

# 智能车库中电动汽车有序充电

中期报告

PI: 王静

更新日期: 2022 年 7 月 14 日



控制科学与工程学院  
山东大学

2022

# 目录

## 第一章 基于整数规划的电动汽车

最优有序充电算法	1
1.1 引言	1
1.2 电动汽车有序充电优化模型	3
1.2.1 问题背景设定	3
1.2.1.1 离散时间系统	3
1.2.1.2 充电桩与电动汽车充电任务	4
1.2.1.3 充电费用计价体系	5
1.2.1.4 有序充电系统的设计原则	5
1.2.2 目标函数	5
1.2.3 约束	6
1.2.3.1 充电时间约束	7
1.2.3.2 电池 SOC 约束	7
1.2.3.3 线路负荷和三相不平衡度约束	8
1.2.4 优化问题完整形式	10
1.3 电动汽车充电仿真算例	10
1.3.1 仿真实验设定	10
1.3.1.1 电动汽车相关参数	10
1.3.1.2 分时电价和基础负荷	11
1.3.2 对比策略	12
1.3.2.1 无序充电	13
1.3.2.2 贪心充电	13
1.3.3 无序充电算例结果	13
1.3.4 贪心充电算例结果	15
1.3.5 有序充电算例结果	17
1.3.6 三种方法算例结果对比及讨论	18
1.3.7 蒙特卡罗仿真	19



# 插图

1.1	在离散时间系统设定下，电动汽车到达与离开时刻对应的时间步。	3
1.2	100 辆电动汽车到达与离开车库的时间	11
1.3	从第一天中午 12 点到第二天中午 12 点的基础负荷（采样周期：15 分钟）。	12
1.4	基础负荷和无序充电负荷	14
1.5	无序充电策略下的负荷曲线	14
1.6	无序充电策略下的三相负荷不平衡度	15
1.7	贪心充电策略下的负荷曲线	15
1.8	贪心充电策略下的三相负荷不平衡度	16
1.9	有序充电策略下的负荷曲线	17
1.10	有序充电策略下的三相负荷不平衡度	18
1.11	有序充电负荷曲线和分时阶梯电价曲线的对应关系	19
1.12	蒙特卡罗仿真中三种充电策略的负荷波动率	20
1.13	蒙特卡罗仿真中三种充电策略的充电费用	20

# 表格

1.1	电池类型及其参数 . . . . .	11
1.2	100 辆电动汽车所安装电池类型及充电相位的数量统计 . . . . .	12
1.3	有序充电分时电价模型 . . . . .	12
1.4	贪心充电策略下未满足充电需求的 8 辆车相关数据 . . . . .	16
1.5	不同充电策略下的小区负荷特性 . . . . .	18
1.6	不同充电策略下的充电花费 . . . . .	19

# 第一章 基于整数规划的电动汽车 最优有序充电算法

## 1.1 引言

本章介绍应用于小区智能车库的电动汽车智能充电系统（charging management system, CMS）核心算法。该算法通过合理调度大量电动汽车的充电时间和次序，即有序充电（coordinated charging），试图解决如下实际问题：

1. 如何满足配电网安全稳定运行的相关约束条件，如配电变压器的三相负荷均衡度约束和每相总负荷约束 [1-6]。避免线路过载，确保配变电设备的安全运行，是建立智能车库和发展电动汽车有序充电的先决条件。
2. 如何对大量电动汽车充电时间进行合理调度，避免电力负荷“峰上加峰”，并进一步利用有序充电策略的“削峰填谷”作用，以降低小区总电力负荷的波动和峰谷差 [4,5,7-11]。
3. 如何充分利用分时电价和用户充电时间（特别是夜晚充电）的自由度，以尽量减少电动汽车用户的充电费用，提高有序充电的“经济性” [3,8,12,13]。一方面，充电花费的明显降低，是激励用户积极参与有序充电项目的重要因素。另一方面，鉴于分时电价制度下的阶梯价格曲线与电力负荷的大小大致对应，即谷价区间负荷低而峰价区间负荷高，考虑用户经济性的有序充电可同时起到“移峰填谷”的作用。

现有文献对电动汽车的有序充电已有较多研究，少数工作采用基于固定规则的充电调度策略，如文献 [5,8] 利用 TOPSIS 排序、文献 [14] 利用“充电灵活度”排序来决定车辆的充电次序，而多数工作将有序充电建模成一个带有众多约束的线性或非线性优化问题，其优化目标可针对上述一个或者多个问题 [15,16]。基于规则的方法实现较为简单，但其往往仅考虑当前时间步的单步优化结果，且难以处理复杂的约束。基于优化的方法通过设计合理的目标函数和制定各类约束，理论上能给出考虑多步长远规划的、满足复杂约束条件的最优有序充电策略（如最小

化用户充电成本)。本项目采用数学优化方法来规划电动汽车的有序调度。根据所构建优化问题的不同形式,通常有两类求解算法。一是传统的数值优化算法,第二类则是启发式随机优化算法。

传统的确定性数值优化方法可用于处理一些标准形式的优化问题,特别是线性和二次优化问题,如文献 [3,12,13,17] 中的线性规划,文献 [2,11,18] 中的二次规划,以及文献 [1,7] 中基于内点法的非线性规划。这此线性和二次规划算法,通常假定充电功率是一个可控的连续值,从而求得在每一时刻的最优功率值。连续可调充电功率是文献中研究最多的情形 [19]。然而,根据现实中所用充电桩硬件的不同,充电功率可能无法调整,而是由充电桩和电动汽车共同决定的一个常数值(即两者功率的较小值)。在恒定充电功率的设定下,控制电动汽车充电行为的决策变量仅有开/关(1/0)两个可能的整数值,相应的求解方法则变成了混合整数(mixed-integer)数值优化方法。如文献 [12,19,20] 的混合整数线性规划,文献 [10] 中的混合整数二次规划。在解决规模较小的(混合整数)优化问题时,数值优化方法有较高的求解速率,每次运行均给出同样的答案,且通常可保证答案的全局最优性。需要指出的是,由于混合整数规划是 NP 困难(NP-hard)问题 [21, 第 6 章],当包含整数决策变量的问题规模增大时,其求解计算量会指数级增大,计算时间明显增长。因此,标准数值优化方法难以处理包含整数决策变量(如充电桩的通断)的大规模有序充电问题(如多达数百个充电桩)。

启发式随机优化算法通常并不针对特定的问题形式,可用于求解各类线性或非线性、连续或整数变量、单目标或多目标等优化问题,如文献 [22] 使用的离散变量遗传算法和文献 [7] 应用的多种群遗传算法,文献 [5,6,23] 采取的粒子群算法,以及文献 [24] 提出的改进鲸鱼算法等。此类优化算法有极高的通用性,不限制具体的问题结构,也通常不依赖梯度信息,从而允许在最优有序充电问题建模中引入各类复杂约束和目标,为优化问题的建模描述提供了更高的灵活性,且工程实现一般比较直观与简单。另一方面,启发式随机优化算法也有其自身的缺点,比如每次运行给出的答案可能均不相同,且无法保证所得答案的全局或者局部最优性。另外,启发式随机优化算法一般将硬约束转为软约束处理(比如在目标函数中添加惩罚项),从而难以保证最终答案严格满足所有约束。在处理小规模标准形式的优化问题时(如线性和二次规划问题),启发式优化算法时间效率一般远远低于传统的数值优化算法。当然,随着问题规模的增大,启发式随机优化算法会逐渐具有一定性能优势,通常可在限定时间内给出一个可行解(但无法保证其质量),而传统数值优化算法则难以完成其计算。

本项目中的交流充电桩硬件仅支持开关控制,无法连续调节充电功率,即对于给定的电动汽车,其充电功率(或等价的充电电流)由该车电池系统所决定,是一常数值。充电桩的电压为恒定 220V,而不同型号的电动汽车通常会有不同的充电功率值。在此背景下,在下述 1.2 节中,最优有序充电将被建模成二元整数线性规

划问题 (binary integer programming)。考虑到普通小区中所设智能车库充电桩数量不会太多, 本项目采用对最优度有保证的整数规划数值优化算法来求解该有序充电优化问题 [21]。

## 1.2 电动汽车有序充电优化模型

### 1.2.1 问题背景设定

#### 1.2.1.1 离散时间系统

采用文献中标准的离散时间系统设定 (可参见文献 [1] 和 [25] 等), 其中采样周期长度是  $\Delta_t$ , 常见值包括 5 min [6]、10 min [25]、15 min [9, 10]、半小时 [26]、一小时 [12]。每个时段用正整数  $t \in \mathbb{N}^+$  索引。设时间段  $t$  对应的开始时刻为  $t_{\text{start}}$ , 结束时刻为  $t_{\text{end}}$ , 则对于任一实际时刻  $\tau \in [t_{\text{start}}, t_{\text{end}}]$ , 其对应的时间步均为  $t$ 。时间步  $t = 0$  所对应的开始时刻可根据问题需要来设定, 比如中午 12 点 [12]

