

移动储能车调度方案优化

摘要

随着我国国民经济发展和人民生活水平的日益提升,城市用电需求不断增加,高峰时期供电短缺现象在人口密集地区时常出现.本文针对移动储能车路径优化问题,基于多元非线性规划的思想,通过确定储能车数量、行驶路径、调度时间、充电时间等指标,以派遣储能车数量最少、总收益最大为目标,建立充放电动态收益模型,并结合蚁群算法、图论以及排队论对模型进行最优求解.

针对问题一:对于题目中给出的条件和约束进行分析,建立移动储能车调度方案的关键(行驶路径、调度时间和充电时间等)在于确定车辆派遣数量、派出时间、行驶路径和充放电计划,本文建立了移动储能车的行驶路径、充放电收益等指标,将移动储能车调度方案问题转化为最优路径和最大收益相结合的多元非线性优化问题,随后基于多元非线性规划思想,建立了充放电动态收益模型.该模型充分考虑了储能车数量、类型、充放电价格波动、太阳能充电、车辆路径选择等因素的影响,结合蚁群算法、图论以及排队论对该模型进行求解,求解结果如下:

- 移动储能车调度方案:5台MV#1型车,3台MV#2型车详见表6.
- 移动储能车充放电方案:详见表8.
- 移动储能车一天收益:218.1351

针对问题二:问题二在问题一的基础上,改变了两个条件,快速充电站6、13、18、22集成了光伏发电板,光伏发电板产生的电能仅能供储能车充电,余电不上网;储能车允许经过多个充放电循环.其余条件同问题一.鉴于此,本文在问题一的模型基础上增加光伏发电板发电条件,其余不变进行建模,结合蚁群算法、图论以及排队论对该模型进行求解,求解结果如下:

- 移动储能车调度方案:5台MV#1型车,3台MV#2型车详见表10.
- 移动储能车充放电方案详见表12.
- 移动储能车一天收益:¥580.4099

针对问题三:在基础条件不变的情况下,问题三中引入了交通路况不确定性、充电站排队等候时间不确定性以及台区变负荷需求不确定性等因素,假设车辆到达充电站和充电时长分别服从泊松分布和负指数分布,台区变负荷需求服从正态分布,移动储能车实际行驶速度=车辆理想驾驶时速 $\times$ 拥堵系数.在以上前提下,本文同样以问题一中模型为基础,将各个新增的假设看做对变量的新增约束,对问题一建立的模型进行修改,用蚁群算法、图论和排队论对该模型进行求解,求解结果如下:

- 移动储能车调度方案:5台MV#2型车,3台MV#1型车详见表15.
- 移动储能车充放电方案:详见表17.
- 移动储能车一天期望收益:¥90.2619

最后,我们对提出的模型进行整体评价:本文的模型较贴合实际,能合理解决提出的问题,具有较强实用性,该模型在垃圾清运车调度等方面也能使用.

关键词:多元非线性规划 移动储能车 路径优化 蚁群算法 图论

目录

移动储能车调度方案优化	I
摘要	I
1 问题综述	1
1.1 问题背景	1
1.2 问题提出	1
1.3 资料条件	2
2 模型假设与符号说明	2
2.1 模型基本假设	2
2.2 符号说明	2
3 数据预处理	3
3.1 附件一数据处理	3
3.2 附件二数据处理	3
3.3 附件三数据处理	4
4 问题分析与模型建立	5
4.1 问题分析	5
4.1.1 问题简析	5
4.1.2 基本假设	5
4.1.3 解题思路	5
4.2 最小行驶成本模型	7
4.3 最大充放电收益模型	7
4.4 算法简介	8
4.4.1 蚁群算法简介	8
4.4.2 图论简介	9
5 问题求解	10
5.1 问题一求解	10
5.2 模型优化与问题二的求解	12
5.2.1 针对问题二对模型的优化	12
5.3 模型优化与三的求解	15
5.3.1 针对问题三对模型的优化	15
6 模型评价	19
6.1 模型的优点	19
6.2 模型的不足	20
参考文献	21
附 录	22
主要程序/关键代码	22

1 问题综述

1.1 问题背景

随着国民经济的发展和人民生活水平的提升,城镇人口增多,城区人口密度增大,随之而来的是城市用电量的增加.有关资料显示在夏、冬等用电高峰时节,时常会出现人口密集区域城市电网供电不足的情况,电网实际运行负荷超出台区变压器的额定功率.在基础电网改造的基础上,近年来,国家电网在储能应用场景上不断进行探索.其中一个重要发展方向是将储能电池同移动应急车结合,形成多功能储能车(Mobile Vehicle 简称MV),采用低谷充电、高峰放电的模式,以此来达到削峰填谷的目的.而在多功能储能车的使用及部署上,传统的人工安排方式容易造成资源浪费、收益低下等问题,因此我们需要智能地根据用户用电情况、电价波动以及城市通行等因素制定合理的储能车运行方案.

储能车运行方案的制定本文认为本质上是一种多元非线性优化问题,对于此类问题,已经有很多学者进行了研究,提出了许多解决问题的算法,诸如遗传算法、梯度下降等.结合储能车运行实际,本文选择利用蚁群算法以及图论进行模型的求解.

1.2 问题提出

移动储能车调度方案的规划问题,由不同类型车辆选派、车辆行驶路径选择、充放电收益最大化等要素组成.在满足下列 10 点约束下:

- 设置一天为一个调度周期,一个小时为一个时间间隔;
- 移动储能车每天从 1 号集合节点出发,调度完成回到 1 号节点;
- 节点 5、14、19、27 各装有一台台区变压器(简称台区变),同一个台区变同一时段仅允许接入一辆移动储能车进行放电,各台区变各时刻负荷负载率不超过 1;
- 节点 6、13、18、22 分别接入四座快速充电站,充电功率为 400KW/H 同一个充电站同一时间只允许一辆储能车进行充电,同一时段有其他车时按照先到先服务原则充电;
- 每台移动储能车在调度完成后必须为满电状态;
- 移动储能车仅能停留在快速充电站和台区变所在节点,其余节点不能停留;
- 供电企业针对用户用电需求将其分为一、二、三类客户,优先级依次降低;
- 只考虑移动储能车储能运行约束,不考虑储能设备充放电行为对电力系统的影响,忽略储能电池充放电行为对其寿命损耗造成的影响;
- 移动储能车的储油量满足一天的出行需求;
- 移动储能车有两种类型 50Kw/200KwH(mv#1)、100Kw/400KwH(mv#2),每种各 5 台,车速均为 30KM/H;
- 移动储能车发车时间为早上 7 点,回到集合点的时间不得晚于 22 点;
- 移动储能车每天只能允许充放电一次.

需要从两类移动储能车的选派,车辆路径选择,充放电收益等角度考虑,解决以下 2 个问题:

- (1) 问题 1: 每类移动储能车的派遣数量是多少时能保证在派出车辆数最少的前提下获得的总收益最大?
- (2) 问题 2: 在满足供电需求的前提下,移动储能车选择怎样的路径来进行行驶时花费最小?

1.3 资料条件

题中一共提供了 3 个附件，给出了台区变、充电站的相关工作参数以及 29 个节点之间的路径数据，各附件的详细说明如下：

- 负荷、电价数据.xlsx 该文件提供了四个台区变节点台区变负荷、台区变额定容量以及移动储能车的充放电价格数据，其中台区变负荷、额定容量以及移动储能车的充放电价格指标是模型的分析重点；
- 光伏出力数据.xlsx 该文件详细介绍了光伏发电板根据时刻的发电功率变化情况，是本题中第二个问题的新增约束条件；
- 29 个节点数据.xlsx 该文件将涉及到的城区节点之间的路径距离列出，各节点之间的路径距离在本文求解储能车行驶最短路径时用到，是本文分析关键点。

2 模型假设与符号说明

2.1 模型基本假设

- (1) 假设移动储能车在到达台区变节点时即开始放电，进入充电节点即开始充电，准备环节的时间不计；
- (2) 假设所有移动储能车不会出现影响正常工作和行驶的情况；
- (3) 假设所有节点之间的道路不会发生除拥堵以外影响移动储能车行驶的情况。

2.2 符号说明

本文定义了如下【数字】个使用次数较多的符号，其余符号在使用时注明。

表 1 符号说明

符号	含义	单位
$P_{补}$	台区变需求功率	KW
$W_{补}$	台区变需求电量	KWh
T	时间间隔	h
$P_{光(t)}$	光伏发电板在 t 时刻的发电功率	KW
$W_{光(t)}$	光伏发电板的累积发电量	KWh
$N_{(MV1)}$	MV#1 型车数量	台
$N_{(MV2)}$	MV#2 型车数量	台
$S_{(MV1)}$	MV#1 型车总行驶路径长度	Km
$S_{(MV2)}$	MV#2 型车总行驶路径长度	Km
$d_1(t)$	每个时刻的充电价格	¥
$d_2(t)$	加上光伏发电每个时刻的充电价格	¥
I	充放电收益	¥
Q	总收益	¥
C	行驶成本	¥

3 数据预处理

3.1 附件一数据处理

利用附件一中给出的各节点台区变负荷、台区变额定功率和题目中给出的理论功率因素数值 0.8, 按照下面的公式:

$$P_{补} = P_{负荷} - P_{额} * 0.8$$
$$W_{补} = P_{补} * T$$

计算得出各台区变节点在各时间段所需的补充功率 $P_{补}$ 和补充电量 $W_{补}$, 在本题中也就是需要的移动储能车放电功率和放电量. 处理后的表格如下:

表 2 各台区变 $P_{补}$ 、 $W_{补}$

时间	#1 台区变 $P_{补}(\text{KW})$	#1 台区变 $W_{补}(\text{KWh})$	#2 台区变 $P_{补}(\text{KW})$	#2 台区变 $W_{补}(\text{KWh})$	#4 台区变 $P_{补}(\text{KW})$	#4 台区变 $W_{补}(\text{KWh})$	#3 台区变 $P_{补}(\text{KW})$	#3 台区变 $W_{补}(\text{KWh})$
9	40	40	0	0	0	0	0	0
10	73	73	0	0	0	0	0	0
11	74	74	0	0	0	0	0	0
12	78	78	45	45	40	40	85	85
13	69	69	42	42	40	40	70	70
14	59	59	50	50	0	0	72	72
15	44	44	44	44	45	45	0	0
16	47.4	47.4	85	85	45	45	36	36
17	32.9	32.9	80	80	30	30	50	50
18	40	40	72	72	36	36	50	50
19	0	0	82	82	40	40	40	40

从表中可以看出, 每个台区变需要移动储能车进行补充供电的时段是固定的, 而且相互之间在时段上有重复, 这给移动储能车派遣方案的制定提供了依据.

