

大型城市地下物流网络优化布局的模拟植物生长算法

李 彤^{1,3}, 王众托²

(1. 杭州电子科技大学 管理学院, 杭州 310018; 2. 大连理工大学 系统工程研究所, 大连 116024;
3. 大连大学 先进设计与智能计算教育部重点实验室, 大连 116622)

摘 要 交通拥堵问题的加剧使传统物流网络在我国大型城市已达到极限, 未来地面物流系统将逐步向地下不同层次里转移并释放出城市地上空间. 本文以斯坦纳最小树 (SMT) 为理论模型, 建立了符合我国大型城市不断扩展这一特点的树状地下物流网络布局模型. 由于 SMT 为 NP- 完全问题, 因此算法的寻优能力是研究的关键. 本文所采用的模拟植物生长算法 (PGSA) 是以植物向光性理论为启发式准则的智能算法, 该算法是利用人工植物在给定物流节点集解空间中的生长过程得到城市地下物流网络的最优布局. 通过对国际公布的 STEINLIB 实例数据计算并与蚁群算法和模拟退火算法进行比较, 表明模拟植物生长算法具有较强的精确性、稳定性和全局搜索能力.

关键词 城市地下物流; 模拟植物生长算法; 斯坦纳最小树; 最优布局

Optimization layout of underground logistics network in big cities with plant growth simulation algorithm

LI Tong^{1,3}, WANG Zhong-tuo²

(1. Management College, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; 2. Institute of Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Key Laboratory of Advanced Design and Intelligent Computing, Ministry of Education, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract With the aggravation of traffic jam traditional logistics network has reached high-point in big cities in China, so the logistics system on the ground will gradually transfer to underground on various layers in the future so as to release the ground space in cities. Based on SMT theory, this paper establishes underground tree logistics network layout model. Because SMT is NP-complete problem, the algorithm optimization capability is the key of research. Plant growth simulation algorithm (PGSA) in this paper is an intelligence optimization algorithm, which takes plant phototropism growth pattern as its heuristic criterion. Through artificial plant growth process in solution space of given logistics node set, we can get the optimal layout of underground logistics network in cities. Through the calculation of STEINLIB lab data announced internationally, PGSA is demonstrated with better accuracy, stability and global searching ability, by comparing the solutions of ant algorithm and simulated annealing algorithm.

Keywords city underground logistics; plant growth simulation algorithm; Steiner minimum tree; the optimal layout

1 引言

进入 21 世纪, 交通拥堵问题已成为制约我国大型城市发展的重要因素. 随着城市化进程的不断推进, 未来我国人口仍将快速向大城市集中, 城市的物资供应、市民消费品配送以及各类商务物品流转的急剧增长使得已经达到极限的传统物流方式不仅无法保证城市进一步发展的要求, 同时还面临环境污染、能源紧缺等一系列问题. 为使我国大型城市走可持续发展和低碳经济之路, 今后包括城市物流系统在内的许多交通模式、产业模式及管理模式都将面临重构.

收稿日期: 2011-01-06
资助项目: 国家自然科学基金 (71171070, 71072161, 71173066); 教育部人文社科基金 (12YJAZH063); 浙江省自然科学基金 (Y7-100447); 浙江省高校人文社科重点研究基地 “决策科学与创新管理” 重大项目 (RWSKZD04-2012ZB, RWSKZD04-2012ZB3)
作者简介: 李彤 (1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 优化理论与技术, E-mail: litong67@tom.com; 王众托 (1928-), 男, 教授, 中国工程院院士.

把地面物流系统逐步向地下不同层次里转移, 释放出城市地上空间, 不仅能够从根本上缓解交通拥堵问题(城市地面近一半的车辆为物流车辆), 大大提高物流系统的运转速度和效率, 有效地减少污染和节约资源, 同时也适应电子商务、网上购物以及低碳经济的发展要求. 20 世纪 90 年代以来, 地下物流的相关技术(如地下管道的非开挖施工技术等)不断成熟, 利用地下物流系统进行货物运输的研究受到了西方发达国家的高度重视, 并作为未来可持续发展的高新技术领域, 该系统将是 21 世纪城市地下空间建设的核心内容.

2 问题背景

城市地下物流系统 (ULS), 是指运用自动导向车 (AGV) 和两用卡车 (DMT) 等承载工具, 通过大直径地下管道、隧道等运输通路, 对固体货物实行输送的一种全新的运输和供应系统. 该系统首先将城外的货物通过各种运输方式运到位于城市边缘的机场、公路或铁路货运站、物流园区 (city logistics park, CLP) 等, 经处理后进入城市地下物流系统, 由 ULS 运送到城内的各个客户 (如超市、酒店、仓库、工厂、配送中心等). 在城市地下物流系统建设之前, 除了考虑自动导向车、两用卡车等运载工具, 提取系统 (AS / RS-Automated storage / retrievesystem)、堆垛机 (stackercrane) 和货盘等基本运输单元以及为实现高度自动化和准确化而采用的自动导航系统外, 更需要重点考虑的就是城市将要形成的地下物流网络结构以及该网络未来的演化和拓展情况. 地下物流系统的网络形态直接影响着物流系统的运转效率, 也直接影响该系统结构的合理性、工程投资以及网络建成后的经济效益和社会效益.

将大型城市的生产用地、仓储用地、办公用地和商业用地等代表性区域抽象为物流节点, 就构成了城市物流节点分布图, 连接这些物流节点的最优网络问题就抽象成为了组合数学中的斯坦纳最小树 (SMT) 问题, Karp 在其著名论文中证明了该问题是 NP- 完全的. 本文将具有较强稳定性、精确性和全局搜索能力的模拟植物生长算法用于解决这一问题, 这在物流优化领域是一次探索和尝试.

3 城市地下物流系统研究现状

目前美国、德国、荷兰、日本等发达国家针对地下物流系统网络规划方面展开了大量的研究和实践工作. 许多学者不断对各类地下物流网络模型进行改进, 并通过联通指数比较法等方法, 结合调查和计算所得的各项基本数据对不同的网络布局进行测算和评价. 地下物流网络布局形态主要有线状布局、环状布局、栅格状布局、树状布局和混合布局等, 见图 1 中 (a)-(g) 所示.

