

清华大学

综合论文训练

题目：高速公路沿线电动汽车充电站
规划方法研究

系 别：电机工程与应用电子技术系

专 业：电气工程及其自动化

姓 名：谢睿

指导教师：魏韡 助理研究员

2017年6月5日

中文摘要

为了给电动汽车的远距离行驶提供条件，需要在高速公路沿线建设充电站。本文研究高速公路沿线的充电站规划问题，采用时空模型刻画电动汽车充电需求，分别针对离网型和并网型充电站分析建模，提出一套完整的规划方案，随后将所提规划方法应用于测试案例验证可行性，通过结果分析验证合理性。除充电设施数量规划外，需求解的优化问题均可使用商业求解器求出最优解，且测试案例表明求解时长可接受。

关键词：电动汽车；充电站规划；配电网；随机优化

ABSTRACT

In order to enable the long-distance traveling of electric vehicles, charging stations should be built along the highway. This thesis studies charging station planning along the highway. A spatial and temporal model is adopted to describe the charging demand. The off-grid and grid-connected charging stations are analyzed and modeled respectively, and a complete planning framework is proposed. Then the methods are applied to a test case for verification. The result shows the feasibility and rationality. Most optimal solutions except charging facility programming can be obtained by off-the-shelf solver, and the test case shows that the time is acceptable.

Keywords: electric vehicle; charging station planning; power distribution network; stochastic optimization

目 录

第1章 引言	1
1.1 研究意义	1
1.2 电动汽车及主要充电方式简介	1
1.3 研究现状	2
1.4 论文主要内容	4
第2章 充电需求建模	6
2.1 概述	6
2.2 电动汽车建模	6
2.2.1 建模目标	6
2.2.2 电动汽车分类	7
2.2.3 电池容量建模	7
2.2.4 荷电状态建模	8
2.2.5 行驶里程建模	8
2.2.6 行驶速度与充电功率建模	8
2.3 充电行为建模	9
2.3.1 建模目标	9
2.3.2 行驶路线建模	9
2.3.3 其他参数建模	9
2.4 蒙特卡洛模拟	9
2.5 说明	11
2.5.1 充电需求数据形式	11
2.5.2 蒙特卡洛过程循环次数	11
2.5.3 直线状高速公路的假设	11
2.6 小结	11

第3章 离网型充电站规划	13
3.1 概述	13
3.2 选址规划	13
3.2.1 问题情景	14
3.2.2 模型与解法	14
3.2.3 说明	16
3.3 充电需求校正	17
3.3.1 校正理由	17
3.3.2 校正过程	17
3.4 充电设施数量规划	19
3.4.1 问题情景	19
3.4.2 求解方法	19
3.4.3 说明	20
3.5 站内容量规划	21
3.5.1 问题情景	21
3.5.2 确定性模型	22
3.5.3 分布鲁棒优化模型	25
3.5.4 失败情形分析	26
3.5.5 条件风险价值求解方法	28
3.5.6 取样近似求解方法	33
3.5.7 说明	34
3.6 小结	38
第4章 并网型充电站规划	39
4.1 概述	39
4.2 选址与负荷分配模型	39
4.2.1 问题情景	39
4.2.2 模型与解法	40
4.2.3 说明	42
4.3 配电网规划模型	43

4.3.1	问题情景	44
4.3.2	支路潮流模型及其松弛化简介	44
4.3.3	基本模型	46
4.3.4	等价模型与求解方法	49
4.3.5	说明	51
4.4	联合规划	54
4.5	充电设施数量规划	56
4.6	小结	57
第5章	测试案例	58
5.1	概述	58
5.2	交通数据	58
5.2.1	电动汽车数据	58
5.2.2	道路数据	59
5.2.3	交通行为数据	59
5.3	充电需求建模	60
5.4	可再生能源数据	65
5.5	离网型充电站规划	65
5.5.1	选址规划	65
5.5.2	充电需求校正	70
5.5.3	充电设施数量规划	70
5.5.4	站内容量规划	71
5.6	电网数据	75
5.7	并网型充电站规划	77
5.7.1	候选站点参数	77
5.7.2	选址与负荷分配	77
5.7.3	配电网规划	80
5.7.4	联合规划	80
5.8	小结	82

第6章 结论	83
6.1 本文工作总结	83
6.2 存在的问题与改进方向	84
插图索引	85
表格索引	87
参考文献	88
致 谢	91
声 明	92
附录 A 外文资料的调研阅读报告或书面翻译	93

主要符号表

v_{EV}	行驶平均速度
SOC_i	电池充电完成后的荷电状态
SOC_c	电池恰好需要充电时的荷电状态
Ran_{ac}	从充满电到需要充电的行驶里程
Ran_{sc}	到达需要充电状态后能继续行驶的里程
p_{EV}	平均充电功率
t_{EV}	充电时长
L7e	550 kg 以下载货四轮车
M1	8 座以下客车
N1	3500 kg 以下四轮货车
N2	3500 kg 至 12000 kg 四轮货车
Cap	电池容量
Ran_{mc}	最大行驶里程
η_d	表示电动汽车加速减速过程中能量损耗的效率参数
η_{EV}	电动汽车充电效率
t_s	行程起始时间
SOC_b	行程初始荷电状态
SOC_e	终点最低荷电状态
OD	起点与终点 (Origin-Destination)
N_e	高速公路出入口数量
$OD_{N_e \times N_e}$	描述行程起点与终点概率分布的矩阵
S_{CP}	充电需求点集合
N_{CP}	充电需求点数量
S_{CS}	候选站点集合
N_{CS}	候选站点数量
$R_{N_{CS} \times N_{CP}}$	候选站点对充电需求点的覆盖关系矩阵
c_i	候选站点 i 的建站成本
c_0	总建站成本上限
z_i	表示候选站点 i 是否建站的 0-1 变量

d_j	表示充电需求点 j 是否被覆盖的 0-1 变量
$WCP_{NCP \times 1}$	各充电需求点需求电量向量
S_T	行程集合
N_T	行程数量
$dT_{N_T \times 1}$	表示行程是否可以完成的向量
$RT_{NCP \times N_T}$	表示充电需求点归属行程的关系的矩阵
S_{CF}	充电设施种类集合
N_{CF}	充电设施种类总数
$Pr_{N_{CF} \times 1}^{CF}$	各种充电设施单台成本
\bar{t}_w	用户平均等待时间上限
$n_{N_{CF} \times 1}^{CF}$	各种充电设施数量
t_w	用户平均等待时间
\mathbb{N}	自然数集合
Pr_{RG}	单位容量可再生能源发电装置的成本
Pr_{ES}	单位容量储能装置的成本
\underline{w}	储能装置荷电状态下限
\bar{w}	储能装置荷电状态上限
η_1	储能装置充电效率
η_2	储能装置放电效率
Δ_t	时间段长度
T	时间段总数
ξ_{RG}	各时间段可再生能源发电功率与装置容量之比
ξ_C	各时间段充电负荷功率
x_{RG}	可再生能源发电装置容量
x_{ES}	储能装置容量
w_0	储能初始总电量
p_{F1}	表示各时间段电源流向负荷的功率的向量
p_{F2}	表示各时间段电源流向储能的功率的向量
p_{F3}	表示各时间段储能流向负荷的功率的向量
F_{OC}	离网型充电站站内容量规划目标函数
x^{OC}	(x_{RG}, x_{ES}, w_0)
ξ^{OC}	(ξ_{RG}, ξ_C)

$C^{OC}(x^{OC}, \xi^{OC})$	$\{\xi^{OC} \exists p_{F1}, p_{F2}, p_{F3}, s. t. \text{ 约束 (3-10) - (3-14) 成立}\}$
\mathcal{D}^{OC}	概率分布集合
α^{OC}	可容忍的失败概率
\mathbb{R}	实数集合
f_0^{OC}	通过观察得到的 ξ^{OC} 的近似概率密度函数
\mathbb{P}_0^{OD}	通过观察得到的 ξ^{OC} 的近似概率分布
d_{OC}	KL 散度上界
\mathcal{M}_+	所有概率分布的集合
α_{1+}^{OC}	对观察到的概率分布可容忍的失败概率
$\overline{C}^{OD}(x^{OC}, \xi^{OC})$	$\{\xi^{OC} \text{若 } p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} \text{ 满足约束 (3-25a) - (3-25d), 则存在 } t \text{ 使约束 (3-25e) 不成立}\}$
\mathbb{R}_+	非负实数集合
g^{OC}	描述违反约束 (3-25a) - (3-25e) 的情况的损失函数
VaR	风险价值 (Value at Risk)
CVaR	条件风险价值 (Conditional Value at Risk)
$E(\cdot)$	期望
γ	使用条件风险价值方法时引入的辅助变量
s_k^{OC}	$\max\{g^{OC}(x^{OC}, \xi_k^{OC}) - \gamma, 0\}$
ξ_k^{OC}	ξ^{OC} 的第 k 次取样
q^{OC}	取样总数
z_k^{OC}	表示第 k 次取样是否导致失败情形的 0-1 变量
M_C	充电负荷 ξ_C 的上界
N_{RG}	可再生能源种类总数
n_{RG}	可再生能源发电设备数量
n_{ES}	储能设备数量
R_0^{RG}	单位发电设备容量
R_0^{ES}	单位储能设备容量
x_{FG}	柴油发电机容量
p_{F4}	表示各时间段柴油发电功率的向量
F_{FG}	柴油发电成本函数
Pr_{FG}	单位容量柴油发电机成本
SR	充电站服务半径

S_{CI}	充电区间集合
N_{CI}	充电区间数量
$R_{N_{CS} \times S_{CI}}^I$	候选站点服务区域与充电区间覆盖关系矩阵
$P_{N_{CI} \times 1}^{CI}$	各充电区间的充电需求总量
f^{CI}	各候选站点能承受的充电需求上限
e_{ij}	候选站点 i 处的充电站承担的充电区间 j 内的充电需求
G	表示配电网拓扑结构的有向图
N	配电网节点集合（图 G 的节点）
E	配电网线路集合（图 G 的边）
(i, j) 或 $i \rightarrow j$	节点 i 到节点 j 的边
r_{ij}^l	节点 i 到节点 j 的线路的电阻（等效 $i \rightarrow j$ 间所有线路）
x_{ij}^l	节点 i 到节点 j 的线路的电抗（等效 $i \rightarrow j$ 间所有线路）
i	虚数单位
z_{ij}^l	节点 i 到节点 j 的线路的阻抗
g_i^n	节点 i 对地并联电导
b_i^n	节点 i 对地并联电纳的相反数
y_i^n	节点 i 对地并联导纳
V_i^n	节点 i 的复电压
I_{ij}^l	节点 i 到节点 j 的线路的复电流
P_{ij}^l	节点 i 到节点 j 的线路的始端有功功率（等效 $i \rightarrow j$ 间所有线路）
Q_{ij}^l	节点 i 到节点 j 的线路的始端无功功率（等效 $i \rightarrow j$ 间所有线路）
S_{ij}^l	节点 i 到节点 j 的线路的始端功率
p_i^n	节点 i 的注入有功功率
q_i^n	节点 i 的注入无功功率
s_i^n	节点 i 的注入功率
$(\cdot)^*$	复数取共轭
l_{ij}^l	$ I_{ij}^l ^2$ （等效 $i \rightarrow j$ 间所有线路）
v_i^n	$ V_i^n ^2$
$p_i^{n,g}$	节点 i 发电有功功率
$p_i^{n,d}$	节点 i 负荷有功功率

$q_i^{n,g}$	节点 i 发电无功功率
$q_i^{n,d}$	节点 i 负荷无功功率
$\bar{p}_i^{n,g}$	新增电源前节点发电的有功功率上限
$\underline{p}_i^{n,g}$	新增电源前节点发电的有功功率下限
$\bar{q}_i^{n,g}$	新增电源前节点发电的无功功率上限
$\underline{q}_i^{n,g}$	新增电源前节点发电的无功功率下限
n_i^g	节点新增电源数量
$\frac{dp_i^{n,g}}{dq_i^{n,g}}$	新增单位电源对发电有功功率上限的影响
$\frac{dp_i^{n,g}}{dq_i^{n,g}}$	新增单位电源对发电有功功率下限的影响
$\frac{dq_i^{n,g}}{dq_i^{n,g}}$	新增单位电源对发电无功功率上限的影响
$\frac{dq_i^{n,g}}{dq_i^{n,g}}$	新增单位电源对发电无功功率下限的影响
$Pr_i^{n,g}$	节点 i 新增单位电源的成本
F^{ps}	新增分布式电源的总成本
N_{ij}^l	新增线路后节点 i 到节点 j 的线路数量
\tilde{l}_{ij}^l	节点 i 到节点 j 一条线路上复电流的模的平方
\tilde{P}_{ij}^l	节点 i 到节点 j 一条线路上的始端有功功率
\tilde{Q}_{ij}^l	节点 i 到节点 j 一条线路上的始端无功功率
\tilde{r}_{ij}^l	节点 i 到节点 j 一条线路的电阻
\tilde{x}_{ij}^l	节点 i 到节点 j 一条线路的电抗
Pr_{ij}^l	在节点 i 与节点 j 之间新增一条线路的成本
F^l	新增线路的总成本
Pr_p	表示从大电网购买电能价格的参数
FP	从大电网购买电能的费用
$Pr_i^{n,g,1}$	节点 i 发电的成本参数 1
$Pr_i^{n,g,2}$	节点 i 发电的成本参数 2
F^s	分布式电源发电总费用
κ	折算新增电源与线路的成本至运行成本的参数
$z_{ij,n}^l$	表示节点 i 到节点 j 新增线路数量的二进制数的第 n 位
N_L	新增线路数量的二进制表示位数的一个上界
$l_{ij,n}^l$	$\tilde{l}_{ij}^l z_{ij,n}^l$
M_l	\tilde{l}_{ij}^l 的一个上界
$P_{ij,n}^l$	$\tilde{P}_{ij}^l z_{ij,n}^l$

M_P	$ \tilde{P}_{ij}^l $ 的一个上界
$Q_{ij,n}^l$	$\tilde{Q}_{ij}^l z_{ij,n}^l$
M_Q	$ \tilde{Q}_{ij}^l $ 的一个上界
$\widehat{S}_{ij}^l = \widehat{P}_{ij}^l + \mathbf{i}\widehat{Q}_{ij}^l$	节点 i 到节点 j 的线性潮流
$y_i^{n,0} = g_i^{n,0} - \mathbf{i}b_i^{n,0}$	节点 i 处与新增线路无关的对地并联导纳
$y_{ij}^{n,l,1} = g_{ij}^{n,l,1} - \mathbf{i}b_{ij}^{n,l,1}$	在 (i, j) 增加一条线路造成节点 i 的对地并联导纳的改变量
$y_{ij}^{n,l,2} = g_{ij}^{n,l,2} - \mathbf{i}b_{ij}^{n,l,2}$	在 (i, j) 增加一条线路造成节点 j 的对地并联导纳的改变量
N_{GN}	图 G 中节点总数
N_{GL}	图 G 中边总数
p_i^{CS}	候选站点 i 承担的充电负荷
$R_{N_{CS} \times N_{GN}}^G$	表示候选站点接入配电网节点情况的矩阵
$p_i^{d,0}$	节点 i 原有负荷
η_C	充电需求覆盖率下限

第1章 引言

1.1 研究意义

环境污染与全球变暖是目前人类面临的两大问题。化石能源的大量使用容易引发环境污染，导致大量碳排放，进而加重温室效应。同时，化石能源的不可再生性也使其不符合当今社会的可持续发展需求。纯电动汽车消耗电能，使用过程中可做到零排放。可在发电环节集中采取措施，减少使用化石能源造成的环境污染。如果从充电电源入手，可大幅提高电动汽车耗能中的可再生能源比例，同时降低碳排放量。基于以上优势，近年来电动汽车在世界范围内受到了广泛关注，电动汽车数量增长迅速。例如，2014年至2015年世界电动汽车（包括混合动力汽车）数量增长了70%，并且在2015年，中国超过美国成为拥有最大电动汽车市场的国家^[1]。未来电动汽车在交通工具中的比例将更大，比如中国计划在2020年之前使电动汽车数量达到500万^[2]。

然而，仍有一些因素制约着电动汽车的发展。第一，电动汽车行驶里程与化石能源汽车相比明显更短。电动汽车行驶里程主要由电池容量与单位里程耗能决定，在这方面存在技术瓶颈。第二，电动汽车的使用需要以充足的配套设施为基础，其中最主要的就是充电设施的建设。建立合理的模型，按规划结果建设充电站，有利于满足更多的充电需求，减少建设成本与运行成本。为了使电动汽车能够得到更广泛的使用，必须让其能够远距离行驶。汽车的远距离行驶常常沿高速公路。短期内电动汽车的行驶里程可能不会有突破性的增长，因此需要在高速公路沿线合理设置电动汽车充电站。目前，国内已在多条高速公路上建设了一些电动汽车充电站，并且计划在将来建造更多的充电站。

综上所述，研究高速公路沿线的充电站规划有重要意义。

1.2 电动汽车及主要充电方式简介

本文讨论插电式的电动汽车。电动汽车的充电方式可以分为慢速充电和快速充电。慢速充电时功率较小，因此充电时间长，充满电往往需几个小时。慢速充电的优势是对充电设施的要求较低，所需投资较少。因此慢速充电比较适

合作为基础充电方式，用户可以在电动汽车空闲时慢速充电。应用快速充电技术，可以大大缩短充电时间，甚至可在 30 min 内将电池荷电状态从 10% 提升到 80%。因此，快速充电的充电功率较大，通常不会低于 30 kW^[3]。因为高速公路沿线充电站供旅程中的电动汽车使用，所以选用快速充电站才能满足实际需求。

充电站可以大致分为离网型与并网型。大多数充电站是并网型，与电网连接，可以从电网获得电能。通常，并网型充电站对电网造成的影响不可忽略^[4,5]。因此，在建充电站前，有必要建立数学模型分析其影响，甚至规划电网的升级改造。离网型充电站是一个独立的系统，站内有电源提供电能，常常还有储能装置用于应对负荷的波动性。如果在较偏远的地区，没有足够强壮的电网覆盖，却有充足的可再生能源，就可以考虑建离网型的充电站^[6]。电源容量等参数需要通过规划得出，以保证能满足负荷需求，同时最小化成本。

1.3 研究现状

电动汽车充电站规划是近年来一个研究热点。

一些文献讨论了电动汽车充电站的规划原则^[7-9]。其中，文献 [7] 指出电动汽车充电站规划问题与经典的加油站规划问题不同，具体而言体现在电池容量、行驶里程、充电能量来源、充电时间以及用途等方面。文献 [8] 根据电动汽车的普及情况划分规划阶段，依照电动汽车的用途选择充电方式，提出充电设施规划的总体流程。文献 [9] 系统地描述了规划流程，即首先收集待规划区域的电动汽车、交通状况、地理条件、电网及现有负荷等有关数据，然后建立充电需求模型，在此基础上进行充电站的选址和定容，最终校核方案的合理性并评估。

在充电需求建模方面，已有多种不同的方法被提出。基于蒙特卡洛方法可以在考虑随机性的同时对电动汽车充电需求建模^[4,10-12]。文献 [10] 用相应的概率分布刻画充电开始时间、行驶里程和充电功率。在使用蒙特卡洛方法得到充电负荷后，研究电动汽车充电行为对电网原有负荷曲线的影响。文献 [11] 引入了车辆类型、充电方式、充电初始荷电状态作为新的随机量。文献 [4] 利用交通统计信息中的起点终点概率分布，以及电动汽车性能参数的统计信息，得到了细致的充电需求时空模型，并将之应用于分析插电式电动汽车对电网的影响。文献 [12] 针对高速公路，在该时空模型基础上对充电需求建模。一些文献假设

道路中某点的充电需求与该点交通流量成正比^[13,14]。流量充电位置模型（flow refueling location model）也可以用于充电需求建模，在已知充电站或者候选站点位置的情况下，通过判断两站之间的路程是否大于电动汽车行驶里程，确定电动汽车的充电位置与需求电量。该模型有几种变形^[5]。除此以外，在某些情况下，还可以采用统计方法得到充电需求^[15]。

在充电站选址定容方面也已有多种方法。许多文献利用伏罗诺伊图（Voronoi Diagram）划分充电区域，并由此选址定容^[13,16,17]。文献 [16] 提出筛选得到候选站点集合的方法，使用伏罗诺伊图将充电需求分配到充电站，规划时最小化充电站成本和网损费用。文献 [17] 引入根据加权伏罗诺伊图划分区域的方法，其中权重由电动汽车分布特征得出，规划问题由粒子群算法求解。文献 [13] 在规划中进一步加入配电网约束条件，优化目标兼顾用户的利益。其他一些文献基于路网结构为充电站选址定容^[5,12,14,18]。文献 [14] 设充电需求与交通流量成正比，在交通学科的截流选址模型基础上，考虑电动汽车的行驶里程和配电网约束，建立了一个多目标规划模型。文献 [18] 针对高速公路，对其中电动汽车荷电状态的变化建立了模型，考虑行驶里程与路网信息的同时采用启发式方法获取候选站点集合，在此基础上建立选址规划模型。文献 [12] 考虑交通信息与电动汽车性能，利用蒙特卡洛方法得到高速公路中充电需求点的时间空间分布，然后采用聚类的方法尝试得到捕获最多充电需求的充电站选址方案，最后使用排队模型刻画电动汽车到达充电站的过程，并以此确定充电站容量。文献 [5] 假定已有候选站点集合，在流量充电位置模型的基础上，使用 0-1 整数变量表示候选站点是否建站，并结合交通流量约束与配电网线性近似的潮流约束，建立选址规划模型。

针对离网型充电站规划的研究较少^[19]。文献 [20] 研究了含有多种可再生能源、柴油发电与储能装置的微网系统的容量优化问题，首先对各个部分分别建立数学模型，提出经过优化的调度策略，在此基础上得到最小化综合成本的模型，并用遗传算法求解。文献 [21] 研究类似的问题，在可靠性与碳排放的约束下，最小化投资成本和柴油发电成本。在使用遗传算法求解该规划问题之前，先采用模糊聚类算法将一年的运行条件数据归类，然后为各部分建立马尔可夫模型。

现有研究仍普遍存在一些问题。例如，在进行基于充电需求的选址时，未充分考虑充电站之间的相互影响。对于并网型充电站，选址和容量规划时，侧

重交通或电网两者中的一方面，忽略或简化其他方面。当规划涉及配电网的升级改造时，将充电站与配电网的规划分阶段进行，将二者相互影响的关系人为割裂开来。对于离网型充电站，现有研究通常假设负荷、可再生能源等随机量的分布已知，但实际上通常只能获得一些样本数据，这些数据对于真实分布的刻画精确度有限。本文将针对以上问题提出新的规划方法。

1.4 论文主要内容

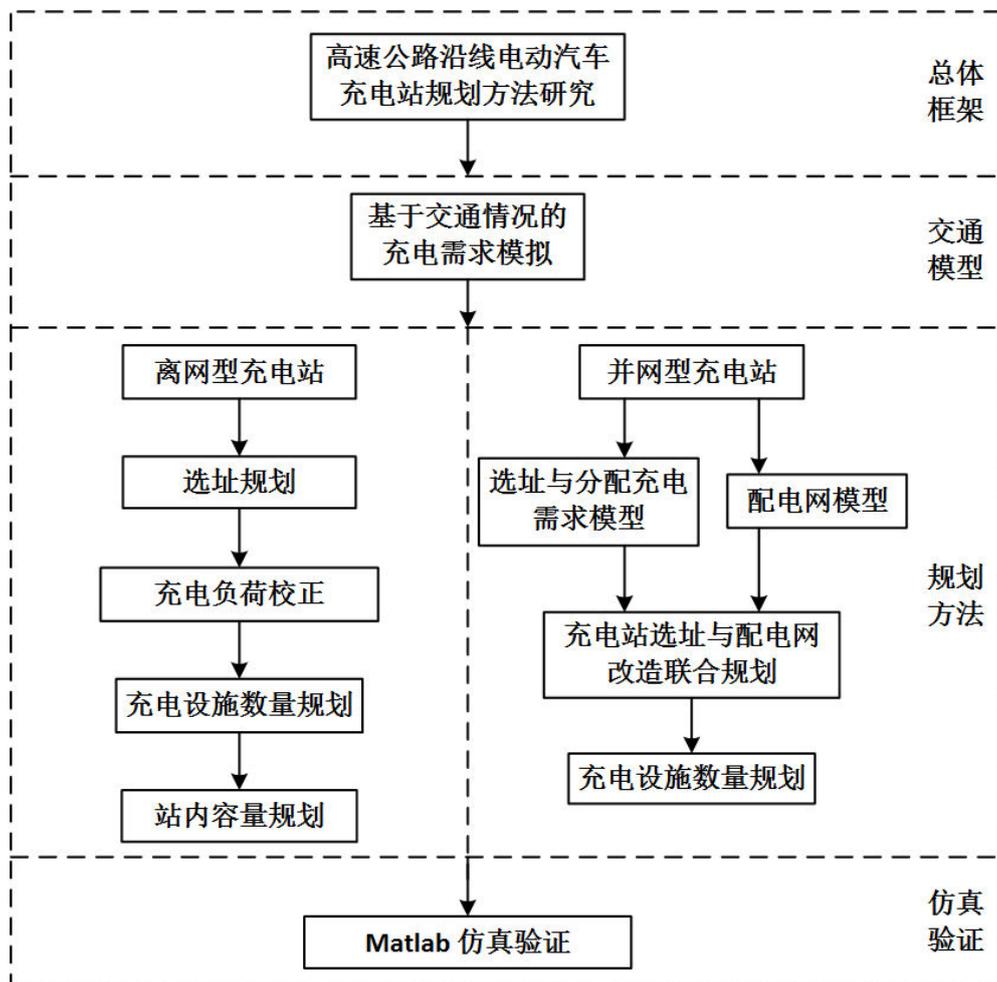


图 1.1 研究思路

本文将介绍一套完整的高速公路沿线电动汽车充电站规划方案，它的基础是充电需求建模。然后针对离网型和并网型充电站的情况分别提出新的规划方

法，最后用基于实际数据设计的测试案例验证所提方法的可行性与合理性，如图 1.1 所示。

本文余下内容安排是：第 2 章介绍高速公路充电需求模型；第 3 章提出离网型充电站规划方法，包括选址、确定充电设施数量与站内规划；第 4 章提出并网型充电站与配电网联合规划方法；第 5 章描述案例，分析测试结果；第 6 章总结所提方法的优势、可改进方向与不足。

第2章 充电需求建模

2.1 概述

本章将介绍如何对高速公路沿线的电动汽车充电需求建模，所用方法基于文献 [12]，并作出一些改进。后续规划将以本章方法得到的充电需求为参数。

充电需求应包含时间、地点、需求电能三个方面的信息。充电需求的影响因素包括电动汽车相关因素（电动汽车的电池容量及行驶里程、各种类型电动汽车数量等）和交通行为相关因素（行程开始时间、行程路线等）。本章对电动汽车和交通行为两方面分别建模，再用蒙特卡洛方法，模拟大量行程，得出充电需求的时空分布。图 2.1 是蒙特卡洛单次模拟的简略示意图，也是对本章各小节之间关系的说明。

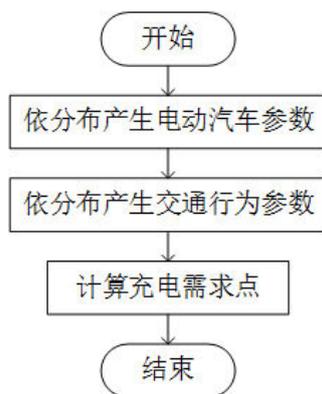


图 2.1 蒙特卡洛单次模拟示意图

为了简化模型，本章假定高速公路呈单条直线状，如图 2.2 所示。对这一假设的讨论见小节 2.5。

2.2 电动汽车建模

2.2.1 建模目标

电动汽车性能是充电需求的一个重要影响因素，具体来说，电动汽车的行驶里程、行驶速度、电池容量和充电功率都会对充电需求的时空分布产生影响。

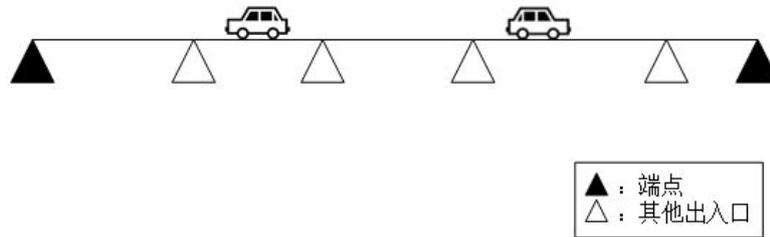


图 2.2 直线状高速公路示意图

换而言之，电动汽车模型应该为后续操作提供以下数据：行驶平均速度 v_{EV} （高速公路无阻塞情况下车辆行驶速度基本恒定^[12,22]）、电池充电完成后的荷电状态 SOC_i 、电池恰好需要充电时的荷电状态 SOC_c 、从充满电到需要充电的行驶里程 Ran_{ac} 、到达需要充电状态后能继续行驶的里程 Ran_{sc} 、充电平均功率 p_{EV} 、充电时长 t_{EV} 。这些数据具有分散性，不仅在不同车型的电动汽车之间有差异，而且也可能受到电动汽车改装、老化、载重等因素的影响。除此以外，不同电动汽车可能要求不同的充电设施。

理想情形下，如果有大量符合待规划区域情况的电动汽车调查数据，就可以直接用于蒙特卡洛模拟。然而，如果规划之前该区域没有充电站，那么电动汽车的使用也受到很大限制，因此实际应用中往往无法得到充足可靠的数据，下文将介绍一种建模方法，可根据电动汽车的典型性能和一些统计信息生成大量电动汽车性能数据。

2.2.2 电动汽车分类

不同类型的电动汽车性能差别很大。首先，按实际情况，根据用途、车型等将电动汽车分为几类。文献 [4] 基于 EU MERGE Project 的数据^[23]，将电动汽车分为 L7e、M1、N1 和 N2 四种类型，分别是 550 kg 以下载货四轮车、8 座以下客车、3500 kg 以下四轮货车、3500 kg 至 12000 kg 四轮货车。蒙特卡洛模拟中，根据待规划区域电动汽车类型比例生成电动汽车类型。

2.2.3 电池容量建模

对同类型电动汽车，电池容量 Cap 可用上下界约束的伽马分布或正态分布近似描述^[23]。在蒙特卡洛模拟中的做法是，对每台电动汽车，根据类型按照公式 (2-1) 或公式 (2-2) 描述的概率密度分布产生 Cap 。如果超过了预先指定的上

