

第 5 章 蜜蜂交配优化算法

蜜蜂交配优化算法是模拟蜜蜂繁殖行为的群智能优化算法。在算法中,由蜂王、雄蜂和工蜂组成蜂群,只有蜂王才能与不同雄蜂交配繁育后代,工蜂负责照顾幼蜂。繁殖过程是蜂王不断更新的进化过程,最终的蜂王即为优化过程中待求解问题的最优解。本章首先介绍蜜蜂竞争繁殖过程的优化原理,然后阐述基于繁殖行为的蜂群优化算法的数学描述、实现步骤及算法流程。

5.1 蜜蜂交配优化算法的提出

蜜蜂交配优化(Marriage in Honey-Bees Optimization, MBO)算法是 2001 年由 Abbass 提出的一种基于蜜蜂繁殖行为的群智能优化算法。在蜜蜂繁殖过程中,蜂王是蜂群中的母体,雄蜂是父代,承担与蜂王交配的任务。该算法通过在繁殖过程中蜂王不断更新的进化,最终的蜂王即为优化过程中待求解问题的最优解。该算法已被用于多目标优化问题、蛋白质结构预测、T-染色问题等。

5.2 蜂群竞争繁殖过程的优化机制

一个完整的蜂群由蜂王、雄蜂和工蜂组成。

蜂王是蜂群中唯一具有生殖能力的雌蜂,它由受精卵发育而成,是工蜂从幼蜂中精心培养出来的,其个体最大,体重约为工蜂的 2 倍,寿命为 5~6 年,而一般的工蜂和雄蜂的寿命不超过 6 个月。蜂王的主要任务是与不同的雄蜂进行交配与产卵,雄蜂由未受精的卵发育而成,主要职责是与蜂王交配。工蜂由受精卵发育而来,个体最小,生殖器官发育不完全,无生殖能力,负责照顾幼蜂、采蜜等工作。

蜂王性成熟后,出巢飞舞,一群雄蜂追随其后。只有雄蜂的飞行速度与蜂王匹配才能完成交配。通过竞争,优秀的雄蜂会为蜂王提供优良的基因,将精子存储于蜂王的受精囊中供蜂王繁育后代。和蜂王交配后那只雄蜂立即死亡,而蜂王可以多次交配。当蜂王受精囊存储满精子后飞回蜂巢。然后蜂王开始产卵,在产卵的过程中,受精囊中的精子会随机和卵细胞进行结合,形成受精卵。受精卵由工蜂负责照顾培育,形成幼蜂,其中优秀的个体会成为新的蜂王。

为了避免近亲繁殖,蜂王有时会寻找其他蜂群的雄蜂交配。刚开始交配时,蜂王飞行速度很快,每交配一次,蜂王的飞行速度就有所衰减。当蜂王衰弱到一定程度时,则由成熟且胜任的幼蜂替代,即产生新一代蜂王,此时结束原蜂王的生命周期。

