

北京交通大学

硕士学位论文

基于充电桩运营平台的有序充电调度策略研究

Research on Ordered Charging Dispatch Strategy Based on
Charging Station Operation Platform

作者：陈 杰

导师：陈科山教授

北京交通大学

2023 年 6 月

学校代码: 10004

密级: 公开

北京交通大学

硕士学位论文

基于充电桩运营平台的有序充电调度策略研究

Research on Ordered Charging Dispatch Strategy Based on
Charging Station Operation Platform

作者姓名: 陈杰

学 号: 20121255

导师姓名: 陈科山

职 称: 教授

学位类别: 工学

学位级别: 硕士

学科专业: 机械电子工程

研究方向: 有序充电

北京交通大学

2023 年 6 月

摘要

在中国政府提出“碳达峰”和“碳中和”这两个战略目标的背景下，电动汽车的发展成为优化能源结构的关键领域。随着电动汽车的普及，大规模电动汽车接入电网进行充电的不可预测性和集中性，将会对电网运行的安全性、稳定性和经济性带来显著影响。为了降低电动汽车充电负荷对电网运行的影响，本文提出了一套完整的有序充电调度策略，并设计了充电桩运营平台的功能结构和物理架构，通过算例验证了该策略在工程实际中的应用效果。该研究对于实现电动汽车和电力系统的协同发展，促进低碳经济和清洁能源的发展具有重要意义。

首先，本文从电动汽车的充电特性、用户的出行模式和电力系统的相关政策等三个方面，对影响电动汽车充电负荷的关键因素进行了分析，并根据NHTS2017全美家庭出行数据拟合出了用户出行规律的概率密度函数。随后，从输电网和配电网两方面分析了充电负荷对电网运行的影响。然后采用蒙特卡洛模拟方法，建立了电动汽车无序充电负荷模型，并通过设计相应的算例来仿真模拟实际情况，以验证充电负荷对电网运行的影响。

其次，为了降低充电负荷的影响，本文对有序充电在优化电网运行和降低充电费用的作用进行分析，然后以充电桩运营商家的角度充分考虑用户侧和电网侧的优化目标和约束条件，建立了有序充电数学优化模型。尽管粒子群算法在解决多目标多约束的工程问题具有一定的优势，但依旧存在一些局限性，为此本文改进提出具有更好收敛速度和全局搜索能力的SCM-PSO算法用来求解该优化模型，仿真结果表明该策略可以有效的降低负荷峰谷差率、负荷波动和充电费用，对平滑负荷曲线和提升用户满意度具有良好的效果。

最后，本文设计了充电桩运营平台的功能结构和物理架构，并基于此给出了电动汽车充电流程。鉴于在实际应用中存在用户临时修改出行计划等随机因素，本文设计了基于优先级队列的充电调度算法和充电负荷跟随策略，以解决实际调度问题，仿真结果表明该策略在工程实际中具有良好的应用效果。

关键词：充电桩运营平台；充电负荷；有序充电；PSO的改进；充电调度策略

ABSTRACT

Against the backdrop of China's government proposing the strategic goals of "carbon peak" and "carbon neutrality", the development of electric vehicles has become a key area for optimizing energy structure. As electric vehicles become more widespread, the unpredictability and concentration of large-scale electric vehicle charging into the grid will have a significant impact on the safety, stability, and economic efficiency of the power grid. In order to reduce the impact of electric vehicle charging loads on grid operation, this thesis proposes a complete ordered charging scheduling strategy, and designs the functional structure and physical architecture of the charging station operation platform. The effectiveness of the strategy in practical engineering is verified through numerical examples. This research is of great significance for achieving the coordinated development of electric vehicles and power systems, and promoting the development of low-carbon economy and clean energy.

Firstly, this thesis analyzes the key factors affecting electric vehicle charging loads from three aspects: the charging characteristics of electric vehicles, user travel patterns, and relevant policies of the power system. The probability density function of user travel patterns is fitted based on the NHTS2017 national household travel survey data. Then, the impact of charging loads on grid operation is analyzed from the aspects of transmission and distribution networks. Next, a Monte Carlo simulation method is used to establish an electric vehicle uncoordinated charging load model, and the corresponding numerical examples are designed to simulate actual situations and verify the impact of charging loads on grid operation.

Secondly, in order to reduce the impact of charging loads, this thesis analyzes the role of ordered charging in optimizing grid operation and reducing charging costs. Then, from the perspective of charging station operators, the optimization objectives and constraints of both the user side and the grid side are fully considered, and a mathematical optimization model for ordered charging is established. Although particle swarm optimization (PSO) has certain advantages in solving multi-objective and multi-constraint engineering problems, there are still some limitations. Therefore, this thesis proposes an improved SCM-PSO algorithm with better convergence speed and global search ability to solve the optimization model. Simulation results show that the strategy can effectively reduce the peak-to-valley ratio of the load curve, load fluctuation, and

charging costs, and has a good effect on smoothing the load curve and improving user satisfaction.

Finally, this thesis designs the functional structure and physical architecture of the charging station operation platform, and gives the electric vehicle charging process based on this. Given the random factors such as users' temporary changes to travel plans in practical applications, this thesis designs a charging scheduling algorithm based on a priority queue and a charging load follow-up strategy to solve practical scheduling problems. Simulation results show that the strategy has good application effectiveness in practical engineering.

KEYWORDS: Charging station operation platform; Charging load; Orderly charging; Improvements of PSO; Charging scheduling strategy

目 录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 电动汽车发展现状.....	1
1.2.2 有序充电调度策略的研究现状.....	4
1.2.3 充电桩运营平台研究现状.....	6
1.3 本文研究工作.....	8
2 影响充电负荷的关键因素分析	11
2.1 电动汽车充电特性对充电负荷的影响	11
2.1.1 电动汽车的充电方式.....	11
2.1.2 动力电池充电特性.....	12
2.2 电动汽车用户出行模式对充电负荷的影响	15
2.2.1 不同用途电动汽车的充电规律.....	15
2.2.2 汽车用户的出行规律.....	17
2.3 电力系统相关政策对充电负荷的影响	21
2.3.1 充电桩的安装位置及数量.....	21
2.3.2 汽车用户对电价变化的需求响应.....	22
2.4 本章小结.....	22
3 电动汽车无序充电负荷研究	23
3.1 电动汽车充电负荷对电网运行的影响	23
3.1.1 电动汽车充电负荷对输电网的影响.....	23
3.1.2 电动汽车充电负荷对配电网的影响.....	24
3.2 基于蒙特卡洛方法的电动汽车充电负荷模型	27
3.2.1 蒙特卡洛模拟方法介绍.....	27
3.2.2 电动汽车无序充电负荷建模.....	28
3.3 无序充电仿真算例分析.....	31
3.3.1 算例参数设计.....	31
3.3.2 算例结果分析.....	33
3.4 本章小结.....	36
4 基于双侧优化的有序充电策略研究	37
4.1 有序充电的作用.....	37
4.1.1 有序充电对优化电网运行的作用.....	38
4.1.2 有序充电对降低充电费用的作用.....	39
4.2 多目标双侧优化有序充电策略研究	41

4.2.1 电网侧优化模型	41
4.2.2 用户侧优化模型	42
4.2.3 电网侧与用户侧优化模型综合分析	43
4.3 基于改进的粒子群算法模型求解	44
4.3.1 粒子群算法介绍	44
4.3.2 粒子群算法的改进	47
4.3.3 有序充电模型的求解	52
4.4 有序充电仿真算例分析	54
4.4.1 算例参数设计	55
4.4.2 算例结果分析	55
4.5 本章小结	57
5 充电桩运营平台充电调度研究	59
5.1 充电桩运营平台总体设计	59
5.1.1 功能结构设计	59
5.1.2 物理架构设计	63
5.1.3 电动汽车充电流程	64
5.2 充电桩运营平台的充电调度研究	65
5.2.1 常见作业调度算法	65
5.2.2 基于优先级队列的充电调度算法	66
5.2.3 充电负荷跟随策略	67
5.3 平台充电算例分析	69
5.3.1 算例参数设计	69
5.3.2 算例结果分析	69
5.4 本章小结	71
6 总结与展望	73
6.1 本文总结	73
6.2 未来展望	74
参考文献	75

1 绪论

1.1 研究背景及意义

2015 年 12 月，来自全世界 178 个缔约方在第 21 届联合国气候变化大会上共同签署了《巴黎协定》，这是一项具有历史性意义的全球行动，是为了应对 2020 年后全球气候变化做出的统一行动安排，为推动全球减排和气候适应措施奠定了基础。《巴黎协定》的长期目标是将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在 2 摄氏度以内，并努力将温度上升幅度限制在 1.5 摄氏度以内。

为应对全球气候变化，中国政府制定了“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”的战略目标^[1]，并着力构建清洁低碳、安全高效的能源体系。能源在促进经济社会发展方面扮演着重要的基础和驱动角色。在交通领域，推动交通方式清洁化、电能化成为实现“碳达峰”和“碳中和”目标的必要路径。因此，电动汽车的发展成为优化能源结构的关键领域^[2]。

但是，随着电动汽车的普及，大规模电动汽车接入电网进行充电的不可预测性和集中性，将会对电力系统的安全性、稳定性和调度规划带来显著影响。为了减少电动汽车普及趋势下充电负荷对电网运行产生的影响，电动汽车的有序充电成为一种有效的应对手段。通过有序充电调度策略，可以实现对电动汽车充电行为的优化管理，改善电力系统的运行情况，提升用户体验以及推动清洁能源的发展，从而促进电动汽车充电基础设施服务保障能力的提升。这将有助于解决电动汽车大规模接入电网充电带来的挑战，推动电动汽车产业的可持续发展，促进碳达峰、碳中和等环保和能源转型目标的实现，对于推动电动汽车产业的发展和能源结构的优化具有积极的社会经济效益。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 电动汽车发展现状

电动汽车（Electric Vehicle，简称 EV）是一种以电能作为动力来源，使用电池或其他可再生能源储存器存储电能，并通过电动机驱动车辆行驶的汽车。随着环保和可持续发展的日益重视，电动汽车在全球范围内得到了广泛关注和推广，其发展主要包括以下几个方面^[3]：

（1）纯电动汽车（Battery Electric Vehicle，简称 BEV）

纯电动汽车完全依赖电池储存的电来驱动电动机，不使用任何内燃机。典型的纯电动汽车包括特斯拉 Model S、蔚来 ES8 等。

（2）插电式混合动力汽车（Plug-in Hybrid Electric Vehicle，简称 PHEV）

插电式混合动力汽车除了搭载了电动机外，还搭载了内燃机作为辅助动力来源。电动机和内燃机可以分别或同时驱动车辆。典型的插电式混合动力汽车包括雪佛兰 Volt、吉利缤越 PHEV 等。

（3）混合动力汽车（Hybrid Electric Vehicle，简称 HEV）

混合动力汽车使用内燃机和电动机共同驱动车辆，但不能通过外部充电进行充电。典型的混合动力汽车包括比亚迪唐、本田雅阁混动等。

此外，根据用途和功能，还可以将电动汽车分为轿车、SUV、MPV、小型客车、公交车、货车、摩托车等多种类型。电动汽车的发展不仅有助于减少尾气排放和空气污染，还有望促进能源结构的优化，实现可持续能源发展和环境保护目标。

在全球范围内，中国、美国、欧盟、日本等始终处于电动汽车市场的前列位置^[4]。其中，各中国、美国、欧盟等世界各大经济体电动汽车 2022 年保有量及 2025 和 2030 年预测保有量^[5]如表 1-1 所示。

表 1-1 各前列国家电动汽车预测保有量

Table1-1 The electric vehicle stock in leading countries around the world

年份	中国	美国	欧盟	印度	其它
2022	590 万	99 万	260 万	4.8 万	51 万
2025	970 万	334 万	420 万	26.5 万	150 万
2030	1460 万	776 万	960 万	92 万	396 万

综合来看，电动汽车市场将继续保持增长的趋势，尤其中国^[6]、欧盟^[7]和美国等地区在电动汽车领域有望实现较大的增长。同时，其他国家也在逐步推进电动汽车发展，显示了全球范围内电动汽车市场巨大的潜力。

中国已成为全球最大的电动汽车市场，销售量呈现显著增长。过去 7 年里，从 2016 年 2022 年电动汽车保有量从 33.9 万增长到 590 万辆，具体如图 1-1 所示。中国政府还实施了一系列支持电动汽车发展的政策和激励措施，如购车补贴、免税政策和优惠的车牌政策等。这些政策在推动中国电动汽车增长方面发挥了关键作用。中国的汽车制造商和科技公司在电动汽车技术方面也取得了显著进步，包

括电池技术、电动机技术和充电基础设施等。这有助于提升电动汽车的性能和价格竞争力，使其对消费者更具吸引力。

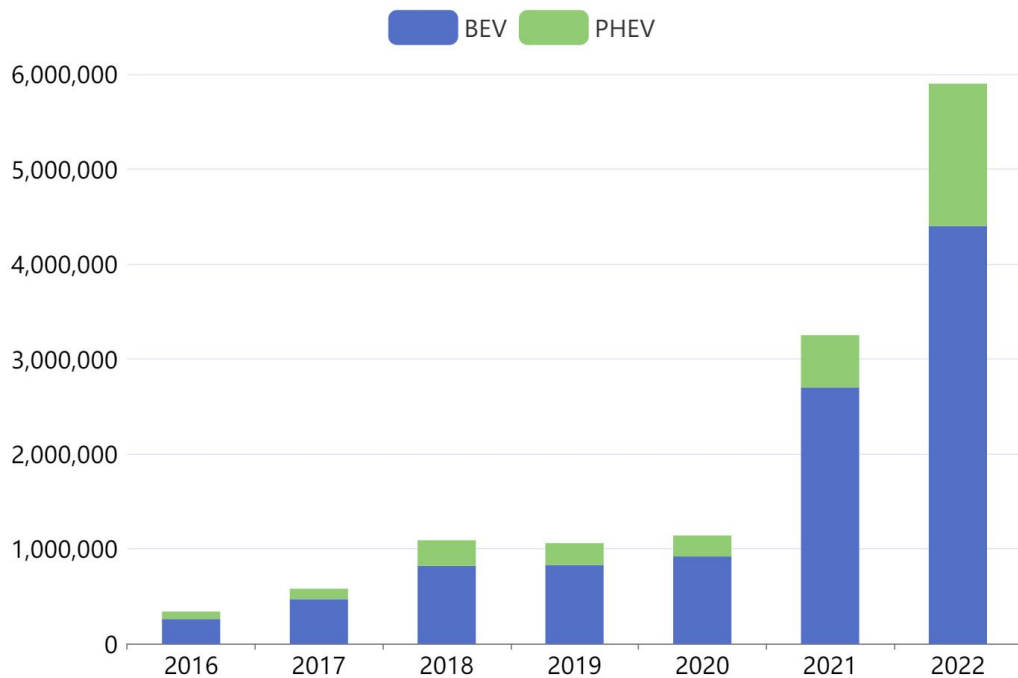


图 1-1 中国近 7 年电动汽车发展情况

Figure1-1 The development of electric vehicles in China over the past 7 years

中国电动汽车发展虽然取得了显著的成就，但仍旧需要在新一轮电动汽车产业与新能源技术变革中重点关注以下问题^[8]：

（1）品牌核心竞争力

中国的新能源汽车企业星罗棋布，但总体规模效益较差，缺乏核心竞争力。中国电动汽车企业需加大技术研发力度、提升产品品质，通过持续的创新和市场推广，树立品牌形象，提升用户认知度和满意度，拓展市场份额，确保发展过程中规模和效益并驾齐驱，在全球电动汽车市场中取得更高的竞争地位。

（2）动力电池等核心技术

动力电池技术是电动汽车的核心关键技术，目前中国的动力电池技术还存在一定的差距，包括续航里程、充电速度、安全性等方面的问题。目前，一些中国电动汽车企业仍较为依赖外部技术和知识产权，缺乏自主创新能力。这导致了技术掌握不牢固，难以形成真正具有核心竞争力的技术优势。因此，中国电动汽车企业应加强自主研发，提高自主创新能力，保护和提升自主知识产权，从而在技术领域取得更大突破。

（3）充电基础设施

尽管中国政府在电动汽车充电基础设施建设方面采取了一系列措施^[9]，但充电基础设施的建设仍然滞后于电动汽车销售的增长速度。充电设施的分布不均衡，充电桩的数量、充电速度和服务质量等方面仍面临挑战，这可能限制了电动汽车用户的使用便利性和体验，从而影响电动汽车的发展。

（4）电网改造升级

电动汽车的普及和发展，将给现有的电网基础设施带来巨大的负荷冲击，电网将面临更大的电力需求和能源管理难度。因此，电网改造升级是电动汽车产业可持续发展的重要保障。只有在电网容量、灵活性、智能化和多能互补等方面实现全面升级和改造，并通过物联网技术对新型的能源需求进行调控管理，才能进一步促进电动汽车的发展^[10-11]。

1.2.2 有序充电调度策略的研究现状

随着电动汽车的不断发展和国家政策的大力推行，电动汽车的保有量将会持续逐年增多，但是当大规模电动汽车接入电网进行无序充电，特别是在用电高峰时期进行充电，将会造成用电负荷“峰上加峰”的现象，引起负荷曲线的波动。若不对充电负荷加以引导，将会对电网的运行和规划产生不可忽视的影响，甚至产生负荷过载现象，严重威胁电网运行的安全性^[12-14]。为了减小电动汽车充电负荷对电网运行的影响，国内外越来越多的学者相继投入到了电动汽车有序充电调度策略的研究工作中。有序充电调度策略可以按照以下三种形式进行分类：

（1）控制方式

1) 直接负荷控制

直接负荷控制是指对电动汽车的充电时间、功率加以限定，有目的性直接控制某个时刻能接入电网的充电负荷，以此管理电动汽车充电行为。文献[15]通过改变电动汽车充电开始时间，尽可能地利用低谷时间为电动汽车进行充电，以此改变总负荷功率曲线。但如果将充电负荷都集中到夜间充电，则可能会导致新的用电高峰出现。

2) 间接电价控制

间接负荷控制是指通过制定分时电价、实时电价或辅助服务价格等方式来间接引导电动汽车用户的充电行为^[16]。文献[17]表明，若采用静态分时电价来引导有序充电，虽然可以有效转移负荷到低价时段，但可能导致用电负荷在低价时段突变增高。文献[18]则提出充电站基于动态分时电价来激励用户充电行为，该方法不仅可以显著降低经济成本，还可以对充电负荷进行削峰填谷。文献[19]中根据入网电动汽车数量来动态调整电价，也取得了同样的效果。

（2）优化层面

在电动汽车进行充电的过程中，分别有汽车用户、电力系统和运营商家三个层面参与到这个过程中，不同的优化层面会针对不同的需求和问题来提出相应的优化策略。

1) 汽车用户

电动汽车用户层面的优化策略，需要在保证电动汽车充电需求的情况下，把充电费用和便利性作为优化目标。文献[20]建立了不同尺度下的用户满意度函数来提升汽车用户参与有序充电的响应度。文献[21]以用户给电动汽车充电费用最低和电动汽车充电开始时间最早为优化目标建立了优化充电模型，结果表明该模型不仅可以保证充电经济性，同时还可以提高用户参与响应度。文献[22]则是采用动态规划的方法来对汽车充电时间进行最优规划，该方法也可以有效地减少电动汽车的充电费用。

