

移动储能车调度优化模型及算法设计

摘要

随着城市发展速度，电资源紧缺是社会关注的重要热点现象，移动储能车作为移动储能设备削峰填谷，缓解输电紧张，降低送电成本，提高输电效率。本文针对移动储能车的选取与调度，基于多目标规划的思想，通过确定行驶路径、调度时间与充电时间等指标，建立关于移动储能车调度优化模型，并对模型进行求解。

针对问题一：以服务收益最大化为目标研究移动储能车的行驶路径、调度时间与充电时间的调度方案。服务收益由放电收益、充电成本与行驶成本三部分组成，在总需求量不变的情况下，尽可能降低行驶成本与充电成本。将调度规划分为两个阶段进行，第一阶段按时间间隔与台区变需求划分了不同的服务节点，综合考虑车辆行驶成本、区间电价、台区变需求的影响因素，利用 **floyd 算法** 生成不同服务节点的闭环行驶路径方案，在所有可行路径之中选择最小行驶成本与充电成本的行驶方案；第二阶段基于 **最小覆盖思想**，针对客户需求优先级别，在目标函数中增加以台区变供求量与需求量之间的约束罚函数。以服务节点与车辆之间的指派问题建立 **0-1 规划模型**。计算结果为总放充电收益为 218.02 元，派出 3 辆 MV#2 车辆，5 辆 MV#1 车辆。

针对问题二：考虑光伏发电供电，允许尽可能地使移动储能车使用光伏充电，车辆可以多次充放电的情况下，构建的移动储能车数量最少，服务收益最大的多目标优化模型。因为储能车的固定成本远大于运营成本，所以将储能车最少作为 **第一求解目标**，收益最大作为 **第二求解目标**。最后求得总放充电收益为 531.40 元，派出 3 辆 MV#2 车辆，2 辆 MV#1 车辆。比较问题一降低了充电成本与行驶成本，提高了移动储能车的利用率，节省公共资源。

针对问题三：考虑交通路面拥堵情况与充电站排队情况，以服务收益最大化为目标建立优化车辆调度模型。第一阶段构建移动储能车在充电站内实时排队模型进行 **仿真模拟**，利用泊松分布和负指数分布模拟了车辆充电排队等待时长，根据正态分布模拟台区变负荷情况；第二阶段以总放充电服务收益最大为目标函数，以违反充放电时间区间的约束为 **罚函数**，在问题一模型基础上加以改进建立的 **随机优化模型**。计算结果总放充电收益为 183.2 元，派出 4 辆 MV#2 车辆，5 辆 MV#1 车辆。

本文模型从考虑角度较广，贴合实际，能合理解决提出的问题，具有实用性强，算法效率高等特点，该模型在指派问题，资源分配等方面也能使用。为使得模型进一步优化，可从能源选择、车辆磨损、发电内耗等角度，加以深化和完善。

关键字： 车辆调度 时间窗 目标规划 排队论

目录

论文题目	I
摘要	I
1 问题综述	1
1.1 问题背景	1
1.2 问题重述	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 问题分析与模型建立	3
3.1 问题分析	3
3.1.1 问题一：	3
3.1.2 问题二：	3
3.1.3 问题三：	4
3.2 模型建立	4
3.2.1 问题一模型建立及求解	4
3.2.2 问题二模型建立及求解	10
3.2.3 问题三模型建立及求解	13
4 模型评价与推广	20
4.1 模型优点	20
4.2 模型缺点	21
4.3 模型推广	22
参考文献	23
附录 A matlab 代码	24

1 问题综述

1.1 问题背景

随着我国城镇化比例增长,加速经济发展的同时,大量人口的涌入也给城市带来了更大的电负荷。根据城市规划的不同,城市能源在空间结构与时间调度上也呈现不同的丰余情况,用电集中区域(如人口密集区,工业区等),依靠原始的城区变电提供的电容量往往无法达到高峰期(如冬季,夏季)电负荷需求。

为进一步优化城市电网,传统储能电站占地大,投资高等缺点明显,移动储能车(移动电源车和储能电池结合)的应用得到了推广。移动储能车电力调控灵活,可配合电网填谷削峰,起到提高配电网侧功率因数,延缓负荷关键节点装置扩容的作用 [1]。Jiang 等提出建立微网经济调度模型,以环境保护和微网运行成本为目标,研究并未联系分析配电网运行成本、负荷峰谷差、损耗、新能源利用率等指标 [2]。另有研究通过集中调度储能车建立调度模型,并未将储能车和电网区别为不同利益主体 [3,4]。部分研究仅用户出行特性,未将交通能耗计入成本并进行电价补贴 [5]。

综上,为实现各区域保电任务,提高电能质量,通过数据和实际情况分析,明确影响指标,建立行之有效的移动储能车调度模型,是优化移动储能参与电网服务,实现电力再配置,完善电网运营模式的关键思路。

1.2 问题重述

移动储能车调度涉及车辆情况、充放电情况、台区变条件等问题,题目已预设以下条件:

- 有规格 #1 和 #2 移动储能车各 5 台,并规定其运营时间和充电次数。
- 规定初始点、台区变、充电站的节点及其规格。

同时,移动储能车调度优化应根据时段电价、路径情况、客户用电需求等方面合理安排,综合考虑不同路径的行驶成本及后续充放电策略,结合配电网运行成本和负荷峰谷差,解决以下三个问题。

问题一: 依据数据条件,建立调度方案模型并求解,满足用电下,使收益最大。

问题二: 结合问题一,充电站增设光伏发电板,允许多次充放电,依据数据条件,建模并求解,使派车最少下满足用电。

问题三: 结合问题一,考虑交通、充电排队、负荷需求等因素,依据数据条件,建模并求解。

1.3 资料条件

- 附件 1：负荷、电价数据.xlsx：该文件提供了未来 24 小时各时段负荷数据及充放电价情况，其中超负荷时段和充电电价为主要参考重点。
- 附件 2：光伏出力数据.xlsx：该文件提供了各充电站的出伏预测，用于问题二充电计算。
- 附件 3：29 个节点数据.xlsx：该文件提供了路网图数据，用于判断最短路径。

2 模型假设与符号说明

2.1 模型基本假设

1. 假设一个调度周期为一天，一个时间间隔为一小时，所有车辆整点出发、整点开始充放电。
2. 假设移动储能车的出行移动与电储能与电耗无关，仅与油耗有关且出油量足够一天的移动量。
3. 假设同一台区变或者同一充电站同一时刻只允许接入一台移动储能车。
4. 忽略道路上其他急性可能突发事件对移动储能车造成的影响。

2.2 符号说明

符号	说明
#1/#2	车辆型号
P_k	额定功率
Q_k	额定容量
M	集合存放点的总车辆数
Q	服务收益
Q_1	放电收益
Q_2	充电成本
Q_3	行驶成本
J_t^F	t 时刻区间放电价
J_t^C	t 时刻区间充电价
l_k	第 k 辆车的行驶成本
L_{ij}	服务编号 j 所在的台区变闭环行驶路径所需路程
$[a_i, b_i]$	服务节点的时间区间

符号	说明
d_i, d_j	服务节点 i、j 供电需求量

3 问题分析与模型建立

3.1 问题分析

3.1.1 问题一：

依据台区变的用电负荷需求和提供的移动储能车信息，进行车辆的调度优化，研究关于车辆的调出决策、行驶路径、调度时间与充电时间的调度方案，实现服务收益最大化。总放充电收益分为三部分，放电收益、充电成本和行驶成本，考虑到车型号规格、区间电价、台区变需求的影响，分阶段进行调度模型优化。过程如图 1。

