

基于路径规划的移动储能车双层时空优化调度

摘要

随着城市建设和经济的高速发展，城市用电需求经常无法在高峰期得到满足，严重影响城市生活。高效的移动储能车调度可以有效解决用户负荷需求，并带来可观的经济收益，因此近些年得到广泛关注。但合适的调度一直是储能车得到广泛应用的一个难题。本文针对移动储能车的优化调度问题，建立动态调度模型，将复杂调度问题分解为双层优化调度问题，由浅入深逐一求解，最终实现在城市供电不同情况下的全局较优解。

针对问题一，建立动态调度模型，在满足负荷需求等一系列约束条件下，将问题分解为上层时间尺度下的移动储能车数量分配最优和下层空间尺度下的路径规划充放电效益最优两个子问题。根据台变区用电负荷需求、台变区额定容量计算欠负荷状态矩阵，该矩阵包含时间信息、负荷差值信息、总需求功率值。利用上述信息，以满足负荷为目标，基于 Gurobi 求解器计算出所有移动储能车的分配组合，再依据用户优先级和换车次数最少为目标函数，对移动储能车的分配组合进行初步优化，并将结果传递给下层进行最优调度的求解。根据下层构建的单目标调度模型，首先采用 Floyd 算法，求解出起点到台区变、而后经充电站返回起点处的最短路径；再通过分支界定的方法对移动储能车不同分配组合的路径成本进行遍历求解；进一步考虑在分时电价情况下，移动储能车从起点出发时间和从台变区离开时间，以实现经济效益最优。四个台变区的最终分配方案为 5、14、19 和 27 台区变节点依次对应 MV1+MV2、MV1+MV2、MV1+MV1 和 MV2 (+MV1)，其中分配给台变区 27 的第二辆移动储能车 (MV1) 来自台变区 5。详细调度方案见正文。其中，道路总成本为 244.2 元，充放电收益为 383.717 元，总经济效益为 139.517 元。

针对问题二，建立可循环充电的动态调度模型，以派出移动储能车最少为第一目标，经济效益最优为第二目标，在一系列约束条件下，通过调用 Gurobi 结合 Yamlip 框架求解。根据用户优先级和第一目标，一类和二类用户用电需求属于强约束，三类用户属于软约束，设置第一目标优先级大于软约束，所以三类用户派车方案只能从其他台变区调用。在此基础上，初步求解出移动储能车调配方案；然后根据第一目标对调配方案进行初步优化，计算出最少派出移动储能车总数量为 4，并且 5、14、19 和 27 台区变节点顺序对应 MV2+MV2、0、MV2 和 MV2 (+MV2)。在尽可能优先考虑光伏充电情况下，计算最优的经济效益。其中包含最优路径成本、移动储能车充电充放电总收益，结果分别为 167.00 元和 473.969 元。总经济效益为 306.969 元。详细调度方案见正文。

针对问题三，考虑储能车到达充电站以及充电时长分别服从泊松分布和负指数分布，建立 M/M/c 的车辆充电排队系统，并通过 Lingo 编程求解，得到系统排队等候时间 W_s ；再结合道路拥堵情况，计算出储能车前往 4 个充电站分别所花费的时间。在此基础上，对下层的调度模型进行补充优化，根据等待成本，即路径成本和分时电价的充电成本，决策出是去近的充电站排队等待充电还是去远的充电站直接充电，最终实现经济效益最优。结果显示，移动储能车最优总经济收益为 169.747 元。其中，5、14、19 和 27 台区变节点顺序对应 MV1+MV2、MV1+MV2、MV2+MV2 和 MV2 (+MV2)，详细调度方案见正文。

关键词：移动储能车 时空调度 Floyd 算法 分支定界法 路径规划 排队论

目录

摘要.....	I
1 问题综述.....	1
1.1 问题背景.....	1
1.2 问题提出.....	1
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与求解.....	3
3.1 问题分析.....	3
3.1.1 问题一分析：.....	3
3.1.2 问题二分析：.....	3
3.1.3 问题三分析：.....	3
4 问题分析与模型建立与求解.....	4
4.1 移动储能车单次充放电优化调度问题.....	4
4.1.1 移动储能车台变区调度线性规划模型.....	4
4.1.2 移动储能车单次充放电优化调度求解.....	6
4.1.3 移动储能车单次充放电优化调度求解.....	9
4.2 移动储能车循环充放电优化调度问题.....	16
4.2.1 循环充放电调度模型.....	16
4.2.2 模型求解.....	16
4.3 考虑不确定因素的移动储能车优化调度问题.....	21
4.3.1 不确定因素移动储能车调度模型.....	21
4.3.2 模型求解.....	21
5 模型评价、推广与改进.....	27
5.1 模型的优点.....	27
5.2 模型的不足.....	27
5.3 模型的推广与改进.....	27
参考文献.....	28
附 录.....	29
附录 I: 主要程序/关键代码.....	29

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，城市人口不断增加，用电负荷面临着诸多挑战。为解决上述问题，近年来，国家电网在储能应用场景方面不断进行探索，目前提出将储能电池与移动式应急电源车相结合的解决方法。在复杂的城市交通网络中，交通拥堵、充电等待时间都影响移动储能车的调度。与此同时引入光伏充电桩，储能车的充电不单纯依赖于电网，从而降低了移动储能车充电成本，但同时又受充电功率和时间段限制。

基于前述背景，现阶段研究中，针对移动储能车充放电问题，需要在城市交通网中对移动储能车进行优化调度，包括时间和空间上的调度。具体内容为台区变需要配备何种类型的移动储能车、移动储能车如何移动到台区变，何时给台区变供电。目前的求解算法主要采用启发式算法、线性规划算法、Dijkstra 算法以及这些算法相结合的算法。但在实际应用中，调度方案在时间和空间的求解中具有较高的复杂度，而且上述解法并不能完美的解决一些不完整的任务环问题，因此并不能得到最优解。

为得到高质量的移动储能车调度计划，在有效的满足各类用户的用电需求的前提下，以经济效益最优作为目标，建立移动储能车的调度模型。针对路径优化与充放电问题，本文将分为双层问题，上层解决如何配置移动储能车，下层解决如何达到经济效益最优。分别采用相应算法进行求解，可以高效获得移动储能车调度结果。

1.2 问题提出

移动储能车的优化调度涉及多方面的问题，根据对机组优化排班问题由浅入深分析的过程，题目提出了以下 3 个子问题：

问题一：移动储能车单次充放电优化调度

只考虑移动储能车的优化调度问题，线性规划模型实现移动储能车的分配任务，并满足以下优化目标：

- 1、移动储能车的路径成本尽可能少；
- 2、移动储能成充放电收益尽可能多。

问题一中移动储能车从时间和空间角度需要满足以下约束：

- 1、移动储能车早上 7 点从起点出发，晚上 10 点之前全部回到起点，且为满电状态；
- 2、两种移动储能车放电功率被限制在额定功率以内；
- 3、一类和二类用户属于强约束，必须满足供电需求；
- 4、移动储能车每天仅允许完整充放电一次；
- 5、同一时间，台区变仅允许接入一台移动储能车；
- 6、各台区变各时刻负荷负载率不超过 1。

问题二：考虑光伏效益的优化调度

本问题在问题一基础上，引入光伏充电桩，在满足问题一优化目标的同时，增加了目标函数，如下所示：

- 1、派出的移动储能车尽可能少

在问题一约束的基础上作以下的补充：

- 1、规定移动储能车一天中允许经历多个充放电循环；

问题三：考虑不确定因素的优化调度

本问题在问题一基础上，考虑交通路况不确定特性、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行等因素。本问题需要考虑的目标函数与问题一相同。

在问题一约束的基础上作以下的补充：

- 1、台区变负荷需求服从正态分布；
- 2、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；
- 3、移动储能车实际行驶速度=车辆理想驾驶时速*拥堵系数；

2 模型假设与符号说明

2.1 模型基本假设

- (1) 假设移动储能车可以输出小于额定功率的任何功率。
- (2) 假设三类用户可以长时间处于欠负荷状态。
- (3) 假设储能车在一个台区变放完电后还有剩余电量，可以去其他台区变继续放电。

2.2 符号说明

本文定义了如下 29 个使用次数较多的符号，其余符号在使用时注明。

MV ：移动储能车。

X_i ：第 i 个台区变节点分配的 MV 类型。

T_i ：第 i 个台区变节点移动储能车到达时间和离开时间。

x_{ij} ：第 i 个台区变分配的第 j 辆 MV 。

$R_{x_{ij}}$ ：每辆 MV 的行驶路径矩阵。

$E_{x_{ij}}$ ：每辆 MV 每个时刻电量，kWh。

C_1 ： MV 行驶成本，元。

C_2 ： MV 充电成本，元。

C_3 ： MV 放电收益，元

C_p^t ：充电桩分时电价，元/kWh。

P_i ：第 i 个台区变的额定功率，MW。

P_{MV}^t ：储能车提供的功率，kW。

P_{MV} ：储能车额定功率，kW。

C_m ： MV 的单位行驶成本，元/公里。

N_2, N_4 ： $MV1$ 和 $MV2$ 的数量。

L_i^t ：台区变 i 的实时负荷，MW。

$W(i, j)$ ：赋权邻接矩阵。

$L(i, j)$ ：Floyd算法中点 i 到 j 的距离。

$R(i, j)$ ：Floyd算法中 i 到 j 之间的插入点。

$l(i, j)$ ：Floyd算法中用插入顶点的方法依次构造出的距离矩阵。

$r(i, j)$ ：Floyd 算法中用插入顶点的方法依次构造出的路由矩阵。

λ ：储能车的平均到达率，辆/小时。

μ ：储能车平均充电率，辆/小时。

c: 充电站数量。
 L_q : 平均排队长。
 W_q : 储能车平均等待的时间。
 L_s : 平均队长。
 W_s : 逗留时间, 平均等待时间加平均充电时长。
 $\alpha(t)$: 拥挤度系数。

3 问题分析与模型建立与求解

3.1 问题分析

3.1.1 问题一分析:

针对问题一, 问题要求根据台区变负荷需求, 按照用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。这是一个单目标优化问题, 建立单目标线性模型进行求解。

该子问题首先需要满足能量约束等一系列基础的约束条件, 在此基础上, 将问题分为双层求解。首先每个台区根据符合需求确定移动储能车类型和换班时间, 然后再通过求解最优路径和充放电成本最低实现总充放电服务效益最大。**核心和难点**在于细节约束较多, 如何与目标函数进行有效结合存在一定难点, 而且路径最优和充放电最优的线性加和不一定全局最优。所以将路径最优和充放电成本组合成为一个目标。通过分层进行求解, 上层解决移动储能车分配问题; 下层解决经济效益最优问题。

3.1.2 问题二分析:

问题二在问题一基础上, 引入光伏充电桩, 光伏充电桩充电成本低于电网充电桩充电成本。同时, 相比问题一, 目标函数增加了派出移动储能车最少, 约束改变为移动储能车可以多次充放电。

从补充目标函数和约束条件、光伏充电桩方面看, 充电成本可以降低, 但充电速度下降导致存在充电设备选择问题; 移动储能车可以多次循环充放电, 但光伏充电桩只能运行在特定时间内, 在需要满足用户负荷的同时, 需要合理安排移动储能车充电时间, 既满足用户符合需要, 又可以以较低的价格实现充电; 同时, 问题变为双目标优化问题, 出现目标函数和用户供电优先级问题, 针对如果出现用户供电不足的情况, 在时间和空间上需要完善的计划;