在离散时间系统的设定下, 在每个长度为  $\Delta_t$  的时间段内, 小区的基础负荷、电动汽车和充电桩的连接状态、电动汽车充电功率和电价均视为恒定值。电动汽车有序充电的调度区间由当前时间步  $t$  开始, 包括接下来的  $T$  个时间段。  $T$  可以是一个固定值, 比如代表一天长度的  $\frac{24h}{\Delta_t}$  [12, 27]。为减少优化问题求解的计算量, 也可将充电规划的时间区间设定为当前时间到所有电动汽车的最晚期望提车时间 (通常短于一天), 从而使得  $T$  成为一个每步都不同的变动值。

若某辆电动汽车到达车库且连接上充电桩的时刻为  $\tau^a$ , 期望提车时间为  $\tau^d$  (上标分别为 arrival 和 departure 的首字母), 我们需要将其转变成对应的离散时间步, 如图 1.1 所示。由于充电规划仅在每个时间段的开始进行调整, 该车在  $\tau^a$  之后的第一个时间步开始参与有序充电调度, 记为  $t^a$ 。该车可能充电的最后时间步为不晚于  $\tau^d$  时间步  $t^d$ 。因此, 该车可参与有序充电的总时间步数为  $t^d - t^a + 1$ , 相应的总充电时间只能是  $\Delta_t$  的整数倍且不超过  $(t^d - t^a + 1)\Delta_t$ 。从这个角度出发, 离散时间周期  $\Delta_t$  不应过大, 可采用 10 min 或者 15 min, 以减小电动汽车不参与有序充电计划的无效停留时间。

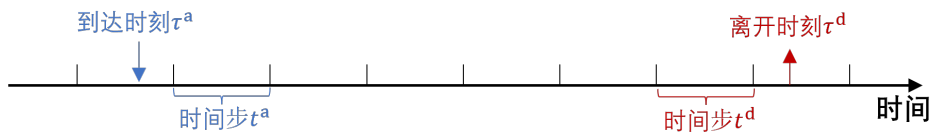


图 1.1: 在离散时间系统设定下, 电动汽车到达与离开时刻对应的时间步。



### 1.2.1.2 充电桩与电动汽车充电任务

当一辆电动汽车  $v$  进入车库并连接到充电桩后，为该车定义一个包括十个要素的充电任务  $d_v$  如下：

$$d_v = (v, t_v^a, t_v^d, s_v^a, s_v^d, E_v, P_v, \eta_v, i_v, \phi_v) \quad (1.1)$$

式中： $t_v^a$  是该车到达车库后连接充电桩、充电准备就绪的时间步（plug-in time）， $t_v^d$  是该车预计提车时间（即结束充电时间，plug-out time）； $s_v^a$  是该车在到达车库时的电池初始 SOC（state of charge，荷电状态）， $s_v^d$  是该车在提车时期望 SOC，需要满足  $0 \leq s_v^a < s_v^d \leq 1$ ； $E_v$  是该车的电池容量， $P_v$  是式(1.2)中该车的充电功率， $\eta_v \in [0, 1]$  是该车电池的充电效率； $i_v$  是电动汽车  $v$  连接的充电桩的编号； $\phi_v \in \{A, B, C\}$  是电动汽车  $v$  充电负荷所在的相位，由其所使用的充电桩  $i_v$  确定。

在项目具体实施时， $t_v^d$  和  $s_v^d$  由用户通过交互界面（如智能手机 APP）提供， $\phi_v$  可根据该车所在的充电桩由系统自动确定，而  $E_v$ 、 $s_v^a$  和  $P_v$  可根据实际硬件条件，由充电桩从车载电池管理系统自动读取 [6] 或由用户提供。充电效率因子用  $\eta_v \in [0, 1]$  表示。若充电桩输出了能量  $E$ ，由于系统损耗（比如 AC/DC 转换损耗），电池的实际储能仅增加  $\eta_v E$ 。充电效率因子通常采用一个经验值，如  $\eta_v = 0.95$ ，也可由用户提供。当用户填写完相关参数值并提交充电请求后， $t_v^a$  由充电管理系统自动确定，并由此完成充电任务  $d_v$  的构建。接下来，电动汽车  $v$  和对应的充电桩  $i_v$  进入有序充电管理系统的调度流程。在整个有序充电过程中，充电任务  $d_v$  相关参数值保持不变。

假定在车库内共安装了  $N$  个交流充电桩，充电桩  $i_v$  的最大输出功率记作  $P_{i_v}^{\max}$ 。一般来说，车库所有充电桩有着相同的最大输出功率。在时间步  $t$  时，共有  $K_t \leq N$  辆电动汽车连接了充电桩准备充电，记作集合  $\mathcal{V}_t$ ， $|\mathcal{V}_t| = K_t$ 。随着电动汽车的陆续到达与离开，集合  $\mathcal{V}_t$  随时间动态变化。如1.1节所述，充电桩的输出功率不可主动调节。电动汽车  $v \in \mathcal{V}_t$  的实际充电功率是该车额定功率  $P_v^{\text{rated}}$  与其连接充电桩最大输出功率  $P_{i_v}^{\max}$  两者中的较小值 [13]，即

$$P_v = \min\{P_{i_v}^{\max}, P_v^{\text{rated}}\}. \quad (1.2)$$

考虑居民小区的三相交流电。每个充电桩由  $\{A, B, C\}$  之中的固定一相供电。根据电动汽车充电负荷所在相，可将参与有序充电的电动汽车集合  $\mathcal{V}_t$  进一步分为三个不相交的子集合，记为  $\mathcal{V}_t^A, \mathcal{V}_t^B, \mathcal{V}_t^C$ ，满足  $\mathcal{V}_t = \mathcal{V}_t^A \cup \mathcal{V}_t^B \cup \mathcal{V}_t^C$ 。在时间步  $t$  时，小区  $\phi$  相的基础负荷（base load，即除电动汽车充电外的所有负荷）记为  $P_{b,t}^\phi$ 。在具体工程实施中，每相的基础负荷可在小区配电变压器处加装智能电表测得，并以实时通信方式传送给充电管理系统（CMS）。

### 1.2.1.3 充电费用计价体系

在车库充电时，电动汽车充电总费用由用电费用和服务费组成。当车库建立在普通小区中时，电费可采用当地的居民用电分时电价，或由车库经营者制定更为细分的分时电价体制，其核心是在负荷曲线高峰期提高电价，而在负荷曲线低谷期降低电价，从而激励用户转移充电时间段，起到“移峰填谷”的作用 [8,9,13]。服务费由车库经营者确定，通常是与时间无关的常数值 [12]，如 0.2 元/度。在分时电价机制下，充电单价也会分时以阶梯形式变动。设在时间步  $t$  向用户收取的充电单价为  $\rho_t$  元/度，计算如下：

$$\rho_t = \rho_t^r + \rho_t^s \quad (1.3)$$

其中  $\rho_t^r$  是分时电价机制下当前电价（元/度）， $\rho_t^s$  是当前服务费单价（元/度）。注意式(1.3)是最广义的表达形式，实际运营中服务费单价往往是一常数值。

### 1.2.1.4 有序充电系统的设计原则

如1.1节所述，本有序充电管理系统主要面向以下三个目标：

1. **小区配电网的安全稳定运行**，包括配电变压器的功率上限和三相负荷平衡等。此类限制将作为优化问题的约束进行处理。
2. **尽可能满足用户的充电需求，以最大化车库运行商收益**。若采用“先到先充”的无序充电模式，由于不同电动汽车的特异性及其随机到达与离开时间，无法保证所有车辆能在给定时间内完成充电。在本项目的最优有序充电系统中，各车的充电需求被描述为优化问题的约束，从而使得优化问题的任一可行解，均可满足用户的充电需求。另一方面，车库运营商收取的充电服务费通常与所充电量成正比（见式(1.3)）。因此，尽可能满足用户充电需求，可提升充电桩的利用率，也同时最大化了车库运营方的收益。
3. **最小化用户的充电费用**。电动汽车在车库的总停泊时间，可能超出其需要的充电时间长度，因此应该充分利用分时电价，合理安排车辆的充电时间区间，以最小化用户充电费用。该指标将作为优化问题的目标函数。

## 1.2.2 目标函数

本项目中交流充电桩的输出功率不可连续控制，仅支持开关控制。因此，优化问题的决策变量是处于有序充电调度计划中的各充电桩通断状态。在时间步  $t$  时，车库内连接到充电桩的电动汽车集合是  $\mathcal{V}_t$ 。其中，电动汽车  $v \in \mathcal{V}_t$  所连接的充电桩为  $i_v$ （见式(1.1)）。由于  $v$  与  $i_v$  一一对应，我们可用布尔变量  $x_{v,t} \in \{0,1\}$  表示

充电桩  $i_v$  在时间步  $t$  时通断状态:  $x_{v,t} = 1$  表示电动汽车  $v$  在时间步  $t$  充电, 而  $x_{v,t} = 0$  表示其未被充电。

