



参赛密码 \_\_\_\_\_

(由组委会填写)



## “华为杯”第十四届中国研究生 数学建模竞赛

题目 构建分层优化的城市地下物流系统网络

### 摘 要：

当前我国正处于城市化进程的加速阶段，城市规模急剧扩张，人口密度和产业密度迅猛提高，城市物流的规模也随之日益增大，由此带来了城市交通拥堵、生态恶化、资源浪费等一系列问题。为改善和缓解城市问题，实现城市可持续发展，因此，建立城市地下物流系统网络十分必要。

针对问题一，首先，对附件 1 中 115 个点的坐标数据进行预处理，计算它们之间距离小于 3 公里的所有点，并按照小于的点的数量对其排序，筛选出需要作为节点的点。接着，建立 APH-PCA 多目标系统分析模型，将区域划分为 5 个小区域，对交通拥堵率(T)、总货物量(H)、货物面积比(F)进行等级划分，依据相对重要性构建判断矩阵，采用方根法计算判断矩阵权重，然后进行一致性检验，计算检查判断矩阵是否具有完全一致性，得到 5 个区域的节点排序情况。依据节点的覆盖范围、拥堵率及货运量，我们选择出 5 个一级节点((149951.9, 1577738.28)、(146987.68, 15418.21)、(149951.9, 157738.28)、(138793.52, 155638.13)、(14367.06, 153444.63))，27 个二级节点。依据拥堵率与货运量成正比的关系，可以计算出每个节点地下物流运输的最少货运量，且给地下的实际货运量有预留量，得到每个区域的一级节点以及其覆盖的点、二级节点以及其覆盖的点的实际货运量。最后，根据一级节点的转运率计算公式，得到每个一级节点的转运率，即左 1 节点  $\phi_1=0.65260$ 、左 2 节点  $\phi_2=0.58731$ 、左 3 节点  $\phi_3=0.61495$ 、左 4 节点  $\phi_4=0.62944$ 、右节点  $\phi_5=0$ 。

针对问题二，首先，对城市地下物流系统网络各类布局情况进行分析，在问题一

的基础上（且转运率变化不大的情况下），建立基于遗传算法的模型。在满足物流货运量的基础上，我们对每个区域分别进行物流网络优化，得到优化后的地下物流网路图。基于问题一的各节点实际货运量，在优化后的网络图上得到最新的各节点实际货运量和各级通道的实际流量。接着，我们适当调整一、二级节点位置，将物流网络图调整为星型或栅格型，且调整后的网络图也满足成本及货运量的要求。通过对双向双轨运输和双向四轨运输总费用进行对比，最终选择双向双轨+双向四轨综合的运输方式（总费用为182亿元），更大程度上缓解交通拥堵，且降低物流成本，达到地下物流系统最优化。

针对问题三，以问题二中设计的网络为基础，根据节点和路径负载能力以及节点的复杂度（即节点之间空间距离和节点与其他节点的关系），计算出每个节点在该区域距离其他节点的重要度。根据对地下物流系统运行情况的分析，以及各个节点的重要度信息，我们对问题二的网络图增加节点个数，调整节点的位置或级别，缩短货物运输总里程，降低运输成本，共计增加7个二级节点，并把23号二级节点变为一节点。此外，当网络中某个节点失效时，通过增加、减少、改变路径的方法，利用Dijkstra算法获取最短路径模型，比较不同路径的费用，得到最优化的网络节点图。

针对问题四，首先，通过Matlab计算得到30年内货运量从76240.97346吨增长到313818.1846吨。根据第一问得到的权重，可知货运量对地下物流网络的影响较大，所以在每年货运量以5%的速度增长的情况下，扩展和改进网络是必不可少的。然后，建立基于贪婪算法的动态规划模型，将每年的成本最低设为目标，在原有网络的基础上，不断地增加节点和改进增加节点的路径。最后，利用蚁群算法进行迭代求解，得出一级节点增加了1个，二级节点增加了6个，以及可满足30年物流需求的地下物流网络。

在本论文中，充分运用了点线面地下物流网络系统，问题一是解决如何选择节点，问题二是对节点之间的路径进行合理规划，问题三是优化物流网络图，问题四是为满足更高要求，对节点以及路径进行最优化处理。并且，我们将各个因素进行归一化处理，计算权重和重要度，在规划路径和改进路径的过程中，定量比较各网络图的优势。

**关键字：城市地下物流；APH-PCA多目标系统；节点重要度；最短路径；网络优化**

## 一、问题重述

地下物流系统是城市内部及城市间通过地下管道或隧道运输货物的运输和供应系统,我们需要通过选择节点和规划路线完成两个最直接的目标是缓解交通拥堵和降低物力成本。地下物流系统的节点建设面临的最大的挑战就是在满足完全覆盖的条件下,需要巨额的投资,所以一味地考虑覆盖率和拥堵率是不合理的。而且,其主要工作场所处于地下,所以在进行线路设计时,必须考虑隧道建设成本,确定合适的网络布局和轨道方案。长远考虑,地下物流系统造价高,改建困难,所以本文需要根据时间序列做好扩容处理,提高此系统的长期使用价值。

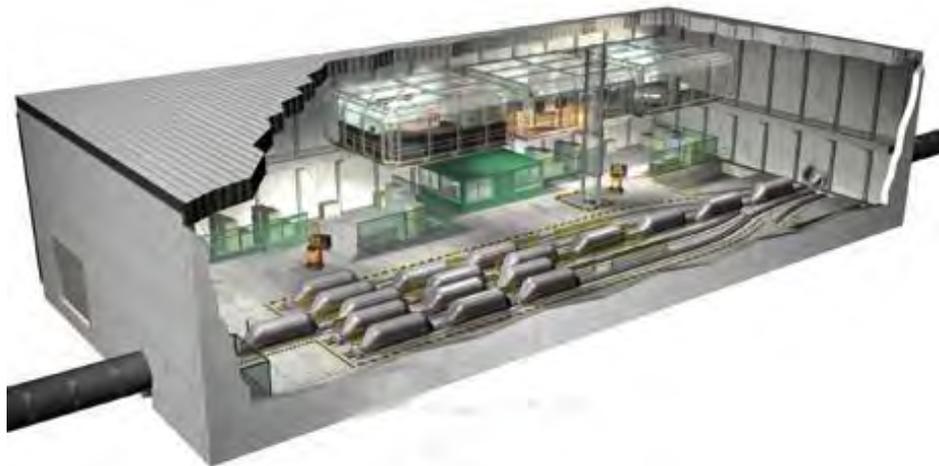


图 1.1 地下物流系统结构图

我们需要建立数学模型来解决以下问题:

(1) 根据所给中心点的位置及当前拥堵率、OD 矩阵表,以缓解拥堵率为最终目标(使每个位置的交通至少为基本畅通),充分考虑完全覆盖条件,建立一个模型,找出最少的节点数目,并确定出一级节点和二级节点,给出一级节点的转运率和各节点货运量。

(2) 根据题目所给隧道和节点建设成本和上题中所算出的节点信息,以地下物流网络建设成本最低为目标,设计或采用一个方法,规划出合理的地下物流网络系统,给出新的节点(若有节点变动)和通道位置、在此系统中各节点实际货运量和通道实际流量,并将规划的地下物流网络系统进行仿真。

(3) 综合上述两步结果,根据上题仿真结果考虑地下系统的全局性,整体考虑此系统覆盖率、拥堵率、建设费用和抗风险能力,以整个系统最优为目标,建立模型,修改节点位置和路径修改。

(4) 由于地下物流系统主体在地下,造价高、风险大、改建困难,所以上题所设计的地下物流系统网络满足应该市 30 年内的交通需求。我们将考虑随着地下物流系统的建设,接下来每年的交通拥堵率变化,建立模型,确定地下物流系统更路线建设时序和演进过程仿真,比较出与上题确定的系统网络的优劣。

## 二、模型假设与说明

- 1、物流网络由两级节点组成，即一级节点（转运节点）和而节点（配送节点）；
- 2、假设两节点之间的直线距离即为所建隧道的长度；
- 3、假设所有种类的货物均可通过隧道运输；
- 4、忽略节点间的经济成本及时间成本。

## 三、符号说明

本文中，用到的主要符号与说明如下表。

符号	说明
T	交通拥堵指数
H	总货物量
F	货物面积比
$\lambda_{\max}$	最大特征值
$\phi$	转运率
$L_{ij}$	线路长度记作
$X_{ij}$	货物运输量为
$W_i$	每个一级节点的建造成本

## 四、模型的建立与求解

### 4.1 基于点线面网络的地下物流系统网络

随着城市经济的快速发展，城市人口的不断增长和人们对物质生活质量要求的提高，使得城市货运量逐年增加，引起了严重的城市交通问题。城市交通拥堵、交通安全、城市空间拥挤、噪音污染、能源消耗加剧、尾气污染等严重影响着城市居民的出行环境、生活质量和身心健康。近年来，地下物流系统（Underground Logistics System—ULS）是适应城市货运发展的新思路和新途径是解决城市交通问题最优远景的方案之一。

整 ULS 的功能(管理操控、运输配送、存储保管等)都是通过系统网络来实现和支撑的，本文将物流网络结构抽象成图论中的网络，根据图论中网络符号的表达方式进行描述，ULS 的网络定义如下：

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

式中：

U—地下物流系统的网络；

N—地下物流网络节点；

V—地下物流网络路线；

W—网络路线的权重。

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，本文将地下物流系统将网络节点进行了分类，分为一级节点和二级节点。

物流中心是地下物流网络的出发点和聚集点，是地下物流系统管理控制的枢纽，分为地上和地下两个部分。它的主要功能是负责运输货物、操作和管理物流、控制与维护系统运载工具、保障整个系统的安全等。配送中心是物流网络的节点，它与物流中心的功能相似，但组成和运作都比物流中心简单很多。网络路线是指将网络节点相连接，也可与传统的地面运输路线连通而组成的线路，最终将货物输送到目的地，部分 ULS 的网络路线也可以根据实际需要在地面上进行规划。

### 4.2 问题一

#### 4.2.1 问题一分析

城市地下物流网络为了缓解交通和降低物流成本，所以我们在选择节点时，应该在保证地区全部覆盖的前提下选取最少的节点。从所给地图地图可以看出每个区域中心点密集度不同，每个中心点的区域面积差别较大，题目中给出货运量与面积之比过小，若节点覆盖了某区域中心点即可视为对该区域进行了覆盖，根据所给数据，计算出运货量和区域面积之比，我们需要将地图进行区域划分，各个区域分开计算选取节点。每个节点的服务半径在 3 公里范围内自由选择，附件所给数据包含了 110 个中心点和四个物流园区的位置，我们需要据此计算出中心点的距离，保证选取的节点群可以覆盖服务所有区域。此网络主要为了缓解交通，至少保证交通基本畅通，根据所给各小区域的当前拥堵率和拥堵指数与货运量成正比，所以选取节点后我们需要计算出各小区域的拥堵系数并保证其小于等于 4。由于有很多中心点距离小于 3 公里，所以一个节点可以覆盖服务很多个小区域，我们需要经过计算分配每个节点的服务范围和一级节点的转运率。

#### 4.2.2 OD 流量矩阵

OD 流量矩阵是记录物流网络中所有起点（Origin, O 点）到所有终点（Destination,

D 点) 货运流量的二维数据矩阵。反映所有物流货物对物流网络的基本需求, 描述全天物流网络的所有起点到所有终点的货运量。物流网络中货物发送的起点也叫始发地, 货物发送的终点也叫目的地。物流网络中的一个节点, 既可以是货物始发地, 也可以是货物目的地。一个有  $n$  个货物始发/目的地 (OD 点) 的物流网络的 OD 矩阵如表 4.1 所示。

表 4.1 OD 矩阵

OD	1	2	...	$j$	...	$n$	始发地
1	$t_{11}$	$t_{12}$	...	$t_{1j}$	...	$t_{1n}$	$O_1$
2	$t_{21}$	$t_{22}$	...	$t_{2j}$	...	$t_{2n}$	$O_2$
...	...	...	...	...	...	...	
$i$	$t_{i1}$	$t_{i2}$	...	$t_{ij}$	...	$t_{in}$	$O_i$
...	...	...	...	...	...	...	
$n$	$t_{n1}$	$t_{n2}$	...	$t_{nj}$	...	$t_{nn}$	$O_n$
目的地	$D_1$	$D_2$		$D_j$		$D_n$	$T$

