

移动储能车的优化调度

摘要

随着城市建设和经济的高速发展,城市人口增加而导致用电需求供应不足的现象日益严重。本文针对多功能移动储能车中充放电运行策略不完善的问题,通过综合分析三类客户用电需求及充电收益等指标,以充电收益、储能车车辆数为目标建立了相关优化模型,并使用遗传算法对模型进行求解。

针对问题一:考虑车辆行驶成本、充电成本、放电收益、客户满意度,满足车辆每天一次的完整充放电要求,对移动储能车调度方案进行建模。

针对问题二:优先考虑最少车辆,在成本最低的条件下,规划路线。由问题一中的单目标优化转化成多目标优化,并且少了车辆每天只能一次完整充放电的要求。优先使用发电板进行充电,使充电成本更低。

针对问题三:通过实验结果和附件数据,拟合车辆到达充电站时间、充电时长、台区变符合需求的分布。通过抽样平均近似(SAA)把随机优化转化成确定优化,进而使用问题一的模型和求解方法进行求解。

最后,我们对提出的模型进行全面的评价:本文的模型能够根据实际需求进行优化,合理解决提出的问题,更大化提高充电效益、减少储能车车次,并能在复杂情况下得以运用。

关键词:多功能移动储能车; VRPTW 模型; 运输路径优化; 遗传算法

目录

移动储能车的优化调度	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 模型基本假设	1
1.4 符号说明	2
2 问题 1 的模型建立与求解	3
2.1 问题分析	3
2.2 问题 1 的模型建立	3
2.3 问题 1 模型求解	4
2.3.1 遗传算法简介	4
2.3.2 遗传算法流程	5
2.3.3 结果分析	7
3 问题 2 的模型建立与求解	7
3.1 问题分析	7
3.2 问题 2 的模型建立	8
3.3 问题 2 模型求解	9
4 问题 3 的模型建立与求解	9
4.1 问题分析	9
4.2 问题 3 的模型建立	9
4.3 问题 3 模型求解	11
5 模型评价	11
参考文献	12
附 录	13
附录 I: 主要程序/关键代码	13

1 问题综述

1.1 问题背景

随着城市建设和经济的高速发展,人口增加使用电负荷增强,满足人口密集区域在负荷高峰期的用电需求面临着诸多挑战,如:高温与低温极端天气,将导致电力供应缺口变大,使全国电力供应形势紧张。有关资料显示:如果出现大面积电荒、拉闸限电造成的电力需求不足,不仅会对我国经济带来意想不到的灾难,还会对居民生活带来不便。如何避免电力需求短缺,对我国经济发展有着重要的现实意义。[1]在用电需求不断扩大,而变电所资源又十分有限的背景下,传统的电网供应方式容易受天气因素、人为因素等方面影响,影响了传输效率及有效利用率。因此我们需要结合移动储能车运输,并给出合理的规划方案。

目前,已经有很多学者对移动储能车面临的问题进行了研究,也提出了很多算法来解决此类问题,传统的调度优化算法有贪婪算法、蚁群算法等,近几年由于高性能计算设备的快速发展,还出现了蝙蝠算法、遗传算法等。虽然这些算法都可以得到一个较满意的解,但相关约束等条件一般却是通用性框架,只能保证大多数情况下的合理性,个别情况可能出现无最优解问题、解不可行问题,这也促使我们运用更好的方法建立更加合理的模型。

1.2 问题提出

移动储能车涉及多方面的问题,往往由成本、收益、客户满意度、台区变负荷需求这些因素构成。要综合考虑这些因素,对移动车辆进行调度。完成重要单位(如政府工作部门、医院等)保电任务,改善电能质量,可有效提升配网末端用户供电服务满意度。移动储能车行驶路径优化与充放电策略主要根据用户用电需求、城市交通流量和电网电价进行灵活规划。不同的路径选择方案会对应不同的行驶成本与充放电方案,最终影响充放电服务收益。

1.3 模型基本假设

- (1) 设置一天为一个调度周期,每小时为一个时间间隔。
- (2) 移动储能车每天开始时从车辆集合存放点发车,一天结束后,移动储能车需驶回原有车辆集合存放点进行维护管理。
- (3) 移动储能车每天出发前电池满电量,选择合适路线前往台区变压器(简称台区变)所在地进行放电调度。规定同一时段内,同一个台区变仅允许接入一台移动储能车。每台移动储能车所装载的电池容量是有限的,电量消耗完毕或完成当天任务后,需行驶至快速充电站进行电池充电。同一个充电站同一时段只允许一台车充电,同一时段有其它车时则按先到先服务原则充电。每台移动储能车在一天调度结束后电量必须为满电状态,为下一个调度周期做准备。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。
- (4) 由于电力的特殊性,目前供电企业针对用户用电需求将其分为一、二、三类不同客户,其中:若突然中断供电会造成人身伤亡或引起周围环境严重污染、造成经济上巨大损失,将会造成社会秩序严重混乱或在政治上产生严重影响的客户称为一类客户;若突然中断供电对经济上有较大损失,将会造成社会秩序严重混乱或在政治上产生较大影响的客户称为二类客户;三类客户不属于上述一类和二类负荷的其它用户。

