

# 基于 GIS 空间分析的物流配送模型研究及应用

陈彦军, 吴国平, 李敬民

(南京大学 城市与资源学系, 江苏 南京 210093)

**[摘要]** 针对物流配送过程中主要有两个环节, 一是配送对象的选择, 另一个是配送路线的设计. 介绍了 GIS 空间分析中的 voronoi 图和 TSP 两个模型的特点以及其在物流配送中的应用, 并以苏果超市为例, 介绍了应用 GIS 空间分析模型在物流配送中的实现方法及过程.

**[关键词]** 物流配送, Voronoi 图, TSP

**[中图分类号]** P208, **[文献标识码]** B, **[文章编号]** 1672-1292-(2004) 03-0068-05

## 0 引言

随着市场经济的发展和竞争的加剧, 市场呈现出多品种、小批量、产品多样化、消费多样化的趋势, 物流配送就是为适应这种趋势而产生的服务. 物流配送是物流活动中的一个重要环节, 它是指对局域范围内的客户进行的多客户、多品种的按时联合送货活动. 配送是“配”与“送”的有机结合, “配”是指配客户, “送”就是送货运输<sup>[1]</sup>. 从这个角度, 物流配送包括两个方面的内容, 一是配送对象的确定, 即向谁配送; 另一个是送货路线的选择, 即如何送. 在通常的物流配送过程中, 为了追求配送费用的最小化, 常用到线性规划、动态规划等数学模型. 而这些模型在解决物流配送问题过程中却存在一定的缺陷和局限性. 首先, 这些模型没有充分考虑到物流设施(供货点和需求点)的空间布局以及其与中间节点的链接关系; 其次, 在配送对象确定以后, 通常是由供货点直接向客户送货, 并没有将这些客户连起来形成一个环路. 这在送货量较大时相对来说比较合理, 然而在连锁超市的零售商品送货过程中, 由于客户多, 且单个客户需求量小, 运用这种模型显然在车辆的调配上存在很大的浪费. 因此, 传统的规划模型不适用于连锁超市的零售商品送货上门这项服务业务.

在南京苏果超市零售商品配送过程中, 我们提出了基于 GIS 技术的 Voronoi 图和 TSP(旅行商问题)空间分析模型, 弥补了上述数学规划模型的不足, 并在实际的应用过程中取得了良好的效果.

## 1 GIS 技术及在物流配送中的应用

地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 是一种以地理空间数据为基础, 实时提供多种空间、动态的地理信息及决策服务的计算机技术系统, 它依据地理对象的空间特征及属性特征, 建立各种空间分析模型, 并在这些模型的基础上使用空间查询和空间分析来对地理数据进行管理, 并通过对地理数据进行分析、加工、处理, 提取有用的地理信息, 从而为辅助决策服务.

物流配送是将物资商品从供货点通过运输工具配送到需求点的地理空间位置的转移过程, 因而在物流配送过程中, 运用 GIS 技术可以对供货点、需求点、交通线路等的地理信息进行提取、加工、分析, 选择配送对象, 确定运输路线, 为物流配送决策服务, 从而实现企业物流管理的可视化、动态化, 提高物流管理的水平和效益.

在物流领域, 目前国外公司已经开发出专门的 GIS 物流分析软件来进行物流分析. 国外一些著名的零售连锁超市公司, 如美国的沃尔玛、日本的神户生协等, 在物流配送过程中都采用 GIS 技术, 并且获得了巨大的成功.

## 2 基于 GIS 空间分析的物流配送模型的建立

### 2.1 Voronoi 图

#### 2.1.1 Voronoi 图及其数学定义

Voronoi 图又称为 Thiessen 多边形, 是由荷兰气候学家 Thiessen A H 在长期的降雨观测过程中, 提

收稿日期: 2003-10-23.