2) 电力系统

在有序充电优化调度中，电力系统层面更关注的是用电负荷的平衡与稳定，以及电力能源的利用率和经济效益。文献[23]在满足最大容量约束的前提下，以电力系统的负荷波动差最小为优化目标建立电动汽车有序充电方案。文献[24]还额外考虑了电网的投资和运行成本，并考虑配电网的潮流和容量等约束，对充电站和主动配电网进行协同规划。文献[25]的研究则是更加关注如何降低配电网的网损。与之类似，文献[26]则是以负荷方差为目标函数，通过一直负荷波动来降低网损。

3) 运营商家

运营商家是指负责运营充电站的企业或个人。在充电基础设施建设过程中，运营商家是重要的参与者，他们需要考虑如何在满足电力系统监管的前提下，为汽车用户提供便利的充电服务。文献[27]在分时电价基础上，以运营商购电成本最低为优化目标，结果显示该策略不仅实现了运营商和用户双方利益共赢，还减小了负荷峰谷差率，提升了电网接入充电负荷的能力。文献[28]则是在考虑电网运行安全和用户充电需求前提下，以减小负荷波动和提高运营商经济效益为目标构建双阶段多目标的充电模型。文献[29]也通过类似的方案构建出了有效减少电动汽车接入对电网运行影响的充电策略。可以看出，运营商家作为电力系统和汽车用户之间的桥梁，其经济效益与电力系统和汽车用户的利益有着直接关系。

（3）能量流动

1) 单向充电

在这种方式下，电能只会从电力系统流向电动汽车，用于电动汽车的充电。电网或者运营商家可以根据有序充电调度计划来控制电动汽车的充电行为。

2) 双向充放电

这种方式主要依赖于 V2G (Vehicle-to-Grid) 技术, 其核心思想将电动汽车作为分布式储能单元, 以充电和放电两种形式参与电网的调控, 即电能可以在电动汽车和电网之间进行双向流动^[30]。文献[31]以考虑 V2G 响应度, 峰谷电价为变量, 在提升用户满意度的前提下优化了配电网的负荷曲线。在文献[32]中提出的充电策略则是在电网侧以负荷均方差最小和用户侧参与 V2G 的经济效益最大为目标函数, 通过粒子群算法进行求解, 其仿真结果表明该策略能够有效平滑负荷曲线并为用户带来一定经济效益。但是 V2G 技术频繁的对电池进行充放电, 会严重影响电池的使用寿命, 加上 V2G 技术需要支持双向充放电的电动汽车和充电设备, 因此该技术需要更高的技术成本, 使得其在实际应用中的价值大打折扣^[33]。

1.2.3 充电桩运营平台研究现状

充电桩运营平台是电动汽车充电设施的管理系统, 它通过互联网、物联网、云计算等技术手段, 将充电设施、用户、充电服务提供商、电力公司等各方面信息集成在一起, 为电动汽车用户提供智能化充电服务, 并实现充电设施的远程监控、管理、维护和运营。

美国是最早进行新能源汽车相关研究的国家, 相应的其充电设施管理平台发展的也较为成熟。ChargePoint 公司致力于构建全世界规模最大的电动汽车充电站在线网络, 拥有全美 70% 的公共充电桩, 该公司将旗下所有充电设施接入云服务平台, 可以通过互联网、手机 APP 和车联网等方式为用户提供实时的充电桩数据, 为电动汽车充电用户提供智能的电动汽车充电服务^[34]。

如图 1-2 所示, ChargePoint 的智能充电系统包括智能充电站、智能通信网络和 ChargePoint 网络操作系统。其中, 智能充电站采用尖端的硬件技术, 提供交流和直流充电硬件设施, 并将不同的充电设施接入云服务平台, 为电动汽车用户提供安全可靠的优质充电服务。ChargePoint 网络操作系统一方面依靠在线地图和物联网技术可以为电动汽车用户提供便捷的充电和实时状态查询服务, 另一方面也可以为充电站运营商提供充电管理服务, 这两方面分别是以手机 APP 和计算机客户端来具体呈现的。而智能通信网络则在这套智能充电系统承担着信息和能源通信的作用。ChargePoint 通过“充电桩+APP”和“产品+服务”的运营模式, 与在线地图服务商、电动汽车厂商和互联网公司进行深入合作, 建立了强大的充电服务生态链。



图 1-2 ChargePoint 充电服务生态链

Figure1-2 ChargePoint ecological chain of charging service

而欧盟为了推进智能电网的部署，则已经制定许多相关标准。PowerUp 项目的目标是旨在推进智能计量与电动汽车充电的融合，并结合 V2G 技术，推出确保大规模电动汽车充电负荷也不会干扰电网稳定性的技术解决方案^[35]。

随着中国新能源和智慧电网的发展，传统的“源随荷动”正在向“源网互动”的协同模式转变。而电动汽车则成为其中能量传输的重要载体。文献[36]提出通过聚合商运营平台将可调节负荷资源进行汇合后，再与负荷调控平台对接，以实现电力系统的调度优化。国内针对基础充电设施的管理，通常是基于云平台来实现远程管理的。文献[37]提出基于云平台、智能充电桩与 APP 架构的智能充电系统，该系统将传统的充电桩屏幕人机交互转变为手机终端显示交互，用户可通过该 APP 实时查询充电桩位置和充电状态等功能，为大规模电动汽车充电提供了一种智能化的解决方案。

而文献[38]基于区块链技术，提出一种去中心化的电动汽车充电桩共享服务机制与技术平台架构，并通过具体实例验证了该平台的可行性。该论文提出的共享经济运营模式中，其市场主体主要包括电动汽车管理商、充电桩运营商和电动汽车用户，各个市场主体基于 Truffle 框架和 Web 技术搭建的共享充电桩平台系统，通过区块链技术加密信息后参与到区块链网络的交互过程中，形成了各市场主体点对点的分布式共享交易系统，该系统的开发架构具体如图 1-3 所示。

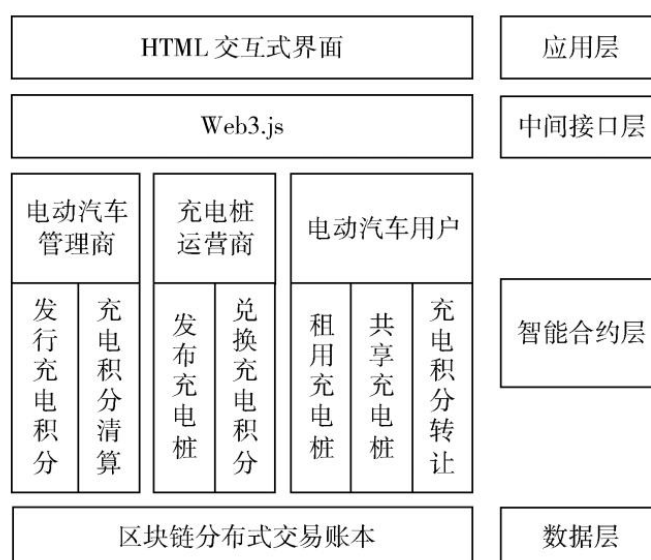


图 1-3 文献[38]中的共享充电桩系统开发架构

Figure1-3 Development architecture of shared charging system in literature [38]

1.3 本文研究工作

本文的研究工作旨在“双碳”背景下，以充电桩运营商的角度去研究制定最佳的有序充电策略，以此来降低电动汽车充电负荷对电网运行的影响。具体研究工作如下：

（1）第一章首先介绍了本文的研究背景和意义，然后分析了国内外电动汽车的发展现状，最后对大量有关有序充电和充电桩运营平台的文献进行总结，为后续研究提供理论指导。

（2）第二章从电动汽车的充电特性、电动汽车用户的出行模式和电力系统的相关政策三个方面，对电动汽车充电负荷的影响进行了分析，并根据 NHTS2017 拟合出了用户出行规律的概率密度函数。

（3）第三章首先从理论上分析了电动汽车充电负荷对电网运行的影响，然后采用蒙特卡洛模拟方法建立电动汽车无序充电负荷模型，最后通过设计相应的算例来仿真模拟实际情况，以验证充电负荷对电网运行的影响。

（4）第四章的研究内容则是旨在通过有序充电策略来降低第三章所验证的充电负荷对电网运行的影响，首先从理论上分析了有序充电的作用，然后充分考虑用户侧和电网侧双侧的优化目标和约束条件，建立了有序充电优化模型。又因为传统粒子群算法具有一定的局限性，对其进行了改进后用来求解该优化模型，最后通过算例验证该策略的有效性。

（5）第五章则是侧重于将本文所研究的有序充电调度策略应用于工程实际中的研究，首先对充电桩运营平台的功能结构和物理架构进行设计，并基于此给出电动汽车充电流程。因为在实际应用中存在用户临时修改出行计划等随机因素，因此设计了基于优先级队列的充电调度算法和充电负荷跟随策略来解决实际调度问题。最后通过算例仿真验证在工程实际中的应用效果。

（6）第六章对本文的研究工作进行了总结分析，介绍相应改进和不足，并对未来可改进和提升的研究工作进行展望。

2 影响充电负荷的关键因素分析

在研究基于充电桩运营平台下对电动汽车的有序充电时，分析电动汽车在充电桩的充电负荷的影响因素是一个重要的问题，涉及多个因素的交互影响^[39]。在近年来的发展中，电动汽车的销售量持续增长，随之充电桩的安装数量也在不断增加。然而，随着大规模的电动汽车并入电网，电动汽车充电需求过大可能会导致充电负荷过大，影响电网的稳定安全运行和汽车用户充电体验。因此，通过深入研究充电负荷的影响因素之间的交互作用，在既定的充电条件下，制定更加合理的充电策略和管理措施，提高充电效率和充电质量，保障电网的稳定运行和用户的充电体验。

本文将以电动汽车充电特性、汽车用户出行规律、电力系统相关政策这三个方面展开具体分析研究。

2.1 电动汽车充电特性对充电负荷的影响

2.1.1 电动汽车的充电方式

随着技术的不断提升和市场的逐渐成熟，电动汽车的充电方式也在不断地演进和发展，目前，社会上应用较多的充电方式主要是常规充电、快速充电、机械充电等方式，用户在对电动汽车充电时需要根据实际的需要和使用场景进行综合考虑。以上三种充电方式的特点和应用场景具体如下所述：

（1）常规充电

常规充电方式通常采用交流电进行充电，充电装置是便携充电器或交流充电桩。便携充电器是指汽车用户随车附带的充电设备，使用时只需将电线与普通家用插座进行连接后便可以开始充电。虽然便携充电器有极大的便利性，但一般来说，实际的充电功率仅有 1.5kW，充电速度缓慢，并且外接插座上也没有相应的电气保护装置，有很大的安全隐患。

交流充电桩一般有两种使用场景，一种是家用充电桩，一种是公共充电桩。家用充电桩与家庭电源连接后，一般安装在停车位或停车库等位置，而公共充电桩通常安装在商场、办公区等公共场所的停车场，由相应的公共场所或者代理商统一管理。交流充电桩的功率范围是 2-12kW，充电速度较慢，但是使用成本低、方便实用，对于日常使用和家庭充电需求来说是一个不错的选择。需要注意的是，常规充电需要长时间充电，约 5-8 个小时，在用车计划中需要汽车用户留出充电

时间, 以免影响日常出行^[40]。随着“新基建”的提出, 充电桩的大规模建设一方面可以不断推进新能源汽车的快速普及, 另一方面通过物联网等技术, 将分散到社会上的充电桩管理起来, 以带来更好的经济效益^[41]。

(2) 快速充电

快速充电是指使用高功率的充电设备, 将电动汽车短时间内充电至 80% 以上的电量状态, 但由于快速充电功率比较高, 当有大量快速充电设备同时运行时, 会对配电网的安全稳定运行带来不利的影响, 并且对于电动汽车的电池也会有一定的损伤, 比较适合短时快速的充电需求。快速充电设备一般都是直流充电桩, 通常安装在充电站里来进行统一管理, 类似于油车去加油站进行充电, 建设快速充电站的总体成本和技术要求也比较高, 一般应用在大型车站、高速公路服务区等场所。

(3) 机械充电

机械充电方式是指采用电池更换为电动汽车提供电能补给的方式, 主要是通过电池更换站来实现的^[42]。通过这种方式, 电动汽车用户可以迅速进行一次电池更换工作, 提高了电动汽车的使用效率, 使出行更方便快捷。除此之外, 可通过对电池充电的过程进行集中管理, 利用电网负荷低谷时段进行充电, 既可以降低充电成本, 也可以对电网负荷起到削峰填谷的作用。但是, 目前市面上的电动汽车动力电池的标准尚未有一个统一的标准, 这就使得这种充电方式很难大规模应用, 此外, 频繁的对电池进行拆卸、装配和充电, 容易加速电动汽车充电系统的老化, 从而带来安全隐患。另一方面, 电池更换站也需要配备专业的工人进行运营和检修设备, 这就使得此种充电方式的成本相对较高。

综上所述, 常规充电虽然速度较慢, 但是充电时间较长, 相对于快速充电和机械充电这两种方式, 一般选择这种充电方式的用户的用车需求并不是十分着急, 因此本文的所研究的充电桩运营平台下的充电方式是常规充电方式, 通过合理的调度充电时序, 不仅可以实现电网负荷的削峰填谷, 还可以更大的消纳电动汽车的充电需求, 并降低充电成本, 获得一定的经济效益。

2.1.2 动力电池充电特性

在电动汽车的整车研发中, 车载动力电池的成本占据电动汽车成本的很大一部分, 是电动汽车的核心部件和动力来源。动力电池的工作特性主要是由其比能量、循环充电次数、电池容量和充放电功率等参数决定的^[43]。比能量是指单位重量电池所能释放的能量, 一般以 Wh/kg 为单位, 比能量越高, 电池就能够储存更多的能量, 也就意味着单充电后电动汽车的续航里程就越远。循环充放电次数指

电池寿命周期内能够循环充放电的次数，循环次数越多，电池的寿命越长。但是，频繁的充放电过程也会导致电池内部化学反应的加速，降低电池的健康状态。电池容量是指动力电池所能储存的最高电能，一般以 Wh 为单位，电池容量越大，车辆的续航里程也会更长，但是，电池容量增加会导致电池重量增加，从而影响车辆的性能和成本。充放电功率是指电池在单位时间内所能释放或吸收的电能，一般以 kW 为单位。充放电功率越高，电池充电或放电的速度也越快。总体来说，各个参数之间是互相制约、互相影响的，下面将会介绍不同种类电池中这些参数的具体情况以及目前市面上主流电池的充电特性。

(1) 电池分类

铅酸蓄电池是一种成熟的化学电源，由正极、负极、电解液和隔板组成。铅酸蓄电池是目前使用最广泛的蓄电池之一，它具有成本低、可靠性高、容易维护等优点，广泛应用于汽车、UPS 电源、电动车等领域。但是由于其比能量低且寿命短，需要经常更换，无法满足大功率电动汽车的需求。镍氢电池是一种高比能量和长寿命的电池，被广泛应用于电动汽车、混合动力车和无人机等领域。它们具有比铅酸电池更高的能量密度，比锂离子电池更高的安全性和环保性。不过，镍氢电池的缺点是体积较大、重量较重、循环寿命较短，充电时间长等。锂离子电池是目前电动汽车应用最为广泛的电池技术之一，其采用锂离子在正负极之间的交换来存储和释放能量。图 2-1 为以上三种电池不同性能之间的比较^[44]。

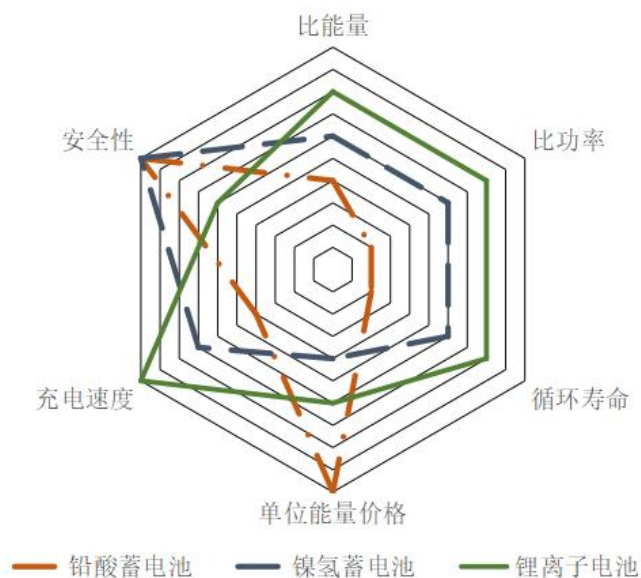


图 2-1 三种电池性能比较

Figure2-1 Comparison of the three batteries

与其他电池技术相比，锂离子电池作为电动汽车上应用最广泛的电池，其优势主要在以下几点：

1) 较高比能量: 锂离子电池具有较高的比能量, 可以实现较长的续航里程, 这是电动汽车尤为关注的一点。锂离子电池的比能量能达到 150-250Wh/kg, 而铅酸蓄电池的比能量只有 30-50Wh/kg, 镍氢电池的比能量也只有 50-80Wh/kg。

2) 长循环寿命: 锂离子电池的循环寿命较长, 可以达到几千次, 这也是电动汽车所需要的。相比之下, 铅酸蓄电池的循环寿命只有几百次, 镍氢电池的循环寿命也较差一些。

3) 较高比功率: 锂离子电池相对于其它电池, 具有更高的比功率。高比功率意味着它能够提供更的放电电流, 使电动汽车更加灵活, 提高了动力系统的响应性能。

4) 充电速度快: 锂离子电池可以实现快速充电, 这可以缩短电动汽车的充电时间。现在的锂离子电池可以在半小时内充电至 80% 的电量, 而铅酸蓄电池的充电时间需要数小时, 镍氢电池的充电时间也需要较长时间。

综上所述, 锂离子电池的综合性能最佳, 其商业前景也特别广泛, 尤其是在电动汽车行业^[43], 本文所研究的充电桩充电对象也主要是锂离子电池。

(2) 锂离子电池充电特性

锂离子电池的充电过程可以分为涓流充电阶段、恒流充电阶段和恒压充电阶段。在锂离子电池的充电过程中, 当电池电压低于其额定电压时, 通常使用涓流充电来提高电池电压。涓流充电的目的是让电池电压逐渐提高, 直至达到锂离子电池的充电起始电压, 通常在 3.6V 到 3.9V 之间, 然后进入恒流充电阶段。在锂离子电池充电的恒流充电阶段, 充电电流维持在一个固定的电流值上, 直至电池充电至其最大容量为止。这个过程中, 充电器将一直提供恒定的电流, 而锂离子电池将不断地吸收电荷并将其转化为化学能量, 使得电池的电压持续上升。在锂离子电池充电的最后阶段, 当电池电压上升到达设定的恒定电压 (通常在 4.1V 到 4.2V 之间), 充电器会开始进入恒压充电阶段。此时, 充电器会维持一个固定的电压值, 但充电电流会逐渐下降。当充电电流降至一个非常小的电流值时, 充电器将停止充电过程, 电动汽车结束充电。