表中  $t_{ij}$  表示物流网络中的第  $i$  个起点到第  $j$  个终点的货运量, 对角线元素  $t_{ii}$  表示的是 OD 点内部的物流量, 均为 0;

$O_i$  表示第  $i$  个起点的物流始发地;

$D_j$  表示第  $j$  个终点的物流目的地;

$T$  表示物流总量。

#### 4.2.3 OD 数据预处理

根据附件 1 中的坐标数据, 可以计算出 115 个点中, 每个点与每个点之间的距离。题目中的“所有节点的服务半径在 3 公里范围内自由选择, 节点间距离不受限制”的条件, 我们对所有点之间的距离进行筛选, 当中心点之间的距离小于 3 公里时, 我们对此点进行记录, 可得到小于 3 公里所有点的位置及次数, 如表 4.2 所示。

表 4.2 距离小于 3 公里所有点的位置及次数

编号	811	809	815	807	817	819	800	804	818	827	847	823	801	802	806
数量	24	23	23	22	22	22	21	21	21	21	21	20	19	19	19
编号	820	830	843	871	814	821	849	810	828	848	851	873	816	824	833
数量	19	19	19	19	18	18	18	17	17	17	17	17	16	16	16
编号	842	845	850	870	876	795	834	836	844	853	856	872	875	880	793
数量	16	16	16	16	16	15	15	15	15	15	15	15	15	15	14
编号	797	803	831	841	846	854	861	822	837	838	857	864	878	881	794

数量	14	14	14	14	14	14	14	14	13	13	13	13	13	13	12
编号	796	839	852	877	813	832	835	859	863	882	826	829	855	860	874
数量	12	12	12	12	11	11	11	11	11	11	10	10	10	10	10
编号	879	791	798	805	858	865	840	883	808	866	887	891	792	799	867
数量	10	9	9	9	9	9	8	8	7	7	7	7	6	6	6
编号	884	885	886	888	889	893	868	869	812	825	862	890	899	892	894
数量	6	6	6	6	6	6	4	4	3	3	3	3	3	2	2
编号	897	895	898	900	896										
数量	2	1	1	1	0										

#### 4.2.4 基于 APH-PCA 的多目标系统分析模型

层次分析法是一种定量和定性相结合的系统分析方法，能将定性问题定量化，它对于解决多层次、多目标的大系统优化问题行之有效，具有高度逻辑性、灵活性及简洁性等特点。AHP 法首先将所要分析的问题层次化，然后在此基础上，根据问题的性质和所要达到的总目标，将问题分解为不同的组成因素，并按照因素间的相互关联影响以及隶属关系将因素按不同层次聚集组合，形成一个多层次分析结构模型，最终获得各要素相对重要程度的权值，判断以决定诸因素相对重要性的顺序。

层次分析方法的基本过程，大体可以分为如下六个基本步骤：明确问题；建立层次结构；构造判断矩阵；计算权重；一致性检验；层次总排序。对于地下物流节点的选择而言，可以把选择的目标分为两层，第一层为地下网络节点群总体目标，第二层为“交通拥堵指数 T”、“总货物量 H”和“货物面积比 F”（货物面积比=该区域总货物量/该区域面积）的三个二级目标，见图 4.1。

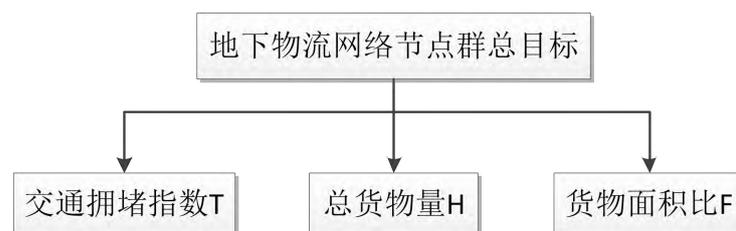


图 4.1 地下物流节点的层次分析

##### (1) 明确问题

对于前期 OD 数据的预处理，可知区域编号 885-900 之间的区域，其距离小于 3 公里的点较少，所以，我们将整个物流区域分为两个部分，分别对两个区域进行节点选择判断，即对两个大区域建立层次模型。

##### (2) 建立层次结构

根据对每个区域的交通拥堵指数、总货物量和货物面积比进行排序对比，我们可以看出在左区域内，因为存在非常密集的区域和较为宽广的区域，所以对较多的点的影响较大。因此，我们根据点的密集度，将左区域继续分为 4 个小区域建立层次结构，区域划分如图 4.2。

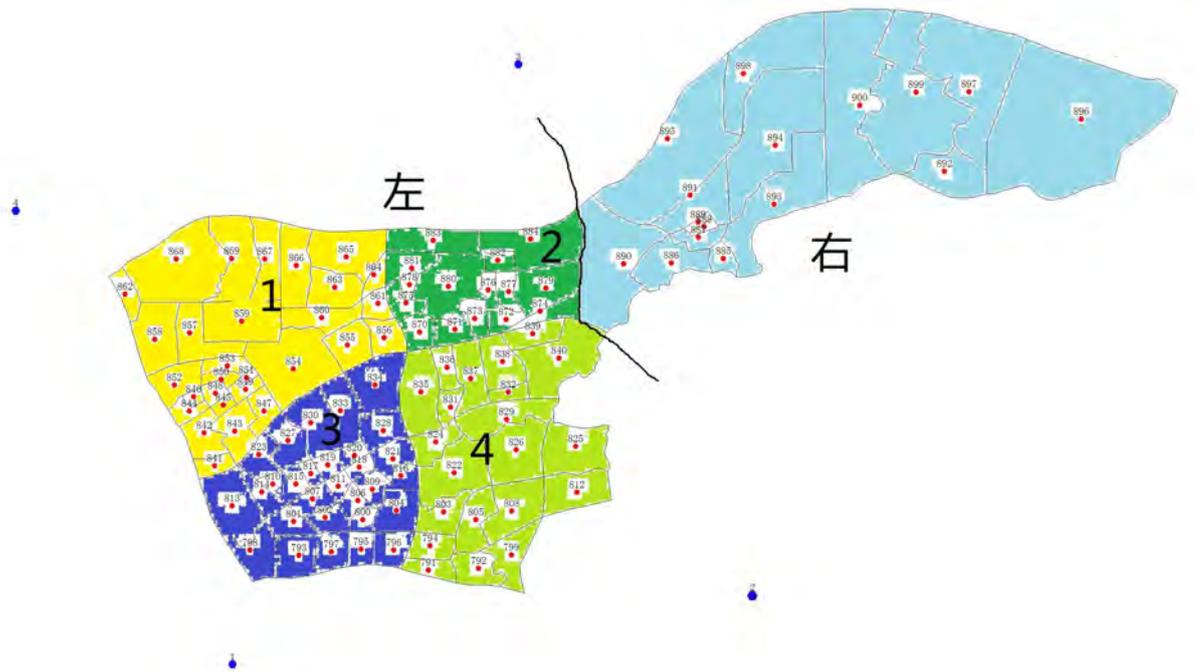


图 4.2 区域划分

### (3) 构造判断矩阵

判断矩阵是将层次模型中同一层次的要素相对于上层的某个因素，相互间做成对比较而形成的矩阵。根据交通拥堵指数、总货物量和货物面积比的排序，我们对三个指标进行重要性的判定。交通拥堵指数取值范围为 0 至 10，每 2 个数为一等级，具体指标见表，数值越高，表明交通拥堵状况越严重。

表 4.3 交通拥堵指数指标

等级	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10
拥堵情况	畅通	基本畅通	轻度拥堵	中度拥堵	严重拥堵

总货物量由于该地区非人口高度密集区，附件 1 中全天 OD 的数值，是每个区域的进货运量和出货运量，因为货物在地面运送才需要考虑到交通拥堵，而发展城市地下物流网络的其中一个直接目标是缓解交通拥堵直至交通畅通。所以，每个区域的地上货运量必须达到交通畅通的要求，即交通拥堵指数指标 $<4$ 。又因为交通拥堵指数与 OD 数据反映出来的区域总货运量（进、出之和）成正比，我们可根据总货物量与交通拥堵指数的关系，推算出当该区域交通拥堵指数指标 $<4$ 时，地上运输货物的最大数值，由此也可知地下需要运输货物的数量。按照地下运输货物的数量分为 10 个等级，具体等级划分见表 4.4。

表 4.4 总货物量等级划分

数量	$H > 4000$	$3000 < H < 4000$	$2500 < H < 3000$	$2000 < H < 2500$	$1800 < H < 2000$	$1400 < H < 1800$	$1000 < H < 1400$	$800 < H < 1000$	$600 < H < 800$	$H < 800$
等级	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

货物面积比 F 等于总货物数量除以该区域的面积，同理，按照货物面积比的数量多少分为 10 个等级，具体等级划货物面积比见表 4.5。

表 4.5 货物面积比等级划分

数量	F>3000	2500<F<3000	2000<F<2500	1500<F<2000	1400<F<1500	1200<F<1400	900<F<1200	900<F<700	400<F<700	F<400
等级	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

根据对应急资源调度定性的认识和数据获取的质量等方面因素,采用 1-9 比率标度法(见表)判断各项基准的相对重要性,建立判断矩阵,见表 4.6。

表 4.6 判断矩阵

	交通拥堵率 T	总货物量 H	货物面积比 F
交通拥堵率 T	1	2	6
总货物量 H	1/2	1	3
货物面积比 F	1/6	1/3	1

其中,判断值有 1, 3, 5, 7, 9 等 5 个等级标度,其意义为:1 表示列目标与行目标同等重要;3 表示列目标较行目标重要一点;5 表示列目标较行目标重要得多;7 表示列目标较行目标更重要;9 表示列目标较行目标极端重要。数值 2, 4, 6, 8 则表示重要程度处在两个等级中间。构造判断矩阵时应注意:所比较事物之间是否具有可比性;数量级差别不应大。

(4) 计算权重

一般而言,判断矩阵的数值是根据数据资料、专家意见和分析者的认识,加以平衡后给出的。但是,因客观事物的复杂性和人们认识上的多样性,可能会产生片面性,因此要求每一个判断矩阵都有完全的一致性显然是不可能的,特别是因素多、规模大的问题更是如此。为了考察层次分析法得到的结果是否基本合理,需要对判断矩阵进行一致性检验(CR<0.10)。本文为便于计算,在 Matlab 中,采用方根法计算判断矩阵权重。

①计算判断矩阵  $P$  中每行所有元素的几何平均值,得到向量  $M$ , 其中:

$$m_i = \sqrt[3]{\prod_j p_{ij}}, i=1,2,3 \quad (\text{式 4.1})$$

求解得出向量为  $M = [2.2894 \quad 1.1447 \quad 0.3816]^T$ 。

②对向量  $M$  做归一化处理,得到相对权重向量  $W$ , 其中:

$$w_i = \frac{m_i}{\sum_{j=1}^3 m_j} \quad (\text{式 4.2})$$

求解得出向量为  $W = [0.60 \quad 0.30 \quad 0.10]^T$ 。

③计算判断矩阵  $P$  最大特征值  $\lambda_{\max}$ , 其中:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \frac{(PW)_i}{w_i} \quad (\text{式 4.3})$$

计算得出  $\lambda_{\max}=3$ 。

(5) 一致性检验

一般而言，判断矩阵的数值是根据数据资料、专家意见和分析者的认识，加以平衡后给出的。但是，因客观事物的复杂性和人们认识上的多样性，可能会产生片面性，因此要求每一个判断矩阵都有完全的一致性显然是不可能的，特别是因素多、规模大的问题更是如此。为了考察层次分析法得到的结果是否基本合理，需要对判断矩阵进行一致性检验。对于任意判断矩阵，当  $C.I.=0$  时，则判断矩阵具有完全一致性； $C.I.$  的值越大，偏离一致性的程度就越大。

构造一致性检验指标  $C.I.$ ，构造如下：

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (\text{式 4.4})$$

求解得出  $C.I.=0$ ，则此判断矩阵具有完全一致性。故获得各个目标权重见表 4.7。

表 4.7 目标权重

交通拥堵率 T	总货物量 H	货物面积比 F
0.3	0.6	0.1
$C.I.=0$		

(6) 层次总排序

层次总排序就是基于层次但排序得到的结果计算组合权重，然后通过比较各要素组合权重的大小，得到要素的相对重要顺序。对于地下物流节点的选择，我们根据分区后计算一致性检验指标，并对该指标排序，得到排序结果如下所示。