作者简介: 陈彦军(1978-), 硕士研究生, 主要从事 GIS 空间建模与应用的学习与研究. E-mail: cyj103@163.com

通讯联系人: 吴国平(1964-), 博士, 副教授, 主要从事地理信息系统及其应用的教学与研究. E-mail: gpwood@sina.com

出的一种数学模型,它由一组连续多边形组成,多边形的边界是由连接两邻点直线的垂直平分线组成.一般图形的 Voronoi 图的定义是以点为生成元的 Voronoi 图的定义扩展而来的,平面上以点为生成元的 Voronoi 图的数学定义<sup>[2]</sup>可描述为:设  $P_i (i = 1, 2, 3 \dots n)$  为二维空间上的  $n$  个点,将由  $V(P_i) = \{ P \mid d(P, P_i) < d(P, P_j) \} (i = 1, 2, 3 \dots n)$  所给出的对平面的分割称为以  $P_i$  为生成元的 Voronoi 图,通常简称为 Voronoi 图,其中  $d(P, P_i)$  为点  $P$  和  $P_i$  之间的欧氏距离<sup>[1]</sup>,即:

$$d(P, P_i) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

根据以上定义,下图是用 Voronoi 图对某市场空间划分的结果,以该图为例介绍 Voronoi 图的一些重要的性质<sup>[3]</sup>:

(1) 每个 Voronoi 图内仅含有一个离散点数据,如图 1 所示,对于每一个空间点  $P_i$  有且只有一个包围它的 Voronoi 图,而对于每一个 Voronoi 图也仅包含一个离散点  $P_i$ .

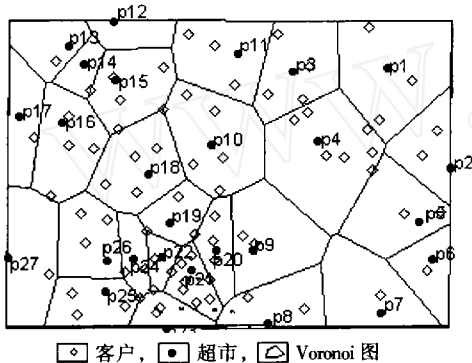


图 1 应用 Voronoi 图对市场空间划分结果

(2) 对于空间任意一个离散点  $P_i$  的 Voronoi 图内任意一点到  $P_i (i = 1, 2 \dots n)$  的距离小于到其它任意一个离散点  $P_j (j = 1, 2, \dots n, i \neq j)$  的距离.

(3) 两个相邻 Voronoi 图的公共边上任意一点到这两个 Voronoi 图所包含的离散点的距离相等.

由于 Voronoi 图有上面的一些特性, Voronoi 已广泛应用于气象、交通、地理学等领域,以下详细介绍 Voronoi 图在零售商品配送过程中,对于配送对象选择的应用.

#### 2.1.2 Voronoi 图在物流配送中的应用

在市场竞争日益激烈的形势下,目前各大连锁超市公司为了赢得客户,占领市场,都开展了零售商品送货上门服务这项业务.该如何从这些超市向客户供货?对于某一具体的超市,它该向哪些客户送货?在市场的经济活动中总是追求所花成本最小,进而追求利润的最大化,同样对于连锁超市公

司也不例外,在向客户配送零售商品的过程中,也要进行合理的规划安排,使得配送成本最小.因为在配送过程中,零售商品配送成本是和商品的空间运送距离成正相关的,因而应用 Voronoi 图模型恰能解决超市该向谁送货的问题.从 Voronoi 图的性质可以知道,对于某离散点  $P_i$  的 Voronoi 图内的任意一点  $q$  到该离散点  $P_i$  的距离小于到其它任意离散点  $P_j$  的距离.所以如果用 Voronoi 图对地理空间进行划分<sup>[4]</sup>,根据 Voronoi 图的第 2 条性质,则对于某一具体超市  $P_i$  来说,落入  $P_i$  的 Voronoi 图内的客户就是该超市的零售商品所应配送的对象.在图 1 中,应用 Voronoi 图对某市场空间进行划分,划分结果来看,对于客户来说,在 Voronoi 图中相对的位置可能有 3 种情况,对于出现的这 3 种情况,将分别采用不同的方法来进行处理:

(1) 对于大部分客户来说,他们落入由这些超市点所形成的 Voronoi 图中,将由各自所位于的 Voronoi 图所包含的超市供货.

(2) 对于少数落于两个超市的 Voronoi 图的公共边上的客户,则从两个超市向这些客户零售商品的配送成本是相同的,可以根据实际情况从这两个超市选择 1 个向这些客户送货.

(3) 对于个别位于 3 个相邻超市所形成的 Voronoi 图公共顶点上的客户,则从这 3 个超市向这些客户配送的运输成本是相同的,可根据实际情况从这 3 个超市中选择 1 个向客户配送零售商品.

