of Ant Colony Optimization Algorithms [J]. Proceedings of the IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(4):358-365.
- [6] GUTJAHR W J. A Graph-based Ant System and Its Convergence [J]. Future Generation Computer Systems, 2000, 16:873-888.
- [7] GUTJAHR W J. A Generalized Convergence Result for the Graph Based Ant System [R]. Vienna: University of Vienna 1999.
- [8] BULLNHEIMER B, HARTL R F, STRAUSS C. A New Rank based Version of the Ant System: A Computational Study [R]. Vienna: University of Vienna, 1997.
- [9] STUTZLE T, HOOS H H. MAX-MIN Ant System [J]. Future Generation Computer Systems, 2000, 16:889-914.
- [10] LI L X, YANG Y X, et al. Parameters Identification of Chaotic Systems via Chaotic Ant Swarm [J]. Chaos, Solutions and Fractals, 2006, 28:1204-1211.
- [11] LEE Z J, LEE C Y. A Hybrid Search Algorithm with Heuristics for Resource Allocation Problem [J]. Information Sciences, 2005, 173:155-167.
- [12] 马文龙,王铮,赵燕伟. 基于改进蚁群算法的制造云服务组合优化[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 52(1):113-121.
- [13] 罗亚波. 面向作业车间调度的基于拓扑排序的二级嵌套蚁群算法研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(8):178-184.
- [14] 杨少兵,吴命利. 基于改进蚁群算法的客运专线电力负荷建模与参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7):1578-1585.
- [15] 王利,高宪文,王伟,等. 基于模型的子空间聚类与时间段蚁群算法的合同生产批量

- 调度方法[J]. 自动化学报, 2014, 40(9): 1991-1997.
- [16] 霍星, 史海滨, 杨松益, 等. 基于层次分析-蚁群算法的内蒙古大型灌区节水改造综合评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 132-140.
- [17] 曾梦凡, 陈思洋, 张文茜, 等. 利用蚁群算法生成覆盖表: 探索与挖掘[J]. 软件学报, 2016, 27(4): 855-878.
- [18] 李智, 周龙, 王东. 基于蚁群算法的往复振动筛运动参数优化设计[J]. 农业机械学报, 2004, 35(3): 76-82.
- [19] 董毅, 赵尚弘, 李勇军, 等. 基于蚁群算法的分布式卫星光网络波长路由分配技术研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11): 2650-2656.
- [20] 许川佩, 蔡震, 胡聪. 基于蚁群算法的数字微流控生物芯片在线测试路径优化[J]. 仪器仪表学报, 2014, 37(6): 1417-1424.
- [21] 李智, 李战胜, Yigong L. 基于蚁群算法的内燃机配气机构凸轮型线的动力学仿真[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 64-67.
- [22] 李智. 基于蚁群算法的煤炭运输优化方法[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(3): 126-129.
- [23] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C]. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995: 1942-1948.
- [24] EBERHART R C, KENNEDY J. A New Optimizer Using Particles Swarm Theory [C]. Proc, Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 1995.
- [25] 李智, 常晓萍, 秦建华. 基于粒子群算法的空间太阳能热动力系统优化设计[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9): 195-200.
- [26] TRELEA I C, The Particle Swarm Optimization Algorithm: Convergence Analysis and Parameter Selection [J]. Information Processing Letters, 2003, 85: 317-325.
- [27] VAN DEN BERGH F, ENGELBRECHT A P. A Study of Particle Swarm Optimization Particle Trajectories [J]. Information Sciences, 2006, 176: 937-971.
- [28] HE S, WU Q H, WEN J Y, et al. A Particle Swarm Optimizer with Passive Congregation [J]. BioSystems, 2004, 78: 135-147.
- [29] AL-KAZEMI B, MOHAN C K. Multi-phase Generalization of the Particle Swarm Optimization Algorithm [C]. Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, Honolulu; IEEE, 2002: 489-494.
- [30] LIU B, WANG L, JIN Y H, et al. Improve Particle Swarm Optimization Combined with Chaos [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2005, 25: 1261-1271.
- [31] SHI X H, LIANG Y C, LEE H P, et al. An Improved GA and a Novel PSO-GA-based Hybrid Algorithm [J]. Information Processing Letters, 2005, 93: 255-261.
