

并行蚁群算法在公交线网优化中应用

于滨^{*1,2}, 杨忠振², 程春田¹

(1. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连海事大学 交通规划研究所, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对实用有效的公交线网优化模型很少的现状, 提出了一个以直达客流密度最大为目标的公交线网优化模型. 该模型以换乘次数最少、单位长度运送客流量最大为优化目标, 线路长度、非直线系数等作为约束条件. 为求解该模型, 并综合考虑优化质量和通信开销, 采用了基于粗粒度模型的并行蚁群算法. 数值实验验证了模型及算法的合理有效.

关键词: 公交线网优化; 直达客流密度; 蚁群算法; 粗粒度

中图分类号: U491.1 **文献标识码:** A

0 引言

城市公交线网设置得是否合理直接影响居民出行所需的时间、换乘次数以及系统运行成本. 因此, 国内外许多学者对公交线网的优化作了大量的研究. 例如 Ceder等^[1]将三阶段法(出行分配、规划路径和发车间隔)引入到公交线网设计中; Hasselstrom^[2]提出了一个两阶段同时优化路线和频率的方法; 王伟等^[3]提出一个以直达乘客量最大为目标的“逐条布设、优化成网”的方法等. 本文以整体线网为研究对象, 以出行者对公交的需求为依据, 方便居民出行为目的, 并兼顾公交企业的经营效益, 建立一个以直达客流密度(单位长度运送的乘客数)最大为目标的公交线网优化模型.

由于网络设计问题是一个 NP-hard问题, 使用传统的算法很难求解. 大量的研究表明, 模拟生物的启发式算法非常适合这种超大规模的优化问题. 蚁群算法就是利用群集智能解决组合优化问题的典型例子. 蚁群算法是受自然界中蚁群找寻食物的行为启发而提出的一种基于种群的模拟进化算法. 它属于随机搜索算法, 是由 Dorigo等^[4]提出的一种新型的优化算法. 比较有代表性的蚁群算法的研究有 Dorigo等^[4]的研究, 他们用蚁群算法解决 TSP问题, 然后进一步把该方法扩

展到解决不均衡的 TSP QAP和 job-shop调度问题中. 为了克服在 Ant-Q中可能出现的停滞现象, Stützle等^[5]提出了 max-min蚁群算法, 称做 MMAS. 它对基本蚂蚁算法(AS)进行了3点改进: ① 为了更加充分地进行寻优, 各路径信息素初值设为最大值 f_{max} ; ② 一次循环后只有修改最短路径的蚂蚁才进行信息素增加; ③ 为了避免算法过早收敛于非全局最优解, 将各路径的信息素浓度限制在 $[f_{min}, f_{max}]$. Gambardella等^[6]提出了一种被称做 HAS-QAP的蚁群算法, 这个算法主要的不同在于它直接修改解决方案. Botee等^[7]对参数 m T U d的选择进行了深入的研究, 用遗传算法求参数的最优组合. 吴庆洪等^[8]提出了具有变异特征的蚁群算法, 在基本蚁群算法中引入变异机制, 充分利用了 2-交换法简洁高效的特点. 陈震等^[9]提出了一种基于分布均匀度的自适应蚁群算法, 该算法根据优化过程中解分布均匀度, 自适应地调整路径选择概率的确定策略和信息量更新策略.

蚁群算法研究的历史比较短, 如面对规模较大的实际问题它的搜索效率不高, 因此还存在许多有待改进的地方. 本文通过借鉴比较成熟算法(并行遗传算法等)的经验, 充分发挥蚁群算法的内在并行性, 开发并行蚁群算法来提高算法的求解质量和搜索效率, 从而求解公交线网优化模型.

收稿日期: 2005-06-10; 修回日期: 2006-12-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50479055; 50278011).

作者简介: 于滨*(1977-), 男, 博士生, E-mail: minlfsl@yahoo.com.cn

1 公交线网优化模型

以直达客流密度(单位长度运送的乘客数)最大为目标的公交线网优化模型如下:

$$\max D_{od} = \frac{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} P_{ij} x_{ij}}{\sum_{g \in N} \sum_{h \in N} \Delta_{gh} l_{gh} x_{gh}}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} L_{\min} \leq L_{od} \leq L_{\max} \\ Q_{od}^{\text{sum}} > Q_{\min} \\ \bar{q}_{od}^x \leq q_{\max}^x \\ b_{od}^n \leq b_{\max}^n \\ Q_{od}^k < Q_{\max}^k \\ \forall l_{gh} > 0.5 \text{ km} \\ o, d \in F \\ m \neq n, \forall m, n \in S_{od} \\ z > 50\% \end{cases} \quad (1)$$