该问题核心和难点在于是否允许用户亏电情况, 导致供电约束与移动储能车数量少的目标函数之间存在矛盾。其中, 一类和二类用户强约束, 必须满足供电需求, 为满足目标函数, 在必要时刻允许第三类用户出现供电不足的情况。具体可体现为需要根据优先级设定约束和目标函数之间的优先规则, 有效处理最优化各个目标实现过程中可能出现的矛盾情况。

3.1.3 问题三分析:

问题三在问题一的基础上, 考虑了不确定性的情况, 即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, 同时考虑交通状况存在拥堵。

根据储能车工作流程, 可以将储能车的充电视为一个排队过程。由题分析可知, 共有 4 个充电站, 并且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, 由此

可知这是一个的[M/M/c]排队系统，且服从先到先服务的原则。基于前述分析的排队模型，计算出储能车平均排队等待时间 W_s ；再依据道路拥堵情况，计算出储能车分别到达4个充电站所花费的时间 T_x 。依据等待时间和所花费时间，决策出去哪个充电站充电。

4 问题分析与模型建立与求解

4.1 移动储能车单次充放电优化调度问题

4.1.1 移动储能车台区变区调度线性规划模型

(一) 决策变量

(1) MV: MV1 表示移动储能车类型 1, MV2 表示移动储能车类型 2。

(2) X_i : 第*i*个台区变节点分配的 MV 类型，数据类型为向量，其中台区变节点之间相互独立。其具体取值为两种类型移动储能车，若表示分配为 MV1，则 X_i 向量为[MV1]，若需要分配多辆 MV，则取值为[MV1,MV2...MV1]，不分配则为空，其长度为分配 MV 的数量，顺序为按时间分配 MV 的排序，出动 MV 的总数量

$$N = \sum \text{len}(X_i) \quad i \in T_r \quad (1)$$

(3) T_i : 第*i*个台区变节点移动储能车到达时间和离开时间。具体取值为时间，第 *m* 时刻到达，第 *n* 时刻离开，那么 T_i 取值为[*m,n*]。如果存在多台 MV，那么取值为[*m*₁,*n*₁;*m*₂,*n*₂]。

(4) x_{ij} : 第*i*个台区变区分配的第*j*辆 MV。

(5) $R_{x_{ij}}$: 每辆 MV 的行驶路径矩阵。

(6) $E_{x_{ij}}$: 每辆 MV 每个时刻能量，数据类型为向量，数据长度为 24。其具体取值为 0 至每种 MV 的额定容量。

(二) 地图模型建立

为简化路径规划求解问题，将地图节点信息转换成点和线的关系，即一个点代表交通路网的节点，每个节点间距离为 d_{ij} ，节点间是否连通用 0, 1 变量表示，1 表示节点之间连通，0 表示节点间不连通，组成无向连接矩阵 *L*。

(三) 构建上层移动储能车分配模型

1) MV 分配目标函数

上层部分目标函数为在满足三类用户用电需求的同时，派出的移动储能车数量最少。即在第*i*个台区变节点处，采用派出所有移动储能车能量加和 P_{MV}^i 大于所需能量即可。

每个台区变节点*t*时刻负荷 L_i^t 和台区变本身供电量 P_i 之间关系 T_i^t 。

$$\begin{cases} T_i^t = L_i^t - P_i \\ P_i = \alpha * S \\ P_{MV}^i \geq T_i^t \end{cases} \quad (2)$$

式中: *S* 为每个台区变额定功率， α 为功率因素。

2) 约束条件

1. 能量约束

台区变*i*和移动储能车提供的功率应等于负荷功率

$$L_i^t = P_i + P_{mv}^t \quad (3)$$

式中: P_{MV} 为所提供的输出功率。

2. MV 能量约束

规定同一时段内，台区变仅允许接入一台移动储能车。MV 在每个时刻释放的能量必须小于额定功率

$$P_{MV}^t \leq P_{MV} \quad (4)$$

3. 负载率约束：

台区变在使用过程中实际运行功率和额定功率的比值，其需要小于等于 1。实际运行功率为台区变所带负荷的功率；

额定功率（MW）=台区变额定容量 S （MVA） \times 功率因素，功率因素理论上取为 0.8。

4. 放电次数约束

针对每辆移动储能车能量状态 E_{xij} ，只允许放电一次，在 E_{xij} 数据模添加标志位，用于表示放电次数：

$$E_{xij}(-1) \leq 1 \quad (5)$$

（四）构建下层移动储能车调度线性规划模型

1) 目标函数

为使 MV 调度分配策略更加合理，从经济效益出发，建立目标函数。

1. 路径成本

每辆 MV 在节点间行驶时，具有行驶成本

$$C_1 = C_m * d_{ij} \quad (6)$$

式中： C_m 为 MV 行驶公里成本。

2. 充电成本

MV 在充电桩充电电价，采用分时电价的售电策略。每辆 MV 的充电成本为

$$C_2 = \sum_{j=1}^N \sum_{t=t_0}^{t_n} C_p^t P_c \quad t = [t_0, t_n] \quad (7)$$

式中： C_p^t 为每个时刻充电桩售电电价，每个充电桩同一时刻售电价格相同； t_0 表示 MV 充电开始时刻， t_n 表示充电结束时刻。

3. 放电收益

放电效益是经济效益的来源，通过 MV 在台变区进行售电的方式，产生 MV 总充放电服务收益。

$$C_3 = \sum_{j=1}^N \sum_{p_i=1} C_s^t P_d \quad t \in [t_0, t_n] \quad (8)$$

式中： P_d 为 t 时刻 MV 的输出功率； C_s^t 为 t 时刻 MV 的输出功率； $p_i = 1$ 表示 MV 在此时刻处于放电状态； t_0, t_n 分别表示 MV 最早放电时刻和最晚放电时刻。

综上所述，问题一的目标函数为

$$\begin{aligned} C &= \max(C_3 - C_2 - C_1) \\ &= \sum_{j=1}^N \sum_{p_i=1} C_s^t P_d - \sum_{j=1}^N \sum_{t=t_0}^{t_n} C_p^t P_c - C_m * d_{ij} \end{aligned} \quad (9)$$

2) 约束条件

1. 时间约束

MV 在 7:00 之后才能出发, 必须在 22:00 之前返回出发点。

$$R_x = [1 \cdots 1] \quad (10)$$

2. 用户优先级约束

用户类型一和二的能量约束属于硬约束, 必须满足, 用户类型三能量约束为软约束, 可以适当不满足。

$$\begin{cases} L_i^t = P_i + P_{mvi}^t & i = 5, 19, 27 \\ L_i^t \leq P_i + P_{mvi}^t & i = 14 \end{cases} \quad (11)$$

3. 能量状态约束

在返回起点时, 必须保证 MV 能量为满状态

$$E_{MVi} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \cdots & 24 \\ S_{MVi} & S_{MVi} & \cdots & S_{MVi} \end{bmatrix} \quad i = 1, 2 \quad (12)$$

4. 路径约束

每辆移动储能车的路径起点和终点均为节点 1。

$$R_x = [1 \cdots 1] \quad (13)$$

综上, 问题一建立的移动储能车分配问题的单目标线性规划模型总结如下:

$$\begin{aligned} C &= \max(C_3 - C_2 - C_1) \\ s.t. &\begin{cases} L_i^t = P_i + P_{mvi}^t \\ E_{MVi} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \cdots & 24 \\ S_{MVi} & S_{MVi} & \cdots & S_{MVi} \end{bmatrix} \\ P_i \leq S * 0.8 \\ R_x = [1 \cdots 1] \\ E_{x_{ij}}(-1) \leq 1 \\ \begin{cases} L_i^t = P_i + P_{mvi}^t & i = 5, 19, 27 \\ L_i^t \leq P_i + P_{mvi}^t & i = 14 \end{cases} \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

4.1.2 移动储能车单次充放电优化调度求解

根据题意, 问题一可以归纳为如下储能车双层时空调度模型:

$$\begin{cases} \max \sum_{l=1}^{i=n} C_i(P_1, P_2, \cdots, P_k) \\ \min \sum_{l=1}^{i=n} Lg_i(P_1, P_2, \cdots, P_k) \end{cases} \quad (15)$$

$$st. (P_1, P_2, \cdots, P_k) \in P$$

其中: (P_1, P_2, \cdots, P_k) 表示储能车路径方案; 上层 $C_n(P_1, P_2, \cdots, P_k)$ 表示求解储能车充放电收益最大的方案, 其代表完整的车辆调度配置方案; 上层 $Lg(P_1, P_2, \cdots, P_k)$ 表示求解完整回路规划运输成本最优, 也即成本最小的方案, 其代表完整的储能车路径规划方案; n 表示储能车数量。

(一) 上层节点 MV 分配求解

根据题目要求，需要在众多的约束条件下在 1 天的时间周期内完成储能车充放电调度的工作。首先，很自然地想到求出能够遍历这些点的最短路径，从理论上初步判断需要的车辆数，因此，考虑在上层根据场景负荷需求条件下，实现效益最大的不同容量车的车辆使用计划；并且，对于题目中仅提供了两支局间直达距离，但这不一定是最短距离。因此，首先需要利用 Floyd 算法求出各支局间的最短路径矩阵 D ，基于此，下层进行完整路径规划和充放电调度计划，以期实现全局效益最大化。

本问题中，我们的最终目标是根据台区变负荷需求，按照客户优先级确保满足各类用户的用电需求，使得移动储能车总充放电服务收益最大。这个目标的计算复杂度很高，所以本文采用分层计算的思想，将问题分段求解。

优化目标：在满足实际电能负荷需求条件下，储能车数量尽可能地少。

假设：容量为 200kw 和 400kw 储能车分别配置于 5、14、19、27 四个台机变节点的数量为 N_2 和 N_4 ，对应最优化目标为：

$$\min(C_1N_2+C_1N_4) \quad (16)$$

其中， N_2 、 N_4 分别为 (4×1) 型矩阵变量，考虑不同类型车辆道路成本不同，赋予不同权重下进行优化。

因为要保证完成当天节点的实际用电需求任务，所以储能车供给的总容量必须不小于节点所需电量，且同时考虑储能车数量等限制，需满足约束条件如下：

$$\begin{aligned} 0.2 \times N_2 + 0.4 \times N_4 &\geq D \\ \sum_{l=1}^{i=4} N_{2(i,l)} &\leq D; N_{2(i,l)} \geq 0 \\ \sum_{l=1}^{i=4} N_{4(i,l)} &\leq D; N_{4(i,l)} \geq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

为保证不同储能车类型下，尽量地实现全局最优，采用极限值权重场景分析，对各种情况下的典型场景进行优化，分析最优方案。

对 MV 单次充放电优化调度问题，本文分为上下两层求解。上层解决台区变如何分配储能车，下层实现经济效益最优的目标。上层根据约束条件和功率平衡的目标函数给出初步的 MV 分配方案。将上层计算结果，传递给下层，下层求解出使得移动储能车总充放电服务收益最大的移动储能车调度方案，包括 MV 的行驶路径、调度时间和充电时间等。

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^n C_i(P_1, P_2, \dots, P_k) \\ \min \sum_{i=1}^n Lg_i(P_1, P_2, \dots, P_k) \end{cases} \quad (18)$$

$$st. (P_1, P_2, \dots, P_k) \in P$$

(二) 下层规划方案求解

根据题目要求，需要在众多的约束条件下在 1 天的时间周期内完成储能车充放电调度的工作。首先，很自然地想到求出能够遍历这些点的最短路径，从理论上初步判断需要的车辆数，因此，考虑在上层根据场景负荷需求条件下，实现效益最大的不同容量车的车辆使用计划；并且，对于题目中仅提供了两支局间直达距离，但这不一定是最短距离。因此，首先需要利用 Floyd 算法求出各支局间的最短路径矩阵 D ，基于此，下层进行完整路径规划和充放电调度计划，以期实现全局效益最大化。