- (5) 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潮流分布的影响。同时忽略储能电池充放电行为对其寿命损耗造成的影响。
- (6) 假设移动储能车的储油量满足一天的出行需求。
- (7) 假设电量消耗到 10%以下近似为完全消耗完电量，再充满到 100%，整个过程为完整充放电。

1.4 符号说明

符号	含义
K	超额放电惩罚系数，为无穷大的系数
V_j	表示储能车 j 的最大容量
$F_{i,t}^j$	若任务(i,t)由车辆 j 完成，则 $F_{i,t}^j=1$ ，否则为 0
$CT_{i,t}^j$	储能车 j 开始进行放电任务(i,t)的时间
$ST_{i,t}$	任务(i,t)开始接受放电的时间
$ET_{i,t}$	任务(i,t)结束接受放电的时间
D	若节点为 1 类节点时， $D=D_1$ ，以此类推至 3 类节点
g_t	时间点为 t 的时候，储能车放电收益
$GT_{i,t}^j$	第 j 辆车在于 t 时间段在台区变 i 放电的时长
γ_j	储能车 j 的放电总时长
P_1	储能车行驶成本
P_2	储能车充电成本
P_3	储能车放电缺口惩罚费用
G_1	储能车放电收益
$x_{k,i}^j$	若车辆 j 在路段(k,i)上行驶，则 $x_{k,i}^j=1$ ，否则为 0
α_j	车辆 j 的每公里行驶成本，型号为 mv1 时， $\alpha_j=1$ ；型号为 mv2，则为 2
s_{ki}	从节点 k 到节点 i 的距离
r_t	时间点为 t 的时候，储能车充电价格
RT_i^j	储能车 j 到达充电站 i 的开始充电的时间
β_j	储能车 j 的充电总时长
$C_{i,t}$	第 i 个台区变在时间点 t 的放电需求量
$A_{i,t}$	第 i 个台区变在时间段 t 内实际上收到的放电量
cost_t	在 t 时间点的放电价格
$W_{i,t}$	台区变 i 在 t 时间的缺额功率
$RW_{i,t}$	t 时间段 i 发电板的发电功率
$RGT_{i,t}^j$	储能车 j 于 t 时间段在发电板 i 的充电时长
P	发电板发电量占比， $0 < P \leq 100\%$
RP_j	充电前储能车 j 的剩余电量

2 问题 1 的模型建立与求解

2.1 问题分析

题目以移动储能车的优化调度为背景，在问题一中我们需要考虑车辆行驶成本、充电成本、放电收益、客户满意度，满足车辆每天一次的完整充放电要求。车辆完整充放电这里假设电量用到 10% 一下，充电到 100% 为完整充放电一次。当电量达到 10% 一下，我们就让车辆返回充电，10% 一下的电量都近似为 0% 来处理，因为完全使用到 0% 的概率很小。完整充放电有利于延长电池的使用寿命。另外考虑车的行驶成本，不同时间段的充电成本，不同时间段的放电收益，不能满足客户需求时的惩罚。这几项构成了目标函数。约束需要考虑早上 7 点出发，晚上 22 点之前需要回到节点 1，两节点是否连通，考虑到车辆排队的等待时间。

2.2 问题 1 的模型建立

(1) 目标函数：由问题 1 可知，为按照客户优先级确保满足各类用户的用电需求，并使得移动储能车总充放电服务收益最大，因此本文以最大化充电收益为目标进行建模，目标函数如下：

$$\max z = G_1 - P_1 - P_2 - P_3 \quad (2-1)$$

其中：

$$G_1 = \sum_i \sum_t \text{cost}_t * \sum_j GT_{i,t}^j * W_{i,t} \quad (2-2)$$

$$P_1 = \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^{29} \sum_{i=1}^{29} \alpha_j X_{k,i}^j S_{ki} \quad (2-3)$$

$$P_2 = \sum_{j=1}^{10} r_t * \min\{V_j, (\lceil RT_i^j \rceil - RT_i^j) * 400\} + \sum_{j=1}^{10} r_{t+1} * \max\{V_j - (\lceil RT_i^j \rceil - RT_i^j) * 400, 0\} \quad (2-4)$$