下界，则重新产生 Cap 直至满足要求。

$$f(Cap, \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} Cap^{\alpha-1} e^{-\frac{Cap}{\beta}} \quad (2-1)$$

$$g(Cap, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Cap-\mu^2}{2\sigma^2}} \quad (2-2)$$

其中 α 和 β 是伽马分布的参数， μ 和 σ 是正态分布的参数，它们只与电动汽车的类型有关。

2.2.4 荷电状态建模

电池荷电状态 SOC 是一个百分数，表示电池电量与电池容量的比例。电动汽车电池的主流技术将是锂离子电池和铅酸电池^[24]。考虑到电池使用寿命与充电效率，通常推荐在大约 15% - 30% 至 80% - 90% 荷电状态内使用电池^[23]。由此，本文假设电池充电完成后荷电状态 SOC_c 服从 15% - 30% 的均匀分布，电池恰好需要充电时的荷电状态 SOC_i 服从 80% - 90% 的均匀分布。

2.2.5 行驶里程建模

电池容量是决定电动汽车最大行驶里程 Ran_{mc} 的主要因素。文献 [4] 用多项式拟合的方式，由 Cap 与 Ran_{mc} 的数据组集合得到两者之间的关系，从而根据 Cap 计算 Ran_{mc} 。本文采用这种方法。

假设 SOC 随行驶路程线性变化^[12]，那么从充满电到需要充电的行驶里程 Ran_{ac} 、到达需要充电状态后能继续行驶的里程 Ran_{sc} 可以分别用公式 (2-3) 和公式 (2-4) 计算：

$$Ran_{ac} = \eta_d (SOC_i - SOC_c) Ran_{mc} \quad (2-3)$$

$$Ran_{sc} = \eta_d SOC_c Ran_{mc} \quad (2-4)$$

其中 η_d 是效率参数，用于计入电动汽车加速减速过程中的能量损耗。

2.2.6 行驶速度与充电功率建模

类似电池容量建模，行驶平均速度 v_{EV} 由上下界约束的正态分布得到。依

分布生成电动汽车要求的充电设施类型，进而得到充电平均功率 p_{EV} 。根据充电电量与功率，按公式 (2-5) 求出充电时长：

$$t_{EV} = \frac{(SOC_i - SOC_c)Cap}{\eta_{EV}P_{EV}} \quad (2-5)$$

其中 η_{EV} 是电动汽车电池充电效率参数。

2.3 充电行为建模

2.3.1 建模目标

在电动汽车性能给定的情况下，充电需求主要由用户的交通行为决定，包括行驶路线、起始时间 t_s 、初始荷电状态 SOC_b 和终点最低荷电状态 SOC_e 。下文将以这几个量为目标，进行交通行为建模。

2.3.2 行驶路线建模

使用概率 OD 矩阵（Origin-Destination matrix）描述行程起点与终点的分布。设高速公路沿线共有 N_e 个出入口，定义矩阵 $OD_{N_e \times N_e}$ ，其中 OD_{ij} 等于出入口 i 为起点且出入口 j 为终点的概率。可见矩阵 OD 满足 $\sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{N_e} OD_{ij} = 1$ ，由实际意义知 $OD_{ii} = 0$ 。根据直线状高速公路的假设，已知起点和终点，即可得出行驶路线。

2.3.3 其他参数建模

根据数据统计得出行程起始时间的分布，再依分布生成行程起始时间 t_s 。类似处理初始荷电状态 SOC_b 和终点最低荷电状态 SOC_e ，但需注意产生 SOC_b 和 SOC_e 时以 SOC_i 为上界，以 SOC_c 为下界。 SOC_b 用于描述用户从起点出发时的电量，此时电池电量往往严格小于充电完成时的电量 SOC_i 。 SOC_e 描述用户到达终点时所能接受的最低电量。设置这一参数的理由是，通常用户在离开高速公路后，还要行驶一段路程才能到达真正的目的地或者下一个充电站。

2.4 蒙特卡洛模拟

根据电动汽车模型和交通行为模型，用蒙特卡洛方法模拟大量行程，对每

次行程得出充电需求，最终得出总体充电需求的近似时空分布。

蒙特卡洛过程的每次循环模拟一次行程，并且每次循环分 3 步进行。

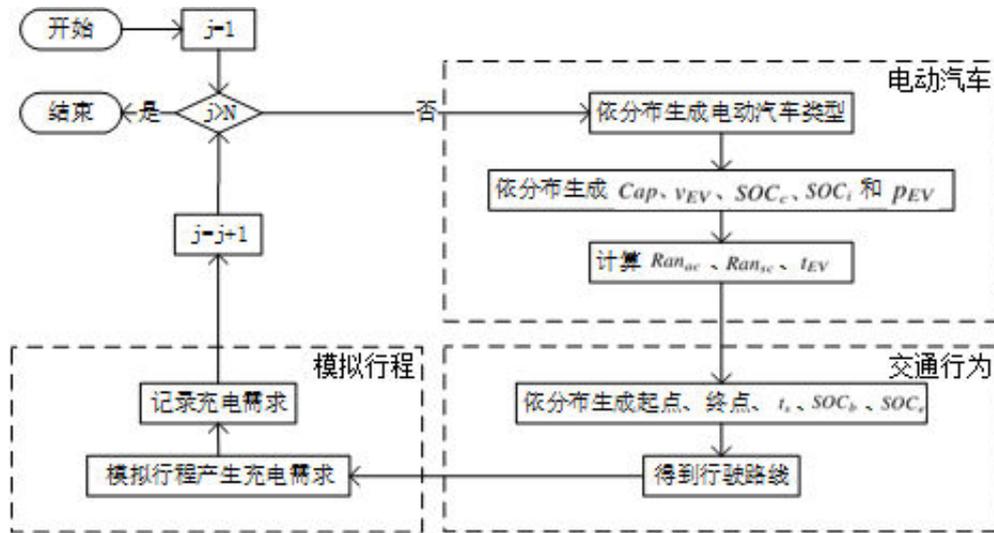


图 2.3 蒙特卡洛模拟流程

第一步，用电动汽车模型产生电动汽车性能参数，做法是依分布产生电动汽车类型，然后根据类型依分布产生电池容量 Cap 、电池荷电状态 SOC_i 和 SOC_c 、行驶平均速度 v_{EV} 、充电平均功率 p_{EV} 。用公式 (2-3) 和公式 (2-4) 计算从充满电到需要充电的行驶里程 Ran_{ac} 和到达需要充电状态后能继续行驶的里程 Ran_{sc} 。用公式 (2-5) 计算充电时长 t_{EV} 。

第二步，用交通行为模型产生用户交通行为信息。根据概率 OD 矩阵产生行程起点与终点，进而得出行驶路线。依分布生成行程起始时间 t_s 、初始荷电状态 SOC_b 和终点最低荷电状态 SOC_e 。

第三步，模拟行程产生充电需求。假设电动汽车达到需要充电的状态立即充电，即可利用以上参数取得这次行程的充电需求信息，包括时间、地点、充电功率。本文用一个例子说明这个过程，见图 2.4。

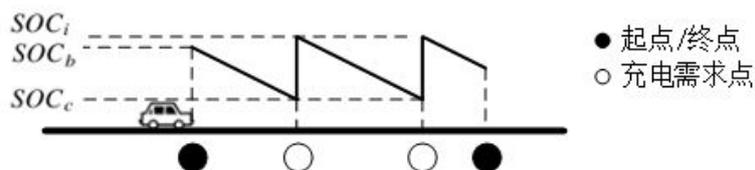


图 2.4 模拟行程过程示意图

2.5 说明

2.5.1 充电需求数据形式

由蒙特卡洛过程得到的数据是一组充电需求点，每个充电需求点的信息包括充电位置、充电开始时间、充电结束时间、充电功率，有可能还包含对充电设施的要求。

2.5.2 蒙特卡洛过程循环次数

蒙特卡洛过程循环次数与模拟目的有关。模拟一天的充电需求时，可将蒙特卡洛过程的循环次数设为一天的行程总数，这时得到的充电功率较符合实际。如果模拟目的是得到时间或空间上的相对分布，应该尽可能多地循环，以减少随机性对结果的影响，但此时的充电功率数值无意义。

2.5.3 直线状高速公路的假设

在整个充电需求建模过程中，只有由起点终点信息得出行驶路线时利用了直线状高速公路的假设。因此，如果能给出确定行驶路线的方法，就可以舍弃这个假设，将充电需求模型应用于任何拓扑结构的高速公路网。以下指出几种方法：

第一，直接将行驶路线的概率分布作为已知数据；

第二，假设用户选择最短路径，则可利用图论中非负加权图找两点间最短路径的算法（如 Dijkstra 算法、Floyd 算法等^[25]），根据起点与终点得出行驶路径。这种方式适合高速公路无阻塞的情况；

第三，为考虑高速公路的阻塞，假设用户选择行驶时间最短的路径，此时可以用一些相应的交通模型，由整个网络起点终点流量情况得出行驶路径。需要指出的是，这种方法会同时得出行驶速度，因此将不再依分布产生 v_{EV} 。另外，直接应用这种方法会导致没有考虑充电所需时间。

2.6 小结

本章介绍了本文采用的充电需求建模方法，首先分别对电动汽车性能与用户交通行为建立考虑随机性的模型，然后在不考虑充电站位置与容量的情形下，用蒙特卡洛模拟的方法求出充电需求的时空分布。

本章内容基于文献 [12] 的充电需求建模方法，但做出了一些改进。

第一，细化电动汽车模型。本文对行驶速度引入了随机性，增加了充电功率参数，并导出充电时间。由于电动汽车充电时间较长，因此充电时间与行驶时间相比不可忽略。所以本文模型能更准确地模拟充电需求的时间属性，而且能区分不同电动汽车对电能需求的差异；

第二，细化交通行为模型。本文引入了初始荷电状态和终点最低荷电状态，文献 [12] 相当于本文的一个特例：将初始荷电状态设为充电完成时的荷电状态，将终点最低荷电状态设为恰好需要充电时的荷电状态。本文模型能够模拟用户进出高速公路时对电池电量的需求，而这是实际中很可能出现的情况，因为高速公路上的起点与终点往往并不是用户整个行程的起点与终点。文献 [5] 在另一种充电需求模型中也有类似的考虑。

第三，文献 [12] 使用了高速公路无阻塞的假设，用最短路径法根据起点终点信息得出行驶路径，并应用于环形高速公路。本文观察到这种方法适用于任何拓扑结构的高速公路网，但假设的合理性值得商榷。因此本文对行驶路径如何确定的问题进行了讨论。

第3章 离网型充电站规划

3.1 概述

离网型充电站是不与电网连接的充电站，通过站内的电源提供电能，利用储能装置实现能量的时间转换，以满足负荷需求。离网型充电站尤其适合没有连接电网条件，且可再生能源丰富的地区。本章提出离网型充电站的整套规划方案，首先根据充电需求的空间分布进行选址规划，然后在已知充电站位置的情况下，用修改的充电需求模型模拟各个充电站充电需求的时空分布。对每个充电站，进行充电设施数量规划和站内容量规划。由于可再生能源和交通流量受很多因素影响，因此表现出很大的随机性，本章采用随机规划的方式，在保证可靠性的同时，避免过于保守的规划结果出现。

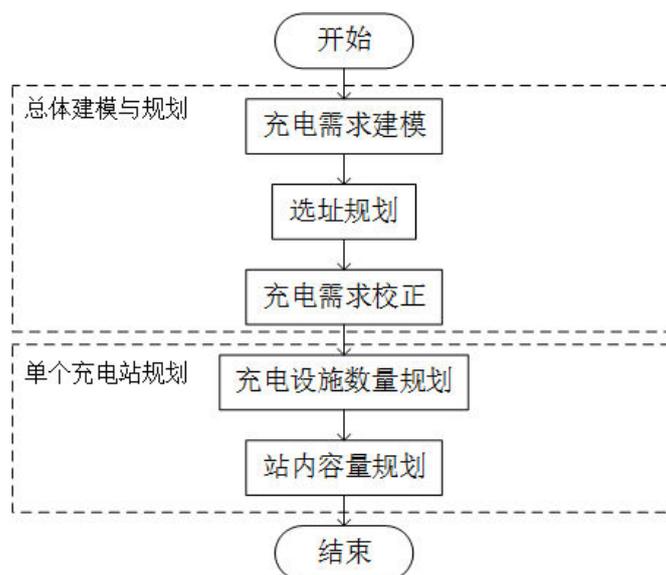


图 3.1 离网型充电站规划流程

3.2 选址规划

本节提出离网型充电站选址规划方法，首先描述需解决的问题，明确规划目标，然后介绍具体模型与求解方法，最后分析该方法的特性。

3.2.1 问题情景

离网型充电站之间没有电气上的连接，除去可能通过充电负荷相互影响之外，不同站点间没有耦合。因此，离网型充电站选址问题的一个自然形式是，希望覆盖尽可能多的充电需求，同时要求成本不超过预算。本文提出的离网型充电站选址规划将在有候选站点集合的情况下解决这个问题。该规划的输入是充电需求点的空间位置、候选站点位置、各个候选站点的建站成本、总预算，输出是候选站点中的最佳充电站选址方案。

3.2.2 模型与解法

(1) 输入参数

设充电需求点集合是 S_{CP} ，共有 N_{CP} 个元素。设候选站点集合是 S_{CS} ，共有 N_{CS} 个元素。由候选站点位置、充电需求点位置和产生该充电需求点时电动汽车还能继续行驶的路程，可以判定该充电需求点能否被候选站点服务区域覆盖。由此可以得到候选站点对充电需求点的覆盖关系矩阵 $R_{N_{CS} \times N_{CP}}$ ，其中

$$R_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果候选站点 } i \text{ 能覆盖充电需求点 } j \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3-1)$$

设候选站点的建站成本是 $c = (c_1, c_2, \dots, c_{N_{CS}})^T$ ，总预算是 c_0 。

(2) 变量

用 0-1 变量 $z_i, i = 1, \dots, N_{CS}$ 表示候选站点 i 是否建站，即

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{候选站点 } i \text{ 建充电站} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3-2)$$

令 $d_j = \min\{1, \sum_{i:R_{ij}=1} z_i\}, j = 1, \dots, N_{CP}$ 。对任意 $j \in \{1, 2, \dots, N_{CP}\}$ ， $\{i | R_{ij} = 1\}$ 是能覆盖充电需求点 j 的候选站点标号集合，当且仅当这个集合中存在候选站点建站时，充电需求点 j 能被覆盖。由此易见 d_j 取值范围是 $\{0, 1\}$ ， $d_j = 1$ 表示 j 能被覆盖， $d_j = 0$ 表示 j 不能被覆盖。因此， $d = (d_1, d_2, \dots, d_{N_{CP}})^T$ 表示充电需求点被充电站覆盖的情况。

(3) 模型

选址规划模型的思路是，在成本不超过总预算的限制下，最大化能覆盖的充电需求点数量：

$$\max \sum_{j=1}^{N_{CP}} d_j \quad (3-3a)$$

$$\text{s. t. } d_j = \min\{1, \sum_{i:R_{ij}=1} z_i\}, j = 1, \dots, N_{CP} \quad (3-3b)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{CS}} c_i z_i \leq c_0 \quad (3-3c)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, N_{CS} \quad (3-3d)$$

(4) 求解方法

可以将模型 (3-3) 转化为等价的混合整数线性规划模型：

$$\max \sum_{j=1}^{N_{CP}} d_j \quad (3-4a)$$

$$\text{s. t. } d_j \leq 1, j = 1, \dots, N_{CP} \quad (3-4b)$$

$$d_j \leq \sum_{i:R_{ij}=1} z_i, j = 1, \dots, N_{CP} \quad (3-4c)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{CS}} c_i z_i \leq c_0 \quad (3-4d)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, N_{CS} \quad (3-4e)$$

可进一步写成矩阵形式（本文向量间的等号和不等号表示对各分量的要求）：

$$\max \mathbf{1}_{1 \times N_{CP}} d \quad (3-5a)$$

$$\text{s. t. } d \leq \mathbf{1}_{N_{CP} \times 1} \quad (3-5b)$$

$$d \leq R^T z \quad (3-5c)$$

$$c^T z \leq c_0 \quad (3-5d)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, N_{CS} \quad (3-5e)$$

混合整数线性规划问题可用商业求解器求出最优解，如 CPLEX、MOSEK、

GUROBI^[26] 等等。

3.2.3 说明

(1) 充电需求点的获取

充电需求点可用第 2 章的方法获得。因为选址规划的目的是覆盖尽可能多的充电需求点，因此只需要充电需求点的空间信息，不需要时间与充电功率信息。此时应该使用循环次数尽可能多的蒙特卡洛模拟。

(2) 规划目标的讨论

应该指出，覆盖尽可能多的充电需求点与覆盖尽可能多的充电需求电量是不同的。本文认为，充电需求点之间应该是平等的关系，倾向于覆盖电量需求更大的充电需求点并不合理。如果目标是覆盖尽可能多的充电需求电量，仍然可以遵循本文的思路得到类似的混合整数规划模型：

$$\max WCP^T d \quad (3-6a)$$

$$\text{s. t. } d \leq 1_{N_{CP} \times 1} \quad (3-6b)$$

$$d \leq R^T z \quad (3-6c)$$

$$c^T z \leq c_0 \quad (3-6d)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, N_{CS} \quad (3-6e)$$

其中 $WCP_{N_{CP} \times 1}$ 是各充电需求点需求电量向量。

(3) 候选站点的选取

本文所提离网型充电站选址方法要求提供候选站点集合。这也是许多已有选址方法的要求^[5]。实际应用中，可以根据高速公路沿线土地资源情况、地形信息、可再生能源情况等因素，筛选出具备建设离网型充电站条件的地点。对于区域状分布的情况，可以通过密集选点的方式来近似。例如，假设有长 2000 m 的区域都具备建站条件，就可以每隔 200 m 设一个候选站点，以 21 个候选站点近似区域中的任意选点。

(4) 建站成本

离网型充电站规划的总成本包括建设成本与运行成本。建设成本中含建站成本、充电设施成本、站内电源成本和储能装置成本。选址规划中只计及建站成本，其他部分在后续规划中考虑。建站成本应该包括购买土地、建造建筑物、

修建道路和改造环境等步骤的费用。规划前应该通过调查评估得到各候选站点的建站成本信息。当所有候选站点的建站成本相同时，总成本约束实际上是对充电站数量的约束。

(5) 规划问题规模

需求解的混合整数线性规划问题 (3-4) 共有 N_{CP} 个连续变量、 N_{CS} 个 0-1 变量、 $2N_{CP}+1$ 个线性约束。混合整数线性规划问题求解时间常常主要由 0-1 变量数量和线性约束数量决定，因此候选站点总数是影响求解时间的重要因素。假设待规划高速公路总长 300 km，沿线均可建离网型充电站，每隔 200 m 设一个候选站点，则大约有 1500 个候选站点。经实验，这种规模问题的求解时间是可以接受的，详细信息见第 5 章。

3.3 充电需求校正

3.3.1 校正理由

第 2 章在不考虑充电站位置和容量的情况下，模拟了充电需求。在选址规划得出充电站位置后，因为电动汽车只能在充电站充电，所以充电需求空间上仅分布在充电站位置集合中。

一个直接的想法是，根据充电站服务区域对充电需求点的覆盖关系，将充电需求点对应到充电站，然后把位置坐标改成充电站的位置^[12]。这个想法存在两方面的问题：第一，该过程存在近似。在改变充电地点后，充电量应该随之变化，进而也对充电时间产生影响，这些变化将影响接下来的行程，可能产生累积效应，甚至行程能否完成也没有保证。第二，同一个充电需求点可能同时被多个充电站的服务区域覆盖，必须增加假设以规定用户选择充电站的策略，例如假设用户选择距离充电需求点最近的充电站，或者等可能地在满足条件的充电站中选择。这些假设的合理性有待讨论。

因此，本文舍弃上述想法，采用重新模拟的方式校正充电需求。该方法能够有效解决上文提到的两个问题。

3.3.2 校正过程

校正充电需求的方式是重新模拟，换言之，本节方法与第 2 章的区别只在与蒙特卡洛过程中的行程模拟，电动汽车建模与交通行为建模部分是完全相

同的。因此，本节仅介绍行程模拟方法。

本节假设用户的充电策略是，必须充电时（即剩余路径中有下一充电站且不充电无法达到下一充电站时，以及剩余路径中没有下一充电站且不充电无法以大于 SOC_e 的荷电状态到达终点时）才充电，每次充电直至完成（即荷电状态达到 SOC_i ）。行程模拟流程如图 3.2 所示。

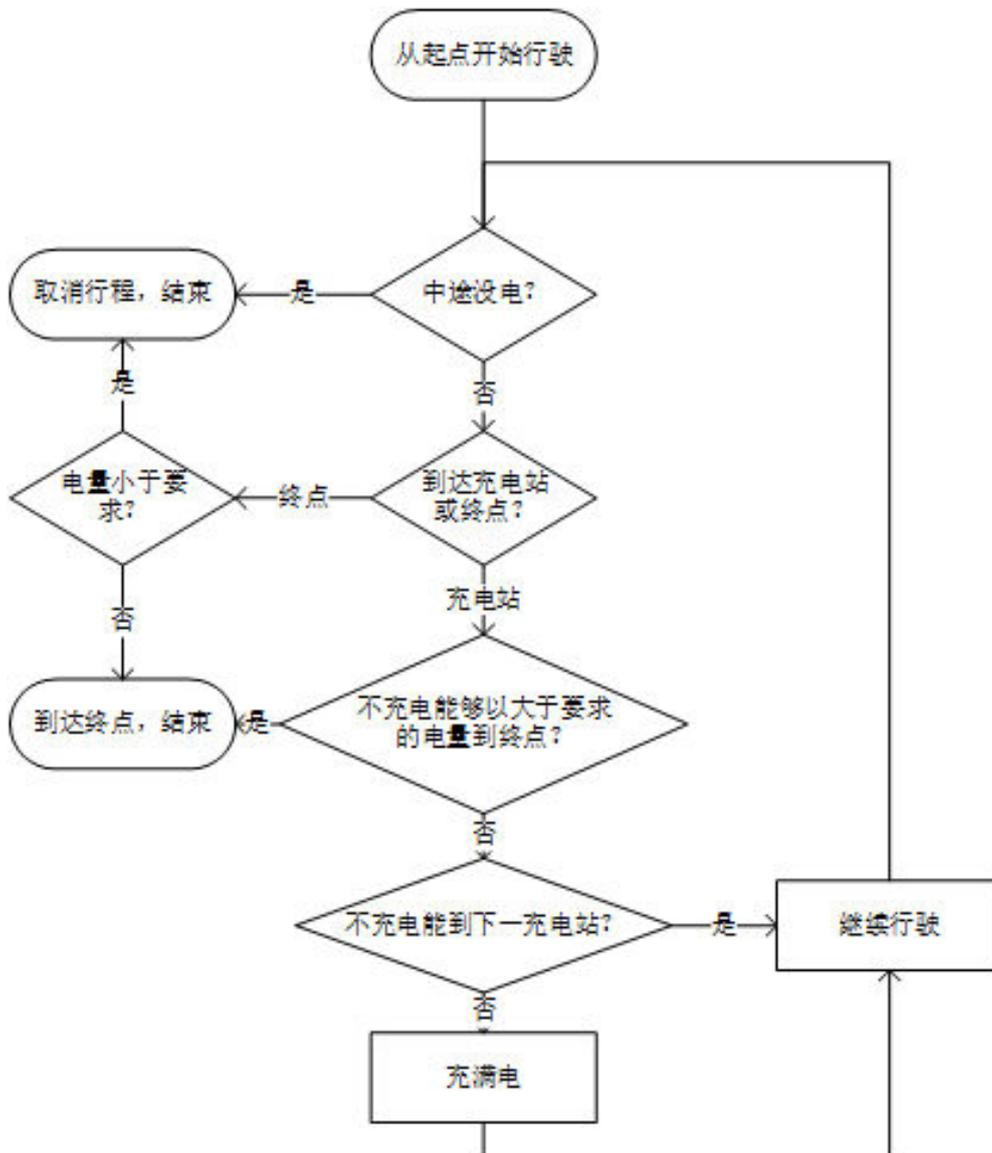


图 3.2 充电需求校正单次行程模拟示意图

本文假定，用户在开始行程前已根据充电站位置制订了充电计划。如果行程不能完成，用户将改用其他方式或更换车辆出行。因此，行程模拟中舍

弃不能完成的行程是合理的。

3.4 充电设施数量规划

本节提出充电设施数量规划方法，该方法利用充电需求信息，并且基于模拟方法。

3.4.1 问题情景

每台电动汽车充电时需占用一台充电设施，电动汽车可能对充电设施的种类有要求。如果需要充电服务的用户到达充电站时无空闲可用充电设施，则该用户需等待。充电站为用户提供服务时，先到达充电站的用户先接受服务。

对于每一个充电站，需要规划各种充电设施的数量，在用户平均等待时间不超过某给定数值的约束下，最小化充电设施总成本。

设 S_{CF} 是充电设施种类集合， N_{CF} 是充电设施种类总数， $Pr_{N_{CF} \times 1}^{CF}$ 是各种充电设施单台成本（包括购买成本和比例缩放后的运行维护成本）。设 \bar{t}_w 是用户平均等待时间上限。用 $n_{N_{CF} \times 1}^{CF}$ 表示各种充电设施数量， t_w 表示用户平均等待时间，则规划单个充电站充电设施数量需求解的问题是 (3-7)：

$$\min (Pr^{CF})^T n^{CF} \quad (3-7a)$$

$$\text{s. t. } t_w \leq \bar{t}_w \quad (3-7b)$$

$$n_i^{CF} \in \mathbb{N}, i = 1, \dots, N_{CF} \quad (3-7c)$$

其中 \mathbb{N} 是自然数集合。

3.4.2 求解方法

使用小节 3.3 的方法，得到各充电站的日充电需求信息。本节规划只需要用户到达充电站的时间、充电时长以及对充电设施种类的要求作为输入信息。

采用模拟的方式来获取 t_w 与 n^{CF} 的关系。将一天分为几个时间段，例如分为 24 个小时。在所有时间段中选择需充电电动汽车数量最小的时间段，以它的结束时间为起点，假定充电设施的初始状态均为空闲。给定 n^{CF} ，即可从时间起点开始模拟一天的充电状况。模拟流程如图 3.3 所示。

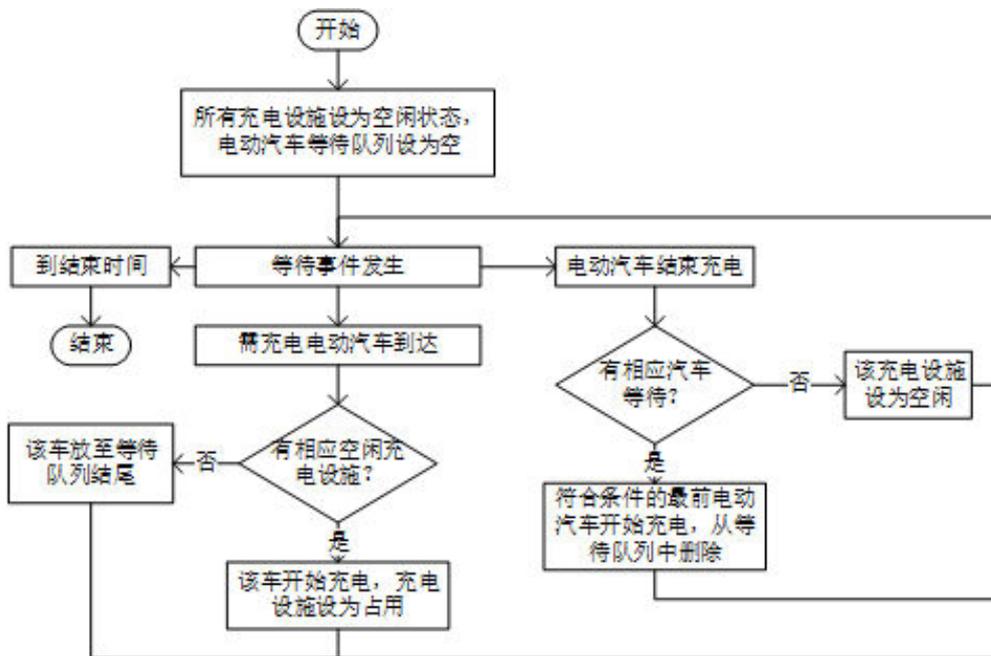


图 3.3 模拟单个充电站日充电状况

每当一台需充电车辆到达充电站，检查是否有该车可用的空闲充电设施，如果有则让该车占用一台相应的充电设施开始充电，否则将其放入等待队列中。每当一辆电动汽车完成充电，检查等待队列中是否有能用该充电设施充电的车辆，如果有，在其中选择最早到达充电站的一辆开始充电，否则将该充电设施设为空闲状态。

为了求解问题 (3-7)，可以先通过模拟求出各种充电设施数量的上界，即用户不等待的情况下需要设置多少充电设施。因为充电设施数量只能取自然数值，因此取值范围集合是有限的。可以对该集合中的每一种取值情况都做一次模拟，检查 t_w 是否满足要求，记录目标函数值。最后找出可行解中目标函数值最小的即可。

3.4.3 说明

(1) 充电需求随机性的处理

小节 3.4.2 中的方法根据给定的充电需求信息求解问题 (3-7)。当需要考虑充电需求随机性时，可以对充电需求的一组取样分别应用小节 3.4.2 中的方法，然后对每一种 n^{CF} 取值，计算 t_w 满足要求的频率与目标函数的平均值，最后选出最合适的 n^{CF} 。

(2) 与基于概率模型方法的比较

大部分已有文献使用基于概率模型的方法规划站内充电设施数量^[5,12,27,28]。其中文献 [5,12] 使用排队模型，换而言之，假定待充电电动汽车到达充电站服从泊松过程；而其他一些文献使用正态分布模型。

基于概率模型的方法无法避免一个问题，即无法证明待充电电动汽车到达充电站的过程服从假定的分布（实际上，不同文献中的假定并不完全相同），而且分布参数的选取难以使人完全信服。与之相反，基于模拟的方法有效地避免了这个问题。直观地，如果模拟过程合理且使用的取样数足够多，就可以认定规划结果符合真正的分布^[29]。