3.2 附件二数据处理

利用附件二中给出的各节点光伏出力数据, 按照下面的公式:

$$W_{光(t)} = \sum_{t=i}^{t=j} P_{光t} * t_0$$

可以得到各光伏发电板的累积发电量 $W_{光}$ (其中 $P_{光t}$ 指的是光伏发电板在 t 时刻的发电功率, 从 $t = i$ 到 $t = j$ 对应从 8:30 到 18:00 每 15 分钟的时刻, t_0 取 0.25, 这里假设在一个时间间隔之间光伏发电板发电功率保持上一时刻的发电功率不变). 表格如下:

表 3 各光伏电站 $W_{光}$

时刻 t	光伏发电累计电量 [KWh](节点 6)	光伏发电累计电量 [KWh](节点 13)	光伏发电累计电量 [KWh](节点 18)	光伏发电累计电量 [KWh](节点 22)
8:30	0.004	0.004	0.004	0
9:00	0.8575	1.1275	0.83675	0.13475
10:00	6.75425	9.176	5.99825	5.0525
11:00	19.43675	28.1755	19.51475	17.04425
12:00	37.8605	53.33575	37.6285	34.415
13:00	61.10775	78.9915	56.797	53.6745
14:00	88.78175	101.3105	74.53	72.36825
15:00	116.885	119.778	92.91375	90.844
16:00	139.45675	133.0705	107.2455	104.68475
17:00	150.98775	140.12425	114.0645	110.85475
18:00	152.7935	141.2165	115.04475	111.7365

从该表格可以得出各光伏电站各时刻的累积发电量，给问题二中的充放电方案规划提供依据。

3.3 附件三数据处理

附件三中数据为 29 个节点之间的路径距离数据，在本文中属于路径优化部分的重要指标。采用图论最短路径算法计算出各节点之间的最短路径，如下所示：

表 4 各节点间路径长度表

节点间路径长度 (km)									
	1	6	13	18	22	5	14	19	27
1	0	5.8	12.4	13.6	9.4	3.7	13.6	11.2	11.7
6	5.8	0	6.6	15.8	10.3	2.1	7.8	13.4	12
13	12.4	6.6	0	17.5	12.9	8.7	3.6	18.9	13
18	13.6	15.8	17.5	0	6.8	13.7	13.9	2.4	4.5
22	9.4	10.3	12.9	6.8	0	8.2	9.3	6.4	2.3
5	3.7	2.1	8.7	13.7	8.2	0	9.9	11.3	9.9
14	13.6	7.8	3.6	13.9	9.3	9.9	0	15.7	9.4
19	11.2	13.4	18.9	2.4	6.4	11.3	15.7	0	6.9
27	11.7	12	13	4.5	2.3	9.9	9.4	6.9	0

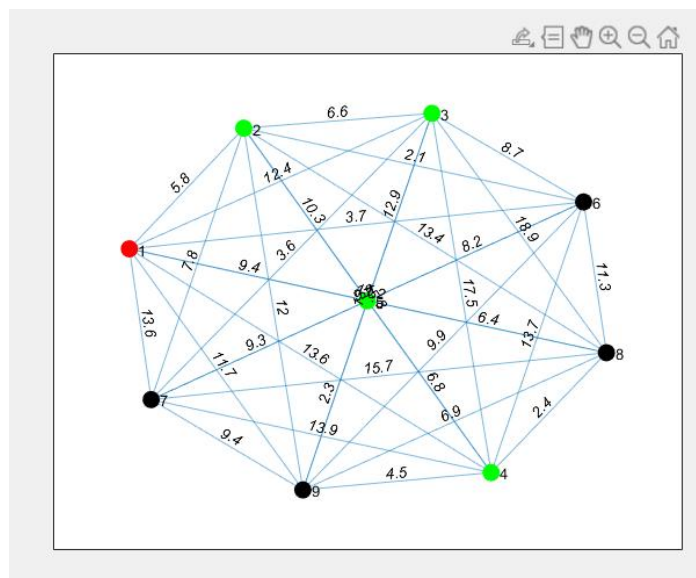


图 1 必经各节点连接示意图

4 问题分析与模型建立

4.1 问题分析

4.1.1 问题简析

题目以城市电网用电高峰削峰填谷手段为背景，介绍了移动储能车在此方面的应用前景，问题一要求我们在已知城市电网各时刻电价和用电负荷的前提下，合理规划移动储能车的调度方案以及充放电方案，确保在车辆派遣最少的前提下，最终受益最大。问题二在问题一的基础上加入了光伏发电模块来用于移动储能车充电，要求我们在此基础上对移动储能车的调度方案和充放电方案进行调整，以满足收益最大的目的。问题三是在问题一的基础上，考虑到现实生活中，城市道路交通情况会随时间变化，充放电过程也分别遵循一定规律，要求在这些条件下，对移动储能车的调度方案和充放电方案进行调整，以满足收益最大的目的。

4.1.2 基本假设

基于问题中给出的各项约束条件以及移动储能车、充电站、台区变的运行规则，由于题中并未给出移动储能车进出节点以及从准备到开始工作的时间，我们可以假设移动储能车到达相关节点的同时即开始工作。此外，题中指出只需考虑储能车储能运行约束，我们假设储能车调度及工作过程中不会发生影响正常工作和行驶的情况。最后，除了问题三中明确的道路拥堵情况会影响储能车行驶最终影响收益大小，并没有其他道路问题影响储能车的路径选择，因此，我们假设所有节点之间的道路不会发生除拥堵以外影响移动储能车行驶的情况。

4.1.3 解题思路

移动储能车调度方案的收益大小受储能车派遣类型与派遣数量、储能车充放电方案、储能车行驶成本的影响。得出总方案收益 Q 的计算公式如下：

$$\begin{cases} Q = I - C \\ I = I_{\text{放}} - \sum d_{1(t)} \\ N_{(MV1)} \leq 5 \\ N_{(MV2)} \leq 5 \end{cases}$$

储能车充放电方案受到充放电电价、车辆派遣类型与派遣数量的影响。经计算可以得出一天内台区变用电需求，结合一天内 MV 放电价变化规律，得出一天内移动储能车放电总收益 $I_{\text{放}}$ 。 $\sum d_{1(t)}$ 为一天内移动储能车充电总支出， $d_{1(t)}$ 是每个时刻的充电价格，随时间 t 变化(详见附件 1)，由于用电需求总量固定，所以充电总支出仅受到各时段的充电量影响，而各时段的充电量与移动储能车的派遣方案相关。储能车的派车方案与台区变负荷需求相关，在需求功率超过 50KW 时，需派遣 MV#2 型储能车，在需求功率小于 50KW 时，可选派 MV#1 型或 MV#2 型储能车。调度收益的第三个影响因素是储能车行驶成本，储能车行驶成本受路径选择和派车方案影响。

综上可得，调度方案总收益受到行驶成本和充放电收益影响，据此，对应这两个问题分别构建最小行驶成本模型和最大充放电收益模型，最后分别按照三个要求条件对模型进行求解得出最优的移动车储能方案(包括储能车派遣方案、储能车行驶路径和储能车充放电规划)。具体流程如下图所示：

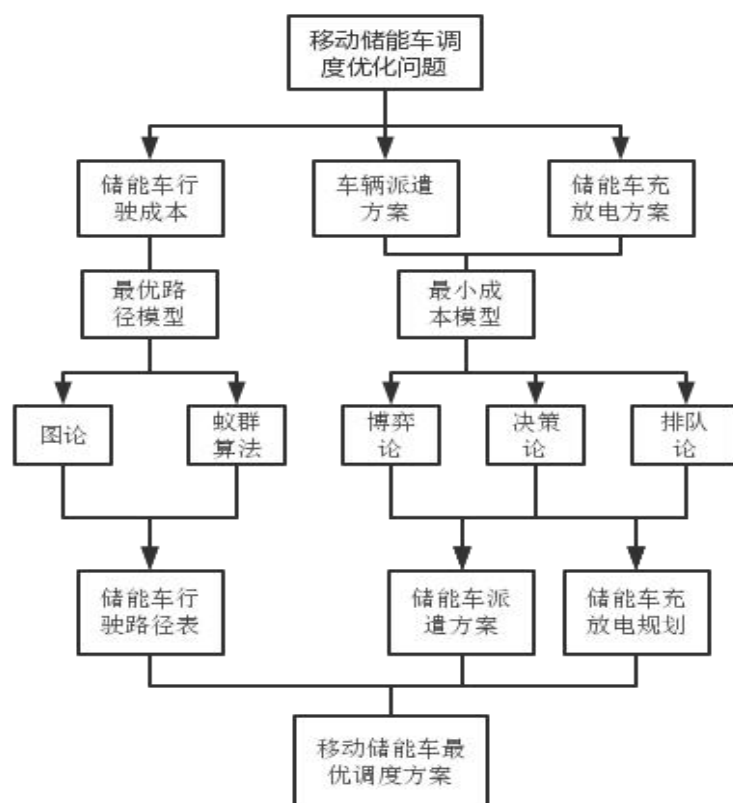


图 2 解题思路图

4.2 最小行驶成本模型

由题目中所给的交通网示意图和附件 3 可以利用 MATLAB 软件将交通网示意图画出, 见图 2, 图中 P 代表节点, 红色节点为储能车集合节点, 绿色节点为充电站节点, 黑色节点为台区变节点, 蓝色节点为其他节点. 节点之间连线上所标识的数字为节点之间距离(单位 km).

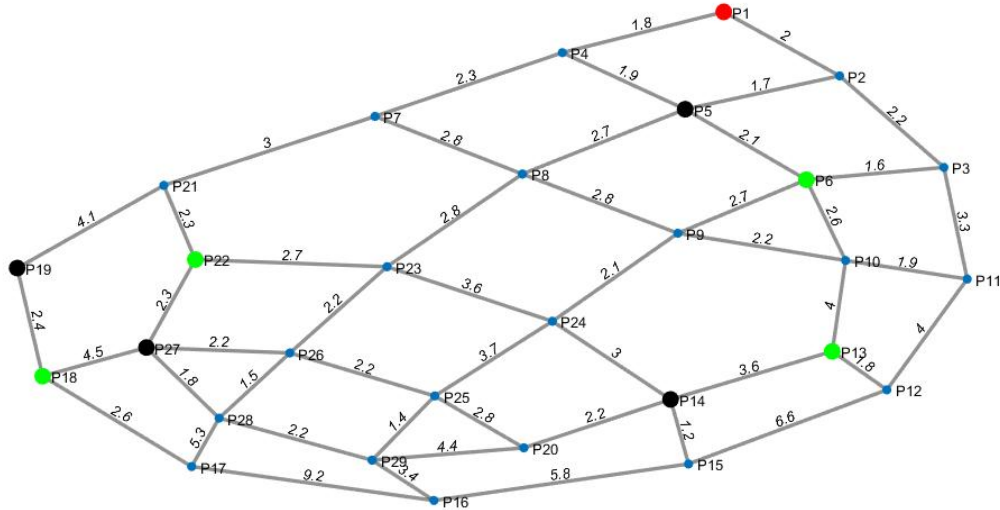


图 3 交通网示意图

由于储能车类型不同, 单位路径行驶成本不同, 两类储能车对比如下:

表 5 两型移动储能车行驶成本对比

车型	行驶成本(元/km)
MV#1	1
MV#2	2

所以储能车行驶成本与每型储能车数量以及行驶路径有关, 依据这两个指标, 通过

$$C = N_{(MV1)} * S_{(MV1)} + 2N_{(MV2)} * S_{(MV2)}$$

公式来构建最小行驶成本模型. 求解时以 C 最小为目标, 利用蚁群算法和图论求得每型储能车数量和其行驶的路径.