在当前时间步  $t$ , 记接下来的有序充电调度时域长度为  $T_t$ 。在多数有序充电研究中 (如 [5, 13, 22, 28]),  $T_t$  通常是一个足够大的常数值 (如一天)。由于车库内泊车时间通常少于 24 小时, 为提高计算效率, 本项目由当前车辆集合  $\mathcal{V}_t$  中的最晚提车时间即  $\max_{v \in \mathcal{V}_t} t_v^d$  来决定  $T_t$ , 使其成为一个时变值:

$$T_t = \min\{\max_{v \in \mathcal{V}_t} t_v^d - t + 1, T_{\max}\} \quad (1.4)$$

式中:  $T_{\max}$  为最大允许的时域长度 (比如 16 h)。接下来的式(1.7)将表明,  $T_t$  主要影响优化问题中的决策变量数量。若有个别用户的期望提车时间非常久, 则设置合理的  $T_{\max}$  可减小优化问题的规模, 进而减少求解时间。

为简化公式中符号表示, 以  $\mathcal{T}_t$  表示从当前时间步  $t$  开始的有序充电有限时域所包含的时间步集合:

$$\mathcal{T}_t = \{t, t+1, \dots, t+T_t-1\} \quad (1.5)$$

如1.2.1.4节所述, 有序充电系统的直接优化目标为最小化用户充电费用。由式(1.3)可知, 充电收费单价仅与所在时间段有关, 而与具体的电动汽车型号无关。若电动汽车  $v \in \mathcal{V}_t$  在时间步  $k \in \mathcal{T}_t$  充电 (即  $x_{v,k} = 1$ ), 则它在这一步的费用为  $\rho_k P_v \Delta_t$ 。因此, 在有限时域  $\mathcal{T}_t$  内, 所有电动汽车的总充电花费为

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{k \in \mathcal{T}_t} \sum_{v \in \mathcal{V}_t} x_{v,k} \rho_k P_v \Delta_t \quad (1.6)$$

式中:  $\mathbf{x}$  代表决策变量的集合, 表示各电动汽车在各时间步的通断状态, 定义为

$$\mathbf{x} = \{x_{v,k}\}, \quad v \in \mathcal{V}_t, k \in \mathcal{T}_t \quad (1.7)$$

易知,  $\mathbf{x}$  共包含  $|\mathcal{T}_t||\mathcal{V}_t|$  即  $T_t|\mathcal{V}_t|$  个二元决策变量。

本项目所提有序充电策略的核心目标即在满足实际约束的前提下最小化  $f(\mathbf{x})$ 。1.2.1.4节讨论的各约束数学表达形式将在下一节给出。

### 1.2.3 约束

如1.1节所述, 最优有序充电问题包含多个实际约束。在本节, 分三类介绍最优有序充电问题所涉及约束的数学表达。

### 1.2.3.1 充电时间约束

根据1.2.1.2节中  $\mathcal{V}_t$  的定义，其包含在时间  $t$  时连接到充电桩的电动汽车集合，因此必然有  $t_v^a \leq k, \forall v \in \mathcal{V}_t, k \in \mathcal{T}_t$ 。然而，当前的有序充电调度时间域  $\mathcal{T}_t$  可能超出了车  $v$  的预计提车时间  $t_v^d$ 。易知，当时间超过  $t_v^d$  时，充电桩  $i_v$  不会给电动汽车  $v$  充电。因此需要添加约束如下：

$$x_{v,k} = 0, \quad \forall k \in \mathcal{T}_t \text{ and } k > t_v^d, \quad \forall v \in \mathcal{V}_t \quad (1.8)$$

式中  $k \geq t_v^d$  是因为电动汽车  $v$  在时间步  $t_v^d$  不会有任何充电（参阅1.2.1.1节）。

### 1.2.3.2 电池 SOC 约束

电池荷电状态的变化规律为：

$$s_{v,k} = s_{v,k-1} + x_{v,k} \frac{\eta_v P_v \Delta_t}{E_v}, \quad \forall k \in \mathcal{T}_t \quad (1.9)$$

式中： $s_{v,k}$  表示电动汽车  $v$  在时间段  $k$  结尾时的 SOC 值， $\Delta_t$  为离散时间系统视角下的时间段长度（参见节1.1），而  $\eta_v$ 、 $P_v$ 、 $E_v$  是式(1.1)中定义的充电效率因子、功率、电池容量。与直觉相符，式(1.9)表明，若电池在时间段  $k$  未充电，即  $x_{v,k} = 0$ ，则电池的 SOC 保持不变。

给定式(1.1)中充电任务  $d_v$ ，电动汽车  $v$  在任一时间段  $k$  的荷电状态 SOC 不能超过用户指定的期望值，即

$$s_{v,k} \leq s_v^d, \quad \forall k \in \mathcal{T}_t \quad (1.10)$$

式中： $s_{v,k}$  表示电动汽车  $v$  在时间段  $k$  结尾时的 SOC 值。

给定式(1.1)中充电任务  $d_v$ ，理论上电动汽车  $v$  在提车时的荷电状态 SOC 应该等于用户指定的期望值  $s_v^d$ 。然而，在开关控制策略下，由式(1.9)可知  $s_{v,k}$  仅可取有限的离散数值之一，很可能无法满足等式约束。若汽车电池在某一时间步充电，则在该时间段的 SOC 增量为：

$$\Delta_v^{\text{SOC}} = \frac{P_v \Delta_t \eta_v}{E_v} \quad (1.11)$$

为使得优化问题可解，首先求得不超过  $s_v^d$  且可由开关控制实现的最大 SOC 值如下：

$$\kappa(s_v^d) = s_v^a + \left\lfloor \frac{s_v^d - s_v^a}{\Delta_v^{\text{SOC}}} \right\rfloor \Delta_v^{\text{SOC}} \quad (1.12)$$

式中： $\lfloor r \rfloor$  表示 floor 函数，返回不大于实数  $r$  的最大整数。

电动汽车  $v$  荷电状态在时间  $t_v^d$  的终端约束如下：

$$s_{v,t_v^d} = \kappa(s_v^d), \text{ if } t + T_t - 1 \geq t_v^d \quad (1.13)$$

值得指出的是，对于给定的充电任务  $d_v$ ， $\kappa(s_v^d)$  是一个常数值，可称为“目标 SOC”。在实际代码编写时，考虑到浮点数的计算误差，可将式(1.13)中的“=”改为“ $\geq$ ”。由于目标函数是最小化充电花费，优化器在求解最优解时会自动减小式(1.13)中  $s_{v,t_v^d}$  至  $\kappa(s_v^d)$ 。

由式(1.4)和式(1.5)可见，在特殊情况下，有限时域  $\mathcal{T}_t$  可能不包含少量停车时间非常长的电动汽车的  $t_v^d$ 。在此情况下，可以线性插值方式近似设定汽车  $v$  在时域  $\mathcal{T}_t$  的最后时间步即  $t + T_t - 1$  的期望 SOC 为：

$$s_{v,t+T_t-1}^d = s_{v,t-1} + \frac{T_t}{t_v^d - t + 1} (s_v^d - s_{v,t-1}) \quad (1.14)$$

从而得到针对有限时域  $\mathcal{T}_t$  的终端约束相应如下：

$$s_{v,t+T_t-1} = \kappa(s_{v,t+T_t-1}^d), \text{ if } t + T_t - 1 < t_v^d \quad (1.15)$$

### 1.2.3.3 线路负荷和三相不平衡度约束

首先，包括基础负荷和充电负荷在内的小区总负荷不应超过配电变压器安全运行允许的最大值  $P_{\max}$ ，即

$$\sum_{v \in \mathcal{V}_t} x_{v,k} P_{v,k} + \sum_{\phi \in \{A, B, C\}} P_{b,t}^\phi \leq P_{\max}, \quad \forall k \in \mathcal{T}_t. \quad (1.16)$$

为减小线路损耗、改善电力质量和维护用电设备的安全运行，配电网要求三相负荷应该相对均衡。国家标准《GB/T 15543-2008 电能质量三相电压不平衡》规定，电网在正常运行时，负序电压不平衡度不超过 2%，短时不得超过 4%。然而，按照国家标准基于负序电压计算三相电压不平衡度的公式较为复杂，作为约束嵌入优化问题时，会导致优化问题难以求解 [2, 29]。在电动汽车有序充电相关研究中，通常采用标准电压不平衡度之外的指标来衡量三相不平衡度 [1-3, 29]。文献 [30] 用三相线路上充电的电动汽车数量来衡量三相不平衡度，但忽略了不同电动汽车可能有不同的充电功率。由于三相电压的不平衡度是由三相负荷的不平衡或由等价的三相电流不平衡导致的，文献 [2] “采用每相负荷与三相平均负荷的比值来衡量三相不平衡度”，而文献 [31] 则参照 IEEE STD 936-1987 标准计算三相电压不平衡度的方法，用三相电流的最大差值与其平均值的比值来表征三相不平