基于模拟的方法还有一个显著的优点：便于考虑多种充电设施的情况，尤其是同一台电动汽车可以使用某几种充电设施的情况。后者似乎很难用基于概率模型的方法描述。

然而，在求解计算量方面，基于概率模型的方法更有优势。基于模拟的方法需要对大量取样分别计算，因此计算量较大。求解多种充电设施的问题往往也比单种充电设施的问题计算量更大。

3.5 站内容量规划

本节提出离网型充电站站内容量规划方法，该方法考虑了充电负荷与可再生能源的随机性，以随机规划与分布鲁棒优化作为工具。

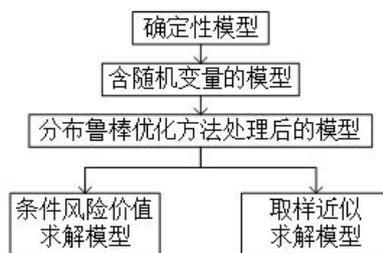


图 3.4 站内容量规划模型推导关系

3.5.1 问题情景

离网型充电站不与电网连接，需要站内电源来为充电负荷提供能量。为了在时间上转移电能，储能装置也是必不可少的。

本节规划方法要解决的基本问题是：对于一个计划配备可再生能源发电装置和储能装置的离网型充电站，要求充电站能正常运行并满足所有充电负荷，最小化电源与储能装置的成本。

由于充电负荷与可再生能源具有随机性，所以需要在基本问题的基础上增加对随机性的考虑。一种方式是采用鲁棒优化，想法是在随机变量的所有可能取值下要求约束成立。这种方式的主要缺点是，规划结果可能过于保守。原因是随机变量的极端取值常常只占很小的概率，但容易大大缩小问题的可行域。与极少出现的约束不成立情况造成的损失相比，妥协极端取值的成本可能更大。另一种方式试图克服这一缺点，要求约束至少以指定的概率成立。决策者可以通过调节概率阈值，选择合适的保守程度。

以上两种方法均建立在已知随机变量概率分布的假设之上。然而，实际应用中充电负荷与可再生能源的概率分布难以准确获得，表现随机性的信息通常以多组取样数据的形式出现。取样数据对原分布的描述不可能完全准确，而是或多或少地存在差异。近年来，分布鲁棒优化（distributionally robust optimization）成为了优化领域的一个热点问题。其基本想法是，假设给定一个集合，它的元素是概率分布，要求对集合中所有概率分布，约束成立的概率不小于指定的阈值。

本节采用分布鲁棒优化的方法，以考虑随机性和取样数据描述分布的误差。因此，需解决的问题是：已知多组充电负荷与可再生能源数据，得出一个包含真实分布的概率分布集合，要求在概率分布属于该集合时，充电站能满足所有充电负荷的概率不小于指定阈值，在此基础上最小化电源与储能装置的成本。

3.5.2 确定性模型

本小节假定随机变量取值确定，建立刻画离网型充电站站内能量流动的确定性模型，写出规划问题的确定性形式。

本文采用多时段的方式，将一天平均分为 24 个时间段，在每个时间段内以平均功率表示能量流动。

(1) 输入参数

设 Pr_{RG} 是单位容量可再生能源发电装置的成本， Pr_{ES} 是单位容量储能装置的成本。此处成本均包含建设成本和运行维护成本，且隐含成本随装置容量线性变化的假定。设 \bar{w} 和 \underline{w} 分别是储能装置荷电状态的上下限， η_1 和 η_2 分别是

储能装置充放电效率。设 Δ_t 是时间段长度， T 是时间段总数。设 ξ_{RG} 表示各时间段可再生能源发电功率与装置容量之比， ξ_C 表示各时间段充电负荷功率，它们都是 $T \times 1$ 的向量。

(2) 变量

设 x_{RG} 是可再生能源发电装置容量， x_{ES} 是储能装置容量， w_0 是储能初始总电量。用 3 个 $T \times 1$ 的向量表示电源、储能、负荷间的能量流动关系： p_{F1} 表示各时间段电源流向负荷的功率， p_{F2} 表示各时间段电源流向储能的功率， p_{F3} 表示各时间段储能流向负荷的功率。能量流动关系如图 3.5 所示。

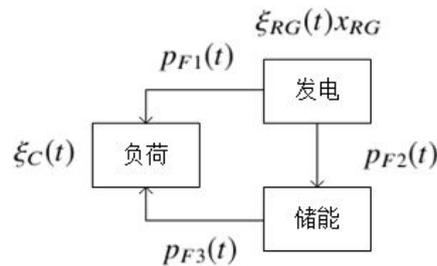


图 3.5 能量流动关系示意图

(3) 目标函数

本节规划的目标是最小化电源与储能装置的成本，因此目标函数为

$$F_{OC} = Pr_{RG}x_{RG} + Pr_{ES}x_{ES} \quad (3-8)$$

(4) 约束

装置容量非负，储能初始总电量不超限：

$$x_{RG} \geq 0, x_{ES} \geq 0, \underline{w}x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w}x_{ES} \quad (3-9)$$

能量流动不反向：

$$p_{F1}(t), p_{F2}(t), p_{F3}(t) \geq 0, t = 1, \dots, T \quad (3-10)$$

储能装置电量不超限：

$$\underline{w}x_{ES} \leq w_0 + \sum_{i=1}^t (\eta_1 p_{F2}(i) - \frac{p_{F3}(i)}{\eta_2}) \Delta_t \leq \bar{w}x_{ES}, t = 1, \dots, T \quad (3-11)$$

为使充电站运行方式可持续，要求一天结束时储能装置电量等于初始电量：

$$\sum_{t=1}^T (\eta_1 p_{F2}(t) - \frac{p_{F3}(t)}{\eta_2}) = 0 \quad (3-12)$$

电源能提供的功率不小于流向负荷与储能的功率之和：

$$p_{F1}(t) + p_{F2}(t) - \xi_{RG}(t)x_{RG} \leq 0, t = 1, \dots, T \quad (3-13)$$

从电源与储能流向负荷的功率之和不小于负荷功率：

$$\xi_C(t) - p_{F1}(t) - p_{F3}(t) \leq 0, t = 1, \dots, T \quad (3-14)$$

约束 (3-13) 和 (3-14) 取不等号的理由见小节 3.5.7。

(5) 模型

目标函数 (3-8) 和约束 (3-9) - (3-14) 组成确定性规划模型 (3-15)：

$$\min F_{OC} = Pr_{RG}x_{RG} + Pr_{ES}x_{ES} \quad (3-15a)$$

$$\text{s. t. } x_{RG} \geq 0, x_{ES} \geq 0, \underline{w}x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w}x_{ES} \quad (3-15b)$$

$$p_{F1}(t), p_{F2}(t), p_{F3}(t) \geq 0, t = 1, \dots, T \quad (3-15c)$$

$$\underline{w}x_{ES} \leq w_0 + \sum_{i=1}^t (\eta_1 p_{F2}(i) - \frac{p_{F3}(i)}{\eta_2}) \Delta_t \leq \bar{w}x_{ES}, t = 1, \dots, T \quad (3-15d)$$

$$\sum_{t=1}^T (\eta_1 p_{F2}(t) - \frac{p_{F3}(t)}{\eta_2}) = 0 \quad (3-15e)$$

$$p_{F1}(t) + p_{F2}(t) - \xi_{RG}(t)x_{RG} \leq 0, t = 1, \dots, T \quad (3-15f)$$

$$\xi_C(t) - p_{F1}(t) - p_{F3}(t) \leq 0, t = 1, \dots, T \quad (3-15g)$$

3.5.3 分布鲁棒优化模型

(1) 基本模型

为考虑充电负荷、可再生能源的随机性，以及数据描述的分布与真实分布之间的差异，采用分布鲁棒优化的工具处理含随机变量及其函数的约束 (3-10) - (3-14)，注意 p_{F1} 、 p_{F2} 和 p_{F3} 均与随机变量有关。

为便于叙述，引入一些记号。令

$$x^{OC} = (x_{RG}, x_{ES}, w_0) \quad (3-16)$$

$$\xi^{OC} = (\xi_{RG}, \xi_C) \quad (3-17)$$

$$C^{OC}(x^{OC}, \xi^{OC}) = \{\xi^{OC} | \exists p_{F1}, p_{F2}, p_{F3}, \text{s. t. 约束 (3-10) - (3-14) 成立}\} \quad (3-18)$$

在固定 x^{OC} 时， $C^{OC}(x^{OC}, \xi^{OC})$ 是 ξ^{OC} 取值范围的子集。

设 \mathcal{D}^{OC} 是一个概率分布集合， α^{OC} 是可容忍的失败概率（此处失败对一天而言，指存在没有满足充电负荷的时间段）。若 \mathbb{P} 是一个概率分布， C 是对应随机变量的一个取值集合，用 $\mathbb{P}\{C\}$ 表示随机变量取值在 C 中的概率。则分布鲁棒优化基本模型可写为：

$$\min F_{OC} = Pr_{RG}x_{RG} + Pr_{ES}x_{ES} \quad (3-19a)$$

$$\text{s. t. } \inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{D}^{OC}} \mathbb{P}\{C^{OC}(x^{OC}, \xi^{OC})\} \geq 1 - \alpha^{OC} \quad (3-19b)$$

$$x_{RG} \geq 0, x_{ES} \geq 0, \underline{w}x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w}x_{ES} \quad (3-19c)$$

后文将使用合理的 \mathcal{D}^{OC} 集合，把约束 (3-19b) 处理成适合求解的形式。

(2) KL 散度与概率分布集合

KL 散度（Kullback-Leibler divergence）是一种度量一个概率分布与另一个概率分布差异的工具，也被称为相对熵，在信息论中较常用。KL 散度是 Φ 散度的一种特殊形式。设 ξ 是 \mathbb{R}^K 中的连续分布随机变量， f 是 ξ 的真实概率密度函数， f_0 是对 f 的估计，定义 f 对 f_0 的 KL 散度为^[30]

$$D_{KL}(f \parallel f_0) = \int_{\mathbb{R}^K} f(\xi) \log \frac{f(\xi)}{f_0(\xi)} d\xi \quad (3-20)$$

式中积分是 \mathbb{R}^K 中勒贝格积分，且规定 $x > 0$ 时 $x \log(x/0) = +\infty$ ，以及 $0 \log(0/0) = 0$ 。对于离散随机变量，可以类似地定义 KL 散度。

设 f_0^{OC} 是通过观察得到的 ξ^{OC} 的近似概率密度函数， \mathbb{P}_0^{OD} 是对应的概率分布。决策者指定参数 d_{OC} ，表示真实概率密度函数对 f_0^{OC} 的 KL 散度上界。令 \mathcal{M}_+ 表示所有概率分布的集合。则 \mathcal{D}^{OC} 的一种合理定义是：

$$\mathcal{D}^{OC} = \{\mathbb{P} \in \mathcal{M}_+ : D_{KL}(f \parallel f_0^{OC}) \leq d_{OC}, f = \frac{d\mathbb{P}}{d\xi}\} \quad (3-21)$$

(3) 分布鲁棒优化约束处理

根据文献 [30] Theorem 1 和 Proposition 4,

$$\inf_{\mathbb{P}: D_{KL}(f \parallel f_0^{OC}) \leq d_{OC}} \mathbb{P}\{C^{OC}(x^{OC}, \xi^{OC})\} \geq 1 - \alpha^{OC} \quad (3-22)$$

$$\iff \mathbb{P}_0^{OD}\{C^{OC}(x^{OC}, \xi^{OC})\} \geq 1 - \alpha_{1+}^{OC} \quad (3-23)$$

其中 $\alpha_{1+}^{OC} = \max\{\alpha_1^{OC}, 0\}$, $\alpha_1^{OC} = 1 - \inf_{x \in (0,1)} \left\{ \frac{e^{-d_{OC}x^{1-\alpha^{OC}}}-1}{x-1} \right\}$ 。文献 [30] 证明 $\alpha_{1+}^{OC} \leq \alpha^{OC}$ ，因此上述结论的意义是，要求约束对于与 \mathbb{P}_0^{OD} 的 KL 散度不大于 d_{OC} 的概率分布都已至少阈值概率成立，等价于约束对于 \mathbb{P}_0^{OD} 以更大的概率成立。另外，文献 [30] 指出 $\inf_{x \in (0,1)} \left\{ \frac{e^{-d_{OC}x^{1-\alpha^{OC}}}-1}{x-1} \right\}$ 关于 x 是凸的，可以用二分法快速地求出 α_1^{OC} 。

因此，问题 (3-19) 等价于问题 (3-24)：

$$\min F_{OC} = Pr_{RG}x_{RG} + Pr_{ES}x_{ES} \quad (3-24a)$$

$$\text{s. t. } \mathbb{P}_0^{OD}\{C^{OC}(x^{OC}, \xi^{OC})\} \geq 1 - \alpha_{1+}^{OC} \quad (3-24b)$$

$$x_{RG} \geq 0, x_{ES} \geq 0, \underline{w}x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w}x_{ES} \quad (3-24c)$$

问题 (3-24) 中不含 \mathcal{D}^{OC} ，而只与 \mathbb{P}_0^{OD} 有关，因此可以基于 ξ^{OC} 的取样数据，用随机规划的工具求解。

3.5.4 失败情形分析

为强调 p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} 与 x^{OC} 和 ξ^{OC} 有关，重新写含 $\xi^{OC}, p_{F1}, p_{F2}, p_{F3}$ 的约

束。

$$p_{F1}(x^{OC}, \xi^{OC}, t), p_{F2}(x^{OC}, \xi^{OC}, t), p_{F3}(x^{OC}, \xi^{OC}, t) \geq 0, t = 1, \dots, T \quad (3-25a)$$

$$\underline{w}x_{ES} \leq w_0 + \sum_{i=1}^t (\eta_1 p_{F2}(x^{OC}, \xi^{OC}, i) - \frac{p_{F3}(x^{OC}, \xi^{OC}, i)}{\eta_2}) \Delta_t \leq \bar{w}x_{ES}, t = 1, \dots, T \quad (3-25b)$$

$$\sum_{t=1}^T (\eta_1 p_{F2}(x^{OC}, \xi^{OC}, t) - \frac{p_{F3}(x^{OC}, \xi^{OC}, t)}{\eta_2}) = 0 \quad (3-25c)$$

$$p_{F1}(x^{OC}, \xi^{OC}, t) + p_{F2}(x^{OC}, \xi^{OC}, t) - \xi_{RG}(x^{OC}, \xi^{OC}, t)x_{RG} \leq 0, t = 1, \dots, T \quad (3-25d)$$

$$\xi_C(t) - p_{F1}(x^{OC}, \xi^{OC}, t) - p_{F3}(x^{OC}, \xi^{OC}, t) \leq 0, t = 1, \dots, T \quad (3-25e)$$

上述约束（对应确定性模型中约束 (3-10) - (3-14)）是待求解规划问题中含随机变量及其函数的约束。

由于本文定义的失败情形是不满足充电负荷，因此希望约束 (3-25a) - (3-25d) 始终成立，使得失败情形等价于充电负荷约束 (3-25e) 对某些 $t \in \{1, \dots, T\}$ 不成立。

首先证明，约束 (3-25a) - (3-25e) 不成立等价于对所有满足约束 (3-25a) - (3-25d) 的 p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} 有约束 (3-25e) 不成立。

定义 $\bar{C}^{OD}(x^{OC}, \xi^{OC})$ 为 $\{\xi^{OC} \mid \text{对任意 } p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} \text{ 满足约束 (3-25a) - (3-25d), 存在 } t \text{ 使约束 (3-25e) 不成立}\}$ 。则以下命题成立：

命题 3.1: 给定 x^{OC} ，则 $\mathbb{R}^{2T} - C^{OD}(x^{OC}, \xi^{OC}) = \bar{C}^{OD}(x^{OC}, \xi^{OC})$ 。

证明 只需证明上述两个集合相互包含。

对任意 $\xi_0^{OC} \in \bar{C}^{OD}(x^{OC}, \xi^{OC})$ ，由 $\bar{C}^{OD}(x^{OC}, \xi^{OC})$ 的定义知，不存在 p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} 使约束 (3-25a) - (3-25e) 成立，因此 $\xi_0^{OC} \notin C^{OD}(x^{OC}, \xi^{OC})$ ，进而 $\mathbb{R}^{2T} - C^{OD}(x^{OC}, \xi^{OC}) \supseteq \bar{C}^{OD}(x^{OC}, \xi^{OC})$ 。

对任意 $\xi_0^{OC} \in \mathbb{R}^{2T} - C^{OD}(x^{OC}, \xi^{OC})$ 。由 $C^{OD}(x^{OC}, \xi^{OC})$ 的定义知，不存在 p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} 使约束 (3-25a) - (3-25d) 与约束 (3-25e) 同时成立。因此 $\xi_0^{OC} \in \bar{C}^{OD}(x^{OC}, \xi^{OC})$ ，进而 $\mathbb{R}^{2T} - C^{OD}(x^{OC}, \xi^{OC}) \subseteq \bar{C}^{OD}(x^{OC}, \xi^{OC})$ 。□

命题 3.1 说明只考虑违反约束 (3-25e) 是合理的，不会改变问题的可行域。

下面将证明, 对于任何可能的 x^{OC} 和 ξ^{OC} 的取值, 存在 p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} 满足约束 (3-25a) - (3-25d)。

令 $\mathbb{R}_+^{2T} = \{(x_1, \dots, x_{2T}) \in \mathbb{R}^{2T} : x_i \geq 0, i = 1, \dots, 2T\}$ 。以下命题成立:

命题 3.2: 设 $x_{RG} \geq 0, x_{ES} \geq 0, \underline{w}x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w}x_{ES}$, 则对于 ξ^{OC} 在 \mathbb{R}_+^{2T} 内的任意取值, 存在 p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} 满足约束 (3-25a) - (3-25d)。

证明 令 p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} 均为零向量, 则约束 (3-25a) - (3-25d) 等价于:

$$\begin{cases} \underline{w}x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w}x_{ES}, t = 1, \dots, T \\ -\xi_{RG}(x^{OC}, \xi^{OC}, t)x_{RG} \leq 0, t = 1, \dots, T \end{cases}$$

根据题设知以上约束成立。 □

注意由 $\xi^{OC} = (\xi_{RG}, \xi_C)$ 的实际意义可知 ξ^{OC} 的各分量只可能取非负值, $x_{RG} \geq 0, x_{ES} \geq 0, \underline{w}x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w}x_{ES}$ 是规划问题对决策变量的要求。因此命题 3.2 的条件对需求解的规划问题成立。

命题 3.2 表明, 一定存在 p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} 使约束 (3-25a) - (3-25d) 成立, 可以将 $\xi_C(t) - p_{F1}(t) - p_{F3}(t)$ 与 0 比较以检查约束 (3-25e) 是否成立。

3.5.5 条件风险价值求解方法

(1) 损失函数与规划问题的等价形式

首先定义一个损失函数 g^{OC} , 用于描述是否违反约束及违反程度。令 $g^{OC}(x^{OC}, \xi^{OC})$ 等于

$$\min g \tag{3-26a}$$

$$\text{s. t. } p_{F1}(t), p_{F2}(t), p_{F3}(t) \geq 0, t = 1, \dots, T \tag{3-26b}$$

$$\underline{w}x_{ES} \leq w_0 + \sum_{i=1}^t (\eta_1 p_{F2}(i) - \frac{p_{F3}(i)}{\eta_2}) \Delta_t \leq \bar{w}x_{ES}, t = 1, \dots, T \tag{3-26c}$$

$$\sum_{t=1}^T (\eta_1 p_{F2}(t) - \frac{p_{F3}(t)}{\eta_2}) = 0 \tag{3-26d}$$

$$p_{F1}(t) + p_{F2}(t) - \xi_{RG}(t)x_{RG} \leq 0, t = 1, \dots, T \tag{3-26e}$$

$$\xi_C(t) - p_{F1}(t) - p_{F3}(t) \leq g, t = 1, \dots, T \tag{3-26f}$$

g^{OC} 是一个以 p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} 为决策变量的线性规划问题的最优值。该规划问题的意义是，最小化满足约束 (3-25a) - (3-25d) 时的 $g = \max\{\xi_C(t) - p_{F1}(t) - p_{F3}(t), t = 1, \dots, T\}$ 。命题 3.2 显示 $g^{OC}(x^{OC}, \xi^{OC})$ 定义良好。

命题 3.3: 设 x^{OC} 满足 $x_{RG} \geq 0, x_{ES} \geq 0, \underline{w}x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w}x_{ES}$ ，用 ξ_0^{OC} 表示非负随机变量 ξ^{OC} 的一种可能取值，则 $g^{OC}(x^{OC}, \xi_0^{OC})$ 存在有限。

证明 由命题 3.2 知，题设条件下规划问题 (3-26) 可行。由约束 (3-26b) 和约束 (3-26e) 知 p_{F1}, p_{F2} 有界。再由约束 (3-26d) 可得 p_{F3} 有界，进而 g 有下界，因此规划问题 (3-26) 有界。由线性规划性质知，规划问题 (3-26) 具有有限最优解，因此 $g^{OC}(x^{OC}, \xi_0^{OC})$ 存在有限。 \square

下面的命题指出，可以用 $g^{OC}(x^{OC}, \xi_0^{OC})$ 和 0 的大小关系，反映约束 (3-25a) 至 (3-25e) 的成立情况。

命题 3.4: 设 x^{OC} 满足 $x_{RG} \geq 0, x_{ES} \geq 0, \underline{w}x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w}x_{ES}$ ，用 ξ_0^{OC} 表示非负随机变量 ξ^{OC} 的一种可能取值，则存在 p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} 满足约束 (3-25a) - (3-25e) 当且仅当 $g^{OC}(x^{OC}, \xi_0^{OC}) \leq 0$ 。

证明 当存在 p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} 满足约束 (3-25a) - (3-25e) 时， $\xi_C(t) - p_{F1}(t) - p_{F3}(t) \leq 0, t = 1, \dots, T$ ，因此 $p_{F1}, p_{F2}, p_{F3}, g = 0$ 是问题 (3-26) 的一组可行解，推出 $g^{OC}(x^{OC}, \xi_0^{OC}) \leq 0$ 。当 $g^{OC}(x^{OC}, \xi_0^{OC}) \leq 0$ 时，存在 $p_{F1}, p_{F2}, p_{F3}, g \leq 0$ 是问题 (3-26) 的可行解，因此 p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} 满足约束 (3-25a) - (3-25d)，且 $\xi_C(t) - p_{F1}(t) - p_{F3}(t) \leq g \leq 0, t = 1, \dots, T$ 。所以 p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} 满足约束 (3-25a) - (3-25e)。 \square

由命题 3.4 知，需求解的规划问题 (3-24) 等价于问题 (3-27):

$$\min F_{OC} = Pr_{RG}x_{RG} + Pr_{ES}x_{ES} \quad (3-27a)$$

$$\text{s. t. } \mathbb{P}_0^{OD} \{\{\xi^{OC} : g^{OC}(x^{OC}, \xi^{OC}) \leq 0\}\} \geq 1 - \alpha_{1+}^{OC} \quad (3-27b)$$

$$x_{RG} \geq 0, x_{ES} \geq 0, \underline{w}x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w}x_{ES} \quad (3-27c)$$

下面将以条件风险价值为工具，得到问题 (3-27) 可行域的一个子集，并以此得出可直接用商业求解器求解的规划问题。

(2) 条件风险价值简介

风险价值 (Value at Risk, VaR) 和条件风险价值 (Conditional Value at Risk, CVaR) 都可用于衡量风险。本小节是对 CVaR 的定义和基本性质的介绍, 内容引自文献 [31], 所定义符号只在本小节内使用。

设 $x \in X \subseteq \mathbb{R}^n$ 是决策变量, $y \in \mathbb{R}^m$ 是随机变量, $f(x, y)$ 是由 x 和 y 的取值决定的损失函数。为方便叙述, 假设 y 的概率密度函数是 $p(y)$, 虽然以下内容实际上不要求 $p(y)$ 的存在性。

给定一个概率阈值 β , 定义 $f(x, y)$ 的 β -VaR 为:

$$\alpha_\beta(x) = \min\{\alpha \in \mathbb{R} : \int_{f(x,y) \leq \alpha} p(y)dy \geq \beta\} \quad (3-28)$$

它的意义是, 在概率 β 下, 能保证损失 $f(x, y)$ 不超过的最小值。

定义 $f(x, y)$ 的 β -CVaR 为:

$$\phi_\beta(x) = \frac{1}{1-\beta} \int_{f(x,y) \geq \alpha_\beta(x)} f(x, y)p(y)dy \quad (3-29)$$

即损失高于 β -VaR 部分的期望。

VaR 的定义较直观, 但通常难以处理。命题 3.5 指出 VaR 与 CVaR 的关系。

命题 3.5: $\alpha_\beta(x) \leq \phi_\beta(x)$ 。

设 $\phi_\beta(x) \leq C \in \mathbb{R}$, 则 $\alpha_\beta(x) \leq \phi_\beta(x) \leq C$ 。因此, VaR 的上界约束可以用 CVaR 的上界约束近似, 而且近似后可行域不会扩大。

定义辅助函数

$$F_\beta(x, \alpha) = \alpha + \frac{1}{1-\beta} \int_{y \in \mathbb{R}^m} \max\{f(x, y) - \alpha, 0\}p(y)dy \quad (3-30)$$

该函数与 CVaR 有密切联系。

定理 3.1 (文献 [31] Theorem 1): $F_\beta(x, \alpha)$ 作为 α 的函数时, 是凸函数且连续可导。对任意 $x \in X$, 有 $\phi_\beta(x) = \min_{\alpha \in \mathbb{R}} F_\beta(x, \alpha)$ 。

设 y_1, y_2, \dots, y_q 是 y 的一组取样, 则可以如下近似 $F_\beta(x, \alpha)$:

$$\tilde{F}_\beta(x, \alpha) = \alpha + \frac{1}{q(1-\beta)} \sum_{k=1}^q \max\{f(x, y_k) - \alpha, 0\} \quad (3-31)$$

(3) 求解方法

本小节转化问题 (3-27) 中的约束 (3-27b), 直至得出可用商业求解器求解的问题形式。

根据 VaR 的定义知, 约束 (3-27b) 等价于 $g^{OC}(x^{OC}, \xi^{OC})$ 的 $(1 - \alpha_{1+}^{OC})$ -VaR 小于等于 0。再由命题 3.5 知, 约束 (3-27b) 的一个充分条件是 $g^{OC}(x^{OC}, \xi_0^{OC})$ 的 $(1 - \alpha_{1+}^{OC})$ -CVaR 小于等于 0。

令 $G_{1-\alpha_{1+}^{OC}}(x^{OC}, \gamma) = \gamma + \frac{1}{\alpha_{1+}^{OC}} E(\max\{g^{OC}(x^{OC}, \xi^{OC}) - \gamma, 0\})$, 其中 $E(\cdot)$ 表示取期望。则由定理 3.1 有, $g^{OC}(x^{OC}, \xi^{OC})$ 的 $(1 - \alpha_{1+}^{OC})$ -CVaR 等于 $\min_{\gamma \in \mathbb{R}} G_{1-\alpha_{1+}^{OC}}(x^{OC}, \gamma)$ 。

因此, 约束 (3-27b) 的一个充分条件是 $\min_{\gamma \in \mathbb{R}} G_{1-\alpha_{1+}^{OC}}(x^{OC}, \gamma) \leq 0$, 等价于:

$$\exists \gamma \in \mathbb{R}, \text{ s. t. } G_{1-\alpha_{1+}^{OC}}(x^{OC}, \gamma) \leq 0 \quad (3-32)$$

用取样的方式近似 $G_{1-\alpha_{1+}^{OC}}(x^{OC}, \gamma)$, 得到约束 (3-32) 的近似:

$$\exists \gamma \in \mathbb{R}, \text{ s. t. } \gamma + \frac{1}{q^{OC} \alpha_{1+}^{OC}} \sum_{k=1}^{q^{OC}} \max\{g^{OC}(x^{OC}, \xi_k^{OC}) - \gamma, 0\} \leq 0 \quad (3-33)$$

其中 $\xi_k^{OC}, k = 1, \dots, q^{OC}$ 是 ξ^{OC} 的取样, q^{OC} 是取样总数。

将约束 (3-33) 替换约束 (3-27b), 可得到问题 (3-27) 的近似问题:

$$\min F_{OC} = Pr_{RG} x_{RG} + Pr_{ES} x_{ES} \quad (3-34a)$$

$$\text{s. t. } \gamma \in \mathbb{R} \quad (3-34b)$$

$$\gamma + \frac{1}{q^{OC} \alpha_{1+}^{OC}} \sum_{k=1}^{q^{OC}} \max\{g^{OC}(x^{OC}, \xi_k^{OC}) - \gamma, 0\} \leq 0 \quad (3-34c)$$

$$x_{RG} \geq 0, x_{ES} \geq 0, \underline{w} x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w} x_{ES} \quad (3-34d)$$

引入辅助变量 $s_k^{OC}, k = 1, \dots, q^{OC}$, 令 $s_k^{OC} = \max\{g^{OC}(x^{OC}, \xi_k^{OC}) - \gamma, 0\}$, 则 $s_k^{OC} \geq 0$ 且 $s_k^{OC} \geq g^{OC}(x^{OC}, \xi_k^{OC}) - \gamma$, 因此 $s_k^{OC} + \gamma \geq g^{OC}(x^{OC}, \xi_k^{OC})$, 这等价于

$$\begin{cases} (\xi_{RG}, \xi_C) = \xi_k^{OC} \\ p_{F1}(t), p_{F2}(t), p_{F3}(t) \geq 0, t = 1, \dots, T \\ \underline{w}x_{ES} \leq w_0 + \sum_{i=1}^t (\eta_1 p_{F2}(i) - \frac{p_{F3}(i)}{\eta_2}) \Delta_t \leq \bar{w}x_{ES}, t = 1, \dots, T \\ \sum_{t=1}^T (\eta_1 p_{F2}(t) - \frac{p_{F3}(t)}{\eta_2}) = 0 \\ p_{F1}(t) + p_{F2}(t) - \xi_{RG}(t)x_{RG} \leq 0, t = 1, \dots, T \\ \xi_C(t) - p_{F1}(t) - p_{F3}(t) \leq s_k^{OC} + \gamma, t = 1, \dots, T \end{cases} \quad (3-35)$$