4.3 最大充放电收益模型

每日充放电收益 I 等于每日储能车放电收益 $I_{\text{放}}$ 与每日储能车充电支出 $I_{\text{充}}$ 的差值, 计算公式如下:

$$\begin{cases} I = I_{\text{放}} - I_{\text{充}} \\ I_{\text{充}} = \sum d_{1(t)} \end{cases}$$

依据该公式构建充放电收益模型. 其中, 每日储能车放电收益 $I_{\text{放}}$ 可由附件 1 求出, 具体如下:

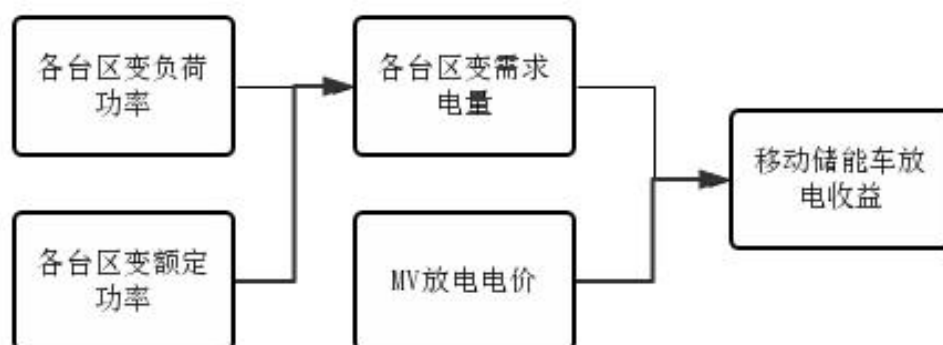


图 4 放电收益计算

其中, MV 放电电价见附件 1, 各台区变需求电量见下表:

表 6 各台区变需求电量表

时刻	#1 台区变(KWh)	#2 台区变(KWh)	#4 台区变(KWh)	#3 台区变(KWh)
9	40	0	0	0
10	73	0	0	0
11	74	0	0	0
12	78	45	40	85
13	69	42	40	70
14	59	50	0	72
15	44	44	45	0
16	47.4	85	45	36
17	32.9	80	30	50
18	40	72	36	50
19	0	82	40	40

最终求得的放电收益为¥1750.2221. $\sum d_{1(t)}$ 为储能车总的充电花费, $d_{1(t)}$ 是每个时刻的充电价格, 随时间 t 变化, 详见附件 1. 求解时, 根据具体问题的条件不同来计算最大充电收益.

4.4 算法简介

4.4.1 蚁群算法简介

蚁群系统(Ant System 或 Ant Colony System)是由意大利学者 Dorigo、Maniezzo 等人于 20 世纪 90 年代首先提出来的. 他们在研究蚂蚁觅食的过程中, 发现单个蚂蚁的行为比较简单, 但是蚁群整体却可以体现一些智能的行为. 例如蚁群可以在不同的环境下, 寻找最短到达食物源的路径. 这是因为蚁群内的蚂蚁可以通过某种信息机制实现信息的传递. 后又经进一步研究发现, 蚂蚁会在其经过的路径上释放一种可以称之为 "信息素" 的物质, 蚁群内的蚂蚁对 "信息素" 具有感知能力, 它们会沿着 "信息素" 浓度较高

路径行走，而每只路过的蚂蚁都会在路上留下 "信息素"，这就形成一种类似正反馈的机制，这样经过一段时间后，整个蚁群就会沿着最短路径到达食物源了。

将蚁群算法应用于解决优化问题的基本思路为：用蚂蚁的行走路径表示待优化问题的可行解，整个蚂蚁群体的所有路径构成待优化问题的解空间。路径较短的蚂蚁释放的信息素量较多，随着时间的推进，较短的路径上累积的信息素浓度逐渐增高，选择该路径的蚂蚁个数也愈来愈多。最终，整个蚂蚁会在正反馈的作用下集中到最佳的路径上，此时对应的便是待优化问题的最优解。

蚂蚁找到最短路径要归功于信息素和环境，假设有两条路可从蚁窝通向食物，开始时两条路上的蚂蚁数量差不多：当蚂蚁到达终点之后会立即返回，距离短的路上的蚂蚁往返一次时间短，重复频率快，在单位时间里往返蚂蚁的数目就多，留下的信息素也多，会吸引更多蚂蚁过来，会留下更多信息素。而距离长的路正相反，因此越来越多的蚂蚁聚集到最短路径上来。

蚂蚁具有的智能行为得益于其简单行为规则，该规则让其具有多样性和正反馈。在觅食时，多样性使蚂蚁不会走进死胡同而无限循环，是一种创新能力；正反馈使优良信息保存下来，是一种学习强化能力。两者的巧妙结合使智能行为涌现，如果多样性过剩，系统过于活跃，会导致过多的随机运动，陷入混沌状态；如果多样性不够，正反馈过强，会导致僵化，当环境变化时蚁群不能相应调整。

与其他优化算法相比，蚁群算法具有以下几个特点：

- (1)采用正反馈机制，使得搜索过程不断收敛，最终逼近最优解；
- (2)每个个体可以通过释放信息素来改变周围的环境，且每个个体能够感知周围环境的实时变化，个体间通过环境进行间接地通讯；
- (3)搜索过程采用分布式计算方式，多个个体同时进行并行计算，大大提高了算法的计算能力和运行效率；
- (4)启发式的概率搜索方式不容易陷入局部最优，易于寻找到全局最优解。

本文主要利用蚁群算法对移动储能车的充电、放电、返程等的最短路径进行求解，为下一步多条件约束的路径优化打下基础。

4.4.2 图论简介

本题与移动储能车的行驶路线密切相关，图论可以很好建立路线模型，且十分便于之后最优路线的规划计算与求解，大大简化基础数据的处理效率。

图的定义：图(Graph)是由顶点的有穷非空集合和顶点之间边的集合组成，通常表示为： $G(V,E)$ ，其中， G 表示一个图， V 是图 G 中顶点的集合， E 是图 G 中边的集合。

在图中需要注意的是：

- (1)线性表中我们把数据元素叫元素，树中将数据元素叫结点，在图中数据元素，我们则称之为顶点(Vertex)；
- (2)线性表可以没有元素，称为空表；树中可以没有节点，称为空树；但是，在图中不允许没有顶点(有穷非空性)；
- (3)线性表中的各元素是线性关系，树中的各元素是层次关系，而图中各顶点的关系是用边来表示(边集可以为空)。

图(graph)并不是指图形图像(image)或地图(map)。通常来说，我们会把图视为一种由 "顶点" 组成的抽象网络，网络中的各顶点可以通过 "边" 实现彼此的连接，表示两

顶点有关联. 注意上面图定义中的两个关键字, 由此得到我们最基础最基本的 2 个概念, 顶点(vertex)和边(edge).

本题建模时, 顶点表示各条路的交汇点(包括充电站节点), 边表示路线, 从而可以很好的将题目条件所给出的路线图转化可直接计算的数学模型.

5 问题求解

5.1 问题一求解

根据以上模型的构建和结果计算方法, 通过计算机代码编写程序进行运算得到如下结果:

表 7 储能车派遣方案(问题一)

台区变节点	MV#1 数量	MV#2 数量
5	1	1
14	1	1
19	2	0
27	1	1

表 8 储能车行驶路径表(问题一)

车号	路线	路径长度
1 号 MV#2	P1→P2→P5→P6→P3→P2→P1	11.6
1 号 MV#1	P1→P2→P5→P6→P3→P2→P1	11.6
2 号 MV#1	P1→P2→P3→P6→P9→P24→P14→P24→P9→P6→P5→P2→P1	27.2
2 号 MV#2	P1→P2→P3→P6→P9→P24→P14→P24→P9→P6→P5→P2→P1	27.2
3 号 MV#2	P1→P4→P7→P21→P22→P27→P22→P21→P7→P4→P1	23.4
3 号 MV#1	P1→P4→P7→P21→P22→P27→P22→P21→P7→P4→P1	23.4
4 号 MV#1	P1→P4→P7→P21→P19→P18→P19→P21→P7→P4→P1	27.2
5 号 MV#1	P1→P4→P7→P21→P19→P18→P19→P21→P7→P4→P1	27.2

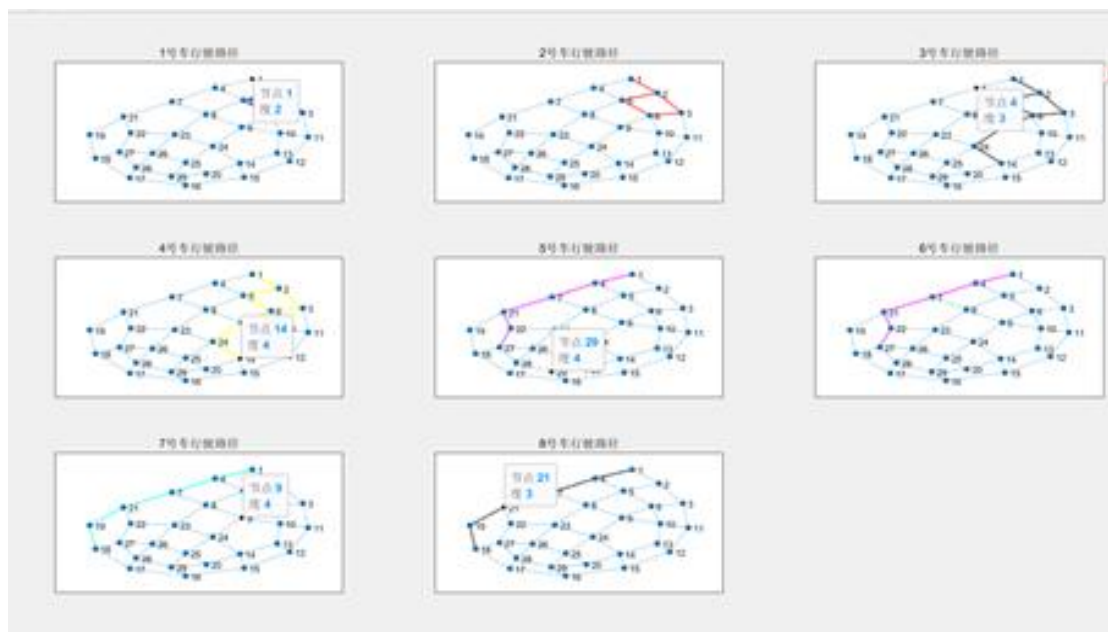


图 5 储能车行驶路径示意图（问题一）

表 9 储能车充放电规划(问题一)

台区变节点	充放电规划
#1 台区变负荷(节点 5)	1 号 MV#2: 9 时到达节点 5 放电 393KWh; 15 时到达节点 6 充电; 16 时返回节点 1.
	1 号 MV#1: 15 时到达节点 5 放电 164.3KWh; 19 时到达节点 6 充电; 20 时返回节点 1.
	2 号 MV#1: 12 时到达节点 14 放电 181KWh; 16 时到达节点 6 充电; 17 时返回节点 1.
#2 台区变负荷(节点 14)	2 号 MV#2: 16 时到达节点 14 放电 319KWh; 20 时到达节点 6 充电; 21 时返回节点 1.
	3 号 MV#2: 12 时到达节点 27 放电 227KWh; 15 时到达节点 22 充电; 16 时返回节点 1.
#3 台区变负荷(节点 27)	3 号 MV#1: 16 时到节点 27 放电 176KWh; 20 时到达节点 22 充电; 21 时返回节点 1.
	4 号 MV#1: 12 时到达节点 19 放电 80KWh; 14 时到达节点 22 充电; 15 时返回节点 1.
#4 台区变负荷(节点 19)	5 号 MV#1: 15 时到达节点 19 放电 196KWh; 20 时到达节点 22 充电; 21 时返回节点 1.