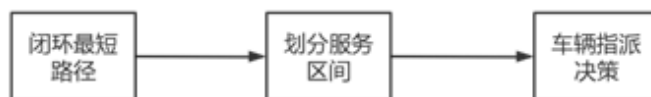


图 1 问题一决策过程

第一阶段求得从集合存车点至台区变、台区变至充电站、充电站至集合存车点的闭环最短路径。台区变总需求不变的情况下，若要收益最大，则需要行驶成本和充电成本尽可能小，移动储能车应该尽量在放电收益较高时段放电，充电成本较小时段充电，并且车辆需要从集合存车点至台区变、台区变至充电站、充电站至集合存车点的路径都是尽可能地小，那么可以先对集合存放点、台区变和充电站的闭环路径求解最小方案。

第二阶段将台区变需求区间接时间间隔划分成若干服务节点，以是否指派车辆前往服务节点提供服务为决策变量，加入以台区变供求量与需求量之间的约束罚函数，建立以服务收益最大为目标函数的单一目标规划模型。

3.1.2 问题二：

在问题一基础上，充电站增设光伏发电板，同时不限车辆的完整充放电次数，在服务收益最大化的同时，求得最少出车数量，优化车辆配置与调度方案。

本问中，为了节省充电成本，尽可能使车辆全都使用光伏充电，并且在不限车辆的完整充放电次数的条件下，可以实现部分储能车往返台区变与充电站多次充放并完成保电任务。考虑光伏发电供能，允许尽可能地使移动储能车使用光伏充电，车辆可以多次充放电的情况下，构建的移动储能车数量最少，服务收益最大的多目标优化模型。因为

储能车的固定成本远大于运营成本，所以将储能车最少作为第一求解目标，收益最大作为第二求解目标。

3.1.3 问题三：

此问加入交通路面情况与充电站排队情况的影响因素，需要进一步调整优化模型。车辆在选择充电站的时候，面临了路面堵车情况与不同充电站不同排队情况，在此时需要决策是选择远距离行驶距离远充电站还是选择近距离排队久的充电站，行驶距离远会影响行驶成本与行驶时间，排队久会影响达到集合存放点的时间。第一阶段构建移动储能车在充电站内实时排队模型进行仿真模拟，利用泊松分布和负指数分布模拟了车辆充电排队等待时长，根据正态分布模拟台区变负荷情况；第二阶段以总放充电服务收益最大为目标函数，以违反充放电时间区间的约束为罚函数，在问题一模型基础上加以改进建立的随机优化模型。

3.2 模型建立

3.2.1 问题一模型建立及求解

为了保证重要社会部门的保电工作，移动储能车的工作任务为装载一定容量的电资源，运至台区变压器，完成放电任务至台区变以提供附近社区内所有用户用电。

集合存放点提供两种移动储能车，其型号规格分别如表 2 所示，#2 的行驶成本比 #1 的行驶成本高，但 #2 的额定功率与额定容量高。规定移动储能车工作时间区间为 7:00 至 22:00，非工作时间需要停泊在集中存放点并且处于满电状态，在此问中移动储能车每天仅允许完整充放电一次。

表 2 移动储能车型号

车型	数量 (辆)	额定功率 (KW)	额定容量 (KWh)	驾驶时速 (Km/h)	行驶成本 (元/公里)
#1	5	50	200	30	1
#2	5	100	400		2

供电企业针对用户用电需求划分优先级别，对此引入以提供给台区变的总供应量与需求量为约束的罚函数，如式 (1) 所示，

$$f(g) = \max\{d_g - R_g, 0\} \quad (1)$$

其中， d_g 为 g 类用户的用电需求量， R_g 为 g 类用户的用电供应量。如果当优先供应的台区变需求量不满足要求时，对其进行加以惩罚。

题目要求各台区变各时刻负荷负载率不超过 1，对附件一中的台区变需求量进行整理，只有实际运行功率高于额定功率时才需要移动储能车进行供电服务，其差值即为该台区变的需电量，整理结果如表 3。

表 3 台区变需求量

时间	节点 5/kWh	节点 14/kWh	节点 19/kWh	节点 27/kWh
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
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
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
总需求	557.3	500	276	403
客户类型	II	III	I	I

将移动储能车调度过程分成两个阶段：第一阶段根据台区变和充电站的节点位置规划出移动储能车的最短闭环路线规划；第二阶段根据每辆台区变的需求，给出移动储能车充放电安排表，完善移动储能的调度优化模型。

Step1. 最短路径问题

台区变总需求不变的情况下，若要收益最大，则需要行驶成本和充电成本尽可能小，移动储能车应该尽量在放电收益较高时段放电，充电成本较小时段充电，并且车辆需要从集合存车点至台区变、台区变至充电站、充电站至集合存车点的路径都尽可能地短，先对集合存放点、台区变和充电站的闭环路径求解最小方案。

为了节省行驶成本，命令一台车辆尽可能地在自身容量范围内满足保电任务后再离

开，即一台移动储能车从集合存放点出发至某台区变后完成放电任务后，便遵循行驶成本最小原则行驶至充电站补充电资源，最后行驶回集合存放点，移动储能车的工作流程如图 2所示。

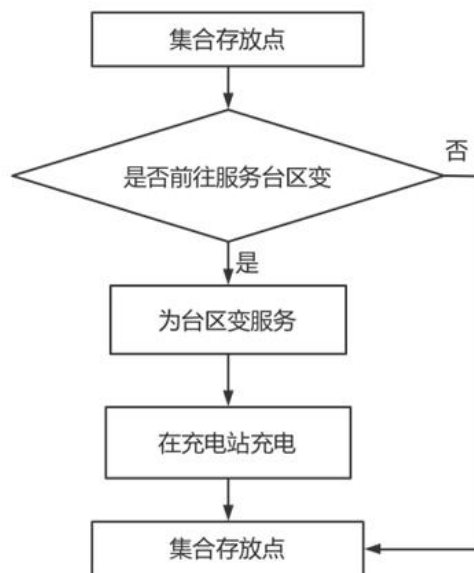


图 2 移动储能车的工作流程

最短路径即不断推算任意两点间最小距离，附件三提供了各节点之间的距离矩阵，使用 matlab 软件利用 floyd 算法计算集合存车点至台区变、充电站至集合存车点之间的最短路径，并绘制出节点位置图，如图 3所示。算得各移动储能车从集合存放点至各台区变或充电站最短路径结果如表 4所示。代码见附录 A。