由此易知, 问题 (3-34) 等价于问题 (3-36):

$$\min F_{OC} = Pr_{RG}x_{RG} + Pr_{ES}x_{ES} \quad (3-36a)$$

$$\text{s. t. } x_{RG} \geq 0, x_{ES} \geq 0, \underline{w}x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w}x_{ES} \quad (3-36b)$$

$$\gamma \in \mathbb{R} \quad (3-36c)$$

$$p_{F1}^k(t), p_{F2}^k(t), p_{F3}^k(t) \geq 0, t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-36d)$$

$$\underline{w}x_{ES} \leq w_0 + \sum_{i=1}^t (\eta_1 p_{F2}^k(i) - \frac{p_{F3}^k(i)}{\eta_2}) \Delta_t \leq \bar{w}x_{ES}, t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-36e)$$

$$\sum_{t=1}^T (\eta_1 p_{F2}^k(t) - \frac{p_{F3}^k(t)}{\eta_2}) = 0, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-36f)$$

$$p_{F1}^k(t) + p_{F2}^k(t) - \xi_{RG}^k(t)x_{RG} \leq 0, t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-36g)$$

$$\xi_C^k(t) - p_{F1}^k(t) - p_{F3}^k(t) \leq s_k^{OC} + \gamma, t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-36h)$$

$$\gamma + \frac{1}{q^{OC} \alpha_{1+}^{OC}} \sum_{k=1}^{q^{OC}} s_k^{OC} \leq 0 \quad (3-36i)$$

$$s_k^{OC} \geq 0, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-36j)$$

其中 $p_{F1}^k, p_{F2}^k, p_{F3}^k$ 表示对应 $\xi_k^{OC} = (\xi_{RG}^k, \xi_C^k)$ 的 p_{F1}, p_{F2}, p_{F3} , $k = 1, \dots, q^{OC}$ 。
问题 (3-36) 是线性规划, 可用商业求解器求出最优解。

3.5.6 取样近似求解方法

假设取样总数 q^{OC} 较大, $\xi_k^{OC}, k = 1, \dots, q^{OC}$ 是 ξ^{OC} 的取样。问题 (3-24) 中约束 (3-24b) 的概率部分可以直接用频率近似。换言之, 要求 x^{OC} 满足对 $\xi_k^{OC}, k = 1, \dots, q^{OC}$ 中至少 $(1 - \alpha_{1+}^{OC})q^{OC}$ 个取值, 存在 $p_{F1}^k, p_{F2}^k, p_{F3}^k$ 满足约束 (3-25a) - (3-25e)。

引入 0-1 变量 $z_k^{OC} \in \{0, 1\}, k = 1, \dots, q^{OC}$ 以表示是否存在 $p_{F1}^k, p_{F2}^k, p_{F3}^k$ 满足约束, 用 $z_k^{OC} = 0$ 表示存在。 ξ_C 是充电负荷, 因此存在上界 (例如根据充电设施数量与充电功率上限可以得到一个上界), 设为 M_C 。考虑约束 (3-37)

$$\xi_C^k(t) - p_{F1}^k(t) - p_{F3}^k(t) \leq M_C z_k^{OC}, t = 1, \dots, T \quad (3-37)$$

当 $z_k^{OC} = 0$ 时, 约束 (3-37) 等价于 $\xi_C^k(t) - p_{F1}^k(t) - p_{F3}^k(t) \leq 0, t = 1, \dots, T$, 形式与约束 (3-25e) 相同; 当 $z_k^{OC} = 1$ 时, 约束 (3-37) 等价于 $\xi_C^k(t) - p_{F1}^k(t) - p_{F3}^k(t) \leq M^{OC}, t = 1, \dots, T$, 由于 $\xi_C^k(t) \leq M^{OC}, p_{F1}^k(t) \geq 0, p_{F3}^k(t) \geq 0$, 上述约束始终成立。因此, 约束 (3-37) 连同约束 (3-25a) - (3-25d) 可以表达 z_k^{OC} 的意义。

此外, 还需要成功频率的下限约束:

$$\frac{\sum_{k=1}^{q^{OC}} (1 - z_k^{OC})}{q^{OC}} \geq 1 - \alpha_{1+}^{OC} \quad (3-38)$$

等价于

$$\sum_{k=1}^{q^{OC}} z_k^{OC} \leq \alpha_{1+}^{OC} q^{OC} \quad (3-39)$$

综上可得问题 (3-40):

$$\min F_{OC} = Pr_{RG} x_{RG} + Pr_{ES} x_{ES} \quad (3-40a)$$

$$\text{s. t. } x_{RG} \geq 0, x_{ES} \geq 0, \underline{w} x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w} x_{ES} \quad (3-40b)$$

$$z_k^{OC} \in \{0, 1\}, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-40c)$$

$$p_{F1}^k(t), p_{F2}^k(t), p_{F3}^k(t) \geq 0, t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-40d)$$

$$\underline{w}x_{ES} \leq w_0 + \sum_{i=1}^t (\eta_1 p_{F2}^k(i) - \frac{p_{F3}^k(i)}{\eta_2}) \Delta_t \leq \bar{w}x_{ES}, t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-40e)$$

$$\sum_{t=1}^T (\eta_1 p_{F2}^k(t) - \frac{p_{F3}^k(t)}{\eta_2}) = 0, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-40f)$$

$$p_{F1}^k(t) + p_{F2}^k(t) - \xi_{RG}^k(t)x_{RG} \leq 0, t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-40g)$$

$$\xi_C^k(t) - p_{F1}^k(t) - p_{F3}^k(t) \leq M^{OC} z_k^{OC}, t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-40h)$$

问题 (3-40) 是混合整数线性规划，可以用商业求解器求出最优解。

3.5.7 说明

(1) 随机变量样本

本节规划问题应该考虑充电站长期运行中可能遇到的各种情况及其发生的概率。充电负荷样本仍然可以通过小节 3.4 中的方式仿真得到（注意已确定充电站选址与各个充电站的充电设施数量），用设定蒙特卡洛循环次数即日行程数量的方式，反映交通流量的变化。

可再生能源样本可根据当地观测记录，以及计划使用的发电设备性能计算得到。

如果假设充电负荷与可再生能源相互独立，那么可以将充电负荷样本和可再生能源样本等可能随机组合产生 ξ^{OC} 的取样集合。实际上，充电负荷与可再生能源很可能有某种联系，假如这种联系是明确的，就可以设置其他的组合方法得到更合适的 ξ^{OC} 取样集合。然而，找出这种联系有一定困难。

基于数据的决策通常要求，使用一组数据求解，之后用另一组数据检验。在这个规划问题中，可以将获取的随机变量样本分成两部分，一部分用于规划，另一部分用于检验最优解的约束成立频率。如果最优解在测试数据集中的约束成立频率与期待的概率相差不大，则可以接受最优解，否则应该通过增加样本、调节 d^{OC} 、选择合适的随机规划求解方法等方式重新求解。

(2) 发电功率约束与负荷功率约束中的不等号

发电功率约束 (3-25d) 要求发电功率大于等于流向负荷与储能的功率，负荷功率约束 (3-25e) 要求负荷功率小于等于从发电与储能流向负荷的功率。这两种约束中采用不等号而不是等号的理由如下：

第一，如果这两种约束存在取不等号的情况，那么发电功率多于对发电的需求或流向负荷的功率多于负荷需求，只需用某些设备将多余的能量消耗掉；

第二，在这两种约束中用不等号不会缩小问题的可行域，最优值不会增大；

第三，命题 3.2 用到了发电功率约束的不等号， g^{OC} 的定义与负荷功率约束中的不等号相符。在发电功率约束与负荷功率约束中用不等号便于推导用于求解的模型，如问题 (3-36) 和问题 (3-40)。

这种处理方式在许多现有文献中出现过，例如文献 [32]。

(3) 模型的一些改进方向

为简化叙述，上文所述模型比较简单，可能无法适应实际需求。现在指出所提规划模型的一些改进方向：第一，充电站内设置多种可再生能源。所提规划模型和求解方法可以直接推广至这种情况。设共有 N_{RG} 种可再生能源， $Pr_{RG}, x_{RG}, \xi_{RG}(t), t = 1, \dots, T$ 均为 $N_{RG} \times 1$ 的向量，意义与之前相似。注意此时发电设备成本为各种可再生能源发电设备的总成本，每一时段发电功率为各种可再生能源发电总功率，则确定性规划模型 (3-15) 可推广为：

$$\min F_{OC} = Pr_{RG}^T x_{RG} + Pr_{ES} x_{ES} \quad (3-41a)$$

$$\text{s. t. } x_{RG} \geq 0, x_{ES} \geq 0, \underline{w}x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w}x_{ES} \quad (3-41b)$$

$$p_{F1}(t), p_{F2}(t), p_{F3}(t) \geq 0, t = 1, \dots, T \quad (3-41c)$$

$$\underline{w}x_{ES} \leq w_0 + \sum_{i=1}^t (\eta_1 p_{F2}(i) - \frac{p_{F3}(i)}{\eta_2}) \Delta_t \leq \bar{w}x_{ES}, t = 1, \dots, T \quad (3-41d)$$

$$\sum_{t=1}^T (\eta_1 p_{F2}(t) - \frac{p_{F3}(t)}{\eta_2}) = 0 \quad (3-41e)$$

$$p_{F1}(t) + p_{F2}(t) - \xi_{RG}(t)^T x_{RG} \leq 0, t = 1, \dots, T \quad (3-41f)$$

$$\xi_C(t) - p_{F1}(t) - p_{F3}(t) \leq 0, t = 1, \dots, T \quad (3-41g)$$

类似地，可以将求解模型 (3-36) 和 (3-40) 推广。

第二，要求规划设备台数，设备容量不能连续变化。这种情况同样可以直接推广本文所提模型。设 n_{RG}, n_{ES} 分别是可再生能源发电设备与储能设备的数量， R_0^{RG}, R_0^{ES} 分别是单台发电与储能设备的容量。用 $n_{RG}, n_{ES}, R_0^{RG}, R_0^{ES}$ 表示 x_{RG}, x_{ES} ，增加 n_{RG}, n_{ES} 取非负整数的约束，则确定性规划模型 (3-15) 可推广

为:

$$\min F_{OC} = Pr_{RG}x_{RG} + Pr_{ES}x_{ES} \quad (3-42a)$$

$$\text{s. t. } x_{RG} = R_0^{RG}n_{RG}, x_{ES} = R_0^{ES}n_{ES}, \underline{w}x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w}x_{ES} \quad (3-42b)$$

$$n_{RG}, n_{ES} \in \mathbb{N} \quad (3-42c)$$

$$p_{F1}(t), p_{F2}(t), p_{F3}(t) \geq 0, t = 1, \dots, T \quad (3-42d)$$

$$\underline{w}x_{ES} \leq w_0 + \sum_{i=1}^t (\eta_1 p_{F2}(i) - \frac{p_{F3}(i)}{\eta_2}) \Delta_t \leq \bar{w}x_{ES}, t = 1, \dots, T \quad (3-42e)$$

$$\sum_{t=1}^T (\eta_1 p_{F2}(t) - \frac{p_{F3}(t)}{\eta_2}) = 0 \quad (3-42f)$$

$$p_{F1}(t) + p_{F2}(t) - \xi_{RG}(t)x_{RG} \leq 0, t = 1, \dots, T \quad (3-42g)$$

$$\xi_C(t) - p_{F1}(t) - p_{F3}(t) \leq 0, t = 1, \dots, T \quad (3-42h)$$

类似地，可以直接推广模型 (3-36) 和 (3-40)。模型 (3-36) 推广后由线性规划变成混合整数线性规划。一般而言，引入新的整数变量会明显增加求解时间。

第三，充电站除了使用可再生能源作为电源，还采用柴油发电等运行成本与发电量有关的电源。设柴油发电容量是 x_{FG} ，各时段柴油发电功率为 $p_{F4}(t), t = 1, \dots, T$ ，日柴油发电成本按比例折算到设备成本后为 $F_{FG}(p_{F4})$ ，单位容量柴油发电机成本为 Pr_{FG} 。基本想法是，将 $F_{FG}(p_{F4})$ 取期望后包含在目标函数中，最小化设备与柴油发电的联合成本。将总发电功率变为可再生能源与柴油发电之和，即 $\xi_{RG}(t)x_{RG} + p_{F4}(t), t = 1, \dots, T$ ，使用平均值近似期望，模型 (3-36) 可修改为问题 (3-43)：

$$\min F_{OC} = Pr_{RG}x_{RG} + Pr_{ES}x_{ES} + Pr_{FG}x_{FG} + \frac{1}{q^{OC}} \sum_{k=1}^{q^{OC}} F_{FG}(p_{F4}^k) \quad (3-43a)$$

$$\text{s. t. } x_{RG} \geq 0, x_{ES} \geq 0, x_{FG} \geq 0, \underline{w}x_{ES} \leq w_0 \leq \bar{w}x_{ES} \quad (3-43b)$$

$$\gamma \in \mathbb{R} \quad (3-43c)$$

$$p_{F1}^k(t), p_{F2}^k(t), p_{F3}^k(t), p_{F4}^k(t) \geq 0, t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-43d)$$

$$\underline{w}^{x_{ES}} \leq w_0 + \sum_{i=1}^t (\eta_1 p_{F_2}^k(i) - \frac{p_{F_3}^k(i)}{\eta_2}) \Delta_t \leq \bar{w}^{x_{ES}}, t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-43e)$$

$$\sum_{t=1}^T (\eta_1 p_{F_2}^k(t) - \frac{p_{F_3}^k(t)}{\eta_2}) = 0, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-43f)$$

$$p_{F_1}^k(t) + p_{F_2}^k(t) - \xi_{RG}^k(t) x_{RG} - p_{F_4}^k(t) \leq 0, t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-43g)$$

$$\xi_{C}^k(t) - p_{F_1}^k(t) - p_{F_3}^k(t) \leq s_k^{OC} + \gamma, t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-43h)$$

$$s_k^{OC} \geq 0, k = 1, \dots, q^{OC} \quad (3-43i)$$

类似地，可修改模型 (3-40)。应该指出，小节 3.5.3 和 3.5.4 中的推导不适用于发电成本与发电量有关的情况。问题 (3-43) 是否易求解与函数 $F_{FG}(p_{F_4})$ 的形式密切相关。根据实际意义， $F_{FG}(p_{F_4})$ 常常是凸函数，这时问题 (3-43) 属于凸规划，局部最优解是全局最优解。

第四，对以上情况的任意组合，都可以修改本节模型得到合理的新模型。

(4) 分布鲁棒优化中的参数选取

参数 d^{OC} 用于确定分布鲁棒优化考虑的集合 \mathcal{D}^{OC} 。 d^{OC} 越大，集合 \mathcal{D}^{OC} 越大，规划结果越保守。决策者可以根据风险偏好选择 d^{OC} [30]。考虑到数据描述分布的精确度与数据总量的关系，决策者可以取 $d^{OC} = J/\ln(q^{OC})$ ，其中 J 是一个常数，随 q^{OC} 增大，数据描述的分布与真实分布的差异倾向于越来越小，因此设定 d^{OC} 随 q^{OC} 增大而减小。对于满足某些条件的分布，有一些结果可用于 d^{OC} 的选取 [30]。

(5) 随机规划两种求解方法的比较

小节 3.5.5 和小节 3.5.6 介绍了两种随机规划求解方法。

用频率近似概率的想法比较直接。在样本量较大的情况下，有很大的把握可以相信频率是对概率的较好近似，因此这时问题 (3-40) 的最优解应该比较接近真正希望求解的问题 (3-19) 的最优解。然而，由于这种方法使用了样本数量的 0-1 变量，所以求解时间随样本数量增长很快。一些文献研究了如何快速求解问题 (3-40)，可采用这些方法缩短求解时间 [29]。除此以外，对于最优解实际满足约束的概率，有一些与样本数量有关的上下界估计 [29]。

基于条件风险价值的方法，在推导过程中存在缩小可行域的步骤，所以通常结果更保守一些。另外，损失函数的选取对这种方法的效果有重要影响。相

比之下，基于条件风险价值的方法主要优势在于，得出的问题 (3-36) 是线性规划问题，求解难度大大降低。问题 (3-36) 有 $q^{OC}(3T+1)+4$ 个变量， $q^{OC}(7T+2)+3$ 个约束。

实际应用中，应该综合考虑两种方法的优缺点，选取合适的一种。

3.6 小结

本章提出离网型充电站的整套规划方法，首先根据未考虑充电站时的充电需求空间分布进行充电站选址，然后在考虑充电站位置的情况下重新模拟充电需求进行校正，接着提出基于模拟方法的充电设施数量规划，最后计及随机性并使用分布鲁棒优化等工具进行站内容量规划。本章不仅详细说明了规划思路、推导过程与求解方法，而且对方法的特点进行了理论分析。本章所提方法的应用效果见第 5 章测试案例。

第4章 并网型充电站规划

4.1 概述

并网型充电站是与电网连接的充电站，而且是充电站的主要形式。并网型充电站通常连接中等电压等级的配电网，如 10 kV 电网^[5]。充电站作为配电网的新增负荷，往往会对配电网造成不可忽略的影响，因此并网型充电站的规划必须考虑交通状况和配电网两方面。本章将提出新的并网型充电站与配电网规划方法，首先介绍针对并网型充电站的选址与负荷分配模型，然后建立配电网升级改造与分布式电源优化模型，并且将两个模型组合为并网型充电站与配电网的联合规划模型，以达到整体最优的效果。

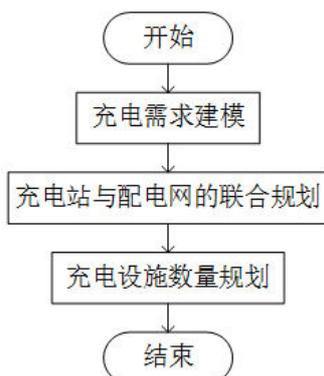


图 4.1 并网型充电站规划流程

4.2 选址与负荷分配模型

本节提出并网型充电站规划中使用的选址与负荷分配模型，并且可单独用于充电站的选址。本节首先介绍问题情景，然后说明建模过程与求解方法，最后分析所提方法，并与小节 3.2 的方法比较。

4.2.1 问题情景

并网型充电站需要与电网连接，因此选址范围受到电网的限制，只能在可接入电网处选择建站地址。综合考虑电网条件和地理情况，可以得出候选站点。

因为有电网的限制，因此并网型充电站候选站点集合与离网型相比较小。

本节模型刻画各个充电站承担服务区域内充电负荷的状况，以建站总成本为约束，最大化接受服务的充电需求总量。本节模型可输出不考虑电网约束时的最优选址。模型建立过程用到两个假设：

假设 4.1： 用户的充电行为服从调度。换言之，如果某用户的充电需求被多个充电站的服务区域覆盖，则可以指定该用户去这些充电站中的一个充电。

假设 4.2： 假设充电站对所有电动汽车有相同的服务范围。

4.2.2 模型与解法

(1) 输入参数

设候选站点集合是 S_{CS} ，共有 N_{CS} 个候选站点。假定充电站的服务半径是 SR 。在交通网中画出所有候选站点的服务区域边界，将这些边界分割出的最小单元称为一个充电区间，如图 4.2 所示。对同一个充电区间内的各点，覆盖它们的候选站点相同。设充电区间集合是 S_{CI} ，共有 N_{CI} 个充电区间，候选站点服务区域与充电区间覆盖关系矩阵为 $R^I_{N_{CS} \times S_{CI}}$ （元素为 1 表示覆盖，0 表示不覆盖，可参考小节 3.2 矩阵 R 的定义）。

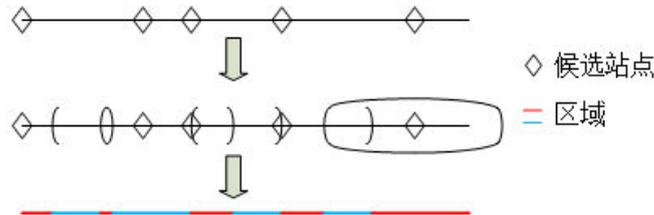


图 4.2 划分充电区间示意图

处理通过第 2 章方法得到的充电需求点数据，获得各个充电区间内的充电需求总量 $P^I_{N_{CI} \times 1}$ 。

设候选站点的建站成本是 $c = (c_1, c_2, \dots, c_{N_{CS}})^T$ ，总建站成本上限是 c_0 。设各候选站点能承受的充电需求上限是 $f^{CI} = (f_1^{CI}, f_2^{CI}, \dots, f_{N_{CS}}^{CI})^T$ 。

(2) 变量

与小节 3.2 中相同，用 0-1 变量 $z_i, i = 1, \dots, N_{CS}$ 表示候选站点 i 是否建站。定义变量 $e_{ij}, i = 1, \dots, N_{CS}, j = 1, \dots, N_{CI}$ ，其中 e_{ij} 表示候选站点 i 处的充电站承担的充电区间 j 内的充电需求。

(3) 模型

由 e_{ij} 的定义和问题情景知, e_{ij} 需要满足以下几个约束:

第一, e_{ij} 非负;

$$e_{ij} \geq 0, i = 1, \dots, N_{CS}, j = 1, \dots, N_{CI} \quad (4-1)$$

第二, 候选站点 i 不建站 (即 $z_i = 0$) 或者候选站点 i 的服务区域不能覆盖充电区间 j 时, $e_{ij} \leq 0$;

$$e_{ij} \leq R_{ij}^I f_i^{CI} z_i, i = 1, \dots, N_{CS}, j = 1, \dots, N_{CI} \quad (4-2)$$

第三, 候选站点 i 承担的充电需求总和 $\sum_{j=1}^{N_{CI}} e_{ij}$ 不超过候选站点 i 能承受的充电需求上限;

$$\sum_{j=1}^{N_{CI}} e_{ij} \leq f_i^{CI}, i = 1, \dots, N_{CS} \quad (4-3)$$

第四, 充电区间 j 接受服务的充电需求总和 $\sum_{i=1}^{N_{CS}} e_{ij}$ 不超过充电区间 j 的充电需求 P_j^{CI} 。

$$\sum_{i=1}^{N_{CS}} e_{ij} \leq P_j^{CI}, j = 1, \dots, N_{CI} \quad (4-4)$$

此外, 还要满足总成本限制:

$$\sum_{i=1}^{N_{CS}} c_i z_i \leq c_0 \quad (4-5)$$

规划目标是最大化接受服务的充电需求 $\sum_{i=1}^{N_{CS}} \sum_{j=1}^{N_{CI}} e_{ij}$, 因此, 规划模型为

$$\max \sum_{i=1}^{N_{CS}} \sum_{j=1}^{N_{CI}} e_{ij} \quad (4-6a)$$

$$\text{s. t. } e_{ij} \geq 0, i = 1, \dots, N_{CS}, j = 1, \dots, N_{CI} \quad (4-6b)$$

$$e_{ij} \leq R_{ij}^l f_i^{CI} z_i, i = 1, \dots, N_{CS}, j = 1, \dots, N_{CI} \quad (4-6c)$$

$$\sum_{j=1}^{N_{CI}} e_{ij} \leq f_i^{CI}, i = 1, \dots, N_{CS} \quad (4-6d)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{CS}} e_{ij} \leq P_j^{CI}, j = 1, \dots, N_{CI} \quad (4-6e)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{CS}} c_i z_i \leq c_0 \quad (4-6f)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, N_{CS} \quad (4-6g)$$

(4) 求解方法

问题 (4-6) 是混合整数线性规划，可以用商业求解器求出最优解。

4.2.3 说明

(1) 充电需求的获取

用第 2 章的方法得出充电需求点。为了获取较准确的充电需求功率的空间分布，可以使用循环次数较大的蒙特卡洛模拟，但必须按比例换算至实际的行程数量对应的功率。

(2) 与离网型充电站选址规划的差别

小节 3.2 介绍了离网型充电站选址规划，本节方法是针对并网型充电站的特点在离网型选址规划方法的基础上修改而成的。它们的主要差别在于：

第一，本节规划问题描述了充电负荷在多个充电站之间的分配，而离网型规划方法只刻画充电需求点是否被充电站的服务区域覆盖。

首先，离网型充电站之间没有电气上的连接，只能通过交通与充电负荷相互影响。因为在离网型充电站的后续规划中，有充电需求校正的步骤用于考虑充电站之间的相互影响，所以在选址规划中不描述负荷分配是不会引起问题的。其次，描述负荷分配需要新增大量变量与约束，因此离网型选址规划仅刻画充电需求点的被覆盖情况是合理的。

并网型充电站之间可以通过交通和电网两方面相互影响。为了将本节选址模型与配电网规划模型结合起来，选址模型必须提供每个充电站的充电负荷信息。如果采用充电需求校正的方式，那么难以达到选址时考虑电网的要求。相比之下，基于本节选址模型的小节 4.4 模型能够同时计及交通与电网求出最优

决策。应该指出，并网型选址模型在描述充电负荷分配时，使用了用户选择充电站的行为服从调度的假设，并且没有经过充电需求校正，所以方法本身会引入误差。但是，在并网型选址中引入负荷分配是利大于弊的。

第二，本节规划问题引入了充电区间的概念，而离网型规划方法直接使用充电需求点集合。

并网型充电站选址模型引入充电区间的主要目的是，减少变量数量。因为并网型充电站的候选站点集合通常不大，所以充电区间不会太多，从充电需求点到充电区间的转换能大大减少变量数量。由于在负荷分配时增加了大量变量，因此这里减少变量的做法有其重要性。引入充电区间的概念，也使得可以增大蒙特卡洛循环次数，得出充电功率在每个区间中的总和，而不必根据行程数量选择循环次数。应该指出，充电区间的引入包含了一个假设：充电站对于所有充电汽车有相同的服务范围。应用中，可以根据可靠性要求，将这个范围取为大部分或全部服务范围的交集。同样地，这个假设可能引入误差。

离网型充电站由于没有接入电网的限制，可建站位置很可能成片出现。为了较准确地描述这种情况，需要采用密集选取候选站点的方法^[5]，因此候选站点之间的距离短，候选站点集合大。由于充电区间是由候选站点服务区域的边界划分而成的，假如为离网型充电站选址使用充电区间，则充电区间数量多，并且存在范围很小的充电区间，甚至导致很难有充电需求点落入这样小的充电区间。因此，充电区间的概念不适合在离网型充电站选址中使用。

这里对离网型和并网型充电站假定最可能出现的情况，当实际情况与之不同时，应该根据以上分析过程选择选址模型。例如，倘若并网型选址中候选站点集合很大，就不应该使用充电区间。

(3) 问题规模

问题 (4-6) 含有 N_{CS} 个 0-1 变量， $N_{CS}N_{CI}$ 个连续变量， $2N_{CS}N_{CI} + N_{CS} + N_{CI} + 1$ 个线性约束。实际上，根据候选站点服务范围对充电区间的覆盖关系，可以在求解规划问题前去掉很大一部分的连续变量，以及相关的约束。所以，真正需求解的规划问题规模比以上估计小很多。

4.3 配电网规划模型

本节提出配电网规划模型。首先描述问题情景，然后介绍模型中用到的支

路潮流模型及其松弛形式，写出基本的配电网规划模型，将其转换成可用商业求解器求解的混合整数二阶锥规划，最后讨论模型转换过程的等价性与需求解问题的规模。

4.3.1 问题情景

本节模型将充电站看作配电网节点的新增负荷，在可以新增分布式电源和增加线路数量的情况下，保持配电网安全运行，最小化从大电网买电、分布式电源发电和新增设备的联合成本。本节模型基于以下几个假设：

假设 4.3： 配电网呈放射状，即拓扑结构是一个树，而且其中有一个节点是平衡节点。

假设 4.4： 每个充电站是配电网中一个节点的负荷。

假设 4.5： 可以在配电网中的某些节点设置电源。

假设 4.6： 可以在配电网中的某些线路增加线路数量，新增线路与原线路参数相同。

4.3.2 支路潮流模型及其松弛化简介

支路潮流模型可精确计算潮流，可以将非线性的潮流方程松弛成凸的形式。在电网呈放射状的情况下，增加一些影响不大的条件后可以保证松弛后仍能求出最优潮流。因此，本文采用支路潮流模型刻画配电网潮流。以下对支路潮流模型及其松弛化形式的介绍基于文献 [33]。

用连通有向图 $G = (N, E)$ 表示配电网，设节点为 $i = 0, 1, \dots, n$ ，其中节点 0 是平衡节点。根据假设 4.3，要求 G 是一个树，平衡节点处于树根的位置。将每条边的方向定为远离平衡节点的方向。下文将用 (i, j) 或 $i \rightarrow j$ 表示从节点 i 到节点 j 的边。

配电网的参数如下：对任意线路 $(i, j) \in E$ ，用 $z_{ij}^l = r_{ij}^l + \mathbf{i}x_{ij}^l$ 表示阻抗。对任意节点 $i \in N$ ，用 $y_i^n = g_i^n - \mathbf{i}b_i^n$ 表示对地并联导纳。平衡节点的复电压为 V_0^n 。

潮流计算有关物理量如下：对每条线路 $(i, j) \in E$ ，分别用 I_{ij}^l 和 $S_{ij}^l = P_{ij}^l + \mathbf{i}Q_{ij}^l$ 表示从节点 i 到节点 j 线路上的复电流和始端复功率。对每个节点 $i \in N$ ，分别用 V_i^n 和 $s_i^n = p_i^n + \mathbf{i}q_i^n$ 表示复电压和注入复功率。

支路潮流模型为 (4-7) - (4-9)，其中 $(\cdot)^*$ 表示复数取共轭的操作。

$$V_i^n - V_j^n = z_{ij}^l I_{ij}^l, \forall (i, j) \in E \quad (4-7)$$

$$S_{ij} = V_i (I_{ij}^l)^*, \forall (i, j) \in E \quad (4-8)$$

$$\sum_{k:j \rightarrow k} S_{jk}^l - \sum_{i:i \rightarrow j} (S_{ij}^l - z_{ij}^l |I_{ij}^l|^2) + (y_j^n)^* |V_j^n|^2 = s_j, \forall j \in N \quad (4-9)$$

公式 (4-7) - (4-9) 的意义分别是线路上的压降、始端复功率的定义和节点功率平衡。

令 $l_{ij}^l = |I_{ij}^l|^2$, $v_i^n = |V_i^n|^2$ 。由公式 (4-7) - (4-9) 可得

$$p_j^n = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk}^l - \sum_{i:i \rightarrow j} (P_{ij}^l - r_{ij}^l l_{ij}^l) + g_j^n v_j^n, \forall j \in N \quad (4-10)$$

$$q_j^n = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk}^l - \sum_{i:i \rightarrow j} (Q_{ij}^l - x_{ij}^l l_{ij}^l) + b_j^n v_j^n, \forall j \in N \quad (4-11)$$

$$v_j^n = v_i^n - 2(r_{ij}^l P_{ij}^l + x_{ij}^l Q_{ij}^l) + \left((r_{ij}^l)^2 + (x_{ij}^l)^2 \right) l_{ij}^l, \forall (i, j) \in E \quad (4-12)$$

$$l_{ij}^l = \frac{(P_{ij}^l)^2 + (Q_{ij}^l)^2}{v_i^n}, \forall (i, j) \in E \quad (4-13)$$