基于以上设计思路，从储能车实际需要供电角度出发，计算四个台机变节点对应储能车放电的负荷需求曲线：

下层规划中主要为空间尺度上对每辆储能车的完整路径规划，其优化目标在于实现运输成本最小，考虑到两类汽车行驶速度一致，因此，优化目标可直接简化为最短路径问题，此类问题类似于经典的车辆调度问题。区别在于：本文考虑了四个台机变的用电需求、返航电量要求以及众多实际情况约束，基于上层调度方案，设计途径固定目标节点位置下的分段路径规划。

此时，设计 Floyd 算法和对比 Dijkstra 算法求解整个区域中任意 2 点之间的最短距离，继而通过分支界定法求解空间尺度上的错峰分段路径优化。

1. Floyd 算法

Floyd 算法的基本思想就是直接在图的带权邻接矩阵中用插入顶点的方法依次构造出 v 个矩阵 $L^{(1)}$ 、 $L^{(2)}$ 、...、 $L^{(v)}$ ，使最后得到的矩阵 $L^{(v)}$ 成为图的距离矩阵，同时也求出插入点矩阵以便得到两点间的最短路径。

此算法的主要程序流程如下：

Step 1: 输入带权邻接矩阵 $W(i,j)$,

Step 2: 赋初值: 对所有 $i,j, l(i,j) \leftarrow W(i,j), r(i,j) \leftarrow j, k \leftarrow 1$ 。

更新 $l(i,j), r(i,j)$: 对所有 (i,j)

若 $l(i,k) + l(k,j) < l(i,j)$

则:

$$l(i,j) \leftarrow l(i,k) + l(k,j), r(i,j) \leftarrow k \quad (19)$$

Step 3: 若 $k=v$, 停止, 输出 $L(i,j)=l(i,j), R(i,j)=r(i,j)$: 否则 $k \leftarrow k+1$, 重复 Step 1。

最终, 求得加权图 G 任意两点之间的最短距离。

分析: 不难发现, Floyd 距离矩阵明显为斜对称矩阵, 经验证, 采用 Floyd 算法与目前广泛采用的 Dijkstra 算法相比, 结果一致, 符合实际情况。并且, Floyd 算法相比对于 Dijkstra 算法对于复杂节点网络的适用性及求解性能更优, 因此, 最终选择 Floyd 算法求解。

2. 分支定界算法

基于求解已知的 Floyd 距离矩阵为了得到给定起始点的回路的最短路径, 采用分支定界算法。算法思想如下:

以 ① 节点来看, 采用分支定界法, 设无向图 G 中共有 29 个点 (包括作为起点及终点的①), $dis(i,j)$ 为图中顶点 V_i 与顶点 V_j 的距离; $path(Vk_1, Vk_2 \dots Vk_i)$ 表示经过的点的路径; 经过路径的长度 $cost = \sum_{j=1}^{i-1} dis[Vk_j, Vk_{(j+1)}]$; $Lmin$ 为所有路径中最短路径的长度; $left(i,j)$ 保存点 V_i 到点 V_j 的边是否已被选取; 初始化令 $Lmin = INF$ (即一个极大的数):

1、以①点为出发点, 遍历每一条分支 $[Xl, Vk_i]$ 作为路径到达 Vk_i 点, 记 $left[0, k_1] = 1, cost = dis[0, k_1]$; 再以点 Vk_1 作为出发点, 遍历与点 Vk_1 相连的每一条边, 记 $left[k_1, k_2] = 1, cost = cost + dis[k_1, k_2]$; 如此下去。

2、每到达一个新的点 Vk_j , 如果 $cost > Lmin$, 则进行定界, 终止该分支的分支操作, 返回到点 Vk_{j-1} , 继续其它分支的分支操作。

3、如果 j 又回到值 0, 则表明到达了终点, 完成了一个回路。

4、如果 $Lmin > cost$, 则令 $Lmin = cost$, 并记录经过的点的路径 $path(Vk_1, Vk_2 \dots Vk_j)$ 。

5、返回点 V_{k-1} ，取下一个分支，返回(2)，以新的 Lmin 作为比较的标准，进行新的分支操作。

4.1.3 移动储能车单次充放电优化调度求解

(一) 上层求解结果

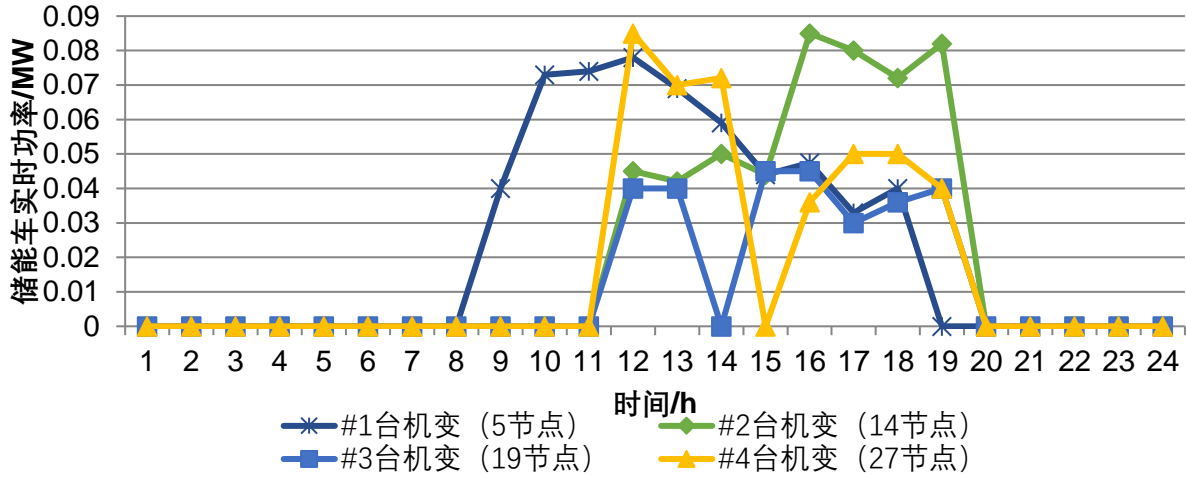


图 1 四个台机变节点对应储能车放电的负荷需求曲线

基于需求曲线可知，四个台机变节点在一个完整调度周期内的电量总需求矩阵 $D=[0.5572999999999999 \ 0.5000000000000000 \ 0.2759999999999999 \ 0.4030000000000000]$ ，基于需求规划对不同台机变所在节点储能车车型及数量作出如下规划：

需要注意的是，仿真是在 64 位 Windows 9.5 操作系统中通过 MATLAB R2022a 编程并调用 YALMIP 和 GUROBI 9.5 完成的，仿真时段为 24h。其他更详细的基础数据、程序源代码和仿真结果如下所示：

① 当 $C_1=0, C_2=1$ 时，基于以上模型求解上层时间尺度下的优化方案为：

★ Tips001: $N_2=[3,1,0,0]^{-1}; N_4=[0,1,1,1]^{-1}$

不难发现，鉴于优化模型的局限性，如果考虑实际充放电的经济效益，此优化模型求解可能存在：

☆ Tips002: $N_2=[1,3,0,0]^{-1}; N_4=[1,0,1,1]^{-1}$

☆ Tips003: $N_2=[1,1,2,0]^{-1}; N_4=[1,1,0,1]^{-1}$

☆ Tips004: $N_2=[1,1,0,2]^{-1}; N_4=[1,1,1,0]^{-1}$

② 当 $C_1=1, C_2=0$ 时，模型求解上层时间尺度下的优化方案为：

★ Tips005: $N_2=[0,1,0,0]^{-1}; N_4=[2,1,1,1]^{-1}$

③ 当 $C_1=C_2=1$ 时，基于以上模型求解上层时间尺度下的优化方案为：

★ Tips006: $N_2=[1,0,0,0]^{-1}; N_4=[1,2,1,1]^{-1}$

从传输成本角度考虑，MV#1 的行驶成本为 1 元/公里，MV#2 的行驶成本为 2 元/公里。因此具体运输成本需要结合下层路径规划来确定总路径成本。

总结以上分析，汇总四类可行性组合方案如下表所示：

表 1 满足欠负荷总能量的移动储能车全部组合类别

分类	节点 5	节点 14	节点 19	节点 27
1	MV2,MV1	MV1,MV2	MV2	MV2,MV1
2	MV2,MV1	MV1,MV2	MV2	MV2,MV2
3	MV2,MV2	MV1,MV2	MV2	MV2,MV1
4	MV2,MV2	MV1,MV2	MV2	MV2,MV2

注：区别于下文具体优化方案

基于以上四类分类依据，需对应设计储能车的具体移动方案，考虑极端场景下的典型代表，结合分类优化思想，汇总具体求解方案如下：

表 2 满足欠负荷总能量的移动储能车最优规划方案

方案	方案一				方案二				方案三			
台区变节点	#1 (5)	#2 (14)	#3 (19)	#4 (27)	#1 (5)	#2 (14)	#3 (19)	#4 (27)	#1 (5)	#2 (14)	#3 (19)	#4 (27)
MV1	3	1	0	0	1	3	0	0	1	1	2	0
MV2	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
方案	方案四				方案五				方案六			
台区变节点	#1 (5)	#2 (14)	#3 (19)	#4 (27)	#1 (5)	#2 (14)	#3 (19)	#4 (27)	#1 (5)	#2 (14)	#3 (19)	#4 (27)
MV1	1	1	0	2	0	1	0	0	1	0	0	0
MV2	1	1	1	0	2	1	1	1	1	2	1	1