左 1 区域：

表 4.8 左 1 区域排序结果

编 号	848	846	845	851	867	844	861	850	849	847
一致性	18.303	18.142	16.242	15.2	13.299	12.798	11.684	11.549	11.348	11.322
编 号	841	853	863	852	843	859	862	842	855	868
一致性	11.004	10.941	10.864	10.16	9.166	8.756	8.348	7.836	6.755	6.381
编 号	860	864	869	856	858	854	865	857	866	
一致性	6.063	5.766	5.716	5.383	5.036	4.949	4.919	4.377	1.979	

左 2 区域：

表 4.9 左 2 区域排序结果

编 号	877	880	876	875	874	878	882	870	884	871
一致性	15.943	13.507	13.037	12.424	11.998	9.902	9.261	6.386	6.378	6.364
编 号	881	872	873	883	879					
一致性	4.718	4.658	4.649	4.332	3.556					

左 3 区域：

表 4.10 左 3 区域排序结果

编 号	793	795	796	797	798	800	801	802	804	806
一致性	10.217	8.059	8.725	11.172	8.534	8.497	9.609	9.908	3.604	5.772
编 号	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816
一致性	13.026	10.487	6.41	15.12	9.629	11.439	8.873	10.903	18.659	4.664

编号	817	818	819	820	821	823	827	828	830	833
一致性	10.692	11.453	16.314	18.983	15.401	14.703	11.921	3.607	11.625	9.25
编号	834									
一致性	8.876									

左4区域:

表 4.11 左4区域排序结果

编号	791	792	794	799	803	805	822	824	825	826
一致性	11.804	7.791	8.779	7.743	6.099	6.066	11.107	6.174	9.738	12.116
编号	829	831	832	835	836	837	838	839	840	
一致性	6.65	12.789	10.237	11.233	6.467	10.843	8.339	19.228	8.016	

右区域:

表 4.12 右区域排序结果

编号	888	886	889	892	893	890	898	887	899	894
一致性	16.562	15.119	15.11	12.351	9.345	9.312	9.282	8.681	8.312	7.682
编号	885	900	891	897	896	895				
一致性	7.304	6.482	5.724	2.776	2.273	1.499				

经过检验,根据地下的货运量、交通拥堵率和货物面积比的数值,我们运用层析分析法得到的排序第一的位置为一级节点。选取本区域二级节点时,需要满足两个条件,一是一级节点从地面收发货物总量上限为4000吨,二级节点从地面收发货物总量上限为3000吨;二是节点的服务半径在3公里范围内自由选择,选取的所有二级节点要全面覆盖该区域。所以,得到一级节点的个数为5个,二级节点数的个数为24个,具体位置如图4.3所示(大圆圈点为一级节点,小圆圈点为二级节点)。

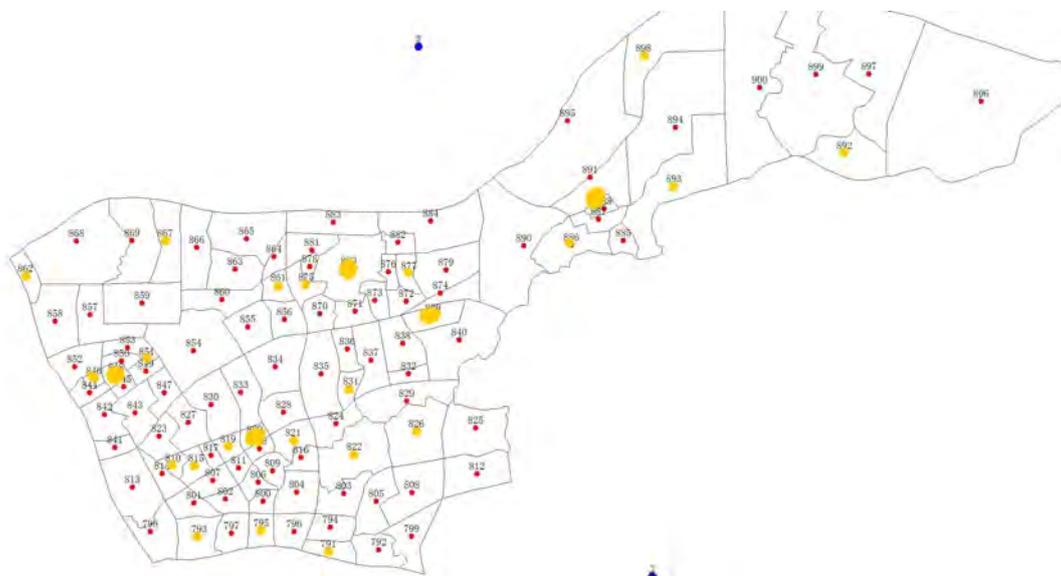


图 4.3 一、二级节点位置

考虑到部分区域货运量与面积之比过小,若节点覆盖了某区域中心点即可视为对该区域进行了覆盖。又已知所有节点的服务半径在3公里范围内自由选择,节点间距离不受限制。所以,我们得到所有节点的服务范围如图4.4所示。

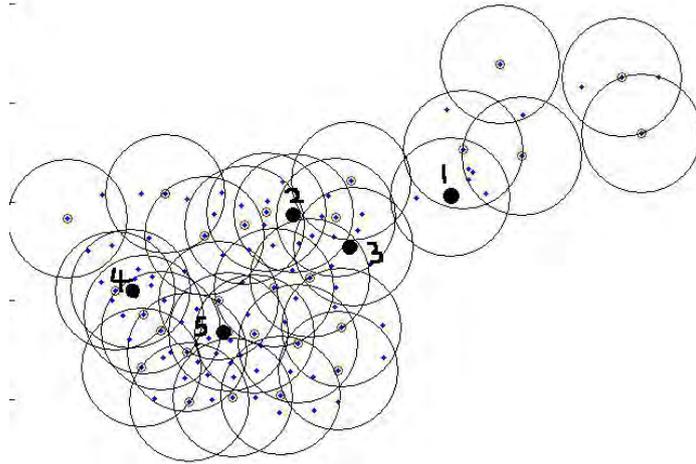


图 4.4 所有节点的服务范围

表 4.13 一级节点的具体位置

一级节点	1	2	3	4	5
坐标	(149951. 9, 1577738. 28)	(146987. 68, 15418. 21)	(149951. 9, 157738. 28)	(138793. 52, 155638. 13)	(14367. 06, 153444. 63)

根据各节点的拥堵率，在一级节点和二级节点的基础上，满足每个节点覆盖范围的要求，我们计算出每个节点地下物流最少货运量。因为计算得到的最少货运量为下限值，但在实际情况下，地下的实际货运量需要有预留，因此，我们在下限的基础上，给每个节点的货运量都进行了预留。每个区域的一级节点以及其覆盖的点、二级节点以及其覆盖的点的实际货运量如下表所示：

左 1 区域：

表 4.14 左 1 区域节点服务范围及实际货运量

节点编号	服务范围	实际货运量
848 (一级)	845, 850, 851, 853, 849	4000
843 (二级)	841, 842, 847	2800
846 (二级)	844, 852	2400
860 (二级)	854, 855	2600
861 (二级)	856, 864, 865,	1900
862 (二级)	857, 858, 868	2100
867 (二级)	859, 866, 869	3000

一级节点	编号	实际货运量	二级节点	编号	实际货运量	二级节点	编号	实际货运量
	848	1200		843	800		846	900
覆盖范围	845	700	覆盖范围	841	600	覆盖范围	844	700
	850	500		842	600		852	800
	851	500		847	800			
	853	600						
	849	500						
二级节点	编号	实际货运量	二级节点	编号	实际货运量	二级节点	编号	实际货运量
	860	500		861	700		862	500

覆盖范围	854	500	覆盖范围	856	400	覆盖范围	857	400
	855	600		864	300		858	500
	863	1000		865	500		868	700
二级节点	编号	实际货运量						
	867	1400						
覆盖范围	859	900						
	866	100						
	869	600						

区域左 2:

表 4.15 左 2 区域节点服务范围及实际货运量

节点编号	服务范围	实际货运量
880 (一级)	871, 873, 883	3400
877 (二级)	872, 876, 874, 879	2300
878 (二级)	875, 881, 870	1900
884 (二级)	882	1200

一级节点	编号	实际货运量	二级节点	编号	实际货运量	二级节点	编号	实际货运量
	880	2400		877	1100		878	400
覆盖范围	871	300	覆盖范围	872	300	覆盖范围	875	800
	873	300		876	600		881	300
	883	400		874	100		870	400
	879	200						
二级节点	编号	实际货运量						
	884	700						
覆盖范围	882	500						
	855	600						
	863	1000						

区域左 3:

表 4.16 左 3 区域节点服务范围及实际货运量

节点编号	服务范围	实际货运量
820 (一级)	819, 818, 811, 806	3500
815 (二级)	807, 817	2800
821 (二级)	809, 816, 804	2100
823 (二级)	827, 810	2800
793 (二级)	801, 802, 795	2500
795 (二级)	796, 800	1400
834 (二级)	833, 828, 830	3200
813 (二级)	814, 798	2400

一级节点	编号 820	实际货运量 1300	二级节点	编号 815	实际货运量 1500	二级节点	编号 821	实际货运量 1300
覆盖范围	819	1000	覆盖范围	807	900	覆盖范围	809	400
	818	500		817	400		816	200
	811	400					804	200
	806	300						
二级节点	编号 823	实际货运量 1100	二级节点	编号 793	实际货运量 800	二级节点	编号 833	实际货运量 800
覆盖范围	827	1000	覆盖范围	801	700	覆盖范围	834	900
	810	700		802	600		828	300
				795	400		830	1200
二级节点	编号 813	实际货运量 1000	二级节点	编号 795	实际货运量 1000			
覆盖范围	814	700	覆盖范围	796	600			
	798	700		800	400			

区域左 4:

表 4.17 左 4 区域节点服务范围及实际货运量

节点编号	服务范围	实际货运量
839 (一级)	840, 838	3800
835 (二级)	831, 836	2400
826 (二级)	825, 896	2400
822 (二级)	824, 803, 805	2800
808 (二级)	812, 799	2800
837 (二级)	832, 829	2000
794 (二级)	792, 791	1600

一级节点	编号 839	实际货运量 2300	二级节点	编号 835	实际货运量 1300	二级节点	编号 826	实际货运量 1400
覆盖范围	840	800	覆盖范围	831	700	覆盖范围	825	1000
	838	700		836	400		896	100
二级节点	编号 822	实际货运量 1300	二级节点	编号 812	实际货运量 1100	二级节点	编号 837	实际货运量 900
覆盖范围	824	500	覆盖范围	808	1100	覆盖范围	832	500
	803	500		799	600		829	600
	805	500						
二级节点	编号 794	实际货运量 600						
覆盖范围	792	600						
	791	400						

区域右:

表 4.18 右区域节点服务范围及实际货运

节点编号	服务范围	实际货运量
886 (一级)	890	3700
888 (二级)	807, 889, 887, 891, 885	2800
892 (二级)	897, 896	2200
893 (二级)	894	2700
899 (二级)	900	1400
898 (二级)	895	1500

一级节点	编号	实际货运量	二级节点	编号	实际货运量	二级节点	编号	实际货运量
	886	2300		888	700		892	1700
覆盖范围	890	1400	覆盖范围	889	600	覆盖范围	897	400
				887	600		896	100
				891	500			
				885	400			
二级节点	编号	实际货运量	二级节点	编号	实际货运量	二级节点	编号	实际货运量
	893	1600		899	130		898	1400
覆盖范围	894	1100	覆盖范围	900	800	覆盖范围	895	100

表 4.19 各物流园区到各一级节点的货运量

O/D	园区 1	园区 2	园区 3	园区 4
839 (左四区)	2877.649	6732.491	2094.932	1176.606
886 (右区)	3001.178	3016.396	6481.612	1716.213
820 (左三区)	7100.836	4373.39	2793.083	1330.095
848 (左一区)	4417.639	2256.072	1825.686	2936.835
880 (左二区)	1044.063	1790.175	4717.565	1294.048
总计	18441.365	18441.365	17912.878	8453.797

由图可知,物流园区 1 将所有货物直接运往左三区 4 号一级节点处后通过转运,物流园区 2 将所有货物运往左四区 5 号一级节点处后通过转运,物流园区 3 将右区的所有货物直接发给右区 1 号节点,将剩下所有货物发给左二区 3 号一级节点进行转运,物流园区 4 将所有货物运往左一区 2 号一级节点进行转运。由转运率公式:

$$\varphi_j = \frac{\left( \sum_{j=1}^5 m_{ij} \right) - m_{ij}}{\sum_{j=1}^5 m_{ij}} \times 100\% \quad (i=1,2,3,4; j=1,2,3,4,5)$$