从公式 (4-7) - (4-9) 到公式 (4-10) - (4-13) 去除了相角信息，进行了松弛化。文献 [33] Theorem 2 证明，对于放射状的网络，公式 (4-10) - (4-13) 的解总是可以唯一地恢复为公式 (4-7) - (4-9) 的解。因此，求出公式 (4-10) - (4-13) 的解相当于获得了精确的潮流。

然而公式 (4-10) - (4-13) 的解集仍然是非凸的，为此将约束 (4-13) 松弛成

$$l_{ij}^l \geq \frac{(P_{ij}^l)^2 + (Q_{ij}^l)^2}{v_i^n}, \forall (i, j) \in E \quad (4-14)$$

可写成二阶锥约束

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij}^l \\ 2Q_{ij}^l \\ l_{ij}^l - v_i^n \end{array} \right\|_2 \leq l_{ij}^l + v_i^n, \forall (i, j) \in E \quad (4-15)$$

因此公式 (4-10) - (4-12) 和 (4-14) 的解集是凸的，以之为可行域的目标函数为凸函数的规划问题是凸规划。给出某些轻微的条件后，从公式 (4-10) - (4-13) 到公式 (4-10) - (4-12) 和 (4-14) 的松弛化不会影响对应规划问题的解（见小节 4.3.5）。本节规划方法使用公式 (4-10) - (4-12) 和 (4-14) 作为潮流约束。

4.3.3 基本模型

(1) 新增分布式电源

对任意节点 i ，令 $p_i^{n,s}$ 和 $p_i^{n,d}$ 分别表示节点发电有功功率和负荷有功功率，类似定义 $q_i^{n,s}$ 和 $q_i^{n,d}$ 。节点负荷是本节规划模型中的参数而不是变量。 $\bar{p}_i^{n,s}$ 、 $\underline{p}_i^{n,s}$ 、 $\bar{q}_i^{n,s}$ 和 $\underline{q}_i^{n,s}$ 分别表示新增电源前节点发电的有功功率上下限和无功功率上下限。用 n_i^s 表示节点新增电源数量， $\overline{dp}_i^{n,s}$ 、 $\underline{dp}_i^{n,s}$ 、 $\overline{dq}_i^{n,s}$ 和 $\underline{dq}_i^{n,s}$ 表示新增单位电源对发电功率上下限的影响。设节点 i 新增电源数量上限是 \bar{n}_i^s 。因此

$$p_j^n = p_j^{n,s} - p_j^{n,d}, \forall j \in N \quad (4-16)$$

$$q_j^n = q_j^{n,s} - q_j^{n,d}, \forall j \in N \quad (4-17)$$

$$\underline{p}_j^{n,s} + \underline{dp}_j^{n,s} n_j^s \leq p_j^{n,s} \leq \bar{p}_j^{n,s} + \overline{dp}_j^{n,s} n_j^s, \forall j \in N \quad (4-18)$$

$$\underline{q}_j^{n,s} + \underline{dq}_j^{n,s} n_j^s \leq q_j^{n,s} \leq \bar{q}_j^{n,s} + \overline{dq}_j^{n,s} n_j^s, \forall j \in N \quad (4-19)$$

$$n_j^s \leq \bar{n}_j^s, \forall j \in N \quad (4-20)$$

假设在节点 i 新增单位电源的成本是 $Pr_i^{n,s}$ ，则新增分布式电源的成本为

$$F^{ps} = \sum_{i \in V} Pr_i^{n,s} n_i^s \quad (4-21)$$

(2) 新增线路

对任意线路，设新增节点 i 与节点 j 之间新增线路数量为 $N_{ij}^l - 1$ ，则新增线路后共有 N_{ij}^l 条线路在节点 i 与节点 j 之间。用 \tilde{l}_{ij}^l 、 \tilde{P}_{ij}^l 、 \tilde{Q}_{ij}^l 、 \tilde{r}_{ij}^l 、 \tilde{x}_{ij}^l 等表示 $i \rightarrow j$ 间一条线路上的物理量，而 l_{ij}^l 、 P_{ij}^l 、 Q_{ij}^l 、 r_{ij}^l 、 x_{ij}^l 等表示 $i \rightarrow j$ 间所有线路等效成一条之后的物理量。根据假设 4.6 有

$$l_{ij}^l = (N_{ij}^l)^2 \tilde{l}_{ij}^l \quad (4-22)$$

$$P_{ij}^l = N_{ij}^l \tilde{P}_{ij}^l \quad (4-23)$$

$$Q_{ij}^l = N_{ij}^l \tilde{Q}_{ij}^l \quad (4-24)$$

$$r_{ij}^l = \frac{1}{N_{ij}^l} \tilde{r}_{ij}^l \quad (4-25)$$

$$x_{ij}^l = \frac{1}{N_{ij}^l} \tilde{x}_{ij}^l \quad (4-26)$$

设在节点 i 与节点 j 之间新增一条线路的成本是 Pr_{ij}^l ，则新增线路的总成本为

$$F^l = \sum_{(i,j) \in E} Pr_{ij}^l (N_{ij}^l - 1) \quad (4-27)$$

(3) 潮流约束

将公式 (4-22) - (4-26) 代入公式 (4-10) - (4-12) 和 (4-14) 得潮流约束（为简化叙述，忽略了所有对地并联导纳，见小节 4.3.5）

$$p_j^n = \sum_{k:j \rightarrow k} N_{jk}^l \tilde{P}_{jk}^l - \sum_{i:i \rightarrow j} (N_{ij}^l \tilde{P}_{ij}^l - N_{ij}^l \tilde{l}_{ij}^l), \forall j \in N \quad (4-28)$$

$$q_j^n = \sum_{k:j \rightarrow k} N_{jk}^l \tilde{Q}_{jk}^l - \sum_{i:i \rightarrow j} (N_{ij}^l \tilde{Q}_{ij}^l - N_{ij}^l \tilde{l}_{ij}^l), \forall j \in N \quad (4-29)$$

$$v_j^n = v_i^n - 2(\tilde{r}_{ij}^l \tilde{P}_{ij}^l + \tilde{x}_{ij}^l \tilde{Q}_{ij}^l) + \left((\tilde{r}_{ij}^l)^2 + (\tilde{x}_{ij}^l)^2 \right) \tilde{l}_{ij}^l, \forall (i, j) \in E \quad (4-30)$$

$$\tilde{l}_{ij}^l \leq \frac{(\tilde{P}_{ij}^l)^2 + (\tilde{Q}_{ij}^l)^2}{v_i^n}, \forall (i, j) \in E \quad (4-31)$$

(4) 电网安全运行约束

为了保证电网能够正常运行，必须满足节点电压约束和线路电流约束：

$$\underline{v}_i^n \leq v_i^n \leq \bar{v}_i^n, \forall i \in N \quad (4-32)$$

$$\underline{l}_{ij}^l \leq l_{ij}^l, \forall (i, j) \in E \quad (4-33)$$

(5) 目标函数

设从大电网购买电能的价格的参数是 Pr_p ，则单位时间内购买电能的费用是

$$F^p = Pr_p \sum_{j:(0,j) \in E} N_{0j}^l \tilde{P}_{0j}^l \quad (4-34)$$

设节点 i 发电的成本参数是 $Pr^{n,g,1}$ 和 $Pr^{n,g,2}$ ，单位时间内发电的总费用是

$$F^g = \sum_{i \in N} (Pr^{n,g,1} p_i^{n,g} + Pr^{n,g,2} (p_i^{n,g})^2) \quad (4-35)$$

新增电源与线路的成本需要经过折算，设参数为 κ 。则目标函数为

$$\begin{aligned} F^{dn} &= \frac{1}{\kappa} (F^{ps} + F^l) + F^p + F^g \\ &= \frac{1}{\kappa} (\sum_{i \in V} Pr_i^{n,g} n_i^g + \sum_{(i,j) \in E} Pr_{ij}^l (N_{ij}^l - 1)) \\ &\quad + Pr_p \sum_{j:(0,j) \in E} N_{0j}^l \tilde{P}_{0j}^l + \sum_{i \in N} (Pr^{n,g,1} p_i^{n,g} + Pr^{n,g,2} (p_i^{n,g})^2) \end{aligned} \quad (4-36)$$

(6) 基本模型

将上述目标函数与约束结合起来，组成配电网规划的基本模型。

$$\begin{aligned} \min F^{dn} &= \frac{1}{\kappa} (\sum_{i \in N} Pr_i^{n,g} n_i^g + \sum_{(i,j) \in E} Pr_{ij}^l (N_{ij}^l - 1)) \\ &\quad + Pr_p \sum_{j:(0,j) \in E} N_{0j}^l \tilde{P}_{0j}^l + \sum_{i \in N} (Pr^{n,g,1} p_i^{n,g} + Pr^{n,g,2} (p_i^{n,g})^2) \end{aligned} \quad (4-37a)$$

$$\text{s. t. } N_{ij}^l \in \mathbb{N}_+, \forall (i, j) \in E \quad (4-37b)$$

$$p_j^n = p_j^{n,g} - p_j^{n,d}, \forall j \in N \quad (4-37c)$$

$$q_j^n = q_j^{n,g} - q_j^{n,d}, \forall j \in N \quad (4-37d)$$

$$\underline{p}_j^{n,g} + \underline{dp}_j^{n,g} n_j^g \leq \overline{p}_j^{n,g} \leq \overline{p}_j^{n,g} + \overline{dp}_j^{n,g} n_j^g, \forall j \in N \quad (4-37e)$$

$$\underline{q}_j^{n,g} + \underline{dq}_j^{n,g} n_j^g \leq \overline{q}_j^{n,g} \leq \overline{q}_j^{n,g} + \overline{dq}_j^{n,g} n_j^g, \forall j \in N \quad (4-37f)$$

$$0 \leq n_j^g \leq \overline{n}_i^g, \forall j \in N \quad (4-37g)$$

$$p_j^n = \sum_{k:j \rightarrow k} N_{jk}^l \overline{P}_{jk}^l - \sum_{i:i \rightarrow j} (N_{ij}^l \overline{P}_{ij}^l - N_{ij}^l \overline{r}_{ij}^l \overline{l}_{ij}^l), \forall j \in N \quad (4-37h)$$

$$q_j^n = \sum_{k:j \rightarrow k} N_{jk}^l \overline{Q}_{jk}^l - \sum_{i:i \rightarrow j} (N_{ij}^l \overline{Q}_{ij}^l - N_{ij}^l \overline{x}_{ij}^l \overline{l}_{ij}^l), \forall j \in N \quad (4-37i)$$

$$v_j^n = v_i^n - 2(\overline{r}_{ij}^l \overline{P}_{ij}^l + \overline{x}_{ij}^l \overline{Q}_{ij}^l) + \left((\overline{r}_{ij}^l)^2 + (\overline{x}_{ij}^l)^2 \right) \overline{l}_{ij}^l, \forall (i, j) \in E \quad (4-37j)$$

$$\overline{l}_{ij}^l \leq \frac{(\overline{P}_{ij}^l)^2 + (\overline{Q}_{ij}^l)^2}{v_i^n}, \forall (i, j) \in E \quad (4-37k)$$

$$\underline{v}_i^n \leq v_i^n \leq \overline{v}_i^n, \forall i \in N \quad (4-37l)$$

$$\overline{l}_{ij}^l \leq \overline{l}_{ij}^l, \forall (i, j) \in E \quad (4-37m)$$

4.3.4 等价模型与求解方法

基本模型 (4-37) 非线性，含有整数变量与连续变量的乘积。为此，本小节运用一种技巧，将其转化为等价的线性约束，并最终将需求解的问题变成混合整数二阶锥问题，使其可以用商业求解器求出最优解。

因为 $N_{ij}^l - 1$ 是非负整数，所以存在 0-1 变量 $z_{ij,n}^l$ 使 $N_{ij}^l - 1 = \sum_{n=0}^{+\infty} 2^n z_{ij,n}^l$ 。事先设置一个足够大的 N_L ，则 $N_{ij}^l - 1 = \sum_{n=0}^{N_L} 2^n z_{ij,n}^l, \forall (i, j) \in E$ 。

令 $l_{ij,n}^l = \overline{l}_{ij}^l z_{ij,n}^l$ ，注意到 $l_{ij,n}^l \geq 0$ 。设 M_l 是 \overline{l}_{ij}^l 的一个上界，考虑下面的不等式组

$$\begin{cases} 0 \leq l_{ij,n}^l \leq M_l z_{ij,n}^l \\ 0 \leq \overline{l}_{ij}^l - l_{ij,n}^l \leq M_l (1 - z_{ij,n}^l) \end{cases} \quad (4-38)$$

当 $z_{ij,n}^l = 1$ 时，第二个不等式使 $l_{ij,n}^l = \overline{l}_{ij}^l$ ，且第一个不等式成立；当 $z_{ij,n}^l = 0$ 时，第一个不等式使 $l_{ij,n}^l = 0$ ，且第二个不等式成立。因此不等式组 (4-38) 与 $l_{ij,n}^l = \overline{l}_{ij}^l z_{ij,n}^l$ 等价。

类似地，令 $P_{ij,n}^l = \overline{P}_{ij}^l z_{ij,n}^l$ ， $Q_{ij,n}^l = \overline{Q}_{ij}^l z_{ij,n}^l$ ， M_P 和 M_Q 分别为 $|\overline{P}_{ij}^l|$ 和 $|\overline{Q}_{ij}^l|$

的上界, 则 $P_{ij,n}^l = \tilde{P}_{ij}^l z_{ij,n}^l$ 等价于 (注意不要求 $\tilde{P}_{ij}^l \geq 0$)

$$\begin{cases} -M_P z_{ij,n}^l \leq P_{ij,n}^l \leq M_P z_{ij,n}^l \\ -M_P(1 - z_{ij,n}^l) \leq \tilde{P}_{ij}^l - P_{ij,n}^l \leq M_P(1 - z_{ij,n}^l) \end{cases} \quad (4-39)$$

$Q_{ij,n}^l = \tilde{Q}_{ij}^l z_{ij,n}^l$ 等价于

$$\begin{cases} -M_Q z_{ij,n}^l \leq Q_{ij,n}^l \leq M_Q z_{ij,n}^l \\ -M_Q(1 - z_{ij,n}^l) \leq \tilde{Q}_{ij}^l - Q_{ij,n}^l \leq M_Q(1 - z_{ij,n}^l) \end{cases} \quad (4-40)$$

因此, 问题 (4-37) 的等价问题是

$$\begin{aligned} \min F^{dn} = & \frac{1}{k} (\sum_{i \in N} Pr_i^{n,g} n_i^g + \sum_{(i,j) \in E} Pr_{ij}^l \sum_{n=0}^{N_L} 2^n z_{ij,n}^l) \\ & + Pr_p \sum_{j:(0,j) \in E} (\sum_{m=0}^{N_L} 2^m P_{0j,m}^l + \tilde{P}_{0j}^l) + \sum_{i \in N} (Pr^{n,g,1} p_i^{n,g} + Pr^{n,g,2} (p_i^{n,g})^2) \end{aligned} \quad (4-41a)$$

$$\text{s. t. } z_{ij,m}^l \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in E, m \in \{0, 1, \dots, N_L\} \quad (4-41b)$$

$$p_j^n = p_j^{n,g} - p_j^{n,d}, \forall j \in N \quad (4-41c)$$

$$q_j^n = q_j^{n,g} - q_j^{n,d}, \forall j \in N \quad (4-41d)$$

$$\underline{p}_j^{n,g} + \underline{dp}_j^{n,g} n_j^g \leq p_j^{n,g} \leq \bar{p}_j^{n,g} + \bar{dp}_j^{n,g} n_j^g, \forall j \in N \quad (4-41e)$$

$$\underline{q}_j^{n,g} + \underline{dq}_j^{n,g} n_j^g \leq q_j^{n,g} \leq \bar{q}_j^{n,g} + \bar{dq}_j^{n,g} n_j^g, \forall j \in N \quad (4-41f)$$

$$0 \leq n_j^g \leq \bar{n}_j^g, \forall j \in N \quad (4-41g)$$

$$p_j^n = \sum_{k:j \rightarrow k} \left(\sum_{m=0}^{N_L} 2^m P_{jk,m}^l + \tilde{P}_{jk}^l \right) - \sum_{i:i \rightarrow j} \left(\sum_{m=0}^{N_L} 2^m (P_{ij,m}^l - \tilde{r}_{ij}^l l_{ij,m}^l) + \tilde{P}_{ij}^l - \tilde{r}_{ij}^l \tilde{l}_{ij}^l \right), \forall j \in N \quad (4-41h)$$

$$q_j^n = \sum_{k:j \rightarrow k} \left(\sum_{m=0}^{N_L} 2^m Q_{jk,m}^l + \tilde{Q}_{jk}^l \right) - \sum_{i:i \rightarrow j} \left(\sum_{m=0}^{N_L} 2^m (Q_{ij,m}^l - \tilde{x}_{ij}^l l_{ij,m}^l) + \tilde{Q}_{ij}^l - \tilde{x}_{ij}^l \tilde{l}_{ij}^l \right), \forall j \in N \quad (4-41i)$$

$$v_j^n = v_i^n - 2(\tilde{r}_{ij}^l \tilde{P}_{ij}^l + \tilde{x}_{ij}^l \tilde{Q}_{ij}^l) + \left((\tilde{r}_{ij}^l)^2 + (\tilde{x}_{ij}^l)^2 \right) \tilde{l}_{ij}^l, \forall (i, j) \in E \quad (4-41j)$$

$$\tilde{l}_{ij}^l \leq \frac{(\tilde{P}_{ij}^l)^2 + (\tilde{Q}_{ij}^l)^2}{v_i^n}, \forall (i, j) \in E \quad (4-41k)$$

$$v_i^n \leq v_i^n \leq \bar{v}_i^n, \forall i \in N \quad (4-41l)$$

$$\bar{l}_{ij}^l \leq \bar{l}_{ij}^l, \forall (i, j) \in E \quad (4-41m)$$

$$0 \leq l_{ij,m}^l \leq M_l z_{ij,m}^l, \forall (i, j) \in E, m \in \{0, 1, \dots, N_L\} \quad (4-41n)$$

$$0 \leq \bar{l}_{ij}^l - l_{ij,m}^l \leq M_l (1 - z_{ij,m}^l), \forall (i, j) \in E, m \in \{0, 1, \dots, N_L\} \quad (4-41o)$$

$$-M_P z_{ij,m}^l \leq P_{ij,m}^l \leq M_P z_{ij,m}^l, \forall (i, j) \in E, m \in \{0, 1, \dots, N_L\} \quad (4-41p)$$

$$-M_P (1 - z_{ij,m}^l) \leq \bar{P}_{ij}^l - P_{ij,m}^l \leq M_P (1 - z_{ij,m}^l), \forall (i, j) \in E, m \in \{0, 1, \dots, N_L\} \quad (4-41q)$$

$$-M_Q z_{ij,m}^l \leq Q_{ij,m}^l \leq M_Q z_{ij,m}^l, \forall (i, j) \in E, m \in \{0, 1, \dots, N_L\} \quad (4-41r)$$

$$-M_Q (1 - z_{ij,m}^l) \leq \bar{Q}_{ij}^l - Q_{ij,m}^l \leq M_Q (1 - z_{ij,m}^l), \forall (i, j) \in E, m \in \{0, 1, \dots, N_L\} \quad (4-41s)$$

问题 (4-41) 是一个混合整数二阶锥规划问题 (Mixed Integer Second-Order Cone Programming, MISOCP), 可以用商业求解器求出最优解。

4.3.5 说明

(1) 支路潮流模型松弛化的合理性

为了保证支路潮流模型的松弛化是合理的, 希望松弛后规划问题的最优解可以复原为原问题的最优解, 本文将这种情况称为松弛化是精确的。本节规划模型用到的松弛化共有 2 步, 已经说明与相角有关的松弛化在放射状电网中是精确的^[33], 仍然需要检查的是将公式 (4-13) 替换为公式 (4-14) 的松弛化 (称为锥松弛) 步骤。在没有附加条件的情况下, 无法保证该松弛化是精确的。已有许多文献提出了充分条件^[33-35], 它们的基本假设是电网呈放射状, 线路电阻与电抗是正数。本文以其中的两个为例子, 说明如何使得问题 (4-41) 的最优解是最优潮流。

首先, 直接求解问题 (4-41), 检查公式 (4-13) (即约束 (4-41k)) 是否在允许的误差下成立。如果成立, 说明此时锥松弛是精确的, 不需要进一步处理。如果公式 (4-13) 出现不能容忍的误差, 则需要修改问题 (4-41), 重新求解。

所采用的充分条件决定修改方式。文献 [33] 提出的充分条件 (Theorem 1) 要求, 节点负荷没有上界, 目标函数是关于线路电流、节点电压、节点负荷与节点发电的凸函数, 并且关于线路电流的模严格单调递增, 关于节点负荷不

增。

在本节规划问题的目标函数中，与潮流有关的部分是分布式电源发电成本和从大电网购买电能的成本。大电网可以看作平衡节点上的电源，因此本节规划问题的目标函数是关于节点发电的函数，与线路电流的模以及节点负荷无关（指在目标函数表达式中不直接出现线路电流的模和节点负荷）。根据文献 [33] Theorem 1 的证明过程，在本节规划问题中去掉节点负荷上界后，仍然不能肯定锥松弛是精确的，但是可以保证松弛后的规划问题存在一个最优解是原问题的最优解。这种情况下，可以采用文献 [36] 的方法调整松弛后的规划问题求出的最优解而得出最优潮流。

本节规划问题去除节点负荷的方式如下：设配电网中节点 i 的负荷需求参数是 $p_i^{n,d0}$ 和 $q_i^{n,d0}$ 。现在用 $p_i^{n,d}$ 和 $q_i^{n,d}$ 表示节点 i 的负荷变量，则应该有

$$\begin{cases} p_j^n = p_j^{n,g} - p_j^{n,d}, \forall j \in N \\ q_j^n = q_j^{n,g} - q_j^{n,d}, \forall j \in N \\ p_j^{n,d} \geq p_j^{n,d0}, \forall j \in N \\ q_j^{n,d} \geq q_j^{n,d0}, \forall j \in N \end{cases} \quad (4-42)$$

替换问题 (4-41) 中的相应部分即可。

虽然节点负荷无上限的要求似乎不合乎常理，但是发电与购电都需要成本，而且规划问题的目标是最小化成本，因此实际上求出的节点负荷与实际需求不会相差很大。换言之，这种方式求出的解是合理的。

文献 [35] 证明，如果线性潮流不反向，目标函数关于节点注入功率单调增，则松弛后的规划问题存在一个最优解是原问题的最优解。因此，可以在问题 (4-41) 中增加线性潮流不反向的条件，得到新的规划问题，求解后检查公式 (4-14) 是否成立，不成立则同样可以用文献 [36] 的方法调整结果。

需要增加的线性潮流不反向约束是

$$\begin{cases} \widehat{P}_{ij}^l = -p_j^n + \sum_{k:j \rightarrow k} \widehat{P}_{jk}^l, \forall (i, j) \in E \\ \widehat{Q}_{ij}^l = -q_j^n + \sum_{k:j \rightarrow k} \widehat{Q}_{jk}^l, \forall (i, j) \in E \\ \widehat{P}_{ij}^l \geq 0, \forall (i, j) \in E \\ \widehat{Q}_{ij}^l \geq 0, \forall (i, j) \in E \end{cases} \quad (4-43)$$

本节模型对于典型的最优潮流问题有一些扩展，加入了新增电源、新增线路数量等变量。将变量分为两部分， y_1 表示潮流有关的变量， y_2 表示其他变量。设本节规划问题的最优解是 (y_1^0, y_2^0) ，则固定 y_2 为 y_2^0 后，该规划问题转化为典型的最优潮流问题，而且 y_1^0 是新问题的最优解。因此，以上关于锥松弛的充分条件都可用于本节模型。

(2) 节点对地并联导纳

上文为了简化叙述，假设节点对地并联导纳可忽略。这个假设是不必要的，因为本节建模方法和求解方法都可以处理节点对地并联导纳。

设 $g_i^{n,0} - \mathbf{i}b_i^{n,0}$ 是节点 i 处与新增线路无关的对地并联导纳， $g_{ij}^{n,l,1} - \mathbf{i}b_{ij}^{n,l,1}$ 是在 $(i, j) \in E$ 增加一条线路造成节点 i 对地并联导纳的改变量， $g_{ij}^{n,l,2} - \mathbf{i}b_{ij}^{n,l,2}$ 是在 $(i, j) \in E$ 增加一条线路造成节点 j 对地并联导纳的改变量。则新增线路后，节点 i 的对地并联导纳为 $(g_i^{n,0} + \sum_{j:(i,j) \in E} (N_{ij}^l - 1)g_{ij}^{n,l,1} + \sum_{j:(j,i) \in E} (N_{ji}^l - 1)g_{ji}^{n,l,2}) - \mathbf{i}(b_i^{n,0} + \sum_{j:(i,j) \in E} (N_{ij}^l - 1)b_{ij}^{n,l,1} + \sum_{j:(j,i) \in E} (N_{ji}^l - 1)b_{ji}^{n,l,2})$ 。

潮流方程 (4-10) - (4-12) 和 (4-14) 中与对地并联导纳有关的部分只有 $g_i^n v_i^n$ 和 $b_i^n v_i^n$ 。因此，用小节 4.3.4 的办法处理 $N_{ij}^l v_i^n$ 和 $N_{ij}^l v_j^n$ 后，同样得到混合整数二阶锥规划问题，所以本节模型可以处理节点对地并联导纳。

(3) 规划问题求解规模

需求解的规划问题 (4-41) 是一个混合整数二阶锥问题。设配电网共有 N_{GN} 个节点， N_{GL} 条线路（实际上，根据配电网拓扑结构是连通的树的假定，有 $N_{GL} = N_{GN} - 1$ ），则问题 (4-41) 包含 $N_{GL}(N_L + 1)$ 个 0-1 变量， $6N_{GN} + 3N_{GL}(N_L + 2)$ 个连续变量， $12N_{GN} + 2N_{GL} + 12N_{GL}(N_L + 1)$ 个线性约束和 N_{GL} 个二阶锥约束。

(4) 参数的获取

配电网节点的负荷由充电负荷与原有负荷两部分组成。充电负荷可以根据充电站连接配电网节点的关系得到。

由于 0-1 变量的数量与 $N_L + 1$ 成正比，因此应该根据实际情况，使用尽量小的 N_L 。

M_l 、 M_P 和 M_Q 的选取可能影响收敛速度。可以选 $M_l = \bar{l}^l$ ，其中 $\bar{l}^l = \max\{\bar{l}_{ij}^l | (i, j) \in E\}$ 。可由节点电压上界 \bar{v}_i^n 和 \bar{l}_{ij}^l 估计出 \bar{P}_{ij}^l 和 \bar{Q}_{ij}^l 的一个上界，例如将 M_P 和 M_Q 设成 $\sqrt{\bar{l}^l \bar{v}^n}$ ，其中 $\bar{v}^n = \max\{\bar{v}_i^n | i \in N\}$ 。

4.4 联合规划

本节针对并网型电动汽车充电站，将充电站选址与容量分配模型和配电网规划模型合并，提出联合规划方法。以上两个模型通过充电站承担的充电负荷连接起来。

在问题 (4-6) 中，约束 (4-6d) 表示每个充电站承担的充电负荷不超过上界。把这个约束替换成 $\sum_{j=1}^{N_{CI}} e_{ij} = p_i^{CS}, i = 1, \dots, N_{CS}$ ，其中 $p_i^{CS}, i = 1, \dots, N_{CS}$ 表示每个候选站点承担的充电负荷。

用矩阵 $R_{N_{CS} \times N_{GN}}^G$ 表示候选站点接入配电网节点的情况，其中 $R_{ij}^G = 1$ 表示候选站点 i 在节点 j 上， $R_{ij}^G = 0$ 表示候选站点 i 不在节点 j 上。那么，配电网节点 j 的充电负荷为 $p_j^{d,c} = \sum_{i=1}^{N_{CS}} R_{ij}^G p_i^{CS}$ 。

设节点 j 的原有负荷为 $p_j^{d,0}$ ，则总负荷为

$$p_j^{n,d} = p_j^{d,0} + p_j^{d,c} = p_j^{d,0} + \sum_{i=1}^{N_{CS}} R_{ij}^G p_i^{CS} \quad (4-44)$$

将以上 $p_j^{n,d}$ 代入配电网规划问题 (4-41)，同时加入问题 (4-6) 中的其他约束，以及充电需求覆盖率约束

$$\sum_{i=1}^{N_{CS}} \sum_{j=1}^{N_{CI}} e_{ij} \geq \eta_C \sum_{j=1}^{N_{CI}} P_j^{CI} \quad (4-45)$$