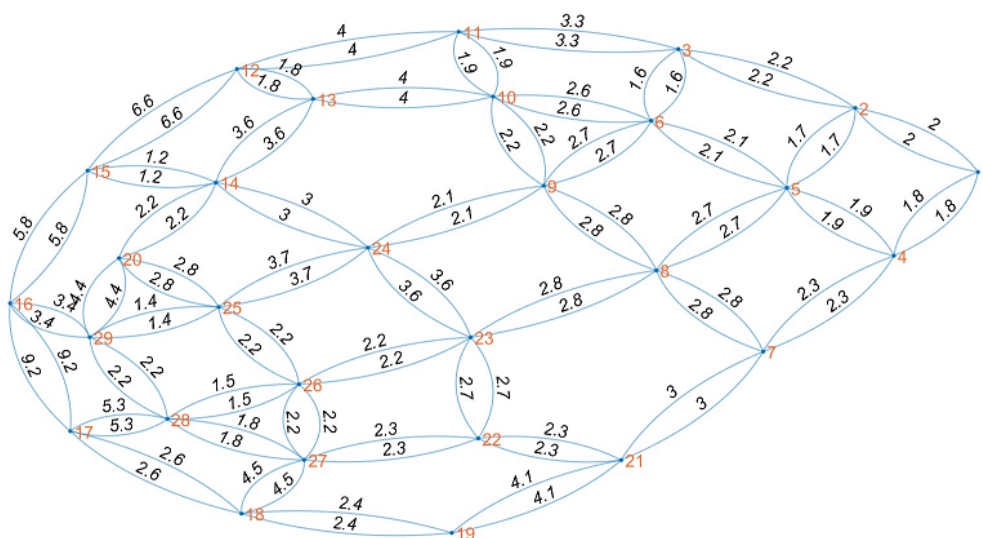


图 3 节点位置图

表 4 集合存放点至各重要节点最短路径

到达节点	路径	距离
台区变 5	1→2→5	3.7
台区变 14	1→2→3→6→9→24→14	13.6
台区变 19	1→4→7→21→19	11.2
台区变 27	1→4→7→21→22→27	11.7
充电站 6	1→2→3→6	5.8
充电站 13	1→2→3→6→10→13	12.4
充电站 18	1→4→7→21→19→18	9.4
充电站 22	1→4→7→21→22	13.6

我们发现台区变 #5 和 #14 的最短闭环路径（集合存放点 → 台区变 → 充电站 → 集合存放点）的方案中，使用的充电站为同一个充电站 #6。但问题一中不涉及排队问题且也不影响车辆在 22:00 前返回至集合存放点。整理各台区变最短闭环路径如表 5:

表 5 最短闭环路径

到达节点	路径	距离
台区变 5	1→2→5→6→3→2→1	11.6
台区变 14	1→2→3→6→9→24→14→24→9→6→3→2→1	27.2
台区变 19	1→4→7→21→19→18→19→21→7→4→1	23
台区变 27	1→4→7→21→22→27→22→21→7→4→1	23.4

Step2. 车辆调度优化模型

确定前往各台区变的闭环路径规划后，第二步要规划出有多少辆车从集合存放点出发，分别去往哪个台区变完成任务，得出移动储能车的充放电时间表，完善调度方案。

结合台区变需求量与储能车规格分析，#2 车辆与 #1 车辆的额定功率不同，#2 车辆可以符合所有的保电任务要求的功率，但是 #1 车辆的额定功率不是全时段能满足，所以将台区变需求按是否可以由 #1 车辆完成划分成 8 个时间段，如表 6 所示，其中服务节点 1 中 9:00 至 10:00 时间段的需求量低于 50kWh，但出于考虑后面几个时间间隔都超过 #1 标准，为了节省成本的原则，不为了此单一时间段单独派车，固将此时间间隔一起合并入编号 1。

服务收益为式 (2)~ (5):

$$Q = Q_1 - Q_2 - Q_3 \quad (2)$$

表 6 台区变需求划分

编号	1	2	3	4	5	6	7	8
时间段 [a,b]	[9,14]	[15,18]	[12,15]	[16,19]	[12,15]	[16,19]	[12,14]	[16,19]
供电需求 q	393	164.3	181	319	125	151	227	176
所属台区变	节点 5		节点 14		节点 19		节点 27	

$$Q_1 = \sum_{t=a_j}^{b_j} J_t^F d_j \quad (3)$$

$$Q_2 = \sum_{t=a_j}^{b_j} J_t^C d_j \quad (4)$$

$$Q_3 = l_k \cdot L_j \quad (5)$$

其中，

Q_1 为放电收益——移动储能车为台区变服务的收益, 为服务节点各时刻所需电量 $d_j \times$ 区间放电价 J_t^F ;

Q_2 为充电成本——移动储能车为台区变服务后所需要的充电成本, 移动储能车为台区变服务所消耗电量 $d_j \times$ 区间充电价 J_t^C ;

Q_3 为行驶成本——移动储能车为台区变服务所行驶最短路径花费成本, l_k 为第 k 辆车的行驶成本, L_j 为服务节点 j 所在的台区变闭环行驶路径所需路程;

计算各服务节点的放电收益、充电成本和行驶成本, 整理后如表 7所示。

表 7 各服务编号

编号	1	2	3	4	5	6	7	8
放电收益 Q_1 (元)	410.27	158.6	162.68	339.46	115.39	159.06	213.76	191
充电成本 Q_2 (元)	270	131.44	124.35	255.2	85.88	120.8	155.96	140.8
行驶成本 Q_3 (元)	#1	11.6		27.2		23		23.4
	#2	23.2		59.2		54		46.8

根据台区变需求、放电收益、充电成本和行驶成本我们可以建立以下模型:

A. 模型的假设

集合存放点现有 M 辆车, 其额定功率与额定容量分别为 P_k 和 Q_k , 其中 $k = 1, \dots, m$ 为 #1 类车, $k = m + 1, \dots, M$ 为 #2 类车, 将各台区变需求按时间间隔分为 N 个服务编

号, 0 为时表示集合存放点, 服务时间间隔为 $[a_j, a_j]$ 。为模型做出以下假设:

(1) 同一服务编号点只由一辆车服务; 因为只允许完整充放电一次, 一辆车也只为一个服务节点提供放电服务;

(2) 被派出的车辆都是按服务节点所对应的台区变最短路径从集合存放点 $\rightarrow$ 台区变 $\rightarrow$ 充电站 $\rightarrow$ 集合存放点完成路径循环;

(3) 车辆到达充电站完成充电无需等待排队;

(4) 忽略交通运输带来的时间上的影响。

B. 数学模型

I. 参数设置

设置决策变量 x_{ij} 表示为第 i 辆车 ($i=1, \dots, 10$, 其中 1-5 为 #1, 6-10 为 #2) 从集合存车点前往编号 j 节点 ($j=1, \dots, 8$) 提供放电服务, 取值为 0 或 1, 取值为 1 时表示此车被派出提供服务, 否则为 0;

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 辆车前往 } j \text{ 服务} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (6)$$

F_j ——完成服务节点 j 的供电任务的收益; C_j ——满足服务节点 j 的放电需求量后的充电成本; L_{jk} ——第 k 辆车行驶服务节点 j 的闭环最短路径所需成本; d_j ——服务节点 j 的供电需求量; P_1 、 P_{II} ——惩罚因子; $f(g)$ ——以台区变需求量与供应量为约束的罚函数。

II. 目标函数

$$\max \sum_i \sum_j x_{ij} (F_j - C_j - L_j) - P_1 f(g) - P_{II} f(g) \quad (7)$$

III. 约束条件

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^{10} x_{ij} = 1 \quad (8)$$

$$x_{ij} = 0, \quad i = 1, \dots, 5, \quad j = 1, 4, 7 \quad (9)$$

$$\sum_j^8 d_j x_{ij} \leq Q_i \quad (10)$$

其中, 式 (8) 表示为每个服务编号 j 有且只有第 i 辆车提供服务; 式 (9) 表示第 1, 4, 7 个服务编号不能由 #1 提供服务; 式 (10) 表示第 i 辆车提供的所有电量不能超过其额定容量。

Step3. 模型求解

使用 matlab 软件进行规划求解, 编码见附录 A, 最后求得总放充电收益为 218.02 元, 调度方案派出 3 辆 MV#2, 5 辆 MV#1, 各自行驶路径、调度时间充电时间如表 8 所示:

表 8 问题一调度方案

第 i 辆车	型号	路径	服务时间	充电时间
1		1→2→5→6→3→2→1	[15,18]	[19,20]
2		1→2→3→6→9→24→14→24→9→6→3→2→1	[12,15]	[16,17]
3	#1	1→4→7→21→19→18→19→21→7→4→1	[12,15]	[16,17]
4		1→4→7→21→19→18→19→21→7→4→1	[16,19]	[20,21]
5		1→4→7→21→22→27→22→21→7→4→1	[16,19]	[20,21]
6		1→2→5→6→3→2→1	[9,14]	[15,16]
7		1→2→3→6→9→24→14→24→9→6→3→2→1	[16,19]	[20,21]
8	#2	1→4→7→21→22→27→22→21→7→4→1	[12,14]	[15,16]
9		未派车		
10		未派车		

3.2.2 问题二模型建立及求解

在问题一的基础上，充电站增设光伏出力电板，提供充电成本更低的充电条件，并且允许移动储能车多次充放电，目标要求移动储能车在派出车辆最少情况下，完成各台区变保电任务。根据附件 2，光伏出力电量可以累积使用，则可知各快速充电站未来 24 小时可提供光伏出力情况如表 9 所示。

经计算发现，光伏出力总电量 (491.8145kwh) 不够台区变供电所需总负荷量 (1736.3kwh)，即派出的移动储能车在提供台区变充电后不能完全依靠光伏储存的电能补充电量。光伏出力全时段电价均为 0.2 元/kwh，远低于原充电站电价，合理安排充电时间，充电时优先使用光伏出力充电，并满足充电所需，以便降低充电成本。

若要派车数量最少，则一定有移动储能车在前往台区变提供服务后，需要有车辆前往接替其剩下的工作任务，并在原车辆完成充电后再回来接替或者前往其他台区变接替其他车辆完成保电任务，一天内必须允许不止一次完整充放电。

分析得到移动储能车工作流程图如图 4 所示。

Step1. 车辆调度优化模型建立以下模型：

A. 模型的假设

集合存放点现有 M 辆车，其额定功率与额定容量分别为 P_k 和 Q_k ，其中 $k = 1, \dots, m$ 为 #1 类车， $k = m + 1, \dots, M$ 为 #2 类车，将各台区变需求按时间间隔分为 N 个服务编号，0 为时表示集合存放点。为模型做出以下假设：

(1) 同一服务编号点只由一辆车服务；因为只允许完整充放电一次，一辆车也只为一个服务节点提供放电服务；

表 9 各时段光伏出力电量

时间	节点 6/kWh	节点 13/kWh	节点 18/kWh	节点 22/kWh
0~7	0	0	0	0
8	0.8575	1.1275	0.83675	0.13475
9	5.89675	8.0485	0.624	4.91775
10	12.6825	18.9995	13.5165	11.99175
11	18.42375	25.16025	18.11375	17.37075
12	23.24725	25.65575	4.7365	19.2595
13	27.674	22.319	17.733	18.69375
14	28.10325	18.4675	18.38375	18.47575
15	22.57175	13.2925	4.3245	13.84075
16	11.531	7.05375	6.819	6.17
17	1.80575	1.09225	0.98025	0.88175
18~24	0	0	0	0
总供电量	152.7935	141.2165	86.068	111.7365

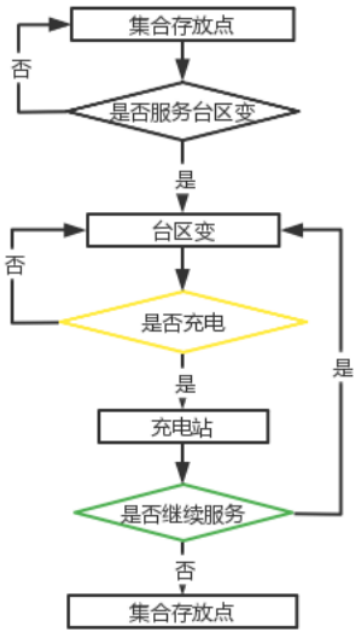


图 4 移动储能车的工作流程图

(2) 车辆到达充电站完成充电无需等待排队；

(3) 忽略交通运输带来的时间上的影响。

数学模型

I. 参数设置

设置决策变量 x_{ij}^k 表示为第 k 辆车 ($i=1,...,10$, 其中 1-5 为 #1, 6-10 为 #2) 从编号 i 节点前往编号 j 节点 ($i=1,...,N$, $j=1,...,N$) 提供服务, 取值为 0 或 1, 取值为 1 时表示 k 车前往提供服务, 否则为 0;

设置决策变量 $y^k(t)$ 表示为在 t 时刻第 k 辆车 ($i=1,...,10$, 其中 1-5 为 #1, 6-10 为 #2) 是否前往充电站充电, 取值为 0 或 1, 取值为 1 时表示 k 车前往充电, 否则为 0;

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{第 } k \text{ 辆车从 } i \text{ 行驶至 } j \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (11)$$

$$y^k(t) = \begin{cases} 1, & \text{在 } t \text{ 时刻第 } k \text{ 辆车前往充电} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (12)$$

L_{ij} ——从 i 到 j 节点的距离; K ——集合存放点出发的总车辆数; l_k ——第 k 辆车的行驶成本, d_i ——服务编号 i 所需负荷。

II. 目标函数

$$\min |K| \quad (13)$$

$$\min Q_2 + Q_3 = \sum_k^M \sum_i^N \sum_j^N \cdot x_{ijk} (L_{ij} \cdot l_k + \sum_k \sum_t y^k(t) \cdot (d_i + d_j) \cdot J^C(t)) \quad (14)$$

其中, 式 (13) 表示从配送中心派出的总车辆数, 式 (14) 表示第 k 辆车被派出后的充电成本和行驶成本。

III. 约束条件

$$s.t. \quad \sum_k^M \sum_j^N x_{ijk} = K < M, \quad i = 1, \dots, N \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ijk} \leq 1, \quad i = 0 \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ijk} - \sum_{j=1}^N x_{jik} = 0 \quad (17)$$

$$\sum_{j=0}^N x_{ijk} - \sum_{j=0}^N x_{jik} = 0 \quad (18)$$

$$\sum_{k=1}^M \sum_{j=0}^N x_{ij}^k = 1 \quad (19)$$

$$\sum_k^M \sum_{i=0}^N x_{ijk} = 1 \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^M x_{ijk} = \begin{cases} 0, & d_i > P_k \\ 1, & d_i < P_k \end{cases} \quad (21)$$

其中，式 (15) 表示派车总车辆小于存放点所拥有的总量；式 (16) 至 (18) 表示第 K 辆车从集合存放点出发最终回到配送中心；式 (19) 和 (20) 表示每个 j 服务编号只能由一辆车提供服务且每个任务都完成；式 (21) 表示当额定功率超过需求时 #1 车才可提供服务。

Step2. 模型求解

使用 matlab 软件进行规划求解，最后求得总放充电收益为 531.40 元，调度方案派出 3 辆 MV#2，2 辆 MV#1，各自行驶路径、调度时间充电时间的调度方案如表 10：

3.2.3 问题三模型建立及求解

问题三在问题一的基础上，引入了排队论与交通拥堵的问题，在考虑交通情况、充电站排队、车辆到达时间不确定的情况下，保证各台区变保电任务的完成情况，进一步优化调度模型。此时移动储能车从台区变供电结束后至充电站充电面临的选择不仅涉及距离问题、还有路况拥堵情况及各充电站的等待时间。路况影响移动储能车的移动速度与行驶时间，并直接影响车辆到达各节点的时间和返回至集合存放点的时间。