锂离子电池在 220V、32A 交流充电过程曲线如图 2-2 所示, 通常情况下, 为了保护锂离子电池的寿命和安全性, 电动汽车的管理系统会控制电池的放电深度, 以避免电池的 SOC 降至过低。因此, 当需要进行充电时, 电池的 SOC 通常不会低于 10%。在充电过程中, 由于电池的内部电阻和电化学反应等因素的影响, 充电电流会随着充电时间的增加而逐渐降低, 因此充电过程不一定能够直接将电池充满。在此背景下, 交流充电桩对电动汽车进行充电时, 通常采用的是恒功率充电方式。因为恒功率充电可以确保充电过程中的充电功率保持稳定, 充电速率也可以得到更好的控制。相比恒流充电和恒压充电, 恒功率充电可以更好地应对充

电桩输入功率的波动和电动汽车电池的充电状态变化，从而提高充电效率和充电速度。另外，恒功率充电还可以帮助控制充电过程中的充电热量，有效避免电池过度加热，从而延长电池寿命。因此，恒功率充电是目前交流充电桩对电动汽车充电的主要方式，也是未来电动汽车充电技术的发展方向之一。

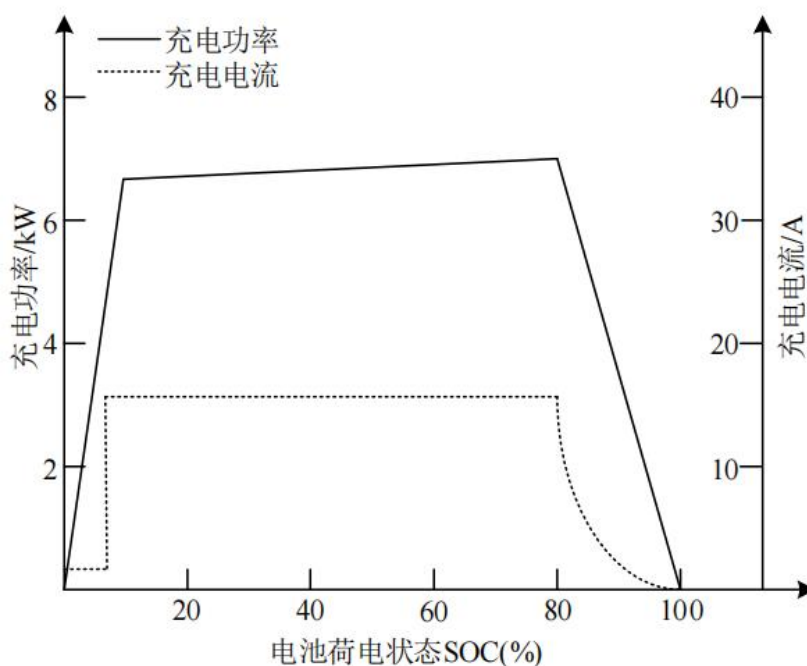


图 2-2 锂离子电池充电过程

Figure2-2 Charging process of lithium-ion batteries

2.2 电动汽车用户出行模式对充电负荷的影响

出行模式是指一组描述出行行为特征的变量，如出行时间、返家时间、行驶里程、出行目的等，反映了个体或群体出行行为的规律和特点。在电动汽车充电负荷的研究中，不同的出行模式将对充电需求产生不同的影响，进而对电网负荷产生不同的影响。不同用途的电动汽车具有不同的充电规律，私家车主要在晚上或周末等闲暇时间进行充电，商务车需要在工作时间内进行充电，出租车和公交车则需要更加频繁的充电。而在汽车用户的出行规律方面，出行时间、返家时间和行驶里程也会对充电负荷产生影响。例如，工作日的早晚高峰期间，出租车和公交车的需求量会增加，而私家车的出行时间和里程可能更加分散。本节将以不同用途电动汽车的充电规律和汽车用户的出行规律两方面来展开分析。

2.2.1 不同用途电动汽车的充电规律

不同类型的电动汽车，由于使用目的和出行规律的不同，其充电规律也各不相同。在电动汽车的充电过程中，如何根据不同的使用目的和出行规律制定相应的充电策略，是一个需要深入研究的问题。本文将从私家车、商务车、公交车三种不同类型的电动汽车的充电规律入手，探讨不同类型电动汽车充电的特点和需要注意的问题。

（1）私家车

私家车的充电规律受到多种因素的影响，包括车主的行车习惯、用车需求、充电设施的可用性等。

私家车车主一般是在夜间回家充电，因此夜间充电的需求相对较大。根据国家的电网管理政策，夜间电费比白天要便宜一些，因此车主也更愿意在夜间充电，以降低用电成本。充电时间一般为几个小时至整夜。车主一般会根据自己的出行需求和电动汽车的剩余电量来决定充电的时间和时长。私家车的充电频率一般较低，主要受到电动汽车的续航里程和车主出行需求的影响。私家车的充电方式以常规充电为主，有的用户自己安装了充电桩，也有用户选择公共充电桩进行充电，但是整体的充电时间具有较高的随机性，一般与用户的出行规律有较强的关联。

（2）商务车

商务车作为商业用车，其出行规律通常受到业务需求的限制。一般而言，商务车的行驶里程相对较长，充电需求也更为迫切。商务车的充电时间通常受到运营时间的限制。例如，出租车、快递车等商务车通常需要全天候运营，因此充电时间通常被安排在运营间隙或夜间。在运营间隙进行充电时，为了满足业务的连贯性，需要在有限的时间内快速补充电量，主要以快速充电为主。但是当下班暂停运营后，因为拥有了更充足的充电时间，为了降低充电成本，汽车用户通常会选择夜间的电价低谷时间进行常规充电，在这种方式下与私家车的充电规律具有相似性。

（3）公交车

公交车作为城市公共交通的主力车型，其充电规律也是影响城市电动汽车充电负荷的一个重要方面。通常情况下，公交车的充电方式分为两种，一种是快速充电，一种是分时段充电。

快速充电是公交车在日常运营过程中进行的充电方式。快速充电通常使用直流快充站，充电功率通常为几十千瓦至上百千瓦不等。快速充电可以在短时间内补充电池电量，因此能够在公交车使用期间进行补充充电，满足其运营需求。对于分时段充电，公交车的充电主要集中在夜间或者低峰期。由于公交车的使用时间比较长，且一般集中在白天高峰期，因此在白天期间电池电量会消耗较快。而在夜间或低峰期，公交车的使用较少，因此可以利用这个时间段对车辆进行充电，

以保证白天高峰期的使用。对于分时段充电的公交车来说，可以根据实际情况进行充电的规划，以避免对电网造成过大的压力，并适当的降低公交车充电的充电成本。

在本文中，除去商务车和公交车的快速充电需求，在充电桩运营平台下，私家车、商务车和公交车的充电规律都具有一定的可预测性和规律性。私家车主充电需求主要集中在夜间，因此在运营平台可以合理安排充电桩资源，避免资源浪费。商务车通常在工作日的白天使用，因此可以通过平台的调度来确保充电桩在非高峰期得到最大的利用率。公交车充电需求相对更为集中和频繁，需要在运营平台上制定相应的充电计划，避免过度占用充电桩资源。通过对不同类型电动汽车充电规律的分析 and 研究，充电桩运营平台可以实现有序充电，一方面可以降低充电成本，提高充电桩的利用率和服务效率，另一方面可以提高电网运行的安全性。

2.2.2 汽车用户的出行规律

在电动汽车的使用中，用户的出行规律都会直接影响到充电需求的大小和分布，而这些充电需求也反过来影响了电动汽车充电桩的运营。用户的出行规律主要有首次出行时间、最终返回时间和日行驶里程，研究这些出行规律对于充电桩平台的运营至关重要。

首先，首次出行时间和最终返回时间是影响充电负荷的两个重要因素。例如，在早上上班高峰期，大量的私家车会在同一时间段内上路行驶，而在晚上下班高峰期，这些私家车又会集中在这段时间内回家开始充电，这样的充电负荷高峰期会对充电设施的使用和电网的运行造成很大的压力。对于商务车，他们的最早出行时间和最后返回时间较为分散，对充电负荷的压力也相对较小。公交车的运营时间一般都比较长，从凌晨一直到深夜，在这段时间即使是充电也大都会选择快速充电来保证自己的使用需求，只会在深夜停止运营后会选择常规充电方式，避开了充电负荷的高峰期。

其次，日行驶里程也会对充电负荷产生影响。一般来说，私家车的日行驶里程相对较短，因此其充电的时长相对较短，而出商务车和公交车的日行驶里程相对较长，所需要的充电时间分布比较长。

本文假设用户在驾驶电动汽车出行时和燃油汽车具有相同的出行规律，以美国交通部对美国家庭 2017 年出行的调查数据^[45]为样本，通过 Matlab 软件进行拟合电动汽车的出行规律概率模型。

(1) 首次出行时间

每个家庭车辆的首次出行时间统计数据如图 2-3 所示。

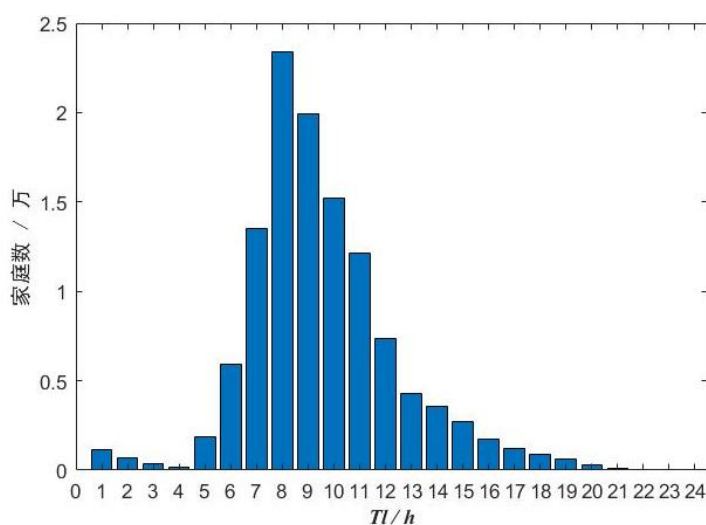


图 2-3 首次出行时间的统计数据图

Figure2-3 Graph of first leave time statistics

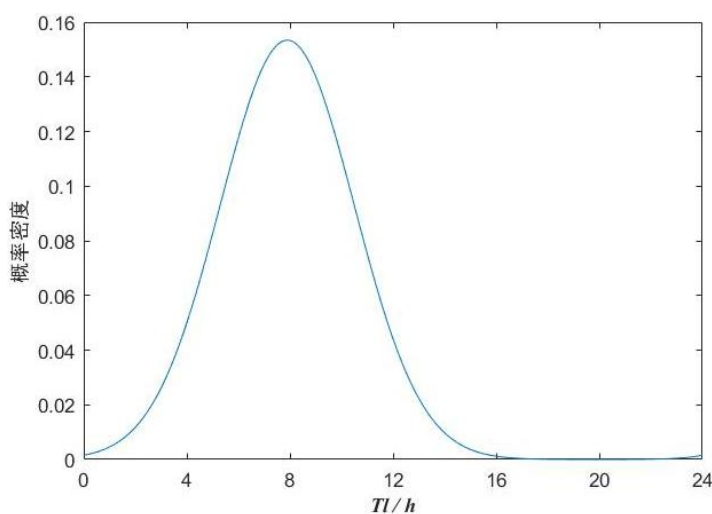


图 2-4 首次出行时间的概率密度分布

Figure2-4 The probability density distribution of first leave time

从图 2-3 可以看出，汽车用户一天中的首次出行时间主要集中在上午 7-11 时，将该统计数据以正态分布模型^[46]进行函数拟合，汽车用户的首次出行时间 T_l 的概率密度函数具体如式(2-1)，具体分布如图 2-4 所示。

$$f(T_l) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_l} \exp\left[-\frac{(T_l - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2}\right], & 0 \leq T_l < \mu_l + 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_l} \exp\left[-\frac{(T_l - 24 - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2}\right], & \mu_l + 12 \leq T_l < 24 \end{cases} \quad (2-1)$$

其中， $\mu_l = 7.893$ ， $\sigma_l = 2.601$ 。

(2) 最终返回时间

每个家庭车辆的最终返回时间统计数据如图 2-5 所示。

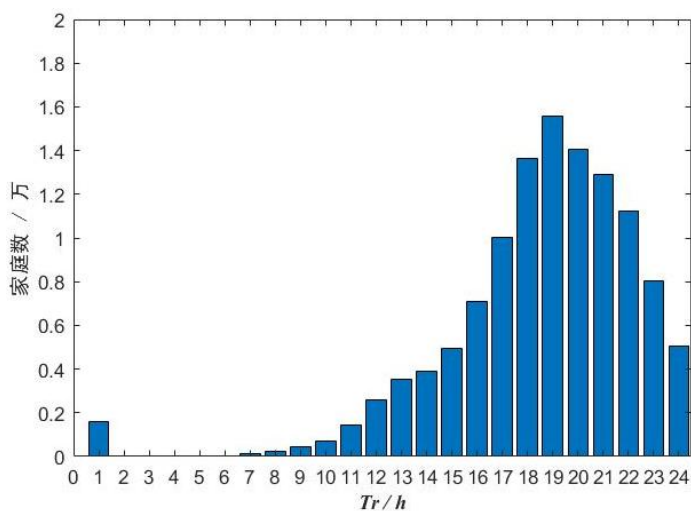


图 2-5 最终返回时间的统计数据图

Figure2-5 Graph of last return time statistics

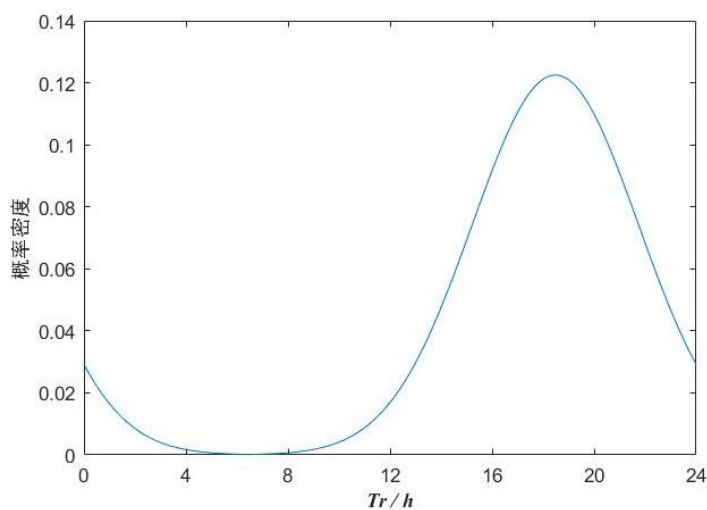


图 2-6 最终返回时间的概率密度分布

Figure2-6 The probability density distribution of last return time

从图 2-5 可以看出，汽车用户一天中的最终返回时间主要从 12 时后开始增长，在 18-20 时处于高峰状态，将该统计数据以正态分布模型进行函数拟合，汽车用户的最终返回时间 T_r 的概率密度函数具体如式(2-2)，具体分布如图 2-6 所示。

$$f(T_r) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left[-\frac{(T_r + 24 - \mu_r)^2}{2\sigma_r^2}\right], & 0 \leq T_r < \mu_r - 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left[-\frac{(T_r - \mu_r)^2}{2\sigma_r^2}\right], & \mu_r - 12 \leq T_r < 24 \end{cases} \quad (2-2)$$

其中， $\mu_r = 18.482$ ， $\sigma_r = 3.257$ 。

(3) 日行驶里程

每个家庭车辆的日行驶里程统计数据如图 2-7 所示。

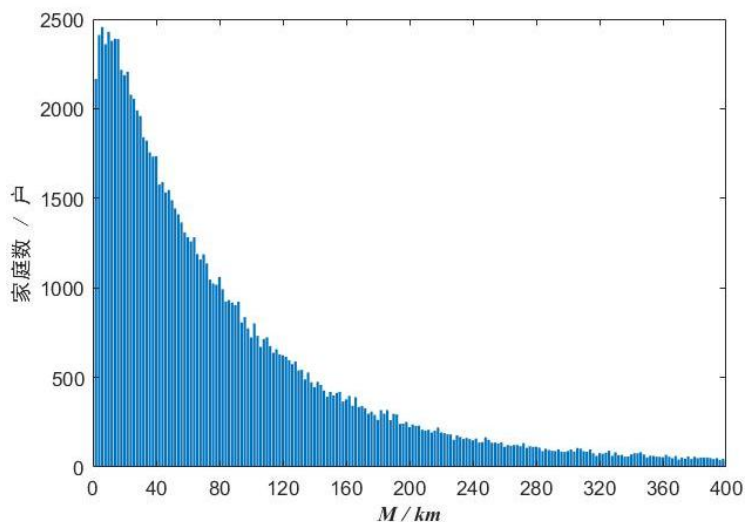


图 2-7 日行驶里程的统计数据图

Figure2-7 Graph of daily mile statistics

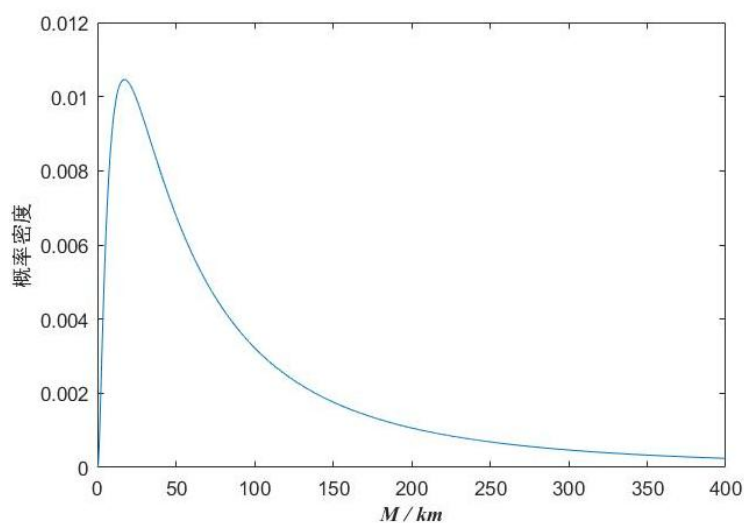


图 2-8 日行驶里程的概率密度分布

Figure2-8 The probability density distribution of daily mile statistics

从图 2-7 可以看出，大部分汽车用户一天的行驶里程在 40km 以内，然后随着里程的增加相应的家庭数也在逐渐减少，将该统计数据以对数正态分布模型进行函数拟合，汽车用户的日行驶里程 M 的概率密度函数具体如式(2-3)，具体分布如图 2-8 所示。

$$f(M) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m M} \exp\left[-\frac{(\ln M - \mu_m)^2}{2\sigma_m^2}\right] \quad (2-3)$$

其中, $\mu_m = 4.095$, $\sigma_m = 1.365$ 。

2.3 电力系统相关政策对充电负荷的影响

电动汽车的普及和充电需求的增加,对电力系统提出了新的挑战。除了汽车用户的出行规律,电力系统的一些政策也会对电动汽车的充电负荷产生一些影响。本文将重点讨论两个方面,即充电桩的安装位置和数量,以及汽车用户对电价变化的需求响应。

2.3.1 充电桩的安装位置及数量

随着电动汽车的普及,充电桩的安装数量迅速增加,电动汽车的充电负荷也在逐年增加。对于配电网而言,如何解决与日俱增的充电负荷跟居民想要好充电、充满电的矛盾将会是一大挑战。因此,充电桩的接纳能力成为了电力系统需要考虑的因素之一^[47]。