衡度。文献 [3] 计算三相不平衡度的方法与文献 [31] 类似，首先计算每相电流与平均电流的相对偏差，并用三相相对偏差中的最大值来衡量三相不平衡度。

参照上述文献，从方便优化建模的角度出发，本项目根据三相负荷的不均衡来计算三相不平衡度。首先，计算在时间步  $t$  时各相包括基础负荷和充电负荷的总负荷：

$$P_t^\phi = P_{b,t}^\phi + \sum_{v \in \mathcal{V}_t^\phi} x_{v,t} P_{v,t}, \quad \forall \phi \in \{A, B, C\} \quad (1.17)$$

式中： $P_{b,t}^\phi$  是  $\phi$  相的基础负荷， $\mathcal{V}_t^\phi$  表示连接在  $\phi$  相充电桩的电动汽车集合。然后，利用负荷功率不均衡来计算  $t$  时间三相不平衡度  $\psi_t$  的公式如下：

$$\psi_t = \frac{\max_{\phi \in \{A, B, C\}} P_t^\phi - \min_{\phi \in \{A, B, C\}} P_t^\phi}{\frac{1}{3} \sum_{\phi \in \{A, B, C\}} P_t^\phi} \quad (1.18)$$

上式中分子表示三相负荷的最大差值，分母表示三相负荷的平均值。设允许的最大三相不平衡度为  $\psi_{\max}$ ，则在任一时间  $k \in \mathcal{T}_t$ ，三相不平衡度需要满足如下约束：

$$\psi_k \leq \psi_{\max}, \quad \forall k \in \mathcal{T}_t \quad (1.19)$$

由式(1.18)和式(1.19)组成的约束原始形式是非线性的（包含  $\max$  和  $\min$  操作符），在优化问题中较难处理，且会增加计算时间。定义时间步  $t$  时三相负荷的平均值为  $\bar{P}_t = \frac{1}{3} \sum_{\phi \in \{A, B, C\}} P_t^\phi$ 。在每一时间步  $k$  时，通过计算每两相间的负荷差值，可将三相不平衡度的非线性约束(1.19)转化为多个绝对值约束如下：

$$\frac{|P_k^A - P_k^B|}{\bar{P}_k} \leq \psi_{\max}, \quad \forall k \in \mathcal{T}_t \quad (1.20a)$$

$$\frac{|P_k^B - P_k^C|}{\bar{P}_k} \leq \psi_{\max}, \quad \forall k \in \mathcal{T}_t \quad (1.20b)$$

$$\frac{|P_k^C - P_k^A|}{\bar{P}_k} \leq \psi_{\max}, \quad \forall k \in \mathcal{T}_t \quad (1.20c)$$

上式(1.20)中包含绝对值的约束可以很容易转化为线性约束。以式(1.20a)为例，对应的线性约束为

$$-\bar{P}_k \psi_{\max} \leq P_k^A - P_k^B \leq \bar{P}_k \psi_{\max}$$



### 1.2.4 优化问题完整形式

综合上述的目标函数和各类约束，可总结在时间步  $t$  时有序充电优化问题如下：

$$\min_{\mathbf{x}} \quad f(\mathbf{x}) \quad (1.21a)$$

$$\text{subject to} \quad (1.8), (1.10), (1.13), (1.14), (1.9), (1.16), (1.20) \quad (1.21b)$$

目标函数  $f(\mathbf{x})$  由式(1.6)定义，明显是关于决策变量  $\mathbf{x}$  的线性函数。同时，式(1.21b)中所有约束均为线性形式。由于任一决策变量  $x \in \mathbf{x}$  是 0/1 整数，最优有序充电问题(1.21)是一个整数线性规划问题 (integer linear programming)。该类问题在数值优化领域已经得到了很多研究，可通过成熟的商业求解器如 Gurobi<sup>1</sup>或开源求解器如 CBC<sup>2</sup>等求解。

## 1.3 电动汽车充电仿真算例

在本节中，采用具体仿真算例来分析所提有序充电最优调度算法的性能，并与无序充电和贪心充电算法的结果进行比较。为简化仿真与结果的分析对比，假定车库有足够的充电桩可容纳电动汽车，即车辆无须因充电桩不足而等待。

### 1.3.1 仿真实验设定

如上述1.2.1.1节所述，电动汽车的充电管理被描述为一个离散时间系统，本算例采用的采样周期为 15 分钟，即每个时间段长度  $\Delta_t = 15 \text{ min}$ 。

#### 1.3.1.1 电动汽车相关参数

在实际应用中，不同电动汽车可能安装着同样类型的电池，因此，下文中对电池而不是电动汽车进行区分。考虑表1.1所示的四种电池类型，其在全部车辆中所占比例为 [0.2, 0.3, 0.3, 0.2]。在仿真研究中，电动汽车所搭载的电池类型按照比例从四种类型中加权随机抽样。

考虑到居民的日常出行规律，以正态分布描述不同电动汽车到达车库及离开车库的时间 [8,19,22]。其中，设到达车库时间所符合的正态分布为  $\tau^a \sim \mathcal{N}(7 \text{ PM}, 2 \text{ h})$ ，而离开车库的时间满足正态分布  $\tau^d \sim \mathcal{N}(7 \text{ AM}, 2 \text{ h})$ ，分别对应于居民日常下班与上班时间。为方便分析，把第一天中午 12 点到第二天中午 12 点视为“一天”进

<sup>1</sup><https://www.gurobi.com/>

<sup>2</sup><https://www.coin-or.org/Cbc/>

表 1.1: 电池类型及其参数

电池类型	容量 (kWh)	额定充电功率 (kW)	充电效率
E1	25	3	0.94
E2	42	4.5	0.96
E3	54	5.6	0.94
E4	60	7	0.95

行研究，其中每个时段（即采样周期）长度为  $\Delta_t = 15 \text{ min}$ ，有序充电调度时域长度为  $T = 96$  步。

各车的初始 SOC 在 0.1 到 0.3 间均匀分布，而提车时期望 SOC 在 0.8 到 1.0 间均匀分布。每辆车的充电相位由 A、B、C 三相随机选取。

在下述算例仿真中，假设共有  $N = 100$  辆电动车参与充电（编号为 1 到 100），每辆车在一天内到达车库充电与离开车库各一次，车辆相关参数按照本节描述随机生成。由于每次仿真运行，生成的电动汽车数据均不相同，下文首先对一次典型运行做具体分析，然后对多次运行的结果进行统计分析。在该次典型仿真运行中，100 辆电动汽车到达与离开车库时刻如图 1.2 所示。

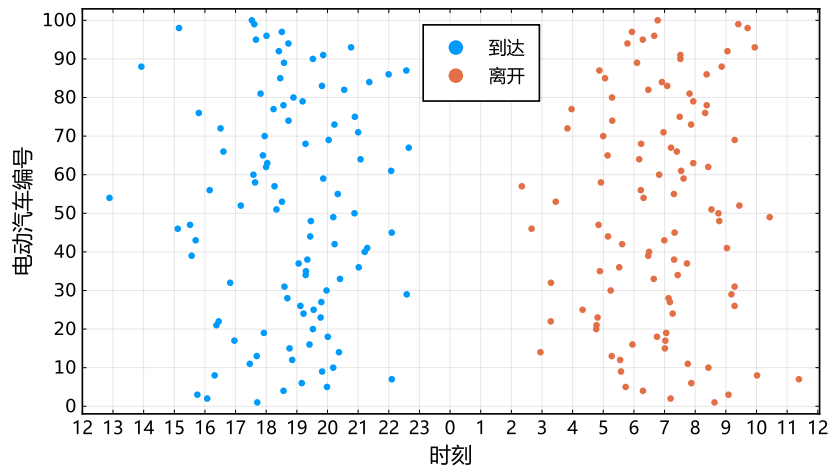


图 1.2: 100 辆电动汽车到达与离开车库的时间

对上述 100 辆汽车按照电池类型（见表 1.1）与充电所在相位进行分类，统计数量如表 1.2 所示。

### 1.3.1.2 分时电价和基础负荷

在下列仿真实验中，所采用的分时电价如表 1.3 所示 [5]，包括尖峰、高峰、平段和低谷四类阶段电价。

小区的基础负荷指除电动汽车充电之外的日常用电负荷，其一天（即从中午 12 点到第二天中午 12 点）中分布的典型值如图 1.3 所示。由于通常情况下小区居



表 1.2: 100 辆电动汽车所安装电池类型及充电相位数量统计

相位 \ 电池类型	电池类型				
	E1	E2	E3	E4	总计
A	4	8	10	7	29
B	8	7	10	9	34
C	10	6	12	9	37
总计	22	21	32	25	100

表 1.3: 有序充电分时电价模型

电价类型	开始时间	结束时间	电价（元/度）
尖峰	18:00	22:00	0.973
高峰	8:00	12:00	0.862
平段	12:00	18:00	0.582
平段	22:00	24:00	0.582
低谷	0:00	8:00	0.303