其中,表示各园区,表示各一级节点,表示园区到节点的货运量,表示节点转运率,即从物流园区经由最近的一级节点转运至其他所有一级节点的货物量占该物流园区总

出货量的百分比。故可得出转运路线和转运率如表 4.20 所示。

表 4.20 转运路线及转运率

节点编号	运入货运量	转出货运量	转运率 $\phi$
1	8453.797	5516.962	0.65260
2	11431.266	6713.701	0.58731
3	18441.365	11340.529	0.61495
4	18168.524	11436.033	0.62944
5	6481.612	0	0.00000

#### 4.2.5 问题一综述

根据附件 1 中的坐标数据，我们针对 115 个点，计算它们之间距离小于 3 公里的所有点，并按照小于的点的数量对其排序，筛选出需要作为节点的点。接着，我们建立 APH-PCA 的多目标系统分析模型，将区域划分为 5 个小区域，对交通拥堵率、总货物量、货物面积比进行等级划分，依据相对重要性构建判断矩阵，采用方根法计算判断矩阵权重，接着进行一致性检验计算检查判断矩阵是否具有完全一致性，得到 5 个区域的节点排序情况。依据节点的覆盖范围、拥堵率及货运量，我们选择出 5 个一级节点 ((149951.9,1577738.28) 、 (146987.68,15418.21) 、 (149951.9, 157738.28) 、 (138793.52,155638.13)、(14367.06, 153444.63))27 个二级节点。根据拥堵率与货运量成正比的关系，我们可以计算出每个节点地下物流最少货运量，并且给地下的实际货运量有预留，得到每个区域的一级节点及其覆盖的点、二级节点及其覆盖的点的实际货运量。最后，根据一级节点的转运率计算公式，得到每个一级节点的转运率，即左 1 节点  $\phi_1=0.65260$ 、左 2 节点  $\phi_2=0.58731$ 、左 3 节点  $\phi_3=0.61495$ 、左 4 节点  $\phi_4=0.62944$ 、右节点  $\phi_5=0$ 。

### 4.3 问题二

#### 4.3.1 问题二分析

在问题一地下物流网络节点群的基础上，选择合适的地下路线以建立该区域的“地下物流系统”网络。并在在转运率变化不大的情况下，若考虑优化网络，可适当调整一、二级节点位置，最终达到总成本最小的目标。除园区至一级节点的地下通道外其他地下通道均采用 5 吨的地下运输车辆，并且地下节点及通道内的货物每天要清仓。不考虑物流园区的建设及园区内的地下节点建设，但从园区出发的通道长度需要计入总成本。我们对问题一中选择的 5 个一级节点和 24 个二级节点建立遗传算法模型，对不同物流网络布局进行分析，如线状布局、环状布局、树状布局等，然后得到不同的物流网络线路。根据建立物流节点的成本、运输的成本、地下物流隧道的建设成本、运输的货物量的等要求，得到最满足服务的最佳物流网络图。

#### 4.3.2 城市地下物流系统网络的布局

根据网络路线与配送中心、物流中心之间连接形式的不同，ULS 的网络布局形态有线状、环状、栅格状、树状和混合状布局等。

##### (1) 线状布局结构

线形结构布局，是指城市地下物流网络路线，以一条单一的曲线连接各网络节点，此结构布局连接的网络节点不多，辐射范围不大，而且投资费用和开发难度不高，便于扩充，适合物流流量大而方向集中的城市地下物流系统。但对整个城市地下物流系统来

说，各网络节点的连通度较低，运输容量也不大，若任一物流节点失效，将造成整个区域物流需求得不到满足，这种布局中连接的节点数量比较少，如图 所示。

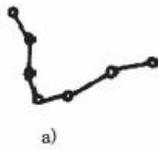


图 4.5 线状布局

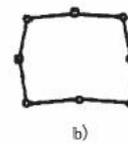


图 4.6 环状布局

### (2) 环状布局结构

环形结构布局，是指城市地下物流网络路线，以一条首尾相接的曲线连接各网络节点，形成环形网络。该布局连接的节点位于环线上，由于环状连接中任意一条线路出问题，整个网络的连通都会受到影响，因此对环状布局来说，但是由于环形的网络连接，其中任何一个或多个网络节点或线路的增减，都可能会造成整个城市地下物流网络的运作瘫痪，每一条路线都特别关键。该网络布局结构连接了环线上的各网络节点，开发难度和成本低，网络节点数量也多，连通度较线性结构要好。如图 3-8。

### (3) 树形结构

树状布局是指网络中的路线呈树状分布，如图 3.4 所示。树形结构布局是指城市地下物流网络路线呈树枝状分布，该布局可以连接到较多数量的节点，但节点是由路线在一定程度上进行选择，树状布局不构成回路。城市地下物流网络节点之间基本实现了点到点的连接，连通度较高，初步形成了简单的城市地下物流网络，但是网络路线对网络节点有一定的选择性，不利于各网络节点之间的高效互通，网络中一个或多个网络节点或网络路线的增减，都会影响到整个城市地下物流网络的运行，如 3-9 所示。

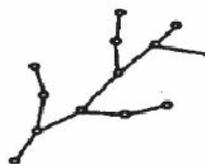


图 4.7 树状布局



图 4.8 栅格状布局

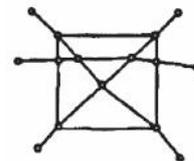


图 4.9 混合状布局

### (4) 栅格状布局结构

栅格结构布局是指城市地下物流网络路线互相交叉，构成的方格网状比较规整的多边形几何结构，此布局结构连接的网络节点较多，网络节点之间的联通度和网络运输容量均较高，辐射面较广，开发难度和投资费用也较大，网络中一个或多个网络节点或网络路线的增减，基本不会影响到整个城市地下物流网络的正常运行，如图 3-10 所示。

### (5) 混合布局结构

混合布局是指将以上两种或两种以上的布局结构有机结合起来，构成的一个完整的网络结构。该结构网络节点和网络路线以比较随机的方式连接成网，可以连接更多的网络节点，网络的连通度和运输容量更高，开发难度也相对较高。如图 3.5 所示。

## 4.3.3 模型建立与求解—基于遗传算法和综合评分的地下物流网络优化模型

在地下物流系统中，假设现需在  $N$  条备选线路中选出合理的地下物流轨道线路，使得这个地下物流系统可以完成配送任务，本文针对多少节点建立模型。

设地下物流轨道线路  $k$  的长度为  $I_k$ ；每公里的建设费用为  $C_k$ ，每公里的运输费用为  $D_k$ ，配送车在行驶过程中速度固定不变，设为  $v$ ，货物从节点  $i$  出发到达节点  $j$ ，线

路长度记作  $L_{ij}$ ，货物运输量为  $X_{ij}$ ， $C$  为建设投资成本， $T$  为时间成本， $Z$  为总成本，并引入  $\eta_k, \mu_{ij}$ ，其中，

$$\eta_k = \begin{cases} 1 & \text{线路}k\text{被选中} \\ 0 & \text{线路}k\text{未被选中} \end{cases} \quad (\text{式 4.6})$$

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点}i, j\text{所在线路被选中} \\ 0 & \text{节点}i, j\text{所在线未路被选中} \end{cases} \quad (\text{式 4.7})$$

我们建立的数学模型如下：

$$C = \sum_{k=1}^N \eta_k l_k (c_k + d_k) \quad (\text{式 4.8})$$

$$T = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m \mu_{ij} x_{ij} \left( \sum_{p=0}^h t_{ijp} + \frac{L_{ij}}{v} \right) \quad (\text{式 4.9})$$

$$\begin{aligned} \min Z &= \min(C + T) \\ &= \min \left( \sum_{k=1}^N \eta_k l_k (c_k + d_k) + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m \mu_{ij} x_{ij} \left( \sum_{p=0}^h t_{ijp} + \frac{L_{ij}}{v} \right) \right) \quad (\text{式 4.10}) \end{aligned}$$

约束条件：

$i, j \in T$ ，其中  $i, j$  是物流节点， $T$  为所有节点的集合。

$L_{\min} \leq \sum_{k=1}^N \eta_k l_k \leq L_{\max}$ ， $L_{\max}$  和  $L_{\min}$  分别为地下物流运输线路总的长度最大值和最小值，保证线路规模的合理性。

$$\eta_k = \begin{cases} 1 & \text{线路}k\text{被选中} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (\text{式 4.11})$$

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点}i, j\text{所在路线选中} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (\text{式 4.12})$$

遗传算法具有内在的隐并行性和更好的全局寻优能力；采用概率化的寻优方法，能自动获取和指导优化的搜索空间，自适应地调整搜索方向，不需要确定的规则。用精确算法将会无法在可接受的时间内计算出全局最优解。遗传算法具有很好的收敛性，是一种相同计算精度下计算时间较少的全局优化算法。

**Step1:** 因为有  $N$  个节点可供选择，对其编号依次为：1, 2, ..., n，其含有 0-1 变量，编码为：{1, 0, 0, ..., 1, 0}，其中，0 表示该位置的节点未被选中，1 则表示节点被

选中。对单一供应点及其需求点进行编码，生成初始种群。

**Step2:**当累计次数  $i$  超过最大运输能力时，则将断点  $i-1$  的节点记录下来，同时累计此时线路的长度。若未超过最大长度时，则在断点  $i-1$  后插入 0；若累计次数未达到  $i-1$ ，就线路长度已达到最大长度，那么取此时线路有长度累计的次数为断点，并插入 0，并将累积量清零。重复上述操作，直至在此序列末尾插入 0 为止。例如：节点 1456352，生成断电后的序列为：140563052，则表示的含义为：线路一：供应点→节点 1→节点 4；线路二：供应点→节点 5→节点 6→节点 3；线路三：供应点→节点 5→节点 2。

**Step3:**将所有线路合并成一个完整的群体，在这个群体中进行交叉和变异运算，从而生成新的完整物流网络群体。如此不断地进行“分割-并列-选择-合并”的操作，最终可求出多目标优化问题的最优解。

**Step4:**根据题目中要求的各项指标因素地下物流隧道与节点的建设成本为：双向四轨（双洞）（10 吨）造价 5 亿元/公里，双向双轨（双洞）（10 吨）造价 4 亿元/公里，双向四轨（双洞）（5 吨）造价 3.5 亿元/公里，双向双轨（双洞）（5 吨）造价 3 亿元/公里，一级、二级节点的建设成本分别约为 1.5 亿元/个、1 亿元/个；通道与节点的设计年限 100 年，年综合折旧率均为 1%。并且，在满足物流货运量的基础上，我们对每个区域分别进行物流网络优化，得到以下的地下物流网路图：