通过上述的 Voronoi 图模型将地理空间进行分割,确定了超市送货的客户对象,接着应确定该如何合理安排配送路线来送货.以下介绍如何用 TSP 模型来选择配送路线.

## 2.2 TSP 模型及应用

### 2.2.1 TSP 的定义

TSP (Travelling Salesman Problem, TSP) 即旅行商问题<sup>[5]</sup>.在零售商品配送过程中,TSP 问题可以描述为在超市周围分布着一系列需求零售商品的客户,如图 2 所示.其中  $P_0$  代表要发送零售商品的超市,  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7$  分别代表需求商品的客户点.设送货车从  $P_0$  点出发,经过  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7$  这些点并向这些点送完货后,再返回  $P_0$  点,如何确定一条路线,使行程距离最短<sup>[6]</sup>?

为了更好地描述 TSP 问题,将其定义为网络  $G = (V, A, C)$ , 其中  $V$  为超市和客户所组成的点集,  $A = \{ (i, j) \mid i, j = 0, 1, 2 \dots n, \text{且 } i \neq j \}$  为一弧集,表示车辆可能走过的路线集合,  $C = \{ c_{ij} \mid (i,$

j)  $A$  为弧长矩阵,  $c_{ij}$  表示对应弧  $(i, j)$  的长度, 为了构造数学模型, 定义决策变量:

$$c_{i,j} = \begin{cases} w_{i,j} & (v_i, v_j) \text{ 是 } A \text{ 中的弧} \\ & (v_i, v_j) \text{ 不是 } A \text{ 中的弧} \end{cases}$$
$$x_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{车辆通过弧 } (i, j) \\ 0 & \text{车辆不通过弧 } (i, j) \end{cases}$$

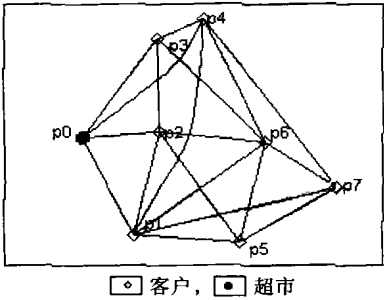


图 2 超市与客户的位置

则在零售商品配送中 TSP 问题的数学模型可表示为:

$$\min \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{i,j} \tag{1}$$
$$\text{s.t.} \sum_{i=0}^n x_{i,j} = 1 \quad j = 0, 1 \dots n \tag{2}$$
$$\sum_{j=0}^n x_{i,j} = 1 \quad i = 0, 1 \dots n \tag{3}$$
$$x_{i,j} \in S \quad i, j = 0, 1 \dots n \tag{4}$$
$$x_{i,j} = 0 \text{ 或 } 1 \quad i, j = 0, 1 \dots n \tag{5}$$

其中, 式(1) 表示行程距离最小的目标; 式(2) 和式(3) 表示每个顾客被访问一次且仅一次;  $S$  为子回路消去约束, 即消去构成不完整线路的解, 它可表示为:  $S = \{x_{i,j} \mid \sum_{i \in Q} x_{ij} = 1, Q \subset \{0, 1, 2 \dots l\}, l < n\}$ , 该式说明点集中某一子集必须同解中其它的点集相连<sup>[6,7]</sup>.

2.2.2 TSP 问题的解决方法

TSP 问题属于 NP 问题, 至今还没有人提出一个精确的算法来解决这一问题<sup>[8]</sup>, 在实际工作中常用到的是一些近似算法, 有节约算法<sup>[9]</sup>、扫描线算法<sup>[10]</sup>等. 最近又有一些专家学者提出了一些新的近似算法, 如遗传算法<sup>[11]</sup>、退火模拟算法<sup>[12]</sup>等等. 这里我们介绍一种较简单的近似算法——最邻近算法<sup>[8]</sup>, 由于其操作起来比较方便, 因而在实际工作中应用也比较广泛. 最邻近法的操作步骤如下:

- Step 1: 构造无向图的邻接矩阵.
- Step 2: 设起点为  $v_1$ , 在其余  $n - 1$  个结点中搜索与  $v_1$  最邻近(即距离最小)的点作为初始通路, 按 Step 3 扩展通路.

Step 3: 设  $v_i$  是最新加入到通路上的点, 从不在通路上的所有点中找一与  $v_i$  最邻近的点  $v_j$ , 把边  $(v_i, v_j)$  加到通路.