注：每个节点下的数据表示从起点出发固定分配给各台区变的储能车方案，以及分配的先后顺序。

同时，为便于后文灵敏度分析，考虑极端场景下的欠负荷需求，特设置对应方案七，具体表述为：

表 3 对比移动储能车最优规划方案

方案	方案七(对比)			
台区变节点	#1(5)	#2(14)	#3(19)	#4(27)
MV1	3	0	0	2
MV2	0	0	1	0

从传输成本角度考虑，MV#1 的行驶成本为 1 元/公里，MV#2 的行驶成本为 2 元/公里。因此具体运输成本需要结合下层路径规划来确定总路径成本。

（二）下层求解结果

求得加权图 G 任意两点之间的最短距离，结果如图所示：

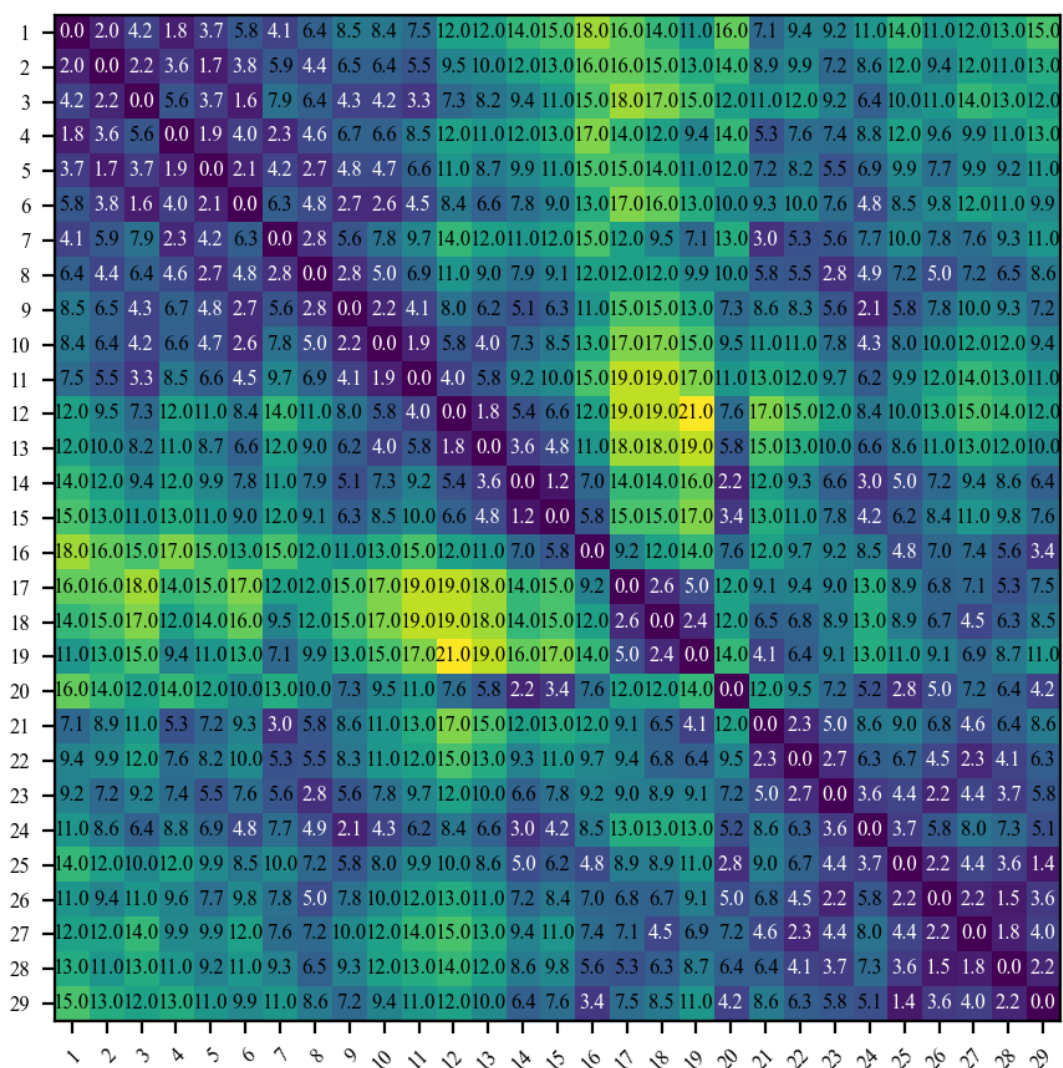


图2 Floyd 算法优化后任意两节点间的最短距离

分析：不难发现，Floyd 距离矩阵明显为斜对称矩阵，经验证，采用 Floyd 算法与目前广泛采用的 Dijkstra 算法相比，结果一致，符合实际情况。并且，Floyd 算法相比对于 Dijkstra 算法对于复杂节点网络的适用性及求解性能更优，因此，最终选择 Floyd 算法求解。

储能车实时充放电电价：

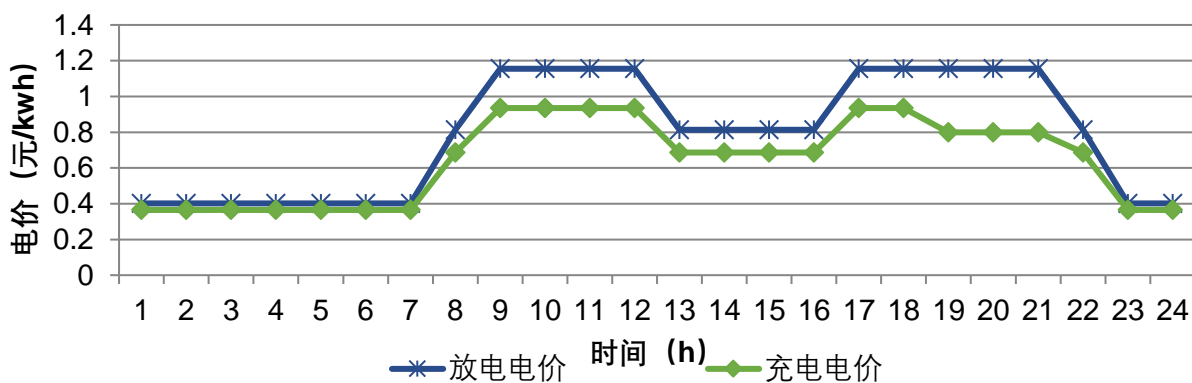


图3 储能车实时充放电电价

其中，实际场景下必须符合一类、二类负荷优先级的要求，也即一、二类负荷用户不可以断电，因此设计的调度方案必须严格按照 5、19 和 27 台机变节点的负荷要求进行放电，因此放电的实时性在负荷要求下无法体现出最优的理念。相比之下，充电电价也是实时电价，可以设计储能车尽可能在充电电价最低时进行充电规划，实现充放电整体效益最优。但是，充电效益最优化必须满足原模型的“硬约束”。

通过分支节界定方法，结合 Folyd 算法后的两节点间最短路径矩阵，求解出最短路径规划。

基于以上分析，求解问题一不同方案下的储能车调度结果：

表 4 方案结果汇总表

方案	台区变节点	MV1	MV2	储能车行驶路径	道路成本	总成本	充放电收益
方案一	#1 (5)	3	0	①→⑤→⑥→①	34.8	243.2	405.317
	#2 (14)	1	1	MV1: ①→⑭→⑬→① MV2: ①→⑭→⑳→⑬→①	107.6		
	#3 (19)	0	1	①→⑲→㉒→①	54		
	#4 (27)	0	1	①→㉓→㉒→①	46.8		
方案二	#1 (5)	1	1	MV1: ①→⑤→㉓→⑥→① MV2: ①→⑤→⑥→①	54.6	244.2	388.172
	#2 (14)	3	0	①→⑭→⑬→①	88.8		
	#3 (19)	0	1	①→⑲→㉒→①	54		
	#4 (27)	0	1	①→㉓→㉒→①	46.8		
方案三	#1 (5)	1	1	MV1: ①→⑤→㉓→⑥→① MV2: ①→⑤→⑥→①	54.6	244.2	383.717
	#2 (14)	1	1	①→⑭→⑬→①	88.8		
	#3 (19)	2	0	①→⑲→㉒→①	54		
	#4 (27)	0	1	①→㉓→㉒→①	46.8		
方案四	#1 (5)	1	1	MV1: ①→⑤→㉓→⑥→① MV2: ①→⑤→⑥→①	54.6	244.2	384.717
	#2 (14)	1	1	①→⑭→⑬→①	88.8		
	#3 (19)	0	1	①→⑲→㉒→①	54		
	#4 (27)	2	0	①→㉓→㉒→①	46.8		
方案五	#1 (5)	0	2	MV2-1: ①→⑤→㉓→⑥→① MV2-2: ①→⑤→⑥→①	66.2	255.8	249.935

	#2 (14)	1	1	①→⑭→⑬→①	88.8		
	#3 (19)	0	1	①→⑲→㉓→①	54		
	#4 (27)	0	1	①→㉓→㉓→①	46.8		
方案六	#1 (5)	1	1	MV1: ①→⑤→㉓→⑥→① MV2: ①→⑤→⑥→①	54.6	273.8	325.788
	#2 (14)	0	2	①→⑭→⑬→①	118.4		
	#3 (19)	0	1	①→⑲→㉓→①	54		
	#4 (27)	0	1	①→㉓→㉓→①	46.8		
方案七 (对比)	#1 (5)	3	0	MV1-1: ①→⑤→㉓→⑥→① MV1-(2~3): ①→⑤→⑥→①	54.8	155.4	325.788
	#2 (14)	0	0	①→⑭→⑬→①	0		
	#3 (19)	0	1	①→⑲→㉓→①	54		
	#4 (27)	2	0	①→㉓→㉓→①	46.8		

备注：为简要说明，储能车路径表中只给出了起始节点、台区变和充电桩这几个关键节点；标红方案为最优方案。

分析：不难发现，方案一的综合效益最优。但是，考虑到模型约束条件中对于“移动储能车进入台区后以不超过额定功率进行放电”这一“硬约束”的要求，而4个台区变对应实际电量需求中5节点、143节点、27节点均需满足至少一辆100kW额定功率的移动储能车。基于此，需要排除方案一、方案二、方案四和对比方案七的可选性。最终，确定最优方案为方案三。以下对方案三的移动储能车调度方案（行驶路径、调度时间和充电时间等）结果进行详细说明。

其中，移动储能车一个调度周期内（24h）内的实时功率如下图所示：

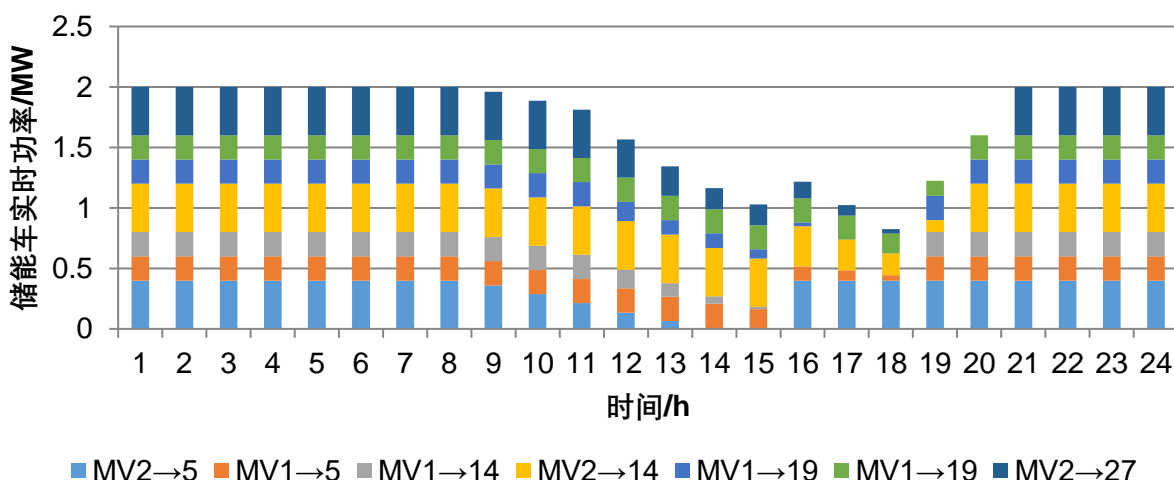


图4 储能车能量状态

表 5 储能车能量状态（实时数据）

储能车 时间	MV2→5	MV1→5	MV1→14	MV2→14	MV1→19	MV1→19	MV2+MV1 →27
1-8	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4
9	0.36	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4
10	0.287	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4
11	0.213	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4
12	0.135	0.2	0.155	0.4	0.16	0.2	0.315
13	0.066	0.2	0.113	0.4	0.12	0.2	0.245
14	0.007	0.2	0.063	0.4	0.12	0.2	0.173
15	0	0.163	0.019	0.4	0.075	0.2	0.173
16	0.4	0.1156	0	0.334	0.03	0.2	0.137
17	0.4	0.0827	0	0.254	5.16948E-16	0.2	0.087
18	0.4	0.0427	0	0.182	0	0.164	0.037
19	0.4	0.2	0.2	0.1	0.2	0.124	0
20	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2 (↗)	0.003
21	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4
22-24	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4