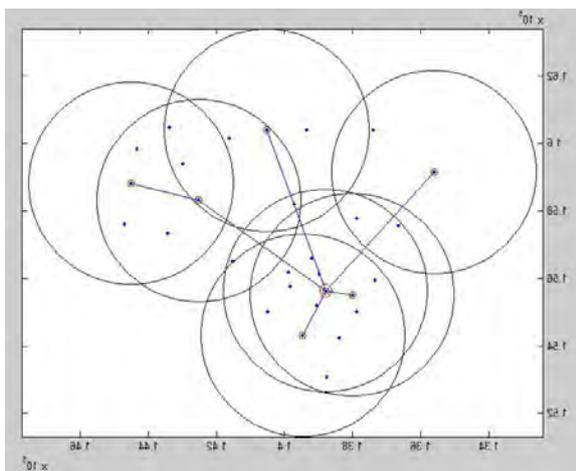


图 4.10 左 1 区域的网络构成

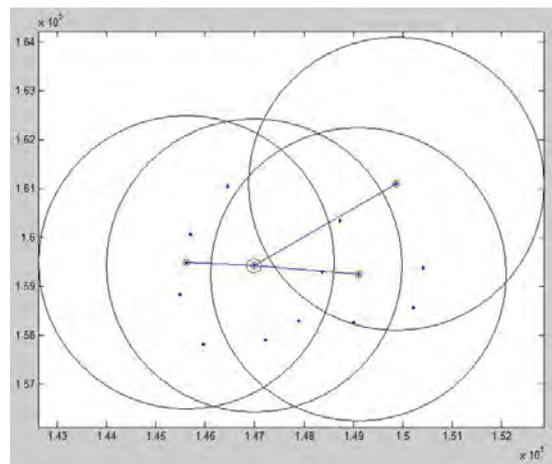


图 4.11 左 2 区域的网络构成

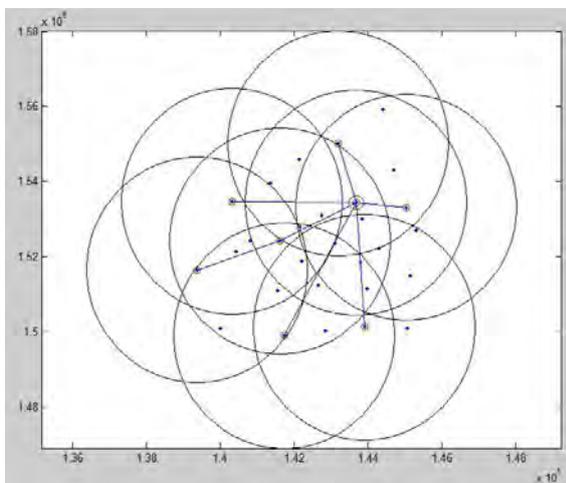


图 4.12 左 3 区域的网络构成

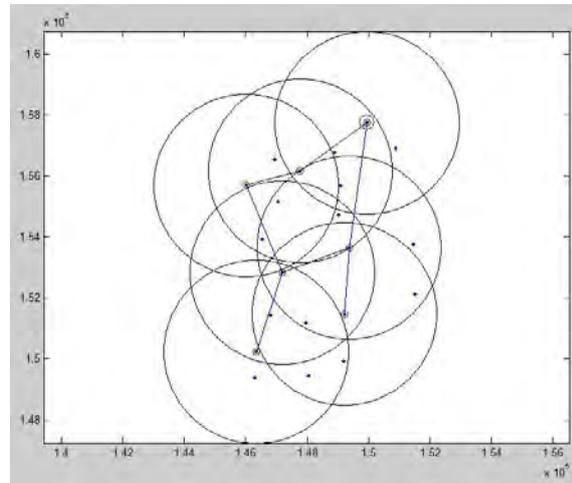


图 4.13 左 4 区域的网络构成

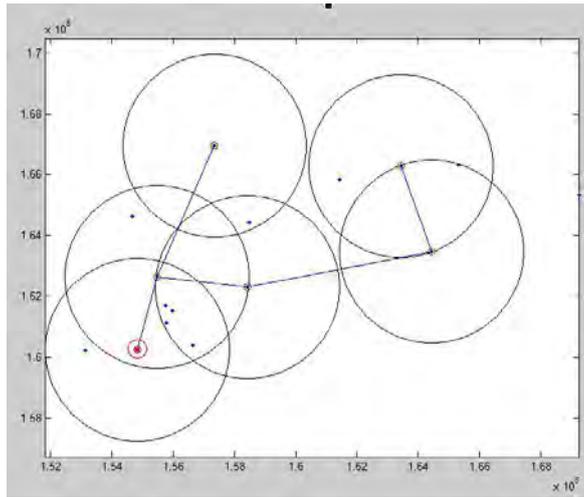


图 4.14 右区域的网络构成

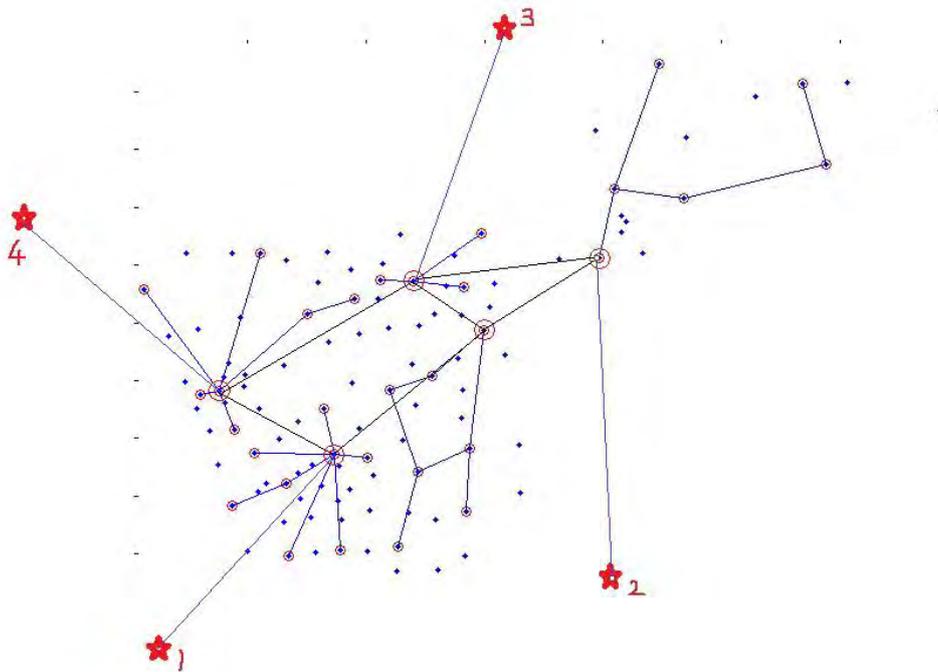


图 4.15 整个区域地下物流网络构成图

根据物流系统网络的布局的原则，在转运率变化不大的情况下，考虑优化网络，我们适当调整一、二级节点位置，将物流网络图调整为星型或栅格型，调整后的网络图也满足成本及货运量的要求。

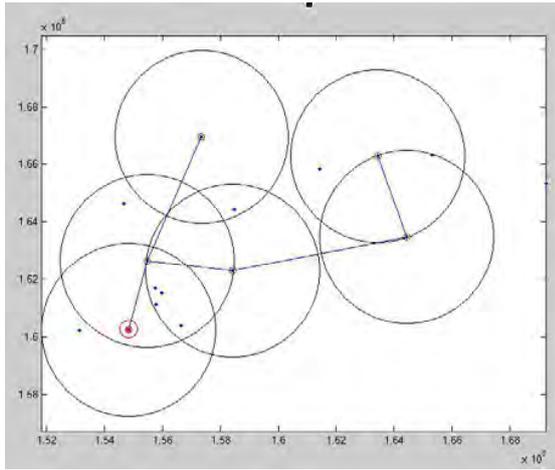


图 4.16 右区域修改前

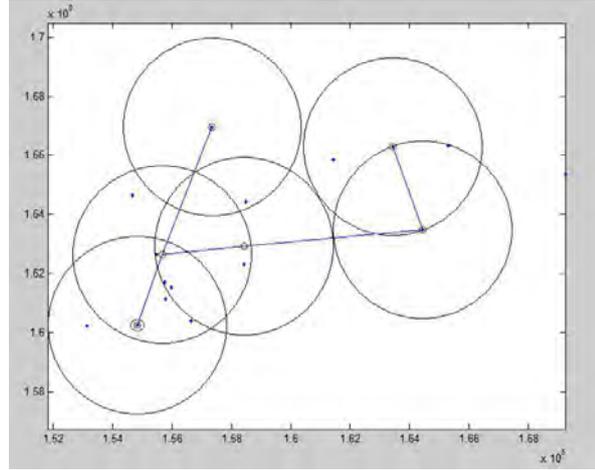


图 4.17 右区域修改后

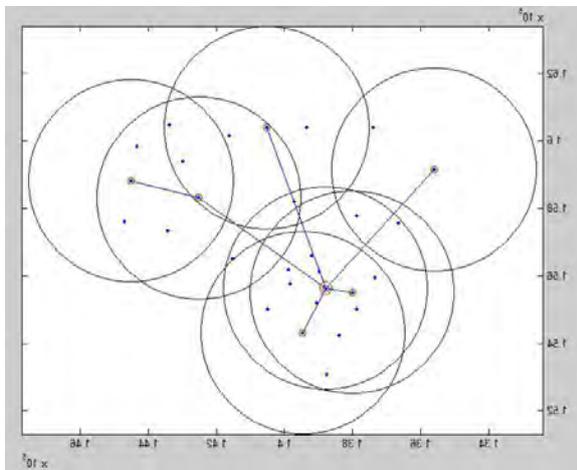


图 4.18 左 1 区域修改前

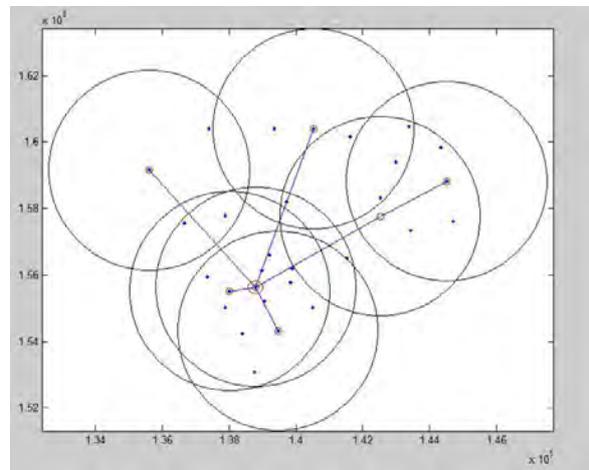


图 4.19 左 1 区域修改后

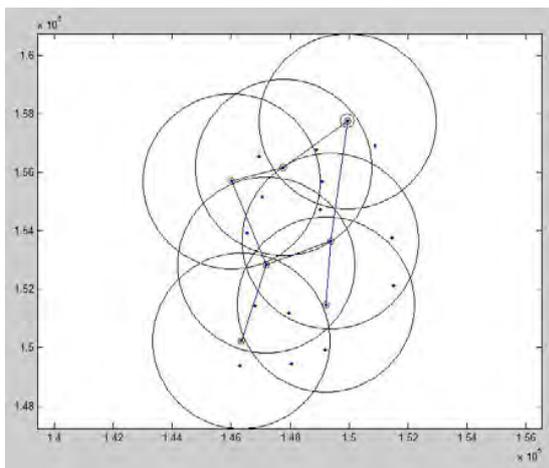


图 4.20 左 4 区域修改前

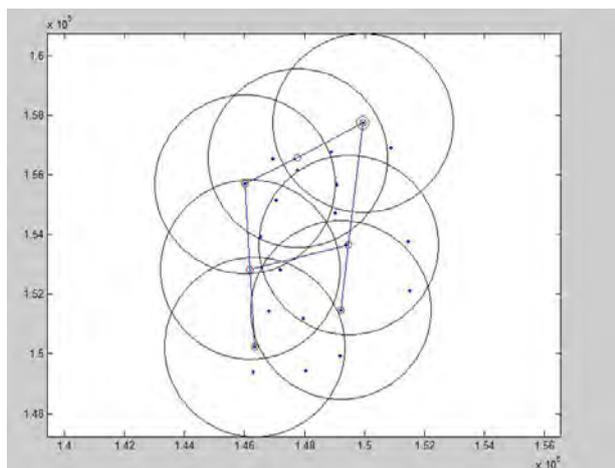


图 4.21 左 4 区域修改后

已知每条线路所连节点（即节点的链接情况）及节点间的运输货物量，经过问题一计算。网络中节点总数为  $m$ ， $a_i$  为一级节点个数， $a_j$  为二级节点个数， $w_i$  为每个一级节点的建造成本， $w_j$  为每个二级节点的建造成本。

在全天 OD 情况下（即 18 小时工作时间），双向双轨隧道的最大运输能力为  $Y_{\max}$ 。

$$W_l = \begin{cases} W_{L1} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m Y_{ijk} > Y_{\max 1}, & \text{双向双轨建设成本} \\ W_{L2} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m Y_{ijk} < Y_{\max 1}, & \text{双向四轨建设成本} \end{cases} \quad (\text{式 4.13})$$

$Y_{ijk}$ : 线路  $k$  在节点  $(i, j)$  之间的运输能力。

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{表示路线 } k \text{ 经过路线 } (i, j) \\ 0, & \text{表示路线 } k \text{ 不经过路线 } (i, j) \end{cases} \quad (\text{式 4.14})$$

$$\text{建设成本: } Z_1 = P_i * W_i + P_j * W_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m W_{Lijk} X_{ijk}; \quad (\text{式 4.15})$$

$$\text{运输成本: } Z_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l W_{Lijk} X_{ijk}; \quad (\text{式 4.16})$$

$$\min Z = \lambda_1 Z_1 + \lambda_2 Z_2; \quad (\text{式 4.17})$$

$$\text{其中, } \begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 = 1 \\ \sum_{i=1}^m Y_{ijk} * X_{ijk} < Y_{\max} \end{cases} \quad (\text{式 4.18})$$