配电网的充电桩接纳能力通常由两个因素决定:变电站容量和线路容量。变电站容量指的是变电站供电能力的大小,它是整个配电网的源头。在某些情况下,变电站容量的大小可能限制了配电网中充电桩的安装数量。线路容量指的是线路的负荷能力,它可以通过改变线路容量或者增加线路数量来提高。

另一个影响充电桩安装位置和数量的因素是充电负荷的分布。在配电网中,充电桩的安装位置和数量需要考虑到负荷的分布情况。通常情况下,充电桩应该尽可能地分布在整个配电网中,而不是集中在某一个区域。这是因为如果充电桩集中在某一个区域,就会导致该区域的负荷过大,可能会对该区域的供电造成影响。相反,如果充电桩分布均匀,可以使得负荷更加平均,减少对配电网的影响。

另外,电力系统还需要考虑充电桩的安装数量与充电负荷之间的关系。充电桩的安装数量和分布应该根据不同地区的电动汽车数量和出行规律来确定。例如,一些地区的私家车较多,而一些地区则以商务车和出租车为主。此外,充电桩的数量也应该根据电动汽车的使用需求来确定,比如每天行驶里程和充电需求等。因此,在制定充电桩的安装计划时,应该充分考虑到充电负荷的分布和需求,以实现充电负荷的平衡。

总之,配电网的充电桩接纳能力与充电桩的安装位置和数量密切相关。通过合理的规划和设计,电力系统可以满足电动汽车充电的需求,并保证充电负荷的平衡分布,从而实现可持续发展。

2.3.2 汽车用户对电价变化的需求响应

需求响应是电力需求响应的简称，主要是指电力用户根据电力系统的直接补偿或者电价调整等信号，通过相应的调整用电习惯，使用户的电力需求响应电力供应，从而实现电网稳定运行，抑制用电成本上升的行为^[48]。

这种响应行为会对电动汽车充电负荷产生重要影响。当电价较低时，汽车用户更倾向于选择在低谷时段进行充电，以获得更低的充电成本。这就意味着在低谷时段，电动汽车充电需求将会增加，电动汽车充电负荷将会增加。相反，当电价较高时，汽车用户可能会减少对电动汽车的充电需求，或者将充电时间转移到电价较低的时段。在实际的充电过程中，电价变化的影响也要考虑到充电桩的智能化管理和控制。通过充电桩的远程管理和控制，可以根据电价变化情况，智能调整充电策略，将充电负荷更加合理地分配到不同的时间段。这种智能化管理和控制的方法不仅能够提高充电桩的接纳能力，不仅可以满足电动汽车用户的出行需求，同时也能够提高充电效率，降低充电成本，为电动汽车的推广和普及提供更好的支持^[49]。

2.4 本章小结

本章以电动汽车的充电特性、电动汽车用户的出行模式和电力系统的相关政策，展开分析了这三个关键因素对电动汽车充电负荷的影响。首先是电动汽车的充电特性，常规充电的充电方式相对于快速充电和机械充电方式，虽然充电速度慢，但是充电时间跨度长，充电功率也较小。然后比较了不同种类动力电池的性能，并详细介绍目前市面上主流的锂离子电池充电特性，通过充电曲线可以得出其充电过程可以看作是一个恒功率充电。电动汽车用户的出行模式主要有车辆用途、出行规律两方面，不同车辆用途在充电时间的分布上也不尽相同，私家车主要集中在非工作时间进行充电，而商务车和公交车主要在其非运营期间进行充电。通过对 NHTS 的 2017 年调查数据进行统计拟合，得出了汽车用户在一天中的首次出行时间、最终返回时间、日行驶里程的概率密度分布，为后续进一步研究充电负荷模型提供了支持。最后，在充电桩运营平台场景下，电力系统的相关政策也会对平台的运营产生影响，主要体现在充电桩的安装位置、数量以及充电时的电力价位，从而间接的影响电动汽车的充电负荷。

3 电动汽车无序充电负荷研究

电动汽车的普及给电力系统带来了新的挑战,其中之一是无序充电对电网运行的影响。无序充电是指车主没有事先安排充电时间,而是在任意时间和地点充电的行为。这种行为所叠加的负荷导致了电网运行的不确定性和不稳定性,使得电网规划和管理变得更加复杂。为了解决这一问题,需要对无序充电负荷对电网运行的影响进行深入研究,本文主要以无序充电负荷对输电网、配电网的影响进行研究。然后,为了具体化这些影响,本研究将采用蒙特卡洛方法建立电动汽车充电负荷模型,通过对充电时间的转换和无序充电负荷计算,设计具体的算例,实现对无序充电行为的仿真分析,探究其对电网运行的影响,通过对比不同渗透率下的充电负荷曲线,得出无序充电对电网运行的影响及解决方案,为充电桩运营平台应对电力系统政策的规划和管理提供理论和实践支持。

3.1 电动汽车充电负荷对电网运行的影响

随着电动汽车等新能源汽车的普及,分布式的、随机性的充电负荷也随之增加,这种充电负荷的充电行为难以预测和调控,将会对电网的运行造成一定的影响。、本节将重点介绍无序充电负荷对输电网、配电网的影响。

3.1.1 电动汽车充电负荷对输电网的影响

电动汽车无序充电负荷对输电网的影响是间接的。随着汽车市场上电动汽车的渗透,必将引起充电负荷的增长,而充电负荷的时空随机性将主要对输电网的安全、经济运行以及输电网的规划产生影响^[14]。文献[50]基于北美 13 个 NERC 区域进行建模,使用 ORCED 模型来预测电动汽车的市场渗透率对电力需求、供应、电源结构、电价以及相应的排放情况等方面的潜在影响。该研究对 7 种不同的场景进行分析表明,随着电动汽车的不断渗透,会使得每个区域都需要进行额外的电源建设或者调整电力市场政策来应对电动汽车入网后电力需求的增加。文献[51]以市场充分满足电动汽车的自然增长出发,研究了美国佛蒙特州电动汽车无序充电负荷对输电网的影响。研究表明,该州电网虽然可以支持 10 万辆电动汽车夜间充电,但是因为用户充电规律的随机性和电动汽车即插即充性,使得充电负荷也会叠加到夜间的负荷高峰期。文献[52]研究了大规模电动汽车充电负荷对某城市输电

网的影响，仿真结果表明，选择合理的充电策略后并不会引起该城市的输电线路产生过载现象。

总体来说，从目前的供电形势来说，中国的发电资源相对丰富，并且考虑到输电网的主要作用是向配电网供电，并且不与电动汽车充电负荷发生直接的交互，所以电能供应不会成为主要矛盾。

3.1.2 电动汽车充电负荷对配电网的影响

电动汽车充电负荷对电网运行的影响主要集中在配电网层面，相关文献^[53-54]对此有过总结。随着电动汽车的渗透率增大，将会有越来越多的电动汽车接入电网，进行无序的充电，充电负荷随机地叠加在在原有基础负荷的基础上，特别是在用电高峰期，会使得电网负荷“峰上加峰”，对配电网产生巨大影响。在充电负荷对配电网的影响方面的研究，主要涉及对配电网的电能质量、可靠性和运行经济性等方面^[14]，如图 3-1 所示。

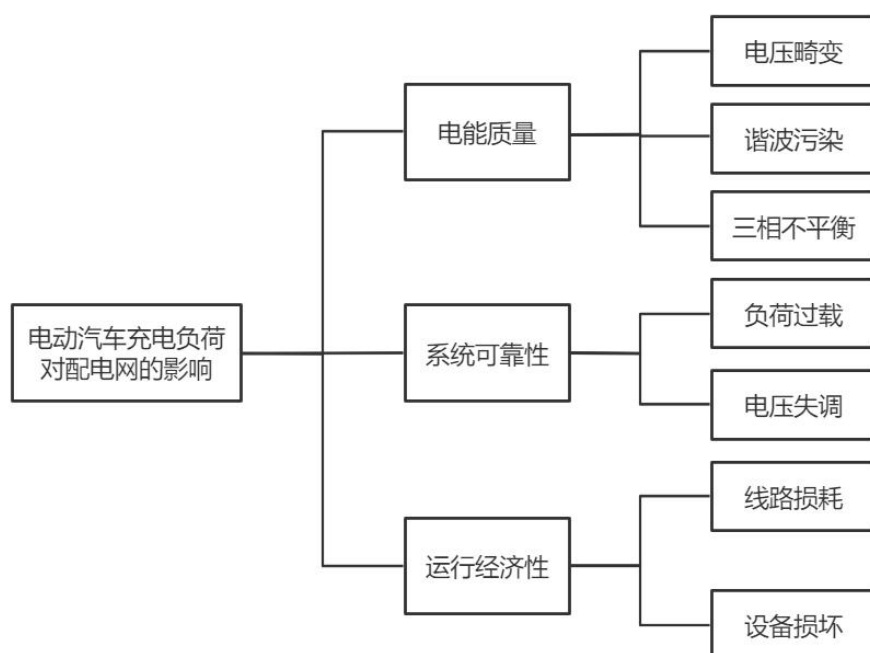


图 3-1 电动汽车充电负荷对配电网的影响

Figure3-1 The influence of EV load on distribution network

(1) 对电能质量的影响

充电负荷对配电网电能质量的影响主要是使配电网电压产生畸变^[55-56]、对配电网产生谐波污染^[57]以及三相不平衡^[58]。电动汽车的充电不论是交流充电还是直流充电方式，都需要经过充电机，如图 3-2 和图 3-3 所示，而充电机是由大量电

力电子元器件构成的非线性设备，当正弦电流输入到非线性设备后，输出电流会产生畸变，非正弦的输出电流势必会对电网产生谐波污染。具体分析如下：

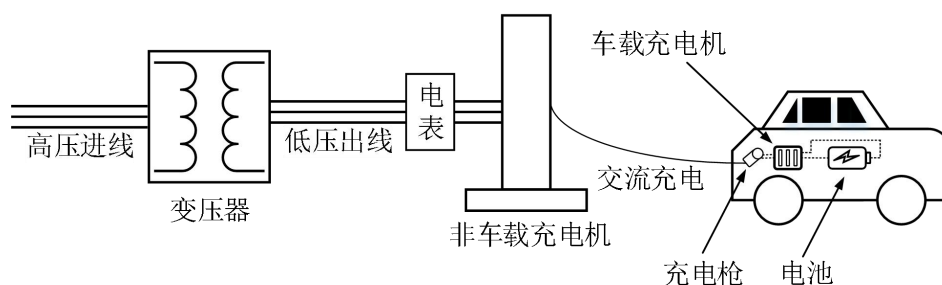


图 3-2 电动汽车交流充电示意图

Figure3-2 AC charging diagram of EV

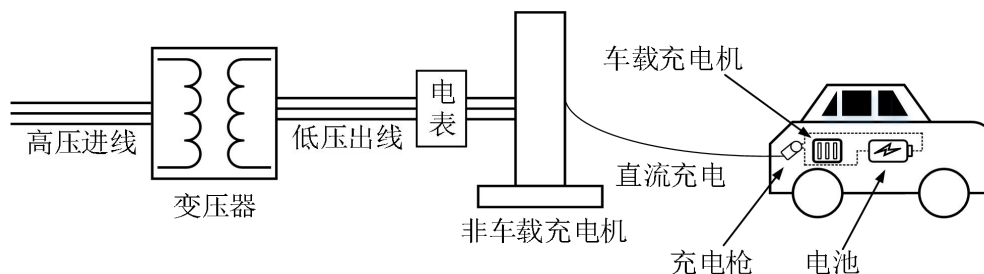


图 3-3 电动汽车交流充电示意图

Figure3-3 DC charging diagram of EV

首先对于周期为 $T = 2\pi / \omega$ 的非正弦波电流波形 $i(\omega t)$ 进行傅里叶级数分析，将非正弦电流分解成多种正弦波形：

$$i(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (3-1)$$

式中：

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d(\omega t) \quad (3-2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (3-3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \sin n\omega t d(\omega t) \quad (3-4)$$

将式(3-1)变形后：

$$i(\omega t) = i_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (3-5)$$

式中：

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (3-6)$$

$$\varphi_n = \arctan\left(\frac{a_n}{b_n}\right) \quad (3-7)$$

$$a_n = c_n \sin \varphi_n \quad (3-8)$$

$$b_n = c_n \cos \varphi_n \quad (3-9)$$

$$i_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(t) dt \quad (3-10)$$

在式(3-5)中, i_0 表示的是非正弦电流在一个周期内的平均值, 一般视作一个恒定的直流分量。频率为 $\omega / 2\pi$ 的分量称为基波, 频率为 $\omega / 2\pi$ 的整数倍分量称为谐波。在《电能质量公用电网谐波》(GB/T 14549-1993) 中规定了表征谐波含量的指标, 通常用 HR 表示谐波的含有率, 用 THD 表示总谐波畸变率。

n 次谐波的电压含量指标如下式所示:

$$HRU_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100\% \quad (3-11)$$

$$U_h = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \cdots + U_n^2} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \quad (3-12)$$

$$THD_u = \frac{U_h}{U_1} \times 100\% \quad (3-13)$$

其中, HRU_n 表示 n 次谐波的电压含有率, U_n 表示 n 次谐波电压的有效值, U_1 表示基波电压的有效值, U_h 表示总谐波电压含量, THD_u 表示谐波电压的总畸变率。

同样的, n 次谐波的电流含量指标为:

$$HRI_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\% \quad (3-14)$$

$$I_h = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \cdots + I_n^2} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (3-15)$$

$$THD_i = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (3-16)$$

其中, HRI_n 表示 n 次谐波的电流含有率, I_n 表示 n 次谐波电流的有效值, I_1 表示基波电流的有效值, I_h 表示总谐波电流含量, THD_i 表示谐波电流的总畸变率。在三相对称的非线性电路中, 电路的功率因数和谐波电流的总畸变率的关系如下式所示:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (3-17)$$

当有越来越多的电动汽车充电负荷接入电网对线路产生谐波污染时, 谐波电流的总畸变率越大, 使得电路的功率因数就越低。

(2) 对系统可靠性的影响

电动汽车的普及和充电需求的增加对配电网的系统可靠性产生了巨大的挑战。在高峰期,大量电动汽车充电负荷的集中对配电网的负荷造成了极大的压力,可能导致负荷过载、电压失调等问题,从而影响了配电网的系统可靠性。文献[59]对此有过相关的总结。电动汽车充电负荷的集中可能导致配电变压器和线路过载,这是影响配电网系统可靠性的一个重要因素。由于电动汽车充电的电流较大,可能会导致配电变压器和线路的额定容量超过极限,造成过载。如果这种情况发生在高峰期,将会对供电公司造成巨大的负担,影响配电网的正常运行。电动汽车充电负荷的突然增加也可能导致配电网电压失调,这是另一个影响配电网系统可靠性的重要因素。由于充电负荷对电网电压的影响,可能会导致配电网电压出现波动,从而影响配电网系统的正常运行。

(3) 对运行经济性的影响

在电动汽车充电负荷对配电网运行经济方面的影响方面,主要是配电网压器等设备的寿命和配电网网络线路损耗^[60-61]的影响。文献[62]在研究中探讨了电动汽车充电负荷对配电变压器寿命的影响,通过仿真结果分析得出,电动汽车的接入将减损配电变压器的使用寿命,特别当电动汽车用户使用 240V 充电并且电动汽车的充电负荷是随机无序时,对压器寿命的负面影响将会更加严重。对变压器寿命影响的研究只停留在定性分析的层面上,还未形成电动汽车充电负荷对变压器影响需考量的具体指标体系^[63]。另一方面,配电网中的线路、变压器等电气设备都具有一定的电阻、电感、电容等等因素,这些因素会导致电能输送过程中发生损耗,即网损。充电负荷对配电网产生的影响会导致电网负载的变化,进而影响电网的电压、电流等参数,从而导致网损的增加。

3.2 基于蒙特卡洛方法的电动汽车充电负荷模型

随着电动汽车的普及,其充电负荷将逐渐成为电力系统中一个重要的负荷。而充电负荷对电网运行的影响是显而易见的。为了具体分析这些影响,需要对电动汽车充电负荷进行建模和研究。由于电动汽车充电负荷的随机性和不确定性,传统的建模方法难以应对,因此需要采用更加精细和复杂的建模方法来描述电动汽车的充电负荷。在这里,我们将使用蒙特卡洛方法来建立电动汽车充电负荷模型。

3.2.1 蒙特卡洛模拟方法介绍

蒙特卡洛模拟 (Monte Carlo Simulation) 方法是一种基于随机数的数值计算方法, 是一种依托于计算机强大计算能力的数值方法, 广泛应用于各种科学和工程领域。在电动汽车充电负荷建模中, 蒙特卡洛方法可以用于模拟电动汽车的充电时间和充电量^[64-65]。蒙特卡洛模拟方法的基本思想是根据实际问题的随机特性, 针对影响该问题的相关因素建立概率模型, 用计算机进行多次抽样统计, 将样本的平均值作为实际问题的近似解, 抽样次数越多, 得到的解就越精确。

设 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 是 n 个互相独立且同分布的随机变量, 它们的概率密度函数是 $f(X)$, 期望是 $E(X)$, 方差是 $D(X)$ 。根据大数定理, 当 n 足够大时, 样本均值近似等于期望值, 即:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left\{\left|\bar{X} - E(X)\right| \leq \varepsilon\right\} = 1 \quad (3-18)$$

式中, $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k$ 为样本的均值, ε 为任意小的正数。

蒙特卡洛模拟方法的具体步骤为:

- (1) 确定问题的数学模型, 并将其转化为一个概率分布函数;
- (2) 通过随机抽样的方式, 根据其分布函数抽取符合实际问题的随机变量;
- (3) 通过多次重复步骤 2, 得到该随机变量的多个取值, 并取得均值;
- (4) 对结果进行统计分析, 得到所求问题的近似解, 即无偏估计量。

3.2.2 电动汽车无序充电负荷建模

无序充电负荷模型的建立是一个复杂的过程, 需要考虑到许多因素的影响, 例如充电需求电量、充电时间、充电功率、充电设备的数量和类型等。只有在考虑到这些因素的影响后, 才能准确地建立充电负荷模型, 并对电动汽车充电负荷对电网的影响进行评估和预测。

在国家标准中规定, 当电动汽车的电池充满并达到一定电量后, 充电桩应该停止充电服务。尽管此时充电枪仍插在车辆的充电口上, 但是充电桩已经进入非充电状态, 此时充电桩一般会一直保持电源接通状态, 以监测电动汽车的状态并等待下一次充电任务的到来。因此, 在充电桩处于非工作状态时, 充电桩所消耗的电量可以忽略不计。本负荷是指在电网中一直存在的负荷, 不随时间变化而变化, 其功率稳定, 可以预测和计划。因此, 对于充电桩非充电状态下的功率消耗, 可以作为基本负荷加以考虑和处理, 以确保电网的稳定运行。对于整个充电负荷来说, 实际的充电桩工作功率才是对电网负荷曲线产生影响的主要因素。