经模型求解，最大收益为：¥218.1351 总路程为：177.6km.

5.2 模型优化与问题二的求解

5.2.1 针对问题二对模型的优化

在问题二中，移动储能车运行情况、台区变节点供电需求没有变化，充电站节点增加了光伏发电设施，利用光伏发电存储电能供移动储能车充电使用，各充电站光伏发电的功率见附件 2，易知光伏发电的充电成本低于市网充电. 经分析，本文认为利用光伏发电来对移动储能车进行充电并不影响节点之间的最短路径选择，会对充放电方案以及车辆派遣方案产生影响. 因此，在模型 I 的基础上，本文对充放电方案规划进行改动，增加随时间变化的变量，光伏发电量 $W_{光}$ ，详见表 3. 新的充放电收益公式为：

$$I = 1750.2221 - \sum d_{2(t)}$$

其中 $d_{2(t)}$ 为加入光伏发电之后的充电价格，随时间变化情况为：

$$d_{2(t)} = (d_{1(t)} * 400 - 0.2 * W_{光(t)}) / 400$$

需要注意的一点是，根据移动储能车充电的时段不同，电价表会有所改变，例如，一辆储能车在 13 时到节点 6 进行充电，之后的电价因为光伏发电积累的电量消耗完将会重新按照 $d_{2(t)}$ 的计算公式进行改变. 将光伏发电产生电量折合到对应时刻电价得到新的电价表如下：

表 10 各充电站节点新电价表

时间 (t)	节点 6MV 充电电 价 (¥/kWh)	节点 13MV 充电电 价 (¥/kWh)	节点 18MV 充电电 价 (¥/kWh)	节点 22MV 充电电 价 (¥/kWh)
1	0.365	0.365	0.365	0.365
2	0.365	0.365	0.365	0.365
3	0.365	0.365	0.365	0.365
4	0.365	0.365	0.365	0.365
5	0.365	0.365	0.365	0.365
6	0.365	0.365	0.365	0.365
7	0.365	0.365	0.365	0.365
8	0.687	0.687	0.687	0.687
9	0.935	0.934	0.935	0.935
10	0.932	0.930	0.932	0.932
11	0.925	0.921	0.925	0.926
12	0.916	0.908	0.916	0.918
13	0.656	0.648	0.659	0.660
14	0.643	0.636	0.650	0.651
15	0.629	0.627	0.641	0.642

16	0.617	0.620	0.633	0.635
17	0.860	0.865	0.878	0.880
18	0.859	0.864	0.877	0.879
19	0.8	0.8	0.8	0.8
20	0.8	0.8	0.8	0.8
21	0.8	0.8	0.8	0.8
22	0.687	0.687	0.687	0.687
23	0.365	0.365	0.365	0.365
24	0.365	0.365	0.365	0.365

根据以上模型的构建和结果计算方法, 通过计算机代码编写程序进行运算得到如下结果:

表 11 储能车派遣方案(问题二)

台区变节点	MV#1 数量	MV#2 数量
5	1	1
14	1	0
19	2	0
27	0	1

表 12 储能车行驶路径表(问题二)

车号	路线	路径长度
1 号 MV#2	P1→P2→P5→P6→P9→P24→P14→P24→P9→P6→P3→P2→P1	27.2
1 号 MV#1	P1→P2→P5→P6→P3→P2→P1	11.6
2 号 MV#1	P1→P2→P3→P6→P9→P24→P14→P24→P9→P6→P5→P2→P1	27.2
2 号 MV#2	P1→P4→P7→P21→P22→P27→P22→P21→P7→P4→P1	23.4
3 号 MV#1	P1→P4→P7→P21→P19→P18→P27→P22→P21→P7→P4→P1	29.8
4 号 MV#1	P1→P4→P7→P21→P19→P18→P19→P21→P7→P4→P1	27.2

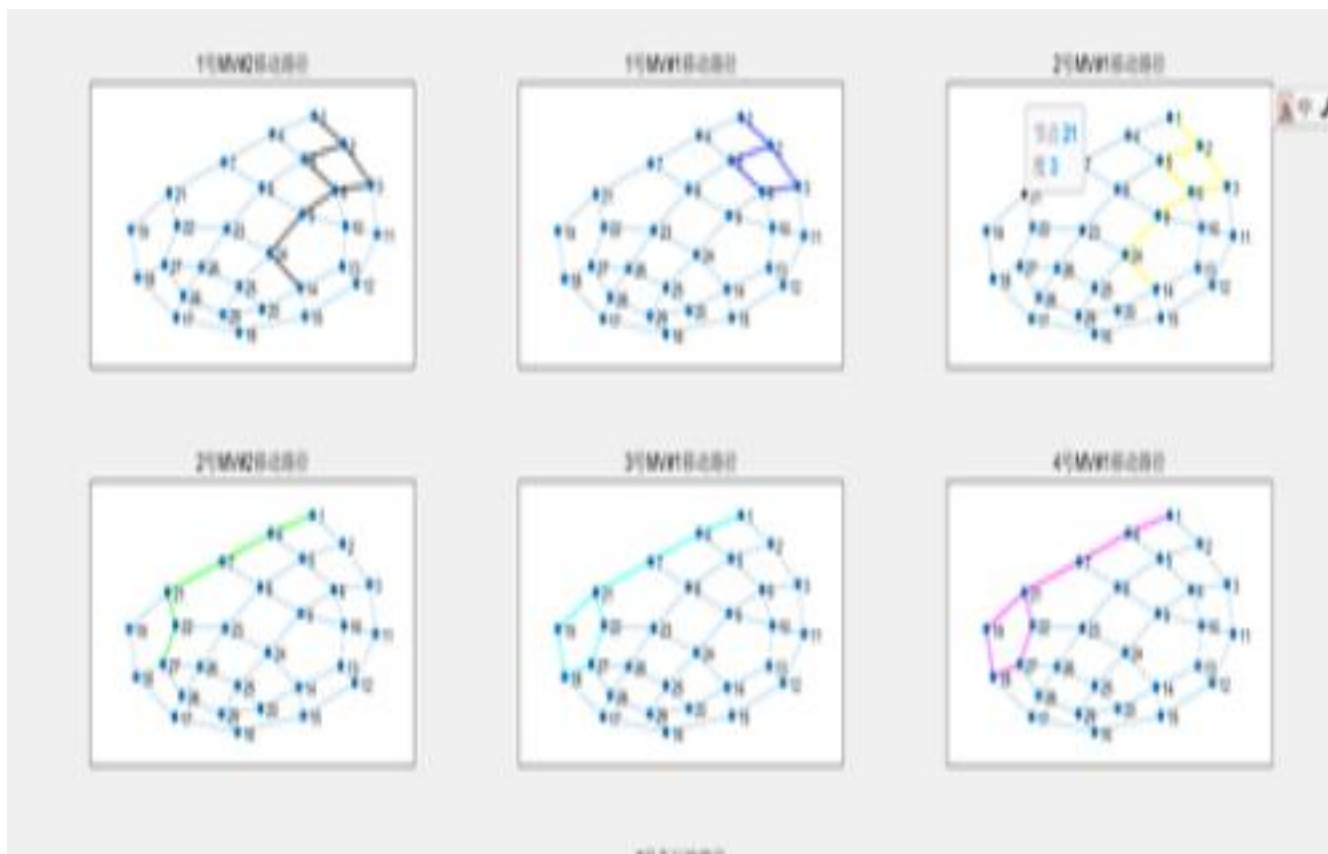


图 6 储能车行驶路径示意图（问题二）

表 13 储能车充放电规划(问题二)

台区变节点	充放电规划
#1 台区变负荷(节点 5)	1 号 MV#2: 9 时到达节点 5 放电 393KWh; 15 时到达节点 6 充电.
	1 号 MV#1: 15 时到达节点 5 放电 164.3KWh; 19 时到达节点 6 充电; 20 时返回节点 1.
	2 号 MV#1: 12 时到达节点 14 放电 181KWh; 16 时到达节点 6 充电; 17 时返回节点 1.
#2 台区变负荷(节点 14)	1 号 MV#2: 16 时到达节点 14 放电 319KWh; 20 时到达节点 6 充电; 21 时返回节点 1.
	2 号 MV#2: 12 时到达节点 27 放电 227KWh; 15 时到达节点 22 充电; 16 时返回节点 1.
	3 号 MV#1: 16 时到节点 27 放电 176KWh; 20 时到达节点 22 充电; 21 时返回节点 1.
#3 台区变负荷(节点 27)	3 号 MV#1: 12 时到达节点 19 放电 80KWh; 14 时到达节点 18 充电.
	4 号 MV#1: 15 时到达节点 19 放电 196KWh; 20 时到达节点 18 充电; 21 时返回节点 1.

经计算得, 最大收益为¥580.4099, 总路程为 146.4km

5.3 模型优化与三的求解

5.3.1 针对问题三对模型的优化

问题三在问题一的基础上加入了交通路况不确定特性、充电站排队等候时间不确定特性以及台区变负荷需求不确定等因素. 已知车辆到达充电站和充电时长分别服从泊松分布和负指数分布, 台区变负荷需求服从正态分布, 同时交通路况也存在拥堵情况(移动储能车实际行驶速度=车辆理想驾驶时速*拥堵系数).

经分析, 本文认为车辆到达充电站和充电时长分别服从泊松分布和负指数分布这两个相结合, 可以按照排队论的方法进行处理, 由移动储能车和充电站组成的充电模型符合 M/M/c/N/inf 排队系统. 据此, 可将将每辆移动储能车的平均充电等候时长(W_q)计算出来, 具体公式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0 = \left[\sum_{k=0}^c \frac{1}{k!} (c\rho)^k + \frac{c^c}{c!} \frac{\rho}{1-\rho} (\rho^c - \rho^N) \right]^{-1} \\ P_n = \begin{cases} \frac{1}{n!} (c\rho)^n P_0, & 0 \leq n \leq c \\ \frac{c^c}{c!} \rho^n P_0, & c \leq n \leq N \end{cases} \\ L_s = L_q + c\rho(1 - P_n) \\ L_q = \frac{(c\rho)^c \rho}{c! (1-\rho)^2} P_0 [1 - \rho^{N-c} - (N-c)\rho^{N-c}(1-\rho)] \\ W_s = W_q + \frac{1}{\mu} \\ W_q = \frac{L_q}{\lambda(1 - P_n)} \end{array} \right.$$

其中, λ 代表单位时间内到达的移动储能车台数, μ 代表单位时间内接受充电的移动储能车台数 $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ 反映充电站繁忙程度, N 代表调度方案中出动的移动储能车总数, c 代表充电站数目.