- [32] YI D, GE X R. An Improved PSO-based ANN with Simulated Annealing Technique [J]. Neural Computing, 2005, 63: 527-533.
- [33] 朱大林, 詹腾, 张屹, 等. 多策略差分进化的元胞多目标粒子群算法[J]. 电子学报, 2014, 42(9): 1831-1838.
- [34] 高云龙, 闫鹏. 基于多种群粒子群算法和布谷鸟搜索的联合寻优算法[J]. 控制与决策, 2016, 31(4): 601-608.
- [35] 焦尚彬, 李鹏华, 张青. 采用知识的粒子群算法的多频微弱信号自适应随机共振检测方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(12): 1-10.
- [36] 刘瑞兰, 王徐亮, 唐超. 基于粒子群算法的有机半导体 NPB 传输特性辨识 [J]. 物理学报, 2014, 63(2): 353-359.
- [37] 李天宏, 曾现进. 基于粒子群算法优化支持向量机的延河流域水沙模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(1): 79-87.
- [38] 李智, 郑晓. 粒子群算法在农业工程优化设计中的应用[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 15-18.
- [39] 常晓萍, 李智, 卢兰光. 内燃机径向滑动轴承的进化设计法[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6): 94-97.
- [40] 卫晓娟, 丁旺才, 李宁洲. 基于改进粒子群算法的 Volterra 模型参数辨识[J]. 振动与冲击, 2015, 34(21): 105-112.

- [41] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(11): 32-38.
- [42] 王辉, 钱锋. 群体智能优化算法[J]. 化工自动化及仪表, 2007, 34(5): 7-13.
- [43] 李晓磊, 钱积新. 基于分解协调的人工鱼群优化算法研究[J]. 电路与系统学报, 2003, 8(1): 1-6.
- [44] 胡瑾, 闫柯, 何东健, 等. 基于改进型鱼群算法的番茄光环境调控目标值模型[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 260-265.
- [45] 刘昌玉, 何雪松, 李崇威, 等. 用于水轮机-引水管道参数辨识的改进型人工鱼群算法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 54-58.
- [46] 张英杰, 李志武, 奉中华. 一种基于动态参数调整的改进人工鱼群算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(5): 77-82.
- [47] 王磊, 潘进, 焦李成. 免疫算法[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 74-78.
- [48] 李智, 孙江波, Yigong LOU. 基于免疫算法的内燃机配气机构型线动力学优化设计[J]. 振动与冲击, 2005, 24(6): 68-70.
- [49] 蔡自兴, 龚涛. 免疫算法研究的进展[J]. 控制与决策, 2004, 19(8): 841-846.
- [50] 洪露, 王经卓, 掌明, 等. 实数编码人工免疫算法概率强收敛速度估计研究[J]. 电子学报, 2015, 43(12): 2388-2393.
- [51] 毕晓君, 彭伟. 基于免疫算法的贝叶斯优化改进算法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2368-2373.
- [52] 戚玉涛, 刘芳, 常伟远, 等. 求解多目标问题的 Memetic 免疫优化算法[J]. 软件学报, 2013, 24(7): 1529-1544.
- [53] LIU R C, ZHANG W, LIAO L C, et al. A Sphere-dominance Based Preference Immune-inspired Algorithm for Dynamic Multi-objective Optimization. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GEcm 2010)[C]. Portland, USA, 2010: 423-430.
- [54] 左兴权, 王春露, 赵新超. 一种结合多目标免疫算法和线性规划的双行设备布局方法[J]. 自动化学报, 2015, 41(3): 528-540.
- [55] YU X, LI Y L, ZHAO B, et al. Optimization of Thread Partitioning Parameters in Speculative Multithreading Based on Artificial Immune Algorithm[J]. 信息与电子工程前言(英文版), 2015, 16(3): 205-216.
- [56] 盛万兴, 张波, 邸宏宇, 等. 一种基于动态抗体记忆库的免疫优化算法在自动需求响应中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4199-4206.
- [57] HOPFIELD J, Tank D. Neural Computation of Decisions in Optimization Problems[J]. Biological Cybernetics, 1985, 52: 141-152.
- [58] 焦李成. 神经网络计算[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995.
- [59] 金海和, 陈剑, 唐政, 等. 基于 Hopfield 网络的极小值问题学习算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(6): 731-734.