在第二章中, 根据对锂离子电池在交流充电桩下充电特性的研究, 充电状态可以看作是恒功率充电, 因此电动汽车实际的充电时间是由充电需求电量和充电

功率等因素决定的。当一个电动汽车在充电桩开始充电前和充电结束后，它的电池荷电状态应该有如下约束：

$$SOC_b \geq SOC_{\min} \quad (3-19)$$

$$SOC_e \leq SOC_{\max} \quad (3-20)$$

式中， SOC_b 为电动汽车的初始荷电状态； SOC_{\min} 为电动汽车电池的最小荷电状态，一般来说电池的过度放电会缩短电池的寿命，并且汽车用户在用车时会主动在电池荷电状态较小时就及时充电，因此要求电动汽车 SOC_b 大于 SOC_{\min} ，本文取 $SOC_{\min} = 1$ ； SOC_e 为电动汽车结束充电时的期望荷电状态； SOC_{\max} 为电动汽车电池的最大荷电状态，也就是将电池充满时的荷电状态，即 $SOC_{\max} = 1$ 。

当电动汽车每次充满电进行出行返家后，电动汽车的荷电状态和出行里程满足以下关系：

$$SOC_b = SOC_e - \frac{M \cdot E_{100}}{100Q_B} \quad (3-21)$$

式中， M 是电动汽车的出行里程； E_{100} 为电动汽车的百公里耗电量； Q_B 为该电动汽车电池的总容量。

在电动汽车用户使用充电桩进行充电的实际情况下，可能会因为用户出行安排的变化，导致电动汽车可能还未充电至期望荷电状态便提前停止充电。为了满足电动汽车用户的出行需求，用户一般使用完电动汽车后便开始充电，因此电动汽车的实际充电时间取决于电动汽车用户首次出行时间到最终返回时间的时间间隔和电动汽车在首次出行时间之前电动汽车电池充满的时间间隔的最小值，即：

$$T_c = \min \left\{ T_l - T_r, \frac{(SOC_e - SOC_b) \cdot Q_B}{P_c \cdot \eta_c} \right\} \quad (3-22)$$

式中， T_l 为电动汽车用户的首次出行时间； T_r 为电动汽车用户的最终返回时间； SOC_e 为电动汽车结束充电时的期望荷电状态； SOC_b 为电动汽车的初始荷电状态； Q_B 为该电动汽车电池的总容量； P_c 为充电桩的充电功率； η_c 为充电桩给电动汽车电池的充电效率。

假设某个区域共有 N 辆电动汽车接入电网开始充电，则任意时刻 t 的电网需求总负荷为

$$P_t = P_{0,t} + \sum_{i=1}^N \xi_{i,t} \cdot P_c \quad (3-23)$$

式中， $P_{0,t}$ 为该区域在 t 时刻的基础负荷； P_i 为第 i 个充电桩的实际工作功率； $\xi_{i,t}$ 为第 i 个充电桩在时刻 t 的状态变量，当工作时值为 1，空闲时值为 0。

为建立电动汽车无序充电负荷模型，本文采用以充电桩数量、电动汽车用户的出行规律、电动汽车车辆类型、电池容量、充电功率等基础参量，利用蒙特卡

洛方法对充电负荷进行模拟分析。基于蒙特卡洛方法模拟无序充电负荷的算法流程如图 3-4 所示。

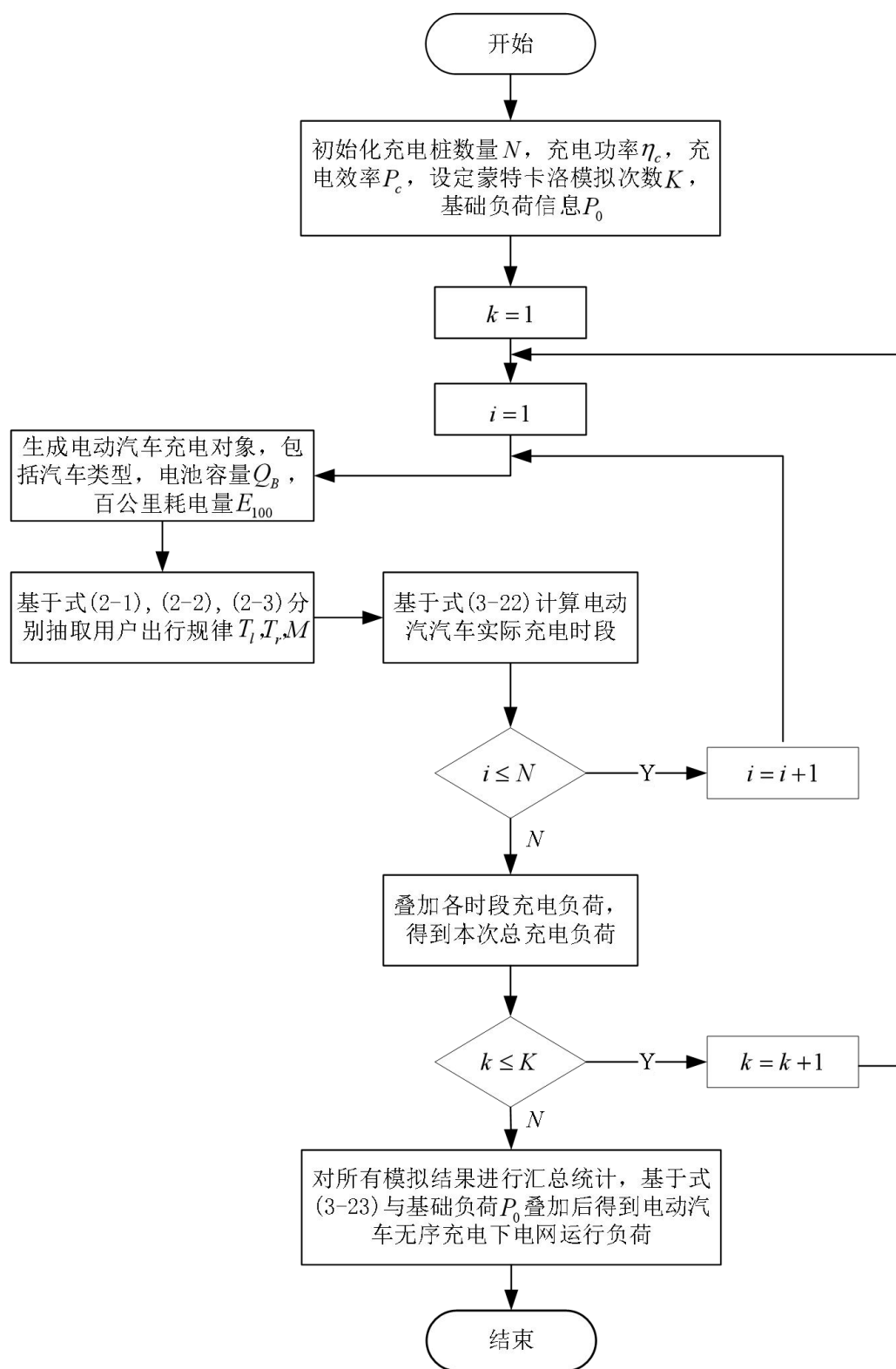


图 3-4 蒙特卡洛模拟充电负荷流程图

Figure3-4 Monte Carlo flow diagram of simulated charging load

具体步骤为：

- (1) 初始化充电桩数量 N ，充电桩充电功率 P_c ，充电桩充电效率 η_c ，各个时段基础负荷 P_0 等基础信息，设定蒙特卡洛模拟次数 K ；
- (2) 生成 N 个电动汽车充电对象，具体有电动汽车的类型，电池容量 Q_B ，百公里耗电量 E_{100} ，电动汽车首次出行时间 T_l ，最终返回时间 T_r ，日行驶里程 M ，其中 T_l 满足式(2-1)， T_r 满足式(2-2)， M 满足式(2-3)；
- (3) 基于式(3-22)计算充电电动汽车实际充电时长，以最终返回时间 T_r 作为开始充电时间，确定每个电动汽车的充电时段；
- (4) 计算并叠加各个时段的充电负荷，得到本次模拟的 N 辆电动汽车充电总负荷；
- (5) 重复步骤 2~4，得到 K 次模拟结果，对各时段的充电负荷取平均，将结果作为电动汽车无序充电负荷的近似解；
- (6) 基于式(3-23)对基础负荷和充电负荷进行汇总统计，得到具体的电网运行负荷曲线。

3.3 无序充电仿真算例分析

为了更好地分析无序充电对电网的影响，本节将通过仿真分析的方法展开，具体来说：一是算例参数设计，包括充电桩数量、充电功率、电动汽车类型、配电变压器电气参数负荷变化等参数；二是算例结果分析，包括无序充电对电网负荷曲线的影响、对电网运行的影响等方面进行深入分析。通过这些分析，本节旨在揭示无序充电对电网运行的影响机制，为后续的研究提供科学依据。

3.3.1 算例参数设计

本文选择充电桩运营平台场景下未来可能部署的某个区域作为研究对象，该区域的电网运行总负荷是由基础负荷和电动汽车充电负荷构成的。电力系统的调度需要进行精细的时间划分和计算，以便更准确地预测和控制负荷、发电和输电。为了方便研究，将一天分成 96 个时段，每个时段的长度为 15 分钟，这种划分方法能够提供足够的时间分辨率，以便对电力系统的响应进行更准确的监测和控制。此外，96 个时段的划分方法也被广泛应用于电力市场和电价计算，以便更好地管理电力供需平衡，实现合理的电价调整。则该区域配电网基本参数和某天中各时刻的基础用电负荷如表 3-1 和表 3-2 所示。

表 3-1 配电网基本参数

Table3-1 Basic parameters of distribution network

配电变压器容量	功率因数	效率	最大可用功
3200kVA	0.85	0.9	2448kVA

表 3-2 某天各时刻基础用电负荷

Table3-2 Regular electricity load of a day

时刻	负荷/kW	时刻	负荷/kW	时刻	负荷/kW	时刻	负荷/kW
00:00	1468	00:15	1426	00:30	1382	00:45	1242
01:00	1192	01:15	1198	01:30	1170	01:45	1144
02:00	1134	02:15	1130	02:30	1116	02:45	1092
03:00	1088	03:15	1080	03:30	1077	03:45	1080
04:00	1076	04:15	1054	04:30	1040	04:45	1040
05:00	1042	05:15	1040	05:30	1038	05:45	1060
06:00	1066	06:15	1102	06:30	1146	06:45	1187
07:00	1180	07:15	1262	07:30	1324	07:45	1334
08:00	1340	08:15	1344	08:30	1348	08:45	1360
09:00	1368	09:15	1390	09:30	1395	09:45	1406
10:00	1408	10:15	1420	10:30	1454	10:45	1474
11:00	1478	11:15	1480	11:30	1474	11:45	1478
12:00	1484	12:15	1474	12:30	1482	12:45	1494
13:00	1524	13:15	1536	13:30	1540	13:45	1536
14:00	1544	14:15	1548	14:30	1542	14:45	1538
15:00	1538	15:15	1546	15:30	1544	15:45	1550
16:00	1548	16:15	1560	16:30	1564	16:45	1578
17:00	1589	17:15	1618	17:30	1634	17:45	1644
18:00	1662	18:15	1673	18:30	1692	18:45	1716
19:00	1726	19:15	1735	19:30	1748	19:45	1760
20:00	1782	20:15	1780	20:30	1785	20:45	1784
21:00	1780	21:15	1783	21:30	1776	21:45	1760
22:00	1728	22:15	1706	22:30	1672	22:45	1634
23:00	1601	23:15	1567	23:30	1522	23:45	1490

假设该区域有 1200 辆汽车，基于本文所研究场景，该区域内所有电动汽车都选择常规充电方式使用交流充电桩进行充电，且选择特斯拉 MODEL3 作为私家车类型，比亚迪唐 EV 作为商务车类型，电动公交车一般都选择在公交车运营车站进行充电，不符合本文研究场景。两种电动汽车相应的基础参数如表 3-3 所示。这两种车型的动力电池都属于锂离子电池，根据第二章的研究种锂离子电池充电前后的荷电状态 SOC 变化范围和与交流充电方式下充电特性，可以将充电过程看作是恒功率充电，因此设定充电桩给电动汽车充电的工作功率 $P_c = 7\text{kW}$ 和充电效率 $\eta_c = 0.9$ 。

表 3-3 电动汽车参数

Table3-3 Electric vehicle parameters

电动汽车型号	电池容量/kWh	百公里耗电量 kWh/100km
特斯拉 MODEL3	60.5	10.88
比亚迪唐 EV	90.3	15.05

本节将通过表 3-3 所示的三个算例对电动汽车无序充电负荷进行建模，通过设置不同电动汽车渗透率与不同电动汽车充电特性来分析不同因素对充电负荷的影响。其中电动汽车渗透率（后面以渗透率简称）是指电动汽车数量在汽车总数中的占比。

表 3-4 各算例电动汽车数量

Table3-4 The number of electric vehicles in each example

仿真算例	渗透率	电动汽车总数/辆	特斯拉/辆	比亚迪/辆
算例一	30%	360	270	90
算例二	50%	600	450	150
算例三	50%	600	300	300

3.3.2 算例结果分析

在本节中，按照上一节设定的算例参数以及图 3-4 所示算法流程进行仿真，设定蒙特卡洛仿真次数 $K = 1000$ 。选取算例一蒙特卡洛模拟中某次抽样的电动汽车用户出行规律，绘制成如图 3-5 所示的三维散点热力图。

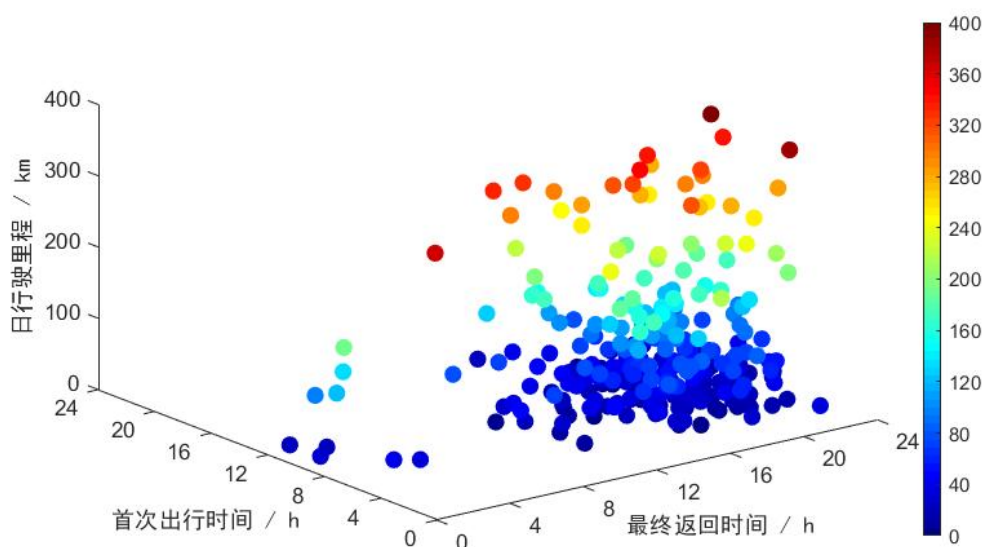


图 3-5 算例一模拟用户出行规律散点热力图

Figure3-5 The scatter heat map of example one

通过图 3-5 分析可知, 用户的出行规律分布具有一定的聚集性, 首次出行时间聚集在上午 8 点左右, 最终返回时间聚集在下午 19 点左右, 且日行驶里程以短程出行居多, 因此蒙特卡洛模拟抽样的用户出行规律符合式(2-1)-(2-3)的概率密度函数。基于以上分析, 使用图 3-4 所示的蒙特卡洛蒙特卡洛模拟无序充电负荷方法, 分别对表 3-4 中的三个算例进行模拟, 得到三个算例下该区域一天 24 小时用电负荷曲线图如图 3-6 所示。

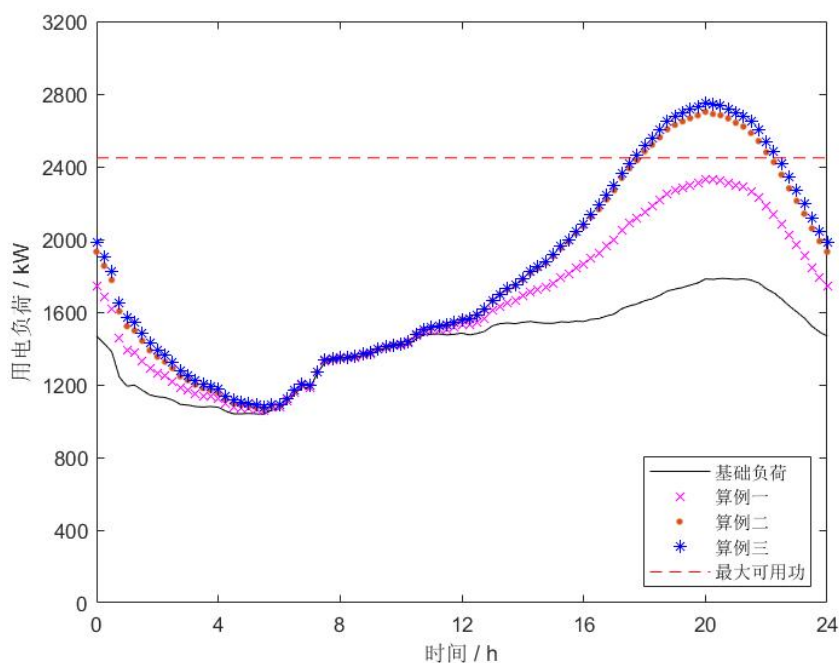


图 3-6 24 小时用电负荷曲线图

Figure3-6 24 hours electricity load curve

由图 3-6 分析可知, 电动汽车无序充电的充电负荷与该区域的基础负荷高峰期基本都发生在 18 时-22 时, 而在基础负荷的低谷期时, 几乎没有电动汽车进行充电, 随着充电负荷高峰叠加到基础负荷高峰, 使得该区域的用电负荷出现“峰上加峰”的现象, 对该区域的电网运行产生了严重的影响。

表 3-5 电网运行负荷指标

Table3-5 Indicators of power grid operating load

仿真算例	最小负荷/kW	最大负荷/kW	峰谷差率	负荷标准差
基础负荷	1038	1785	41.85%	232.88
算例一	1055	2333	54.78%	404.11
算例二	1067	2702	60.51%	527.24
算例三	1077	2750	60.84%	541.91

基础负荷和三个算例下的各项电网运行负荷指标如表 3-5 所示。通过对比算例一和算例二可知, 在该区域配电网原有的容纳能力基础上, 该区域能够接受相当数量电动汽车的充电负荷。但是随着电动汽车渗透率的增大, 区域内的最大负荷超过了配电网的最大可用功, 必将会引起区域内输电线路的过载, 威胁电网的安全运行。通常情况下, 发电机组等设备的利用率与峰谷差率是有直接联系的, 一般根据电网运行的最大负荷来选取电网最大容量。如果为此而投入更多发电机组和设备来满足负荷高峰期的用电需求, 则在低谷时期, 这些机组和设备将会处于待机或低载状态, 使得它们并没有得到充分利用, 产生了资源的浪费。此外, 因为电动汽车充电属于非线性负荷, 渗透率的增加也会导致充电负荷对电网的谐波污染进一步增加, 根据式(3-17), 使得配电网功率因数降低。另一方面, 随着接入电动汽车充电负荷后, 电网负荷的峰谷差率进一步加大, 电网负荷的波动也更加严重, 可能会导致电网运行电压和频率等参数偏离正常范围和电力系统网损的增加。因此, 电动汽车充电负荷将会对电网运行的电能质量、系统可靠性和运行经济性产生不可避免的负面影响。