表 14 各储能车排队分布

无排队	排队 1 辆	排队 2 辆	排队 3 辆	排队 4 辆	排队 5 辆	排队 6 辆	排队 7 辆	排队 8 辆
0.778807801	0.194699838	0.02433748	0.002028	0.000127	0	0	0	0

经计算, 平均充电等候时长为 0.15h.

此外, 台区变负荷需求服从正态分布. 正态分布又称高斯分布, 属于一种常见的连续概率分布, 当数学表现形式为: $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 时, 其概率面密度为:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

式中，期望值 μ 为位置参数，决定了分布的位置，标准差 σ 为尺度参数，决定了分布的幅度。根据问题一中各台区变供电需求，可以得出负荷符合正态分布时的各台区变供电需求如下图：

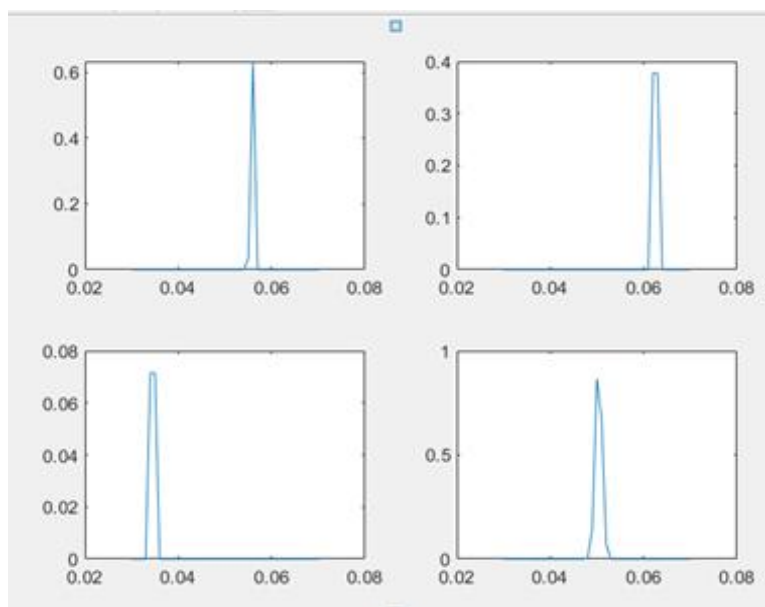


图 7 各台区变供电需求

在实际应用中，一组数据符合正态分布，则由“经验法则”可知，约 99.7% 的数值分布在距离平均值 3 个标准差之内的范围。根据这个准则，我们对各台区变的供电需求进行重新计算得到供电需求均值，从而对移动储能车的派遣方案进行优化，各台区变节点供电需求表如下：

表 15 各台区变节点供电需求

台区变节点	供电需求 (KW)
5	54.9—56.6
14	61.4—63.6
19	33.8—35.2
27	48.3—52.5

问题三引入交通拥堵规则，保障完成最晚时间为 19 时，为保证储能车在 22 时之前回到集合点，必须将回程最短时间考虑在内，因此，将集合节点、各充电站节点与各台区变节点之间的最短距离求出，具体如下：

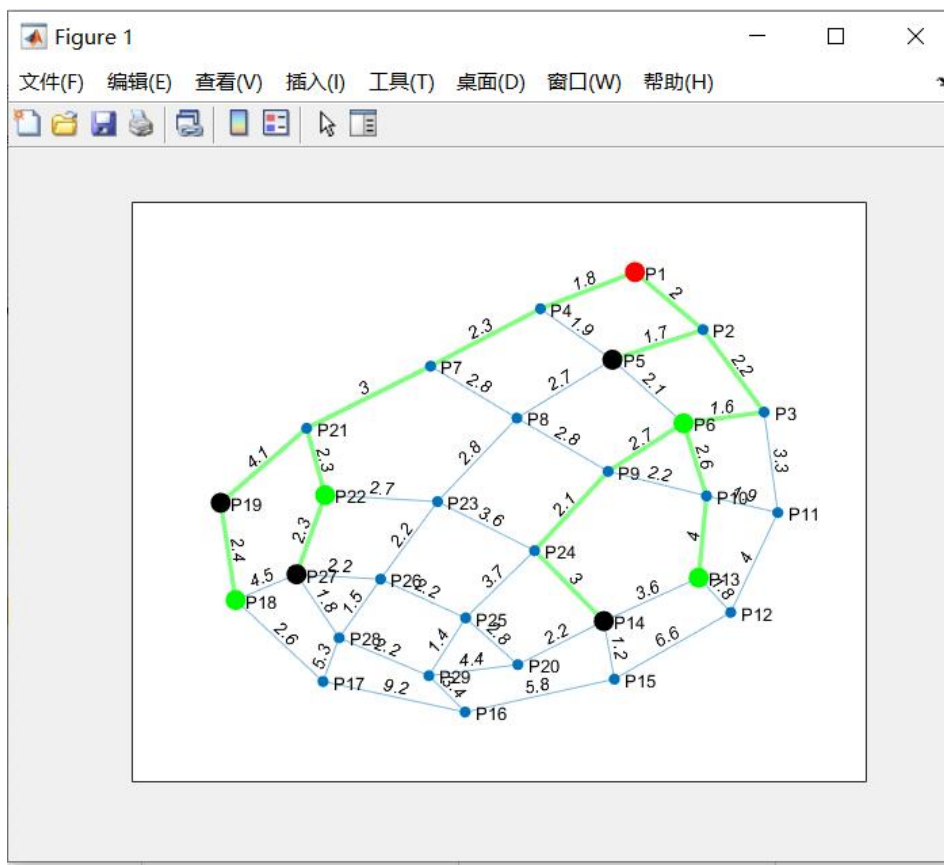


图 8 各节点最短路径图

根据以上模型的构建和结果计算方法，通过计算机代码编写程序进行运算得到如下结果：

表 16 储能车派遣方案(问题三)

台区变节点	MV#1 数量	MV#2 数量
5	0	2
14	0	2
19	2	0
27	1	1

表 17 储能车行驶路径表(问题三)

车号	路线	路径长度 (km)
1 号 MV#2	P1→P2→P5→P6→P3→P2→P1	11.6
2 号 MV#2	P1→P2→P5→P6→P3→P2→P1	11.6
3 号 MV#2	P1→P2→P3→P6→P9→P24→P14→P24→P9→P6→P5→P2→ P1	27.2
4 号 MV#2	P1→P2→P3→P6→P9→P24→P14→P13→P10→P6→P5→P2 →P1	29.7
5 号 MV#2	P1→P4→P7→P21→P22→P27→P22→P21→P7→P4→P1	23.4
1 号 MV#1	P1→P4→P7→P21→P22→P27→P22→P21→P7→P4→P1	23.4
2 号 MV#1	P1→P4→P7→P21→P19→P21→P22→P21→P7→P4→P1	27
3 号 MV#1	P1→P4→P7→P21→P19→P18→P19→P21→P7→P4→P1	27.2

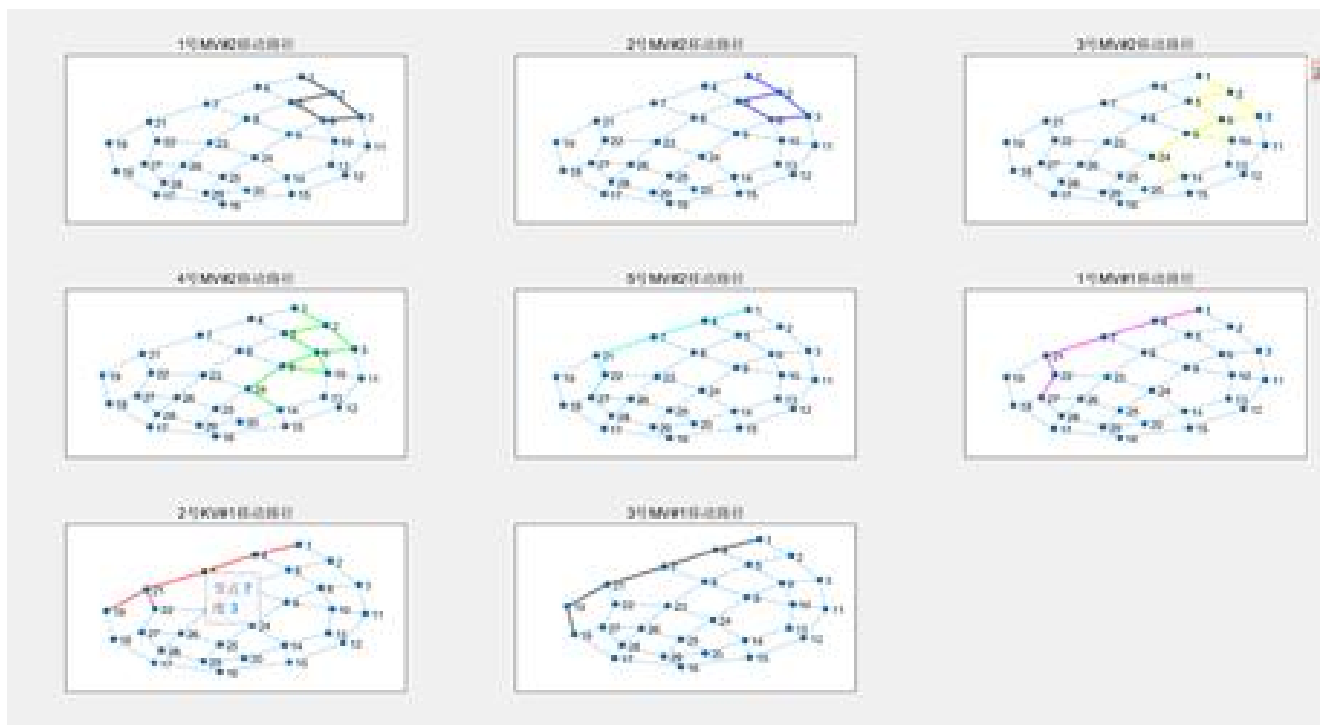


图 9 储能车行驶路径示意图 (问题三)

表 18 储能车充放电规划(问题三)

台区变节点	充放电规划
#1 台区变负荷(节点 5)	1 号 MV#2: 9 时到达节点 5 放电 400KWh; 15 时到达节点 6 充电; 充满电返回节点 1.
	2 号 MV#2: 15 时到达节点 5 放电 157.3KWh; 19 时到达节点 6 充电; 充满电返回节点 1.
	3 号 MV#2: 12 时到达节点 14 放电 200KWh; 16 时到达节点 6 充电; 充满电返回节点 1.
#2 台区变负荷(节点 14)	4 号 MV#2: 16 时到达节点 14 放电 300KWh; 20 时到达节点 13 充电; 充满电返回节点 1.
	5 号 MV#2: 12 时到达节点 27 放电 201.5KWh; 15 时到达节点 22 充电; 充满电返回节点 1.
#3 台区变负荷(节点 27)	1 号 MV#1: 16 时到节点 27 放电 201.5KWh; 20 时到达节点 22 充电; 充满电返回节点 1.
	2 号 MV#1: 12 时到达节点 19 放电 138KWh; 15 时到达节点 22 充电; 充满电返回节点 1.
#4 台区变负荷(节点 19)	3 号 MV#1: 15 时到达节点 19 放电 138KWh; 20 时到达节点 18 充电; 充满电返回节点 1.