式中

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当边}(i, j) \text{在规划的公交线路路上} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}; D_{od} \text{ 为}$$

直达客流密度; $a, d \in F$ 分别为起、终点和起终点集合; P_{ij} 为网络内从节点 i 到节点 j 的直达客流量;

$L_{od} = \sum_{g \in N} \sum_{h \in N} \Delta_{gh} l_{gh} x_{gh}$, 为公交线路的长度, 通常长度不易过长或过短 ($5 \text{ km} \leq L_{od} \leq 15 \text{ km}$); l_{gh} 为

g, h 两点间 T 路线的道路网长度, 通常 $l_{gh} = 0.5 \sim 0.6 \text{ km}$; $\Delta_{gh} = \begin{cases} 1, & g, h \text{ 是线路中的相邻节点} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$;

$\bar{q}_{od}^x, q_{\max}^x$ 分别为非直线系数和最大非直线系数(通常取 1.5); Q_{od}^k 为断面 k 的客流量; Q_{\max}^k 为断面 k 允许通过的最大客流量; Q_{\min}, Q_{sum} 分别为最低开线客流量和线路的客流总量; b_{od}^n, b_{\max}^n 分别为线路断面客流的不均匀系数和最大不均匀系数(通常取 1.5); m, n 是候选线路的中间站点, 这条约束主要是为了控制线路的走向, 即同一条线路不应两次或两次以上通过同一个站点; z 为不换乘比, 公交线网乘客不换乘比按下式计算:

$$z = \frac{\text{各线路直达乘客量总和}}{\text{全规划区乘客 } o-d \text{ 量总和}} \quad (2)$$

若计算得到的不换乘比与采用的不换乘比相差较大, 则应以计算的不换乘比重新进行网络设计, 直至采用的不换乘比与计算的不换乘比接近为止。

上述模型是一个 NP 完全问题, 没有多项式解法, 考虑到蚁群算法的内在并行性, 本文提出通过蚁群算法的并行实施来提高搜索速度和优化质量。

2 算法设计

蚁群算法在优化公交网络时, 首先初始化各边的信息素分布, 然后从起点释放出 p 只蚂蚁, 出发寻找终点。在每一步中, 每只蚂蚁移动一次, 到达下一节点。蚂蚁从相邻的, 在该循环中没有被其访问过的, 且该路段含有一定的信息素的节点中, 按照转移规则求得每一点的转移概率, 来选择下一节点。当所有蚂蚁都找到终点, 则一次循环结束, 每条边上的信息素按更新策略更新。这样重复循环, 直到所有的线路都布设完毕或者循环次数达到限值为止。

2.1 初始化

对于蚂蚁来说, 最初所有的路径(边)的吸引力都是一样的, 这时需要给所有的边设置一个合适的初始权重^[5], 这个权重不能过大, 那样会减弱蚂蚁在搜索路径上留下“信息素”对后来蚂蚁的指导作用, 导致蚁群陷入纯粹的随机搜索中; 但是也不能过小, 过小会减弱搜索的随机性, 快速收敛于局部最优解, 减少得到最优解的可能性。把客流密度看成蚂蚁在路径上留下的“信息素”, 所以这里采用了平均客流密度来初始化信息素矩阵:

$$\bar{T} = \sum_{i, j \in N} P_{ij} / \sum_{i, j \in N} l_{ij} \quad (3)$$

式中: \bar{T} 为整个路网的初始信息素强度(平均客流密度)。最后, 可以把探路蚂蚁分布到图中, 由于各条路径的“信息素”相等, 可以将蚂蚁随机地分布到巢穴附近的点上。

2.2 转移规则

蚂蚁的运动不是盲目的, 是依据一定的转移规则进行的。蚂蚁在移动时, 很多点是不可行的。例如, 在公交网络优化问题中, 线路已经经过的点就是不可行点。转移规则就是蚂蚁选择每一可行点的概率, 对于第 i 点的第 k 只蚂蚁来说, 选择 j 点的概率如下:

$$p_{ij}(k) = \begin{cases} \frac{\bar{T}_{ij} \times Z_{ij}^k}{\sum_{j \in I_{T_k}} \bar{T}_{ih} \times Z_{ih}^k}; & j \in I_{T_k} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中 \bar{T} 为信息素的强度, 它反映了蚁群在这条边上的先验经验, 反映的是一个全局的信息, 是蚂蚁在运动过程中所积累的信息量; Z 为能见度, 它的值是由一个与源问题相关的贪婪算法得到的, 它只考虑本地信息, 鼓励蚂蚁去走局部的最优路径, 这里取 $d_{ij} = P_{ij} / l_{ij}$; \bar{T} 和 U 分别为信息启发式因子

和能见度启发式因子; T_k 为对于第 k 只蚂蚁不可行的节点的集合.