蜂群繁殖进化过程也是蜂王不断更新的过程,如图 5.1 所示。新蜂王的产生类似于进化

计算中的一个优化过程,蜂王是优化过程中待求解问题的最优解。

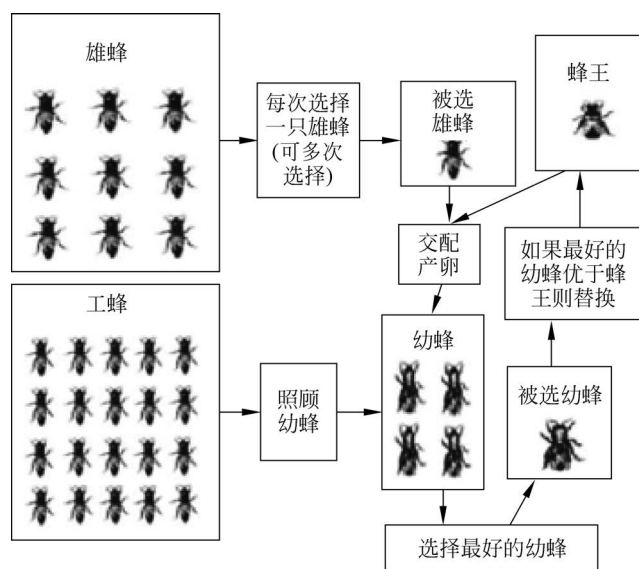


图 5.1 蜂群繁殖进化过程

5.3 蜜蜂交配优化算法的数学描述

在蜜蜂繁殖过程中,蜂王作为蜂群中的母体,主要承担着产生子代的任务;雄蜂是父代,承担着与蜂王进行交配的任务;工蜂负责照顾幼蜂。在优化问题中,蜂王代表当前最优解,雄蜂是候选解;工蜂等同于局部搜索算法;幼蜂是子代的个体,由蜂王和雄蜂交叉产生。

为了模拟蜜蜂繁殖过程的竞争和优胜劣汰的优化机制,将蜂群作为要解决问题的解集,组成蜂群的个体可以看作编码后的染色体。在形成最开始的蜂群后,通过优胜劣汰的原则产生蜂王。然后通过迭代模拟蜂王的交配行为,再逐代地产生优良的解。可以利用模拟退火(SA)产生雄蜂群体,再通过交叉产生新的代表可行解集合的幼体集合,并替换当前蜂王。

蜜蜂繁殖算法的整个过程分为4个阶段:初始化蜂群、蜂王与雄蜂交配、产生幼蜂、更新蜂王。对每一阶段具体描述如下。

(1) 初始化蜂群。对初始蜂群进行初始化,需要设置以下5个参数。

- ① 雄蜂个数。雄蜂代表的是问题的候选解,求解空间的大小直接受雄蜂数量影响。
- ② 幼蜂个数。幼蜂个数会影响算法的多样性,对算法中交叉和变异次数也会产生影响。
- ③ 蜂王受精囊容量。蜂王受精囊容量可以反映出蜂王一次婚飞中可以进行交配的次数,若受精囊容量过大,则所有精子都会被蜂王容纳,精子的选择过程就毫无意义;若受精囊容量过小,则精子多样性下降,易导致早熟。
- ④ 蜂王婚飞次数。这是算法迭代次数的体现,若次数过多,势必影响算法运行效率,否则难以收敛。

⑤ 蜂王能量和速度阈值。这关系到模拟退火(SA)的程度,一般设置为0。

蜜蜂交配算法使用随机方式产生初始蜂群,虽然简单,但难以保证算法的整体性能。

(2) 蜂王与雄蜂交配。蜂王会对雄蜂进行选择,完成受精囊吸纳精子的过程。蜂王进行

婚飞之前会有一个初始的能量和速度,此时能量和速度数值都比较大。随着婚飞过程中雄蜂与蜂王交配次数增加,蜂王的能量和速度会按照一定的模式衰减。婚飞期间蜂王按照式(5.1)挑选雄蜂进行交配:

$$p(Q, D_i) = e^{\frac{-\Delta(f_i)}{S(t)}} \quad (5.1)$$

$$\Delta(f_i) = |f(Q) - f(D_i)| \quad (5.2)$$

$$S(t+1) = \alpha(t) \times S(t) \quad t \in \{1, 2, \dots, t\}, \quad \alpha \in [0, 1] \quad (5.3)$$

$$E(t+1) = \gamma(t)E(t) \quad t \in \{1, 2, \dots, t\}, \quad \gamma \in [0, 1] \quad (5.4)$$