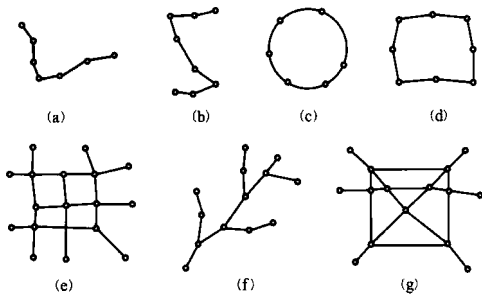


图 1 地下物流网络布局形态图

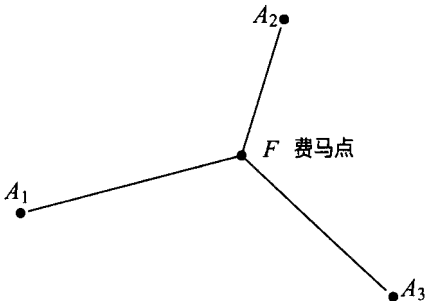


图 2 费马问题

在各类网络布局形态中, 树状布局 (f) 连接的节点较多, 网络的扩展性和演化性较强, 而且其开发难度和投资费用相对较少, 是所有地下物流网络中性价比最高的布局形态, 树状布局比较符合目前我国大城市快速扩展的特点. 但是, 树状最优网络的求解却是最困难的, 该网络优化的理论原型最早可以追溯到 1634 年法国数学家费马 (Fermat) 所提出的费马问题, 即: 对平面上任意给定的三个点 A_1, A_2, A_3 , 如何找出另外一点 F (费马点), 将它与这三个点相连, 使得连线的总长度最小? 对于这个给定点 $n = 3$ 的优化问题, 费马并没有给出解答 (费马问题见图 2).

1640 年, 对于已给三个点所构成的三角形三内角皆小于 120° 的情形, 被伽利略的学生托里拆利 (Torricelli) 解决; 1750 年, 辛普森 (Simpson) 提出一种加权情形: 若 A_1, A_2, A_3 为平面上给定的三个点, 又 $w_i > 0$ ($i = 1, 2, 3$), 求平面上一点 A_0 使 $\sum_{i=1}^3 w_i |A_0 A_i|$ 最小; 1775 年, 法尼亚诺 (Fagnano) 提出了 $n = 4$ 的问题, 即求出一点 P , 使得它与所给的 4 个点的距离之和为最小, 并给出了解法; 1834 年, Heinen 解决了所给三个点所构成的三角形有内角大于或等于 120° 的情形, 即退化情形; 19 世纪初, 瑞士数学家斯坦纳 (Steiner) 将问题进一步推广为: 求平面上一点至已给 n 点的距离之和最小, 此问题称为斯坦纳问题; 20 世纪 40 年

代, 库朗 (Courant) 和罗宾斯 (Robbins) 对斯坦纳问题进行了一次具有重大理论意义的推广, 他们认为, 斯坦纳问题是对费马问题的一个平凡推广, 更有意义的推广应是: 对给定的 n 个点 $x(1), x(2), \cdots, x(n)$, 如何求一最小网络将它们连接起来? 这一推广将斯坦纳问题拓展成为了最短网络问题^[1]. 由于最短网络一定是树, 20 世纪 70 年代年吉尔伯特 (Gilbert) 和波拉克 (Pollak) 首次将这一最短网络称之为斯坦纳最小树 (Steiner minimum tree, SMT).

SMT 在物流网络结构优化中具有不同的应用背景, 历史上不断有管理学家给出 SMT 的解法和讨论, 例如 20 世纪初期德国管理学家韦伯 (Weber) 在《工厂选址理论》中, 以 SMT 为理论模型第一次研究了如何使单个仓库到不同客户总距离最短的问题^[2](20 世纪 50 年代 SMT 问题在我国也曾作为麦场选址问题被提出来过); Hotelling 在其 1929 年发表的论文中考虑两个竞争供应商在一条直线上的区位选择模型, 随后 Smithies、Stevens 对此问题进行了更深入的研究; 区域经济学家 Isard 还从土地利用、投入产出等角度入手对工业区位进行优化. 20 世纪五、六十年代, 研究者偏重于网络优化问题的实际应用, 包括产品销售网点的分布与设计 (Losch, Moses)、电话网络程控交换设备结构优化 (Rapp) 等. Hakimi 于 1964 年发表的关于多设施网络优化的论文是网络优化在应用领域的一个系统、科学的里程碑^[3]. 到了七、八十年代, 网络优化问题被引入一个更宽广的领域, 包括生产中心优化设计 (Eilon)、发电厂的最优位置确定 (Dobson)^[4]、变电站网络规划 (Hochbaum)、交通枢纽最优设计 (Wirasinghe, Waters) 等, 研究方法更集中于运筹学、拓扑学, 经济学方法的应用越来越少. 从 20 世纪 90 年代以后, 更多的优化方法和技术应用到网络设计问题当中, Brimberg, ReVelle 研究了简单线性工厂最优结构设计问题, 提出使用特殊算法中的 LP 代码来解决优化模型^[5]; Noon, Hankins 运用空间数据挖掘和知识发现方法, 对卫生服务设施的网络进行优化^[6]; Ribeiro, Antunes 对葡萄牙北部一重要自治区的公共设施网络进行优化^[7]. 进入 21 世纪, 对于城市物流网络优化方面的研究进一步深化, 如 Taniguchi 和 Thompson 的城市物流系统优化模型研究^[8]; Ambrosino 和 Scutella 的网络模型和算法研究^[9]; Crainic 等人的城市物流系统评估计划等方面的研究^[10]. 随着城市交通拥堵和环境污染情况的加剧, 城市地下物流系统成为了未来城市物流体系发展的一个主要方向. 美国格兰尼教授和日本尾岛俊雄教授认为: 城市地下物流系统是将地上的城市运输和传输系统逐步转移到城市地下的不同层次里, 使地上逐步摆脱与传统运输相联系的环境干扰. Swartzwelter 在《美国长期运输问题解决方案》中提出: 地表空间仅供人们休养生息, 地下广阔的空间才是供人类开发交通运输通道的场所, 那里在深度和广度上几乎不受限制. 地下通行权可自由获得, 不会因地形变化、地面工程或天气条件而中断. 直线是从一点到另一点最短的路径, 由于地下物流网络运输线路可以取得很直很平, 在摩擦很低的环境中, 直线运输线路的效率更显著, 基于这一特点, 目前德国的 Ruhr University Bochum、美国的 University of Missouri-Columbia、荷兰的 Delft University 以及日本的 Kyoto University 等正积极开展地下物流网络结构优化方面的研究. 在传统的物流网络系统中, 在地面上建一条没有弯曲的运输通道极不现实, 因此许多网络优化理论和方法是无法真正有效运用的, 城市地下物流系统为优化理论的运用提供了非常好的应用背景. 美国休斯顿对地下物流系统网络布局进行了详细的论证和优化设计, 最后利用 SMT 优化理论建立了树状网络布局 (见图 3).