方案一下各个移动储能车一个调度周期内（24h）内的运动情况如下表所示：

表 6 移动储能车运动情况

储能车 时间	MV2→5	MV1→5	MV1→14	MV2→14	MV1→19	MV1→19	MV2+MV1 →27
8	→	→	→	→	→	→	→
9	0.36	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
10	0.287	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
11	0.213	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
12	0.135	⊙	0.155	⊙	0.16	⊙	0.315
13	0.066	⊙	0.113	⊙	0.12	⊙	0.245
14	0.007	⊙	0.063	⊙	0.12	⊙	0.173
15	0	0.163	0.019	⊙	0.075	⊙	0.173
16	0.4	0.1156	0	0.334	0.03	⊙	0.137
17	←	0.0827	0	0.254	5.16948E-16	⊙	0.087
18	←	0.0427	0	0.182	0	0.164	0.037
19	←	0.2	0.2	0.1	0.2	0.124	0
20	←	←	←	0.4	←	0.2 (↗)	0.003

21	←	←	←	←	←	←	0.4
1-7 22-24	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙

注：→ 表示前往放电行驶中；⊙表示停止中；←表示返航行驶中

方案一下各个移动储能车一个调度周期内（24h）内的充放电调度数据如下图所示：

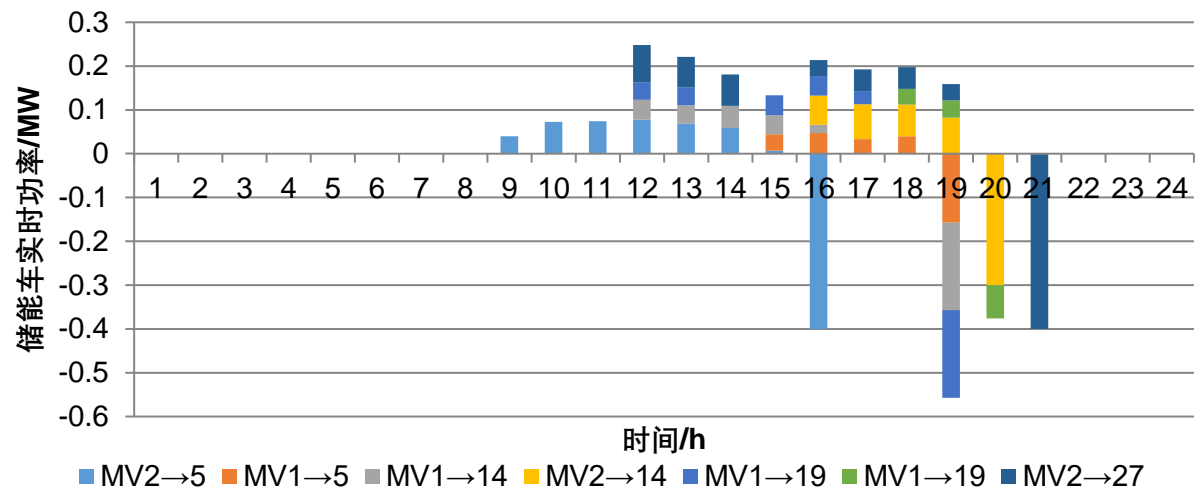


图 5 储能车实时充放电情况

表 7 储能车充电量（实时数据）

储能车 时间	MV2→5	MV1→5	MV1→14	MV2→14	MV1→19	MV1→19	MV2+MV1 →27
1-8	0	0	0	0	0	0	0
9	0.04	0	0	0	0	0	0
10	0.073	0	0	0	0	0	0
11	0.074	0	0	0	0	0	0
12	0.078	0	0.045	0	0.04	0	0.085
13	0.069	0	0.042	0	0.04	0	0.07
14	0.059	0	0.05	0	0	0	0.072
15	0.007	0.037	0.044	0	0.045	0	0
16	-0.4	0.0474	0.019	0.066	0.045	0	0.036
17	0	0.0329	0	0.08	0.03	0	0.05
18	0	0.04	0	0.072	5.16948E-16	0.036	0.05
19	0	-0.1573	-0.2	0.082	-0.2	0.04	0.037
20	0	0	0	-0.3	0	-0.076	0
21	0	0	0	0	0	0	-0.4
22-24	0	0	0	0	0	0	0

4.2 移动储能车循环充放电优化调度问题

4.2.1 循环充放电调度模型

问题二的求解实际上是在问题一基础上引入光伏充电、增加目标函数和取消充放电次数约束。光伏充电的引用，使得充电成本降低，但被限制了时间段和充电功率。与此同时，使得在派出移动储能车最少的前提下，按照客户优先级确保满足各类用户的用电需求，需要增加移动储能车最少作为目标函数。不限制充放电次数可以允许同一辆 MV 多次循环使用，增加了 MV 的调度复杂度。通过建立移动储能车的优化配置和调度模型，采用动态调度的方法进行求解，得到储能车经济效益、移动储能车出行数量、移动储能车行驶路径与对应时刻。

（一）决策变量

第二问的决策变量实际上是延续第一问中的决策变量，为避免重复性，此处不再具体给出。

（二）目标函数与约束条件

在问题一目标函数基础上，将派出移动储能车最少作为新增目标函数：

$$\min \sum_{i=1}^4 \text{len}(X_i) \quad (20)$$

以此为第一目标，决策变量 X_{14} 为空集，不安排车辆，针对节点 5, 19, 27 进行移动储能车的动态调度。

由原来的单目标调度问题变为双目标调度问题。依然采用双层求解的方法，设派出移动储能车数量最少最为第一目标，以经济效益最优作为第二目标。

取消移动储能车只能充放电一次的约束，取消每辆移动储能车的标志位。

$$s.t. \begin{cases} L_i^t = P_i + P_{mvi}^t \\ E_{MVi} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \cdots & 24 \\ S_{MVi} & S_{MVi} & \cdots & S_{MVi} \end{bmatrix} \quad i=1,2 \\ P_i \leq S * 0.8 \\ R_x = [1 \cdots 1] \\ \begin{cases} L_i^t = P_i + P_{mvi}^t & i=5,19,27 \\ L_i^t \leq P_i + P_{mvi}^t & i=14 \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

4.2.2 模型求解

（一）第一目标求解

1. 求解步骤

在问题一基础上，采用动态调度的方法进行求解。

Step1: 计算在不安排三类用户移动储能车的所有调配方案。

Step1: 按照用户优先级和用户用电需求开始派车，第一辆车从节点 1 开始派出。

Step2: 根据预测负荷数据，每个节点欠负荷时判断调用已派出移动储能车，还是从节点 1 派出新储能车。调配原则设定为，在保证方案派车的情况下，每个台变区是否可以从其他台变区节点派车；如果可以，则优先从台变区派车，此时至多增加一辆移动储能车，便可实现至少两个节点的能量调度。

Step3: 对放电车辆进行充电调度安排。

Step4: 放电结束计算派出移动储能车数量和每个时刻移动储能车位置、能量的状态。

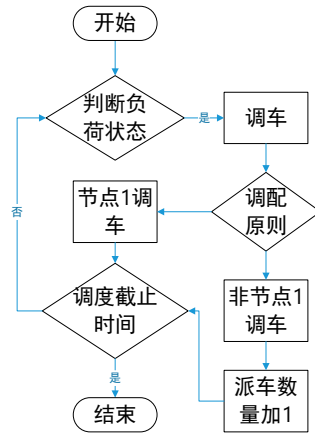


图6 第一目标求解流程图

2. 求解结果

表8 初步调度方案

方案	节点 5	节点 14	节点 19	节点 27
1	MV2, MV1	无	MV2	MV2, MV1
2	MV2, MV1	无	MV2	MV2, MV2
3	MV2, MV2	无	MV2	MV2, MV1
4	MV2, MV2	无	MV2	MV2, MV2

在初步调度方案基础上，计算出派出移动储能车数量最少的具体方案。

表9 初步优化调度方案

方案	节点 5	节点 14	节点 19	节点 27
1	MV2(1), MV1(1)	无	MV2(1)	MV2(1), MV2(5)
2	MV2(1), MV2(1)	无	MV2(1)	MV2(1), MV2(5)

表9中，MV2(1)，表示分配一辆MV2类型移动储能车，来自于节点1。

(二) 第二目标求解

1. 求解步骤

求解方案类似于问题一，“通过分支节界定方法，结合Folyd算法后的两节点间最短路径矩阵，求解出最短路径规划”的思想。但是建模过程中已经提及增加了光伏出力和连续多次充放电情况下的路径规划。

考虑实际建模过程是依据“上层：固定车辆分配方案前往对应台区变-下层：基于充放电效益进行路径优化”的思路，三类负荷考虑依据优先级断电情况下车辆配置数量更小，因而模型采纳以下方案：

② 当 $C_1 = 1, C_2 = 0$ 时，并且加入三类负荷可以停电的优先级约束，模型求解上层时间尺度下的优化方案为：

$$\star \text{ Tips005: } N_2 = [0,0,0,0]^{-1}; N_4 = [2,0,1,1]^{-1}$$

对应类似于问题一中优化模型中设计的方案五。

方案五：200kw*0+400kw*4, $N_2=0$; 200kw 储能车数量， $N_4=4$; 400kw 储能车数量。5、14、19、27 这四个节点依次为:4+4|0|4|4

但是，问题二考虑到充电站配置光伏，发电可以自发自用、储能车允许多次充放电和三类负荷可实现最低这两个条件，所以问题二的方案八与问题一的方案五优化方式不

同。体现在下层路径规划中，分支界定的方法尽可能调整充电计划，实现低电价光伏发电的充分使用。

结合以上配置条件，需要结合分支界定法与调度策略对充放电进一步进行详细规划。

2. 求解结果

基于问题一求解出的最优储能车调度结果，对应方案三：

表 10 方案结果汇总表

方案	台区变节点	MV1	MV2	储能车行驶路径	道路成本	总成本	充放电收益
方案五 (问题一)	#1 (5)	0	2	MV2-1: ①→⑤→②⑦→⑥→① MV2-2: ①→⑤→⑥→①	66.2	255.8	249.935
	#2 (14)	1	1	①→⑭→⑬→①	88.8		
	#3 (19)	0	1	①→⑲→⑳→①	54		
	#4 (27)	0	1	①→⑳→㉒→①	46.8		
方案八 (问题二)	#1 (5)	0	2	MV2-1: ①→⑤→②⑦→⑥→① MV2-2: ①→⑤→⑥→①	66.2	167	473.969
	#2 (14)	0	0		0		
	#3 (19)	0	1	①→⑲→⑳→①	54		
	#4 (27)	0	1	①→⑳→㉒→①	46.8		