其中 η_C 表示充电需求覆盖率下限。

从而得出充电站选址与配电网升级改造的联合规划模型

$$\begin{aligned} \min F^{dn} = & \frac{1}{k} (\sum_{i \in N} Pr_i^{n,g} n_i^g + \sum_{(i,j) \in E} Pr_{ij}^l \sum_{n=0}^{N_L} 2^n z_{ij,n}^l) \\ & + Pr_p \sum_{j:(0,j) \in E} (\sum_{m=0}^{N_L} 2^m P_{0j,m}^l + \tilde{P}_{0j}^l) + \sum_{i \in N} (Pr^{n,g,1} p_i^{n,g} + Pr^{n,g,2} (p_i^{n,g})^2) \end{aligned} \quad (4-46a)$$

$$\text{s. t. } z_{ij,m}^l, z_k \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in E, m \in \{0, 1, \dots, N_L\}, k = 1, \dots, N_{CS} \quad (4-46b)$$

$$e_{ij} \geq 0, i = 1, \dots, N_{CS}, j = 1, \dots, N_{CI} \quad (4-46c)$$

$$e_{ij} \leq R_{ij}^l f_i^{CI} z_i, i = 1, \dots, N_{CS}, j = 1, \dots, N_{CI} \quad (4-46d)$$

$$\sum_{j=1}^{N_{CI}} e_{ij} = p_i^{CS}, i = 1, \dots, N_{CS} \quad (4-46e)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{CS}} e_{ij} \leq P_j^{CI}, j = 1, \dots, N_{CI} \quad (4-46f)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{CS}} c_i z_i \leq c_0 \quad (4-46g)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{CS}} \sum_{j=1}^{N_{CI}} e_{ij} \geq \eta_C \sum_{j=1}^{N_{CI}} P_j^{CI} \quad (4-46h)$$

$$p_j^{n,d} = p_j^{d,0} + p_j^{d,c} = p_j^{d,0} + \sum_{i=1}^{N_{CS}} R_{ij}^G p_i^{CS}, \forall j \in N \quad (4-46i)$$

$$p_j^n = p_j^{n,g} - p_j^{n,d}, \forall j \in N \quad (4-46j)$$

$$q_j^n = q_j^{n,g} - q_j^{n,d}, \forall j \in N \quad (4-46k)$$

$$\underline{p}_j^{n,g} + \underline{dp}_j^{n,g} n_j^g \leq p_j^{n,g} \leq \bar{p}_j^{n,g} + \bar{dp}_j^{n,g} n_j^g, \forall j \in N \quad (4-46l)$$

$$\underline{q}_j^{n,g} + \underline{dq}_j^{n,g} n_j^g \leq q_j^{n,g} \leq \bar{q}_j^{n,g} + \bar{dq}_j^{n,g} n_j^g, \forall j \in N \quad (4-46m)$$

$$0 \leq n_j^g \leq \bar{n}_i^g, \forall j \in N \quad (4-46n)$$

$$p_j^n = \sum_{k:j \rightarrow k} \left(\sum_{m=0}^{N_L} 2^n P_{jk,m}^l + \tilde{P}_{jk}^l \right) - \sum_{i:i \rightarrow j} \left(\sum_{m=0}^{N_L} 2^n (P_{ij,m}^l - \tilde{r}_{ij}^l l_{ij,m}^l) + \tilde{P}_{ij}^l - \tilde{r}_{ij}^l \tilde{l}_{ij}^l \right), \forall j \in N \quad (4-46o)$$

$$q_j^n = \sum_{k:j \rightarrow k} \left(\sum_{m=0}^{N_L} 2^n Q_{jk,m}^l + \tilde{Q}_{jk}^l \right) - \sum_{i:i \rightarrow j} \left(\sum_{m=0}^{N_L} 2^n (Q_{ij,m}^l - \tilde{x}_{ij}^l l_{ij,m}^l) + \tilde{Q}_{ij}^l - \tilde{x}_{ij}^l \tilde{l}_{ij}^l \right), \forall j \in N \quad (4-46p)$$

$$v_j^n = v_i^n - 2(\tilde{r}_{ij}^l \tilde{P}_{ij}^l + \tilde{x}_{ij}^l \tilde{Q}_{ij}^l) + \left((\tilde{r}_{ij}^l)^2 + (\tilde{x}_{ij}^l)^2 \right) \tilde{l}_{ij}^l, \forall (i, j) \in E \quad (4-46q)$$

$$\tilde{l}_{ij}^l \leq \frac{(\tilde{P}_{ij}^l)^2 + (\tilde{Q}_{ij}^l)^2}{v_i^n}, \forall (i, j) \in E \quad (4-46r)$$

$$\underline{v}_i^n \leq v_i^n \leq \bar{v}_i^n, \forall i \in N \quad (4-46s)$$

$$\tilde{l}_{ij}^l \leq \bar{l}_{ij}^l, \forall (i, j) \in E \quad (4-46t)$$

$$0 \leq l_{ij,m}^l \leq M_l z_{ij,m}^l, \forall (i, j) \in E, m \in \{0, 1, \dots, N_L\} \quad (4-46u)$$

$$0 \leq \tilde{l}_{ij}^l - l_{ij,m}^l \leq M_l (1 - z_{ij,m}^l), \forall (i, j) \in E, m \in \{0, 1, \dots, N_L\} \quad (4-46v)$$

$$-M_P z_{ij,m}^l \leq P_{ij,m}^l \leq M_P z_{ij,m}^l, \forall (i, j) \in E, m \in \{0, 1, \dots, N_L\} \quad (4-46w)$$

$$-M_P(1 - z_{ij,m}^l) \leq \tilde{P}_{ij}^l - P_{ij,m}^l \leq M_P(1 - z_{ij,m}^l), \forall (i, j) \in E, m \in \{0, 1, \dots, N_L\} \quad (4-46x)$$

$$-M_Q z_{ij,m}^l \leq Q_{ij,m}^l \leq M_Q z_{ij,m}^l, \forall (i, j) \in E, m \in \{0, 1, \dots, N_L\} \quad (4-46y)$$

$$-M_Q(1 - z_{ij,m}^l) \leq \tilde{Q}_{ij}^l - Q_{ij,m}^l \leq M_Q(1 - z_{ij,m}^l), \forall (i, j) \in E, m \in \{0, 1, \dots, N_L\} \quad (4-46z)$$

问题 (4-46) 仍然是混合整数二阶锥规划，因此可以用商业求解器求出最优解。问题 (4-46) 含有 $N_{CS} + N_{GL}(N_L + 1)$ 个整数变量，因此求解时间应该比问题 (4-6) 和问题 (4-41) 更长。但是，问题 (4-46) 同时考虑了选址与配电网规划，求出的最优解是全过程最优的，通常效果比选址规划与配电网规划分开更好。

小节 4.3.5 中关于松弛步骤精确性的讨论对本节联合规划完全适用，同时也可以类似地考虑节点对地并联导纳。

需要注意的是，充电需求与配电网节点的原有负荷应该在时间上相互对应。实际上，本节规划模型是针对某一时段的。为了保证最优解在其他时段也能维持电网安全运行，应该选取负荷峰值时段进行规划。另外一个直接的想法是，将问题 (4-46) 扩展为多时段的规划问题，对每一时段，要满足相应的负荷分配约束、潮流约束和电网运行约束。此时 0-1 变量的数量并没有增长，但线性约束和二阶锥约束数量成倍增长。如何考虑负荷的随机性，同时如何控制求解时间，是进一步需要研究的问题。

4.5 充电设施数量规划

使用与小节 3.4 类似的方法，可以在充电站选址和配电网规划后进行充电设施数量规划。需要修改的部分是，在模拟充电站中电动汽车的充电过程时，不仅要考虑电动汽车占用充电设施的情况，还要满足充电站内总充电负荷不超过上限（配电网规划中该充电站的峰值负荷），才能保证配电网的安全运行。当充电设施不够或者充电负荷过大时，用户只能进入队列中等待。

4.6 小结

本章提出并网型充电站的一整套规划方法，详细介绍了建模思路和推导过

程，并作出分析与评价。已有文献中较少出现同时涉及交通状况和精确电网潮流的联合规划模型^[27]，本章内容是一个有益的尝试。

第5章 测试案例

5.1 概述

本章利用实际交通数据和可再生能源发电数据设计测试案例，将第 2 章的充电需求建模方法、第 3 章的离网型充电站规划方法、第 4 章的并网型充电站规划方法应用于测试案例，以检验本文所提方法的可行性。同时，本章试验不同的参数，并分析结果。本章实验结果可以与前文分析相互照应。所有测试在一台配备 2.30 GHz Intel(R) Core(TM) i5-4200U CPU 和 4.00 GB 内存的笔记本电脑上进行。所有线性规划、混合整数线性规划、混合整数二阶锥规划均在 MATLAB 中使用 YALMIP 工具箱^[37]调用 GUROBI 求解器^[26]求解。

5.2 交通数据

5.2.1 电动汽车数据

根据对欧洲电动汽车市场的调查和预测，设电动汽车分为 L7e、M1、N1、N2 四个种类，在行程中的占比分别是 10%、84%、3%、3%。表 5.1 展示了各种类型电动汽车电池容量 Cap 的概率分布类型和参数^[38]。

表 5.1 各种类型电动汽车电池容量 Cap 的概率分布信息

电动汽车类型	L7e	M1	N1	N2
分布类型	伽马分布	伽马分布	正态分布	正态分布
分布参数 ^①	$\alpha = 10.8$ $\beta = 0.8$	$\alpha = 4.5$ $\beta = 6.3$	$\mu = 23.0$ $\sigma = 9.5$	$\mu = 85.3$ $\sigma = 28.1$
上界 (kWh)	15.0	72.0	40.0	120.0
下界 (kWh)	5.0	10.0	9.6	51.2

① 分布参数意义见概率密度函数 (2-1) 和 (2-2)

设 SOC_c 服从 15% - 30% 的均匀分布， SOC_i 服从 80% - 90% 的均匀分布。根据文献 [38]，使用表 5.2 线性插值，从而由 Cap 计算 Ran_{mc} 。

表 5.2 Cap 和 Ran_{mc} 的插值数据

Cap (kWh)	Ran_{mc} (km)	Cap (kWh)	Ran_{mc} (km)
0	0	40	225
10	70	50	270
20	130	80	370
30	180	800	3000

令 η_d 服从 90% - 100% 的均匀分布。表 5.3 是各种类型电动汽车行驶平均速度 v_{EV} 服从的正态分布的参数，数据来自文献 [22]。

表 5.3 各种类型电动汽车行驶平均速度 v_{EV} (km/h) 的正态分布参数

电动汽车类型	L7e	M1	N1	N2
μ	70	86	70	70
σ	10	10	10	10
上界	100	120	100	100
下界	60	60	60	60

设电动汽车充电效率 $\eta_{EV} = 0.9$ ，每辆电动汽车使用某一种充电设施，由此决定平均充电功率 p_{EV} ，分布如表 5.4 所示。

表 5.4 电动汽车充电特性的分布

充电设施类型	A	B	C
p_{EV} (kW)	30	60	120
占比	30%	50%	20%

5.2.2 道路数据

设待规划高速公路是一条长为 300 km 的直线状高速公路。表 5.5 展示了该高速公路的出入口编号和位置。图 5.1 是道路结构的示意图。

5.2.3 交通行为数据

描述行程起点和终点分布的概率 OD 矩阵如图 5.2 所示。行程起始时间分

表 5.5 高速公路的出入口编号与位置

编号	位置 (km)	编号	位置 (km)
1	0	6	160
2	30	7	210
3	50	8	240
4	90	9	270
5	130	10	300

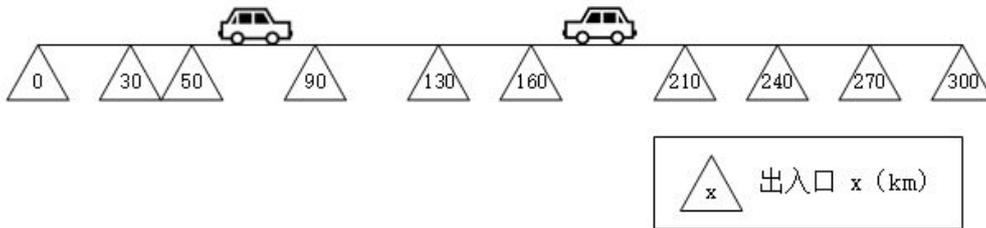


图 5.1 高速公路示意图

布如图 5.3 所示（数据来自文献 [39]）。

设初始荷电状态 SOC_b 和终点最低荷电状态 SOC_e 服从正态分布（以 SOC_i 为上界，以 SOC_c 为下界），分布参数如表 5.6 所示。

表 5.6 SOC_b 和 SOC_e 的分布参数

SOC 类型	SOC_b	SOC_e
μ	0.7	0.3
σ	0.1	0.1

设日典型电动汽车行程数量是 10000 次。

5.3 充电需求建模

使用第 2 章的方法，根据小节 5.2 的数据对充电需求建模。蒙特卡洛过程产生一组充电需求点，每个点包含空间坐标、充电开始时间、充电结束时间、充电功率（即充电设施类型）。为了可视化仿真结果，将高速公路等分为 30 个区域，一日等分为 24 个时间段，充电需求按区域和时间段合并，以此绘制一系列

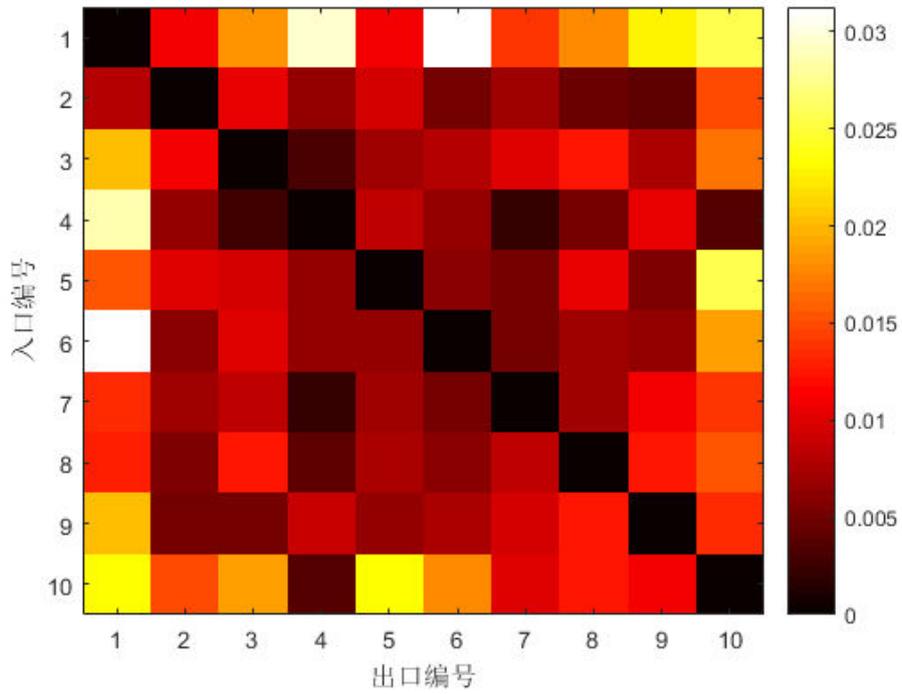


图 5.2 概率 OD 矩阵

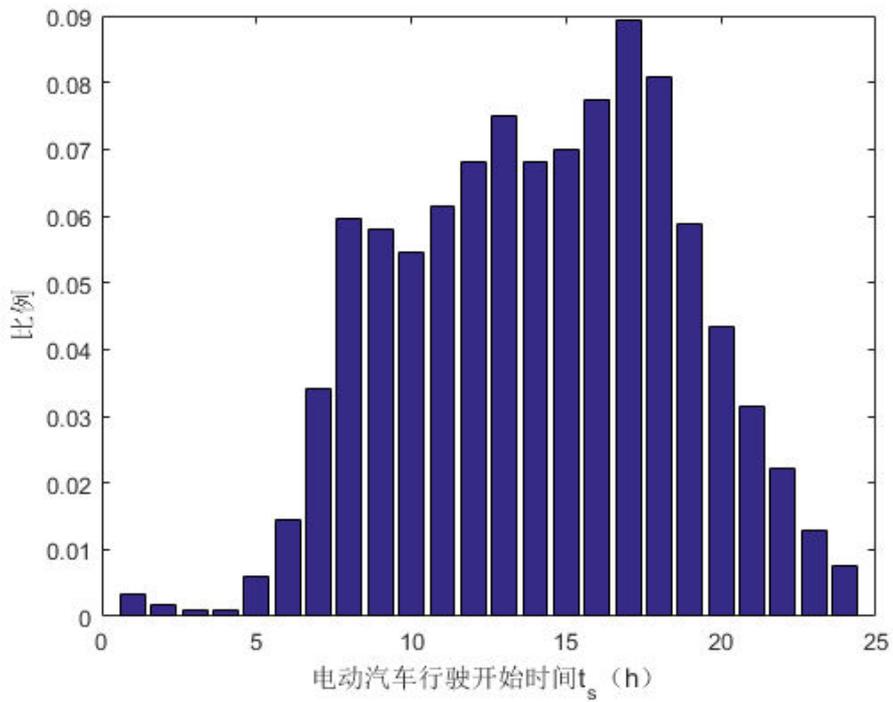


图 5.3 行程起始时间分布

图表：

图 5.4 和图 5.5 展示的是充电需求空间上和时间上的相对分布，数值是充电需求出现在某区域或某时间段中的频率。计算时循环 20 万次，产生约 30 万个充电需求点，用时约 60 s。计算空间分布时包含了所有时间段的充电需求，计算时间分布时包含了所有区域的充电需求。另外，图 5.4 还将充电需求在时间上的分布与行程开始时间曲线对比，可以看出，二者形状相似，但充电需求曲线滞后行程开始时间曲线约 1 h，这是由于充电需求总是发生在开始行程之后。

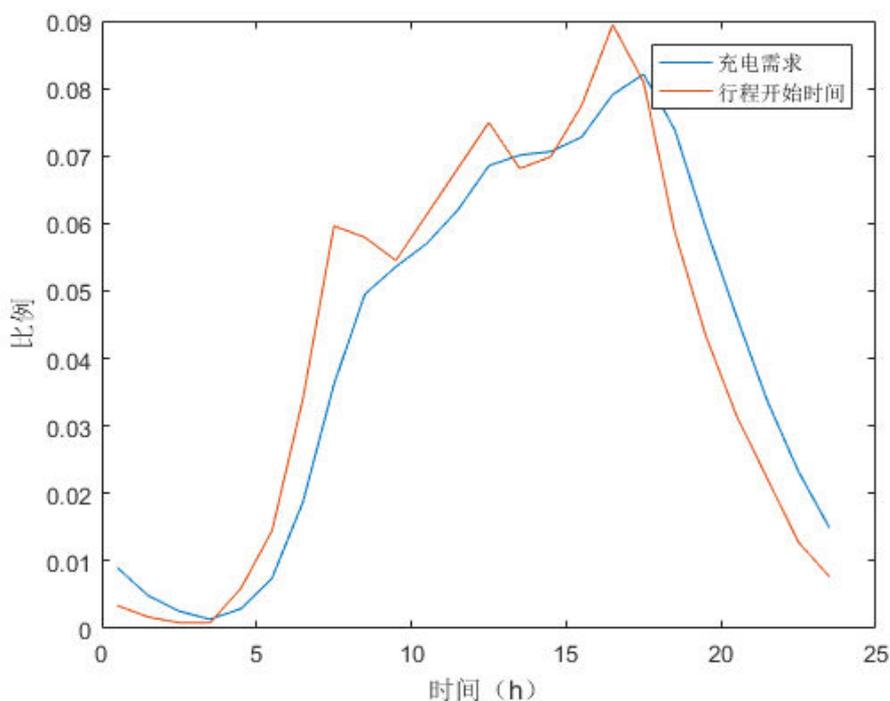


图 5.4 充电需求时间相对分布

图 5.6 表示各空间区域中充电需求的时间分布，图 5.7 表示各时间段中充电需求的分布。

图 5.8 和图 5.9 说明模拟过程的随机性。蒙特卡洛模拟 50 次，每次模拟循环 1 万次（即日典型电动汽车行程数量），得到 50 种充电需求结果，绘制箱线图以描述数据的分散程度。

日充电需求随电池容量的变化情况如图 5.10 所示。可以看出，日充电需求随电池容量变化不大。原因是，最大行驶里程与电池容量近似成正比，电池容

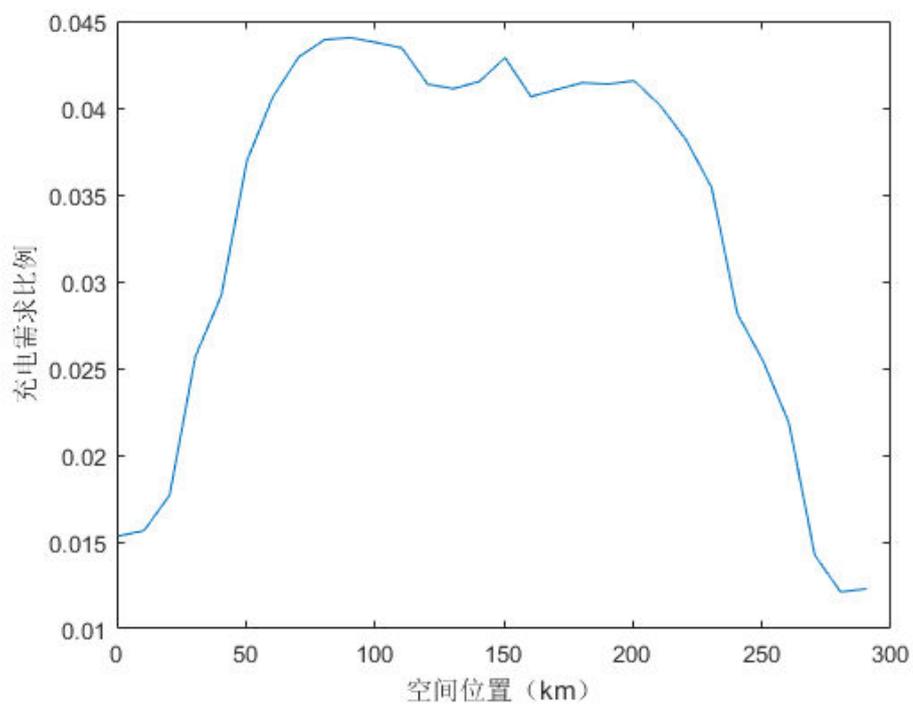


图 5.5 充电需求空间相对分布

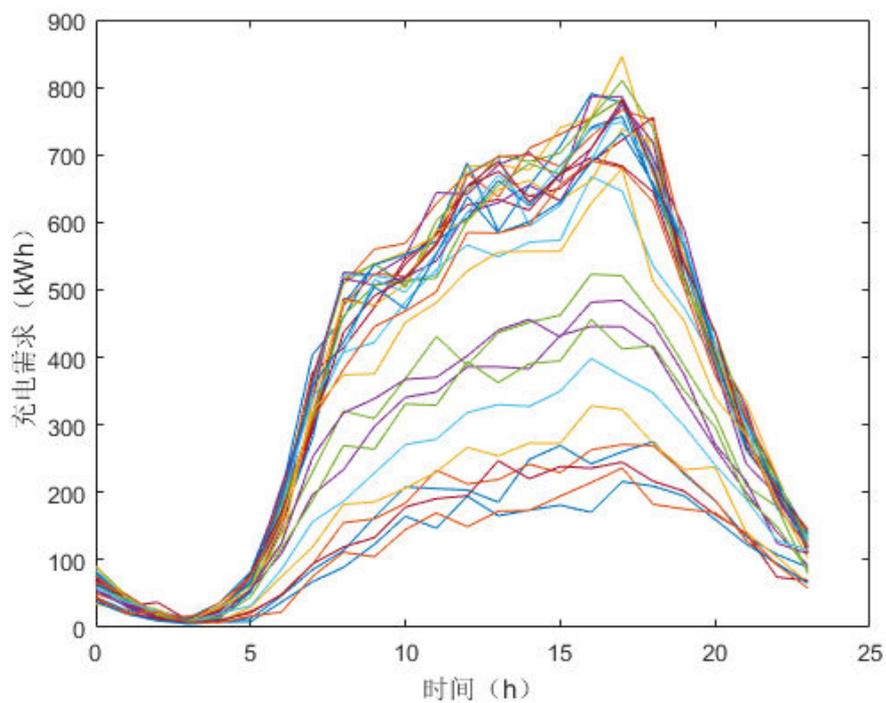


图 5.6 各区域中充电需求的时间分布

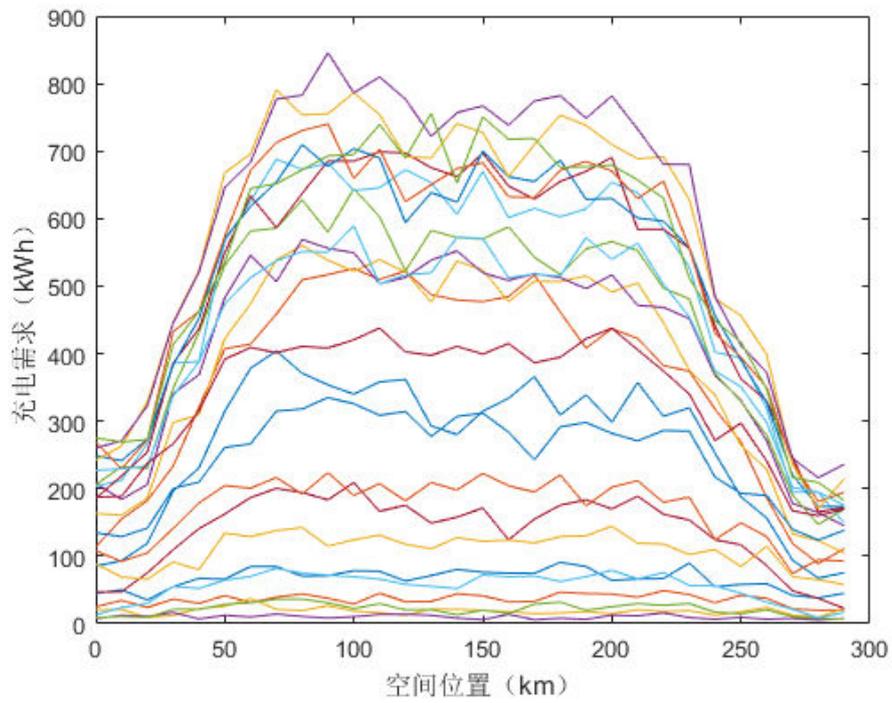


图 5.7 各时间段中充电需求的空分布

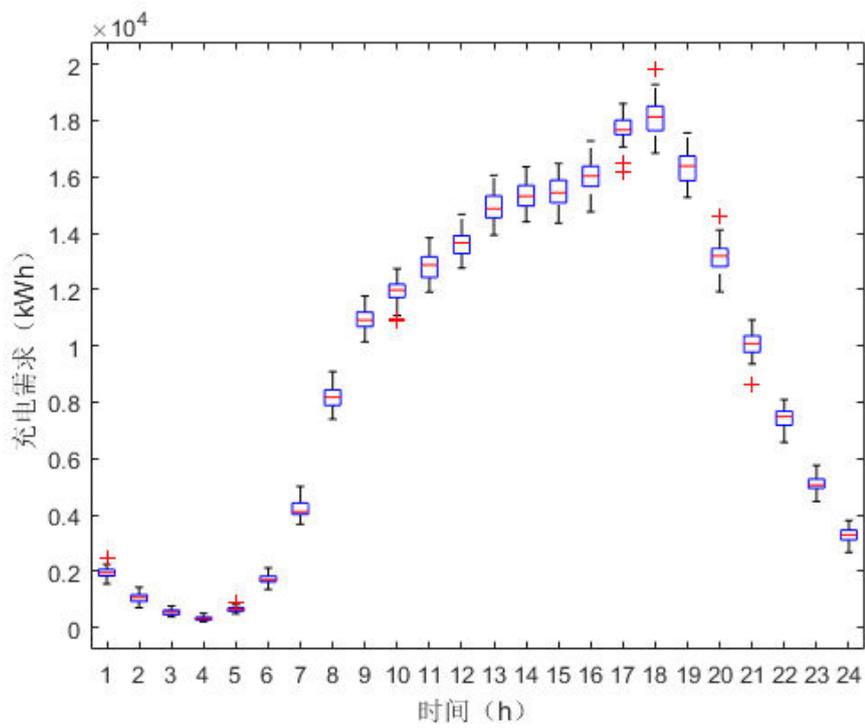


图 5.8 充电需求模拟分散程度 (时间)

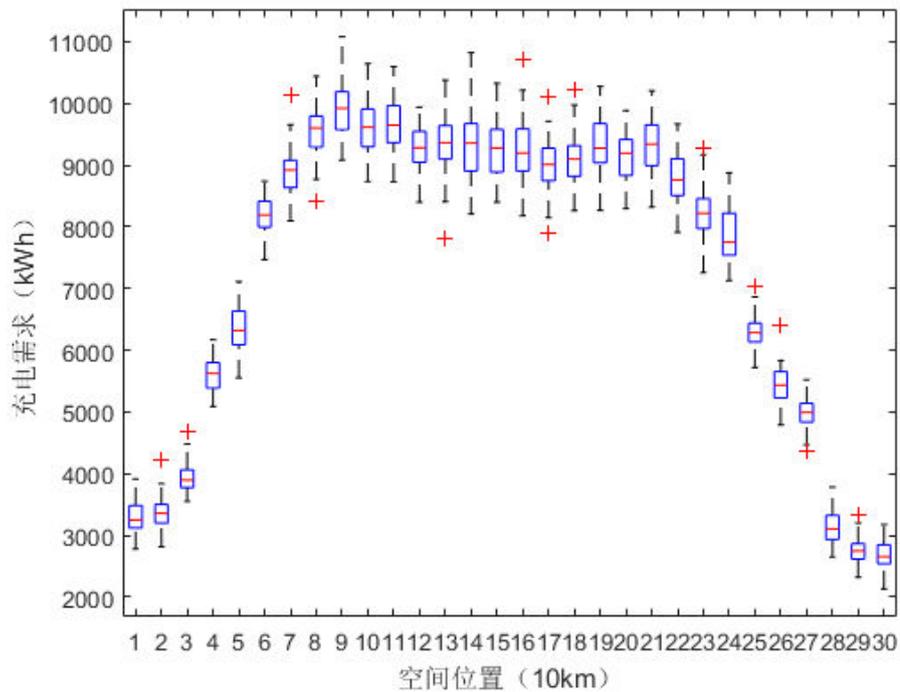


图 5.9 充电需求模拟分散程度（空间）

量增大后，长距离行程的耗电量基本不变，充电需求也变化不大。假设电池容量不变，日充电需求随最大行驶里程的变化情况如图 5.11 所示。此时，日充电需求随最大行驶里程增大而减小，因为充相同电量后可行驶的里程增大了。

5.4 可再生能源数据

假设离网型充电站配备光伏发电设备。从 National Solar Radiation Data Base^[40] 获得美国亚拉巴马州某地一年中每小时的光伏发电数据，作为 ξ_{RG} 的样本。该数据集的分散程度如图 5.12 所示。

5.5 离网型充电站规划

5.5.1 选址规划

类似小节 5.3 中模拟过程，模拟 1 万次行程得到约 1.5 万个充电需求点。候选站点的选取方法是，在高速公路沿线每隔 200 m 设一个候选站点，共计 1501