$$P_3 = \sum_i \sum_t D_i (C_{i,t} - A_{i,t}) \quad (2-5)$$

上述函数中各项的说明：公式 2-1：指总的充电收益为储能车放电收益 G_1 与储能车行驶成本 P_1 、储能车充电成本 P_2 及储能车放电缺口惩罚费用 P_3 之间的差值；公式 2-2：储能车放电收益 G_1 为 j 辆车在于 t 时间段在台区变 i 各自放电的时长乘上台区变 i 在 t 时间的缺额功率，再与对应时间点的放电价格 cost_t 相乘累加得到；公式 2-3：储能车行驶成本 P_1 为车辆 j 的每公里行驶成本与对应的行驶距离相乘；公式 2-4：储能车充电成本 P_2 为储能车于 t 时间点的充电价格 r_t 与它在充电站充电电量相乘，充电电量分为两部分。 t 时间段充电时间通过储能车 j 的固定电容量 V_j 与该时间段剩余可充电量比较，该时间段剩余电量为储能车 j 到达充电站 i 的开始充电的时间向上取整得到 $\lceil RT_i^j \rceil$ 减去 RT_i^j ，再整体乘上充电功率； $t+1$ 时刻以此类推。公式 2-5：储能车放电缺口惩罚费用 P_3 为每类节点对应的时间惩罚系数 D 与其缺口电量相乘，其中缺口电量为第 i 个台区变在时间点 t 的放电需求量 $C_{i,t}$ 减去第 i 个台区变在时间段 t 内实际上收到的放电量 $A_{i,t}$ 。

(2) 对于每辆移动车辆，都在节点 1 存放集合；必须早上 7 点一起出发，晚上 22 点前返回；节点间不一定连通：

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^{10} \sum_{i=1}^{29} x_{1,i}^j \leq 10 \\
& \sum_{j=1}^{10} \sum_{i=1}^{29} x_{k,1}^j = \sum_{j=1}^{10} \sum_{i=1}^{29} x_{1,i}^j \\
& 7 + \sum_{j=1}^{10} \sum_{i=1}^{29} x_{k,i}^j / 30 + \beta_j + \sum_{i=5..27} \sum_{t=1}^{24} GT_{i,t}^j \leq 22, \forall j = 1, \dots, 10 \\
& x_{k,i}^j = \begin{cases} 1, & s_{ki} \geq 0 \\ 0, & s_{ki} \geq 0 \text{ 或 } s_{ki} = \inf \end{cases} \\
& \sum_{k=1}^{29} x_{1,k}^j = 1, \forall j = 1, \dots, 10 \\
& \sum_{k=1}^{29} x_{k,1}^j = 1, \forall j = 1, \dots, 10
\end{aligned} \tag{2-6}$$

以上约束的说明：第一个表示车辆均从节点 1 出发，第二个表示从节点 1 出发并返回节点 1，第三个表示车辆早上 7 点一起出发，晚上 22 点前返回。第四个判断节点间是否联通，第五个与第六表示从节点 1 出发只能去下一个节点，并返回节点 1 的同车。

(3) 充放电

$$\begin{aligned}
& 0 < V_j - \sum_{i=5..29} \sum_{t=1}^{24} GT_{i,t}^j * W_{i,t} \leq 0.1 * V_j \\
& RT_i^j \geq \sum_{k=1}^{29} \sum_{i=1}^{29} x_{ki} / 30 + \sum_{i=5..27} \sum_{t=1}^{24} GT_{i,t}^j \\
& RT_{i,m+1}^j - RT_{i,m}^j \geq V_j / 400 \\
& \sum_{i=1}^{29} x_{ki}^j = 1, \forall j = 1, \dots, 10, k = 6, \dots, 22
\end{aligned} \tag{2-7}$$

以上约束的说明：第一个表示当车辆的存电量少于 10% 时，则需要充电；第二个表示开始充电的时间需要大于等于储能车行驶时间与其放电时间之和；第三个表示下一辆储能车开始充电时间与上一辆储能车充电时间之差应大于等于上一辆储能车总的充电时间；第四个表示储能车只去一次充电站进行完整充放电。

2.3 问题 1 模型求解

2.3.1 遗传算法简介

遗传算法（Genetic Algorithm, GA）是一种常用的优化方法，是以编码的空间来取代问题的参数，以适应度函数为评价标准，以编码群体为进化基础，以对群体中的个体位串的遗传操作来实现选择和遗传机制，从而建立的一个迭代过程。并且，其编码的技术和遗传操作是简单易行的，不受限制性条件的约束的一种优化方法，具有隐含的并行性和全局最优解的搜索能力。遗传算法是基于高度并行的、随机的及自适应的优化算法，整个过程是将问题的求解方法表示成染色体的生存过程，并通过染色体种群的一代代不断的进化（选择、交叉、变异等）操作，最终收敛得到最适应环境的个体或种群，逐渐得到问题的最优解或满意解，最终达到求解问题的目的。