通过分析算例三可知, 相比于电动汽车的充电数量, 不同种类电动汽车的电池性能对充电负荷产生的影响就相形见绌了, 虽然充电特性稍差的电动汽车数量增多时, 也会引起电网负荷的峰值和标准差增大, 但是与充电负荷规模效应相比, 影响非常有限。此外, 不同汽车厂商为了使自家的产品更具竞争力, 也会促使未来不同电动汽车的电池性能不会有太大差距, 这也就使得电动汽车本身的充电特性并不会成为影响电网运行的主要因素。

3.4 本章小结

本章首先分析了电动汽车充电负荷对电网运行的影响，以对输电网和配电网两个方面展开。为了解决这些问题，需要对无序充电负荷进行建模来定性或定量分析，为后续提出相应的管理和调控策略提供科学依据，以保障电网的安全稳定运行。基于蒙特卡洛方法在模拟随机问题上具有较好的效果，因此本章选用该方法进行电动汽车充电负荷的建模。最后，通过设计三个仿真算例进行对比分析，得出结论：由于无序充电负荷的充电需求较大以及用户充电规律的聚集性和随机性，当充电负荷叠加到基础负荷后，会导致负荷曲线“峰上加峰”和加大电网负荷波动，进而影响电网运行的电能质量、系统稳定性和运行经济性

4 基于双侧优化的有序充电策略研究

随着电动汽车的快速普及，充电负荷对电网运行的影响成为了限制其发展的主要因素之一。为了应对这些挑战，有序充电作为一种有效的解决方案被提出。有序充电是指根据电动汽车充电需求的优先级和时间窗口，对电动汽车进行智能调度，在保证电动汽车充电需求的基础下，尽可能的降低充电负荷对电网运行的影响以及提升用户的满意度。本章的研究路线是，首先通过对优化电网运行和降低充电费用的作用分析有序充电的可行性和意义；然后基于双侧优化的思想，从电网和用户两侧的角度出发，建立有序充电的多目标优化模型，并提出一种改进的粒子群优化算法来进行模型求解；最后，通过算例进行分析，验证所提出的有序充电策略的可行性和优越性。

4.1 有序充电的作用

根据上一章的研究，大量的电动汽车接入电网进行无序充电，往往会导致电网负荷“峰上加峰”的问题。

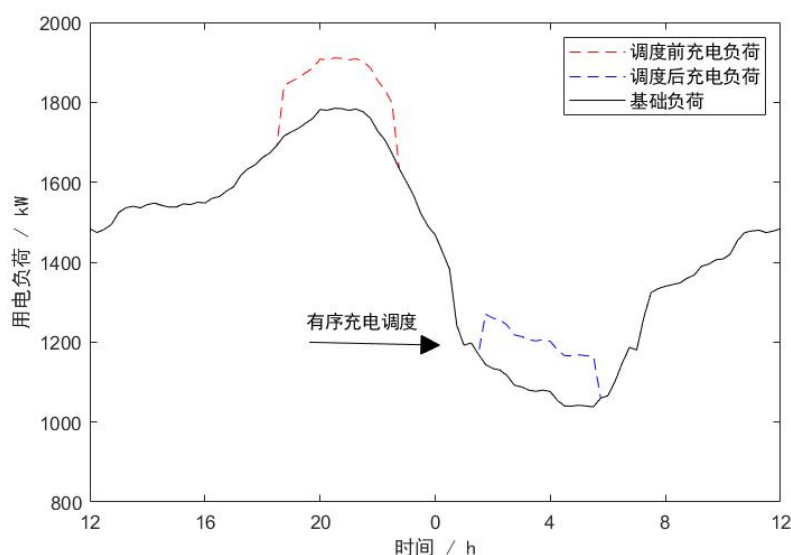


图 4-1 有序充电示意图

Figure4-1 Ordered charging schematic

假设现在有 20 辆电动汽车于下班后晚上 19 时开始充电，第二日早上 7 时出行用车，需要充电 4 个小时才能达到使用需求。通过 3.3 的算例可知，这部分充电负荷刚好叠加到了基础负荷的高峰期，且在晚上 23 时就已经结束充电，但是

距离第二日用车还有 8 个小时。通过基础负荷不难发现, 大概在凌晨 0 时后基础负荷就已经开始下降进入负荷低谷期, 直到 6 时左右负荷曲线才会再一次上升, 这段时间完全可以满足上述 20 辆电动汽车的充电需求, 如图 4-1 所示。为了解决“峰上加峰”问题, 可以通过有序调度的方式, 在保证车主的正常用车的情况下, 引导电动汽车在谷时段进行充电, 将充电负荷分散到配电网负荷的谷时段, 从而实现“削峰填谷”的效果。具体该过程示意图由此可以看出有序充电的可行性, 接下来将以有序充电对优化电网运行和降低充电成本的作用来具体分析其现实意义。

4.1.1 有序充电对优化电网运行的作用

首先, 有序充电能够使车辆充电负荷分散到配电网负荷的谷时段进行充电, 减少峰值负荷。对于输电网, 有序充电后可以避免因充电需求大量聚集在用电高峰期而导致的输电线路过载问题, 将负荷转移到低谷时段后, 不仅可以提高发电机组等设备的利用率, 还可以在不进一步扩大电网容量的情况下, 消纳更多的电动汽车接入充电。而对于配电网, 有序充电可以减少电网调度的压力, 避免因充电负荷的瞬时增加导致的电网频率、电压等指标的波动, 提高电网运行的系统稳定性。

另一方面, 有序充电能够优化电网负荷曲线, 使电网负荷曲线趋于平滑, 有助于降低负荷峰谷差率, 减少因负荷波动而带来的线路损失。下面将通过理论计算, 来分析负荷波动对线路损耗的影响^[60]。

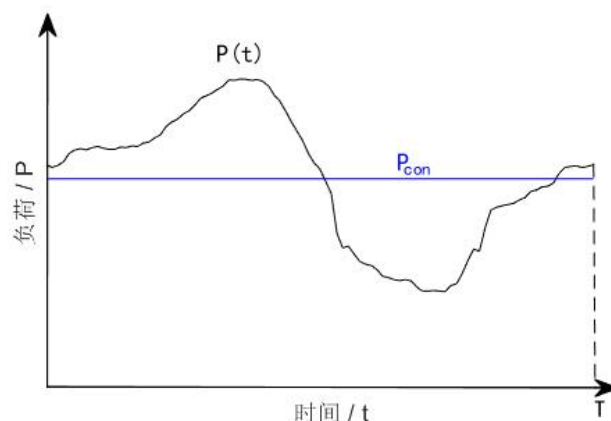


图 4-2 两条用电量相同的负荷曲线

Figure4-2 Two load curves with the same electricity consumption

如图 4-2 所示, 假设有一条存在波动的负荷曲线, 其功率为 $P(t)$, 另一条负荷曲线为理想的恒定负荷曲线, 功率值为 P_{con} , 在相同时间 T 内, 这两条负荷曲线虽然形状不同, 但是用电量相同, 如式(4-1)所示。

$$\int_0^T P(t)dt = P_{con} \cdot T \quad (4-1)$$

当电网稳定运行的时候，负荷的功率因数 $\cos \varphi$ 是不变的，且无功补偿充足，能够保证负荷的电压 U 也不变。设两条负荷曲线中的电路电阻都是 R ，则在时间 T 内，两条线上的有功损耗 W_{L1} 和 W_{L2} 分别为

$$W_{L1} = \int_0^T \left(\frac{P(t)}{\cos \varphi \cdot U} \right)^2 \cdot R dt \quad (4-2)$$

$$W_{L2} = \left(\frac{P_{con}}{\cos \varphi \cdot U} \right)^2 \cdot R \cdot T \quad (4-3)$$

那么这两条线路中有功损耗的差值 ΔW 为

$$\begin{aligned} \Delta W &= W_{L1} - W_{L2} \\ &= \int_0^T \left(\frac{P(t)}{\cos \varphi \cdot U} \right)^2 \cdot R dt - \left(\frac{P_{con}}{\cos \varphi \cdot U} \right)^2 \cdot R \cdot T \\ &= \frac{R}{(\cos \varphi \cdot U)^2} \cdot \left(\int_0^T P^2(t) dt - P_{con}^2 \cdot T \right) \geq 0 \end{aligned} \quad (4-4)$$

由柯西-许瓦兹不等式可以证明，当且仅当 $P(t) = P_{con}$ 时取等号。通过式(4-4)可以得到，当在用电量相同的情况下，恒定功率的负荷引起的有功损耗最小。但是在实际状态下，不可能出现恒定功率的负荷。因此为了研究不同曲线形状的负荷损耗影响因素，引入负荷方差 S^2 的概念，如式(4-5)所示，其中负荷 $P(t)$ 在时间 T 内的平均功率 $\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t)dt = P_{con}$ 。

$$\begin{aligned} S^2 &= \int_0^T (P(t) - \bar{P})^2 dt \\ &= \int_0^T (P(t) - P_{con})^2 dt \\ &= \int_0^T (P^2(t) - 2P(t) \cdot P_{con} + P_{con}^2) dt \\ &= \int_0^T P^2(t) dt - P_{con}^2 \cdot T \end{aligned} \quad (4-5)$$

联立式(4-4)、(4-5)可得负荷 $P(t)$ 的有功损耗 ΔW 为

$$\Delta W = \frac{R}{(\cos \varphi \cdot U)^2} \cdot S^2 \quad (4-6)$$

由式(4-6)可知，有功损耗 ΔW 与负荷的方差 S^2 呈正相关的关系，即负荷的波动越小，则引起的有功损耗 ΔW 就越小。因此，通过有序充电来进行“削峰填谷”和平抑负荷波动对于降低充电负荷对电网运行的影响来说具有重要的意义。

4.1.2 有序充电对降低充电费用的作用

峰谷分时电价是按照不同时段用电情况来制定电力价格的一种电价制度。该制度将一天分为高峰时段、平时段和低谷时段，电价在用电负荷高峰时段变高，

在用电低谷时段变低，这种定价方式从经济学的角度来讲能够较好地形成负荷边际成本价格理论，有利于实现电力资源的有效配置^[66]。北京市城区的一般工商业用电的电价表如表 4-1 所示。

表 4-1 北京市分时电价表

Table 4-1 Time-of-use electricity tariff of Beijing

分布区间	价格(元/kW·h)	所属时段
00:00-07:00	0.577	低谷时段
7:00-10:00	0.842	平价时段
10:00-15:00	1.139	高峰时段
15:00-18:00	0.842	平价时段
18:00-21:00	1.139	高峰时段
21:00-23:00	0.842	平价时段
23:00-24:00	0.577	低谷时段

为了分析充电负荷在分时电价制度下的分布情况，将 3.3 节中的算例三的充电负荷曲线，基于上述表中的时段进行划分后如图 4-3 所示。

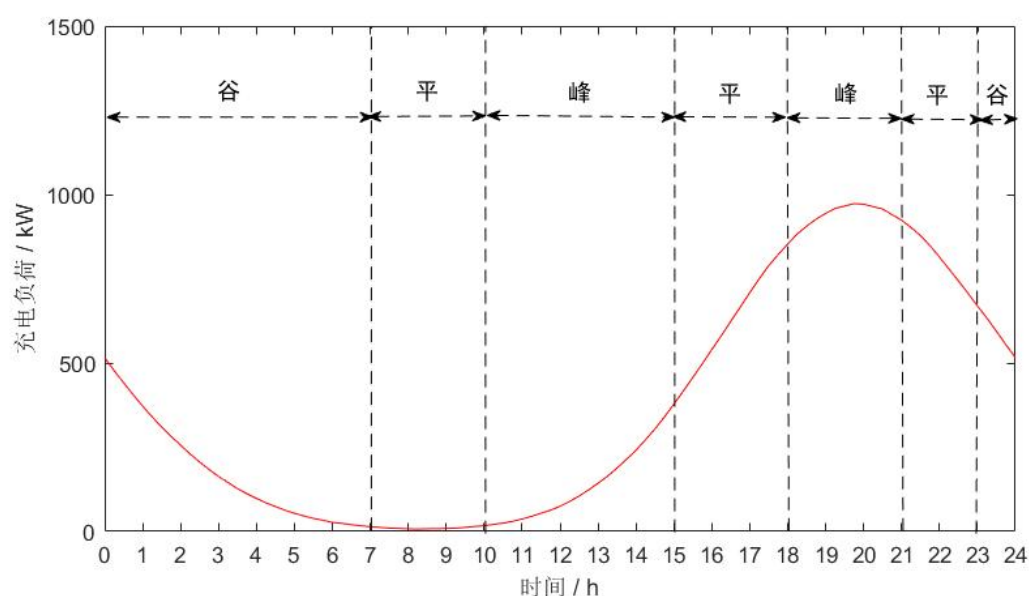


图 4-3 充电负荷时段划分

Figure 4-3 Charging load period division

从图 4-3 中可以得出，当电动汽车是无序充电时，汽车用户会在结束一天的行程后就将电动汽车连接到充电桩进行充电，这就导致电动汽车充电时间恰好与分时电价的高峰时段重叠，使得电动汽车的充电成本总体处于一个较高的水平。

若通过有序充电的方式，对电动汽车进行智能调度，在保证每辆车充电需求的情况下将充电负荷转移到电价低谷时段，这时的电价比高峰时段要低很多，同时，也可以降低电网负荷的波动，减少了电力运行设备的进一步投放，进一步降低了充电费用。

4.2 多目标双侧优化有序充电策略研究

在研究有序充电策略时，单一目标的优化往往难以满足实际需求，因为在实际充电场景中，存在多种不同的优化目标。对于充电桩运营平台，在制定充电计划时除了需要考虑尽量减小电动汽车充电负荷对电网运行的影响，优化电网运行，还要考虑电动汽车用户的充电需求和电动汽车的充电成本，提升用户满意度，以此增加平台的综合效益。因此充电计划需要在多个目标和电网用户双侧之间进行权衡，以达到综合最优的效果。

4.2.1 电网侧优化模型

根据第三章的分析可知，电动汽车的充电负荷会与基础负荷的峰值进行叠加，从而“峰上加峰”，导致出现更大的尖峰用电负荷，甚至超出了配电网的最大容量发生负荷过载、电压下降的现象，严重影响了电网运行的安全性和稳定性。为了实现对用电负荷的“削峰填谷”，建立以用电负荷峰谷差率最小的优化目标 f_1 ，具体如式(4-7)所示。

$$\begin{cases} f_1 = \min(\frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\min}}) \\ P_{\max} = \max(P_t) \\ P_{\min} = \min(P_t) \\ P_t = \sum_{i=1}^T (P_{0,t} + \sum_{i=1}^N \xi_{i,t} \cdot P_c) \end{cases} \quad (4-7)$$

式中， P_{\max} 为一天中用电负荷的峰值； P_{\min} 为一天中用电负荷的谷值； P_t 为一天中 t 时刻的用电负荷； T 为一天的划分时段数目，本文取 15min 为一个时段区间，即 $T=96$ 。

充电负荷还会加剧用电负荷的波动，增加电网稳定性和安全性的风险。在电力系统中，负荷方差是一个重要的指标，它描述了负荷变化的程度。负荷方差越小，负荷变化的越缓慢，电网运行就越稳定。此外，根据式(4-6)，线路上的有功

损耗与负荷的方差是呈正相关的，方差越小，损耗就越小。因此，为了降低负荷波动对电网运行的影响，建立以负荷方差最小的优化目标 f_2 ，如式(4-8)所示。

$$\begin{cases} f_2 = \min(\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_t - \bar{P})^2) \\ \bar{P} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_t \end{cases} \quad (4-8)$$

式中， \bar{P} 为一天中用电负荷的平均值。

在制定有序充电计划时，除了要考虑上述电网侧的优化目标，还要考虑电网侧的约束条件。电网容量约束是指在充电计划中，要保证电网运行的稳定性，避免因充电过程中充电负荷与基础负荷叠加后导致电网负荷过载，从而引起电力设备的损坏或引发严重事故。因此需要在制定充电计划时，将电网容量约束作为一项重要的约束条件，以保障电网的安全稳定运行。电网容量约束表达式如式(4-9)所示。

$$P_t = P_{0,t} + \sum_{i=1}^N \xi_{i,t} \cdot P_c < P_{grid} \quad (4-9)$$

式中， P_{grid} 为电网运行最大容量功率。

4.2.2 用户侧优化模型

在建立用户侧优化模型时，需要考虑用户的充电需求和充电成本，以提高用户的满意度和使用体验。首先，充电成本是用户决定是否参与有序充电的主要因素之一，因为用户总是希望在不影响次日出行的情况下，最大程度地降低充电成本。以电动汽车充电费用最低的优化目标 f_3 如式(4-10)所示。

$$f_3 = \min(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \xi_{i,t} \cdot P_c \cdot \Delta t \cdot q_t) \quad (4-10)$$

式中， Δt 为时段间隔长度，在本文中为 15min； q_t 为时刻 t 的电价。

其次，如果因为参加了有序充电，导致充电电量太低而影响了次日出行，将会极大的降低用户参与有序充电的意愿。电动汽车用户的优化目标是在满足电动汽车用户充电需求的前提下进行的，可作为约束条件，具体如式(4-11)所示。

$$\begin{cases} SOC_{need,i} \leq SOC_{e,i} \leq 1 \\ SOC_{e,i} = SOC_{b,i} + \frac{P_c \cdot \eta_c \cdot T_{c,i}}{Q_B}, \text{ 其中 } i=1,2,\dots,N \end{cases} \quad (4-11)$$

式中， $SOC_{need,i}$ 为第 i 辆电动汽车电池的需求荷电状态； $SOC_{e,i}$ 为第 i 辆电动汽车充电结束后电池的荷电状态； $SOC_{b,i}$ 为第 i 辆电动汽车充电开始前电池的荷电

状态,通过式(3-21)计算得出; $T_{c,i}$ 为第 i 辆电动汽车的充电时长,通过式(3-22)计算得出。

最后,有序充电对电动汽车进行调度充电的具体时间也应当满足充电开始时间在汽车用户最终返回时间之后,而充电结束时间应该在充电开始后,直至充电至所需电池电量的时间和用户次日首次出行时间之间。充电时间约束具体如式(4-12)所示。

$$\begin{cases} T_{r,i} \leq T_{b,i} \\ T_{b,i} + T_{c,i} \leq T_{e,i} \leq T_{l,i} \end{cases}, \text{其中 } i=1,2,\dots,N \quad (4-12)$$

式中, $T_{r,i}$ 为第 i 辆电动汽车的最终返回时间; $T_{b,i}$ 为第 i 辆电动汽车的充电开始时间; $T_{e,i}$ 为第 i 辆电动汽车的充电结束时间; $T_{l,i}$ 为第 i 辆电动汽车的首次出行时间。

4.2.3 电网侧与用户侧优化模型综合分析

电网侧和用户侧的优化模型都是针对电动汽车充电过程的不同问题而建立的。电网侧的优化目标是减少充电负荷对电网运行的影响,优化电网运行,提高电网容量的利用率,以避免电网负荷过载的发生和降低电力系统中的线路损耗。而用户侧优化模型的目标则是提高用户的满意度,在满足用户充电需求的前提下,降低充电费用。

