

多级多商品流物流网络设计的优化模型与 组合模拟退火算法*

秦 进^{1,2}, 倪玲霖¹, 缪立新²

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075; 2. 清华大学深圳研究生院 现代物流研究中心, 广东 深圳 518055)

摘 要: 以最小化系统内的建设费用、库存费用和运输费用为优化目标, 建立可描述一般性带能力约束的多级多商品流物流网络设计问题的优化模型, 并根据物流网络设计问题的特点, 基于模拟退火算法的思想, 设计组合模拟退火算法对模型进行求解。算例的计算结果表明, 该优化方法运算快捷, 结果正确合理, 能为此类物流网络设计问题提供科学的决策依据; 通过分析发现, 存储费用和运输费用都会影响物流网络系统的总费用, 但运输费用对系统总费用的影响程度相对要大得多。

关键词: 多商品流; 多级物流网络; 优化模型; 组合模拟退火算法

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)09-3348-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.09.039

Optimization model and combined simulated annealing algorithm for multi-level multi-commodity logistics network design

QIN Jin^{1,2}, NI Ling-lin¹, MIAO Li-xin²

(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Research Center for Logistics, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Guangdong Shenzhen 518055, China)

Abstract: This paper presented an optimization model for the generic multi-level multi-commodity logistics network design problem with capacity constraint, in which the objective function was to minimize the total cost, including the location cost and transportation cost and inventory cost. The combined simulated annealing algorithm was developed for the model. Practical application denotes the optimization method operates rapidly and the result is rational, so it can provide a scientific decision-making support method for the design of the network. Moreover, the unit inventory cost and unit transportation cost can affect the total system cost, but the transportation cost has more influence on the total cost.

Key words: multi-commodity; multi-level logistics network; optimization model; combined simulated annealing algorithm

0 引言

物流网络是物流配送过程中相互联系的组织与设施的集合。企业建立物流网络的最终目的是为了能满足顾客需要, 实现商品的价值以及增强企业的竞争能力。伴随着日趋激烈的市场竞争, 越来越多的企业开始更多地关注其物流网络的优化, 尤其是生产制造企业和物流服务行业。这些企业都希望拥有一个具备快速反应能力、有较高的依赖性以及更大的弹性的物流服务系统, 以此来应付不断变化的市场需求。

很多企业生产的商品在其物流网络上往往经过一次或两次调配后就直接运送至其最终用户。在企业的最终用户数量不多或者其位置非常集中时, 这种物流网络结构没有表现出不适应。但是伴随企业经营规模的扩大, 其营销范围已拓展到全国甚至全球, 这样其商品的流通渠道和其最终用户位置越来越复杂, 商品流通呈现出少批量、多批次的趋势。如果仍采用原物流网络结构, 势必会导致企业承担大量小规模的商品运输, 这不仅会造成企业运输成本上升, 也会由于运输次数的频繁,

造成过度地使用道路网络和堵塞交通等, 从而增加社会成本。

对于最终用户数量较多且其分布范围较广的企业, 应建立合理的多级物流网络结构, 且不同层次中的节点在整个物流网络中承担的任务是不同的, 其设施条件也存在一定的区别。例如可在生产厂地等商品流量大的地点附近建立大型物流节点, 在节点内合理地保管和处理企业的各种商品, 再选择合适的运输方式实施干线运输, 这样既发挥了物流的规模经济效益, 使企业的自身成本得以降低, 还可以有效地抑制社会成本的上升; 其次, 根据流量的分布情况和运输方向, 在合适的地点建立适当规模的中小型物流节点, 干线运输的商品运送至这些节点后统一管理, 再选择适当的运输方式向下一层的节点运输, 直至将货物送至最终客户, 这样就可以大大提高物流的效率。如图 1 所示的物流网络体系, 就是一个典型的多级物流网络结构。

将物流网络设计问题作为单一商品流下的三层或四层的设施选址问题, 在很多文献中都有所涉及^[1~9]。而对于多商品流环境下的多级物流网络的优化设计问题则少有研究, 特别是

收稿日期: 2010-03-15; **修回日期:** 2010-04-30 **基金项目:** 中国国家博士后基金资助项目(20090450915); 中南大学自由探索计划资助项目(201012200168)

作者简介: 秦进(1978-), 男, 副教授, 博士后, 主要研究方向为系统优化方法(esu_qinjin@hotmail.com); 倪玲霖(1980-), 女, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为物流工程; 缪立新(1964-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为交通规划与物流工程。