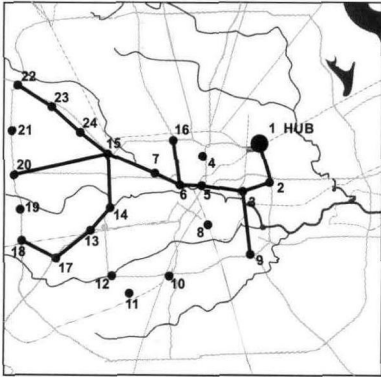


图 3 美国休斯顿地下物流系统网络

我国上海在 2010 年也规划了地下空间建设八大重点工程, 其中在地下 -15 米 ~ -40 米地层规划为地下物流系统建设空间, 其系统优化方面的研究尚在不断的探索之中. 由于我国大型城市拓展速度较快, 地下物流节点不仅数量多, 且规模还不断发生变化, 这些特殊性与已基本完成城市化进程的发达国家不同, 因此有效算法就成为大型城市地下物流网络优化重中之重的问题了.

4 地下物流网络系统优化

4.1 模拟植物生长算 (PGSA)

模拟植物生长算法 (plant growth simulation algorithm, PGSA) 目前主要被国内外学者应用于多级规划、组合优化、整数规划等基础研究领域以及物流、核工业、电力、水利等应用研究领域, 模拟植物生长算法的特点和主要发展过程如下:

2005 年, 本文第一作者李彤在文献 [11]、[12] 中建立了模拟植物生长算法 (PGSA) 的理论和算法体系. 其主要特点是以植物向光性理论为启发式准则, 将优化问题的解空间当作植物的生长环境, 模拟真实植物的向光性机理 (形态素浓度理论), 建立枝干在不同光线强度环境下的快速生长演绎方式 (L- 系统). PGSA 的理论核心是建立以生长规则为基础的植物系统演绎方式和以植物向光性理论为基础的概率生长模型, 两者结合所形成的优化模式, 就是实现人工植物在优化问题解空间中从初始状态到完整形式的终态 (没有新的树枝生长) 的过程.

2006 年, PGSA 没有得到国内外学者关注 (全年发表了一篇文章), 只有上海交通大学的王淳和程浩忠教授将 PGSA 用于解决 Ward-Hale 6 节点系统和 IEEE 30 节点系统的优化问题, 结果表明 PGSA 的精度和运算速度优于遗传算法和协同进化算法 [13].

2007 年, 李彤等在科学出版社出版了介绍 PGSA 的学术专著, 将 PGSA 与遗传算法、模拟退火算法、填充函数法等进行了比较研究 [14]; 王淳和程浩忠在文献 [15] 中将 PGSA 用于解决配电网重构优化问题, 计算表明 PGSA 与遗传算法、Tabu 搜索等算法相比, 具有更高的精度和更加快速的全局寻优能力; 文献 [16] 将 PGSA 用于解决 18 节点网络系统, 结果表明 PGSA 给出的最优网络是现有中外文献当中最好的方案, 明显优于遗传算法和粒子群算法.

2008 年, 李彤和王众托院士利用 PGSA 解决物流设施选址问题, 并与遗传算法求得的结果进行比较, PGSA 的运算精度更高 [17]; Rao 和 Narasimham 应用 PGSA 解决规模分别为 9、34 和 85 三种典型类别的电容布局径向分布系统优化问题, 所有结果均优于 PSO (粒子群算法) [18]; 罗伟强、于建涛和黄家栋采用植物顶点变速度生长特点来减少搜索时间, 利用植物生长期前期纵向型生长特性减少搜索空间, 通过对不同类型的非线性整数规划问题进行求解, 表明了 PGSA 的有效性 [19]; 杨俊、艾欣、邵淮岭等人利用 PGSA 进行了安全成本研究 [20]; 王淳、程浩忠、谭永香、翁新林等人以电力系统优化为应用背景, 将 PGSA 与遗传算法、粒子群算法等进行了比较研究 [21–23].

2009 年, PGSA 开始逐步被国内外一些学者在各自的优化领域所应用, Guney, Durmus 和 Basbug 将 PGSA 分别于 MTACO、BA、BFA 三种智能算法比较, PGSA 均得到了更优的结果, 且收敛性和计算速度明显优于其他算法 [24]; Thiruvankadam 等人利用 PGSA 解决大规模电网能源优化问题 [25]; Rama 等人利用 PGSA 选择最优径向分布系统, 在实际应用中实现了能源损失成本和系统折旧成本之和最小, 且负荷效应增长可达 5 年 [26]; Rao、Narasimham、Wang、Sakthivel 等人也分别利用 PGSA 解决了不同领域优化问题 [27–29]. 在国内, 杨磊等人将 PGSA 用于解决辐照装置上的钴源源棒的排列优化问题 [30]; 丁雪枫、马良利用 PGSA 解决易腐物品物流中心选址问题 [31]; 叶婧、汪芳宗利用 PGSA 解决配电网重构问题 [32]; 此外, 赵颖、罗伟强、张节潭、王淳、万卫、杨丽徙、王锴、武娜、焦彦军、于建涛等人均在优化领域运用 PGSA 进行了应用研究, 取得了令人满意的效果 [33–37].