作为充电桩运营平台,对电网侧和用户侧的优化目标进行综合考虑具有重要意义,可以帮助充电桩运营平台实现更加全面、平衡的运营目标。如果只考虑电网侧的优化目标,可能会忽略用户的实际需求和体验,导致用户满意度下降,甚至影响平台的利润。而如果只考虑用户侧的优化目标,则会忽略电网的实际承载能力和负荷情况,从而影响电网的运行情况,甚至引发严重的安全事故。

因此,综合考虑电网侧和用户侧的优化目标,可以在保证电网运行稳定性的前提下,更好地满足用户的充电需求和提高用户体验,避免在优化某一侧的时候,对另一侧产生不必要的负面影响,使得平台可以从电网和用户双侧获得双赢的局面。

在本中所建立的优化模型属于一个多目标优化问题,共有三个目标函数,但这些目标函数具有不同的单位、数量级和范围,因此需要它们归一化到相同的范围,以便进行综合分析和比较。归一化是指将目标函数转化为无量纲的值,这样就可以消除因量纲不同而导致的权重偏差,保证各目标函数在计算中具有相同的重要性,并可以将多个目标函数综合成一个综合目标函数,以便进行多目标决策。本文采用线型归一化方法对电网侧和用户侧的目标函数归一化,具体如下式所示。

$$\begin{cases} f_1 = \frac{f_1 - f_{1,\min}}{f_{1,\max} - f_{1,\min}} \\ f_2 = \frac{f_2 - f_{2,\min}}{f_{2,\max} - f_{2,\min}} \\ f_3 = \frac{f_3 - f_{3,\min}}{f_{3,\max} - f_{3,\min}} \end{cases} \quad (4-13)$$

对上述优化目标函数进行归一化处理后, 将其进行加权后, 得到多目标综合目标函数(4-14)。

$$f = \lambda_1 \cdot f_1 + \lambda_2 \cdot f_2 + \lambda_3 \cdot f_3 \quad (4-14)$$

式中, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为 f_1 、 f_2 、 f_3 的权重系数, 且满足 $\sum_{k=1}^3 \lambda_k = 1$ 。

4.3 基于改进的粒子群算法模型求解

在上述的有序充电优化模型中, 存在着多条复杂的约束条件和决策变量, 目标函数也具有非凸性和多峰性, 在进行模型求解算法研究的过程中, 选择一个适合的优化算法非常关键。本研究将采用粒子群算法来解决电网侧和用户侧的有序充电优化问题, 具有收敛速度快、并行性能好、对约束条件处理方便的特点, 在多目标优化问题中被广泛应用, 但因其容易陷入局部最优的缺点, 本文将对粒子群算法进行改进, 以期得到更优的充电策略。

4.3.1 粒子群算法介绍

粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法是一种基于群体智能的优化算法, 该算法是由 Eberhart 和 Kennedy 在 1995 年提出的一种基于群体智能的计算机智能算法, 算法思想源于对鸟群和鱼群群体运动行为的研究, 通过群体中的每个个体之间的相互合作来实现全局寻优^[67]。目前, 粒子群算法因其具有收敛速度快、收敛精度高的特点, 常被用于函数优化、组合优化等各种工程应用中, 是一种解决优化问题的强有力工具^[68-69]。

粒子群算法具有如下特点:

(1) PSO 算法具有全局搜索的能力, 能够在搜索空间中找到全局最优解或者接近最优解;

(2) PSO 算法的求解过程中, 每个粒子的位置和速度独立于其他粒子, 因此算法易于并行化, 可以有效地利用计算资源;

- (3) PSO 算法不需要目标函数的梯度信息，适用于非线性和非凸优化问题；
- (4) PSO 算法稳定性较高，受种群规模的影响较小；
- (5) PSO 算法可以有效地处理大规模、多目标优化问题；
- (6) PSO 算法进入运算后期时，收敛速度变慢，容易陷入局部最优。

粒子群算法中，粒子在搜索空间内的寻优方式如图 4-4 所示。

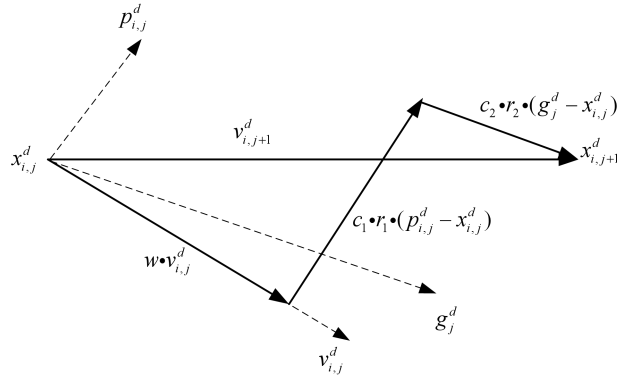


图 4-4 粒子寻优方式示意图

Figure4-4 Particle optimization schematic diagram

在图中， $x_{i,j}^d$ 表示粒子在第 j 代的位置，粒子在解空间搜索最优解的过程中，粒子下一代的位置 $x_{i,j+1}^d$ 受到粒子当前的速度 $v_{i,j}^d$ 、个人最优位置 $p_{i,j}^d$ 和种群最优位置 g_j^d 的影响。通过对自身历史最佳经验和种群中最优粒子的最佳经验进行学习后，改变自身下一次移动的方向和速度，从而确定下一次迭代的位置。通过不断地迭代学习，使整个种群的粒子逐渐趋于最优解。

假设，搜索空间的维度是 D ，粒子的种群规模是 N 。在上述寻优过程中，粒子群优化算法主要是在维护两个向量，即位置向量和速度向量。粒子的位置表示该粒子在搜索空间的位置，粒子的速度向量表示该粒子在搜索空间中的运动方向和速度。那么第 i 个粒子的位置和速度向量如式(4-15)和(4-16)所示。

$$X_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4-15)$$

$$V_i = (v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^D), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4-16)$$

粒子群算法还需要维护每个粒子在寻优过程中自身已经找到的最优位置，即个人最优位置，如式(4-17)所示。具体过程是，当粒子在解空间寻优找到某个位置的适应度值大于该粒子个人最优位置的适应度值，则对个人最优位置进行更新。

$$P_{best} = (p_i^1, p_i^2, \dots, p_i^D), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4-17)$$

另外，粒子群算法还需维护整个种群的最优位置向量，如式(4-18)所示，用来引导粒子种群向整个种群目前已经找到的最优区域靠近，该向量的维护过程与个人最优位置向量的更新方式类似。

$$G_{best} = (g^1, g^2, \dots, g^D) \quad (4-18)$$

通过不断的维护个体最优和种群最优位置向量，粒子根据式(4-19)和(4-20)来更新速度和位置。

$$v_{i,j+1}^d = w \cdot v_{i,j}^d + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{i,j}^d - x_{i,j}^d) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_j^d - x_{i,j}^d) \quad (4-19)$$

$$x_{i,j+1}^d = x_{i,j}^d + v_{i,j+1}^d \quad (4-20)$$

式中， w 为惯性权重； c_1 为个体学习因子； c_2 为社会学习因子； r_1 和 r_2 为两个区间 $[0,1]$ 上的均匀分布随机数。

为了限制每个粒子第 d 维的最大速度，一般地会引入参数 $V_{\max}^d \in R^+$ ，如果速度的值 $|v_{i,j+1}^d|$ 超过了 V_{\max}^d ，那么 $v_{i,j+1}^d$ 则用 $\text{sign}(v_{i,j+1}^d) \cdot V_{\max}^d$ 来代替，否则不变，如式(4-21)所示。在本文中，最大速度 V_{\max}^d 设定为搜索范围的 20%^[70]。

$$v_{i,j+1}^d = \begin{cases} \text{sign}(v_{i,j+1}^d) \cdot V_{\max}^d, & |v_{i,j+1}^d| \geq V_{\max}^d \\ v_{i,j+1}^d, & \text{其他} \end{cases} \quad (4-21)$$

粒子群优化算法具体流程如图 4-5 所示：

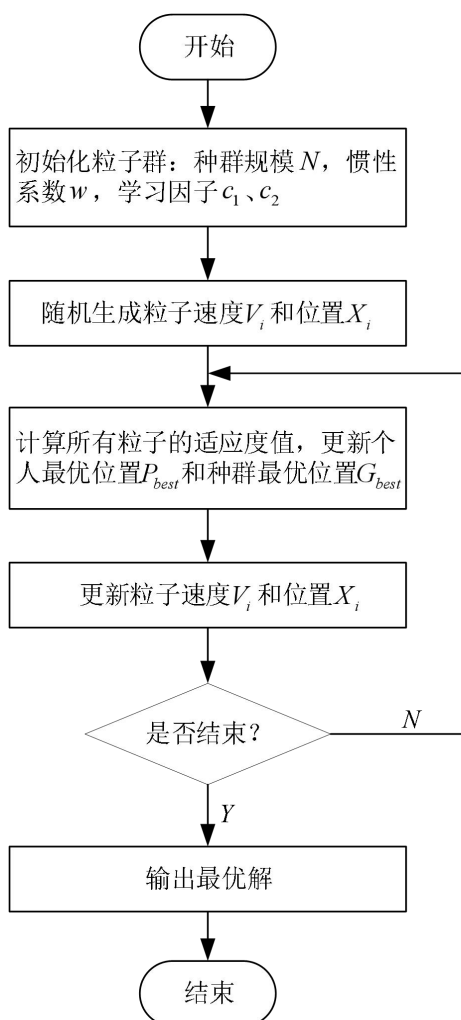


图 4-5 粒子群优化算法流程图

Figure4-5 Particle swarm optimization flowchart

具体步骤为:

- (1) 初始化粒子群: 设定种群规模、惯性系数、学习因子等参数, 随机生成粒子初始位置和速度;
- (2) 更新个人最优位置和种群最优位置: 计算所有粒子的适应度值, 并更新个人最优位置和全局最优位置;
- (3) 更新粒子位置、速度: 根据式(4-19)和式(4-20)更新粒子的位置和速度;
- (4) 当满足终止条件或达到最终迭代次数时, 输出最优解; 否则, 重复步骤 3。

4.3.2 粒子群算法的改进

通过式(4-19)和(4-20)可知, 粒子群算法在更新粒子位置和速度的时候具有很好的导向性, 因此粒子在解空间不断的寻优过程中, 逼近空间最优解的能力很强, 但是这种导向性会使得在求解多峰问题时, 粒子容易跟随历史最优位置陷入局部最优解中^[67]。

避免陷入局部最优和加快收敛速度是目前粒子群算法的改进上最重要的两个目标。Shi 等提出了一种线性调整惯性权重的改进策略, 其研究发现当惯性权重 w 较大时, 粒子的位置更新受本身速度的影响较大, 使得其具有较强的全局搜索能力, 当 w 较小时, 则会更倾向于进行局部搜索。该策略将惯性权重跟随迭代次数线性地减少方式如式(4-22)所示。

$$w(g)_{\text{linear}} = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \frac{g}{G} \quad (4-22)$$

式中, g 为当前迭代的次数; G 为粒子群算法中设定的最大迭代次数; w_{\max} 和 w_{\min} 为最大和最小惯性权重, 通常设置为 0.9 和 0.4^[71]。通过实验证明, 该方法会使粒子群算法的性能大大提高, 相对于基本的 PSO 具有更快的收敛速度和求解精度。文献[72]提出了惯性权重非线性递减的一种策略, 实验结果表明, 当初始参数都相同的情况下, 凹函数递减的性能提升优于线性递减, 凸函数递减的效果最差。

除了惯性权重, 学习因子 c_1 和 c_2 也是 PSO 中的重要参数, 它们的取值会影响 PSO 的全局和局部搜索能力。当 c_1 取值较大时, 粒子更多地会受到自身经验的影响, 更倾向于在局部搜索空间内寻找最优解; 当 c_2 取值较大时, 粒子则会跟随种群最优经验进行寻优, 使粒子具有更强的全局搜索能力。一般地, 大多数学者采用两个值都为固定值 2.0 的设置^[73]。但文献[74]表明, 针对不同的问题 c_1 和 c_2 选择特定的值可以使 PSO 具有更好的性能。

本文所研究的电动汽车有序充电数学模型，是一种典型的多峰函数，如果使用经典的粒子群算法，不仅收敛速度慢，影响充电桩运营平台的性能，还会陷入局部最优，使得平台对电动汽车充电负荷的整体优化效果达不到预期的效果。因此，基于已有的学者研究，本文提出以当前迭代次数 g 为自变量，使用 Sigmoid 函数来动态调整 PSO 中的惯性权重 w 、个人学习因子 c_1 和社会学习因子 c_2 。Sigmoid 函数图像和解析式如图 4-6 和式(4-23)所示。

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4-23)$$

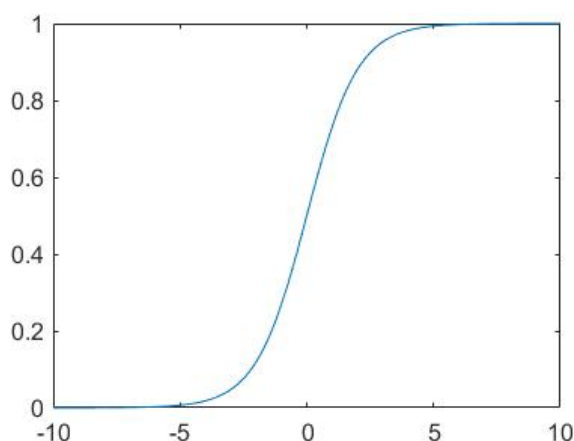


图 4-6 Sigmoid 函数图像

Figure4-6 Sigmoid function graph

对于惯性权重 w ，在迭代初期，较大的 w 能够使粒子在搜索空间中进行较大区域的探索，可以快速地定位到最优解的大概位置；在迭代后期，应当减小 w 以控制粒子速度，使粒子开始精细的局部搜索。为了比较不同动态调整策略下，对 PSO 算法性能的改进程度，选用式(4-22)作为 w 线性调整的策略，非线性分为凸函数模型及凹函数模型，如式(4-24)和式(4-25)所示。

$$w(g)_{convex} = w_{\min} + \left(\frac{1}{1 + e^{-\alpha(1-g/G)}} - \frac{1}{2} \right) \cdot 2(w_{\max} - w_{\min}) \quad (4-24)$$

$$w(g)_{concave} = w_{\min} + \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\alpha g/G}} \right) \cdot 2(w_{\max} - w_{\min}) \quad (4-25)$$

式中， α 为一个常数，用来控制曲线的弯曲程度。三种 w 动态调整策略下的曲线图像如图 4-7 所示。

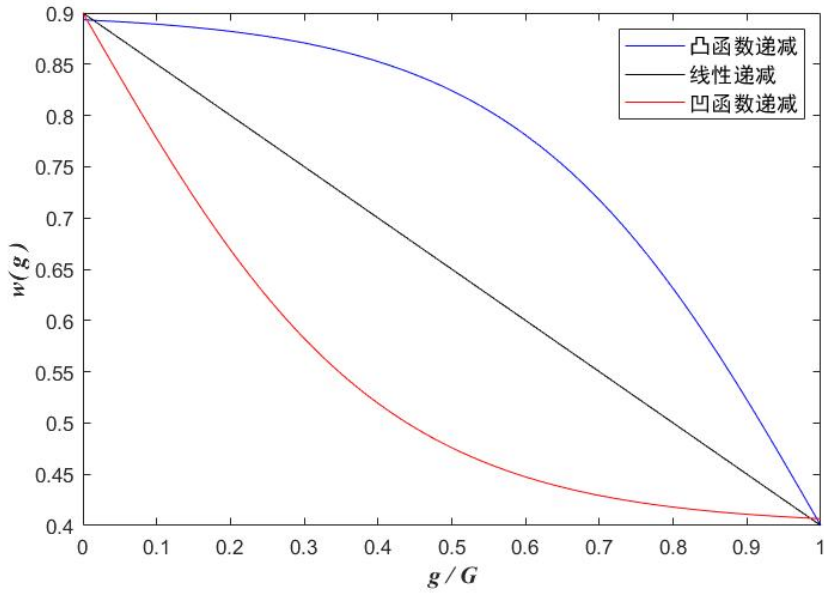


图 4-7 三种惯性权重递减图像

Figure4-7 Three plots of weight decay

对于个人学习因子 c_1 和社会学习因子 c_2 ，在迭代开始初期，应当设定较大的 c_1 和较小的 c_2 ，这样粒子则会更多的跟随个人的历史最佳位置进行搜索，同时，也可以减少粒子在群体中的社会影响，减少粒子之间的竞争关系，从而更好地探索整个搜索空间。随着迭代次数增加，种群的社会经验会逐渐增加，此时增大 c_2 的值可以使粒子更多地收到社会最优位置的影响，从而更快地收敛到全局最优解。相应地，减小 c_1 的值可以减少粒子向个体最优位置方向的移动，以避免陷入局部最优解。因此，在 PSO 算法中，随着迭代次数的增加，逐渐减小 c_1 ，增大 c_2 ，可以更好地平衡全局搜索和局部搜索之间的关系，从而得到更好的优化结果。个人学习因子 c_1 和社会学习因子 c_2 的三种动态调整策略函数如式(4-26)-(4-31)所示。

$$c(g)_{1,linear} = c_{\max} - (c_{\max} - c_{\min}) \frac{g}{G} \quad (4-26)$$

$$c(g)_{1,convex} = c_{\min} + \left(\frac{1}{1 + e^{-\alpha(1-g/G)}} - \frac{1}{2} \right) \cdot 2(c_{\max} - c_{\min}) \quad (4-27)$$

$$c(g)_{1,concave} = c_{\min} + \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\alpha g/G}} \right) \cdot 2(c_{\max} - c_{\min}) \quad (4-28)$$

$$c(g)_{2,linear} = c_{\min} + (c_{\max} - c_{\min}) \frac{g}{G} \quad (4-29)$$

$$c(g)_{2,convex} = c_{\min} + \left(\frac{1}{1 + e^{-\alpha g/G}} - \frac{1}{2} \right) \cdot 2(c_{\max} - c_{\min}) \quad (4-30)$$

$$c(g)_{2,concave} = c_{\min} + \left(\frac{1}{1 + e^{-\alpha(1-g/G)}} - \frac{1}{2} \right) \cdot 2(c_{\max} - c_{\min}) \quad (4-31)$$

为了对比不同参数调整策略下，对粒子群算法性能的影响，本文使用 Ackley 函数来验证，其二维形式如式(4-32)所示。

$$f(x, y) = -20 \cdot \exp(-0.2 \cdot \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{2}}) - \exp(\frac{\cos(2\pi x) + \cos(2\pi y)}{2}) + 20 + \exp(1) \quad (4-32)$$

Ackley 函数是一个经典的用于优化算法测试的多元非凸函数，它是由 David Ackley 于 1987 年提出。Ackley 函数具有一个非常平滑的、连续的、非凸的表面，其最小值 0 非常难以在空间中找到，且该函数具有多个局部极小值点和鞍点，因此对于优化算法来说是一个具有挑战性的函数。其二维图像如图 4-8 所示。