备注：为简要说明，储能车路径表中只给出了起始节点、台区变和充电桩这几个关键节点；标红方案为最优方案。

分析：不难发现，加入光伏配置的方案八的综合效益最优。对方案八的移动储能车调度方案（行驶路径、调度时间和充电时间等）结果进行详细说明。

其中，移动储能车一个调度周期内（24h）内的实时功率如下图所示：

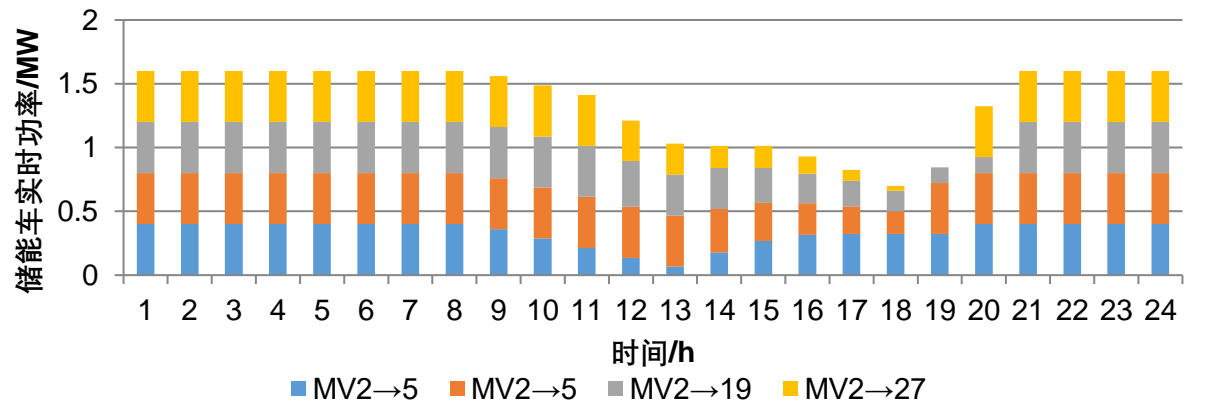


图 7 储能车能量状态

表 11 储能车能量状态（实时数据）

储能车 时间	MV2→5	MV2→5	MV2→19	MV2→27
1-8	0.4	0.4	0.4	0.4
9	0.36	0.4	0.4	0.4
10	0.287	0.4	0.4	0.4
11	0.213	0.4	0.4	0.4
12	0.135	0.4	0.36	0.315
13	0.066	0.4	0.32	0.245
14	0.178413 ↑	0.341	0.32	0.173
15	0.2687 ↑	0.297	0.275	0.173
16	0.314824 ↑	0.2496	0.23	0.137
17	0.322047 ↑	0.2167	0.2	0.087
18	0.322047	0.1767	0.164	0.037
19	0.322047 (↗)	0.4	0.124	0
20	0.4	0.4	0.124	0.4
21	0.4	0.4	0.4	0.4
22-24	0.4	0.4	0.4	0.4

方案八下各个移动储能车一个调度周期内（24h）内的运动情况如下表所示：

表 12 移动储能车运动情况

储能车 时间	MV2→5	MV2→5	MV2→19	MV2→27
8	→	→	→	→
9	0.36	→	→	→
10	0.287	→	→	→
11	0.213	→	→	→
12	0.135	→	0.36	0.315
13	0.066	→	0.32	0.245
14	0.178413 ↑	0.341	0.32	0.173
15	0.2687 ↑	0.297	0.275	0.173
16	0.314824 ↑	0.2496	0.23	0.137
17	0.322047 ↑	0.2167	0.2	0.087
18	0.322047	0.1767	0.164	0.037
19	0.322047 (↗)	0.4	0.124	0
20	0.4	←	0.124	0.4

21	←	⊙	0.4	←
1-7 22-24	⊙	⊙	←/⊙	⊙

注：→ 表示前往放电行驶中；⊙表示停止中；←表示返航行驶中

方案八下各个移动储能车一个调度周期内（24h）内的充放电调度数据如下图所示：

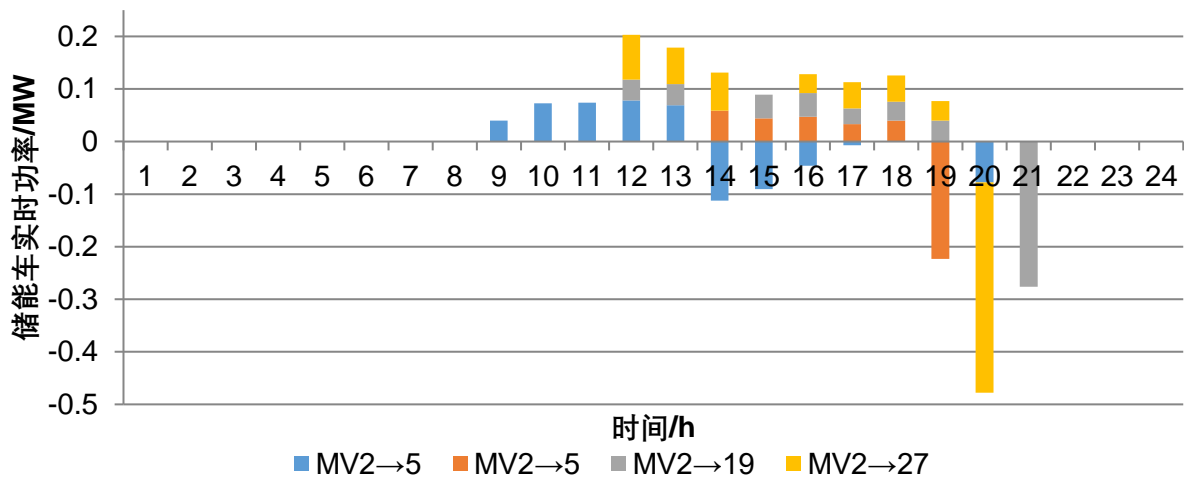


图 8 储能车实时充放电情况

表 13 储能车充放电量（实时数据）

储能车 时间	MV2→5	MV2→5	MV2→19	MV2→27
1-8	0	0	0	0
9	0.04	0	0	0
10	0.073	0	0	0
11	0.074	0	0	0
12	0.078	0	0.04	0.085
13	0.069	0	0.04	0.07
14	-0.11241	0.059	0	0.072
15	-0.09029	0.044	0.045	0
16	-0.04612	0.0474	0.045	0.036
17	-0.00722	0.0329	0.03	0.05
18	0	0.04	0.036	0.05
19	0	-0.2233	0.04	0.037
20	-0.07795	0	0	-0.4
21	0	0	-0.276	0
22-24	0	0	0	0

4.3 考虑不确定因素的移动储能车优化调度问题

4.3.1 不确定因素移动储能车调度模型

问题三的求解实际上是在问题一基础上考虑了不确定性的影响，增加了下层调度规划中的充电时间约束。不确定性的考虑，使得储能车的充电并不像问题一中选择路径最优的充电站并且到了充电站就能立马充上电，而是需要考虑排队等待。根据等待成本和路径成本，具体选择是去路径短但需要排队的充电站还是去路径远但不需排队的充电站。通过建立储能车充电排队等待模型，确定等待成本和路径成本，之后同问题一的求解过程一样，得到储能车经济效益、移动储能车出行数量、移动储能车行驶路径与对应时刻。

问题三的决策变量、目标函数以及约束条件延续了问题一的思路，在此不做赘述。所不同的是在求解过程中，考虑等待时间后分时电价的不同而导致的充电成本不同，以及选择去不同的充电站的路径不同而导致的路径成本改变。

4.3.2 模型求解

(一) 求解步骤

1、排队模型的建立

关于储能车充电可能等待时间 W_q 的估计值，取决于车辆到达充电站的规律和充电时长。

a、储能车的平均到达率

储能车到达充电站的时间间隔符合泊松分布，其平均到达率 λ 。

b、储能车的平均充电时长

两类储能车的充电时长是不一样的，对于 MV1 和 MV2，平均服务率分别为 $\mu_1 = 2$ 辆/小时， $\mu_2 = 1$ 辆/小时。为求平均充电时长，根据不同方案，假设 MV1 有 n_1 辆，MV1 有 n_2 辆，则平均服务率 $\mu = \frac{n_1+n_2}{n_1/\mu_1+n_2/\mu_2}$ 。

c、储能车的平均等待时间

可以认为储能车到排队等候充电过程满足储能车到达充电站的时间间隔符合泊松分布，充电时长服从负指数分布， c 个服务台(充电点)，顾客源和系统容量无限，以及先到先服务的排队模型： $M/M/c/\infty/\infty/FCFS$ 。

对于此模型，系统稳态概率

$$P_n = \begin{cases} \frac{1}{n!} \rho^n P_0, n \leq s \\ \frac{1}{s! s^{n-s}} \rho^n P_0, n > s \end{cases} \quad (22)$$

$$\text{其中 } \rho = \frac{\lambda}{\mu}, \quad P_0 = \left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{1}{n!} \rho^n + \frac{1}{s!} \frac{1}{1-\rho} \rho^s \right]^{-1}.$$

P_n 表示在平衡条件下系统中储能车数为 n 的概率，当 $n \geq s$ 时，即系统中车辆数大于或等于充电站个数，这时再来的车辆必须等待，因此记：

$$c(s, \rho) = \frac{\rho^s}{s!(1 - \rho_s)} P_0 \quad (23)$$

其中 $\rho^s = \frac{\rho}{s} = \frac{\lambda}{s\mu}$ ， $c(s, \rho)$ 表示的是储能车需要等待的概率。对多服务台等待制排队系统，由已得到的平稳分布可得平均排队长 L_q 为：

$$L_q = \frac{c(s, \rho)\rho_s}{1 - \rho_s} \quad (24)$$

平均队长 L_s 为：

$$L_s = L_q + \rho \quad (25)$$

由此可以算出储能车平均等待的时间 W_q ：

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (26)$$

总的花费时间 W_s ：

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda_e} \quad (27)$$

2、交通拥堵模型的建立

交通路况的不确定性如下表所示。

表 14 城市拥堵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
[0.1,3)	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

为充分考虑随机性，假设城市拥堵系数符合正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ ，对于不同的时间段，都取均值作为该拥堵程度的拥堵系数 α ， α 如下所示：

$$\alpha(t) = \begin{cases} 0.85, & \text{不拥堵} \\ 0.6, & \text{1级拥堵} \\ 0.4, & \text{2级拥堵} \\ 0.2, & \text{3级拥堵} \\ 0.05, & \text{4级拥堵} \end{cases} \quad (28)$$

由此可以算出储能车行驶花费的时间为 $T_x = h_x / (\alpha(t) * v)$ ， h_x 代表储能车到各个充电站的行驶距离，如下表所示， v 代表储能车行驶速度。

表 15 台区变节点到充电站节点的最短距离

台区变节点 \ 充电站节点	#1 (6)	#2 (13)	#4 (18)	#4 (22)
#1 (5)	2.1	7.8	13	12
#2 (14)	8.7	3.6	19	13
#3 (19)	14	14	2.4	4.5
#4 (27)	7.2	12	4.1	4.6

储能车从台区变到充电站的时间 $T_x = h_x / \alpha(t)v$ ，在不同拥挤程度下， T 如下表所示：

表 16 不同拥堵情况下储能车从台区变到充电站的时间 T_x

道路拥堵情况 \ 路径	不拥堵	1 级拥堵	2 级拥堵	3 级拥堵	4 级拥堵
(5) → (6)	0.08235	0.11667	0.175	0.35	1.4
(5) → (13)	0.30588	0.43333	0.65	1.3	5.2
(5) → (18)	0.5098	0.72222	1.08333	2.16667	8.66667
(5) → (22)	0.47059	0.66667	1	2	8
(14) → (6)	0.34118	0.48333	0.725	1.45	5.8
(14) → (13)	0.14118	0.2	0.3	0.6	2.4
(14) → (18)	0.7451	1.05556	1.58333	3.16667	12.6667
(14) → (22)	0.5098	0.72222	1.08333	2.16667	8.66667
(19) → (6)	0.54902	0.77778	1.16667	2.33333	9.33333
(19) → (13)	0.54902	0.77778	1.16667	2.33333	9.33333
(19) → (18)	0.09412	0.13333	0.2	0.4	1.6
(19) → (22)	0.17647	0.25	0.375	0.75	3
(27) → (6)	0.28235	0.4	0.6	1.2	4.8
(27) → (13)	0.47059	0.66667	1	2	8
(27) → (18)	0.16078	0.22778	0.34167	0.68333	2.73333
(27) → (22)	0.18039	0.25556	0.38333	0.76667	3.06667