2010 年至今, 李彤和王众托院士从智能算法创新的角度总结了 PGSA 的提出和发展过程, 并对国内外研究现状进行了总结 [38]; 李彤等人将 PGSA 用于解决斯坦纳最小树问题 [39] 和非线性整数二层规划问题 [40]; 什隆男、大山力、桥口卓平等人以及 Sirjani、Mohamed 和 Shareef 对 PGSA 在配电网系统分布优化和大规模径向分布系统最优化方面进行了总结 [41–42]; 杨磊、刘义保、龚学余、刘珂等人将 PGSA 用于解决大型辐照系统优化问题, 结果表明 PGSA 比现有排源算法整体性能提高 30 倍以上 [43]; 陈立华、梅亚东将 PGSA 应用于二滩、锦屏、官地、桐子林水库群的优化调度问题, 并与动态规划 (DP)、动态规划逐次逼近法 (DPSA) 和逐步优化法 (POA) 进行了比较研究 [44]; 此外, 于永哲、黄家栋、唐海波、叶春明、张新功、丁雪枫、马良等人也利用 PGSA 解决了配电网重构、MCCS 问题、车间调度等问题, 并与遗传算法等智能算法进行了比较研究 [45–49].

PGSA 从 2005 年提出至今经过了 6 年的时间, 还有许多缺点和不成熟之处, 但该算法在某些领域也逐步体现出了一些特点和优势, 文献 [24] 认为: “As an optimization algorithm, the PGSA will most likely be an

increasingly attractive alternative, in the electromagnetics and antennas community, to other optimization algorithms”. 文献 [25] 认为: “The advantages with the plant growth simulation algorithm (PGSA) is that it treats the objective function and constraints separately, which averts the trouble to determine the barrier factors and makes the increase/decrease of constraints convenient, and that it does not need any external parameters such as crossover rate, mutation rate, etc. It adopts a guiding search direction that changes dynamically as the change of the objective function”. 文献 [16] 对 PGSA 做过一个概括: “理论分析及算例结果表明, 与遗传算法为代表的现代启发式算法相比, 模拟植物生长算法具有以下优点: ①模拟植物生长算法将目标函数和约束条件分开处理, 且无需编码和解码, 避免构造新的计算用目标函数, 也不存在惩罚系数、交叉率、变异率选取等问题, 解的稳定性好; ②模拟植物生长算法具有一个由形态素浓度决定的方向性和随机性平衡比较理想的搜索机制, 能以较快的速度寻找到全局最优解”。

基于以上国内外学者运用 PGSA 解决不同领域优化问题并与遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法、粒子群算法、Tabu 搜索等优化算法的比较研究, 本文尝试将 PGSA 用于地下物流网络系统的优化。

4.2 地下物流网络系统的模拟植物生长优化

在传统的物流网络系统中, 在地面上建一条没有弯曲的运输通道极不现实, 而地下物流网络运输线路却可以取得很直很平, 正是基于这种原因, 才可以将连接各个物流节点的城市地下物流网络转化为 SMT。在众多 SMT 的算法中, 所有精确算法的计算量都是随给定点数量的增加而呈指数增加的。Karp 证明了 SMT 是 NP- 完全的, 这意味着对平面点集而言, 不大可能存在求解这个问题的多项式时间算法, 他的这一研究结论为解决 SMT 问题启发式算法的开展奠定了理论基础。目前典型的启发式算法主要包括: Kou、Markousky 和 Breman 提出的 DNH 算法, Takahashi 和 Matsuyama 提出的 MPH 算法, Rayward 提出的 ADH 算法, 以上三种启发式算法在绝大多数情况下都不能得到最优网络。

本文采用的模拟植物生长算法具有网络形态演化的能力 (人工植物在解空间中不断生长), 除扩展性好的特点外, PGSA 还具有计算精度高、收敛速度快、稳定性好等特点。但对于具体的 SMT 网络, 尚需要解决 5 个算法关键点: 1、植物生长细胞 (随机初始可行解); 2、植物向光性 (评价函数); 3、L- 系统 (邻域); 4、形态素浓度 (选择和接受解的准则); 5、新枝生长停止 (终止准则)。

按照图论中的网络表达方式, 将地下物流网络结构加以抽象, 以网络图论的符号定义如下:

$$U = \{N, V, W\},$$

式中: U 为城市地下物流系统网络; N 为物流节点; V 为网络路线; W 为路线的权重, 即运输距离、时间、费用等。

定义 1 设 $P = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 是一个有限点集, $N = (V, E)$ 是一个顶点集为 V , 边集为 E 的网络。如果 $V \supseteq P$, 则称 N 为 P 的 Sterner 网络。如果 $V = P$, 则称 N 为 P 的生成网络。

定义 2 网络 N 的长度定义为它的各条边的长度之和。对于给定有限点集 P 及正整数 k , 称 P 的最短 k - 边连通 Sterner 网络的长度与 P 的最短 k - 边连通生成网络的长度的比值为 k - Sterner 比率, 记为 $l_k(P)$ 。

(注: $l_k(P)\sqrt{3} \geq 1/2 \approx 0.866$ 是组合数学中著名的斯坦纳比猜想 (也称 G-P 猜想)。根据该猜想, 在地下物流网络设计上用 SMT 去代替 MST, 最多可以减少 13.4% 的成本)。

根据以上定义, 地下物流网络被抽象为物流节点和网络路线。在整个网络中, 物流节点是最关键的, 物流节点有着不同的分类与分级, 如美国休斯顿地下物流系统将网络节点进行了分类, 分为客户、物流中心 (hub) 和配送中心 (DC); 荷兰 Schiphol 的物流系统将网络节点称之为终端 (terminal)。在以上概念模型的基础上, 本文将物流节点 N 分为两类: 供给节点和需求节点, 在一个欧几里得空间上, 需求节点位置为 a_i ($i = 1, 2, \dots, m$), 供给节点位置为 x_j ($j = 1, 2, \dots, n$), 该模型的数学形式如下:

$$\min U = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m W_{ij} \|x_j - a_i\|, x_j \in R^2, W_{ij} \geq 0, \forall i, j \tag{1}$$

式中, a_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 是第 i 个需求节点的位置, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是有界闭凸区域, x_j 为第 j 个供给节点位置 (需求节点变化时, 供给节点将随之演化), W_{ij} 是第 j 个供给节点到第 i 个需求节点的权重, $\|x_j - a_i\|$ 是 x_j 到 a_i 的范数距离, 本文采用欧式距离。

地下物流系统最小网络的模拟植物生长算法实现如下:

Step 1 利用 Prim 算法计算有限点集 P 所构成的 MST 网络;

Step 2 根据 MST 生成新的 SMT 拓扑结构, 构造 n 个初始斯坦纳点 $(S_1, S_2, \cdots, S_n)$;
Step 3 计算 $(S_1, S_2, \cdots, S_n)$ 形态素浓度值:

$$p_i = \frac{f(S_i)}{\sum_{i=1}^n f(S_i)}$$

(2)

(注: $f(\cdot)$ 为与 S_i 相邻边长度之和; 由于 $P_1 + P_2 + \cdots + P_n = 1$, 因此其概率空间如图 4 所示.