根据题目中已知的数据，地下物流系统运行速度可以达到 20-60 公里/小时，一级节点与物流园区相连且采用 10 吨的大型车辆地下运输，从地面收发货物总量上限为 4000 吨，二级节点从地面收发货物总量上限为 3000 吨。地下物流隧道与节点的建设成本为：双向四轨（双洞）（10 吨）造价 5 亿元/公里，双向双轨（双洞）（10 吨）造价 4 亿元/公里，双向四轨（双洞）（5 吨）造价 3.5 亿元/公里，双向双轨（双洞）（5 吨）造价 3 亿元/公里。并且，一级、二级节点的建设成本分别约为 1.5 亿元/个、1 亿元/个；通道与节点的设计年限 100 年，年综合折旧率均为 1%。表 4.21 表示的是各节点实际货运量，图 4.22 表示的是各级通道的位置和实际流量。

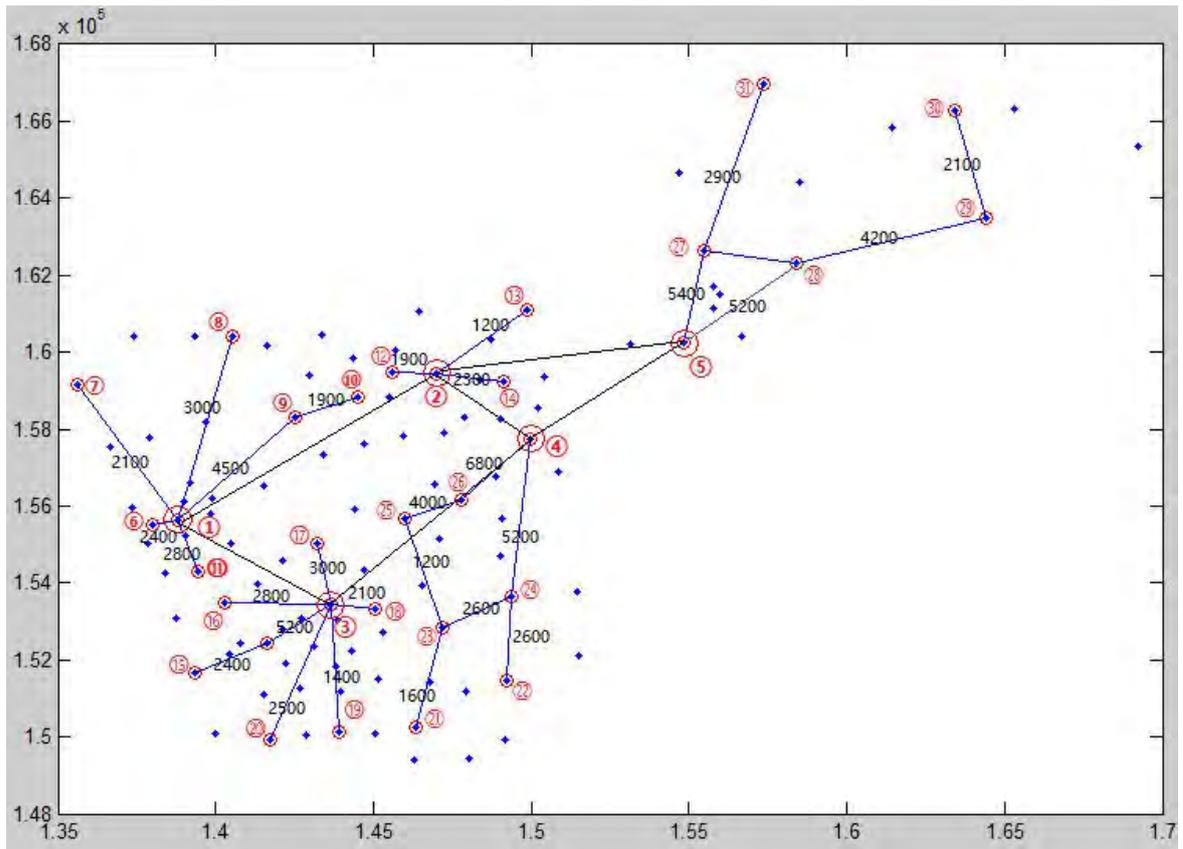


图 4.22 各级通道的位置和实际流量

表 4.21 各节点实际货运量

节点编号	实际货运量	节点编号	实际货运量
①	14800	①⑦	3000
②	5400	①⑧	2100
③	17000	①⑨	1400
④	12000	①⑩	2500
⑤	10600	①⑪	1600
⑥	2400	①⑫	2600
⑦	2100	①⑬	2200
⑧	3000	①⑭	2600
⑨	2600	①⑮	2800
⑩	1900	①⑯	2800
⑪	2800	①⑰	2500
⑫	1900	①⑱	1000
⑬	1200	①⑲	2100
⑭	2300	①⑳	2100
⑮	2400	①㉑	2900
⑯	2800		

通过带入数据计算，得到：

- (1) 采用双向双轨运输：总费用为 208 亿元；
- (2) 采用双向四轨运输：总费用为 197 亿元；
- (3) 采用双向双轨+双向四轨运输：总费用为 182 亿元。

综上所述，我们采用双向双轨+双向四轨综合的运输方式，更大程度上缓解交通拥堵，并且降低物流成本，达到地下物流系统最优化。

#### 4.2.4 问题二综述

首先，我们分析了城市地下物流系统网络的各类布局情况，在问题一的基础上，且在转运率变化不大的情况下，建立基于遗传算法的模型，在满足物流货运量的基础上，我们对每个区域分别进行物流网络优化，得到优化后的地下物流网路图。基于问题一的各节点实际货运量，在优化后的网络图上得到最新的各节点实际货运量和各级通道的实际流量。接着，我们适当调整一、二级节点位置，将物流网络图调整为星型或栅格型，且调整后的网络图也满足成本及货运量的要求，通过比较对双向双轨运输和双向四轨运输总费用的比较，最终选择双向双轨+双向四轨综合的运输方式（总费用为 182 亿元），更大程度上缓解交通拥堵，并且降低物流成本，达到地下物流系统最优化。

### 4.4 问题三

#### 4.4.1 问题三分析

在前两问中的计算中，我们未对地下物流网络进行系统的考虑，由于地下物流系统在运作过程中的多样性和动态实时性，物流的风险会因蝴蝶效应而扩大，及时预知物流风险，选择合适的规避风险地下物流网络就尤为重要。在地下物流系统中会出现例如未考虑运输时间是否最短、某一方向的货运量剧增所带来的货物滞留以及某通道中断等问题。由于第二问中我们对每个节点的预留量都很大，所以可以忽略货运量剧增的问题。我们只需要分析出每个节点或通道出现问题时，所造成的影响的定量分析和比较，对影响较大的节点和通道在确保低成本的目标下，做出合适的预留量和预留通道，建立新的地下物流系统，并定性比较其与第二问中的地下物流网络的优劣。

#### 4.4.2 模型建立与求解—基于重要度的失效负载分流模型和 Dijkstra 算法的最短路径模型

根据问题一的分析，运输中断所在的路段在网络中的重要程度和负载能力大小对于地下物流系统中断后失联负载分配有重要影响，也影响 ULS 的抗风险能力。因此我们采用介数定义物流网络中每个节点路段的重要性。假设任意的一条路段  $e_{ij}$ ，其介数为  $B_{ij}$ ，则：

$$B_{ij} = \sum_{p \neq q} \frac{\sigma_{pq}(ij)}{\sigma_{pq}} \quad (\text{式 4.19})$$

其中， $\sigma_{pq}$  表示任意的节点  $v_p$  和  $v_q$  之间的最短路径的总数； $\sigma_{pq}(ij)$  表示任意节点  $v_p$  和  $v_q$  之间的所有最短路径中经过  $e_{ij}$  的路径个数，且  $p \neq i \neq q$ 。这结合物流 OD 需求运输的基本特点，将物流运输的任务经过该路径的次数作为路段重要度的表现，符合实际中物流特点。

此外，我们给出路径的负载能力（即货运量）的定义，结合图论和介数的概念，得

到:

$$B_{ij} \leq (B_i \vee B_j) \quad (\text{式 4.20})$$

其中, 节点介数的计算公式如下:

$$B_i = \sum_{p \neq q} \frac{\sigma_{pq}(i)}{\sigma_{pq}} \quad (\text{式 4.21})$$

其中,  $\sigma_{pq}$  为任意节点  $v_p$  和  $v_q$  之间最短路径的总数;  $\sigma_{pq}(ij)$  表示任意节点  $v_p$  和  $v_q$  之间的所有最短路径中途经节点  $v_i$  的路径数量。

接着, 对节点两端的路径负载能力进行量化, 假设任意边  $e_{ij}$  的负载能力  $C_{ij}$ ,

$$C_{ij} = B_{ij} (k_i k_j)^\rho \quad (\text{式 4.22})$$

$k_i$  和  $k_j$  分别代表运输路段两端节点  $v_i$  和  $v_j$  的度。

假设任意边  $e_{ij}$  在节点  $F$  处突发失效, 其任意邻接边  $e_{\alpha\beta}$  获得师兄负载的分配比例  $P_{\alpha\beta}, v_\alpha \in \{v_i, v_j\}$ , 那么得到在运输方向性的新的分配比例  $\Theta_{\alpha\beta}$ ,

$$\begin{aligned} \Theta_{\alpha\beta} &= \frac{D_{\alpha F}}{D_{ij}} p_{\alpha\beta}^0 \\ &= \frac{D_{\alpha F}}{D_{ij}} \frac{B_{\alpha\beta}}{\sum_{e_{\alpha\eta} \in \Gamma_{\alpha v}} B_{\alpha\eta}} \end{aligned} \quad (\text{式 4.23})$$

其中,  $D_{ij}$  为边  $e_{ij}$  的空间距离,  $D_{\alpha F}$  为节点  $v_\alpha$  与失效点处  $F$  的空间距离,  $\Gamma_{\alpha v}$  为节点  $v_\alpha$  端的失联邻接边的集合。那么, 任意关联邻接边  $e_{\alpha\beta}$  获得的来自失效边  $e_{ij}$  上的负载分配量  $\Delta L_{\alpha\beta}$  为:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\alpha\beta} &= \Theta_{\alpha\beta} L_{ij} \\ &= \frac{D_{\alpha F}}{D_{ij}} \frac{B_{\alpha\beta}}{\sum_{e_{\alpha\eta} \in \Gamma_{\alpha v}} B_{\alpha\eta}} L_{ij} \end{aligned} \quad (\text{式 4.24})$$

我们根据节点和路径负载能力以及节点的复杂度(即节点之间空间距离和节点与其他节点的关系), 计算出每个节点在该区域距离其他节点的重要度, 如下表 4.22 所示:

表 4.22 各节点的重要度

节点编号	实际货运量	节点编号	实际货运量
⑥	5	⑲	4
⑦	6	⑳	6
⑧	7	㉑	5
⑨	10	㉒	7
⑩	4	㉓	7
⑪	6	㉔	10
⑫	4	㉕	9
⑬	4	㉖	10
⑭	5	㉗	10
⑮	10	㉘	10
⑯	6	㉙	9
⑰	6	⑳	6
⑱	5	㉚	7

问题二中的网络是分步设计网络，并未从全局出发，根据对地下物流系统运行情况的分析，以及各个节点的重要度信息，我们对问题二的网络图增加节点个数，调整节点的位置或级别，通过增加、减少、改变路径的方法，缩短货物运输总里程（同时节省运输时间），降低运输成本，修改之后的地下物流运输网络图如图 4.23 所示。共计增加 7 个二级节点，并把 23 号二级节点变为一级节点。