遗传算法的理论基础是以种群收敛到全局最优解的分析为主，基本原理是以自然选择和遗传学理论为基础，将自然界中的“适者生存的法则”应用到搜索算法中。遗传算

法的优化过程是在搜索之前，用某种方式对初始种群中的个体进行编码，计算出适应度函数，然后，根据个体染色体的适应值的大小来选择保留到下一代中的个体，并计算迭代次数，最后，对被选择的个体染色体进行交叉、变异来产生新的个体染色体。其具体流程如图 2.1 所示：

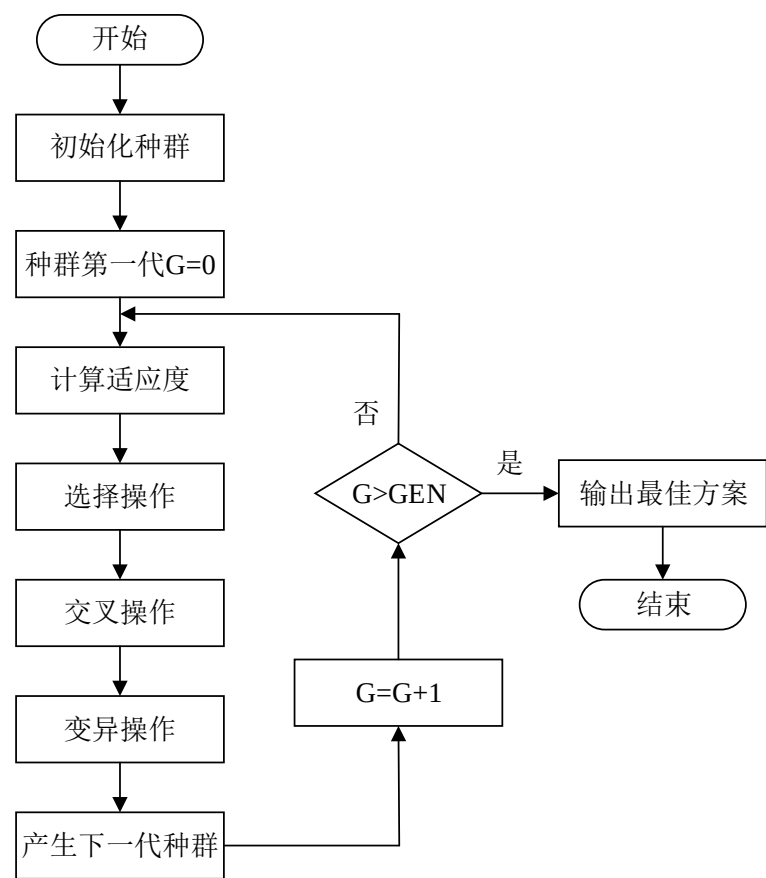


图 2.1 遗传算法流程图

2.3.2 遗传算法流程

在这之前，在附件 1 里根据相关要求标记相关任务需求，如图 2.2 所示：

时间	#1台区变负荷P/MW (节点5)	#2台区变负荷P/MW (节点14)	#4台区变负荷P/MW (节点19)	#3台区变负荷P/MW (节点27)	MV放电电价 (¥/kWh)	MV充电电价 (¥/kWh)
1	0.3757	0.71	0.5717	0.36757	0.4015	0.365
2	0.4473	0.71	0.5658	0.4521	0.4015	0.365
3	0.426	0.725	0.554	0.405	0.4015	0.365
4	0.4189	0.744	0.5422	0.4177	0.4015	0.365
5	0.4189	0.755	0.5481	0.41	0.4015	0.365
6	0.426	0.774	0.5035	0.4033	0.4015	0.365
7	0.4254	0.8	0.5248	0.4255	0.4015	0.365
8	0.62	0.82	0.53051	0.488	0.814	0.687
9	0.68	0.85	0.5505	0.502	1.155	0.935
10	0.713	0.933	0.5741	0.534	1.155	0.935
11	0.714	0.948	0.58	0.568	1.155	0.935
12	0.718	1.005	0.68	0.685	1.155	0.935
13	0.709	1.002	0.68	0.67	0.814	0.687
14	0.699	1.01	0.64	0.672	0.814	0.687
15	0.684	1.004	0.685	0.6	0.814	0.687
16	0.6874	1.045	0.685	0.636	0.814	0.687
17	0.6729	1.04	0.67	0.65	1.155	0.935
18	0.68	1.032	0.676	0.65	1.155	0.935
19	0.51	1.042	0.68	0.64	1.155	0.8
20	0.4816	0.92	0.594	0.4816	1.155	0.8
21	0.4461	0.866	0.56	0.4461	1.155	0.8
22	0.3893	0.867	0.48	0.3893	0.814	0.687
23	0.3183	0.855	0.42	0.3183	0.4015	0.365
24	0.3474	0.78	0.413	0.3474	0.4015	0.365
台区变额定容量S (MVA)	0.8	1.2	0.8	0.75		
台区变额定功率	0.64	0.96	0.64	0.6		