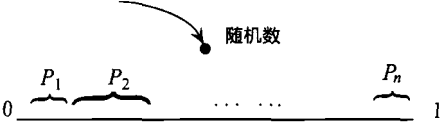


图 4 形态素浓度概率空间

计算机系统不断产生随机数, 这些随机数就象不断向区间 $[0, 1]$ 上投掷的小球, 小球落在 $P_1, P_2, \cdots, P_n$ 的某一个概率空间内, 所对应的生长点就得到优先生长的权利.)

Step 4 $P(i+1) \leftarrow P(i+1) + P(i), P(i) \leftarrow P(i)/P(n)$;
Step 5 if $P(i) < \text{random}[0,1] < P(i+1)$ then $F \leftarrow S_i$;
Step 6 初始状态 ω : F ,

旋转角度: $\delta = 90^\circ$,
生长规则: $F \rightarrow F[-F][+F]F$,
新生长点为: $S_i(1), S_i(2), S_i(3)$.

(注: 设 (x, y, α) 为随机选择的斯坦纳点 (模拟植物生长点) 的当前状态. 其中 x 和 y 为其位置的坐标, α 为生长点的指向, 节的长度为 d , 顶的角度增量为 δ . [代表的含义是将当前信息记录下来, 即将该节点 (树枝的分叉点) 的信息保存起来, 先画第一个分枝; 而] 表示的含义是将 [时刻记录的信息释放出来, 当画完一个分枝后, 利用] 将上一个节点的信息 (即上一分叉点的状态) 取出, 然后从该分叉点继续画第二个分枝. 其他相关符号的含义为:

F : 在当前方向上生长节长 d , 顶的状态变为 (x', y', α) . 其中, $x' = x + d \cos \alpha, y' = y + d \sin \alpha$.
+: 逆时针旋转一个角度 δ , 顶的状态变为 $(x, y, \alpha + \delta)$. 这里, 规定逆时针方向为正.
-: 顺时针旋转一个角度 δ , 顶的状态变为 $(x, y, \alpha - \delta)$.)

Step 7 $S_i \leftarrow \min\{f(S_i), f(S_i(1)), f(S_i(2)), f(S_i(3))\}$;
Step 8 若连续 n (如 500) 次迭代无新枝生长, 则植物生长结束, 否则返回 Step 3.

4.3 数值试验

给定节点 $P: a_1, a_2, \cdots, a_m$, 求一最小网络将它们连接起来, 对于该问题国际上公布了测试数据库 STEINLIB, 其中 $L_S(X)/L_M(X)$ 为斯坦纳比. 对于给定节点集不同的情况, 本文利用模拟植物生长算法 (PGSA) 与文献 [50] 中利用蚁群算法 (AA) 和模拟退火算法 (SA) 的比较结果作以下数值试验.

数值试验 1 测试数据库 STEINLIB 中给定点集 $P = \{(0.14 \ 0.45), (0.21 \ 0.27), (0.75 \ 0.19), (0.87 \ 0.34), (0.67 \ 0.84), (0.48 \ 0.86)\}$ 时, AA 的最好运算结果 $L_S(X)/L_M(X) = 0.9914836$, SA 的最好运算结果 $L_S(X)/L_M(X) = 0.9964533$, PGSA 的最好运算结果 $L_S(X)/L_M(X) = 0.8953993$, 精度提高较大, PGSA 求得的最小网络见图 5.

表 1 STEINLIB 中数值试验 1 计算结果比较

	PGSA	AA	SA
$L_S(X)/L_M(X)$	0.8953993	0.9914836	0.9964533
斯坦纳点: (0.2264,0.3816); (0.5164,0.4964); (0.7660,0.2988); (0.5604,0.7964)			

数值试验 2 测试数据库 STEINLIB 中给定点集 $P = \{(0.25 \ 0.20), (0.31 \ 0.09), (0.39 \ 0.08), (0.48 \ 0.10), (0.70 \ 0.20), (0.64 \ 0.28), (0.56 \ 0.32), (0.48 \ 0.30)\}$ 时, AA 的最好运算结果 $L_S(X)/L_M(X) = 0.9965880$, SA 的最好运算结果 $L_S(X)/L_M(X) = 0.9975208$, PGSA 的最好运算结果 $L_S(X)/L_M(X) = 0.9756573$, PGSA 求得的最小网络见图 6.

表 2 STEINLIB 中数值试验 2 计算结果比较

	PGSA	AA	SA
$L_S(X)/L_M(X)$	0.9756573	0.9965880	0.9975208
斯坦纳点: (0.3103,0.0902); (0.3802,0.0812); (0.3900,0.0800); (0.5395,0.2585); (0.6380,0.2747); (0.5300,0.2700)			