对于本文所研究的具有一般通用性的多级多商品流的物流网络优化问题的模型与算法,目前还很少有相关学者进行探讨和研究。

1 变量定义及假设

为了便于描述问题,首先定义如下变量: N 表示多级物流网络的层级数(第一层为最终用户层,第 N 层为生产制造企业,其他层为中间物流节点); L 表示商品种类数; F_n^i 表示第 n ($2 \leq n \leq N-1$,下同)层第 i 个物流节点的建设费用(元); W_n 表示第 n 层等待选择修建的物流节点的数目或最终用户($n=1$)的数目或生产企业($n=N$)的数目; d_i^l 表示最终用户 i 对商品 l 的需求量(件/天); λ_l 表示单位商品 l 的能力占用率,即储存单位商品 l 时,占用的物流节点的能力; V_n^i 表示第 n 层第 i 个网络物流节点(或生产企业)的通过或储存能力(件); C_{nl}^{ij} 表示将商品 l 从第 n ($n \leq N-1$)层的第 i 个物流节点送至第 $n+1$ 层的第 j 个节点(或最终用户)的单位运输费用(元); E_{ni}^l 表示商品 l 在第 n 层的第 i 个中间物流节点的单位固定存储费用,即在物流节点为了储存商品 l 时需要前期投入的固定费用(元); U_{ni}^l 分别表示商品 l 在第 n 层的第 i 个中间物流节点的单位可变存储费用; Q_{ni}^{ij} 表示商品 l 从第 n 层的第 i 个中间物流节点运至第 $n+1$ 层的第 j 个中心(或最终用户)的数量(件); G_{ni}^l 表示通过第 n 层第 i 个物流节点(或生产制造企业、客户)的商品 l 的数量(件); M_n 为第 n 层最多允许建立的中间物流节点的数目(个); α_1, α_2 分别为运输费用和库存费用的权重系数; P 表示多级物流网络系统的规划年数(年); γ 表示银行利率。

另外定义决策变量如下:

$$X_n^i = \begin{cases} 0 & \text{若决定不修建第 } n \text{ 层第 } i \text{ 个网络节点} \\ 1 & \text{否则} \end{cases}$$

当第 n 层的第 i 个物流节点的通过流量 $\sum_{l=1}^L G_{ni}^l = 0$,则 $X_n^i = 0$,否则 $X_n^i = 1$ 。

$$Y_{nl}^{ij} = \begin{cases} 1 & \text{若第 } n \text{ 层上的节点 } i \text{ 对于产品 } l \text{ 的需求由} \\ & \text{第 } n+1 \text{ 层上的节点 } j \text{ 满足} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

另外,还需要定义0-1函数如下: $Z(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases}$

同时,为了简化问题和模型,作如下合理假设:

- a) 企业生产的商品数量大于市场需求,即企业生产的商品总能满足市场的需求。
- b) 物流网络的物流节点不产生任何需求。
- c) 一个用户对商品 l 的需求只能由一个物流节点来满足,即其需求不能被分割。
- d) 每一个企业只生产一种商品,对于一个企业生产多种商品的情况,可以通过增加虚拟企业的方法以达到满足每一个企业只生产一种商品的条件。

由以上定义,对于中间物流节点的通过流量 G_{ni}^l ,由于第一层的节点即为客户点,应有:

$$G_{1i}^l = d_i^l \tag{1}$$

而对于非第一层的通过流量,应有:

$$G_{ni}^l = \sum_{j=1}^{W_{n-1}} G_{n-1,i}^l Y_{nl}^{ij} \quad \forall n=2,3,\dots,N-1 \tag{2}$$

2 优化模型的建立

物流网络设计中要考虑的费用主要包括建设费用、运输费

用以及存储费用。其中建设费用是一次性支出,其他费用按年进行统计,因此需要将建设费用分摊到规划期内所有年度进行考虑,从而与其他费用在时间上统一。这里为方便模型的描述,记分摊系数 $\beta = \frac{1}{365} \sum_{h=1}^P \frac{\gamma}{(1+\gamma)^h - 1}$ 。

上述多级物流网络设计中需要考虑建设费用、运输费用和库存费用。

建设费用主要为物流节点的基本建设费用,该基本建设费用与规模无关。由前面的定义,第 n 层第 i 个物流节点的建设费用为 F_n^i ,则物流网络的固定建设费用为 $\sum_{n=2}^{N-1} \sum_{i=1}^{W_n} X_n^i F_n^i$ 。