民用电三相负载较为均衡，在本节算例研究中假定三相基础负荷是完全平衡的，即每相的基础负荷是图1.3所示值的 1/3。

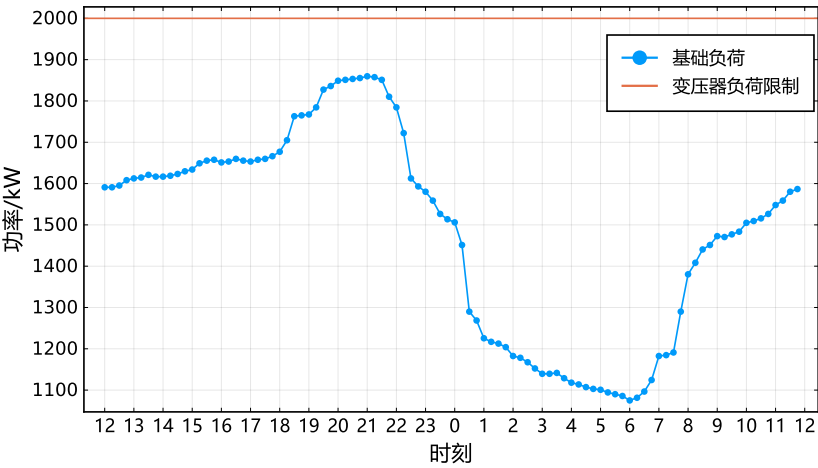


图 1.3: 从第一天中午 12 点到第二天中午 12 点的基础负荷（采样周期：15 分钟）。

图1.3也显示了小区配电变压器所允许最大功率值为 2000 kW。在本算例仿真研究中，要求任一时刻以式(1.18)计算的三相负荷不平衡度不超过 4%。

1.3.2 对比策略

本算例仿真共比较三种充电策略：无序充电 [5,22]，贪心充电，以及本项目所提出的有序充电优化算法。

### 1.3.2.1 无序充电

无序充电指车辆“即插即充”的模式，从车辆连接到充电桩开始连续充电，直至达到指定的 SOC 值 [6, 7, 22]。在无序充电方案中，忽略配电器容量和三相负载均衡等电力系统约束，所有车辆均可即时得到充电。无序充电的结果可用于对比验证本项目有序充电方案的优化效果及其维护小区配电网安全稳定运行的功效。易知，无序充电方案仅可用于理论比较，在现实中并不可行。

### 1.3.2.2 贪心充电

鉴于上述无序充电方案在现实环境中并不可行，我们另外提出一种基于数学优化的、可满足现实约束的直观易行充电方案，但此方案并不考虑价格因素。在任一时间步  $t$ ，在配电变压器最大功率和三相均衡等约束条件下，最大化当前时间步的总充电功率。设时间步  $t$  时停留的车辆集合为  $\mathcal{V}_t$ ，各车  $v \in \mathcal{V}_t$  的充电通断决策变量为  $x_{v,t} \in \{0, 1\}$ ，则优化问题表述过

$$\max_{\mathbf{x}_t} \quad g(\mathbf{x}_t) = \sum_{v \in \mathcal{V}_t} x_{v,t} P_v \quad (1.22a)$$

$$\text{subject to} \quad \begin{cases} (1.9), (1.10) & (\text{SOC 约束}) \\ (1.16) & (\text{最大负荷约束}) \\ (1.20) & (\text{三相负荷不平衡度约束}) \end{cases} \quad (1.22b)$$

式中：决策变量集合  $\mathbf{x}_t = \{x_{v,t}\}, \forall v \in \mathcal{V}_t$ 。该充电调度算法仅考虑当前时间步的总充电功率最大化，因此称之为“贪心充电”方法。无序充电方案可预估  $T$  步后电动汽车的 SOC 值，通过施加相应约束（式(1.13)）以满足车辆的充电需求。与之相比，贪心充电方案仅尝试最大化当前时间步的总充电功率，并不能确保电动汽车  $v$  在提车时其 SOC 达到了期望值  $s_v^d$ 。

### 1.3.3 无序充电算例结果

在“即插即充”的无序充电方式下，每一时刻的充电负荷如图1.4所示。为便于分析比较，图1.4同时描绘了基础负荷。由于居民返程充电时间较为集中，且与日常用电高峰期有较大重合，导致图1.4出现了用电高峰期（19:00 – 22:00）负荷“峰上加峰”的现象。基础负荷与充电负荷叠加后的总负荷容易出现尖峰，超出配电变压器允许的最大功率值，如图1.5所示。在 19:00 到 23:00，变压器处于过载运行状态，不仅会影响变压器使用寿命，也会引发电压降低甚至断电等情况，严重影响小区配电网的安全稳定运行 [7, 22]。

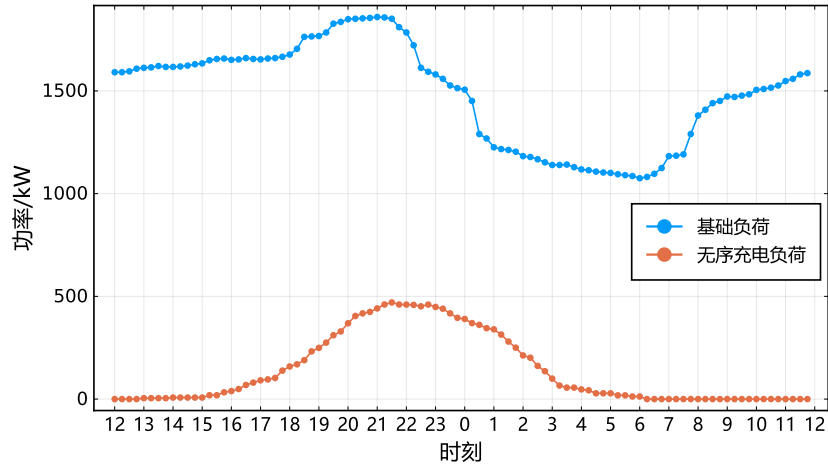


图 1.4: 基础负荷和无序充电负荷

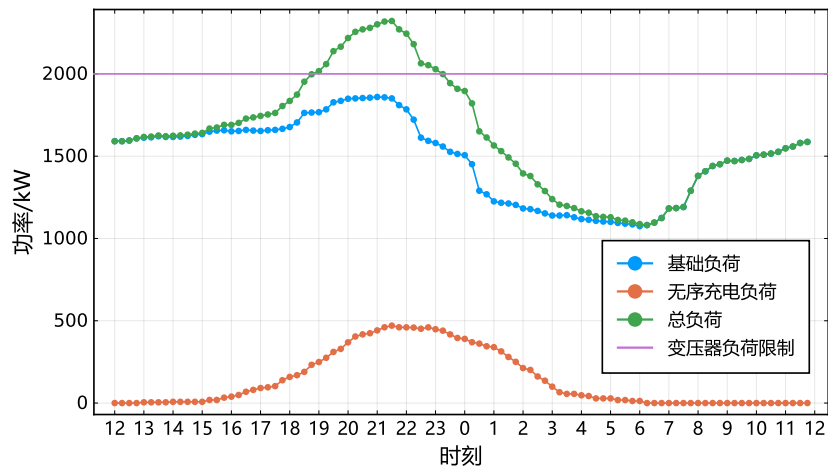


图 1.5: 无序充电策略下的负荷曲线

交流配电网稳定高效运行的另一要求是三相负载均衡。按式(1.18)计算无序充电策略下总负荷在每一时间步的三相不平衡度，结果如图1.6所示。尽管基础负荷自身保持三相完全平衡（本算例研究中的理想设定），但是由于参与充电的电动汽车数量三相分布不是完全均匀（见表1.2），且不同车辆充电功率可能存在不同，仍会出现三相负载不平衡程度超限的情况（如图1.6中 17:00 到 20:00 时间段），导致配电网变压器和线路的电能损耗增大，影响用电设备的安全运行等。

**小结：**如1.3.2.1节所述，由于对总负荷和三相负载平衡没有施加约束，无序充电策略容易导致负荷曲线“峰上叠峰”而造成负荷超载，在实际车库充电管理系统中通常无法使用。同时，无序充电的“即插即充”模式不考虑分时电价机制，而充电高峰期往往位于电价的峰段，从而导致用户的充电成本升高。在本例中，100 辆汽车的总充电花费为 2226 元。