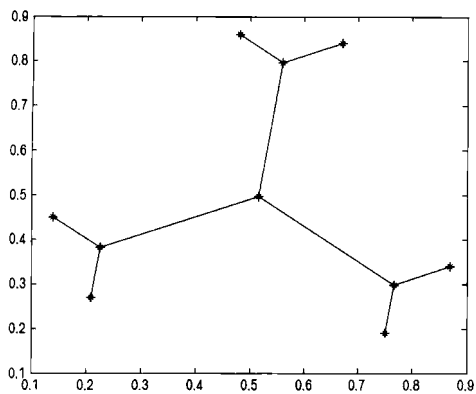


图 5 试验 1 的最小网络

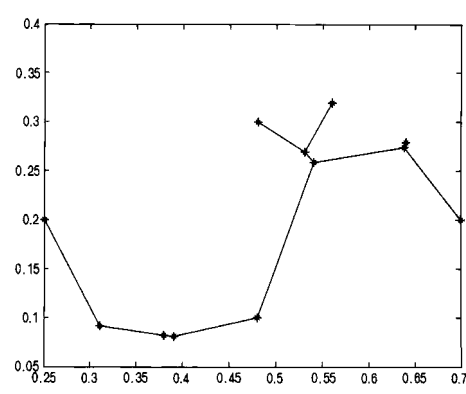


图 6 试验 2 的最小网络

数值试验 3 测试数据库 STEINLIB 中给定点集 $P=\{(0.03\ 0.50), (0.20\ 0.60), (0.37\ 0.50), (0.37\ 0.30), (0.20\ 0.20), (0.03\ 0.30), (0.63\ 0.50), (0.80\ 0.60), (0.97\ 0.50), (0.97\ 0.30), (0.80\ 0.20), (0.63\ 0.30)\}$ 时, AA 的最好运算结果 $L_S(X)/L_M(X) = 0.9777726$, SA 的最好运算结果 $L_S(X)/L_M(X) = 0.9751919$, PGSA 的最好运算结果 $L_S(X)/L_M(X) = 0.9346679$, PGSA 求得的最小网络见图 7.

表 3 STEINLIB 中数值试验 3 计算结果比较

$L_S(X)/L_M(X)$	PGSA	AA	SA
	0.9346679	0.9777726	0.9751919
斯坦纳点: (0.1425,0.5000); (0.2000,0.4005); (0.1420,0.3000); (0.3125,0.4005); (0.6876,0.4004); (0.8000,0.4004); (0.8580,0.3000); (0.8576 0.5000)			

数值试验 4 测试数据库 STEINLIB 中给定点集 $P=\{(0\ 0.40), (0\ 0.50), (0.03\ 0.60), (0.10\ 0.65), (0.20\ 0.60), (0.20\ 0.48), (0.30\ 0.40), (0.37\ 0.45), (0.39\ 0.60), (0.45\ 0.65), (0.50\ 0.65), (0.54\ 0.60), (0.54\ 0.48), (0.63\ 0.40), (0.70\ 0.50), (0.72\ 0.60), (0.80\ 0.68), (0.89\ 0.65), (0.90\ 0.51), (0.90\ 0.41)\}$ 时, AA 的最好运算结果 $L_S(X)/L_M(X) = 0.9906618$, SA 的最好运算结果 $L_S(X)/L_M(X) = 0.9907826$, PGSA 的最好运算结果 $L_S(X)/L_M(X) = 0.9767640$, PGSA 求得的最小网络见图 8.

表 4 STEINLIB 中数值试验 4 计算结果比较

$L_S(X)/L_M(X)$	PGSA	AA	SA
	0.9767640	0.9906618	0.9907826
斯坦纳点: (0.0001, 0.4999); (0.0632, 0.5780); (0.0564, 0.5958); (0.1686 0.5613); (0.3007, 0.4146); (0.6247, 0.4436); (0.8004, 0.6775)			

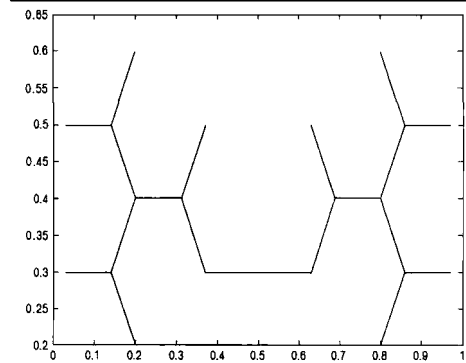


图 7 试验 3 的最小网络

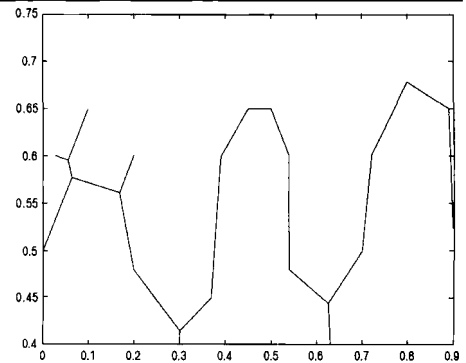


图 8 试验 4 的最小网络

以上数值试验的模拟植物生长算法用 Matlab 编程实现, 在 Windows XP 平台上运行通过, 试验中计算机为 Celeron(R) CPU 3.06GHz, 1.00GB 内存, PGSA 在 STEINLIB 中的每个测试实例分别进行 15 次计算. 数值试验 1 平均运算时间 9.3s, 数值试验 2 平均运算时间 7.8s, 数值试验 3 平均运算时间 17.2s, 数值试验 4 平均运算时间 15.7s. 其中最好结果与最差结果之间误差值不超过 0.00031%, 表现出了算法突出的计算稳定性.

除以上在 STEINLIB 测试数据库中给定点为 6、8、12、20 四个测试案例外, 课题组还求得了给定点为 5、7、9、10、18 等测试案例, 由于篇幅所限, 省略其最小网络求解结果, 选择参数“斯坦纳比” $L_S(X)/L_M(X)$

作为模拟植物生长算法 (PGSA) 与蚁群算法 (AA) 和模拟退火算法 (SA) 的质量标准, 精度对比结果如图 9 所示, 表明 PGSA 精度优势较明显.

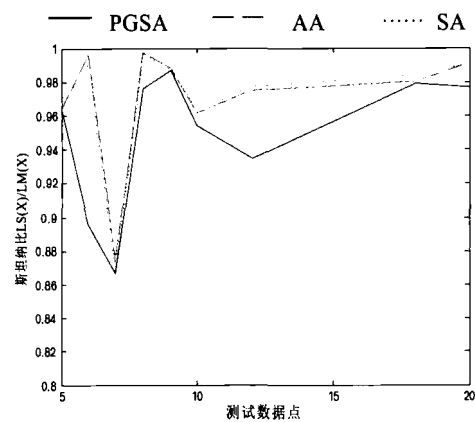


图 9 PGSA、AA、SA 精度对比结果

5 结束语

在大型城市交通拥堵问题日益严重的情况下, 发展城市地下物流系统逐步释放出地上空间是未来我国大型城市可持续发展的重要途径 [51–53], 而这一网络的优化水平将直接影响其建设成本及其建成后的经济效益和社会效益. 本文将树状地下物流网络抽象为 SMT 问题, 进而利用模拟植物生长算法求得连接各主要物流节点的最小网络. 模拟植物生长算法作为一种新的智能优化算法, 在解决地下物流网络优化问题时, 该算法表现出了较强的全局搜索能力, 具有计算精度高, 稳定性好和应用性强的特点.