运输费用则为将商品从生产制造企业送至最终用户时,在物流网络的中间层次之间所产生的所有运输费用,即为 $\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{W_{n+1}} \sum_{i=1}^{W_n} \sum_{l=1}^L C_{nl}^{ij} Q_{ni}^{jl}$ 。

库存费用包括商品在各个中间物流节点上的固定存储费用和可变存储费用。总的固定存储费用应为 $\sum_{n=2}^{N-1} \sum_{i=1}^{W_n} \sum_{l=1}^L E_{ni}^l Z(G_{ni}^l)$,可变存储费用根据Baumel-Wolfe方法^[9],应为 $\sum_{n=2}^{N-1} \sum_{i=1}^{W_n} \sum_{l=1}^L U_{ni}^l (G_{ni}^l)^\theta$ 。其中, θ 的取值与物流节点的规模经济性有关,一般取值为0.5。

记构建物流网络的系统总费用为 C ,则可建立一般性多级多商品流物流网络优化模型如下:

$$\min C = \beta \sum_{n=2}^{N-1} \sum_{i=1}^{W_n} X_n^i F_n^i + \alpha_1 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{W_{n+1}} \sum_{i=1}^{W_n} \sum_{l=1}^L C_{nl}^{ij} Q_{ni}^{jl} + \alpha_2 \sum_{n=2}^{N-1} \sum_{i=1}^{W_n} \sum_{l=1}^L E_{ni}^l Z(G_{ni}^l) + \alpha_2 \sum_{n=2}^{N-1} \sum_{i=1}^{W_n} \sum_{l=1}^L U_{ni}^l (G_{ni}^l)^\theta \tag{3}$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{l=1}^L \lambda_l C_{ni}^l \leq V_n^i \quad \forall n, i \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{W_n} X_n^i \leq M_n \quad 2 \leq n \leq N-1 \tag{5}$$

$$\sum_{j=1}^{W_{n+1}} Q_{ni}^{ij} = \sum_{j=1}^{W_n} Q_{ni}^{ij} \quad \forall n, i \tag{6}$$

$$G_{ni}^l = \sum_{l=1}^L G_{n-1,i}^l Y_{nl}^{ij} \quad \forall i, n, l \tag{7}$$

$$Q_{ni}^{ij} = G_{ni}^l Y_{nl}^{ij} \quad \forall i, j, n, l \tag{8}$$

$$d_i^l, Q_{ni}^{ij}, G_{ni}^l, V_n^i \geq 0 \quad \forall i, l \tag{9}$$

优化模型的目标函数式(3)是要最小化系统的总费用,包括建设费用、运输费用以及存储费用;约束式(4)表示物流节点的能力限制,即对于任意一个中间物流节点,经过其上的所有商品的数量的换算能力之和,均不能超过其本身的处理能力;约束式(5)是考虑投资限制而对物流网络每一层级中的可修建的最大节点数目限制;约束式(6)表示中间物流节点上的流量守恒约束;约束式(7)(8)表示不同层级各节点上流量的关系约束;约束式(9)表示各变量的非负约束。

3 组合模拟退火算法

前面所提出的多级多商品流下的物流网络设计问题的优化模型,是一个大规模的混合整数规划模型,对于此类模型,一般利用拉格朗日算法及各种现代优化算法进行求解。但是拉格朗日算法求解不直观,且算法计算复杂、灵活性不强,因此为了增加求解算法的适应性,本文在现代优化算法中,选择具有描述简单、使用灵活、实现容易且较少受初始条件限制的模拟退火算法^[10,11]进行问题的求解。

模型的初始可行解可以使用文献[12]中的随机分配的方法获得,即首先求取第一层与第二层构成的物流网络的初始解后,视第二层中的中间物流节点为假定客户点,继续求解第二层与第三层构成的物流网络的初始解,如此循环迭代,直至求取所有层次上修建的设施以及各层需求的分配决策变量。