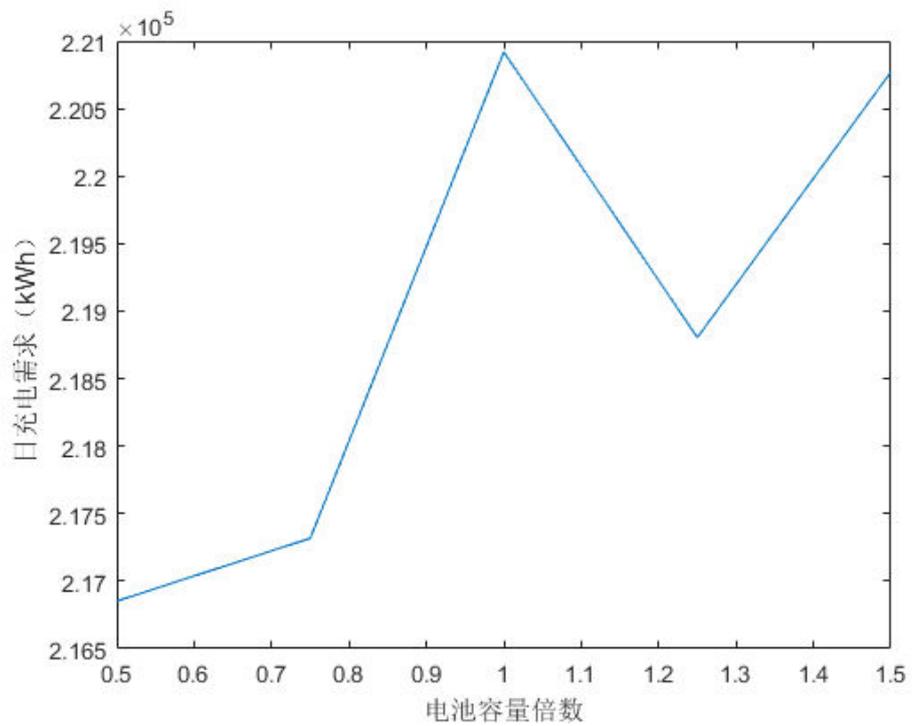


图 5.10 日充电需求与电池容量

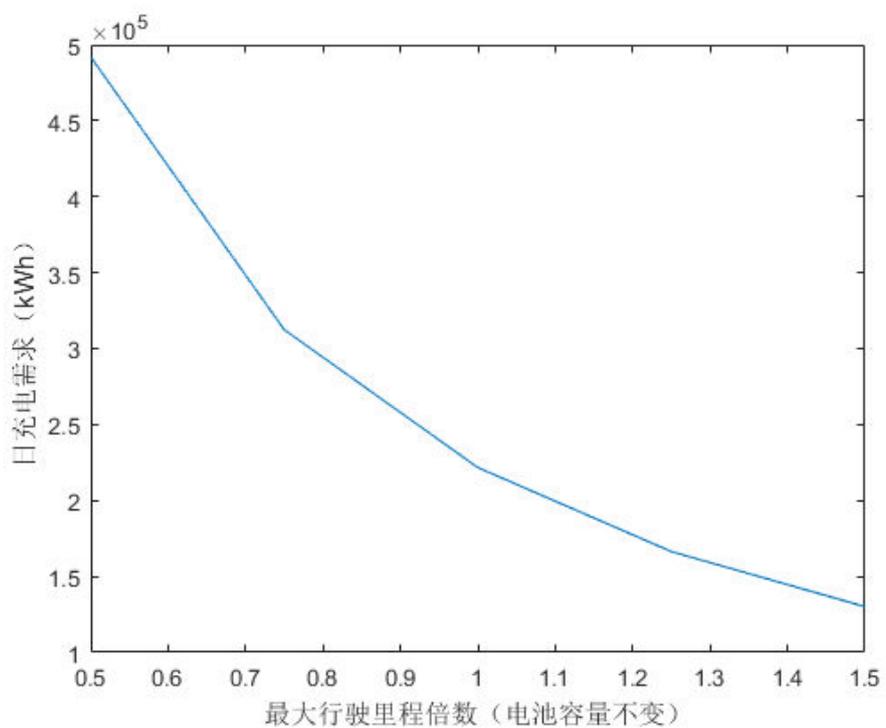


图 5.11 日充电需求与最大行驶里程

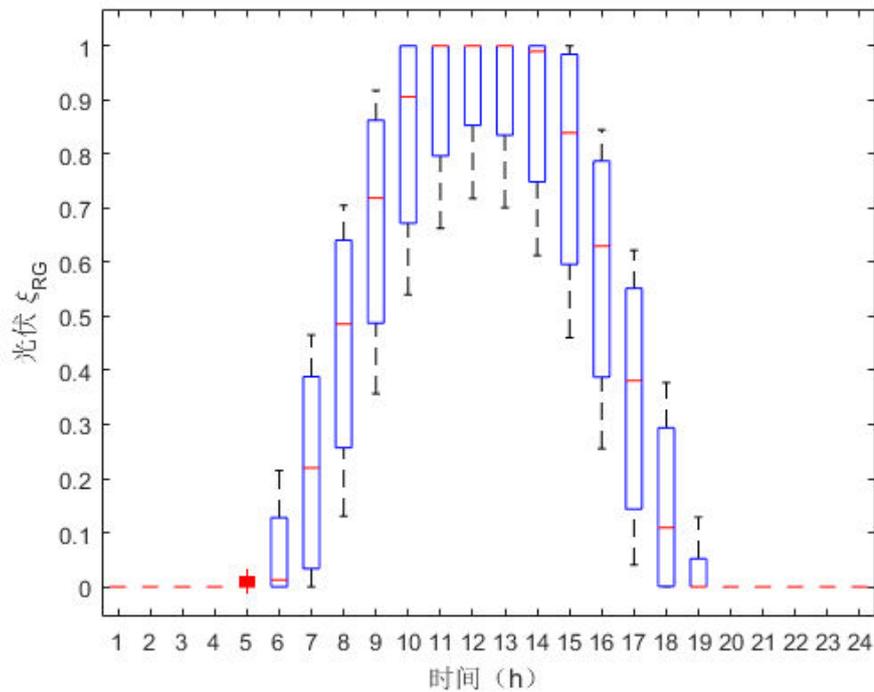


图 5.12 日光伏发电数据

个候选站点。比较产生充电需求点的电动汽车的 Ran_{sc} ，与充电需求点到候选站点的距离，计算候选站点对充电需求点的覆盖关系矩阵 R 。图 5.13 是 R 的可视化，行表示充电需求点，列表示候选站点，均按照空间位置顺序排列。可以看出，矩阵 R 比较稀疏，不同电动汽车的 Ran_{sc} 有一定分散性。

假设所有候选站点的建站成本相同，设为 c_1 ，则此时总预算 c_0 和 c_1 的比值是充电站数量上限。设置不同的充电站数量上限，求解问题 (3-4)，求解时间处于 20 至 30 s 之间，随充电站数量上限变化有少许波动。图 5.14 显示充电需求点覆盖率随充电站数量上限的变化。随充电站数量增加，充电需求点覆盖率单调增长，但增长的速度单调下降。实际应用中，决策者应该权衡总成本与覆盖率，在类似图 5.14 的曲线上选择方案。

表 5.7 和图 5.15 展示了限制 7 个充电站时的选址结果。可以看出，充电站选址比较均匀，相邻两站间隔 40 千米左右，靠近高速公路两端没有充电站。这种现象是由 2 个因素决定的。第一，此案例设置为高速公路沿线均匀密集分布候选站点，而且所有候选站点的建站成本相等。第二，充电需求点的空间分布（图 5.5）的特点是，在高速公路中间比较均匀，靠近两端处较少。因此充电站

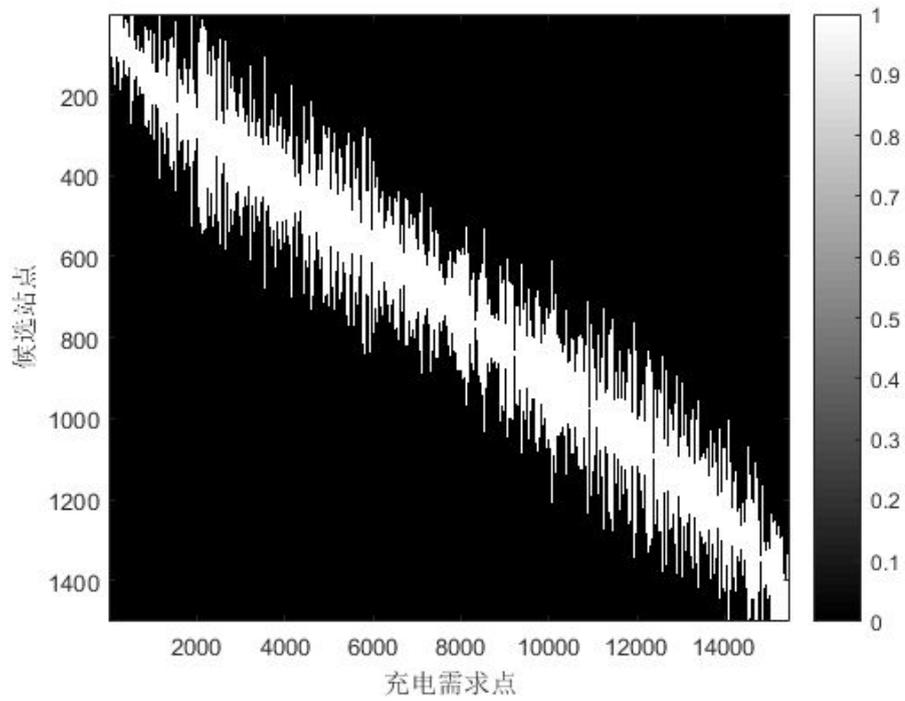


图 5.13 矩阵 R

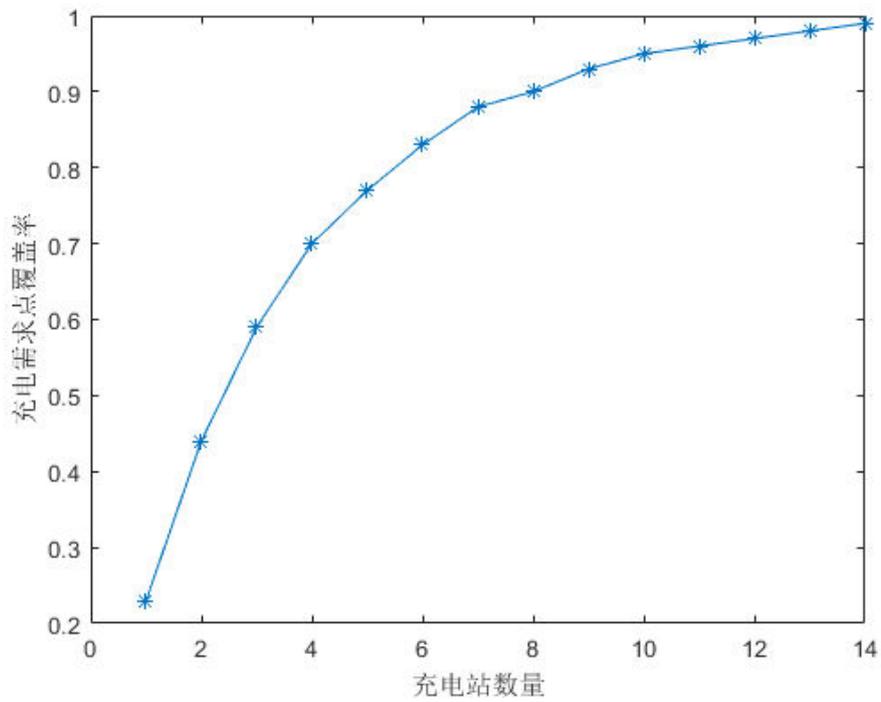


图 5.14 充电需求点覆盖率与充电站数量（离网型）

表 5.7 限制 7 个充电站时的选址（离网型）

编号	位置 (km)	编号	位置 (km)
1	27.8	5	186.8
2	66.2	6	226.4
3	109.4	7	266.6
4	148.4		

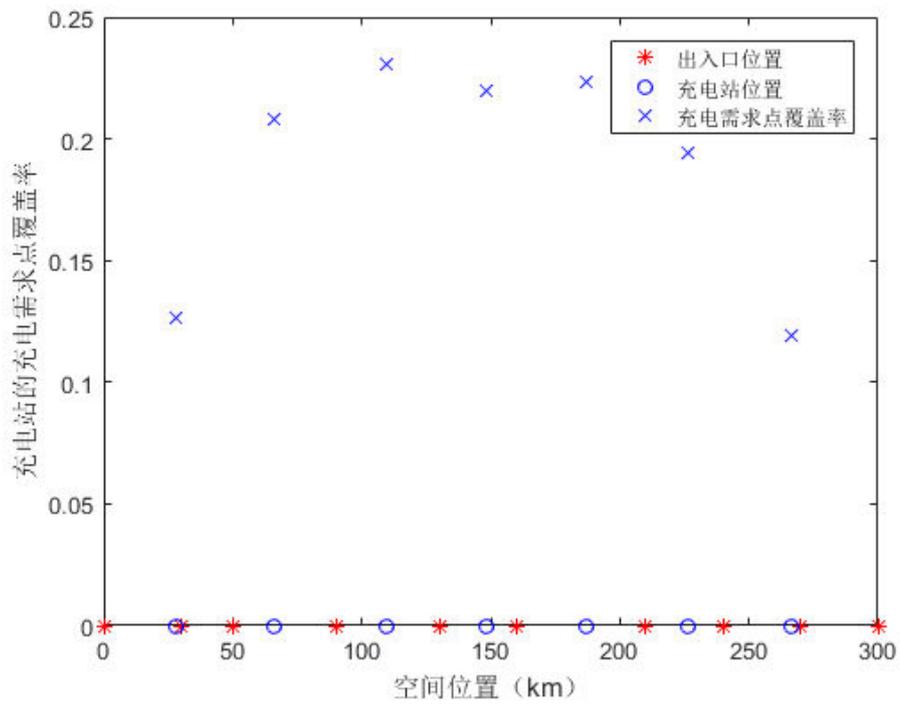


图 5.15 限制 7 个充电站时的选址结果（离网型）

倾向于在中间充电需求点较多的区域均匀排列。此结果显示，本文选址方法可以实现覆盖充电需求总量最大，而且能够间接地考虑充电站之间的相互影响，在充电需求较多的区域也不会选址过密。

本节离网型充电站的后续规划基于表 5.7 中的 7 个充电站的选址。

5.5.2 充电需求校正

采用小节 3.3 的方法进行充电需求校正，得到 7 个充电站的日充电负荷。仿真时模拟 1 万次行程，其中有 894 次行程因为无法得到足够的充电服务而放弃（选址规划时的充电需求点覆盖率略低于 90%，此处行程覆盖率略高于 90%）。图 5.16 展示各个充电站当日各时间段的充电车辆数。图 5.17 展示 5 号充电站区分充电设施类型的充电车辆数。

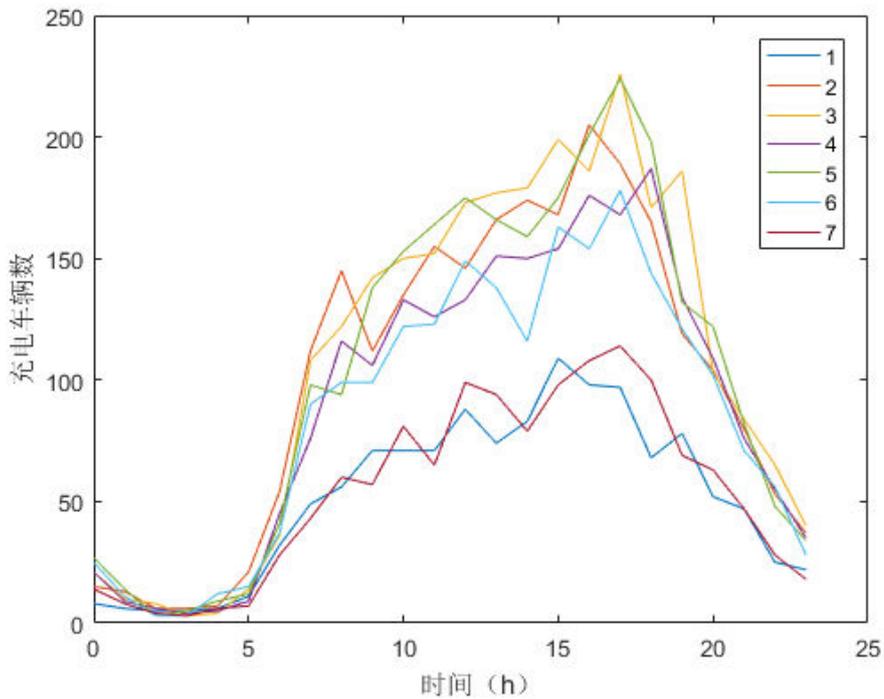


图 5.16 各充电站充电车辆数

5.5.3 充电设施数量规划

使用小节 5.5.2 的得到的充电站充电需求数据（包括需充电车辆到达时间、充电时长和要求的充电设施种类），根据小节 3.4 提出的方法，对每一个充电

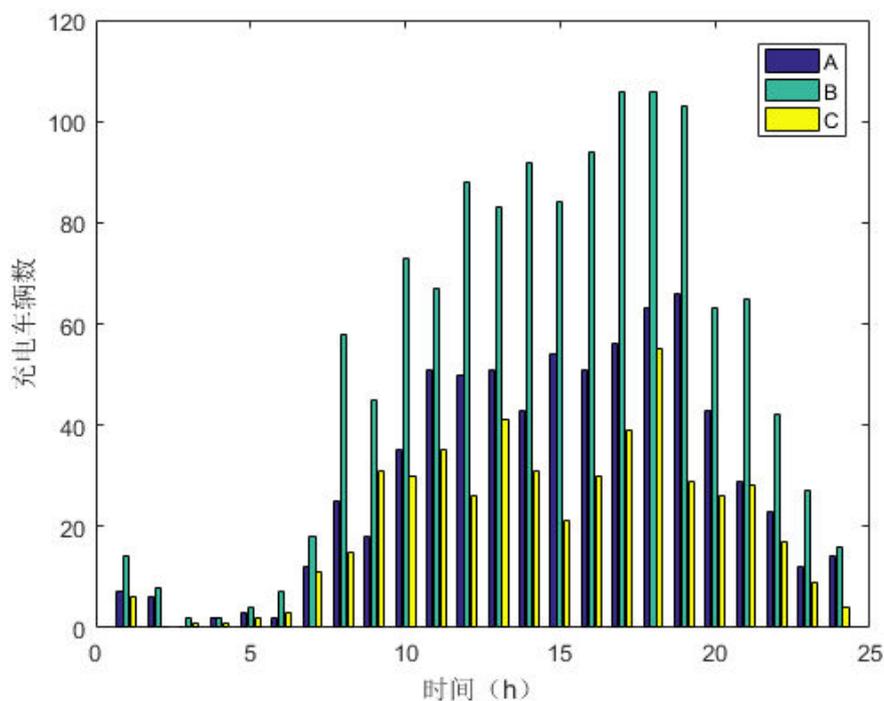


图 5.17 5 号充电站充电车辆数（区分充电设施）

站规划充电设施数量。在此测试案例中，一辆电动汽车只能使用一种充电设施，因此，可以区分充电设施分别规划数量。图 5.18 是 5 号充电站用户平均等待时间与充电设施数量的关系。如果将每种类型用户的平均等待时间上限设为 0.02 h，则应该设置 33 台 A 类充电设施、29 台 B 类充电设施、7 台 C 类充电设施。对比图 5.17，充电设施台数显著小于充电车辆数峰值。虽然使用 B 类充电设施的电动汽车最多（见表 5.4），但是 A 类充电设施充电功率小充电时间长，所以在相同平均等待时间要求下需要的台数更多。

5.5.4 站内容量规划

设 5 号充电站计划设置光伏发电装置和储能装置，该地理位置的光伏发电数据由小节 5.4 给出。一些参数设置如表 5.8 所示。

为在测试中突出充电负荷的随机性，设日行程数服从正态分布，参数 $\mu = 10000$ 、 $\sigma = 2000$ ，具有下界 1000。在 33 台 A 类充电设施、29 台 B 类充电设施、7 台 C 类充电设施的情况下，用小节 3.4 的方法产生 365 组充电负荷数据，形式是每小时的平均充电负荷功率。充电负荷数据的分散程度如图 5.19 所示，可以看出充电负荷被充电设施数量限制，小时平均充电功率不超过 4000 kW。

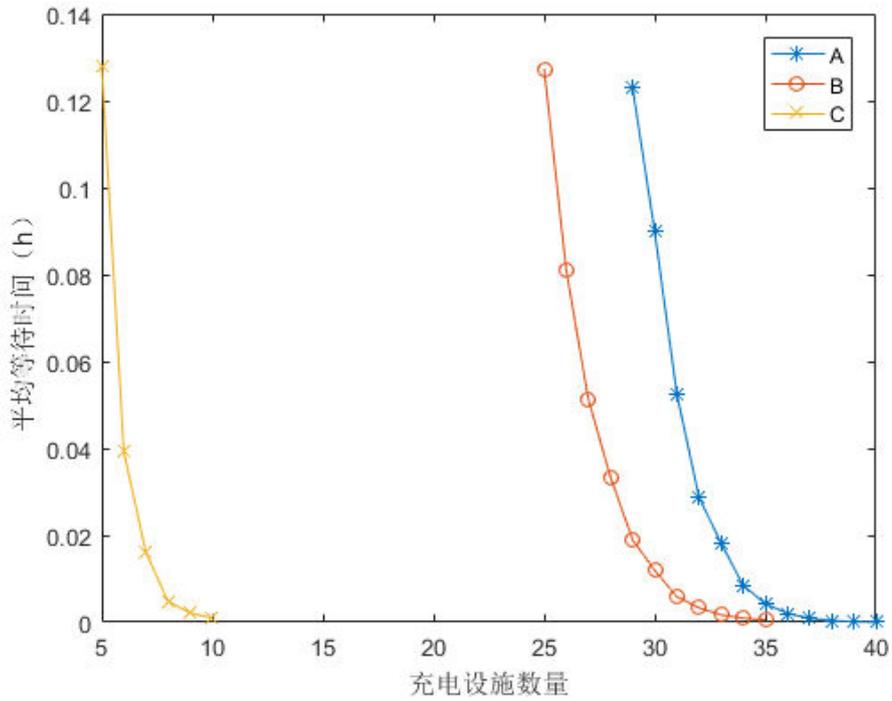


图 5.18 5 号充电站用户平均等待时间

表 5.8 站内容量规划参数

参数	值	参数	值
Pr_{RG}	1	η_1	0.9
Pr_{ES}	1	η_2	0.9
\underline{w}	0.1	Δ_t (h)	1
\overline{w}	0.9	T	24

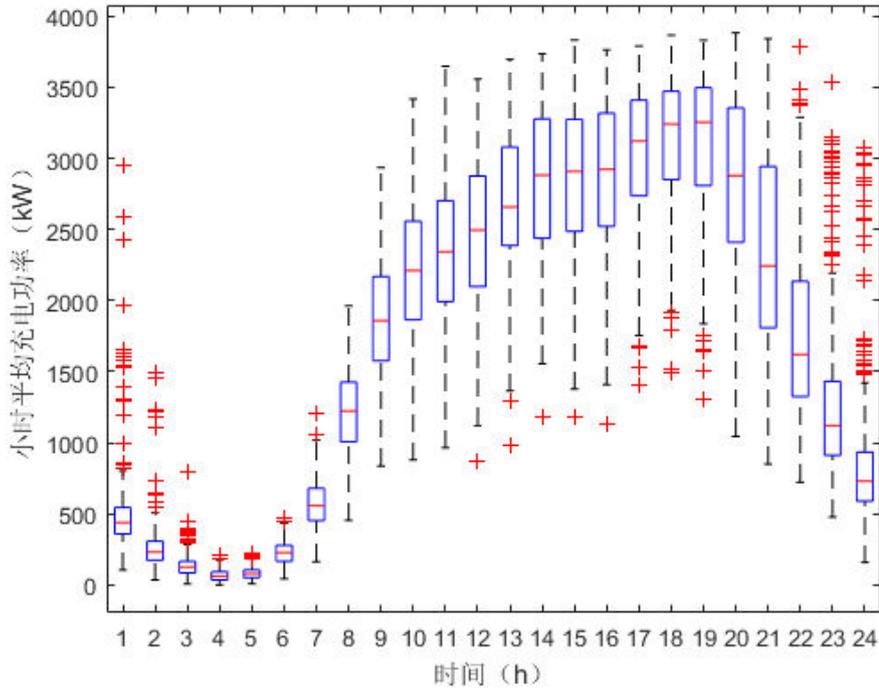


图 5.19 充电负荷数据分散程度

将光伏发电数据与充电负荷数据随机组合，产生 365 组 $\xi^{OC} = (\xi_{RG}, \xi_C)$ 的样本。

首先研究 α_{1+}^{OC} 与 d_{OC} 和 α^{OC} 的关系。根据

$$\alpha_{1+}^{OC} = \max\{\alpha_1^{OC}, 0\} \tag{5-1}$$

$$\max\left\{1 - \inf_{x \in (0,1)} \left\{ \frac{e^{-d_{OC} x^{1-\alpha^{OC}}} - 1}{x - 1} \right\}, 0\right\}$$

在 d_{OC} 和 α^{OC} 的不同取值下计算 α_{1+}^{OC} ，结果如图 5.20 所示。图 5.20 显示 α_{1+}^{OC} 总是小于等于 α^{OC} 。并且，固定 α^{OC} 时，随 d_{OC} 增大 α_{1+}^{OC} 减小， $d_{OC} = 0$ 时 $\alpha_{1+}^{OC} = \alpha^{OC}$ 。这些现象与变量意义是符合的。 d_{OC} 越大表明越保守，因此对观察到的分布可容忍的失败概率越小，即 α_{1+}^{OC} 越小。

取 $\alpha^{OC} = 0.1$ ，尝试不同的 d_{OC} ，并分别使用模型 (3-36) 和模型 (3-40) 进行站内容量规划。在样本中随机取出 100 例作为测试集，用于检验失败概率。剩下的 265 份样本用于规划。规划结果如表 5.9 所示，其中时间指求解时间， r_1 指最优解在规划用样本集合中的失败率， r_2 指最优解在测试样本集合中的失败率。

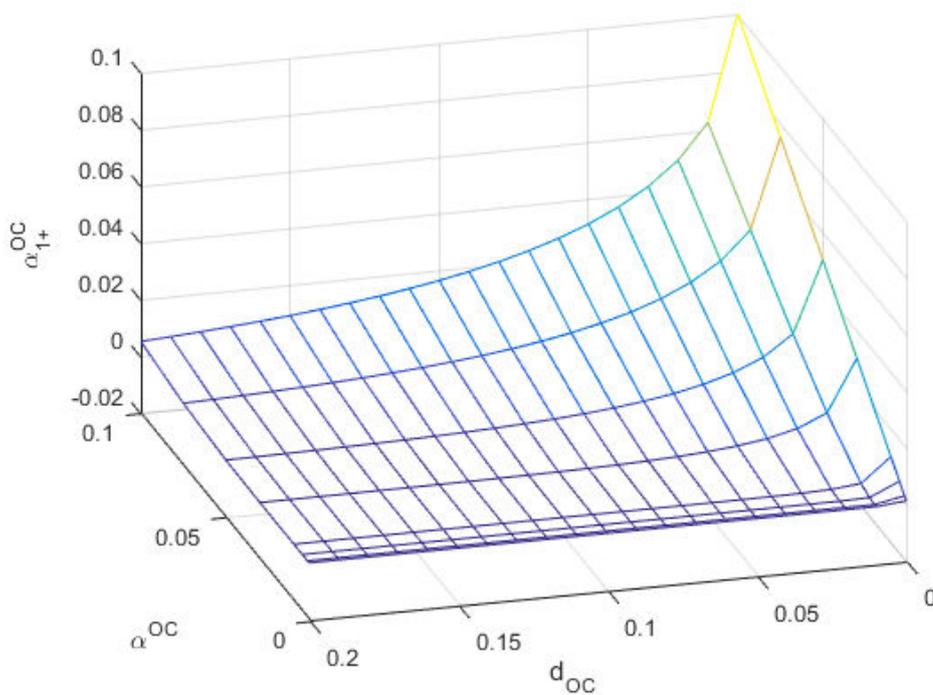


图 5.20 α_{1+}^{OC} 随 d_{OC} 和 α^{OC} 变化情况

表 5.9 离网型充电站容量规划结果 ($\alpha^{OC} = 0.1$)

编号	模型	d_{OC}	α_{1+}^{OC}	时间	x_{RG} (kW)	x_{ES} (kWh)	r_1	r_2
1	(3-36)	0	0.1	10 s	12157	35847	0.0415	0.13
2	(3-36)	0.001	0.0871	11 s	12260	36360	0.0340	0.11
3	(3-36)	0.005	0.0727	11 s	12410	36977	0.0264	0.10
4	(3-36)	0.01	0.0629	10 s	12611	37333	0.0226	0.09
5	(3-40)	0	0.1	124 s	10986	31792	0.0981	0.26
6	(3-40)	0.01	0.0629	33 s	11960	33088	0.0604	0.21
7	(3-40)	0.05	0.0313	17 s	11971	35497	0.0302	0.13
8	(3-40)	0.1	0.0166	16 s	12470	38520	0.0151	0.09

从表 5.9 中观察可得出以下几个结论：第一，使用同一模型时，随 d_{OC} 增大， α_{1+}^{OC} 减小，最优值增加，失败率下降，规划保守性增加。第二，规划样本失败率 r_1 明显小于测试样本失败率 r_2 ，这反映了数据描述分布的误差。如果认为规划样本可以完全反映实际分布，那么规划结果应该是表中 5 号，但实际上

它在测试样本中失败率是 0.26，远高于期待的失败概率 $\alpha^{OC} = 0.1$ 。第三，对于模型 (3-36)，即使在 $d_{OC} = 0$ 时，规划样本失败率 r_1 也明显小于 α^{OC} 。这是因为模型 (3-36) 使用了条件风险价值方法，用 CVaR 近似 VaR 时加强了保守性。第四， d_{OC} 的选择对规划效果有决定性作用，而且模型 (3-36) 和 (3-40) 在条件相同时，应该采用不同的方式选取 d_{OC} 。第五，在相同规划样本数量的情况下，模型 (3-40) 的求解时间通常大于模型 (3-36)。并且，模型 (3-40) 的求解时间有随 α_{1+}^{OC} 增大的趋势。