2.3 信息素更新策略

蚂蚁依据转移规则沿着不同的点游历,直至构成一个源问题的解决方案.例如,公交优化问题中,一个解决方案就是蚂蚁搜索到一条起终点间的线路.这里定义当所有的蚂蚁都构成了自己的解决方案后作为蚁群算法的一次循环.每次循环后,在每条边上的信息素浓度将依据下式更新:

$$f_{ij}(t+1) = d \times f_{ij}(t) + \sum_{k=1}^p \Delta f_{ij}^k \quad (5)$$

这里 d 是信息素残留系数 ($0, 1$), p 是蚁群的规模, Δf_{ij}^k 是第 k 只蚂蚁在当前循环中在 (i, j) 边上的信息素增量,信息素增量比较常用的而且效果较好的是 Ant-cycle 策略:

$$\Delta f_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{f^k}; & \text{第 } k \text{ 只蚂蚁在循环中经过边 } (i, j) \\ Q; & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

这里 f^k 为第 k 只蚂蚁在整个路径中的总的客流量.

综上所述,蚁群算法是根据正反馈原理工作的,其具有很强的发现较好解的能力.但是,蚁群算法也有一些缺陷.例如,由于蚁群中多个个体的运动是随机的,当群体规模较大时,要找出一条较好的路径需要较长的搜索时间.为了解决这个问题,本文充分利用蚁群算法的内在并行性,提出了蚁群算法的并行实现,来减少算法的搜索时间.

2.4 算法的并行化

本文将蚁群算法的并行模型分为 3 类(参考并行遗传算法):独立并行蚁群算法、主从式并行蚁群算法和粗粒度并行蚁群算法.

2.4.1 独立并行蚁群算法 独立并行蚁群算法是最简单的模型^[10],它由几个串行蚁群算法组成,每个串行蚁群算法都有一个独立的进程,它们不受其他的子蚁群影响,独自在巢穴和食物之间搜寻路径,也就是说,每个蚁群都需要维护自己的信息素矩阵,同时它们对其他子蚁群的信息素不敏感.这个算法的优点在于处理器之间不需要通信,这是一个原始的并行算法,其没有对串行蚁群算法的结构进行改变,只是通过增加处理器数目来提高运行速度.它能很容易地运行在 MIMD 或集群工作站.

2.4.2 主从式并行蚁群算法 在主从式并行蚁

群算法中^[11],主处理器负责接收用户的输入,初始分布蚂蚁,执行全局的信息素更新和输出结果等.当然某些时候它也可以作为一个从处理器来提高效率.但是其未对蚁群算法的基本框架进行改变,所以主从式不可避免地存在着主从节点负荷忙闲不均衡的问题.这个算法最重要的一个组成部分就是维持分布式的信息素结构,在每次局部操作完成后,从节点都要向主节点发送结果,主节点再更新信息素矩阵,造成了瓶颈和较大的通信延迟,因此,运行效率不高,它只在搜索工作量非常大的时候.

2.4.3 粗粒度并行蚁群算法 粗粒度并行蚁群算法^[12]是基本蚁群算法结构的扩展,它将原蚁群依处理器个数划分成若干个子蚁群,每个子蚁群在不同的处理器上相互独立地并发执行串行蚁群算法,每经过一定的进化代,各子蚁群间会交换若干信息,丰富各子蚁群的多样性,防止未成熟收敛的发生.粗粒度模型的通信开销较小,可获得接近线性的加速比,它除了基本蚁群算法的转移规则和更新策略等操作,还引入了“迁移”操作,负责子蚁群间的通信任务.

在蚁群算法并行化时,选择何种并行模型是由问题的规模及运行环境决定的.本文选择了一个比较普通的集群环境,通过综合考虑每种模型的通信开销和所求得解的质量,选择了粗粒度方案.与主从式相比,它仅需要很少的通信便可加快搜索的速度;而与独立模型相比,它扩大了蚁群的规模,丰富了蚁群的多样性,搜索的质量大大提高.