另一方面，若参与充电的电动汽车数量很少，而小区的基础负荷较大，则充电

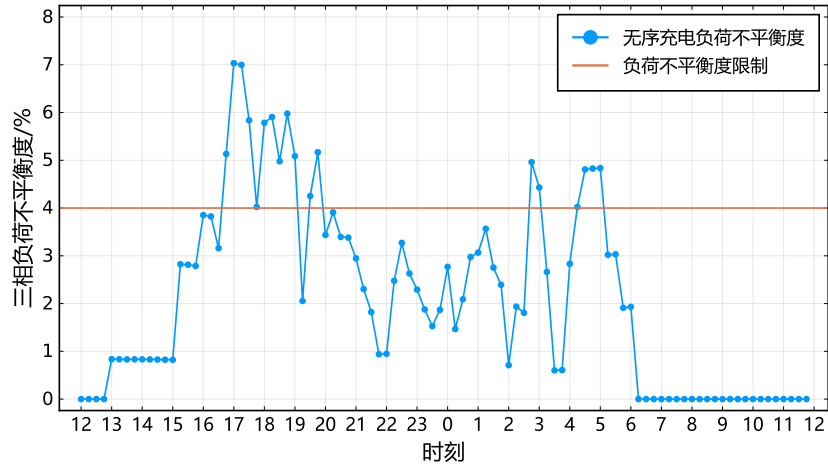


图 1.6: 无序充电策略下的三相负荷不平衡度

负荷的引入对总负荷曲线的影响可以忽略。在这种情况下，若用户对充电花费不敏感，无序充电则成为一种最简单易行的充电策略，可保证电动汽车在最短的时间内满足充电需求。

### 1.3.4 贪心充电算例结果

本节分析贪心充电策略（见1.3.2.2节）的仿真结果。首先，在贪心充电策略的管理下，充电负荷和总负荷曲线如图1.7所示。由图1.7显然可见，在所有时刻，用电总负荷约不超过变压器的限制值，验证了优化问题(1.22)中最大负荷约束的有效性。比较图1.5和图1.7可知，贪心充电策略通过引入最大负荷约束，避免了“峰上加峰”造成的极端负荷峰值，从而防止了变压器超载。

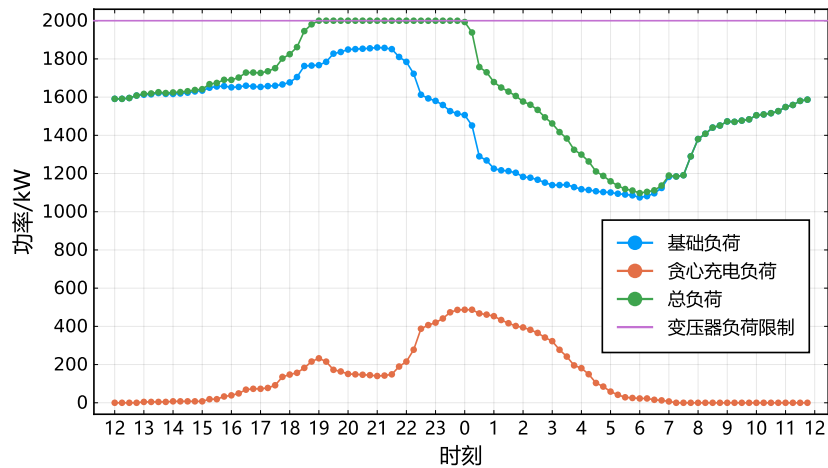


图 1.7: 贪心充电策略下的负荷曲线

贪心充电优化问题中的三相不平衡度约束（见式(1.22b)），可维持总负载的三相均衡，结果如图1.8所示。

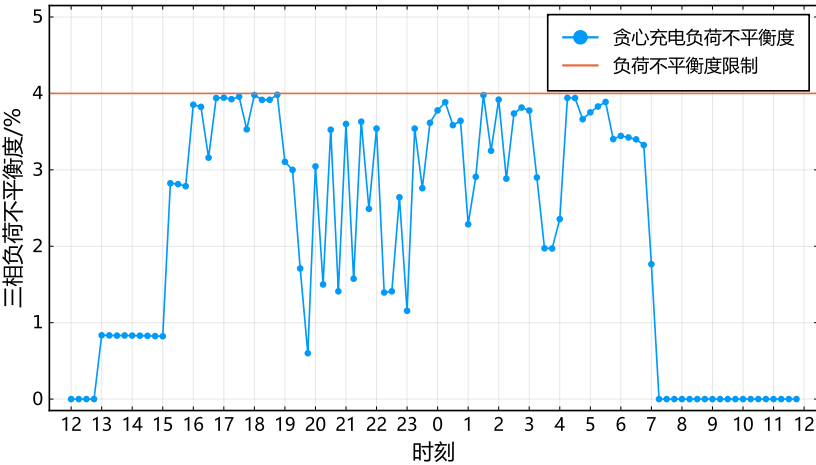


图 1.8: 贪心充电策略下的三相负荷不平衡度

贪心充电策略仅对当前时间步在满足约束条件下最大化总充电功率，而未对接下来的多个时间步进行整体充电协调和优化。贪心充电策略的“近视”特性使得它倾向于简单推迟部分电动汽车的充电以满足当前时间步的电力系统约束，而不考虑电动汽车在整个时间段的充电需求，容易导致一些车辆在提车时低于指定的SOC 值。在本算例的 100 辆电动汽车中，共有 8 辆电动汽车未达到其充电需求，如表1.4所示。

表 1.4: 贪心充电策略下未满足充电需求的 8 辆车相关数据

车辆编号	初始 SOC	期望 SOC	实际 SOC
14	0.23	0.895	0.812
20	0.127	0.873	0.847
23	0.114	0.821	0.723
44	0.104	0.876	0.747
53	0.23	0.986	0.913
57	0.17	0.804	0.633
68	0.161	0.868	0.844
87	0.174	0.823	0.795

比较图1.5和图1.7中的负荷曲线可知，贪心充电推迟了充电高峰期以满足电力负载约束。由于推迟后的充电高峰期恰好避开了分时电价的尖峰段，使得贪心充电策略的充电费用显著低于无序充电，由 2226 元削减到了 16661 元。然而，与无序充电类似，贪心充电并不主动最小化用户充电成本，与有序充电相比仍可能会导致较高的充电费用。下面的1.3.6节将对三种策略的充电费用进行统一比较。

### 1.3.5 有序充电算例结果

本算例研究进行理想化的有序充电仿真，以专注于测试所提整数规划充电策略的优化效果。具体而言，假定在第一天中午 12 点时即知晓接下来一天的所有基础负荷数据及车辆数据，包括各车的到达与离开时间、初始 SOC 及期望 SOC、充电所在相位等，并利用这些信息构建优化问题(1.21)，然后通过整数线性规划算法求解(1.21)，得到各汽车在接下来一天每一时间步的充电状态。并利用这些信息构建优化问题(1.21)，进一步通过整数线性规划算法求解(1.21)以确定各充电桩在接下来一天每一时间步的充电状态。需要指出的是，在实际应用中，车辆信息和基础负荷数据是无法提前准确预知的：某一车辆的到达与离开时间、初始 SOC 和期望 SOC，仅在该车到达时才会告知充电管理系统，而基础负荷数据使用的则是预测值。换言之，随着电动汽车的到达与离开，参与充电的车辆集合  $\mathcal{V}_t$  在不同的时间步  $t$  不断变化，且仅可实时得知；而基础负荷预测必须存在一定偏差，只有当前时间步的基础负荷值可准确测得。对电动汽车集合  $\mathcal{V}_t$  随时间变化和基础负荷预测不确定性的处理，将在下一章进行讨论。

在本项目所提的有序充电策略下，充电负荷和总负荷曲线如图1.9所示。首先，总负荷被严格限制在变压器所允许的最大负荷内，这是由约束(1.16)所决定的。与同样可保证负荷受限的贪心充电策略相比（见图1.7），图1.9中有序充电策略下总负荷曲线更加平缓，峰谷差更小。这一现象的主要原因是，由于基础负荷的峰谷期与分时电价的峰谷段大致对应，有序充电会尽可能将充电负荷移动至电价谷段和平段以减小充电费用，从而间接起到了“削峰填谷”的作用，平抑了负荷曲线的波动，提高了配电网运行的稳定性 [5, 7, 22]。