其中, $p(Q, D_i)$ 为蜂王 Queen 与雄蜂 Drone_{*i*} 能够交配的概率; $\Delta(f_i)$ 为蜂王 Queen 与雄蜂 Drone_{*i*} 适应度值之差的绝对值,由式(5.2)表示; $E(t)$ 为蜂王在 t 时刻的能量。由式(5.1)可以看出,雄蜂能量较高或者蜂王与雄蜂适应度值相差不大时,雄蜂更可能被蜂王选中。蜂王与雄蜂完成交配后,蜂王具有的速度和能量分别按式(5.3)和式(5.4)所示规则进行衰减。其中, $\alpha(t)$ 为速度衰减因子; $\gamma(t)$ 为能量衰减因子。当蜂王的能量低于临界值时或达到蜂王受精囊数值时,蜂王会结束婚飞。

(3) 产生幼蜂。这一阶段主要是受精卵(幼蜂)的产生与维护。蜂王结束婚飞后,算法进入产生幼蜂阶段。在这个阶段中,蜂王会随机从受精囊中选取精子,进行交叉操作,然后产生一个幼蜂后代,后代由工蜂喂养照顾。工蜂会采用启发式算法对处于培育阶段的幼蜂进行局部搜索,产生高适应度值的可行解。幼蜂的数量达到设定值时,进入下一个阶段。

(4) 更新蜂王。在这个阶段中,选出最优秀的幼蜂同蜂王进行比较,如果幼蜂比蜂王的适应度值高,那么幼蜂替换当前蜂王,然后舍弃其余幼蜂。进入下一轮迭代循环,令蜂王与雄蜂交配,当交配次数达到设置的临界值时,停止迭代。

5.4 蜜蜂交配优化算法的实现步骤及流程

蜜蜂交配优化算法实现的基本步骤如下。

(1) 初始化。初始化算法所需的各个参数,确定蜂群的大小,对初始蜂群进行初始化;将蜂群按照适应度值的大小进行排序;选出适应度值最大的个体作为蜂王,其余作为雄蜂。

(2) 蜂王婚飞。比较子代个数与所需种群大小,前者小于后者,则重复步骤(2)~步骤(6);初始化蜂王受精囊容量及蜂王的起始速度和能量;当蜂王的速度和能量下降到阈值后,蜂王返回蜂巢。

(3) 交配操作。让蜂王随机选择一个雄蜂,将雄蜂被选中的概率和 $0 \sim 1$ 的一个随机数进行比较,当且仅当雄蜂被选中概率小于该随机数时,才将该雄蜂加入蜂王的受精囊中。同时,将蜂王的速度和能量分别按照式(5.8)和式(5.9)进行衰减。

(4) 产生子代。蜂王与雄蜂进行基因交叉,生成子代种群。

(5) 子代优化。子代产生后,用工蜂对其进行优化培育;使用局部邻域搜索算法将子代加入新种群中。

(6) 选择新蜂王将新种群个体进行排序,选出最优个体与当前蜂王进行比较,如果优于当前则替换蜂王。

(7) 检验终止条件,若满足,则终止算法,输出最优解;否则,返回步骤(2)。

蜜蜂交配优化算法的流程如图 5.2 所示。

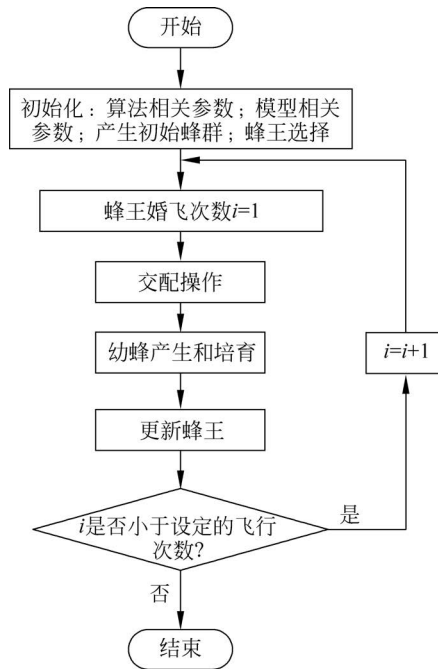


图 5.2 蜜蜂交配优化算法的流程图