这里简单说明文献[12]所提出的组合模拟退火算法(combined simulated annealing, CSA)的主要步骤。CSA算法共

分为两层,其中内层算法是对设施选址决策进行优化,外层算法则是在内层选址决策的基础上对用户需求的分配决策进行优化。

外层优化算法的具体步骤如下:

a) 设置模拟退火计划表,令初始温度为 t ,升温系数 $\tau = 1$,降温系数 $\xi = 0.9$,随机生成问题的初始解 S ,同时令当前记忆最优解 $\bar{S} = S, \Omega \leftarrow \Omega \cup S$,且令 $\lambda(S) = n, K = 1$ 。

b) 执行外层邻域函数,得到新解 S' ,若 $\lambda(S') > 0$,则重复 b); 否则, $\Omega \leftarrow \Omega \cup S'$,同时更新禁忌表中各对象的禁忌长度,即对于 $\forall S \in \Omega$,执行 $\lambda(S) \leftarrow \lambda(S) - 1$,若 $\lambda(S) = 0$,则 $\Omega \leftarrow \Omega \setminus S$,转步骤 c)。

c) 执行内层优化算法。

d) 若 $C(S'') < C(\bar{S})$,则令 $\bar{S} = S''$ 。

e) 若 $C(S') < C(S)$,则令 $S = S'$; 否则,从 $(0, 1)$ 内随机产生一个数值 ρ ,若有 $\rho < \exp[-(C(S') - C(S))/(\tau t)]$,则令 $S = S'$; 否则不接受该解。

f) $K = K + 1$,若未满足同温度下的抽样稳定准则,返回步骤 b); 否则执行降温操作,即令 $t \leftarrow t \cdot \xi$,同时令 $k = 0$ 。

g) 若未满足升温条件,则返回步骤 b); 否则执行升温操作,即令 $\tau \leftarrow \tau + \Delta C/K$ 。

h) 收敛性检验。若未满足算法终止条件,返回步骤 b); 否则算法终止,输出最优解 \bar{S} 。

内层优化算法的步骤为

a) 以 S' 为当前初始解和最优解,构造内层邻域解,得到新解 S'' 。

b) 若 $C(S'') < C(S')$,则令 $S' = S''$; 否则从 $(0, 1)$ 内随机产生一个数值 ρ' ,若有 $\rho' < \exp(-(C(S'') - C(S'))/t)$,则令 $S' = S''$,否则不接受该解。

c) 若未达到同温度下的抽样稳定准则,则返回步骤 b); 否则算法终止,返回外层优化算法。

上面算法的具体步骤中, $C(S)$ 表示解 S 所对应的目标函数数值。另外在上面的外层优化算法中,对标准的模拟退火算法进行了一定的改进,结合利用了禁忌搜索算法中的禁忌表思想,同时增加了升温操作,以防止算法在后期陷入局部最优,增加算法搜索的效率。

4 算例分析

算例中待修建物流网络的层级数 $N = 5$,系统内的商品种类 $L = 5$,最终用户的数目即最底层第五层的节点数为 50,中间各层可选的物流节点的数目分别为第二层 $W_2 = 20$,第三层 $W_3 = 12$,第四层 $W_4 = 5$,而相应的各层中最大节点修建数目为 $M_2 = 12, M_3 = 8, M_4 = 3$,费用的权重系数 $\theta_1 = 1, \theta_2 = 1$,所有的其他相关数据均为随机生成。详细数据信息请见参考文献 [13]。

CSA 算法的关键设置包括冷却进度表,即初始温度、温度下降规则、同一温度的迭代控制规则以及算法终止规则。初始温度 T_0 的设置采用文献 [10] 中的方法,在该温度进行迭代时,应使目标函数上升的较劣解的接受频率 p_0 达到 0.8 左右,即有大约 80% 的较劣解能被算法接受为当前最优解。初始温度可以通过如下方法得到:执行一次初始搜索,在该次搜索中,

所有较劣解均被接受为当前最优解,计算目标函数的平均增加值 \bar{f} ,则初始温度 $T_0 = -\bar{f}/\ln(p_0)$ 。温度下降规则采取按比例下降的方法,即给定下降比例 α ,则 $T_{i+1} = T_i \times \alpha$ 。其中 T_i 是在第 i 次迭代时用来计算接受概率的温度,且 $\alpha = 0.955$ 。同一温度下的计算迭代次数采用固定值的方法,其中外层迭代次数为 $5 \sum_{n=2}^N W_n$,内层迭代次数为 $10W_1L$ 。算法终止规则采用温度小于给定的终止温度 $t_f = 0.001$ 或总费用 C 在 100 次迭代中无改变来进行综合控制。