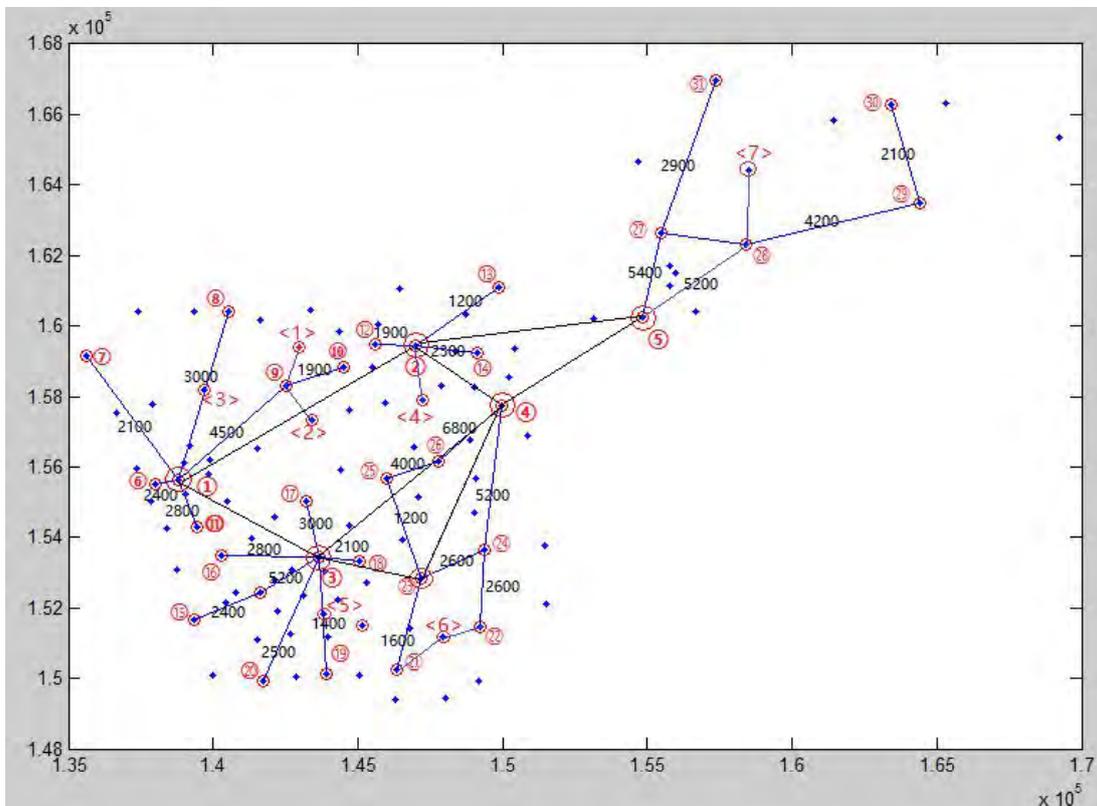


图 4.23 修改之后的地下物流运输网络图

Dijkstra(迪杰斯特拉)算法是典型的单源最短路径算法,用于计算一个节点到其他所有节点的最短路径。主要特点是以起始点为中心向外层层扩展,直到扩展到终点为止。

第一步(初始化):令  $k=0, P^{(0)} = \{V_s\}, T^{(0)} = \{V_1, V_2 \dots V_n\}, d^{(0)}\{V_s\} = 0, d^{(0)}\{V_i\} = \infty, \lambda(V_i) = V_s$

$rsent = V_s$ ;

第二步:令  $k = k + 1$ , 对所有的临时标号  $V_i \in T^{(k-1)}$  计算;

在起点为 0 终点为 D 的网络中,用  $f(0, i) (i=1, 2, \dots, D)$  表示起点 0 到节点  $i$  的路线权值,那么最短的路径总是从起点 0 出发,沿着某条路到达节点  $i$ ,再通过与  $i$  相连的路段  $(i, j)$  到达节点  $j$ ,那么产生如下权值:  $f(0, j) = \min\{f(0, i) + f(i, j)\}$

因此可采用以下的递推公式搜索从 0 到 D 的最短路线:

令:

$$f^{(1)}(0, j) = f(0, i) \quad (i=1, 2, \dots, D) \quad (\text{式 4.25})$$

对  $t=2, 3, \dots$ ,

$$f^{(t)}(0, j) = \min\{f^{(t-1)}(0, i) + f(i, j)\} \quad (i=1, 2, \dots, D) \quad (\text{式 4.26})$$

反复进行迭代计算,当迭代到第  $n$  步时,如果对所有的  $i=1, 2, \dots, D$ , 存在

$$f^{(n)}(0, j) = f^{(n-1)}(0, i) \quad (\text{式 4.27})$$

那么,  $\{f^{(n)}(0, i)\}$  就是从 0 到 D 的最短路径的权值。

将整个地下物流网络的二级节点均与一级节点相连,一级节点之间互相连接,得到如下的网络图 4.24。

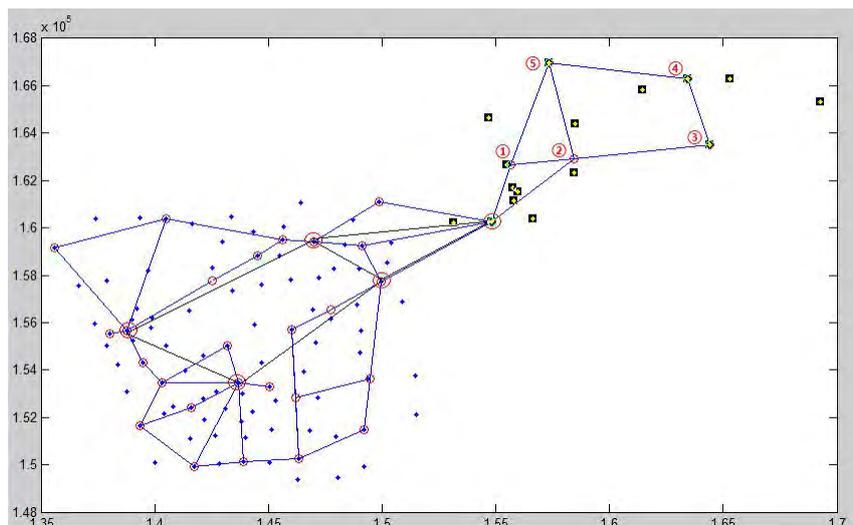


图 4.24 各节点相连网络图

以右区域为例,我们将右区域的一级节点和二级节点分别进行编号,如图所示。如果删除节点 2(二级节点),通过 Dijkstra 算法的最短路径模型遍历该区域的所有点,

得到最优的路径，即货物运输总里程最短（同时节省运输时间），且运输成本最低。通过多条不同路径对比，最终得到最优路径，如图所示 4.25。

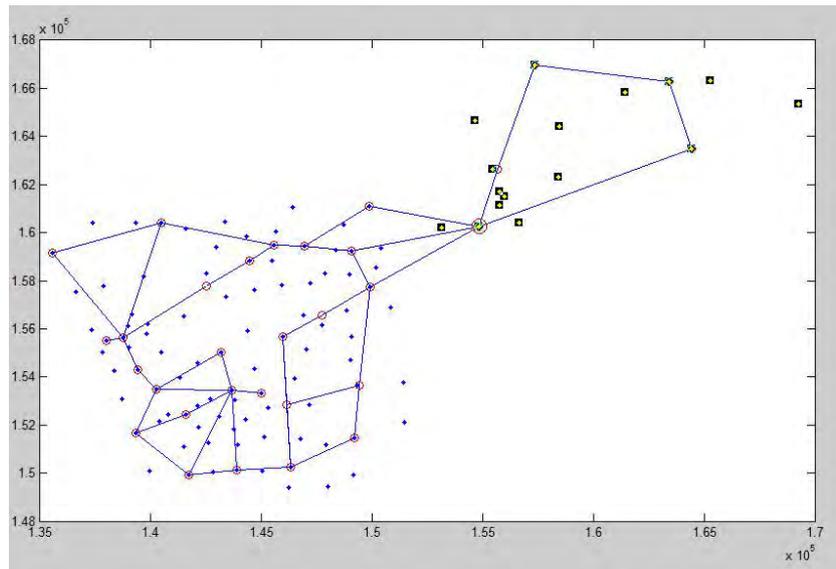


图 4.25 删除节点后更新的网络图

#### 4.4.3 问题三综述

根据问题二中设计的网络，我们根据节点和路径负载能力以及节点的复杂度（即节点之间空间距离和节点与其他节点的关系），计算出每个节点在该区域距离其他节点的重要度。根据对地下物流系统运行情况的分析，以及各个节点的重要度信息，我们对问题二的网络图增加节点个数，调整节点的位置或级别，通过增加、减少、改变路径的方法，缩短货物运输总里程（同时节省运输时间），降低运输成本，共计增加 7 个二级节点，并把 23 号二级节点变为一级节点。当网络中某个节点失效时，通过 Dijkstra 算法获取最短路径算法，比较不同路径的费用，得到最优化的网络节点图。

### 4.5 问题四

#### 4.5.1 问题四分析

前三问只考虑了当前货运量下而建立的地下物流系统，由于此系统大部分工作在地下完成，所以改建困难。我们需要考虑可持续发展，做好扩容处理，使此系统满足 30 年的交通需求。正是由于其改建困难，所以在建设过程中，按每年的货运量所建设的节点和路线就不可再改变，我们必须在保证成本最低的情况下，选择当前网络以外的点和通道扩展此网络，所以我们只能选择迭代法每年进行最优路径迭代计算。最终确定此系统需要增加线网容量和节点数。

#### 4.5.2 模型建立—基于贪婪算法的动态规划模型

贪婪算法是一步步的进行求解，每一步都将最优化测度当做目标，对当前构造的不分解做一扩展，最终获得问题的完整解。所以它必须满足：①结果必须具有可行性，满足规划中所有的约束条件；②每一步结果必须是局部最优解；③结果的不可逆性，即上一步的最优解确定后，这一步的结果无法影响上一步规划结果，且不可改变。由于上一问中我们已经采用 Dijkstra 算法求解了当前日货运量的线路规划，即当前的最优物流网络。为了解决地下物流系统改建困难的问题，我们需要采用贪婪算法对已经规划的物流网络进行优化，使其满足近 30 年内的交通需求。根据题目所给，需求量每年呈 5% 增长，即根据当前货运量，我们可以预测出未来 30 年内每个区域每年的货运量，总货

运量变化如下图 4.26 所示。

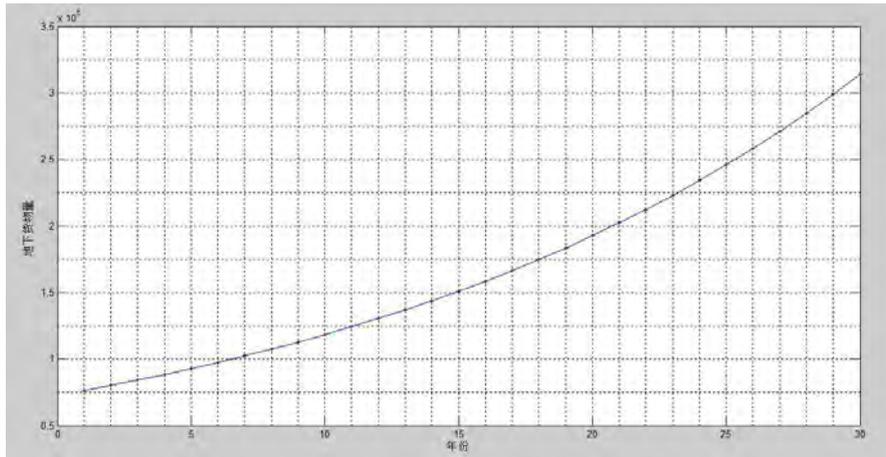


图 4.26 30 年内货运量变化曲线

接下来我们需要在图中寻找合适的节点加入到此网络中。每年的货流量都在增加，所以此网络每年都在扩充，我们在进行迭代时，以贪婪的方式来对此网络进行扩充，也就是把不在网络中的并且成本最低的插入到网络中。