经计算, 最大收益为¥188.5956, 可完成概率为 0.4786, 期望收益为¥90.2619, 总路程为: 181.1km.

6 模型评价

6.1 模型的优点

- (1) 模型充分结合实际, 简化了移动储能车到达充电站以及台区变节点充放电准备环节、除储能车储能约束以外的行驶约束条件以及储能车速度约束条件. 充分考虑各台区变供电需求随时间变化的规律、储能车行驶路径以及派车方案等指标. 这样得到的模型贴合实际, 具有较高的应用价值, 可以推广到城市垃圾清运车调度方案等生活实际问题;
- (2) 模型在简化约束条件、合理假设的基础上, 依据蚁群算法、图论以及排队论等的思想, 将原本复杂的多元非线性优化问题分解成最短路径、充放电方案优化、车辆派遣等问题, 然后针对分解后的问题进行依次求解, 最终将求得的最短路径以及车辆派遣方案结合求出最终解.

- (3) 通过模型建立,快速将题目各类条件转换为数学语言.模型在合理假设的基础上,抓住了影响储能车最大收益的实质因素,忽略了一些次要因素,不但简化了模型,使计算更方便,而且使模型更切合实际情况,更有借鉴意义.
- (4) 本文所建立的模型具有推广性和可复制性,结合目前社会实际,针对不同路线图,均可以用此模型进行优化设计,以满足日常生活的实际需要,提高供电效率,缓解供电压力.
- (5) 模型充分考虑大量的不确定性因素,如充电排队等待问题(运用排队论建模求解),符合客观实际,保证了在多条件约束下的移动储能车调度方案最优.

6.2 模型的不足

- (6) 模型并未按照多元非线性规划的一般思路,将最终收益与车辆数量、充放电次数以及行驶路径等原始指标的关系求出,而是将问题分解,按步求解,从限制条件限定车辆派遣方案开始,根据求得的车辆方案求出充放电方案,再结合求出的节点之间的最短路径来计算最终收益.模型存在局限性,遇到同类问题但限制条件不同的情况下,模型就必须进行较大改动;
- (7) 模型在建立求解过程中,对部分约束条件进行了主观处理,不够严谨,还需进一步优化设计,减少因主观人为因素造成计算偏差.
- (8) 在问题三中,在拥堵系数加入之后,方案的可行性大大降低,没有很好的解决道路拥堵的方案,下一步还要对道路拥堵情况进行更深入的研究,提高方案的可行性.

参考文献

- [1]陈迎欣.基于改进蚁群算法的车辆路径优化问题研究[J].计算机应用研究,2012,29(06):2031-2034.
- [2]温文波,杜维.蚁群算法概述[J].石油化工自动化,2002(01):19-22.
- [3]熊超文. 蚁群算法的改进及其在路径规划中的应用研究[D].重庆邮电大学,2020.DOI:10.27675/d.cnki.gcydx.2020.000436.
- [4]窦明,石亚欣,于璐,李桂秋,贾瑞鹏.基于图论的城市河网水系连通方案优选——以清潩河许昌段为例[J].水利学报,2020,51(06):664-674.DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20190848.
- [5]胡福年,张认,卞小亮.基于图论的主动配电网故障定位方法[J].控制工程,2021,28(05):833-838.DOI:10.14107/j.cnki.kzgc.20190127.
- [6]刁涵彬,李培强,吕小秀,刘小龙,李欣然.考虑多元储能差异性的区域综合能源系统储能协同优化配置[J].电工技术学报,2021,36(01):151-165.DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.200386.
- [7]李宝磊,施心陵,苟常兴,吕丹桔,安镇宙,张榆锋.多元优化算法及其收敛性分析[J].自动化学报,2015,41(05):949-959.DOI:10.16383/j.aas.2015.c140585.
- [8]蔡博戎,凌开元,姜华,周洁,魏歆.配电网移动储能优化配置研究[J].电工电能新技术,2019,38(09):26-32.
- [9]邵宇峰. 主动配电网移动储能优化配置与调度策略研究[D].华北电力大学(北京),2021.DOI:10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.000632.
- [10]张璐,黄睿,王照琪,唐巍,陈颖.考虑恢复力与经济性均衡的配电网移动储能优化配置策略[J].电力系统自动化,2020,44(21):23-31.

附 录

主要程序/关键代码

代	操作系统: Windows (Version 10)
码	编程语言: MATLAB 语言
环	编辑器: MATLAB-2020B
境	代码详见: 代码清单

代码清单 1 路径处理及优化模块

```
clc
clear
data=xlsread('附件 3: 29 个节点数据.xlsx');
data(find(isnan(data)==1)) = 0;
G_data=data(2:end,2:end);
G = graph(G_data);
edge_num=G.Edges;
Node_num=G.Nodes;
x=0:0.5:10;
y=0:0.5:10;
z=0:0.5:10;
label={'P1' 'P2' 'P3' 'P4' 'P5' 'P6' 'P7' 'P8' 'P9' 'P10'...
       'P11' 'P12' 'P13' 'P14' 'P15' 'P16' 'P17' 'P18' 'P19' 'P20'...
       'P21' 'P22' 'P23' 'P24' 'P25' 'P26' 'P27' 'P28' 'P29'};
sources = [1];
charge_point=[6 13 18 22];
charge_point_label=label([charge_point]);
load_point=[5 14 19 27];
load_point_label=label([load_point]);
targets = [1 6 13 18 22 5 14 19 27];
figure(1)
idx=[sources charge_point load_point];
conection_graph=subgraph(G,idx);
h=plot(G,'EdgeLabel',G.Edges.Weight);
a=1:29;
```



```

labelnode(h,[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29],label)
labelnode(h,[a],label);
highlight(h,1,'NodeColor','r','MarkerSize',8)
highlight(h,charge_point,'NodeColor','g','MarkerSize',8)
highlight(h,load_point,'NodeColor','k','MarkerSize',8)
for i=1:9
    [P,d(i)] = shortestpath(G,1,targets(i));
    highlight(h,P,'EdgeColor','g','LineWidth',2)
end
conection_graph=subgraph(G,idx);
figure(2)
for i=1:9
    S(i)=[idx(i)];
    target=[idx];
    target(i)=[];
    [TR,D(i,:)] = shortestpathtree(G,S(i),idx);
    subplot(3,3,i);
    htr=plot(TR);
    highlight(htr,1,'NodeColor','r','MarkerSize',8)
    highlight(htr,charge_point,'NodeColor','g','MarkerSize',8)
    highlight(htr,load_point,'NodeColor','k','MarkerSize',8)

end
Graph_min_d=graph(D,'upper');
figure(9)
ht=plot(Graph_min_d,'Layout','force','EdgeLabel',Graph_min_d.Edges.Weight);
highlight(ht,1,'NodeColor','r','MarkerSize',8)
highlight(ht,[2 3 4 5],'NodeColor','g','MarkerSize',8)
highlight(ht,[6 7 8 9],'NodeColor','k','MarkerSize',8)

T=minsparcree(Graph_min_d);

figure(3)
ht2=plot(T,'Layout','force','EdgeLabel',T.Edges.Weight);
highlight(ht2,1,'NodeColor','r','MarkerSize',8)

```

```

highlight(ht2,[2 3 4 5],'NodeColor','g','MarkerSize',8)
highlight(ht2,[6 7 8 9],'NodeColor','k','MarkerSize',8)
%[T,pred] = minspantree(G,'Type','forest','Root',findnode(G,'1'));
%highlight(p,T)
d = distances(G,sources,targets);

%%%%计算费用%%%%%%%%%%%%%%

price_load_data=xlsread('附件 1: 负荷、电价数据.xlsx');
price_load_data=price_load_data(1:25,1:7);
guangfu_data=xlsread('附件 2: 光伏出力数据.xlsx');
guangfu_data=guangfu_data(:,2:end);
ralated_load=price_load_data(25,2:5).*0.8;
for i=1:24
    for j=1:4
        grater_than_related_load(i,j)=((price_load_data(i,j+1)>=ralated_load(j)));
    end
end
[row,col v]=find( grater_than_related_load==1);

for m=1:32
    for l=1:32
        price_load_data2(row(m),col(l):6)=price_load_data(row(m),col(l)+1:7);
    end
end
price_load_data2(19,1)=0;
price_load_data2(9:11,2:4)=0;
price_load_data2(9:11,6)=0;
charge_spend_matrix=price_load_data2(9:end,:);
for i=1:4
    for j=1:11
        average_earn_money_matrix(j,i)=[charge_spend_matrix(j,i)-ralated_load(i)]*...
            charge_spend_matrix(j,5);
        real_charge_capacity(j,i)=charge_spend_matrix(j,i)-ralated_load(i);
        if real_charge_capacity(j,i)<=0

```

```

        real_charge_capacity(j,i)=0;
    end
    if j<7
        spend_charge_capcity(1,i)=sum(real_charge_capacity(1:j,i));
    else
        spend_charge_capcity(2,i)=sum(real_charge_capacity(7:j,i));
    end
    if average_earn_money_matrix(j,i)<=0
        average_earn_money_matrix(j,i)=0;
    end
    sum_earn_money_matrix(i)=sum(average_earn_money_matrix(:,i));
end

end

earn_money=sum(sum_earn_money_matrix)*1000;
first_distance_cost=(d(6)+2.1+d(2))*3+d(4)*2*2-0.4+d(9)*2*3+d(7)*2*3;
second_distance_cost=(d(4)*2+(d(4)+4.5+d(9)))+d(9)*2*2+(d(6)+2.7+2.1+3+d(7))*2+(d(6)+2.1+d(2
)))+...
    (d(7)*2*1)-0.2;
charge_cost=sum(spend_charge_capcity(1,:))*0.687+sum(spend_charge_capcity(2,:))*0.8;
%pure_earn_money_2=earn_money-distance_cost-charge_cost*1000+44*(0.8-0.687);

pure_earn_money_1=earn_money-first_distance_cost-charge_cost*1000+44*(0.8-0.687);
guangfu_data_after_17_1=sum([152.7935 141.2165 115.0448 111.7365])/1000;
charge_cost_2=sum(spend_charge_capcity(1,:))*0.687+(sum(spend_charge_capcity(2,:))-guangfu_data_after_17_1)...
    *0.8+0.2*guangfu_data_after_17_1;
pure_earn_money_2=earn_money-charge_cost_2*1000+44*(0.8-0.687)-second_distance_cost;
%%
%%
%%thrid problem
mean_load(1)=mean(real_charge_capacity(1:end-1,1));
for i=1:4
    if i>=2
        mean_load(i)=mean(real_charge_capacity(4:end,i));
        % v(i)=var(real_charge_capacity(4:11,i));
    end
end