3、决策模型

根据前述分析，储能车在实际情况中可能会面临行驶目的地距离近的充电站排队等候时间长，距离远的充电站无需排队等候充电的情况。为判断储能车具体去哪个充电站充电，需对储能车去不同充电站的充电成本路径成本进行比较。具体决策方式与问题一一致。

充电成本的计算公式还是同问题一中描述的一样，不同的是考虑等待时间后，实时电价可能发生改变，因此充电成本不同。路径成本由储能车的行驶路径决定，而储能车选择去不同的充电站后最优行驶路径发生改变，但最优路径均可确定，因此相应的路径成本即可求出。

基于问题一，问题考虑的模型约束条件中对于“移动储能车进入台区后以不超过额定功率进行放电”这一“硬约束”的要求，反映在4个台区变表现为：对应实际电量需求中5节点、14节点、27节点均需满足至少一辆100kW额定功率的移动储能车。最终排除方案一、方案二、方案四和对比方案七的可选性。因此，确定剩余方案为方案三、方案五和方案六。并且已经证明问题在方案三下的移动储能车调度方案最优（行驶路径、调度时间和充电时间等）。

（二）求解结果

针对问题一中提出的三种方案，即方案三总共调度4辆MV1和3辆MV2；方案五六总共调度1辆MV1和5辆MV2。通过排队模型，在lingo中求解出系统的各项运行指标如下表所示：

表 17 排队模型的运行指标

方案 参数	方案三	方案五、六
平均服务时间 μ	7/5	6/5.5
排队等候时间 W_q	0.548	0.300
总的等候时间 W_s	1.262	1.216

注：充电时间= $W_s - W_q$ 。

考虑到问题三是基于问题一对模型条件的进一步拓展，所以初始方案参考问题一的最优选择方案，也即方案三，并且基于排队论模型下的求解结果易知：相比于方案三，方案五和方案六无法实现总收益最优（等待时延较长），因此问题三最终选择基于问题一方案三的模型优化，并进行对比，结果表示如下：

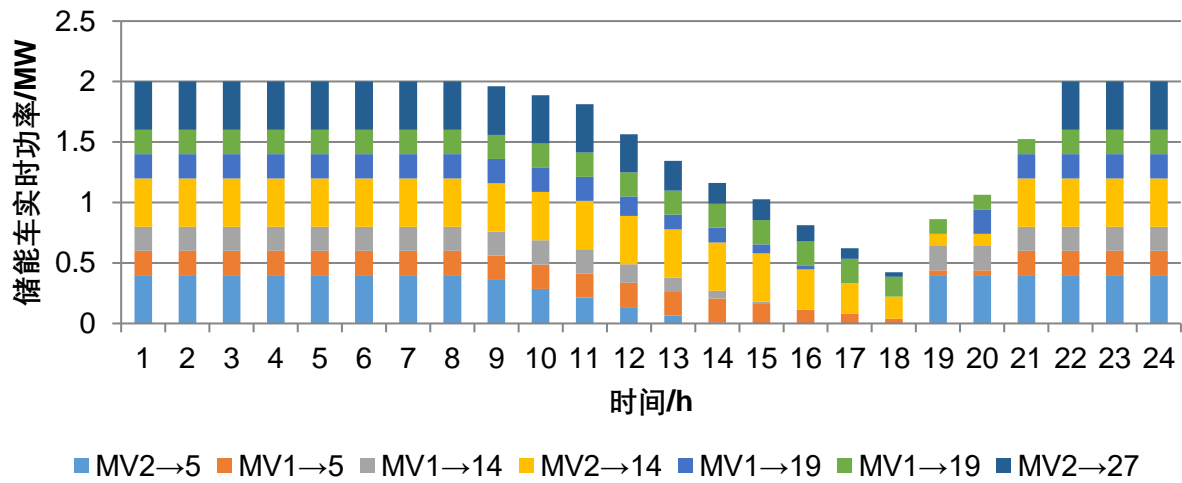
表 18 方案结果汇总表

方案	台区变节点	MV1	MV2	储能车行驶路径	道路成本	总成本	充放电收益
方案三 (问题一)	#1 (5)	1	1	MV1: ①→⑤→②⑦→⑥→① MV2: ①→⑤→⑥→①	54.6	244.2	383.717
	#2 (14)	1	1	①→⑭→⑬→①	88.8		
	#3 (19)	2	0	①→⑲→⑳→①	54		
	#4 (27)	0	1	①→⑳→㉑→①	46.8		
方案九 (问题三)	#1 (5)	1	1	MV1: ①→⑤→②⑦→⑥→① MV2: ①→⑤→⑥→①	54.6	244.2	413.947
	#2 (14)	1	1	①→⑭→⑬→①	88.8		
	#3 (19)	2	0	①→⑲→⑳→①	54		
	#4 (27)	0	1	①→⑳→㉑→①	46.8		

备注：为简要说明，储能车路径表中只给出了起始节点、台区变和充电桩这几个关键节点；标红方案为最优方案。

对比可知，在计及充电时间延迟不确定性以及道路交通拥挤情况下，方案九收益会略高于不考虑这些潜在不确定因素下的“问题一方案三”的总效益，具体解释为题目所提及的：“移动储能车在实际情况中可能会面临行驶目的地距离近的充电站排队等候时间长，距离远的充电站无需排队等候充电的情况”，因此，再考虑到这些潜在的优化路径导致充放电效益的提升，而路径成本不变，继而表现为总收益的提升。

其中，方案九下移动储能车一个调度周期内（24h）内的实时功率如下图所示：



储能车 时间	MV2→5	MV1→5	MV1→14	MV2→14	MV1→19	MV1→19	MV2+MV1 →27
1-8	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4
9	0.36	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4
10	0.287	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4
11	0.213	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4
12	0.135	0.2	0.155	0.4	0.16	0.2	0.315
13	0.066	0.2	0.113	0.4	0.12	0.2	0.245
14	0.007 (≡)	0.2	0.063	0.4	0.12	0.2	0.173
15	0	0.16	0.019	0.4	0.075	0.2	0.173
16	0	0.1126	0	0.334	0.03	0.2	0.137
17	0	0.0797	0	0.254	5.17E-16	0.2	0.087
18	0	0.0397	0	0.182	0	0.164	0.037
19	0.4	0.0397	0.2	0.1	0	0.124	0
20	0.4	0.0397	0.2	0.1	0.2	0.124	0
21	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.124	0
22	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4
22-24	0.4	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4

方案一下各个移动储能车一个调度周期内（24h）内的运动情况如下表所示：

表 20 移动储能车运动情况

储能车 时间	MV2→5	MV1→5	MV1→14	MV2→14	MV1→19	MV1→19	MV2+MV1 →27
8	→	→	→	→	→	→	→
9	0.36	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
10	0.287	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
11	0.213	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
12	0.135	⊙	0.155	⊙	0.16	⊙	0.315
13	0.066	⊙	0.113	⊙	0.12	⊙	0.245
14	0.007 (↗)	⊙	0.063	⊙	0.12	⊙	0.173
15	0/⊙	0.16	0.019	0.4	0.075	⊙	0.173
16	0/⊙	0.1126	0/⊙	0.334	0.03	⊙	0.137
17	0/←	0.0797	0/←	0.254	0/⊙	⊙	0.087
18	0/←	0.0397	0/←	0.182	0/←	0.164	0.037
19	0.4	0.0397/←	0.2	0.1/←	0/←	0.124	<u>0.003</u>
20	←	0.0397/←	←	0.1/←	0.2	0.124/←	0/←
21	⊙	0.2	⊙	0.4	←	0.124/←	0/←
22	⊙	←	⊙	←	⊙	0.2	0.4
1-7 22-24	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	←-/⊙	←-/⊙

注：→ 表示前往放电行驶中；⊙表示停止中；←表示返航行驶中

方案一下各个移动储能车一个调度周期内（24h）内的充放电调度数据如下图所示：

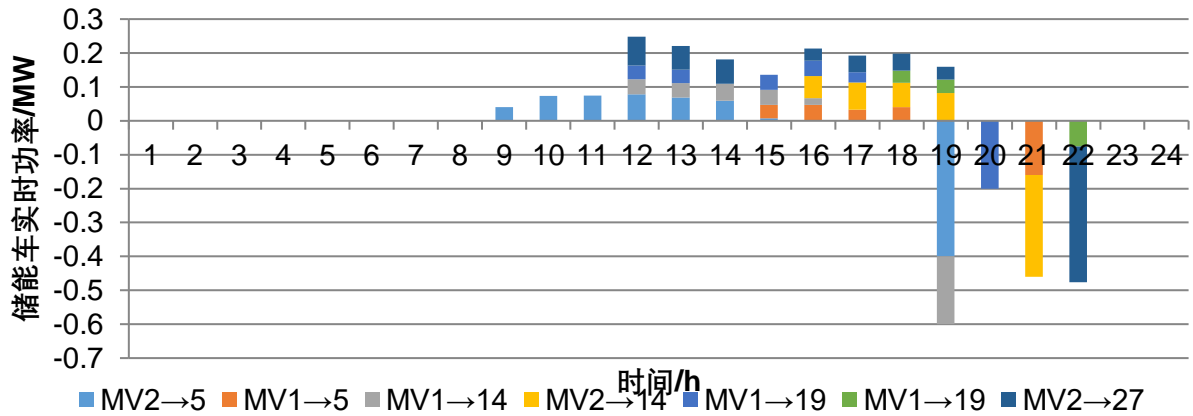


图 10 储能车实时充放电情况

表 21 储能车充放电量（实时数据）

储能车 时间	MV2→5	MV1→5	MV1→14	MV2→14	MV1→19	MV1→19	MV2+MV1 →27
1-8	0.04	0	0	0	0	0	0
9	0.073	0	0	0	0	0	0
10	0.074	0	0	0	0	0	0
11	0.078	0	0.045	0	0.04	0	0.085
12	0.069	0	0.042	0	0.04	0	0.07
13	0.059	0	0.05	0	0	0	0.072
14	0.007 (≈)	0.04	0.044	0	0.045	0	0
15	0	0.0474	0.019	0.066	0.045	0	0.036
16	0	0.0329	0	0.08	0.03	0	0.05
17	0	0.04	0	0.072	5.16948E-16	0.036	0.05
18	-0.4	0	-0.2	0.082	0	0.04	0.037
19	0	0	0	0	-0.2	0	0
20	0	-0.1603	0	-0.3	0	0	0
21	0	0	0	0	0	-0.076	-0.4
22-24	0.04	0	0	0	0	0	0

5 模型评价、推广与改进

5.1 模型的优点

- (1) 本文针对城市移动储能的调度的问题展开研究，建立调度优化模型，在时间和空间尺度上分双层进行求解，求解结果表明，本文建立的模型能够有效解决移动储能车调度问题，并得到合理的行驶路径、移动储能车与时间相关的位置与能量状态，以及最终的经济效益。
- (2) 建立的移动储能车动态调度模型可解释性强、考虑因素多，更贴合实际情况。
- (3) 基于本文构建的模型，设计双层求解法，通过排列组合、循环遍历、动态调度、Floyd 和分支定界等算法，采用 MATLAB 配合 Gurobi 和 Yalmip 框架求解，有效降低求解难度，算法难度的降低有效增强了模型的实用性。