图 2.2 任务需求图

根据题意，表格中红色部分是需要储能车帮忙发电的时间区间，因为在问题一中，要求储能车必须完整充放电，且每天只能完整充放电一次，故而可以得出，电动车的可选充电时间区间一定如图中绿色覆盖所示，同时本题目中有十辆车。

本文将充放电的每个时间区间看成一个任务，放电任务应该尽量全部完成，不然会造成损失。充电任务不需要全部完成，只需要完成部分任务后，保证使用的车辆电量全部充满即可。

总结题中所给元素：

- 放电任务一共有 32 个（图中所有红色部分相加），放电任务都得尽量完成。
- 可选择充电任务一共有 $14 * 4 = 56$ 个，充电任务部门完成即可，保证储能车在完成选定的充电任务后都是电量为满的情况即可。
- 一共有十辆车可待选择。

Step 1 染色体编码

首先总结问题 1 中所给元素：

- 放电任务一共有 32 个（图中所有红色部分相加），放电任务都得尽量完成。
- 可选择充电任务一共有 $14 * 4 = 56$ 个，充电任务部门完成即可，保证储能车在完成选定的充电任务后都是电量为满的情况即可。
- 一共有十辆车可待选择。

于是根据所给元素，现给出编码过程：

- 假定一条染色体由三部分组成，是三个列表。
- 列表 1: 是一个关于 $[0, 31]$ 之间的整数的排列数据，代表着必须完成的放电任务。
- 列表 2: 是一个关于 $[0, 55]$ 之间的整数的排列数据，代表着可选完成的充电任务。
- 列表 3: 是一个关于 $[0, 10]$ 之间的整数的排列数据，代表着可选来完成任务的储能车，对于一个数字 i 属于列表 3, if $i \% 2 == 0$: 那么就选择 a 车, else 选择 b 车。

将以上三个列表通过 `np.random` 进行排列后重组，代表出选择任务和车辆的顺序。

Step 2 群体初始化

采用产生随机数的方法进行群体的初始化，确保每一代都有 3000 条染色体，所以初始便生成 3000 条染色体。

Step 3 适应值评估

为更好用适应度来评估一个染色体的优劣，对题目进行完整分析。首先要求储能车只能完整充放电一次，所以计算完整充放电损失；计算用户路径里给出的充电成本，放电收益，电力缺口惩罚，行驶成本。综上所述，构成需要最大化的染色体适应度 `fitnessmax`。

Step 4 选择种群

对每一条染色体计算其适应度矩阵，选择适应度较高的染色体直接复制到下一代的染色体中。

Step 5 种群交配

交叉操作是指从种群中随机选择两个个体，通过两个染色体的交换组合，把父串的优秀特征遗传给子串，从而产生新的优秀个体。

Step 6 种群变异

为了防止遗传算法在优化过程中陷入局部最优解，在搜索过程中，需要对个体进行变异。

其算法流程如下所示：

设定放电指针 $\text{charge_point} = 0$,设定充电指针 $\text{recharge_point} = 0$ 。

if $\text{charge_point} \leq$ 充电任务的总数量：

- 1) 通过 charge_point 从列表 1 中拿出一个放电任务，计算车辆在此放电任务上的放电情况。
- 2) $\text{charge_point} += 1$ 。
- 3) 重复步骤 1，步骤 2，直到车的电量消耗到指定标准以下（10%）。
- 4) 当车的电量消耗到指定标准以下的时候：
- 5) 通过 recharge_point 选择一个充电任务，如果可以消耗完充电任务的电量，则 recharge_point 后移；反之则不改变 recharge_point 的值，只修改当前充电任务的剩余可用时间。
- 6) 进入下一辆车的路径探索循环。