Step 4: 重复 Step 3, 直到所有结点都在路径上为止, 设最后加入的点为  $v_n$ .

Step 5: 将边  $(v_n, v_1)$  加到路径上, 即得到所求的回路.

例如在图 2 中, 如果各点间的距离矩阵为:

C =

0	8	5	9	12			
8	0	8		17	7	11	14
5	8	0	7		10	6	
9		7	0	3		11	
12	17		3	0		11	15
	7	10			0	8	8
	11	6	11	11	8	0	5
	11			15	8	5	0

则用最邻近算法构造的旅行商路径为:  $P_0$   
 $P_2 \ P_6 \ P_7 \ P_5 \ P_1 \ P_4 \ P_3 \ P_0$ , 长度为: 60.

3 案例分析

苏果超市有限公司是我国一个大型商业连锁企业, 目前在南京已有多家分店. 为了更好地服务南京市民, 苏果超市开展了零售商品送货上门这项服务项目. 针对在南京市苏果分店数目多、送货距离短、灵活机动的特点, 采用 Voronoi 图和 TSP 模型提出了以下解决方案.

3.1 数据收集

在具体工作过程中, 根据工作的需要, 收集了南京市区交通图、苏果超市各分店在南京市分布、居民分布等空间数据以及有关各苏果超市分店的诸如店名、地址、联系电话等各种属性数据.

3.2 数据处理与分析

在各种数据数收集完后, 用 Mapinfo 软件、Mapx5.0 二次开发工具以及 Visual Basic6.0 编程工具对这些数据进行处理和分析.

首先, 根据所收集的空间数据和属性数据, 建立关于苏果超市的地理信息数据库. 在设计地理信息数据库过程中, 交通信息以路段为单位进行存储, 属性字段包括路段号、起点、终点、长度、所属街道, 其中起点和终点是两条(或多条)道路相交叉的路口. 路口的属性字段包括路口号、所连接路段的数目. 超市属性字段包括名称、地址、所邻近的路段号. 客户信息则根据实际情况而建立, 并且进行实

时更新,其属性字段包括客户名、代号、地址、所近邻路段号。

根据苏果超市各分店在南京的位置,结合南京市交通图,应用 Mapinfo 软件做了苏果超市各分店在南京市市区分布的电子地图、南京市交通电子地图。

然后,用 Mapx5.0 以及 Visual Basic6.0 进行编程,实现了根据各苏果分店在南京市的空间分布图,用 Voronoi 图对南京市市区进行划分,并且用 TSP 模型的算法,实现了送货路线的合理安排。由于客户的情况随时间变动性较大,用 Voronoi 对南京市市区划分后,对客户来说,其所属的 Voronoi 图所包含的苏果分店就是商品的来源,也就是说根据各分店的 Voronoi 图所包含的客户,确定由其送货的客户对象。

最后,用 Voronoi 图模型确定苏果超市送货的客户对象以后,再运用 TSP 模型的解决法,确定从各分店发出车辆的向客户送货的送货路线。在实际操作过程中,由于所建的地理信息数据库中,道路信息和客户信息并没有直接连接,而且客户信息也是随时间而变化的,因而在送货路线设计过程所采用的最邻近算法做了一定的改进,操作步骤如下:

Step 1:对位于超市  $P_i$  的 Voronoi 图内的每个客户分别从其所邻近的路段的两个路口中查找距其最近的路口,得到关于路口的点集集合  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ,设货车的出发点为  $s_b$ ,其所邻近的路段为  $e_b$ ,其连接的两个路口分别为  $v_b$  和  $v_b$ ,计算  $|v_b s_b|$  以及  $|s_b v_b|$  的长度,令  $s_0 = s_b, v_0 = v_b, v_0 = v_b$ 。

Step 2:计算  $|s_0 v_0|$  以及  $|s_0 v_0|$  的长度,用 Dijkstra 算法搜索  $v_0$  到  $V$  中各路口的最短路径,计算其长度,并从中选取最短的一条。设到  $v_i$  最短,长度为  $|v_0 v_i|$ ;同样搜索  $v_0$  到路口集合  $V$  中各路口的最短路径,并计算其长度,设到  $v_j$  最短,长度为  $|v_0 v_j|$ 。比较  $|v_0 v_i| + |s_0 v_0|$  与  $|v_0 v_j| + |s_0 v_0|$  的大小,从其中选择较小的一个,设为  $|v_0 v_i| + |s_0 v_0|$ 。则货车从  $s_0$  出发经  $v_0$  沿所搜索到的最短路径行驶到路口  $v_i$ 。