放电收益取决于服务台区变的总需求负荷，充电成本取决于车辆到达充电站的时刻，所以要选择等待时间与行驶时间最短的路径，移动成本取决于选择的路径。所以在本问中，优化目标为服务收益最大和从集合存放点出发至返回集合存放点的时间最小。移动储能车的工作流程图如图 5 所示。

表 10 问题二调度方案

第 i 辆车	型号	路径	服务时间	充电时间
1		1→2→3→6→9→24→14→13→10→6→3→2→1	[12,15]	[16,17]
2		1→4→7→21→19→18→19→18→19→21→7→4→1	[12,13]、[15,19]	[14,15]、[20,21]
3	#1	未派车		
4		未派车		
5		未派车		
6		1→2→5→6→9→24→14→13→10→6→3→2→1	[9,13]、[16,19]	[14,15]、[20,21]
7		1→2→5→6→3→2→1	[14,17]	[19,20]
8	#2	1→4→7→21→22→27→22→27→22→21→7→4→1	[12,14]、[16,19]	[15,16]、[20,21]
9		未派车		
10		未派车		

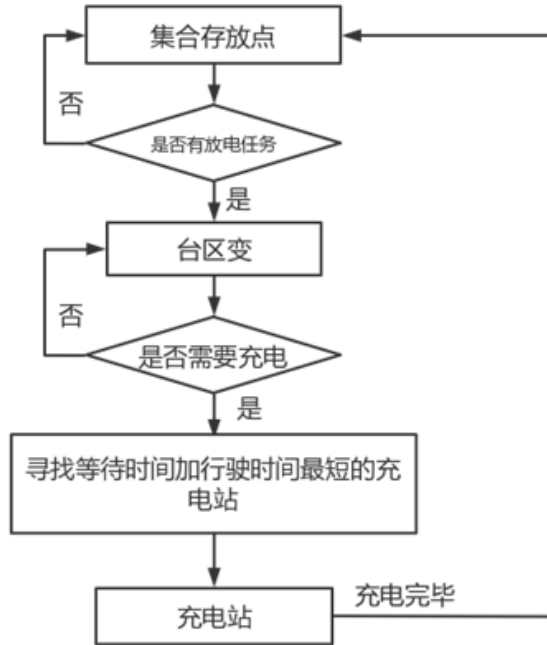


图 5 移动储能车的工作流程图

此问题中需要重点考虑车辆到达时间影响下的时间窗因素，该模型将车辆在充电站的等待时间应该要考虑在内，故给出以下时间指标：

I. 第 k_1 辆车在充电站充电时，充电站仅能为一辆车进行服务，若第 k_2 辆车到达充

电站时，前一辆车还未结束充电，则第二辆车的充电结束时间为：

$$t_e(k_1) = t_0(k_1) + S_h(\mu) \quad (22)$$

$$t_e(k_2) = \max\{t_e(k_1), t_0(k_1)\} + S_h(\mu) \quad (23)$$

II. 假设车辆 k 从集合存放点出发，服务的节点为 i, j ，且出行的顺序为 $i \rightarrow j$ ，则到达各服务节点的时间为：

$$S_i = L_{0i} \cdot \frac{\alpha(t)}{V_k} \quad (24)$$

$$S_j = S_i + L_{ij} \cdot \frac{\alpha(t)}{V_k} \quad (25)$$

III. 假设车辆 k 从 j 服务节点出发，则到达充电站 h 和集合存放点的时间分别为：

$$S_h = S_i + S_j + L_{0i} \cdot \frac{\alpha(t)}{V_k} \quad (26)$$

$$S_0 = S_i + S_j + S_h + t_e(k) \quad (27)$$

其中， $t_0(k)$ ——第 k 辆车到达充电站的时间； $S_h(\mu)$ —— h 充电站的服务时间，服从负指数分布； $t_e(k)$ ——第 k 辆车离开充电站的时间； L_{0i}, L_{ij}, L_{ij} —— k 车从集合存放点至 i 服务节点、从 i 服务节点至 j 服务节点的距离； V_k —— k 车的行驶速度； $\alpha(t)$ —— k 车出发时刻的拥堵因子； S_i, S_j, S_h, S_0 ——车辆到达节点 i, j 、充电站 h 、集合存放点的时间。

Step1. 充电站模拟仿真

排队是现实世界中广泛存在的社会现象。在一个排队系统中，可能存在一个或者一个以上的服务窗口，并同时存在多个需要被服务的“顾客”，若顾客进入排队系统后不能立刻得到服务，就会出现排队现象。一个排队系统必须由服务窗口和顾客组成。在现实生活中，顾客到达服务窗口的时间间隔分布和服务时间分布一般服从于下列三种分布：poisson 分布、负指数分布和 Erlang 分布。

在排队论中，最为重要的三个因素为：

- (1) 顾客到达排队系统的时间间隔分布规律；
- (2) 顾客在排队系统中进行服务的时长分布规律；
- (3) 服务窗口的数量。

按照以上三个因素分类，排队模型的一般形式为 XYZ。其中 X 表示顾客到达排队系统的时间间隔分布规律；Y 表示顾客在排队系统中进行服务的时长分布规律；Z 表示服务窗口的数量。其中，

X 和 Y 可为：

M—负指数分布；

D—确定型分布；
 E_k —K 阶 Erlang 分布；
 GI—一般相互独立的时间间隔分布；
 G—一般服务时间分布。

Z 可为：

1—表示只有一个服务窗口；
 S—表示有 S 个服务窗口 ($S>1$)。

由于车辆到达充电站的数量服从泊松分布，则其到达充电站的时间间隔服从负指数分布，充电时长也服从负指数分布，那么每个充电站的排队模型属于 M/M/1 单服务台模型，需要确定参数 λ 和 μ ，其中 λ 为单位时间内到达充电站的车辆数目； μ 为单位时间内可充电的车数。利用 matlab 编译程序计算参数 L_s, L_q, W_s, W_q ，其中：

L_s 为队长，即充电站排队等待平均车数；
 L_q 为队列长度，即充电站队列中平均车数；
 W_s 为服务时间，即在充电站排队直到服务完毕的时长；
 W_q 为等待时间，即在充电站排队的平均时长。

按重要程度，可将充电站按三类客户分类，其中 18 和 22 号充电站为一类客户，6 号充电站为二类客户，13 号充电站为三类客户。由于充电站的充电功率一定，则 u 为定值，参数 λ 可按充电站重要性而改变。参数 λ 和 μ 如表 11 所示。

表 11 不同充电站参数表

充电站节点	#6	#13	#18	#22
λ	2.5	2	3	2.5
μ	4	4	4	4

在参数 λ 和 μ 已确定的情况下，利用 matlab 进行仿真测试，测试时间为 24h，根据已知条件可以得出 24h 内各充电站车辆的到达时间、离开时间、等待时间和停留时间。

图 6 和图 7 所示两图分别 13 号和 18 号充电站车辆到达时间和离开时间的阶梯图。由图中对比可知，单位时间内到达车辆数目越多，则其排队的可能性约大，等待时间也较长。