随机抽取一辆车，记下其车型数据。

进入该车的路径探索：

当充电任务都被完成的时候，本次探索结束，找到了由列表 1，列表 2，列表 3 唯一确认的路径信息。

2.3.3 结果分析

由算法编译后得到相关结果，再绘制出甘特图如图 2.3 所示：

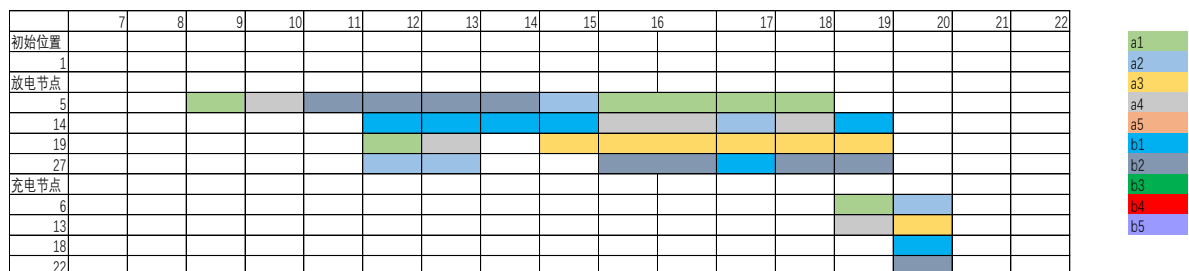


图 2.3 甘特图

通过甘特图我们可以清晰看到每一种储能车的充放电策略安排，可以得到此种情况下一共需要六种储能车：a1、a2、a3、a4、b1、b2。路径如下：

a1: 1-2-5-4-7-21-19-21-7-4-5-6-10-13-10-6-5-2-1

a2: 1-4-7-21-22-27-26-23-8-5-6-9-24-14-24-9-6-3-2-1

a3: 1-2-5-4-7-21-19-21-7-8-9-10-13-10-6-3-2-1

a4: 1-2-5-4-7-21-19-21-22-23-24-14-13-10-6-3-2-1

b1: 1-2-3-6-9-24-14-20-25-26-27-18-19-21-7-4-1

3 问题 2 的模型建立与求解

3.1 问题分析

将台区变集成光伏发电板，自发自用，且以每 15 分钟的分布式光伏出力。基于此，使得在派出移动储能车最少的情况下，按照客户优先级确保满足各类用户的用电需求。

与问题 1 不同的是此情况下移动储能车一天中允许经历多个充放电循环，本文建立一个优化移动储能车配置和调度模型。

3.2 问题 2 的模型建立

(1) 目标函数一：由问题 2 可知，为按照客户优先级确保满足各类用户的用电需求，并使得安排的移动储能车最少，因此本文以最小化移动储能车车次为目标进行建模，目标函数一如下：

$$\min Z_1 = \sum_{j=1}^{10} x_{1,k}^j \quad (3-1)$$

(2) 目标函数二：与问题一类似，仍需将整体充电收益作为目标来进行建模，目标函数二如下所示：

$$\max Z_2 = G_1 - P_1 - P_2 - P_3 \quad (3-2)$$

其中 G_1 、 P_1 、 P_3 与问题 1 含义一致， P_2 表示如下所示：

$$\begin{aligned} P_2 = & 0.2 * (V_j - RP_j)P + \sum_{j=1}^{10} \gamma_t \min\{(V_j - RP_j)(1-P), (\lceil RT_i^j \rceil - RT_i^j) * 400\} \\ & + \sum_{j=1}^{10} \gamma_{t+1} \max\{(V_j - RP_j)(1-P) - (\lceil RT_i^j \rceil - RT_i^j) * 400, 0\} \end{aligned} \quad (3-3)$$

此时 P_2 计算即为发电板与发电站费用之和，其中发电板费用为充电电量乘上发电板发电占比后与电价 0.2/kwh 相乘，发电站产生的费用计算方法与问题一计算类似。

(2) 由于此情况下移动储能车一天中允许经历多个充放电循环，且各光伏板 24 小时内每 15 分钟分布式光伏出力，存在以下约束：

$$0 \leq \sum_{t=1}^{24*4} RW_{i,t} * RGT_{i,t}^j \leq V_j, \forall j = 1 \dots 10 \quad (3-4)$$

以上约束的说明：第一个表示移动储能车一天中允许经历多个充放电循环，第二个由附件 2 所给数据得知，且光伏电站每天于 8:15-17:30 时间段才会进行发电。

(3) 类比问题 1，对于每辆移动车辆，都在节点 1 存放集合；必须早上 7 点一起出发，晚上 22 点前返回；节点间不一定连通：

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{10} \sum_{i=1}^{29} x_{1,i}^j \leq 10 \\ & \sum_{j=1}^{10} \sum_{i=1}^{29} x_{k,1}^j = \sum_{j=1}^{10} \sum_{i=1}^{29} x_{1,i}^j \\ & 7 + \sum_{j=1}^{10} \sum_{i=1}^{29} x_{k,i}^j / 30 + \beta_j + \sum_{i=5..27} \sum_{t=1}^{24} GT_{i,t}^j \leq 22, \forall j = 1, \dots, 10 \\ & x_{k,i}^j = \begin{cases} 1, & s_{ki} \geq 0 \\ 0, & s_{ki} \geq 0 \text{ 或 } s_{ki} = \inf \end{cases} \\ & \sum_{k=1}^{29} x_{1,k}^j = 1, \forall j = 1, \dots, 10 \\ & \sum_{k=1}^{29} x_{k,1}^j = 1, \forall j = 1, \dots, 10 \end{aligned} \quad (3-5)$$

以上约束的说明：第一个表示车辆均从节点 1 出发，第二个表示从节点 1 出发并返回节点 1，第三个表示车辆早上 7 点一起出发，晚上 22 点前返回。第四个判断节点间是否联通，第五与第六表示从节点 1 出发只能去下一个节点，并返回节点 1 的同车。