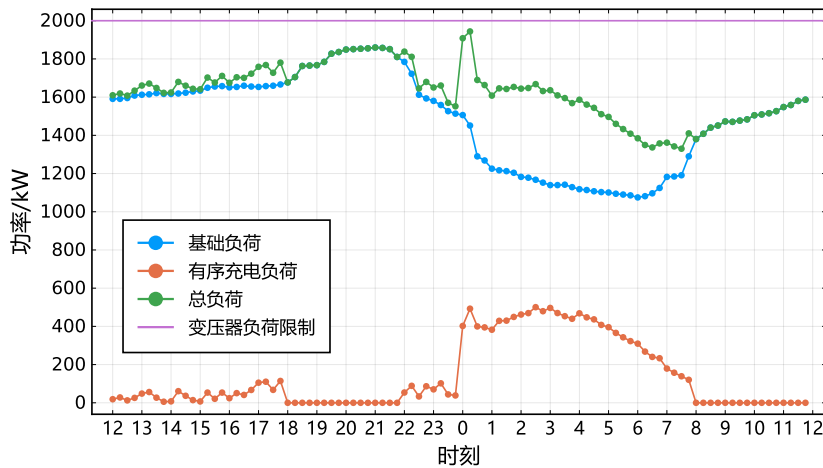


图 1.9: 有序充电策略下的负荷曲线

有序充电优化问题中约束(1.19)可把总负荷的三相功率不平衡度有效限制在指定数值以下，此作用可由图1.10所示结果得到验证。

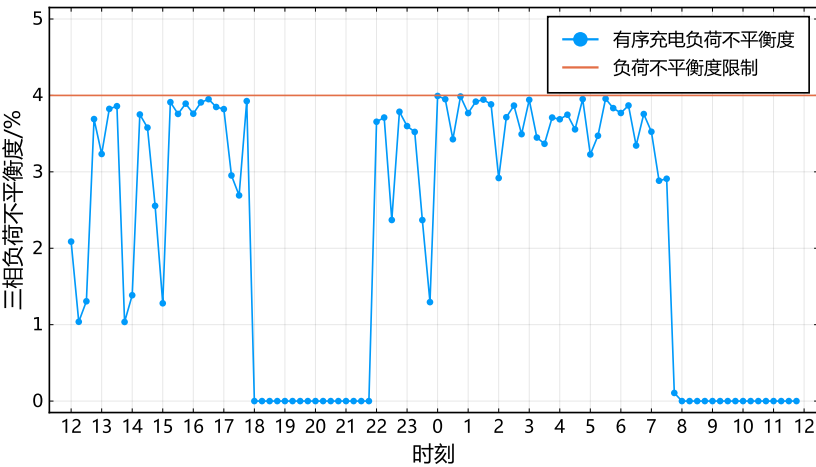


图 1.10: 有序充电策略下的三相负荷不平衡度

该 100 辆电动汽车在有序充电策略调度下的充电总花费为 1136.7 元，远低于无序充电和贪心充电方案的花费。

1.3.6 三种方法算例结果对比及讨论

在上述三种充电策略下，计算小区总负荷的相关指标，如表1.5所示。其中，负荷波动率等于负荷曲线的标准差与其平均值之比，表示单位平均负荷时的负荷分散程度。负荷波动率越小，则负荷越平稳。

表 1.5: 不同充电策略下的小区负荷特性

	负荷峰值/kW	负荷谷值/kW	峰谷差/kW	负荷波动率/%	三相负荷不平衡度峰值/%
基础负荷	1859.75	1075	784.75	16.7	0
无序充电	2321.55	1081.45	1240.1	21.53	7.03
贪心充电	2000	1097.6	902.4	17.18	3.98
有序充电	1943.85	1330	613.85	9.01	3.99

由表1.5可见，无序充电的充电负荷高峰期与基础负荷高峰期有较大重叠（见图1.5），导致负荷峰值和相应的峰谷差显著增大，负荷波动率明显升高。这类剧烈波动的负荷给电力系统的平稳运行带来不利影响，会导致供电电压的波动和闪变 [7,32]。同时，由于缺乏相应约束，无序充电的峰值负荷会导致变压器过载，三相负荷不平衡度也超出了限制范围。与无序充电策略相比，贪心充电方案对负荷峰值和三相负荷不平衡度施加了约束，可维持配电系统的正常运行，也间接减小了负荷波动率。但应看到，当实施贪心充电时，小区总负荷的峰值增加较多，而谷值几乎不变，使得负荷峰谷差与波动率仍然大于基础负荷，即贪心充电并没有起到“移峰填谷”的作用。比较表1.5中基础负荷与有序充电总负荷的峰谷值以及图1.9，可



以明显看到有序充电将电动汽车充电高峰期移动到基础负荷的低谷期，从而通过“移峰填谷”进一步平抑了负荷曲线，取得了最小的负荷峰谷差和最低的负荷波动率。总的来看，表1.5表明有序充电策略给出了最优的小区负荷特性。

针对本算例的 100 辆车，三种充电策略下的充电花费如表1.6所示。由于采用贪心充电策略时，有小部分车辆充电需求未完全满足（见表1.4），表1.6仅考虑了其已充电量。由图1.11进一步可见，有序充电策略通过尽可能在电价谷段充电，可有效减少充电费用，表1.6表明其充电平均单价仅为无序充电方案的大约一半。

表 1.6: 不同充电策略下的充电花费

	充电费用/元	平均单价/(元/度)
无序充电	2226.47	0.694
贪心充电	1660.79	0.523
有序充电	1136.68	0.354

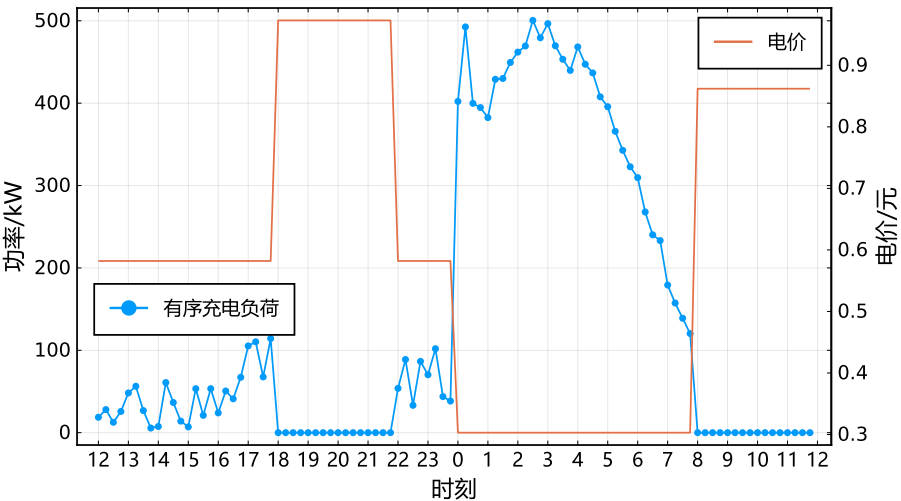


图 1.11: 有序充电负荷曲线和分时阶梯电价曲线的对应关系

若回顾有序充电的优化目标(1.6)，可注意到所提出的有序充电方法并没有试图直接最小化峰谷差等负荷特性，而表1.5中有序充电的平缓负荷曲线可借助图1.11给出解释。通过合理设计分时电价，使得居民用电负荷的峰谷段与电价的峰谷段大致对应（现实中阶梯电价大多依据此思路设计），则最小化充电花费的同时可自动将充电高峰期移动到分时电价的谷段（相当于基础负荷的谷段，见图1.11），从而起到“移峰填谷”、平抑负荷曲线、减小负荷波动的作用 [22]。

1.3.7 蒙特卡罗仿真

上述1.3.3节到1.3.5节报告了一个典型算例的相关仿真结果。由于电动汽车的相关信息，如接入时的 SOC、离开时期望 SOC、充电功率等，是根据1.3.1.1节的



设定随机生成的, 本节进一步展示蒙特卡罗实验的结果。运行 100 次算例仿真, 其中每次仿真随机生成 100 辆车辆信息, 并汇总这 100 次仿真的相关结果, 以更好反映三种充电策略的性能统计特征。

100 次蒙特卡罗仿真下的负荷波动率曲线如图1.12所示。可见, 上文具体算例中的对比结果并不失一般性, 本项目提出的有序充电方案可取得明显最低的负荷波动率, 在大多数情况下低于 10%, 远低于贪心充电的 18% 和无序充电的 21%。

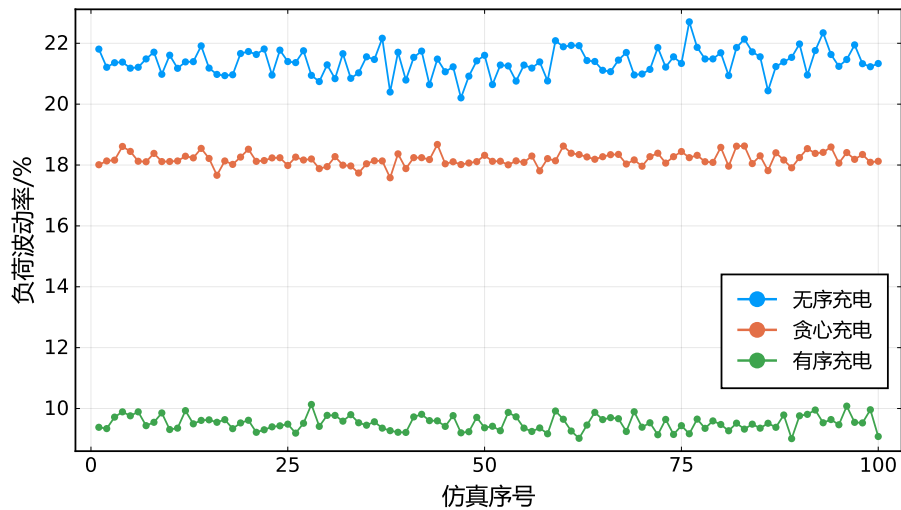


图 1.12: 蒙特卡罗仿真中三种充电策略的负荷波动率

在 100 次蒙特卡罗仿真中, 相应的充电费用统计如图1.13所示。可见, 有序充电策略下的充电花费仅大致为无序充电方案的一半、贪心充电方案的 2/3, 取得了最好的经济效益。