Step2. 调度模型建立

根据各充电站车辆的到达时间、离开时间、等待时间和停留时间，综合考虑最短路径、最小排队时间、最小行驶时间等条件，建立了关于各时间的车辆调度模型：

A. 模型的假设

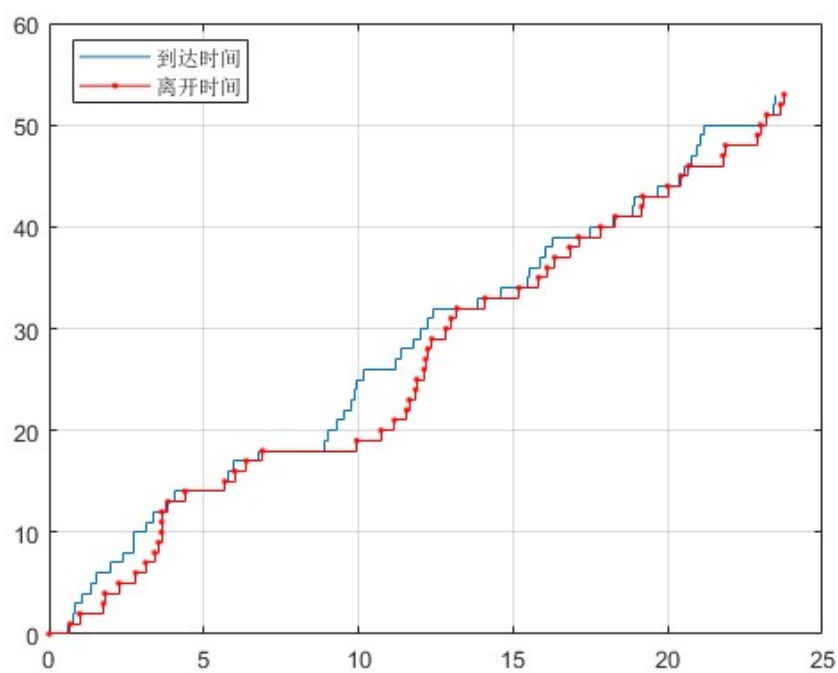


图 6 13 号充电站等待情况

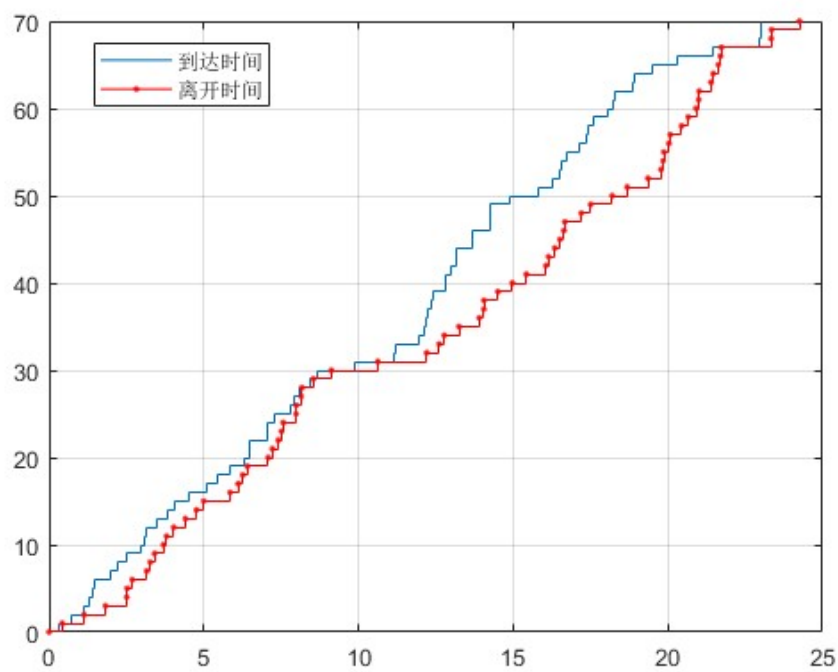


图 7 18 号充电站等待情况

集合存放点现有 M 辆车，其额定功率与额定容量分别为 P_k 和 Q_k ，其中 $k = 1, \dots, m$ 为 #1 类车， $k = m + 1, \dots, M$ 为 #2 类车，将各台区变需求按时间间隔分为 N 个服务编号，0 为时表示集合存放点，服务时间间隔为 $[a_i, a_j]$ 。为模型做出以下假设：

- (1) 一辆车尽可能放完电再离开服务点，同一服务编号点都由一辆车服务；
- (2) 忽略交通运输带来的时间上的影响。

B. 数学模型

I. 参数设置

设置决策变量 $x_{k0i}(t)$ 表示为 t 时刻第 k 辆车 ($i=1, \dots, 10$ ，其中 1-5 为 #1，6-10 为 #2) 从集合存放点前往 i 服务节点 ($i=1, \dots, N$) 提供放电服务，取值为 0 或 1，取值为 1 时表示 k 车前往提供服务，否则为 0； $x_{kij}(t)$ 表示为 t 时刻第 k 辆车从 i 服务节点前往 j 服务节点 ($j=1, \dots, N$) 提供放电服务，取值为 0 或 1，取值为 1 时表示 k 车前往 j 服务节点提供服务，否则为 0； $x_{kjh}(t)$ 表示为 t 时刻第 k 辆车从 j 服务节点 ($j=1, \dots, N$) 前往 h 充电站 ($h=1, \dots, H$) 充电，取值为 0 或 1，取值为 1 时表示前往充电，否则为 0； $x_{kh0}(t)$ 表示为 t 时刻第 k 辆车从 h 充电站前往集合存放点 ($i=1, \dots, N$)，取值为 0 或 1，取值为 1 时表示返回集合存放点，否则为 0；

$$x_{0i}^k(t) = \begin{cases} 1, & t \text{ 时刻 } K \text{ 辆车从集合存放点至 } i \text{ 台区变完成放电服务} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (28)$$

$$x_{ij}^k(t) = \begin{cases} 1, & t \text{ 时刻 } K \text{ 辆车从 } i \text{ 台区变至 } j \text{ 台区变} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (29)$$

$$x_{jh}^k(t) = \begin{cases} 1, & t \text{ 时刻 } K \text{ 辆车从 } j \text{ 台区变至 } h \text{ 充电站} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (30)$$

$$x_{h0}^k(t) = \begin{cases} 1, & t \text{ 时刻 } K \text{ 辆车从 } h \text{ 充电站至集合存放点} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (31)$$

$L_{0i}, L_{ij}, L_{hj}, L_{h0}$ ——从集合存放点至 i 节点、 i 节点至 j 节点、 j 节点至 h 充电站、 h 充电站返回集合存放点的路程； $\alpha(t)$ —— t 时刻的拥堵系数； V_k ——第 k 辆车的行驶速度； $J_j^F(t)$ 、 $J_j^C(t)$ —— t 时刻的放、充电区间电价； $d_i(t)$ 、 $d_j(t)$ —— t 时刻 i 节点、 j 节点的负荷需求

II. 目标函数

$$\max Q = Q_1 - Q_2 - Q_3 - P_f(f_i) - P_f(f_j) - P_{lf}(g) - P_{lf}(g) \quad (32)$$

$$Q_1 = \sum_k \sum_t \sum_i x_{0i}^k(t) \cdot J_j^F(t) \cdot d_j(t) + \sum_k \sum_t \sum_i \sum_j x_{ij}^k(t) \cdot J_j^F(t) \cdot d_j(t) \quad (33)$$

$$Q_2 = \sum_k \sum_t \sum_j \sum_h x_{jh}^k(t) \cdot J_h^C(t) \cdot (d_i(t) + d_j(t)) \quad (34)$$

$$Q_3 = (\sum_k \sum_t \sum_i x_{0i}^k(t) \cdot L_{oi} + \sum_k \sum_t \sum_i \sum_j x_{ij}^k(t) \cdot L_{ij} + \sum_k \sum_t \sum_j \sum_h x_{jh}^k(t) \cdot L_{jh} + \sum_k \sum_t \sum_h x_{h0}^k(t) \cdot L_{h0}) l_k \quad (35)$$