图 5.21 展示了能量流动的一个例子。可见，储能装置在光伏发电有余的时段储存电能，在无光伏发电或发电不足的时段释放电能以满足充电负荷。

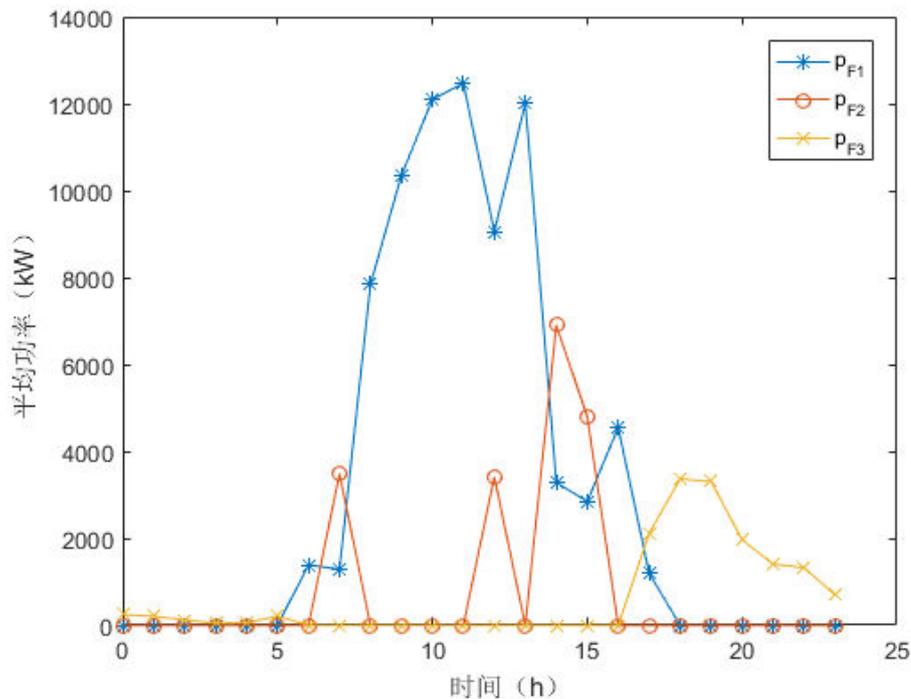


图 5.21 站内能量流动的一个例子

5.6 电网数据

以下讨论并网型充电站。假设给充电站供电的配电网拓扑结构如图 5.22 所示。该配电网呈放射状，共有 20 个节点，其中节点 0 是平衡节点。配电网中各线路均可新增条数，表 5.10 展示配电网原有线路参数（阻抗参数为标么值）。

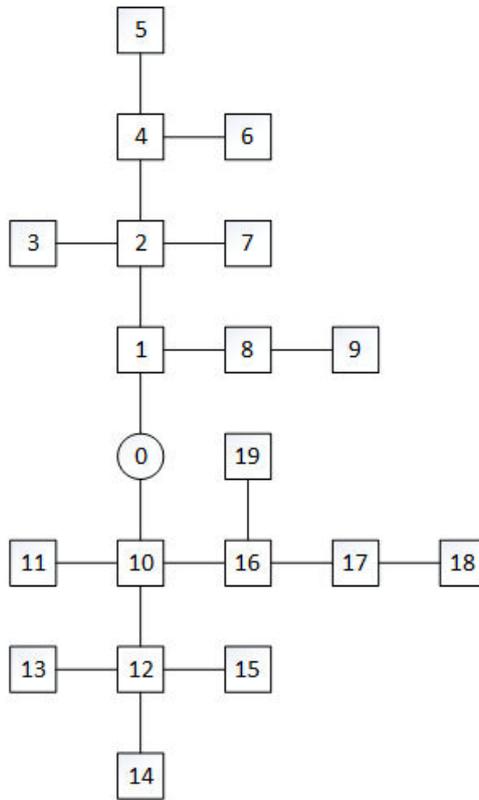


图 5.22 配电网拓扑结构

表 5.10 配电网线路参数

线路	Pr^l/κ	\bar{r}^l	\bar{x}^l	线路	Pr^l/κ	\bar{r}^l	\bar{x}^l
0 → 1	282	0.081	0.061	10 → 11	222	0.107	0.073
1 → 2	205	0.115	0.080	10 → 12	190	0.127	0.083
2 → 3	205	0.127	0.083	12 → 13	203	0.119	0.078
2 → 4	195	0.122	0.083	12 → 14	195	0.122	0.083
4 → 5	203	0.119	0.078	12 → 15	220	0.106	0.075
4 → 6	186	0.131	0.084	10 → 16	201	0.114	0.079
2 → 7	200	0.120	0.080	16 → 17	201	0.120	0.080
1 → 8	370	0.066	0.042	17 → 18	202	0.120	0.080
8 → 9	200	0.123	0.077	16 → 19	203	0.120	0.080
0 → 10	185	0.135	0.081				

设配电网中各节点没有对地并联导纳，节点 1、2、4、10、12、16 已有电源且可新增电源，它们的参数如表 5.11 所示，表中未出现的 $\underline{p}^{n,g}$ 、 $\underline{q}^{n,g}$ 、 $\underline{dp}^{n,g}$ 、 $\underline{dq}^{n,g}$ 均为 0，新增电源量没有上限。

表 5.11 配电网节点发电参数

节点	$\bar{p}^{n,g}$	$\bar{q}^{n,g}$	$\bar{dp}^{n,g}$	$\bar{dq}^{n,g}$	$Pr^{n,g}/\kappa$	$Pr^{n,g,1}$	$Pr^{n,g,2}$
1	2.0	0.4	1.0	0.2	500	140	1800
2	1.0	0.2	1.0	0.2	600	150	2000
4	2.5	0.4	1.0	0.2	450	130	2500
10	0.5	0.1	1.0	0.2	500	150	2200
12	1.0	0.3	1.0	0.2	400	140	2000
16	2.0	0.4	1.0	0.2	500	150	2000

表 5.12 设置了其他有关参数（未指明节点的节点参数对所有节点适用，未指明线路的线路参数对所有线路适用）。

表 5.12 配电网其他参数

参数	值	参数	值
\underline{v}^n	0.95	\bar{l}^l	1.1
\bar{v}^n	1.05	Pr_p	3000
v_0^n	1.04	N_L	6
$p^{d,0}$	0.1	$q^{d,0}$	0.02

5.7 并网型充电站规划

5.7.1 候选站点参数

在表 5.5 和图 5.1 表示的高速公路上设置 19 个候选站点。选择方法是，将所有的出入口以及相邻两个出入口的中点作为候选站点。候选站点的地理信息及编号如图 5.23 所示。假设候选站点连接具有相同编号的配电网节点。

5.7.2 选址与负荷分配

根据小节 5.3 获得的充电需求数据，峰值时段是 18 时，并且产生约 94%

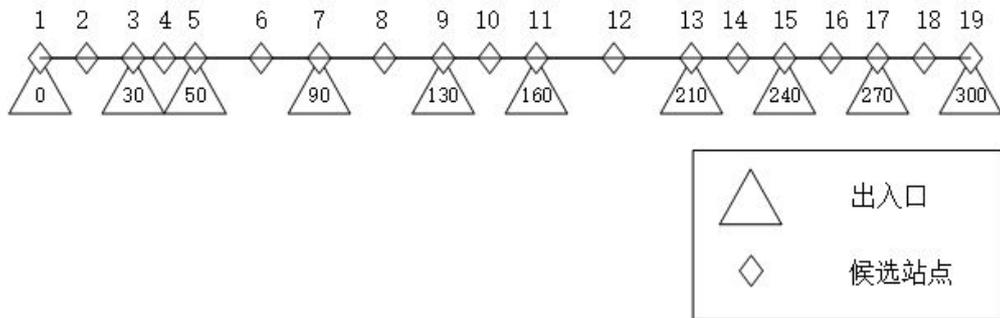


图 5.23 并网型充电站候选站点

行程的电动汽车满足 Ran_{sc} 大于 20 km。因此，将候选站点的服务半径设为 20 km，根据小节 4.2 的方法划分出 28 个充电区间。将峰值时段的充电需求点数据处理成充电区间内的充电负荷，如图 5.24 所示。

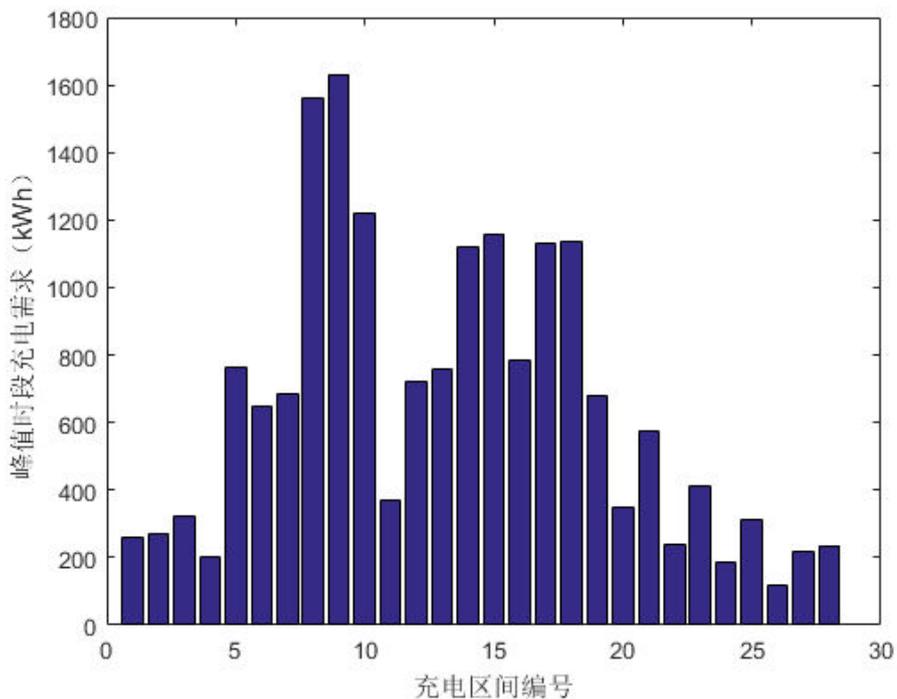


图 5.24 各充电区间的峰值时段充电需求

设各个候选站点建站成本相同，所能承受的充电功率上限均为 4000 kW。改变充电站数量上限，求解模型 (4-6)，得到充电站选址与充电需求满足率，求解时间约 1 s。图 5.25 展示了限制 7 个充电站时的选址。图 5.26 是充电需求满足率与充电站数量上限的关系。与图 5.14 对比，充电站数量小于等于 4 时，图

5.14 中覆盖率明显大于图 5.26，这是因为图 5.14 对应的充电站近似可以选在任何位置，而本小节规划只能在 19 个候选站点中选择。充电站数量大于等于 9 时，图 5.26 的覆盖率达到 1，但图 5.14 仍然仅略高于 0.9。原因是，本节规划应用了候选站点服务半径是 20 km 的假定，因此未正确计算 Ran_{sc} 小于 20 km 的电动汽车所产生充电需求的满足情况。

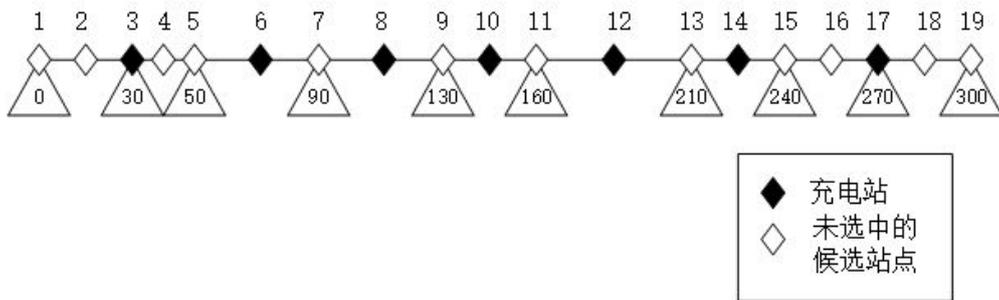


图 5.25 限制 7 个并网型充电站时的选址（最大化充电需求满足率）

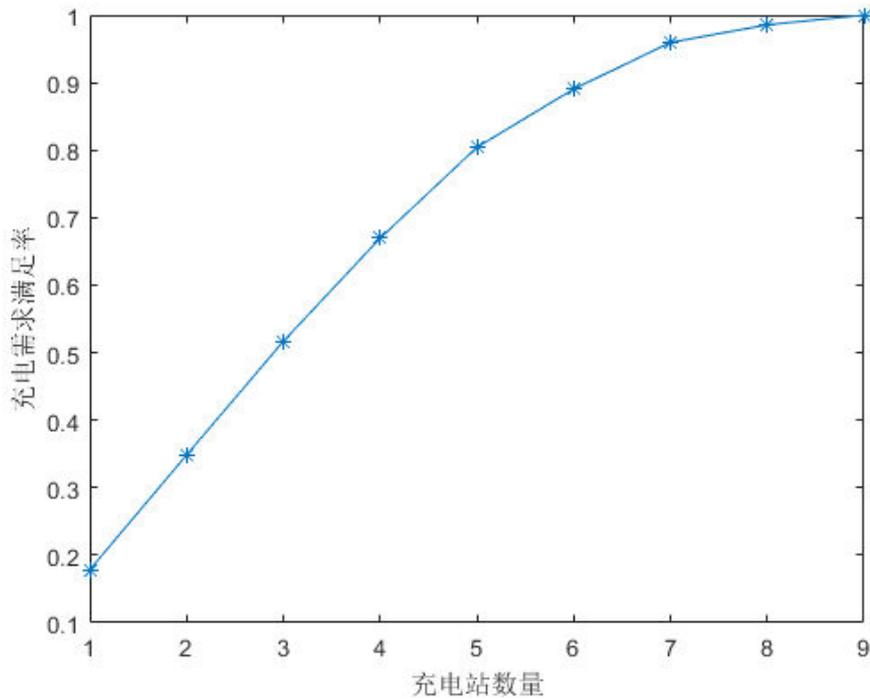


图 5.26 充电覆盖率与充电站数量（并网型）

5.7.3 配电网规划

设选址方案是小节 5.7.2 中限制 7 个充电站时的结果，可以同时得到各个充电站的峰值负荷。使用小节 5.6 的电网数据，假定功率的基值是 2000 kW，求解模型 (4-41)，用时 23 s，最优值是 30135，并且最优解使公式 (4-14) 在每条线路上都取等号（误差不超过 10^{-6} ），之后所有求解模型 (4-41) 和模型 (4-46) 得到的最优解也是这样。表 5.13 展示线路增加条数情况，表 5.14 展示节点新增发电装置情况。

表 5.13 新增线路（配电网规划）

线路	增加条数	线路	增加条数
2 → 3	2	12 → 14	3
4 → 6	4	16 → 17	2
1 → 8	2	其它	0
8 → 9	1		

表 5.14 新增电源（配电网规划）

节点	增加量	节点	增加量
2	0.0839	12	2.3762
10	0.6536	其它	0

调节充电负荷，新增线路总数量、新增电源总量和最优值的变化如表 5.15 所示。随新增负荷变大，新增线路总量、新增电源总量、最优值均变大，而且求解时间也显著变长。无充电负荷时，最优值是为现有负荷供电的最少费用。

5.7.4 联合规划

充电区间划分和区间内充电需求计算过程与小节 5.7.2 相同，限制 7 个充电站，使用模型 (4-46) 联合规划充电站选址与配电网改造，则规划结果与充电需求满足率下限的关系如表 5.16 所示。

因为限制 7 个充电站时最大充电需求满足率在 0.959 至 0.960 之间，所以将充电需求满足率下限设为大于等于 0.960 的数时问题 (4-46) 无解，设为 0.959 时最优解和最优值与小节 5.7.3 几乎相同。可以从表 5.16 中看出，如果在充电需

表 5.15 配电网规划结果与充电负荷

充电负荷倍数	新增线路总量	新增电源总量	最优值	求解时间 (s)
2	28	12	62974	283
1.5	21	6.29	45812	59
1	14	3.11	30135	23
0.6	9	1.31	18709	19
0.2	2	0	7877	6
0	0	0	3423	2

表 5.16 联合规划结果与充电需求覆盖率

充电需求满足率	新增线路总量	新增电源总量	最优值	求解时间 (s)
0.959	14	3.11	30122	28
0.94	10	2.73	28470	30
0.92	7	2.61	27576	70
0.90	6	2.76	26535	34
0.88	5	2.70	25798	56

求满足率方面让步一些，则配电网改造成本可以明显减少。这显示出联合规划的优势，即能够在充电站选址时同时考虑配电网改造的成本。图 5.27 展示充电需求满足率设为 0.94 时的联合规划选址结果。

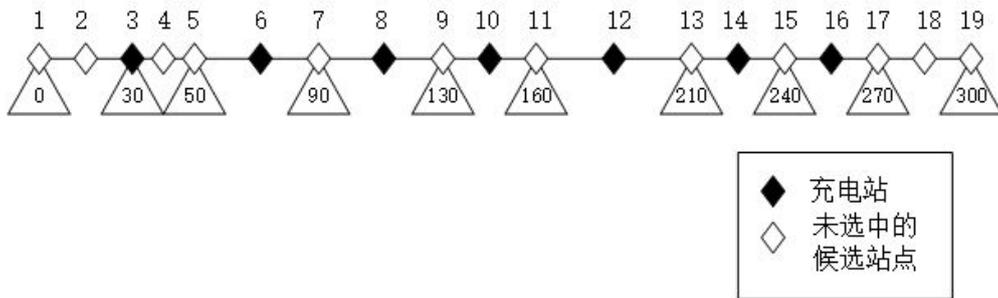


图 5.27 联合规划充电站选址结果

与图 5.25 对比，可以发现两图中只有一个充电站选址有差异：图 5.25 中 17 号候选站点被选为充电站，而图 5.27 中选择 16 号候选站点。原因是，选择 17 号候选站点能取得更高的充电需求满足率，但选择 16 号候选站点对于配电网而言更合适。

5.8 小结

本章设计了一个测试案例，对本文所提基本方法验证了可行性，并通过调整某些参数的方法分析结果的合理性。

第6章 结论

6.1 本文工作总结

本文针对高速公路沿线电动汽车充电站的规划问题提出一整套规划方法。第2章完善文献[12]的充电需求建模过程。第3章提出一种离网型充电站的规划方法，包括选址规划、充电设施数量规划与考虑随机性的站内容量规划。第4章提出一种并网型充电站规划方法：建立充电站选址与容量分配模型、配电网升级改造模型，并将二者组合得出联合规划方法。第5章设计测试案例，验证第2至4章所提方法的可行性。

本文的主要贡献有：

第一，在文献[12]的基础上改进而得出一种细致的基于电动汽车与交通状况的充电需求模型，并进一步提出考虑充电站和充电设施情况的充电需求校正方法。

第二，对于充电站选址问题，根据候选站点集合的大小，分别提出合适的选址规划模型。在忽略建模过程引入的误差时，它们能够求出充电需求满足率最大的规划方案。

第三，为具有强随机性的离网型充电站的电源与储能容量规划问题建立合理的模型，并使用分布鲁棒优化的方法处理数据描述分布的误差。

第四，对于放射状配电网中的并网型充电站提出一种联合规划模型，该模型的特色在于能够同时考虑交通信息与配电网情况，精确计算电网潮流，同时显式控制充电需求满足率。

第五，本文所提方法需要求解的规划问题中，除充电设施数量规划外，均可以使用商业求解器求出最优解。

遇到的难点问题有：第一，如何最大化充电需求满足率。为了解决这个问题，我曾从聚类的角度尝试多种方法，但效果欠佳。经过反复思考，我决定采用混合整数规划的工具，并引入一些方法减小规划规模。第二，如何处理离网型充电站站内容量规划问题中的随机性。我在导师的指引下，确定采用分布鲁棒优化的方法。模型推导过程中，曾考虑基于矩的方法和基于分布函数特征的方法，经过仔细比较，我认为基于分布函数差异的方法较适用于本文需解决

问题。在模型形式方面，同样尝试了多种方法并选取最适宜的一种。第三，如何将并网型充电站的选址与配电网规划合为整体。充电站与配电网之间由电能流动耦合，因此我修改选址模型，加入负荷分配部分，以充电功率为接口整合选址模型与配电网模型。第四，如何精确计算配电网最优潮流。我根据导师的建议，采用松弛化的支路潮流模型计算最优潮流。实验中发现松弛步骤的精确性可能出现问题，为此我仔细阅读相关文献及其证明，对该问题准备了一套解决方案。

6.2 存在的问题与改进方向

本文所提方法仍然存在一些问题。第一，本文提出的选址模型均假定充电站的设置不影响交通情况。这个假定使得交通信息与选址规划可以仅由充电需求连接，避免在选址规划中引入过于复杂的交通模型，有利于简化选址过程，但同时也必然引起一些误差。例如，充电行为实际上只能在充电站处发生，假设电动汽车在充电需求点处充满电是会导致误差的。为了在后续规划中减小这个假定引起的误差，本文提出充电需求校正方法，但使用时必须具备一些条件，比如充电需求校正方法和充电行为服从调度的假设不相容。第二，在对离网型充电站站内电源、储能和负荷之间的能量流动关系建模时，使用的模型比较简单，忽略了许多因素，例如储能装置的自放电效应以及电源的发电成本。这方面的改进方向是，引入更细致的模型，并推导相关规划模型的改进形式。第三，本文所提充电设施数量规划方法采用枚举法求解，计算量随充电设施种类总数与单位时间充电车辆数增长很快。如何快速求解该规划问题需要进一步研究。第四，并网型充电站模型假定用户充电行为服从调度，该假定是为了在充电站之间分配充电负荷而引进的。该假设合理性存疑，且必然会引入误差。如果放弃联合规划，就可以避免该假设，类似本文所提离网型充电站规划过程，先选址，然后校正充电负荷，最后配电网规划。第五，并网型充电站和配电网的联合规划使用充电负荷峰值时段的数据，并且未考虑随机性。文献 [27] 在另一联合规划模型中考虑了这个问题，因此可以尝试类似方法。

插图索引

图 1.1	研究思路	4
图 2.1	蒙特卡洛单次模拟示意图	6
图 2.2	直线状高速公路示意图	7
图 2.3	蒙特卡洛模拟流程	10
图 2.4	模拟行程过程示意图	10
图 3.1	离网型充电站规划流程	13
图 3.2	充电需求校正单次行程模拟示意图	18
图 3.3	模拟单个充电站日充电状况	20
图 3.4	站内容量规划模型推导关系	21
图 3.5	能量流动关系示意图	23
图 4.1	并网型充电站规划流程	39
图 4.2	划分充电区间示意图	40
图 5.1	高速公路示意图	60
图 5.2	概率 OD 矩阵	61
图 5.3	行程起始时间分布	61
图 5.4	充电需求时间相对分布	62
图 5.5	充电需求空间相对分布	63
图 5.6	各区域中充电需求的时间分布	63
图 5.7	各时间段中充电需求的空间分布	64
图 5.8	充电需求模拟分散程度（时间）	64

图 5.9	充电需求模拟分散程度（空间）	65
图 5.10	日充电需求与电池容量	66
图 5.11	日充电需求与最大行驶里程	66
图 5.12	日光伏发电数据	67
图 5.13	矩阵 R	68
图 5.14	充电需求点覆盖率与充电站数量（离网型）	68
图 5.15	限制 7 个充电站时的选址结果（离网型）	69
图 5.16	各充电站充电车辆数	70
图 5.17	5 号充电站充电车辆数（区分充电设施）	71
图 5.18	5 号充电站用户平均等待时间	72
图 5.19	充电负荷数据分散程度	73
图 5.20	α_{1+}^{OC} 随 d_{OC} 和 α^{OC} 变化情况	74
图 5.21	站内能量流动的一个例子	75
图 5.22	配电网拓扑结构	76
图 5.23	并网型充电站候选站点	78
图 5.24	各充电区间的峰值时段充电需求	78
图 5.25	限制 7 个并网型充电站时的选址（最大化充电需求满足率）	79
图 5.26	充电覆盖率与充电站数量（并网型）	79
图 5.27	联合规划充电站选址结果	81

表格索引

表 5.1	各种类型电动汽车电池容量 Cap 的概率分布信息.....	58
表 5.2	Cap 和 Ran_{mc} 的插值数据	59
表 5.3	各种类型电动汽车行驶平均速度 v_{EV} (km/h) 的正态分布参数	59
表 5.4	电动汽车充电特性的分布	59
表 5.5	高速公路的出入口编号与位置	60
表 5.6	SOC_b 和 SOC_e 的分布参数	60
表 5.7	限制 7 个充电站时的选址 (离网型)	69
表 5.8	站内容量规划参数	72
表 5.9	离网型充电站容量规划结果 ($\alpha^{OC} = 0.1$)	74
表 5.10	配电网线路参数	76
表 5.11	配电网节点发电参数	77
表 5.12	配电网其他参数	77
表 5.13	新增线路 (配电网规划)	80
表 5.14	新增电源 (配电网规划)	80
表 5.15	配电网规划结果与充电负荷	81
表 5.16	联合规划结果与充电需求覆盖率	81

参考文献

- [1] Cazzola P, Gorner M. Global EV outlook 2016, beyond one million electric cars[R]. Technical report, International Energy Agency, 2016. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Global_EV_Outlook_2016.pdf.
- [2] Ministry Of Industry And Information Technology Of The People's Republic Of China. China energy-saving and new energy vehicles industry development program[EB/OL]. [2017-05-20]. http://mddb.apec.org/documents/2012/AD/AD2/12_ad2_006.pdf.
- [3] 陈良亮, 张浩, 倪峰, 等. 电动汽车能源供给设施建设现状与发展探讨[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14):11–17.
- [4] Mu Y, Wu J, Jenkins N, et al. A spatial-temporal model for grid impact analysis of plug-in electric vehicles[J]. Applied Energy, 2014, 114:456–465.
- [5] Zhang H, Moura S, Hu Z, et al. PEV fast-charging station siting and sizing on coupled transportation and power networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016.
- [6] Mueller O M, Mueller E K. Off-grid, low-cost, electrical sun-car system for developing countries[C]. IEEE Global Humanitarian Technology Conference. IEEE, 2014. 14–17.
- [7] 徐凡, 俞国勤, 顾临峰, 等. 电动汽车充电站布局规划浅析[J]. 华东电力, 2009, 37(10):1678–1682.
- [8] 吴春阳, 黎灿兵, 杜力, 等. 电动汽车充电设施规划方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(24):36–39.
- [9] 郭春林, 肖湘宁. 电动汽车充电基础设施规划方法与模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13):70–75.
- [10] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11):126–130.
- [11] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14):36–42.
- [12] Dong X, Mu Y, Jia H, et al. Planning of fast EV charging stations on a round freeway[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4):1452–1461.
- [13] 葛少云, 冯亮, 刘洪, 等. 考虑车流信息与配电网容量约束的充电站规划[J]. 电网技术, 2013, 37(3):582–589.
- [14] 王辉, 王贵斌, 赵俊华, 等. 考虑交通网络流量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13):63–69.
- [15] 黄小庆, 陈颀, 陈永新, 等. 大数据背景下的充电站负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12):68–74.

- [16] 刘志鹏, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电动汽车充电站的最优选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3):54–59.
- [17] 唐现刚, 刘俊勇, 刘友波, 等. 基于计算几何方法的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8):24–30.
- [18] 贾龙, 胡泽春, 宋永华, 等. 高速路网上电动汽车充电站布点优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15):82–89.
- [19] 许上宇. 含风光储的离网型电动汽车充电站容量配比研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [20] 丁明, 王波, 赵波, 等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(3):575–581.
- [21] Hong Y Y, Lian R C. Optimal sizing of hybrid wind/PV/diesel generation in a stand-alone power system using Markov-based genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2):640–647.
- [22] 肖润谋, 李彬, 陈荫三. 2013 年中国高速公路网运输状态[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(6):67–73.
- [23] Project MERGE. Project MERGE: Preparing europe’s grid for electric vehicles[EB/OL]. [2017-05-20]. <http://www.ev-merge.eu/>.
- [24] 程广明. 电动汽车快速充电器的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [25] 耿素云, 屈婉玲, 王捍贫. 离散数学教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
- [26] OPTIMIZATION G. Gurobi optimization - the state-of-the-art mathematical programming solver[EB/OL]. [2017-05-20]. <http://www.gurobi.com/index>.
- [27] Zhang H, Moura S J, Hu Z, et al. Joint planning of PEV fast-charging network and distributed PV generation[J]. arXiv preprint arXiv:1702.07120, 2017.
- [28] Zhang H, Moura S, Hu Z, et al. A second order cone programming model for PEV fast-charging station planning[J]. arXiv preprint arXiv:1702.01897, 2017.
- [29] Luedtke J, Ahmed S. A sample approximation approach for optimization with probabilistic constraints[J]. SIAM Journal on Optimization, 2008, 19(2):674–699.
- [30] Jiang R, Guan Y. Data-driven chance constrained stochastic program[J]. Mathematical Programming, 2016, 158(1):291–327.
- [31] Rockafellar R T, Uryasev S. Optimization of conditional value-at-risk[J]. Journal of risk, 2000, 2:21–41.
- [32] Wang Q, Guan Y, Wang J. A chance-constrained two-stage stochastic program for unit commitment with uncertain wind power output[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1):206–215.
- [33] Farivar M, Low S H. Branch flow model: Relaxations and convexification—part I[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2554–2564.

- [34] Gan L, Li N, Topcu U, et al. Exact convex relaxation of optimal power flow in radial networks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60(1):72–87.
- [35] Huang S, Wu Q, Wang J, et al. A sufficient condition on convex relaxation of AC optimal power flow in distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(2):1359–1368.
- [36] Wei W, Wang J, Li N, et al. Optimal power flow of radial networks and its variations: A sequential convex optimization approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017.
- [37] Löfberg J. YALMIP : A toolbox for modeling and optimization in MATLAB[C]. In *Proceedings of the CACSD Conference, Taipei, Taiwan, 2004*. 284–289.
- [38] Mu Y, Wu J, Ekanayake J, et al. Primary frequency response from electric vehicles in the Great Britain power system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(2):1142–1150.
- [39] Santos A, McGuckin N, Nakamoto H Y, et al. Summary of travel trends: 2009 national household travel survey[R]. Technical report, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2011. <http://nhts.ornl.gov/2009/pub/stt.pdf>.
- [40] National Solar Radiation Data Base. NSRDB: 1991-2010 update[EB/OL]. [2017-04-17]. http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/1991-2010/.