(4) 充放电

$$RT_i^j \geq \sum_{k=1}^{29} \sum_{i=1}^{29} x_{ki} / 30 + \sum_{i=5..27} \sum_{t=1}^{24} GT_{i,t}^j \quad (3-6)$$

$$RT_{i,m+1}^j - RT_{i,m}^j \geq V_j / 400$$

以上约束的说明：第一个表示开始充电的时间需要大于等于储能车行驶时间与其放电时间之和；第二个表示下一辆储能车开始充电时间与上一辆储能车充电时间之差应大于等于上一辆储能车总的充电时间。

3.3 问题 2 模型求解

模型求解：求解模型中由于约束过多，导致遗传算法的效果不太好，为了能够缩小解的范围，引入选择概率来进行优化。在车辆选择一个节点进行充电或者放电的时候，以小时为周期，在下一周期到来的时候，如果该节点的任务没有完成，车辆优先选择当前节点进行充放电。这样能让车辆少一些调动，减少路程的费用。这种做法并没有排除最优解，同时淘汰了不好的解。甘特图如下，具体结果见支撑材料。

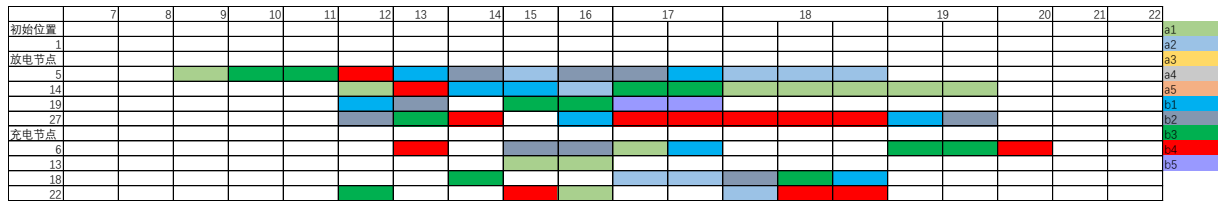


图 3.3：甘特图

4 问题 3 的模型建立与求解

4.1 问题分析

- (1) 考虑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，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。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）。
- (2) 这是典型的鲁棒优化问题，如果按照鲁棒优化的模型直接求解会比较复杂，我们采取多次仿真实验的办法来进行优化。由于样本函数的具体参数未知，我们通过多次模拟记录或附件中的数据来拟合分布。

4.2 问题 3 的模型建立

- (1) 车辆到达充电站时间是泊松分布，参数未知，可以通过问题一中记录的车辆达到充电站的时间来拟合泊松分布；

$$P(x = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (k = 0, 1, \dots, \lambda > 0)$$