5.2 模型的不足

- (1) 模型的细节众多，考虑因素多，导致可读性存在缺陷。
- (2) 问题数据量比较少，在大数据量、更复杂交通环境中，存在未知时间成本问题。

5.3 模型的推广与改进

本文从移动储能车调度出发，综合考虑移动储能车和城市本身约束条件，使模型有一定的应用价值。

- (1) 在问题一中各节点相互独立，初步求解调配模型，还可以将节点之间看作相互作用进行求解，达到节点间相互调配的结果。
- (2) 模型适配于未来智能低碳交通下的园区级别电动汽车充电调度。

参考文献

- [1] 黄博文, 黄甜. 移动储能车应用前景广阔[J]. 大众用电, 2020,35(08):57.
- [2] 李靖霞, 纪陵, 左建勋, 等. 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.
- [3] Wu J, Liu Y, Chen X, et al. Data-driven adjustable robust Day-ahead economic dispatch strategy considering uncertainties of wind power generation and electric vehicles[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022,138:107898.
- [4] 《运筹学》教材编写组. 运筹学.第4版[M]. 清华大学出版社, 2012.
- [5] 茆诗松, 程依明, 濮晓龙, 等. 概率论与数理统计教程第二版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011
- [6] 肖强, 何瑞春, 俞建宁, 等. 基于泊松分布的出租车合乘概率及等待时间建模[J]. 中国公路学报, 2018,31(05):151-159.
- [7] 苏又. 基于不同服务率的带休假策略的 M/M/c/m 排除模型[D]. 中南大学, 2012.
- [8] 姜启源, 谢金星, 叶俊. 数学模型.第4版[M]. 高等教育出版社, 2011.
- [9] 韩中庚. 数学建模方法及其应用-第2版[M]. 高等教育出版社, 2009.
- [10] 张家怡, 余晓养, 夏志乐. 基于排队论模型的机场出租车问题研究[J]. 大学数学, 2021,37(06):117-124.
- [11] Ma S, Xiang T, Hou K, et al. Spatial-temporal optimal dispatch of mobile energy storage for emergency power supply[J]. Energy Reports, 2022,8:322-329.
- [12] 肖凯超. 不同场景下的配电网移动储能规划与调度[D]. 浙江大学, 2021.
- [13] 卢晓珊, 何伟, 贺永金. 邮政运输网络中的邮路规划和邮车调度研究[J]. 数学的实践与认识, 2009,39(17):66-71.
- [14] Chen C, Xiao L, Duan S D, et al. Cooperative Optimization of Electric Vehicles in Microgrids Considering Across-Time-and-Space Energy Transmission[J]. IEEE transactions on industrial electronics (1982), 2019,66(2):1532-1542.

附录

附录 I: 主要程序/关键代码

代	操作系统: Windows 10 (家庭版)
码	编程语言: MATLAB 2022a (Yalmip 框架)、Excel、Lingo
环	数学求解器: Gurobi 9.5 (Academic version)
境	代码详见: Code.zip

部分代码清单 1Floyd 算法

```
Floyd.m

function [D,path,min1,path1]=floyd(a,start,terminal)
%D(i,j)表示i到j的最短路径, path(i,j)表示i到j之间的最短路径上顶点i的后继点。
%min1返回start和terminal之间的最短距离, path1返回start和terminal之间的最短路径
%a为带权邻接矩阵, start、terminal分别是起始点和终止点
clc
clear all
a=[0 2 inf 1.8 inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf
    inf inf inf inf inf;
  2 0 2.2 inf 1.7 inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf
    inf inf inf inf;
  inf 2.2 0 inf inf 1.6 inf inf inf inf 3.3 inf inf inf inf inf inf inf inf
    inf inf inf inf;
  1.8 inf inf 0 1.9 inf 2.3 inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf
    inf inf inf inf;
  inf 1.7 inf 1.9 0 2.1 inf 2.7 inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf
    inf inf inf inf;
  inf inf 1.6 inf 2.1 0 inf inf 2.7 2.6 inf inf inf inf inf inf inf inf inf
    inf inf inf inf;
  inf inf inf 2.3 inf inf 0 2.8 inf inf inf inf inf inf inf inf inf 3 inf
    inf inf inf inf;
  inf inf inf inf 2.7 inf 2.8 0 2.8 inf inf inf inf inf inf inf inf inf 2.8
    inf inf inf inf;
  inf inf inf inf inf 2.7 inf 2.8 0 2.2 inf inf inf inf inf inf inf inf inf
    inf inf inf inf;
  inf inf inf inf inf inf 2.6 inf inf 2.2 0 1.9 inf 4 inf inf inf inf inf
    inf inf inf inf;
  inf inf 3.3 inf inf inf inf inf inf 1.9 0 4 inf inf inf inf inf inf inf
    inf inf inf inf;
  inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf 4 0 1.8 inf 6.6 inf inf inf inf
    inf inf inf inf;
  inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf 1.8 0 3.6 inf inf inf inf
    inf inf inf inf;
  inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf 3.6 0 1.2 inf inf inf
    inf 2.2 inf inf inf 3 inf
    inf inf inf inf;
  inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf 6.6 inf 1.2 0 5.8
    inf inf inf inf inf inf
    inf inf inf inf;
  inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf 5.8 0 9.2 inf
    inf inf inf inf inf inf
    inf inf inf 3.4;
  inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf 9.2 0 2.6
    inf inf inf inf inf inf
    inf inf 5.3 inf;
  inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf inf 2.6 0
    2.4 inf inf inf inf inf inf
    inf 4.5 inf inf;]
```

[illegible]

```
D=a;n=size(D,1);path=zeros(n,n);
```

%n为顶点个数，生成D、path矩阵

```
%遍历一遍矩阵，初始化path矩阵，先将可以直接相连的点的path进行补充
```

```
for i=1:n
    for j=1:n
        if D(i,j)~=inf
            path(i,j)=j;
        end
    end
end
```

%三重遍历，查找是否有中继点可以使得路径缩短，若有则更新D、path矩阵

```
for k=1:n
    for i=1:n
        for j=1:n
            if D(i,k)+D(k,j)<D(i,j)
                D(i,j)=D(i,k)+D(k,j);
                path(i,j)=path(i,k);
            end
        end
    end
end
```

%这里演示了每一步的调整过程

 k, D, path

end

%判断输出参数是否为三个

```

if nargin==3
    min1=D(start,terminal);
    m(1)=start;
    i=1;
    path1=[ ];
    %根据path路径一步一步跳转找到具体路径，返回path1
    while path(m(i),terminal)~=terminal

```



```

        k=i+1;
        m(k)=path(m(i),terminal);
        i=i+1;
    end
    m(i+1)=terminal;
    path1=m;
end

```

部分代码清单 2 部分参数设计

```

clc
clear all;
%问题一求解
%%%%%储能车等数据%%%%%%%%%;
N=4;%储能车数量
Tj=4;%台机变和充电站节点数量;
Time=24;%时间尺度;
%% (24+1)*4矩阵
Data=[0.3757 0.71    0.5717 0.36757
0.4473 0.71    0.5658 0.4521
0.426  0.725  0.554  0.405
0.4189 0.744  0.5422 0.4177
0.4189 0.755  0.5481 0.41
0.426  0.774  0.5035 0.4033
0.4254 0.80.5248 0.4255
0.62   0.82   0.53051  0.488
0.68   0.85   0.5505 0.502
0.713  0.933  0.5741 0.534
0.714  0.948  0.58   0.568
0.718  1.005  0.68   0.685
0.709  1.002  0.68   0.67
0.699  1.01   0.64   0.672
0.684  1.004  0.685  0.6
0.6874 1.045  0.685  0.636
0.6729 1.04   0.67   0.65
0.68   1.032  0.676  0.65
0.51   1.042  0.68   0.64
0.4816 0.92   0.594  0.4816
0.4461 0.866  0.56   0.4461
0.3893 0.867  0.48   0.3893
0.3183 0.855  0.42   0.3183
0.3474 0.78   0.413  0.3474];% 台区变5（二类）、14（三类）、19（一类）、27（一类）位
置下的负荷要求：
%各自容量： 0.8   1.2   0.8   0.75
% 单位：兆瓦 MW
S=0.8.*[0.8   1.2 0.8 0.75];
Data1=ones(24,4);
% P1=zeros(24,4);
SData=(S).*Data1;
P1=Data-SData;
P1(P1<0)=0; %不足额定功率部分，储能车补充

```

```

Price=[0.4015    0.365
0.40150.365
0.40150.365
0.40150.365
0.40150.365
0.40150.365
0.814 0.687
1.155 0.935
1.155 0.935
1.155 0.935
1.155 0.935
0.814 0.687
0.814 0.687
0.814 0.687
0.814 0.687
1.155 0.935
1.155 0.935
1.155 0.8
1.155 0.8
1.155 0.8
0.814 0.687
0.40150.365
0.40150.365];%充放电电价，元/KWh

```

```

PV=[0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 0 0
3.43 4.51 3.347 0.539
23.58732.194 20.646 19.671
50.73 75.998 54.066 47.967
73.695100.641 72.455 69.483
92.989102.623 76.674 77.038
110.696 89.276 70.932 74.775
112.413 73.87 73.535 73.903
90.28753.17 57.327 55.363
46.12428.215 27.276 24.68
7.223 4.369 3.921 3.527
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 0 0];% 单位KW

```

```
%% 建模求解
```

```
Nmax=5;%每类储能车最大数量;
```

```
PPc=sdpvar(Time,N);%储能车充电调度功率;
```

```
PPd=sdpvar(Time,N);%储能车放电调度功率;
```

```
PPc1=zeros(Time,N);
```

```
PPd1=zeros(Time,N);
```

```

for i=1:Time
    for j=1:N
        PPc1(i,j)=Data(i,2)*PPc(i,j);%充电
        PPd1(i,j)=Data(i,1)*PPd(i,j);%放电
    end
end;
f1=sum(sum(PPd1-PPc1));%充放电成本;

f5=1000*sum(sum(Pc*Nc.*D-Pd*Nd.*E).*w);%车主的充电成本;
f=f1+f2;
%%%%%%%%%%%%约束条件%%%%%%%%%%%%%;
C=[S>=0,N>=0];
%等式约束;
for k=1:Tj
    for i=1:Time
        C=[C,PP(i,k)+Data(25,k)*0.8==Data(i,k)];
    end
end
%可充放电的电动汽车数量限制
C=[C,N<=Nmax];
%充放电需求约束
C=[C,sum(Nc)==Ncsummax,sum(Nd)==Ndsummax];

%%求解模型%%
ops=sdpssettings('solver','gurobi');
result = solvesdp(C,f,ops);

%%结果表示%%
Price=[double(f1),double(f2)];
Price_total=double(f)

```

部分代码清单 3 排队模型 Lingo 语言设计

```

model:
s=4;lambda=4.5;mu=7/5;
rho=lambda/(mu*s);
P_wait=@peb(s*rho,s);          !P_wait可以直接被算出来;
p0=6*(1-rho)*P_wait/(rho*s)^3;  !通过P_wait来计算p0;
L_q=P_wait*rho/(1-rho);
L_s=L_q+s*rho;
W_q=L_q/lambda;
W_s=L_s/lambda;
Sba=L_s-L_q;
yinta=Sba/s;
Q=1;
A=lambda;
p2=(s*rho)^2*p0/2;
p3=(s*rho)^3*p0/6;
p4=(s*rho)^4*p0/(4*3*2*3);

```

end