```

```

end

end

v1=var(real_charge_capacity(1:10,1));
v2=var(real_charge_capacity(4:11,2));
v3=var(real_charge_capacity(4:11,3));
v4=var(real_charge_capacity(4:11,4));
v=[v1 v2 v3 v4]
%%load point 5 14 19 27
t=0.0300:0.001:0.07;
for i=1:4
    P_limit_max(i)=mean_load(i)+3*v(i);
    P_limint_min(i)=mean_load(i)-3*v(i);
    y(i,:)=gaussmf(t,[v(i),mean_load(i)]);
    subplot(2,2,i);
    plot(t,y(i,:));
end
P_use_power=[P_limit_max;P_limint_min];
P_use_power=[P_limit_max;P_limint_min];
thrid_distsance_spend=d(8)*2+2.3*2+d(4)*2+d(9)*2*3+(d(7)+3.6+d(3))*2+d(7)*2*2+...
    d(2)*2*2*2;
thrid_earn_money=earn_money-thrid_distsance_spend-(400+250+138+201.5)*0.687...
    -(157.3+250+138+201.5)*0.8

```

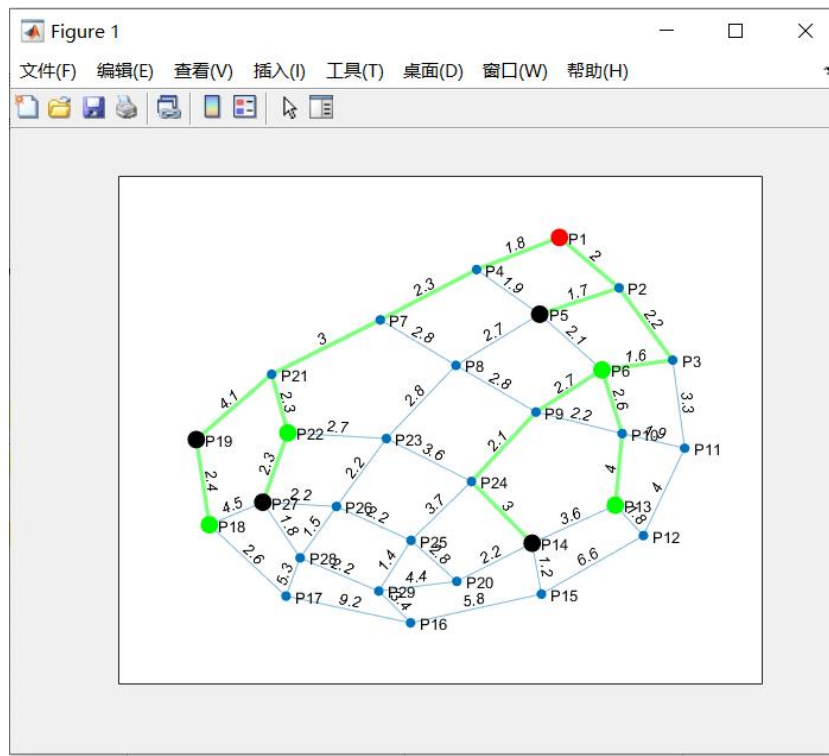


图 10 最短路径图

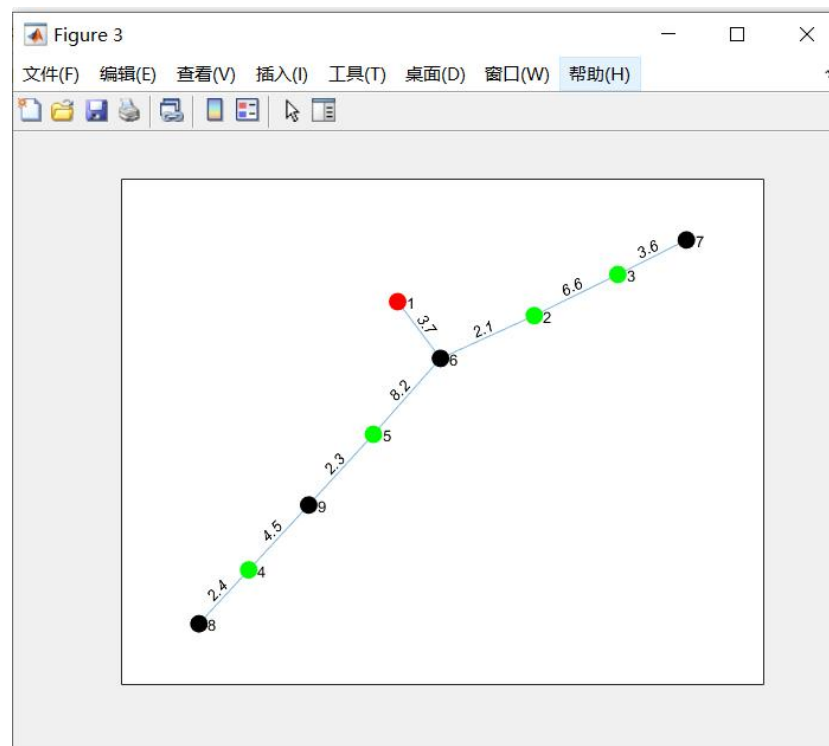


图 11 最小连通图

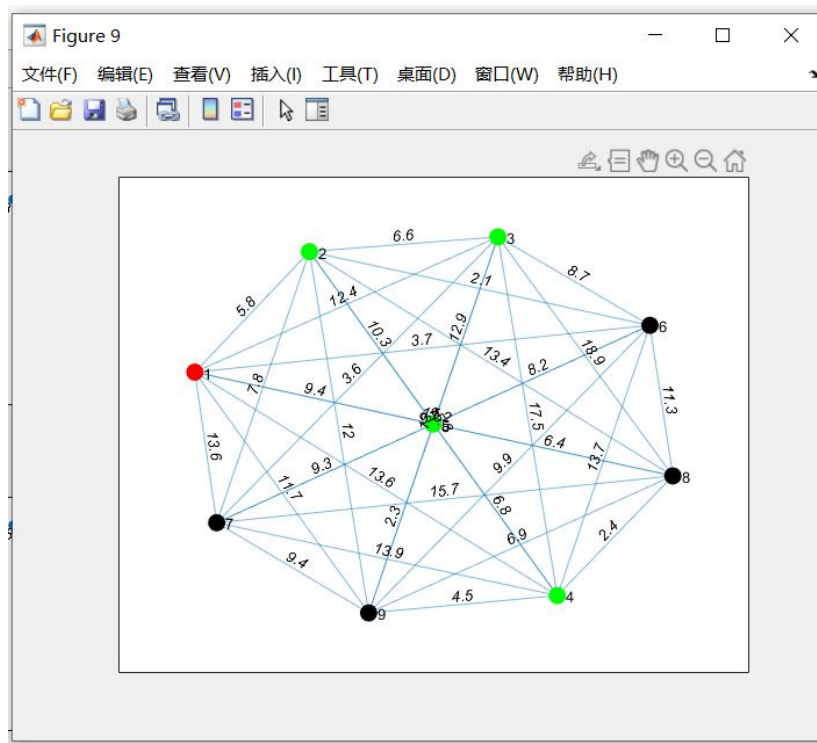


图 12 台区变、充电站连接示意图

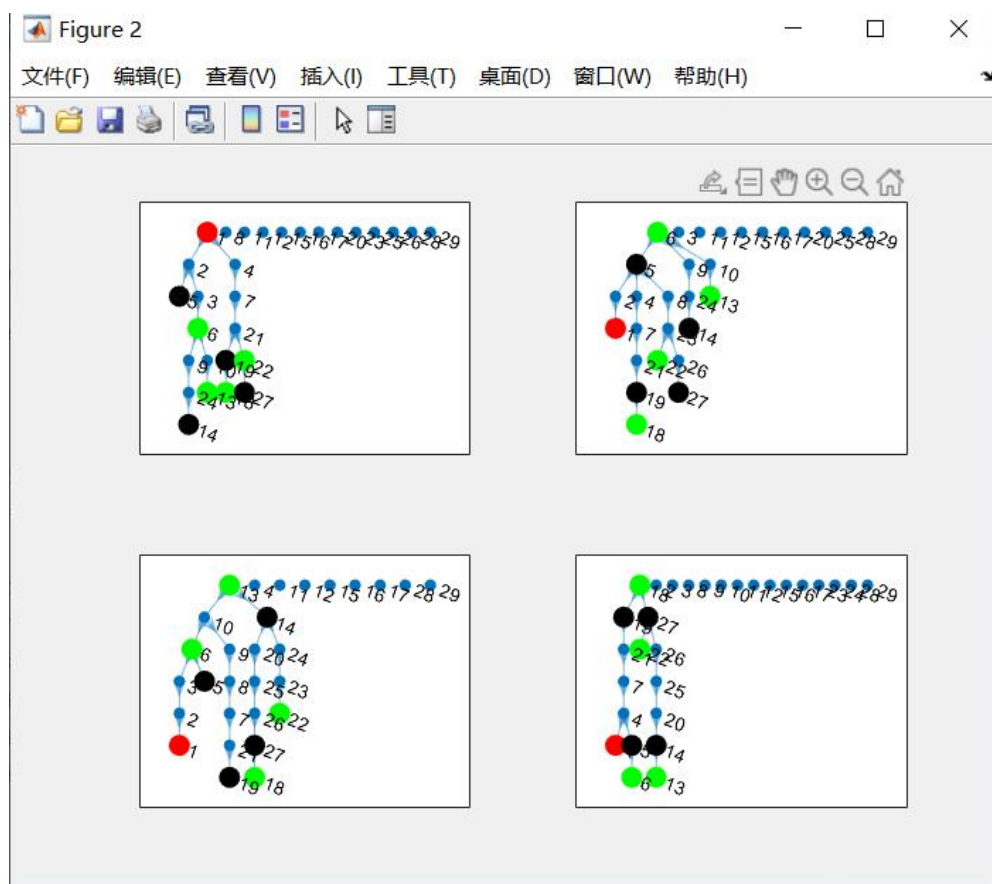


图 13 各节点出发最小生成树(一)

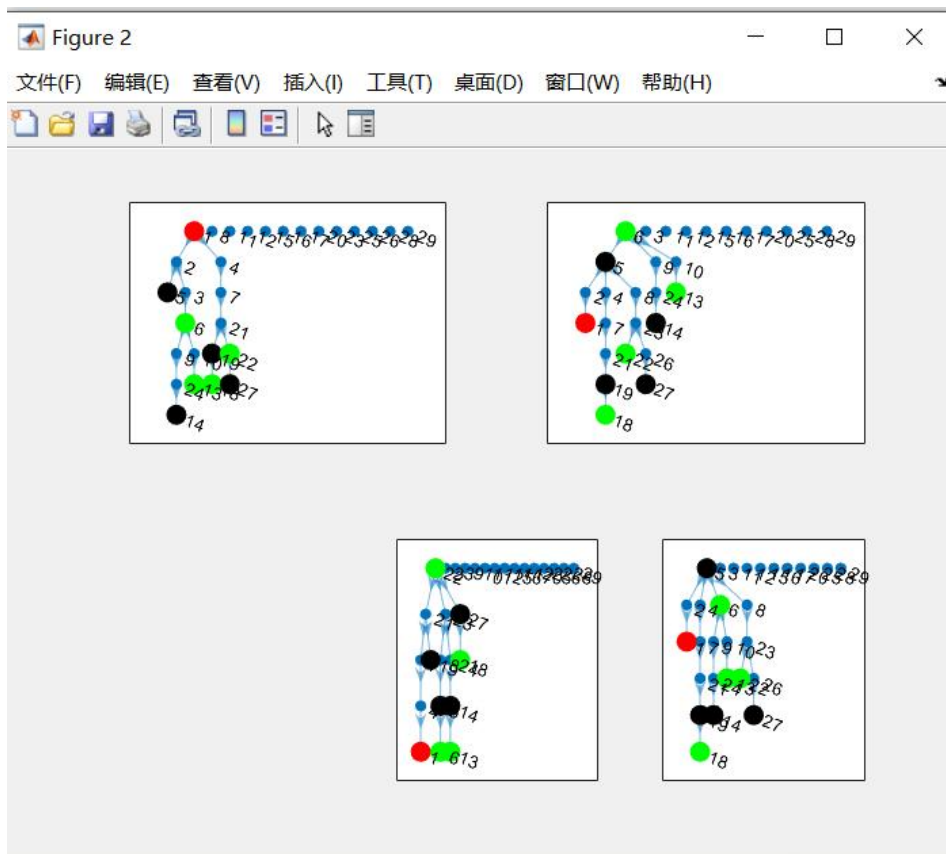


图 14 各节点出发最小生成树(二)