参考文献

[1] 越民义. 最小网络 —— 斯坦纳树问题 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2006.
Yue M Y. Minmum network — Steiner tree problem[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2006.

[2] Drezner Z, Wesolowsky G O. The Weber problem on the plane with some negative weights[J]. INFOR Journal, 1991, 29: 87–99.

[3] Hakimi S L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph[J]. Operations Research, 1964, 12(3): 450–459.

[4] Dobson J. A regional screening procedure for land use suitability analysis[J]. The Geographical Review, 1979, 69: 224–234.

[5] Brimberg J, ReVelle C. Solving the plant location problem on a line by linear programming[J]. TOP, 1998, 6(2): 277–286.

[6] Noon C E, Hankins C. Spatial data visualization in healthcare: Supporting a facility location decision via GIS-based market analysis[C]// 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2001.

[7] Ribeiro A, Antunes A P. A GIS-based decision-support tool for public facility planning[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2002, 29: 553–569.

[8] Taniguchi E, Thompson R G. Modeling city logistics[J]. Transportation Research Record, 2002, 1790: 45–51.

[9] Ambrosino D, Grazia Scutella M. Distribution network design: New problems and related models[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 165(3): 610–624.

[10] Crainic T G, Ricciardi N, Storchi G. Models for evaluating and planning city logistics systems[J]. Transportation Science, 2009, 43(4): 432–454.

[11] 李彤. 基于模拟植物生长的二级整数规划算法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005.
Li T. The research on bilevel integer programming algorithm based on plant growth simulation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.

[12] 李彤, 王春峰, 王文波, 等. 求解整数规划的一种仿生类全局优化算法 —— 模拟植物生长算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(1): 76–85.
Li T, Wang C F, Wang W B, et al. A global optimization bionics algorithm for solving integer programming — Plant growth simulation algorithm[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2005, 25(1): 76–85.

[13] 王淳, 程浩忠. 基于模拟植物生长算法的电力系统无功优化 [J]. 电网技术, 2006, 30(21): 37–41.
Wang C, Cheng H Z. Reactive power optimization based on plant growth simulation algorithm[J]. Power System

- Technology, 2006, 30(21): 37–41.
- [14] 李彤, 宿伟玲, 李磊. 单级与二级整数规划算法原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Li T, Su W L, Li L. Single-believel integer programming theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [15] 王淳, 程浩忠. 基于模拟植物生长算法的配电网重构 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 50–55.
Wang C, Cheng H Z. Reconfiguration of distribution network based on plant growth simulation algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 50–55.
- [16] 王淳, 程浩忠. 模拟植物生长算法及其在输电网规划中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 24–28.
Wang C, Cheng H Z. A plant growth simulation algorithm and its application in power transmission network planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 24–28.
- [17] 李彤, 王众托. 模拟植物生长算法在设施选址问题中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(12): 107–115.
Li T, Wang Z T. Application of plant growth simulation algorithm on solving facility location problem[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2008, 28(12): 107–115.
- [18] Rao R S, Narasimham S, Ramalingaraju M. Optimal capacitor placement in a radial distribution system using plant growth simulation algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(5): 1133–1139.
- [19] 罗伟强, 于建涛, 黄家栋. 一种求非线性整数规划最优解的仿生算法 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(7): 57–68.
Luo W Q, Yu J T, Huang J D. Bionic algorithm for solving nonlinear integer programming[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(7): 57–68.
- [20] 杨俊, 艾欣, 邵淮岭, 等. 基于模拟植物生长算法考虑安全成本的最优潮流 [J]. 中国电机工程学报, 2008: 35–40.
Yang J, Ai X, Shao H L, et al. Optimal power flow subject to security cost based on plant growth simulation algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2008: 35–40.
- [21] 王淳, 程浩忠, 谭永香, 等. 发电机组检修计划的模拟植物生长算法 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(9): 105–110.
Wang C, Cheng H Z, Tan Y X, et al. Plant growth simulation algorithm for generator maintenance scheduling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(9): 105–110.
- [22] Wang C, Cheng H Z, Hu Z C, et al. Distribution system optimization planning based on plant growth simulation algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science). 2008, 13(4): 462–467.
- [23] Wang C, Cheng H Z, Yao L Z. Reactive power optimization by plant growth simulation algorithm[C]// Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008(4): 771–774.
- [24] Guney K, Durmus A, Basbug S. A plant growth simulation algorithm for pattern nulling of linear antenna arrays by amplitude control[J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2009, 17: 69–84.
- [25] Thiruvankadam S, Nirmalkumar A, Sakthivel A. Energy management of large distribution network with plant growth simulation algorithm and heuristic fuzzy[J]. International Journal on Electronic & Electrical Engineering, 2009, 1(1): 97–108.
- [26] Rama P, Sivanaga Raju S. Optimal conductor selection in radial distribution system using plant growth simulation algorithm[J]. International Journal of Engineering Studies, 2009, 1(3): 229–240.
- [27] Wang C, Cheng H Z. Transmission network optimal planning based on plant growth simulation algorithm[J]. European Transactions on Electrical Power, 2009, 19(2): 291–301.
- [28] Rao R S, Narasimham S. A new heuristic approach for optimal network reconfiguration in distribution systems[J]. International Journal of Engineering and Applied Sciences, 2009, 5(1): 15–21.
- [29] Thiruvankadam S, Nirmalkumar A, Sakthivel A. Optimal reconfiguration algorithm for radial distribution system feasible under normal and abnormal conditions[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2009, 4(9): 115–122.
- [30] 杨磊, 刘义保, 刘玉娟. 基于模拟植物生长算法的钴源源棒的排列优化 [J]. 核技术, 2009, 32(12): 915–921.
Yang L, Liu Y B, Liu Y J. Optimization of source pencil deployment based on plant growth simulation algorithm[J]. Nuclear Techniques, 2009, 32(12): 915–921.
- [31] 丁雪枫, 马良, 丁雪松. 基于模拟植物生长算法的易腐物品物流中心选址 [J]. 系统工程, 2009, 27(2): 96–101.
Ding X F, Ma L, Ding X S. The location allocation of logistics center of perishable products based on plant growth simulation algorithm[J]. Systems Engineering, 2009, 27(2): 96–101.
- [32] 叶婧, 汪芳宗. 基于改进模拟植物生长算法的配电网重构 [J]. 计算技术与自动化, 2009, 28(3): 49–59.
Ye J, Wang F Z. Distribution network reconfiguration based on refined plant growth simulation algorithm[J]. Computing Technology and Automation, 2009, 28(3): 49–59.
- [33] 赵颖, 罗伟强. 基于改进模拟植物生长算法的输电网络扩展规划 [J]. 电力科学与工程, 2009, 25(5): 6–10.
Zhao Y, Luo W Q. Plant growth simulation algorithm for transmission network expansion planning[J]. Electric Power Science and Engineering, 2009, 25(5): 6–10.
- [34] 张节潭, 程浩忠, 姚良忠, 等. 分布式风电源选址定容规划研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 1–7.
Zhang J T, Cheng H Z, Yao L Z, et al. Study on siting and sizing of distributed wind generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 1–7.