其中，式 (32) 表示第 k 辆车从集合存放点出发后完成充放电后最后回到集合存放点获得总收益； P_F 为惩罚因子； f_i 和 f_j 为惩罚函数； P_I 、 P_{II} 为惩罚因子； $f(g)$ 为以台区变需求量与供应量为约束的罚函数。

$$f_i = \max\{0, S_i - a_i\} \quad (36)$$

$$f_j = \max\{0, S_j - a_j\} \quad (37)$$

III. 约束条件

$$s.t. \quad \sum_k \sum_t x_{oi}^k(t) = K < M, \quad i = 1, \dots, N \quad (38)$$

$$\sum_{i=1}^N (d_i(t) + d_j(t)) \left[x_{oi}^k(t) + \sum_{j=0} x_{ij}^k(t) \right] \leq Q_k = \begin{cases} 200, & K = 1 \sim 5 \\ 400, & K = 6 \sim 10 \end{cases} \quad (39)$$

$$x_{ij}^k(t) = \begin{cases} 0, & d_i > Q_K \\ 1, & d_i < Q_K \end{cases} \quad (40)$$

$$\sum_t \sum_k \sum_{j=1} x_{ij}^k(t) = 1, \quad i = 1, \dots, N \quad (41)$$

$$\sum_t \sum_k \sum_{i=1} x_{ij}^k(t) = 1, \quad j = 1, \dots, N \quad (42)$$

$$\sum_k \sum_{t=22}^{24} x_{00}^k(t) = \sum_t \sum_{t=0}^7 x_{00}^k(t) = 0 \quad (43)$$

其中，式 (38) 表示集合存放点派车总车辆小于存放点所拥有的总量；式 (39) 表示第 k 辆车完成的放电总额不超过车辆的额定容量；式 (40) 表示 #1 车不能为超过额定功率的服务节点服务；式 (41) 和 (42) 表示确保每个 j 服务节点只能被一辆车服务一次；式 (43) 表示 k 车辆非工作时间停放在集中存放点。

由于台区变的负荷需求服从正态分布，可根据台区变负荷量，计算每个台区变的均值 μ 与方差 σ^2 ，并随机生成服从均值 μ 与方差 σ^2 的正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ ，进而得到各个时间段内的电量需求，如表 12 所示，在问题 1 的基础上对台区变进行车辆指派。

Step3. 模型求解

表 12 台区变需求量

时间	节点 5/kWh	节点 14/kWh	节点 19/kWh	节点 27/kWh
7	0	0	0	0
8	31.43	0	0	0
9	39.37	0	0	0
10	44.94	22.49	0	0
11	49.97	30.67	0	71.32
12	90.34	47.28	18.07	98.83
13	87.33	93.62	50.27	75.25
14	75.48	81.79	80.76	58.66
15	71.08	67.69	50.60	0
16	41.59	57.69	48.85	49.89
17	35.10	30.77	29.81	39.04
18	0	23.68	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0.
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
总需求	566.62	455.67	278.35	392.98
客户类型	II	III	I	I

使用 matlab 软件进行规划求解。最后求得总放充电收益为 183.2 元，调度方案派出 4 辆 MV#2，5 辆 MV#1，各自行驶路径、调度时间充电时间如表 13和表 14所示：

4 模型评价与推广

4.1 模型优点

1、模型从放电收入、充电成本、行驶成本三个角度确立评价指标，并依据负荷量划分时间窗，确定移动储能车供电区间，将多个供电时段简化区分，可更直观统计与分析数据，简化了模型，便于快速确定移动储能车调度方案。

2、模型考虑单目标规划时，结合多目标共同讨论，可多个满足目标的解中选出最优解。

3、模型借鉴排队论方法，即节点车辆到达数与服务时间，依据原始数据预测负荷

表 13 问题三路径规划

第 i 辆车 型号	路径
1	1→2→5→6→3→2→1
2	1→2→3→6→9→24→14→24→9→6→3→2→1
3 #1	1→2→3→6→9→24→14→24→9→6→3→2→1
4	1→4→7→21→19→18→19→21→7→4→1
5	1→4→7→21→22→27→22→21→7→4→1
6	1→2→5→6→3→2→1
7	1→2→3→6→9→24→14→24→9→6→3→2→1
8 #2	1→4→7→21→19→18→19→21→7→4→1
9	1→4→7→21→22→27→22→21→7→4→1
10	未派车

表 14 问题三调度安排

第 i 辆车 型号	最晚出发时间	放电服务时间段	到达充电站时间	平均排队时间	充电服务时间	离开充电站时间	最早回程时间
1	7:51	[8,12]	12:21	0.417	0.414	13:11	14:09
2	7:28	[9,12]	13:18	0.417	0.367	14:05	15:01
3 #1	15:24	[16,18]	20:03	0.417	0.136	20:37	21:35
4	11:34	[13,15]	15:08	1.000	0.197	16:20	16:52
5	12:03	[14,16]	16:08	0.417	0.222	16:47	20:07
6	11:41	[12,18]	19:06	0.417	1.000	20:37	21:35
7	10:52	[12,16]	16:26	0.417	0.752	17:37	19:38
8 #2	7:37	[9,13]	13:24	1.000	0.499	15:17	15:49
9	7:35	[9,13]	13:24	0.417	0.760	14:35	15:21
10	未派车						

量，通过仿真模拟实现随机数预测，有效提高预测准确性，从而模拟多项不确定因素条件下调度情况。

4.2 模型缺点

1、模型削弱了时间对调度的影响，通过拟定区间来减少“客户量”，服务对象减少使得调度方案受限，因此可能存在更优解。

2、模型存在多解时，可能出现人工筛选过程，增加了操作流程。

3、在考虑多项不确定因素共同影响调度时，数据来源于随机生成，仅从理论出发，没有实际数据支撑与佐证模型可行性。

4.3 模型推广

移动储能车是解决未来城市供电负荷的有效手段之一，当下正值用电高峰季节，如何合理调度，利用新型手段满足城市用电需求，实现资源再分配成为待解决问题。本文模型从考虑角度较广，贴合实际,能合理解决提出的问题,具有实用性强,算法效率高等特点,该模型在指派问题，资源分配等方面也能使用。为使得模型进一步优化，可从能源选择、车辆磨损、发电内耗等角度，加以深化和完善。

参考文献

- [1] 李靖霞, 纪陵, 左建勋, 吴世伟, 王紫东. 基于遗传算法的移动储能车调度方案优化及应用 [J]. 浙江电力, 2020, 39(03): 50-53.
- [2] Jiang H , Ning S , Ge Q . Multi-Objective Optimal Dispatching of Microgrid With Large-Scale Electric Vehicles[J]. IEEE Access, 2019, PP(99):1-1.
- [3] Saboori H , Jadid S . Optimal scheduling of mobile utility-scale battery energy storage systems in electric power distribution networks[J]. The Journal of Energy Storage, 2020, 31:101615.
- [4] 艾博. 考虑可移动储能技术的 SCUC 模型与算法研究. 华北电力大学; 华北电力大学(北京).
- [5] Feng Y , Liu Y , Zeng X , et al. Power demand side response potential and operating model based on EV mobile energy storage[C]// 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2018.