代码清单 2 蚁群算法优化车辆行驶路线模块

```

%%找到整个图中的遍历所有点的最小值
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%初始化%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all; %清除所有变量
close all; %清图
clc; %清屏
m = 6; %蚂蚁个数
Alpha = 1; %信息素重要程度参数
Beta = 5; %启发式因子重要程度参数
Rho = 0.1; %信息素蒸发系数
G = 200; %最大迭代次数
Q = 100; %信息素增加强度系数
C = [1304 2312;3639 1315;4177 2244;3712 1399;3488 1535;3326 1556;...
     3238 1229;4196 1044;4312 790;4386 570;3007 1970;2562 1756;...
     2788 1491;2381 1676;1332 695;3715 1678;3918 2179;4061 2370;...

```

```

3780 2212;3676 2578;4029 2838;4263 2931;3429 1908;3507 2376;...
3394 2643;3439 3201;2935 3240;3140 3550;2545 2357;2778 2826;...
2370 2975]; %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%第一步: 变量初始化%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%load('graph_data.mat');
% data=xlsread('附件 3: 29 个节点数据.xlsx');
% data(find(isnan(data)==1)) = 0;
% D=data(2:end,2:end);
n = size(C,1); %n 表示问题的规模(城市个数)
D = zeros(n,n); %D 表示两个节点距离间隔矩阵
for i = 1:n
    for j = 1:n
        if i ~= j
            D(i,j) = 2.9*((C(i,1)-C(j,1))^2+(C(i,2)-C(j,2))^2)^0.5./1000;
        else
            D(i,j) = eps;
        end
        D(j,i) = D(i,j);
    end
end
end
Eta = 1./D; %Eta 为启发因子, 这里设为距离的倒数
Tau = ones(n,n); %Tau 为信息素矩阵
Tabu = zeros(m,n); %存储并记录路径的生成
NC = 1; %迭代计数器
R_best = zeros(G,n); %各代最佳路线
L_best = inf.*ones(G,1); %各代最佳路线的长度
figure(1); %优化解
while NC <= G
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%第二步: 将 m 只蚂蚁放到 n 个城市上%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    Randpos = [];
    for i = 1:(ceil(m/n))
        Randpos = [Randpos,randperm(n)];
    end
    Tabu(:,1) = (Randpos(1,1:m))';

```


%%%第三步: m 只蚂蚁按概率函数选择下一个节点, 完成各自的周游%%%

```

for j = 2:n
    for i = 1:m
        visited = Tabu(i,1:(j-1)); %已访问的节点起始的时候都占了一个
        J = zeros(1,(n-j+1)); %待访问的城市
        P = J; %待访问节点的选择概率分布
        Jc = 1;
        for k = 1:n
            if length(find(visited==k))==0
                J(Jc) = k;
                Jc = Jc+1;
            end
        end
        %%%%%%%%%计算待选节点的概率分布%%%%%%%%
        for k = 1:length(J)
            P(k) = (Tau(visited(end),J(k))^Alpha)...
                *(Eta(visited(end),J(k))^Beta);
        end
        P = P/(sum(P));
        %%%%%%%%%按概率原则选取下一个城市%%%%%%%%
        Pcum = cumsum(P);
        Select = find(Pcum >= rand);
        to_visit = J(Select(1));
        Tabu(i,j) = to_visit;
    end
end
if NC >= 2
    Tabu(1,:) = R_best(NC-1,:);
end
%%%%%%%%第四步: 记录本次迭代最佳路线%%%%%%%%
L = zeros(m,1);
for i = 1:m
    R = Tabu(i,:);
    for j = 1:(n-1)
        L(i) = L(i)+D(R(j),R(j+1));
    end
end

```

```

        end
        L(i) = L(i)+D(R(1),R(n));
    end
    L_best(NC) = min(L);
    pos = find(L==L_best(NC));
    R_best(NC,:) = Tabu(pos(1),:);
    %%%%%%%%%第五步: 更新信息素%%%%%%%%
    Delta_Tau = zeros(n,n);
    for i = 1:m
        for j = 1:(n-1)
            Delta_Tau(Tabu(i,j),Tabu(i,j+1)) = ...
                Delta_Tau(Tabu(i,j),Tabu(i,j+1))+Q/L(i);
        end
        Delta_Tau(Tabu(i,n),Tabu(i,1)) = ...
            Delta_Tau(Tabu(i,n),Tabu(i,1))+Q/L(i);
    end
    Tau = (1-Rho).*Tau+Delta_Tau;
    %%%%%%%%%第六步: 禁忌表清零%%%%%%%%
    Tabu = zeros(m,n);
    %%%%%%%%%历代最优路线%%%%%%%%
    for i = 1:n-1
        plot([ D(R_best(NC,i),1), D(R_best(NC,i+1),1)],...
            [D(R_best(NC,i),2), D(R_best(NC,i+1),2)],'bo-');
        hold on;
    end
    plot([D(R_best(NC,n),1),D(R_best(NC,1),1)],...
        [D(R_best(NC,n),2), D(R_best(NC,1),2)],'ro-');
    title(['优化最短距离:',num2str(L_best(NC))]);
    hold off;
    pause(0.005);
    NC = NC+1;
end
%%%%%%%%第七步: 输出结果%%%%%%%%
Pos = find(L_best==min(L_best));
Shortest_Route = R_best(Pos(1),:); %最佳路线

```

```

Shortest_Length = L_best(Pos(1)); %最佳路线长度
figure(2),
plot(L_best)
xlabel('迭代次数')
ylabel('目标函数值')
title('适应度进化曲线')

```

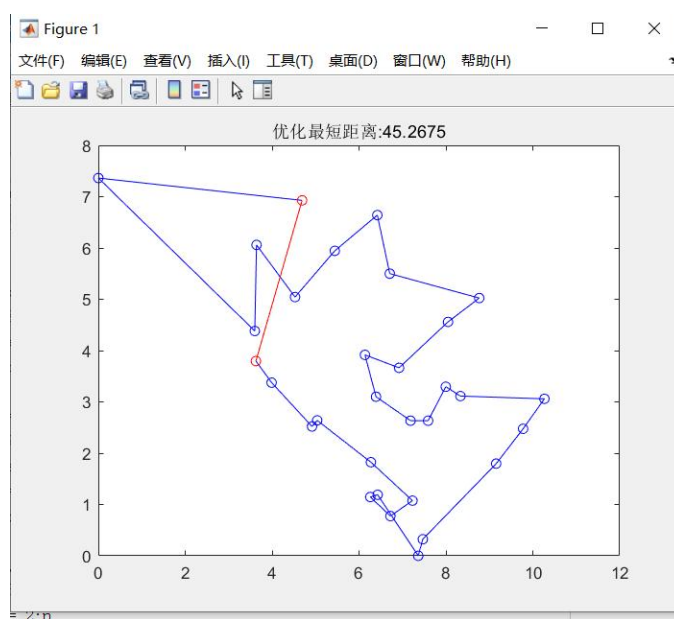


图 15 优化最短路径

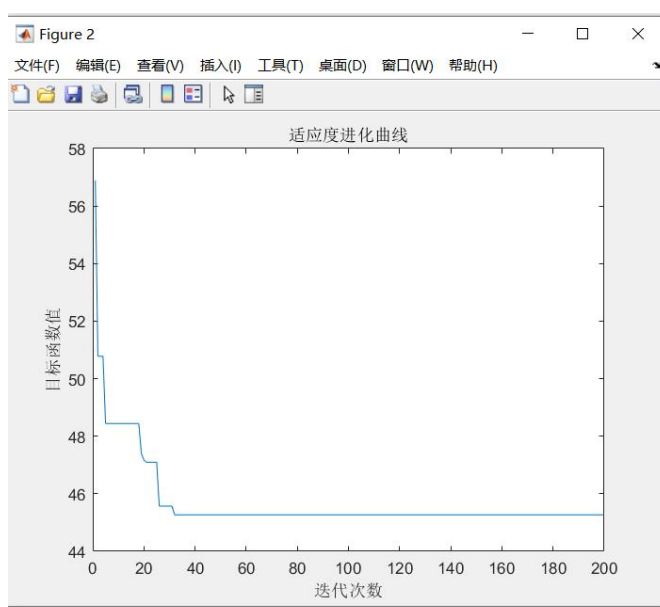


图 16 适应度进化曲线

代码清单 3 充电排队模块

```

%%%%%%%%在道路拥堵时采用问题3 中的分配方案使用M/M/m/c排队系统
clc
clear
close all

[P0,P,Ls,Lq,Ws,Wq]=MMC2(0.25,1,4,8)
function [P0,P,Ls,Lq,Ws,Wq] = MMC2(lambda,mu,c,N)
%M/M/c/inf/m排队系统
%lambda为顾客平均达到率
%mu为系统平均服务率
%c为服务器台数
%m为系统中顾客总数的限制
%P0为系统空闲率
%系统中有n个顾客的概率为向量P的第n个分量
%Ls为系统中平均顾客数(平均队长)
%Lq为系统中平均等待接收服务的顾客数(平均等待队长)
%Ws为顾客在系统中的平均逗留时间
%Wq为顾客在系统中的平均等待时间
rho=lambda/(c*mu);
T1=0;
P=zeros(1,N);
for k=0:c
    T1=T1+(c*rho)^k/factorial(k);
end
T2=(c^c/factorial(c))*(rho*(rho^c-rho^N)/(1-rho));
P0=(T1+T2)^(-1);
for i=1:c
    P(i)=((c*rho)^i/factorial(i))*P0;
end
for i=c:N
    P(i)=(c^c/factorial(c))*rho^i*P0;
end
Lq=((P0*rho*(c*rho)^c)/(factorial(c)*(1-rho)^2))*(1-rho^(N-c)-(N-c)*rho^(N-c)*(1-rho));
Ls=Lq+c*rho*(1-P(N));
Wq=Lq/(lambda*(1-P(N)));
Ws=Wq+1/mu;
end

```