- [35] 王淳, 万卫, 程虹, 等. 多阶段输电网络最优规划的模拟植物生长算法 [J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 937-942.
Wang C, Wan W, Cheng H, et al. Plant growth simulation algorithm for the optimal multistage transmission network planning[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 937-942.
- [36] 杨丽徙, 王锴, 程杰. 应用改进模拟植物生长算法求解无功优化问题 [J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 694-698.
Yang L X, Wang K, Cheng J. Application of modified plant growth simulation algorithm in solution of reactive power optimization problem[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 694-698.
- [37] 武娜, 焦彦军, 于建涛. 一种基于模拟植物生长算法的输电网故障诊断方法 [J]. 电力科学与工程, 2009, 25(3): 5-9.
Wu N, Jiao Y J, Yu J T. Fault diagnosis of transmission network based on plant growth simulation algorithm[J]. Electric Power Science and Engineering, 2009, 25(3): 5-9.
- [38] 李彤, 王众托. 模拟植物生长算法与知识创新的几点思考 [J]. 管理科学学报, 2010, 13(3): 87-96.
Li T, Wang Z T. Plant growth simulation algorithm and the thinking in knowledge innovation[J]. Journal of Management Sciences in China, 2010, 13(3): 87-96.
- [39] Li T, Su W L. Application of plant growth simulation algorithm on SMT problem[J]. ICIC Express Letters, 2010, 4(5): 1945-1950.
- [40] Li T, Han J H, Liu W H. Plant growth simulation algorithm for solving bilevel programming[J]. ICIC Express Letters, 2011, 5(6): 1857-1861.
- [41] Sirjani R, Mohamed A, Shareef H. Optimal capacitor placement in a radial distribution system using harmony search algorithm[J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 10(23): 2998-3006.
- [42] 什隆男, 大山力, 桥口卓平, 等. 配电损失低减を目的とした将来型配电システムの自律分散型电压分布制御方式 [J]. 电气学会论文集, 2010, 130(11): 941-954.
- [43] 杨磊, 刘义保, 龚学余, 等. 改进的模拟植物生长算法及其在大型辐照装置自动排源中的实用化 [J]. 原子能科学技术, 2010, 44(11): 1403-1408.
Yang L, Liu Y B, Gong X Y, et al. Improved plant growth simulation algorithm and its practical application for source bars arrangement at big irradiation facility[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(11): 1403-1408.
- [44] 陈立华, 梅亚东. 模拟植物生长算法在水库群优化调度中的应用 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2010, 34(2): 1-5.
Chen L H, Mei Y D. Plant growth simulation algorithm and its application in optimal operation of cascade reservoirs[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2010, 34(2): 1-5.
- [45] 于永哲, 黄家栋. 基于改进模拟植物生长法的配电网络重构 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 40-43.
Yu Y Z, Huang J D. Reconfiguration of distribution network based on improved plant growth simulation algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 40-43.
- [46] 唐海波, 叶春明. 基于模拟植物生长算法的车间调度问题研究 [J]. 机械科学与技术, 2010, 29(11): 1581-1585.
Tang H B, Ye C M. Application of plant growth simulation algorithm to solving job shop scheduling problem[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(11): 1581-1585.
- [47] 唐海波, 叶春明, 张新功. 应用模拟植物生长算法求解置换流水车间调度问题 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27(10): 3670-3672.
Tang H B, Ye C M, Zhang X G. Plant growth simulation algorithm for permutation flow shop scheduling to minimize makespan[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(10): 3670-3672.
- [48] 丁雪枫, 马良, 丁雪松. 基于模拟植物生长算法的求解 MCCS 问题的研究 [J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(7): 1405-1412.
Ding X F, Ma L, Ding X S. Study on minimal connected cover set problem based on plant growth simulation algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31(7): 1405-1412.
- [49] 丁雪枫, 马良, 尤建新, 等. 基于模拟植物生长算法作业车间调度问题研究 [J]. 微计算机信息, 2010, 26(30): 1-7.
Ding X F, Ma L, You J X, et al. Studies on the job-shop scheduling problem based on plant growth simulation algorithm[J]. Microcomputer Information, 2010, 26(30): 1-7.
- [50] 金慧敏, 马良, 王周缅, 等. 欧氏 Steiner 最小树问题的智能优化算法 [J]. 计算机工程, 2006, 32(10): 201-203.
Jin H M, Ma L, Wang Z M, et al. Intelligent optimization algorithms for Euclidean Steiner minimum tree problem[J]. Computer Engineering, 2006, 32(10): 201-203.
- [51] 郭东军, 陈志龙, 钱七虎. 发展北京地下物流系统初探 [J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 37-41.
Guo D J, Chen Z L, Qian Q H. Discussion on developing underground logistic system in Beijing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(1): 37-41.
- [52] 潘盛艺, 毛海军. 城市地下物流规划建设关键问题发展研究 [J]. 物流技术, 2009, 28(7): 253-255.
Pan S Y, Mao H J. Research on the key issues of urban underground logistics system planning[J]. Logistics Technology, 2009, 28(7): 253-255.
- [53] Ma C L, Mao H J. Function area layout method of underground distribution center[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 48(2): 547-550.