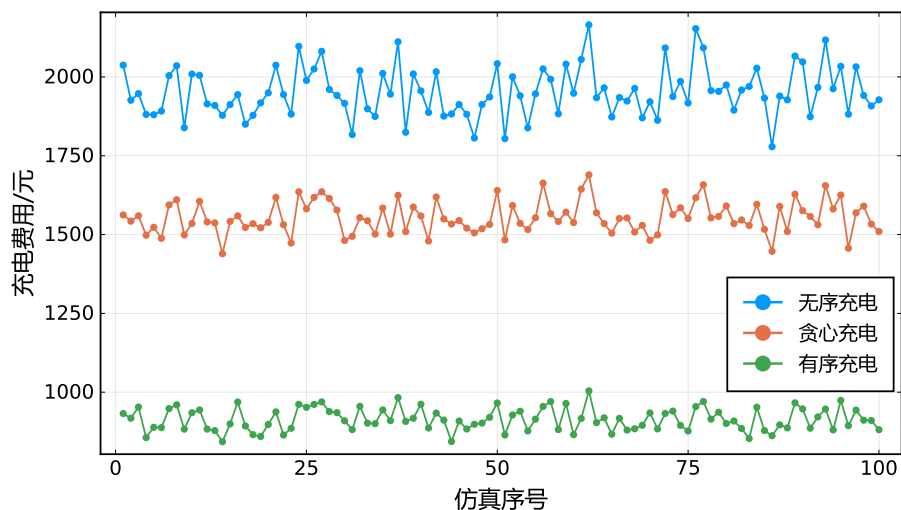


图 1.13: 蒙特卡罗仿真中三种充电策略的充电费用

综上所述, 本项目设计的基于整数规划的最优有序充电算法, 针对分时阶梯电

价对充电负荷进行时间轴上的移动,从而有效减小用户的充电成本进行优化,并同时平抑电网的负荷波动,实现电力负荷削峰填谷,维护小区配电网络、特别是老旧小区容量有限的电力系统的安全稳定运行。

# References

- [1] 李佩杰, 林颂晨, 白晓清, 罗翠云, and 韦化, “计及配电网三相模型的电动汽车充电滚动时域控制,” 中国电机工程学报, vol. 36, no. 17, pp. 4533–4543, 2016.
- [2] 占恺峤, 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 贾龙, and 张洪财, “考虑三相负荷平衡的电动汽车有序充电策略,” 电力系统自动化, vol. 39, no. 17, pp. 201–207, 2015.
- [3] J. de Hoog, T. Alpcan, M. Brazil, D. A. Thomas, and I. Mareels, “Optimal Charging of Electric Vehicles Taking Distribution Network Constraints Into Account,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, pp. 365–375, Jan. 2015.
- [4] H. S. Das, M. M. Rahman, S. Li, and C. W. Tan, “Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 120, p. 109618, Mar. 2020.
- [5] 沈国辉, 陈光, 赵宇, 李晓光, 耿爱国, 袁浩, and 刘方, “基于双目标分层优化和 TOPSIS 排序的电动汽车有序充电策略,” 电力系统保护与控制, vol. 49, no. 11, pp. 115–123, 2021.
- [6] S. Hajforoosh, M. A. S. Masoum, and S. M. Islam, “Online optimal variable charge-rate coordination of plug-in electric vehicles to maximize customer satisfaction and improve grid performance,” *Electric Power Systems Research*, vol. 141, pp. 407–420, Dec. 2016.
- [7] 陈奎, 马子龙, 周思宇, 沈兴来, and 蔺华, “电动汽车两阶段多目标有序充电策略研究,” 电力系统保护与控制, vol. 48, no. 1, pp. 65–72, 2020.
- [8] 师瑞峰, 梁子航, and 马源, “基于 TOPSIS 方法的居民区电动汽车有序充电策略,” 电力系统自动化, vol. 42, no. 21, pp. 104–110+159, 2018.

- [9] 蒋怡静, 于艾清, and 黄敏丽, “考虑用户满意度的电动汽车时空双尺度有序充电引导策略,” *中国电力*, vol. 53, no. 4, pp. 122–130, 2020.
- [10] B. Sun, Z. Huang, X. Tan, and D. H. K. Tsang, “Optimal Scheduling for Electric Vehicle Charging With Discrete Charging Levels in Distribution Grid,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, pp. 624–634, Mar. 2018.
- [11] E. Sortomme, M. M. Hindi, S. D. J. MacPherson, and S. S. Venkata, “Coordinated Charging of Plug-In Hybrid Electric Vehicles to Minimize Distribution System Losses,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, pp. 198–205, Mar. 2011.
- [12] C. Jin, J. Tang, and P. Ghosh, “Optimizing Electric Vehicle Charging: A Customer’s Perspective,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, pp. 2919–2927, Sept. 2013.
- [13] 梁锦华, 原增泉, 韩华春, and 许海平, “电动汽车充电站功率和时间分配控制策略,” *电力建设*, vol. 36, no. 7, pp. 101–106, 2015.
- [14] G. Abdelaal, M. Gilany, and M. Elshahed, “A Smart On-Line Centralized Coordinated Charging Strategy in Residential Distribution Networks,” *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 11, pp. 523–534, June 2021.
- [15] P.-Y. Kong and G. K. Karagiannidis, “Charging Schemes for Plug-In Hybrid Electric Vehicles in Smart Grid: A Survey,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6846–6875, 2016.
- [16] M. Liu, P. Mcnamara, R. Shorten, and S. Mcloone, “Residential electrical vehicle charging strategies: The good, the bad and the ugly,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 3, pp. 190–202, June 2015.
- [17] R.-C. Leou, “Optimal Charging/Discharging Control for Electric Vehicles Considering Power System Constraints and Operation Costs,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 1854–1860, May 2016.
- [18] Y. He, B. Venkatesh, and L. Guan, “Optimal Scheduling for Charging and Discharging of Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 1095–1105, Sept. 2012.

- [19] L. Yao, W. H. Lim, and T. S. Tsai, “A Real-Time Charging Scheme for Demand Response in Electric Vehicle Parking Station,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, pp. 52–62, Jan. 2017.
- [20] 李斌, 刘畅, 陈慧妙, 胡进永, 徐智威, 夏露, and 胡泽春, “基于混合整数规划的电动公交车快速充电站有序充电策略,” *电网技术*, vol. 40, no. 9, pp. 2623–2630, 2016.
- [21] L. A. Wolsey, *Integer programming*. John Wiley & Sons, 2020.
- [22] 王姝凝 and 杨少兵, “居民小区电动汽车充电负荷有序控制策略,” *电力系统自动化*, vol. 40, no. 4, pp. 71–77, 2016.
- [23] 余星儒 and 高桂革, “基于粒子群算法的电动汽车有序充电控制策略的研究,” *电力学报*, vol. 32, no. 3, pp. 194–199+264, 2017.
- [24] 张公凯, 陈才学, and 郑拓, “改进鲸鱼算法在电动汽车有序充电中的应用,” *计算机工程与应用*, vol. 57, no. 4, pp. 272–278, 2021.
- [25] M. Casini, A. Vicino, and G. G. Zanvettor, “A receding horizon approach to peak power minimization for EV charging stations in the presence of uncertainty,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 126, p. 106567, Mar. 2021.
- [26] M. Ş. Kuran, A. Carneiro Viana, L. Iannone, D. Kofman, G. Mermoud, and J. P. Vasseur, “A Smart Parking Lot Management System for Scheduling the Recharging of Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 2942–2953, Nov. 2015.
- [27] Y. Zheng, Y. Song, D. J. Hill, and K. Meng, “Online Distributed MPC-Based Optimal Scheduling for EV Charging Stations in Distribution Systems,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, pp. 638–649, Feb. 2019.
- [28] W. Tang and Y. J. Zhang, “A Model Predictive Control Approach for Low-Complexity Electric Vehicle Charging Scheduling: Optimality and Scalability,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, pp. 1050–1063, Mar. 2017.
- [29] 冯万富, 电动汽车接入配电网的三相不平衡问题研究. 硕士, 沈阳工程学院, 2021.
- [30] 周美玲 and 陈淮莉, “基于负荷平衡的电动汽车模糊多目标充电调度算法,” *计算机应用*, vol. 41, no. 4, pp. 1192–1198, 2021.

- [31] 王吉洁, 王生栋, 祝小康, 王运泽, 李智强, and 韩俊杰, “方舱供配电三相负载不平衡在线调整简化算法,” 新技术新工艺, no. 6, pp. 47–50, 2020.
- [32] W. Su and M.-Y. Chow, “Performance Evaluation of an EDA-Based Large-Scale Plug-In Hybrid Electric Vehicle Charging Algorithm,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 308–315, Mar. 2012.