附录

附录 A matlab 代码

```
%求两点间最短距离
clc,clear
s=xlsread('节点与权.xlsx','A1:CT1');
t=xlsread('节点与权.xlsx','A2:CT2');
w=xlsread('节点与权.xlsx','A3:CT3');
G=graph(s,t,w); %在点s和t之间创造权为w的边
plot(G, 'EdgeLabel', G.Edges.Weight, 'linewidth', 1.5)
    %求节点1到节点5的最短距离,下同,求解节点1到14最短距离时将此部分注释化
[P,d]=shortestpath(G,1,5)
[P,d]=shortestpath(G,1,14)
[P,d]=shortestpath(G,1,19)
[P,d]=shortestpath(G,1,6)
[P,d]=shortestpath(G,1,13)
[P,d]=shortestpath(G,1,22)
[P,d]=shortestpath(G,1,18)
elseplot=plot(G, 'EdgeLabel', G.Edges.Weight, 'linewidth', 1.5);
highlight(elseplot, P, 'EdgeColor', 'r'); %高亮最短距离路线

%参数计算
clc,clear
%充电站按重要程度划分为4个充电站,其中充电站3,4为一类客户,
2为2类客户,3为一类客户
%充电站1
miu=4; %单位时间内可充电的车数
lamda=2; %单位时间内到达车辆数
rou=lamda/miu;
p0=1-rou;
Ls=lamda/(miu-lamda);
Lq=Ls*rou;
```

```

Ws=1/(miu-lamda);
Wq=Ws*rou;
disp(['充电站1排队等待的平均车数为' num2str(Lq) '辆'])
disp(['充电站1排队间平均等待车数为' num2str(Ls) '辆'])
disp(['充电站1排队的平均停留时间为' num2str(Ws) '小时'])
disp(['充电站1排队等待的平均时间为' num2str(Wq) '小时'])

```

%充电站2

```

miu=4; %单位时间内能充电的车数
lamda=2.5; %单位时间内到达车辆数
rou=lamda/miu;
p0=1-rou;
Ls=lamda/(miu-lamda);
Lq=Ls*rou;
Ws=1/(miu-lamda);
Wq=Ws*rou;
disp(['充电站2排队等待的平均车数为' num2str(Lq) '辆'])
disp(['充电站2排队间平均等待车数为' num2str(Ls) '辆'])
disp(['充电站2排队的平均停留时间为' num2str(Ws) '小时'])
disp(['充电站2排队等待的平均时间为' num2str(Wq) '小时'])

```

%充电站3

```

miu=4; %单位时间内能充电的车数
lamda=2.5; %单位时间内到达车辆数
rou=lamda/miu;
p0=1-rou;
Ls=lamda/(miu-lamda);
Lq=Ls*rou;
Ws=1/(miu-lamda);
Wq=Ws*rou;
disp(['充电站3排队等待的平均车数为' num2str(Lq) '辆'])
disp(['充电站3排队间平均等待车数为' num2str(Ls) '辆'])
disp(['充电站3排队的平均停留时间为' num2str(Ws) '小时'])
disp(['充电站3排队等待的平均时间为' num2str(Wq) '小时'])

```

```

%充电站4
miu=4; %单位时间内能充电的车数
lamda=3; %单位时间内到达车辆数
rou=lamda/miu;
p0=1-rou;
Ls=lamda/(miu-lamda);
Lq=Ls*rou;
Ws=1/(miu-lamda);
Wq=Ws*rou;
disp(['充电站4排队等待的平均车数为' num2str(Lq) '辆'])
disp(['充电站4排队间平均等待车数为' num2str(Ls) '辆'])
disp(['充电站4排队的平均停留时间为' num2str(Ws) '小时'])
disp(['充电站4排队等待的平均时间为' num2str(Wq) '小时'])

%对充电站1进行仿真测试,其余充电站修改参数lamda和miu即可
clc,clear
CStime=24; %仿真时长
N=100000000; %队列最大长度
lamda=3; %单位时间车辆到达数
miu=4; %单位时间内可充电的车数
rp1 = 1/lamda;
rp2 = 1/miu;
rpnumber = round(CStime*lamda*2);
situation=[]; %赋空值
%由于车辆到达的时间服从泊松分布,则其到达的时间间隔服从负指数分布,
因此按负指数分布随机产生各车辆到达的时间间隔
situation(1,:) = exprnd(rp1,1,rpnumber);
situation(1,:) = cumsum(situation(1,:));
%车辆的到达时刻等于时间间隔的累计
situation(2,:) = exprnd(rp2,1,rpnumber);
%按负指数分布产生各车辆充电时长
len_cs = sum(situation(1,:) <= CStime);
%计算测试车辆个数,即到达时刻在测试时间内的车辆数
situation(3,1) = 0;

```

```

%第1个顾客进入充电站后直接充电，不等待
situation(4,1) = situation(1,1)+situation(2,1);
%车辆离开时刻等于到达时刻与充电时长之和
situation(5,1) = 1; %第一辆车被服务，此时系统内共有1个顾客
Nov= [1];%其余车辆进入排队系统后，系统内已有成车辆1
for i = 2:rpnumber
    if situation(1,i)>CStime
        break; %若第i个车辆的到达时间超过仿真时间，跳出
    else
        count = sum(situation(4,Nov)>situation(1,i));
        if count >= N+1 %如果排队系统已满，则拒绝第i个顾客，其标志位置0
            situation(5,i) = 0;
        else
            if count==0 %如果排队系统空闲，则第i个车辆直接充电
                situation(3,i) = 0; %等待时间为0
                situation(4,i) = situation(1,i)+situation(2,i);
                %车辆离开时刻等于到达时刻与充电时长之和
                situation(5,i) = 1;
                Nov = [Nov,i];
                %如果系统有车辆充电，且排队等待队列未满，则第i个车辆进入充电
            else len_nov = length(Nov);
                situation(3,i)=situation(4,Nov(len_nov))-situation(1,i);
                %等待时间等于前一个车辆的离开时刻减去其到达时刻
                situation(4,i)=situation(4,Nov(len_nov))+situation(2,i);
                %离开时刻等于队列中前一个车辆的离开时刻加上充电时间
                situation(5,i) = count+1; %表示其进入系统后，系统内共有的车辆数
                Nov = [Nov,i];
            end
        end
    end
end
len_nov = length(Nov); %仿真结束时，进入系统的总车辆数
%绘制测试时间内，进入系统的所有车辆的到达时刻和离开时刻阶梯图
stairs([0 situation(1,Nov)],0:len_nov);
hold on;

```

```

stairs([0 situaition(4,Nov)],0:len_nov,'.-r');
legend('到达时间 ','离开时间 ');
hold off;
grid on;
%绘制在测试时间内，进入系统的所有车辆的停留时间和等待时间曲线图
figure;
plot(1:len_nov,situaition(3,Nov),'r-*',1:len_nov,situaition(2,Nov)+situaition(3,Nov),'k-');
legend('等待时间 ','停留时间 ');
grid on;
xlswrite('situaition.xlsx',situaition,1) %导出excel文件
%xlswrite('situaition1.xlsx',situaition,1) %此为lamda=2.5时，生成的situation1的数据
%xlswrite('situaition2.xlsx',situaition,1) %此为lamda=3时，生成的situation1的数据

```