考虑到随机搜索算法的最优解的质量可能与初始解有关,因此在算法的实现中,分别求解并记录了 10 组在不同初始解前提下的最优解,以此对前面所提出的优化模型和算法进行检验。表 1 列出了在给定的不同初始解的前提下,CSA 算法所求得的最优解的目标函数值(即系统总费用)以及相对费用节省率。

表 1 对应的初始解与最优解的目标函数值

序号	初始解目标函数值	最优解目标函数值	Gap/%
1	5 688 195.302	1 769 628.578	68.89
2	8 538 668.962	1 771 664.879	81.96
3	2 752 659.031	1 776 739.844	35.45
4	6 695 017.663	1 752 555.891	73.82
5	4 559 821.683	1 733 317.083	61.99
6	3 670 912.353	1 764 488.697	51.93
7	5 609 158.201	1 751 208.339	68.78
8	3 763 855.376	1 760 261.894	53.23
9	3 085 257.828	1 742 725.479	43.51
10	4 506 684.389	1 733 893.974	61.53

由表 1 中的数据可以看到,初始解不同时所求得的最优解的总费用是非常接近的,最大值(1 776 739.844)与最小值(1 733 317.083)的偏差仅为 2.51%,且相对于初始解,最优解的总费用均有 35.45% ~ 81.96% 的节省。由此可以证明前面所提出的优化模型和算法的有效性。

图 2 描述了上面 10 组求解方案中,多商品流的多级网络结构优化模型的目标值,即系统总费用随 CSA 算法的外层迭代次数变化的情况。从图中可以看到,在上述 10 个求解过程中,CSA 算法都能在较短的时间内收敛到最优解,而且所求得的最优解的目标函数值(总费用)也都非常接近。

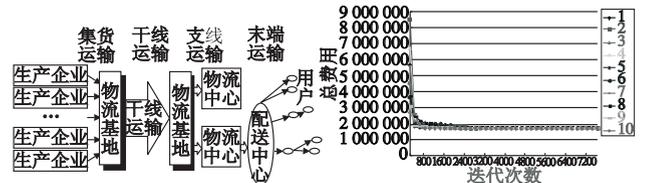


图 1 多级物流网络

图 2 总费用随外层迭代次数变化

图 3 显示的是随着单位运输费用的变化,系统总费用的相对变化率。从图中可以看到,总费用随单位运输费用增大而增大的趋势非常明显,而且当单位运输费用变化幅度为 100% (从 -50% 变化至 +50%),总费用的变化幅度高达 160% 以上;特别是在后期,当运输费用的变化幅度从 20% 升至 50% 时,总费用的变化幅度达到近 100%,这就说明运输费用的变化对系统总费用的影响非常大。导致这种现象的原因是因为运输费用在系统总费用中占有很大比例,而且随着单位运输费用的增加,此比例逐渐增大,而单位运输费用对系统总的运输费用的影响也非常大。

图 4 则显示了当单位可变存储费用 U_m^i 变化时,总费用的相对变化率情况。从图中可看到,当 U_m^i 变化幅度为 100% (从 -50% 变化至 +50%) 时,系统总费用的相对变化率从 -7.14% 变化为 4.79%, 总体变化幅度仅为 11.93%, 可见单位可变存储费用对系统总费用的影响程度相对来说并不是很大。

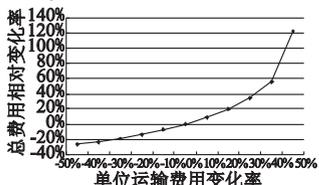


图3 总费用相对变化率与单位运输费用变化率

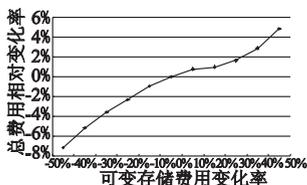


图4 总费用相对变化率与可变存储费用变化率

从上面的分析可以知道,单位可变存储费用和单位运输费用都会对物流网络系统的总费用产生影响,但是相对而言,单位运输费用的变动对系统总费用的影响程度要大很多。因此,企业物流网络规划者必须要高度关注物流网络系统的运输成本控制,尽可能选择最合适和最经济的运输方式。

5 结束语

随着企业经营规模的扩大,生产制造企业的商品流通呈现出少批量、多批次的趋势,为了有效降低物流成本,企业需要建立合理的多级物流网络结构。本文在考虑多商品流的前提下,提出了一种满足大范围配送要求和规模经济效益的企业多级物流网络结构,以最小化物流网络内的运输费用、存储费用和建设费用为优化目标,建立了可以描述一般性的多级多商品流物流网络设计问题的优化模型,并使用组合模拟退火算法对其进行求解。通过算例的计算分析发现,存储费用和运输费用都会对物流网络系统的总费用产生影响,但运输费用的变动对总费用的影响更大。同时算例计算也表明,上述模型和算法是解决相关大规模问题的一种有效方法,能为相应生产企业的物流网络设计提供理想的决策支持。

参考文献:

[1] 吕海峰,马维忠,王衍华. 基于网络分析方法的物流配送中心选址的研究[J]. 运筹与管理, 2004, 13(6):80-85.