Step 3:设与路口  $v_i$  最邻近的客户集合为  $C$ ,与  $v_i$  相连接的路段集合为  $E$ ,设货车向  $v_i$  行驶过程中经过与  $v_i$  相连接的路段为  $e_i$ 。

Step 4:是否有客户邻近路段  $e_i$ ,如果有,则货车在向  $v_i$  行驶过程中,按经过这些客户的顺序向

他们送货,送完后将他们从客户集合  $C$  中删除,到达  $v_i$  后,将  $e_i$  从与  $v_i$  相连接的路段集合  $E$  中删除。如果没有客户邻近路段  $e_i$ ,则进行 Step 5。

Step 5:从  $C$  中搜索与  $E$  中其它路段所邻近的客户,并且计算每一客户到  $v_i$  的距离,根据与每一路段所邻近的客户到  $v_i$  的最远距离的大小,对这些路段排序,排序的结果作为货车遍历这些路段的顺序,在遍历这些路段过程中向与其邻近的客户送货。

Step 6:对某一路段而言,当向与其邻近的客户送完货后,返回路口  $v_i$ ,将该路段从  $E$  中删除。

Step 7:判断路段集合  $E$  是否为空,如果是,则将路口  $v_i$  从路口集合  $V$  中删除,记录最后遍历的路段,设为  $e_l$ ,记录最后送货的客户,设为  $c_l$ ,并且进行下一步,否则,返回 Step 6。

Step 8:查找路段  $e_l$  的两个路口,已知一个为  $v_i$ ,另一个设为  $v_j$ ,判断路口集合  $V$  是否为空?如果是,则记录最后访问的路口  $v_j$ ,最后遍历的路段  $e_f$  以及最后送货的客户  $c_f$ ,进行 Step 9;否则,令  $v_0 = v_i, v_0 = v_j, s_0 = c_l$ ,返回 Step 2。

Step 9:查找路段  $e_f$  的两个路口,已知其中一个为  $v_j$ ,另一个设为  $v_k$ ,分别计算  $|c_l v_j|$  以及  $|c_l v_k|$  的长度,用 Dijkstra 算法搜索从  $v_j$  到  $v_b$  以及  $v_j$  到  $v_b$  和  $v_k$  到  $v_b$  以及  $v_k$  到  $v_b$  的最短路径,并且计算各最短路径的长度,设分别为  $|v_j v_b|$ 、 $|v_j v_b|$ 、 $|v_k v_b|$ 、 $|v_k v_b|$ ,比较  $|c_l v_j| + |v_j v_b| + |v_b s_b|$ 、 $|c_l v_j| + |v_j v_b| + |v_b s_b|$ 、 $|c_l v_k| + |v_k v_b| + |v_b s_b|$ 、 $|c_l v_k| + |v_k v_b| + |v_b s_b|$  的大小,并从中选取最小的一个,设为  $|c_l v_j| + |v_j v_b| + |v_b s_b|$ ,则货车在向客户  $c_f$  送完货后返回  $v_j$ ,然后再沿着所搜索的从  $v_j$  到  $v_b$  的最短路径返回  $v_b$ ,最后经  $v_b$  返回  $s_b$ ,完成一个回路,结束整个送货过程。

改进的最邻近算法主要是针对客户多、空间位置变动频繁的特点以及其与所邻近路段的关系,根据实际工作的要求,在最邻近算法的基础上做了一定的改进,以使其能更好的适用于连锁超市的零售商品送货上门服务这项业务。以中山路连锁店( $S_0$ )为例介绍一下改进的最邻近算法的操作过程。它位于中山路与长江路交叉口附近,处于南京市中心,离中心商务区新街口不远,其位置如图 4 所示。其周围人口密度大,零售商品配送频繁,以它为例,要向其周围的几个客户  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7$  (其分布位置如图 4 所示)送货。根据改进的最邻近算法,

首先从其所邻近的路段查找距其最近的路口,得到路口集合  $V = \{v_1, v_2, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}\}$ , 根据最邻近的原则,送货车辆经过路口的顺序为:  $s_0 - v_2 - v_6 - v_7 - v_9 - v_{10} - v_8 - v_1 - s_0$ , 其向客户送货的顺序为:  $s_0 - c_6 - c_7 - c_4 - c_5 - c_3 - c_1 - c_2 - s_0$ , 路线设计结果如图 4 所示,总的送货路线长度为 2.7 km. 由此可见,改进的最邻近算法在操作过程中通过将路口作为中转点,解决了客户与路段没有连接的矛盾,因而在连锁超市的零售商品送货的路线选择应用中取得了良好的效果.