3 实例研究

为了验证本研究模型和算法的有效性,利用大连市主城区的数据对其进行了校验.在集群环境下(Windows 平台),使用 VC++ .NET 2003 实现了并行蚁群算法(PACO),并使用 MPI 完成子蚁群间的通信.然后,将该算法与基本蚁群算法(MMAS)在相同条件下连续测试 10 次,测试的结果如图 1 所示.

从图中可以看到 PACO 的优化质量和运行时间都要好于基本的蚁群算法.这是由于在 PACO 算法中引入了并行机制,充分地开拓了蚁群的内在并行性,大大降低了算法的搜索时间,同时极大地丰富了蚁群的多样性,开拓了蚁群的搜索空间,刺激其寻找新的更优的路径,在很大程度

上解决了蚁群算法容易陷入局部最优的问题,提高了优化方案的质量.

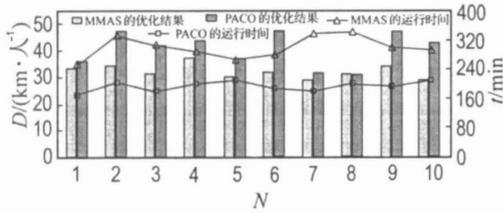


图 1 PACO 算法和 MMAS 算法的比较

Fig. 1 Comparison between PACO and MMAS

4 结 论

公交网络优化一直是交通领域的研究热点,但是现实可行的优化模型非常少.本文在“逐条布设、优化成网”的基础上提出了一种以直达客流密度最大为目标的优化模型.该模型综合考虑了乘客和公交企业两方的利益,有效地提高了线路的利用效率.但是由于该模型是一个 NP-hard 问题,目前还没有多项式算法,为此本文提出了采用并行的蚁群算法来对其进行求解的方法,在保证解的质量的同时大幅度地加快了算法的收敛速度,取得了良好的优化效果.

参考文献:

[1] CEDER A, WILSON N H M. Bus network design [J]. *Transp Res Part B*, 1986, **20B**(4): 331-344
 [2] HASSELSTROM D. Public transportation planning — a mathematical programming approach [D].

Goteborg University of Goteborg, 1981

[3] 王 炜, 杨新苗, 陈学武. 城市公共交通系统规划方法与管理技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2001
 [4] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents [J]. *IEEE Trans on Syst, Man and Cybern*, 1996, **1**(26): 29-41
 [5] STUTZLE T, HOOS H H. Max-min ant system [J]. *Future Gener Comput Syst*, 2000, **16**(8): 889-914
 [6] GAMBARELLA L M, DORIGO M. An ant colony system hybridized with a new local search for the sequential ordering problem [J]. *INFORMS J on Comput*, 2000, **12**(3): 237-255
 [7] BOTEE H M, BONABEAU E. Evolving ant colony optimization [J]. *Complex Syst*, 1998, **1**(2): 149-159
 [8] 吴庆洪, 张纪会, 徐心和. 具有变异特征的蚁群算法 [J]. *计算机研究与发展*, 1999, **36**(10): 1240-1245
 [9] 陈 , 沈 洁, 秦 玲, 等. 基于分布均匀度的自适应蚁群算法 [J]. *软件学报*, 2003, **4**(8): 1379-1387
 [10] STUTZLE T. Parallelization strategies for ant colony optimization [J]. *Lect Notes in Comput Sci*, 1998, **1498**: 722-741
 [11] FOSTER I. *Designing and Building Parallel Programs* [M]. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1994
 [12] YANG Z Z, YU B, CHENG C T. A parallel ant colony algorithm for bus network optimization [J]. *Comput-Aided Civ Infrastruct Eng*, 2007, **22**(1): 44-55

Application of parallel ant colony algorithm to optimizing bus network

YU Bin^{* 1,2}, YANG Zhong-zhen², CHENG Chun-tian¹

(1.School of Civil and Hydraul. Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;

2.Inst. of Transp. Program., Dalian Maritime Univ., Dalian 116026, China)

Abstract Since most existing models are theory-oriented and not practically implemented, a new model is presented to optimize bus network, which takes maximum direct traveler density as objective. The model tries to achieve minimum transfers and maximum traveler flow per unit length with line length and non-linear rate as constraints. Considering the communication cost and optimization qualities, an ant colony algorithm based on the coarse-grain model is designed to solve the problem of this model. With a numerical test, the effectiveness of the model and the algorithm is verified.

Key words bus network optimization; direct traveler density; ant colony algorithm; coarse-grain