[2] 王转,任冠星. 需求势能理论的配送中心选址方法的研究[J]. 数学的实践与认识, 2006, 36(2):133-140.

[3] ELKOTE S M, DASKIN M S. Capacitated facility location/network design problems[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 129(3): 481-495.

[4] MELKOTE S, DASKIN M S. An integrated model of facility location and transportation network design [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2001, 35(6):515-538.

[5] KLOSE A, DREXL A. Facility location models for distribution system design[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 162(1): 4-29.

[6] BARAHONA F, CHUDAK F A. Near-optimal solutions to large-scale facility location problems[J]. Discrete Optimization, 2005, 2(1): 35-50.

[7] ABOOLIAN R, BERMAN O, KRASS D. Competitive facility location and design problem [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 182(1):40-62.

[8] 牟伦英,黄丹. 物流网络节点的动态选址研究[J]. 工业工程与管理, 2005, 10(2):102-106.

[9] 程国全,柴继峰,王转,等. 物流设施规划与设计[M]. 北京:中国物资出版社, 2003:58-60.

[10] 邢文训,谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2001:90-96.

[11] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2001:17-26.

[12] 秦进,史峰. 物流设施选址问题的双层模拟退火算法[J]. 系统工程, 2007, 25(2): 36-40.

[13] 秦进. 多商品物流网络设计相关优化模型及算法研究[D]. 长沙:中南大学, 2006.

[14] 秦进,史峰. 多级物流配送网络设计的优化模型及算法[J]. 武汉理工大学学报:交通科学版,2007, 31(5):819-822.

[15] 秦进,史峰. 考虑库存控制的物流网络设计优化模型与算法[J]. 系统工程, 2007, 25(12):24-29.

[16] 秦进,史峰,缪立新,等. 考虑随机需求和库存决策的多商品物流网络设计的优化模型与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(4):176-183.

(上接第 3347 页)搜索区域,因此可收敛得到多个最优值点,极大地提高了寻优效率。

参考文献:

[1] EHRlich P R, RAVEN P H. Butterflies and plants: a study in co-evolution[J]. Evolution, 1964, 18(4):586-608.

[2] HILLIS D W. Co-evolving parasites improve simulated evolution as an optimization procedure [J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1990, 42(1-3):228-234.

[3] ROSIN C D, BELEW R K. Methods for competitive co-evolution, finding opponents worth beating [C]//Proc of International Conference on Genetic Algorithms. San Francisco:Morgan Kaufman,1995: 256-328.

[4] POTTER M, JONG K D. A cooperative co-evolutionary approach to function optimization [J]. Lecture Notes in Computer Science, 1994, 866(7):249-257.

[5] 巩敦卫,孙晓燕. 多搜索区域多种群遗传算法[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(2):256-260.

[6] 申晓宁,郭毓,陈庆伟,等. 一种子群体个数动态变化的多目标优化协同进化算法[J]. 控制与决策, 2007, 22(9):1011-1016.

[7] 许珂,刘栋. 多粒子群协同进化算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(3):51-54.

[8] 李碧,林土胜. 协同进化在遗传算法中的应用述评[J]. 计算机科学, 2009, 36(4):34-37.

[9] URSEM R K. Diversity-guided evolutionary algorithms [C]//Proc of the 7th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature. London: Springer-Verlag, 2002:462-474.

[10] 辛斌,陈杰,窦丽华,等. 群搜索优化中基于分布熵的多样性控制[J]. 模式识别与人工智能, 2009, 22(3):374-380.

[11] 王文义,秦广军,王若雨. 自适应的多种群并行遗传算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(15):34-36.

[12] 陈国良. 遗传算法及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 1996:1-433.

[13] 金阳,左万利. 一种基于动态近邻选择模型的聚类算法[J]. 计算机学报, 2007, 30(5):756-762.