- (2) 车辆的充电长符合负指数分布，MV#1 充电时长和 MV#2 充电时长不同，分别构建负指数分布。

$$\text{MV\#1: } f(x) = 2e^{-2x}, x > 0;$$

$$\text{MV\#2: } f(x) = e^{-x}, x > 0$$

- (3) 台区变负荷需求服从正态分布，不同台区变的需求量变化不同（如图 4.1，每个台区变建立一个正态分布。

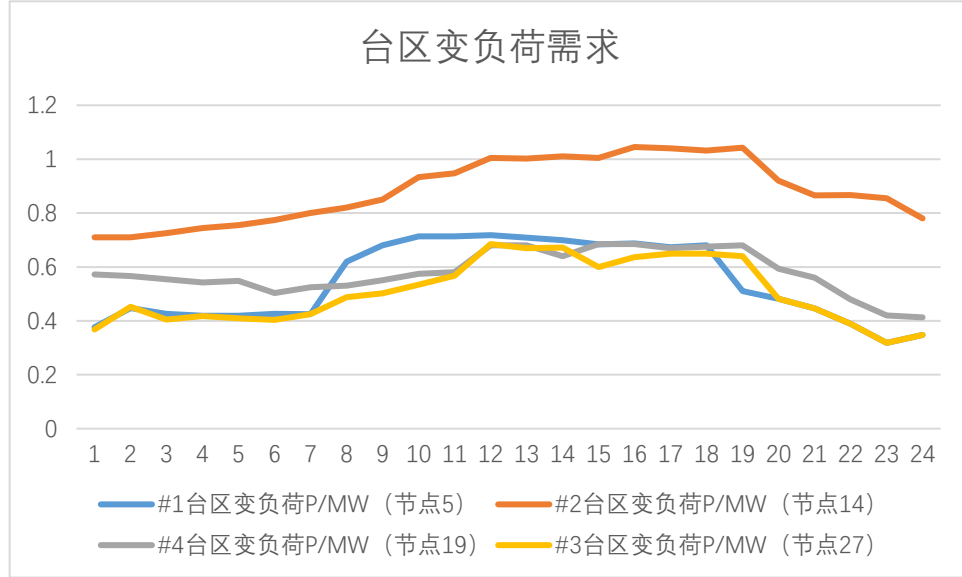


图 4.1 台区变负荷需求随时间的变化

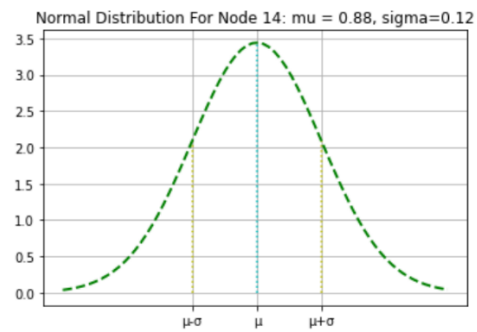
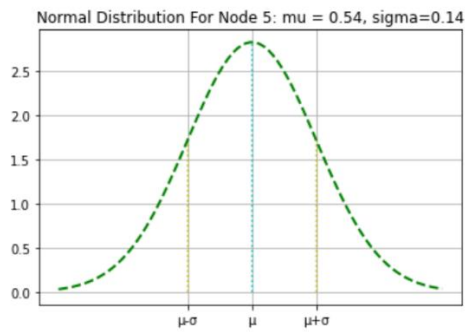
每个节点的台区变负荷需求整体分布，单位（MW）

$$\text{节点5: } f(x) = \frac{1}{0.1441\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-0.5420)^2}{2*0.1441^2}}$$

$$\text{节点14: } f(x) = \frac{1}{0.1184\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-0.8849)^2}{2*0.1184^2}}$$

$$\text{节点19: } f(x) = \frac{1}{0.0815\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-0.5795)^2}{2*0.0815^2}}$$

$$\text{节点27: } f(x) = \frac{1}{0.1182\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-0.5066)^2}{2*0.1182^2}}$$



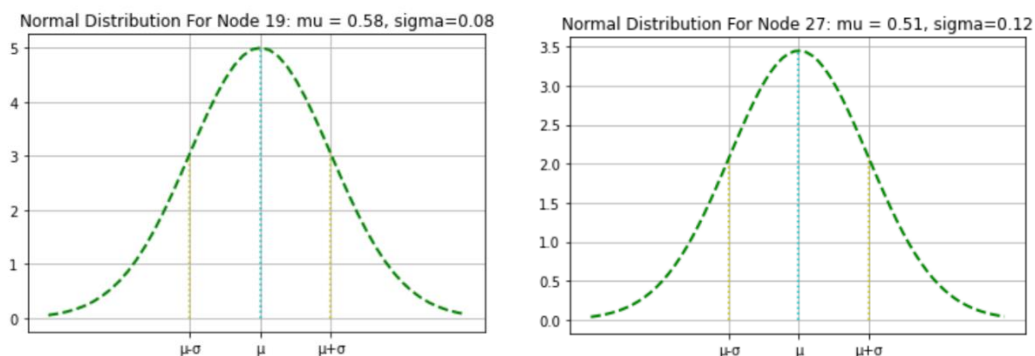


图 4.2：四个台区变负荷需求分布图

- (4) 实际行驶速度也会受交通的影响，设时间段 t 的拥堵系数为 k_t ，拥堵系数变化如表 4.1 所示。实际速度为 $v_j' = k_t \times v_j$

表 4.1：城市拥挤系数取值范围及时间范围

拥堵系数分布	拥堵程度	时间段
[0.7,1)	不拥堵	22:00-8:00
[0.5,0.7)	1 级拥堵	14:00-17:00
[0.3,0.5)	2 级拥堵	10:00-12:00
[0.1,0.3)	3 级拥堵	12:00-14:00,19:00-22:00
(0,0.1)	4 级拥堵	8:00-10:00,17:00-19:00

4.3 问题 3 模型求解

这里使用抽样平均近似方法（Sample Average Approximation，SAA）来解决随机规划问题，目标函数为：

$$\max f(x, \xi) \quad (4-1)$$

其中 ξ 作为一个随机变量，而 x 是一个求解变量。抽样平均方法 SAA 的大致含义是用抽样的方法将随机变量用样本表示，从而将随机规划问题转化为确定性问题。假设随机变量 ξ 的样本分别为： $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 。则原问题转化为：

$$\max \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x, \xi_i) \quad (4-2)$$

把随机规划问题转化为确定性问题，使用问题一的方法进行求解。

5 模型评价

在建立模型的时候尽可能的满足题目的要求，模型比较完善。但是在求解过程中，由于算法以及算力的限制，有可能求导局部最优解。在计算解的过程中应该进行算法改进，提高求解速度。

参考文献

- [1] 陈树民. 我国电力需求影响因素研究[D].山东大学,2018.
- [2] 高升. 基于电动汽车的带时间窗的路径优化问题研究[D].大连海事大学,2015.

附 录

附录 I: 主要程序/关键代码

代	操作系统: window
码	编程语言: Python 3.8
环	编辑器: vscode
境	代码详见: 支撑材料