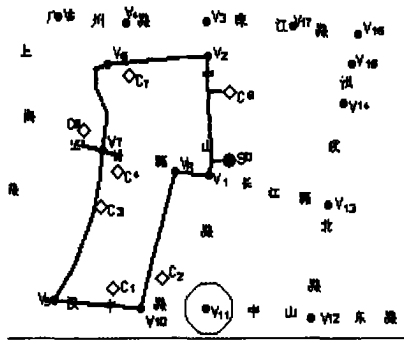


图 4 中山路连锁店送货路线

4 结论

Voronoi 图和 TSP 是 GIS 空间分析中常用的两个模型,在实际中也有着广泛的应用. 本文这两个模型应用于零售商品的物流配送中,对于企业节约运输成本,提高工作效率,甚至节约整个社会资源有着重要的意义. 但是本文在 Voronoi 图和 TSP 两个模型的应用讨论过程中还存在一定的缺陷,首先在 Voronoi 图的构造过程中没有考虑到长江、玄武湖等水体以及紫金山、幕府山等地形以及人口分布等各种影响因素. 其次在 TSP 问题解决的算法的效

率上也有待进一步提高. 因此在以后的工作中需要进一步研究带权 Voronoi 图<sup>[7]</sup>的构造方法,以及其它的一些 TSP 问题的解决算法,以提高其在实际工作应用中的效率.

[参考文献]

[1] 孙明贵,潘留柱. 物流管理学[M]. 北京:北京大学出版社,2002. 149 ~ 155.

[2] Kei Kobayashi, Kokichi Sugihara. Crystal Voronoi diagram and its applications[J]. Future Generation Computer Systems, 2002, 18(5): 681 ~ 692.

[3] 陆守一,唐小明,王国胜. 地理信息系统实用教程[M]. 北京:中国林业出版社,1998. 105 ~ 106.

[4] Barry Boots, Robert South. Modeling Retail Trade Areas Using Higher-Order, Multiplicatively Weighted Voronoi Diagrams[J]. Journal of Retailing, 1997, 73(4): 519 ~ 536.

[5] 郭仁忠. 空间分析[M]. 北京:高等教育出版社,2001. 182 ~ 185.

[6] Michael R, Swihart, Jason D Papastavrou. Theory and methodology a stochastic and dynamic model for the single-vehicle pick-up and delivery problem[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 114(3): 447 ~ 464.

[7] Vicky Mak, Natashia Boland. Heuristic approaches to the asymmetric travelling salesman problem with replenishment arcs[J]. International Transactions in Operational Research, 2000, 7(4): 431 ~ 447.

[8] 肖位枢. 图论及其算法[M]. 北京:航空工业出版社,1993. 236 ~ 237.

[9] 王加林,张蕾丽. 物流系统工程[M]. 北京:中国物资出版社,1987. 378 ~ 386.

[10] 赵刚. 物流运筹学[M]. 成都:四川人民出版社,2002. 75 ~ 78.

[11] 唐立新. 旅行商问题(TSP)的改进遗传算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1999, 20(1): 40 ~ 42.

[12] Van Breedam Alex. Theory and Methodology Improvement heuristics for the Vehicle Routing Problem based on Simulated Annealing[J]. European Journal of Operational Research, 1995, 86(3): 480 ~ 490.

Research and Application of Delivery Model Based on GIS Spatial Analysis

CHEN Yanjun, WU Guoping, LI Jingmin

(Department of Urban and Resources Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Two models of Voronoi graph and TSP (traveling salesman problem) in GIS spatial analysis are discussed, with their application to SuGuo Supermarket Corporation introduced.

**Key words:** logistical delivery, Voronoi graph, TSP (traveling salesman problem)

[责任编辑:严海琳]