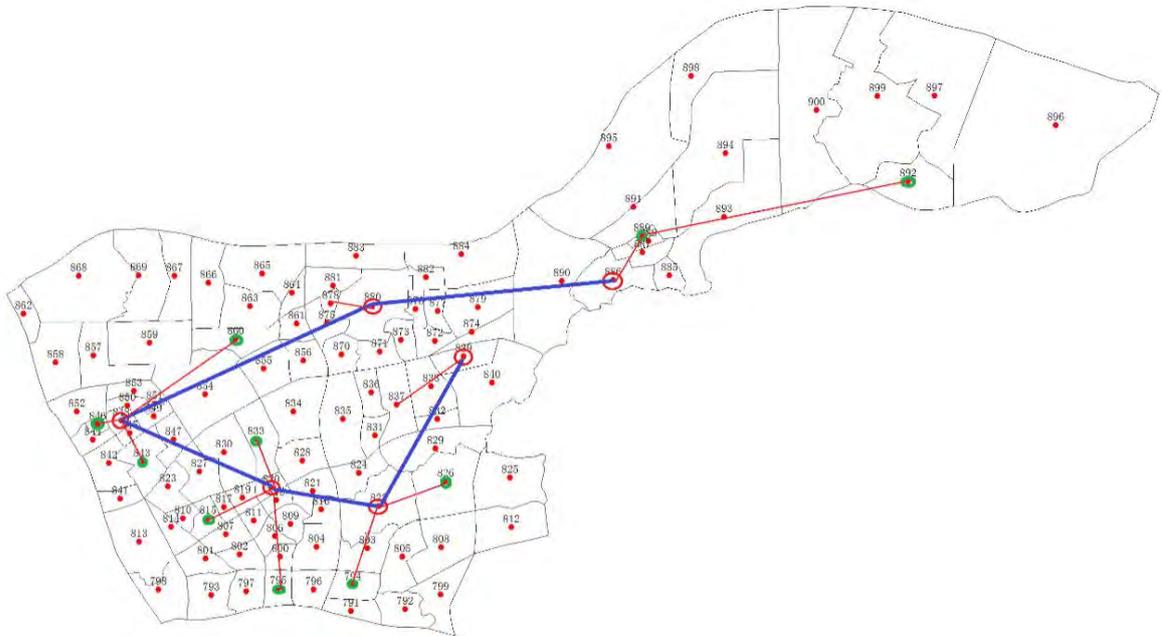


图 4.27 当前货运量下的地下物流网络

令地下物流网络为图  $G=(V, E)$ ，其网络的节点集合为  $V_i$ 。

$$W_{Ln} = \begin{cases} W_{L1} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m Y_{ijn} > Y_{\max 1}, & \text{双向双轨建设成本} \\ W_{L2} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m Y_{ijn} < Y_{\max 1}, & \text{双向四轨建设成本} \end{cases} \quad (\text{式 4.28})$$

$Y_{ijk}$ ：第  $n$  年在节点  $(i, j)$  之间的线路运输能力， $W_{Ln}$

$$X_{ijn} = \begin{cases} 1, & \text{表示第 } n \text{ 年 } (i, j) \text{ 间有路线} \\ 0, & \text{表示第 } n \text{ 年 } (i, j) \text{ 间没有路线} \end{cases} \quad (\text{式 4.29})$$

第  $n$  年建设成本:  $Z_{1n} = P_{in} * W_{in} + P_{jn} * W_{jn} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m W_{Ln} l_{ijn} X_{ijn}$ ; (式 4.30)

第  $n$  年运输成本:  $Z_{2n} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m W_{Ln} l_{ijn} X_{ijn} W_{Ln} l_{ijn} X_{ijn}$ ; (式 4.31)

我们的规划目标为:  $\min Z_n = \lambda_1 Z_{1n} + \lambda_2 Z_{2n}$  其中,

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 = 1 \\ \sum_{i=1}^m Y_{ijn} * X_{ijn} < Y_{\max} \end{cases} \text{。 (式 4.32)}$$

若  $X_{ijn} = 1$ , 则  $X_{ijn+1} = 1$  必须存在。

接下来, 我们运用蚁群算法进行迭代求解。算法实现流程如图 4.28 所示:

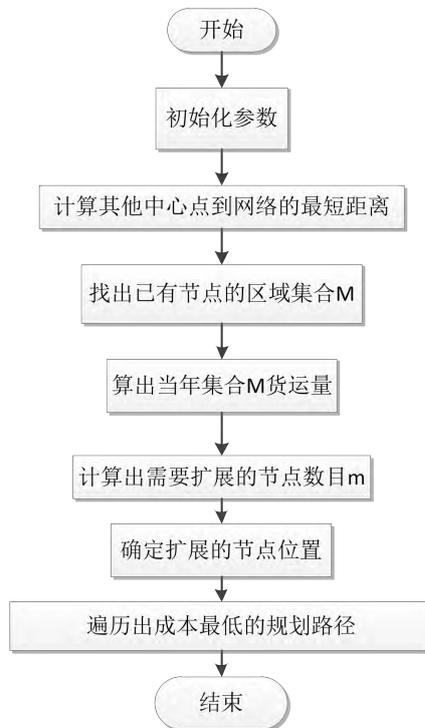


图 4.28 基于蚁群算法求解流程图

迭代求解后的地下物流网络如图 4.29 所示:

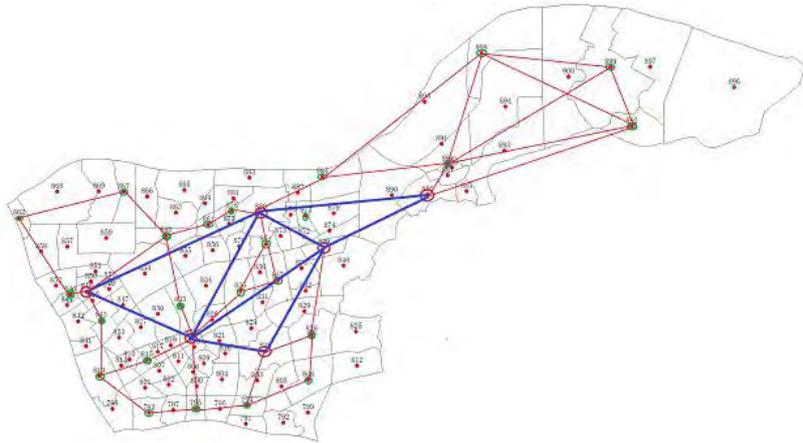


图 4.29 迭代求解后的地下物流网络

### 4.5.3 问题四综述

首先，我们计算出 30 年内货运量从 76240.97346 吨增长到 313818.1846 吨，根据第一问算出权重可以知道货运量对地下物流网络的影响比较大，所以在每年货运量 5% 增长的情况下，扩展和改进网络是必不可少的。然后我们建立了基于贪婪算法的动态规划模型，以每年的成本最低为目标，不断的在原有网络的基础上，增加节点和改进增加节点的路线。最后，利用蚁群算法不断迭代求解，得出一级节点增加了 1 个，二级节点增加了 6 个，以及可满足 30 年物流需求的地下物流网络如图 4.29 所示。

## 五、模型的优缺点

### 优点：

- 1、充分运用了点一线一面一地下物流网络系统之间的关联性；
- 2、在规划路径和改进路径的过程中，定量比较了不同类型网络布局的优缺点；
- 3、在问题四中，本文充分考虑了地下物流网络改建困难问题，保证下一年的规划仅在上一年度的基础上扩建，并不改变上一年的网络结构；
- 4、考虑到长期成本和收益。

### 缺点：

- 1、只考虑了地下物流网络中部分影响因素的权重，并未将其他相关参数进行详尽的定量分析；
- 2、在问题四中，利用蚁群算法进行迭代求解运算时间较长。

## 参考文献

- [1] 刘向东,何建敏,张岳峰.基于 APH-PCA 的应急调度系统多目标优化方法研究[J].西安电子科技大学学报.2010.3(20):46-50.
- [2] 徐国峰.城市地下物流系统构架研究[D].华中科技大学.2012.
- [3] 曾令慧.周爱莲,基于遗传算法的城市地下物流网络优化模型[J].交通科学与工程.2016.3(22):84-93.
- [4] 周婷.周爱莲,基于时间成本的地下物流配送路线优化模型[J].物流工程与管理.2016.38(8):60-62.
- [5] 张妍.随机环境下的地铁换乘问题两阶段优化模型[D].北京交通大学:2016.
- [6] MILLER-HOOKS E D, MAHMASSANI H. Path comparisons for a priori

and time-adaptive decisions in stochastic,time-varying networks[J].European Journal of Operational Research,2003,146(1):67-82.

[7] PRETOLANI D.A directed hyper graph model for random time dependent shortest paths[J].European Journal of Operational Research.2000,123(2):315-324.

## 附件：

//问题 1

```
x=xlsread('C:\Users\You can success\Desktop\11',1,'D6:D115');
y=xlsread('C:\Users\You can success\Desktop\11',1,'E6:E115');%数据提取
%节点间的距离运算
for i=1:110
    for j=1:110
        D(i,j)=sqrt((x(i)-x(j))^2+(y(i)-y(j))^2);
    end
end
%3 公里覆盖范围判别
k=1;
for i=1:110
    for j=i+1:110
        if D(i,j)<=3000
            Dp(k,1)=i+790;
            Dp(k,2)=j+790;
            Dp(k,3)=D(i,j);
            k=k+1;
        end
    end
end
%货物量遍历
for a=791:900
    shu(a-790,1)=a;
    shu(a-790,2)=0;
    for i=1:680
        if (Dp(i,1)==a)
            shu(a-790,2)=shu(a-790,2)+1;
        else if(Dp(i,2)==a)
            shu(a-790,2)=shu(a-790,2)+1;
        end
    end
end
end
%P=[1,1,9;1,1,7;1/9,1/7,1] 判别矩阵的选取
P=[1,2,6;1/2,1,3;1/6,1/3,1];
```

```

m=[];
for i=1:3
    m(i,1)=(P(i,1)*P(i,2)*P(i,3))^(1/3);
end
sum=0;
for i=1:3
    sum=sum+m(i,1);
end
k=1/sum;
for i=1:3
    w(i,1)=k.*m(i,1);% 获取权重因子
end
%一致性检验模型的实现
Pw=P*w;
sum2=0;
for i=1:3
    sum2=sum2+(Pw(i,1)/w(i,1));
end
max=1/3*sum2;
CI=(max-3)/2;
CR=CI/0.58;

//问题 2
clc;clear;
x=xlsread('C:\Users\You can success\Desktop\11',1,'D6:D115');
y=xlsread('C:\Users\You can success\Desktop\11',1,'E6:E115');%数据获取
%右区节点网络与分析
x5=x(95:110);
y5=y(95:110);
xj5=x5([2,7,8,9,14,15]);
yj5=y5([2,7,8,9,14,15]);
plot(x5,y5,'.');
hold on
plot(xj5,yj5,'ro');
plot([xj5(1) xj5(2)],[yj5(1) yj5(2)]);
plot([xj5(3),xj5(4)],[yj5(3),yj5(4)]);
plot([xj5(2),xj5(4)],[yj5(2),yj5(4)]);
plot([xj5(2),xj5(5)],[yj5(2),yj5(5)]);
plot([xj5(3),xj5(6)],[yj5(3),yj5(6)]);
%左四区节点网络与分析
x4=x([1,2,4,9,13,15,18,22,32,34:36,39,41,42,45:50]);
y4=y([1,2,4,9,13,15,18,22,32,34:36,39,41,42,45:50]);
plot(x4,y4,'.');
xj4=x4([3,7,9,12,16,18,20]);

```

```

yj4=y4([3,7,9,12,16,18,20]);
hold on
plot(xj4,yj4,'ro');
%左三区节点网络与分析
x3=x([3,5,6:8,10:12,14,16,17,19:21,23:31,33,37,38,40,43,44]);
y3=y([3,5,6:8,10:12,14,16,17,19:21,23:31,33,37,38,40,43,44]);
plot(x3,y3,'.');
xj3=x3([1,2,15,17,22,23,24,28]);
yj3=y3([1,2,15,17,22,23,24,28]);
hold on
plot(xj3,yj3,'ro');
%左二区节点网络与分析
x2=x(80:94);
y2=y(80:94);
plot(x2,y2,'.');
xj2=x2([8,9,11,15]);
yj2=y2([8,9,11,15]);
hold on
plot(xj2,yj2,'ro');
%左一区节点网络与分析
x1=x(51:79);
y1=y(51:79);
plot(x1,y1,'.');
xj1=x1([3,6,8,20:22,27]);
yj1=y1([3,6,8,20:22,27]);
hold on
plot(xj1,yj1,'ro');
%时间最优化
for k=0:18
    %时间上限为 18
    if t<(30+60*k)&&t>=(60*k)
        y=k*5.86-7.46*(t-60*k)/30;
    else
        if t>=(30+60*k)&&t<(60*k+60)
            y=k*5.86-7.46+13.32*(t-30-60*k)/30;
            %12 分钟的车辆通行能力为不多于 8 辆
            %2.11-8.9-0.67=-7.46, 22.89-8.9-0.67=13.32
        else y=y;
        end
    end
end
m=y;
end
y=0;
%经济最优化

```

```
for k=0:20
    if t<(30+60*k)&&t>=(60*k)
        y=14+k*1.53-7.15*(t-60*k)/30;
        %初始化车辆数
    elseif t>=(30+60*k)&&t<(60*k+60)
        y=14+k*1.53-7.15+8.68*(t-30-60*k)/30;
    else y=y;
    end
end
m=y;
end
```