- [60] 姜惠兰, 孙雅明. 异联想记忆 Hopfield 神经网络的模型、算法及性能[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(5): 101-107.
- [61] 李智. Hopfield 神经网络在原料混匀中的应用[J]. 金属矿山, 2003, (9): 35-39.
- [62] 李智. 一种基于神经网络的煤炭调运优化方法[J]. 铁道科学与工程学报(原长沙铁道学院学报), 2003, 21(2): 98-101.
- [63] 张昀, 张志涌, 于舒娟. 基于幅值相位型离散 hopfield 神经网络的多进制振幅键控盲检测[J]. 物理学报, 2012, (14): 82-90.
- [64] LIU W, FU C J, HU H C. Global Exponential Stability of a Class of Hopfield Neural Networks with Delays[J]. Neural Computing and Applications, 2011, 20(8): 1205-1209.
- [65] ADNENE ARBI, FAROUK CHERIF, CHAOUKI AOUITI, et al. Dynamics of New Class of Hopfield Neural Networks with Time-Varying and Distributed Delays[J]. 数学物理学报(B 辑英文版), 2016, 36B(3): 891-912.
- [66] 余刃, 孔劲松, 骆德生, 等. 基于运行数据分析的核动力装置异常运行状态监测技术研究[J]. 核动力工程, 2013, 34(6): 156-160.
- [67] 韩广, 乔俊飞, 韩红桂, 等. 基于 hopfield 神经网络的污水处理过程优化控制[J]. 控制与决策, 2014, 29(11): 2085-2088.
- [68] 康立山 谢云 等. 非数值并行算法——模拟退火算法[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

- [69] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京:清华大学出版社, 1999.
- [70] 李智. 改进的模拟退火算法在原料矿混匀优化中的应用[J]. 矿业研究与开发. 2003, 23(5):40-42.
- [71] 袁澎, 艾芊, 赵媛媛. 基于改进的遗传-模拟退火算法和误差度分析原理的 PMU 多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报. 2014, 34(13):2178-2187.
- [72] 张亚明, 史浩山, 刘燕, 等. WSNs 中基于蚁群模拟退火算法的移动 Agent 访问路径规划[J]. 西北工业大学学报. 2012, 30(5):629-635.
- [73] 刘爱军, 杨育, 李斐, 等. 混沌模拟退火粒子群优化算法研究及应用[J]. 浙江大学学报(工学版). 2013, 47(10):1722-1730.
- [74] 严小俊, 蒋伟康, 曹诚. 基于遗传模拟退火算法的汽车动力总成悬置系统优化设计[J]. 振动与冲击. 2014, 33(23):155-159.
- [75] WANG HongYan, HONG HuangJie, HAO GuiXiang, et al. Characteristic Verification and Parameter Optimization of Airbags Cushion System for Airborne Vehicle [J]. 中国机械工程学报(英文版), 2014, 27(1):50-57.
- [76] Glover F. Future Paths of Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. Computers and Operations Research. 1986, 13:533-549.
- [77] 李智, 常晓萍, Lou YiGong. 基于禁忌搜索算法的内燃机配气机构优化设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(4):116-118.
- [78] 陈晓峰, 姜慧研. 量子禁忌搜索算法的研究[J]. 电子学报, 2013, 41(11):2161-2166.
- [79] 潘郁, 达庆利. $1|fuzzy|\min \sum_{i=1}^n C_i$ 模型的禁忌搜索算法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(50):852-856.
- [80] 钱洁, 郑建国. 引入逆学习的量子自适应禁忌搜索算法[J]. 电子学报, 2013, 41(6):1069-1075.
- [81] 杨文强, 邓丽, 费敏锐, 等. 基于改进禁忌搜索的多目标自动化仓库调度[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(8):2097-2104.
- [82] 丁铸, 马大为, 于存贵, 等. 基于禁忌搜索与微粒群优化算法的混合优化策略算法在目标分配问题上的应用[J]. 兵工学报, 2007, 28(9):1127-1131.
- [83] 许鹏飞, 苗启广, 李伟生, 等. 基于函数复杂度的自适应模拟退火和禁忌搜索新算法[J]. 电子学报, 2012, 40(6):1218-1222.