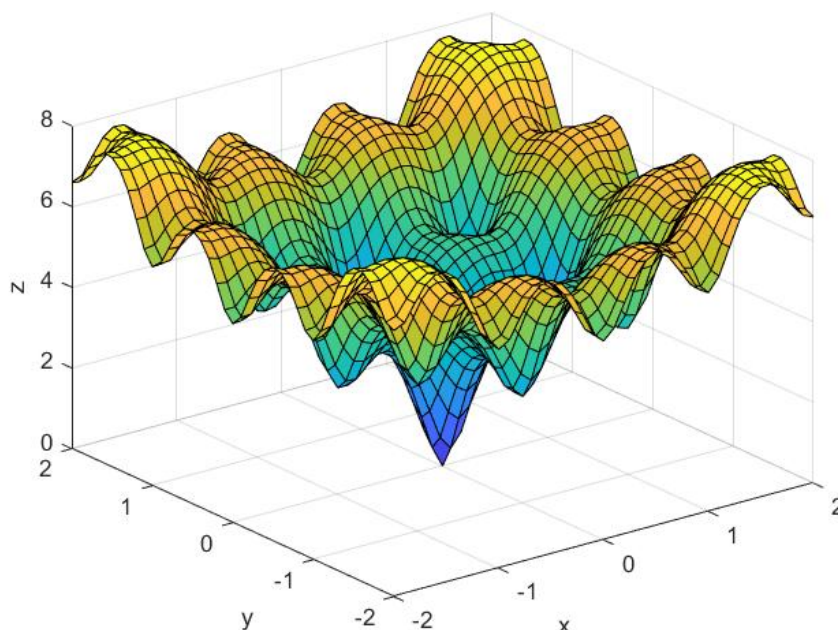


图 4-8 Ackley 函数图像

Figure4-8 Ackley function diagram

此外，本文再引入文献[75]中提出的一个指标，即“种群标准差”，用 psd 表示为

$$psd = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \sum_{d=1}^D (x_i^d - \bar{x}^d)^2} \quad (4-33)$$

在粒子群算法中， psd 较小意味着种群中的粒子位置之间比较接近，算法已经收敛或者即将收敛。 psd 较大则表明种群中的粒子位置分散，种群的多样性较高，但也可能表明算法还未收敛。因此，应当与最终的适应度值放在一起考虑。

下面，本文将通过设置 12 种方案来对比 PSO 中参数不同的调整策略下的性能优化情况，并设置 PSO 的最大迭代次数 $G=200$ ，种群数 $N=30$ ，维数 $D=2$ ， $\alpha=5$ ， $w_{\max}=0.9$ ， $w_{\min}=0.4$ ， $c_{\max}=2$ ， $c_{\min}=0.75$ 。适应度值和 psd 取程序运行 50 次后的平均值作为比较，具体如下表所示。

表 4-2 PSO 不同参数调整策略下的性能对比

Table4-2 Performance comparison of PSO with different parameter adjustment strategies

方案	w 策略	c_1 策略	c_2 策略	\bar{f}	\overline{psd}
方案 1	固定值	固定值	固定值	2.23×10^{-2}	1.74×10^0
方案 2	线性	固定值	固定值	6.18×10^{-10}	9.96×10^{-5}
方案 3	凸函数	固定值	固定值	6.96×10^{-6}	2.83×10^{-2}
方案 4	凹函数	固定值	固定值	1.65×10^{-14}	3.39×10^{-8}
方案 5	凹函数	线性	固定值	1.03×10^{-15}	1.99×10^{-14}
方案 6	凹函数	凸函数	固定值	1.21×10^{-15}	1.07×10^{-11}
方案 7	凹函数	凹函数	固定值	9.59×10^{-16}	3.11×10^{-16}
方案 8	凹函数	凹函数	线性	8.93×10^{-16}	3.12×10^{-19}
方案 9	凹函数	凹函数	凸函数	9.35×10^{-16}	6.76×10^{-18}
方案 10	凹函数	凹函数	凹函数	8.88×10^{-16}	1.33×10^{-20}
方案 11	线性	线性	线性	4.94×10^{-15}	1.51×10^{-11}
方案 12	凸函数	凸函数	凸函数	1.13×10^{-7}	9.98×10^{-5}

通过方案 1 可知，该方案的所有参数都是固定值，即传统的粒子群算法，在求解 Ackley 函数时，陷入了局部最优，且算法的收敛情况较差。通过对比方案 1-方案 4 可知，当对惯性权重 w 采取随着迭代次数递减时，算法在性能上有了较大的提升，算法寻优效果凹函数>线性>凸函数，之所以凹函数递减的策略具有更好的效果原因可能是 PSO 在算法的早期收敛速度较快，通过加速 w 的递减速度，能够使算法较早的进入局部搜索，因此获得了更好的寻优效果。通过对比方案 4-方案 7 可知，递减的个人学习因子 c_1 在求解精度上没有较大的改进效果，但是收敛效果却有很大的提升，导致原因是在迭代后期，算法已经进入局部搜索阶段，较小的 c_1 会使粒子向着种群最优位置靠近，且凹函数因为其加速了 c_1 的递减，使得算法具有了更好的局部搜索效果。通过对比方案 7-方案 10 可知，递增的社会学习因子 c_2 进一步提升了算法的收敛效果，而凹函数的策略具有最佳的效果，原因是该策略是在算法的后期才开始加速 c_2 的递增，避免过早陷入局部最优解，在充分的探索解空间后开始快速地向全局最优解靠近。为了进一步对比不同参数调整策略下，对算法的改进情况，又设置了方案 11 和方案 12 与方案 1 和方案 10 进行对比，这四种方案下的 PSO 迭代曲线如图 4-9 所示。

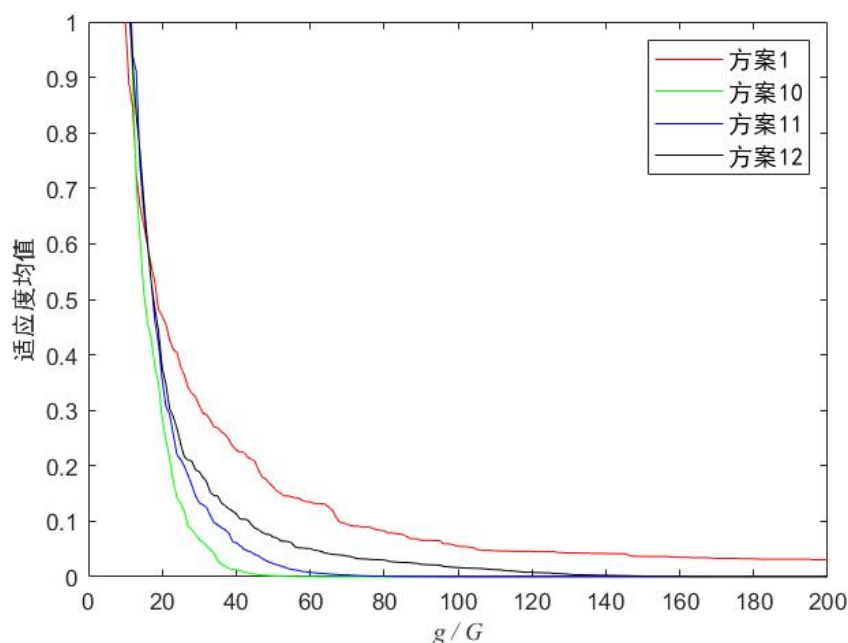


图 4-9 算法迭代曲线

Figure4-9 Algorithm iteration curve

由图可知，凹函数策略下的 PSO 收敛速度和最终收敛精度效果最好，其次是线性策略，然后是凸函数策略，固定值策略下的效果是最差的，然后在初始时的收敛精度效果则是相反的。采用动态调整 w 、 c_1 和 c_2 能够较好地平衡全局搜索和局部搜索之间的关系，在初期较高的 w 和 c_1 能够让粒子种群充分的探索解空间，当种群定位到种群最优位置后，较小的 w 和 c_1 能够使粒子群开始精细的局部搜索，同时增大 c_2 使粒子群向着种群最优位置收敛。同时，采用 Sigmoid 凹函数映射下的调整策略，具有最佳的算法性能，这是因为该策略下使得粒子群前期更注重粒子群的全局搜索，后期则是更注重局部搜索。

因此本文在后续的有序充电优化求解算法中，对传统粒子群算法进行改进，对惯性权重 w 、个人学习因子 c_1 和社会学习因子 c_2 都采用 Sigmoid 凹函数映射下的调整策略，即 SCM-PSO(PSO with Sigmoid concave function mapping)。

4.3.3 有序充电模型的求解

针对 4.2 节建立的多目标双侧优化有序充电策略模型，本文采用改进的粒子群算法 SCM-PSO 来进行模型的求解，以使得在满足电动汽车用户充电需求的情况下，最大化的降低充电费用以及对电网运行的影响。

在本文中，将一天分为 96 个时段，在每个时段的开始时间开始调度电动汽车开始充电。在求解算法中，粒子的维度数由需要调度的电动汽车数量决定，需

要进行优化求解的是每辆电动汽车的最优开始充电时间 $T_{b,i}$ ，并且通过约束条件(4-11)和(4-12)对 $T_{b,i}$ 进行搜索范围限制。同时，通过约束条件(4-8)对所有电动汽车的充电时间进行约束，防止其超过负荷上限，并以多目标综合目标函数(4-14)作为适应度函数。在算法寻优过程中，根据适应度函数的值，每个粒子不断调整各个维度所表示的电动汽车开始充电时间，并与个人最优开始充电时间和种群最优开始充电时间进行比较和更新，最终得到所有电动汽车的最优充电策略。

通过改进的粒子群优化算法进行求解有序充电模型的具体步骤如下：

(1) 定义问题：设定粒子种群规模，迭代次数，电动汽车数目，粒子最大更新速度，根据所有电动汽车的出行和充电需求对决策变量进行限制，保证满足用户的充电需求和电网最大容量，输入电网运行基础负荷、分时电价等基本参数；

(2) 初始化粒子群：基于步骤 1 设置的参数，随机初始化粒子群的位置和速度；

(3) 计算适应度值：根据当前粒子群所控制的电动汽车充充电开始时间和充电需求时长，获得当前电动汽车充电负荷，计算对应的适应度函数值即综合优化目标值；

(4) 更新个人最优位置：比较当前粒子与个人历史最优适应度函数值，若当前值更优则更新个人最优位置；

(5) 更新社会最优位置：比较当前粒子与种群历史最优适应度函数值，若当前值更优则更新社会最优位置；

(6) 调整速度和位置：计算当前迭代次数下的惯性权重、个人学习因子、社会学习因子等参数，根据粒子的速度、个人最优位置和种群最优位置更新粒子位置，并基于限制条件进行修正；

(7) 算法停止准则：若迭代次数，则终止算法流程，否则返回步骤 3，继续寻优；

(8) 输出结果：输出粒子种群最优位置，即所有电动汽车的最优充电策略。

图 4-10 为有序充电模型的求解流程图。

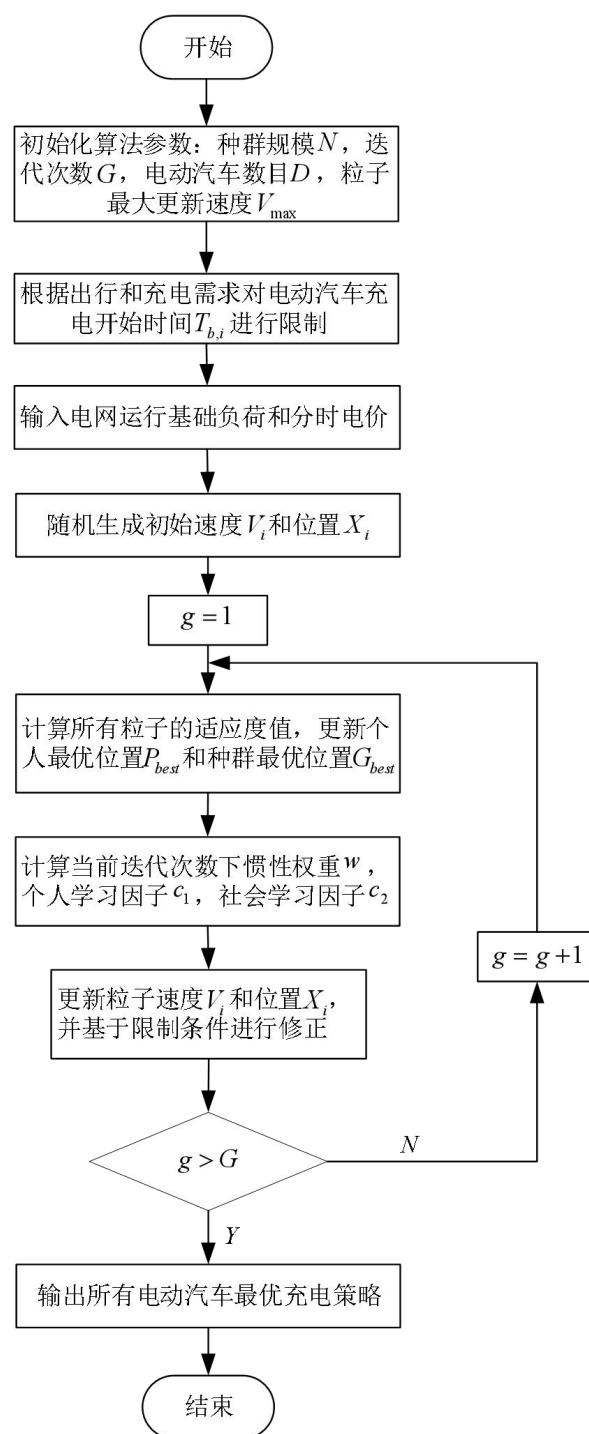


图 4-10 有序充电模型求解流程图

Figure4-10 Flowchart for solving the ordered charging model

4.4 有序充电仿真算例分析

在本节中将进行电动汽车有序充电模型的仿真算例分析，以验证其在实际应用中的意义。

4.4.1 算例参数设计

为了与无序充电时电动汽车充电负荷的影响进行对比, 本节算例的基本参数沿用 3.3 节中的基本参数, 并引入表 4.1 中的北京市分时电价表作为充电费用计算标准。同时, 以表 3.4 中的算例三作为需要进行充电的电动汽车, 并通过蒙特卡洛方法进行模拟电动汽车用户的出行规律和充电需求。

针对有序充电模型的综合目标函数(4.14), 对于不同的充电需求, 需要设置合理的权重系数来达到最佳的优化效果。对于充电桩运营平台来说, 经济效益是一个至关重要的指标, 而充电费用是直接影响经济效益的因素之一。同时, 由于电力系统的调度需要考虑到电力负荷的稳定性, 因此对于负荷峰谷差率和标准差的最小化也应当有一定的考虑。在本文中, 设置 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.3$, $\lambda_3 = 0.4$ 。

在有序充电中, 不同的电动汽车用户可能对于有序充电的响应率不同, 即有的用户愿意服从平台对电动汽车充电的调度来进行有序充电, 而有的用户则更愿意随机地选择充电时间。因此, 本节分别设置用户参与有序充电的响应率 $\delta = 0\%$ 、 $\delta = 50\%$ 和 $\delta = 100\%$ 来进行对比实验, 从而更好地反应实际情况, 以满足不同用户的充电需求和行为特点。

4.4.2 算例结果分析

通过蒙特卡洛方法模拟出电动汽车充电需求后, 以不同的响应率 δ , 采用 SCM-PSO 算法进行优化求解, 得到三种响应率下的充电负荷曲线如图 4-11 所示。

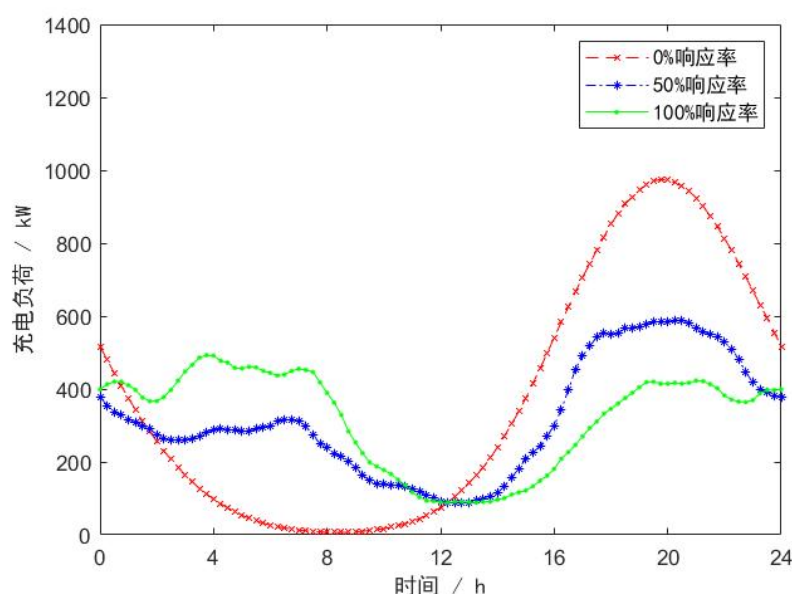


图 4-11 三种响应度下的充电负荷曲线

Figure4-11 Charging load curves under three response rates

由上图可知,当响应率较高时,参与有序充电的电动汽车数量相对较多,因此充电需求得到了更好的平衡和分配,整体充电负荷曲线较为平缓。而当响应率较低时,有部分用户未参与有序充电反而选择了随意的开始充电时间,使得充电负荷集中在了下班高峰期,导致充电负荷曲线负荷波动更为明显。因此可以得出,有序充电可以有效调节充电需求,将充电需求分散到不同时间段,从而实现负荷平滑和削峰填谷的目的,而响应率越高,参与有序充电的电动汽车数量相对越多,充电需求就能得到更好的平衡和分配,进而减小负荷波动的幅度。

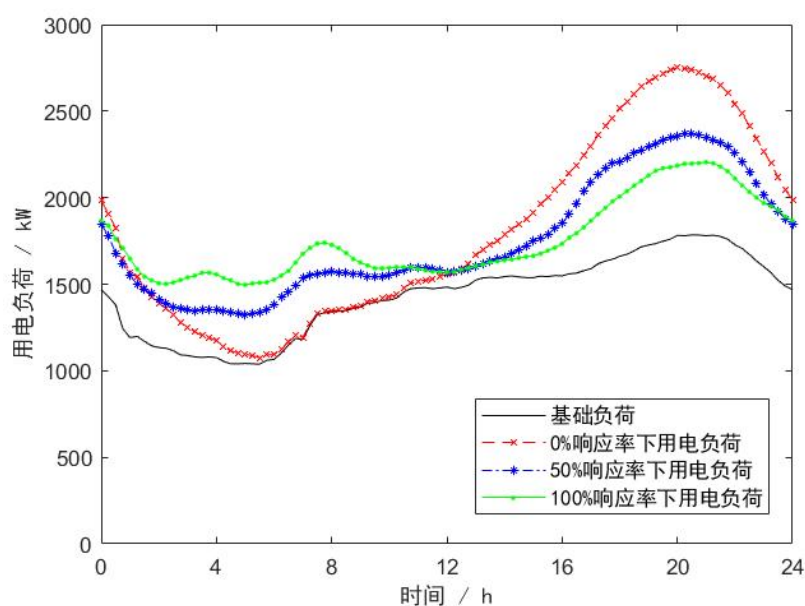


图 4-12 三种响应率下有序充电总负荷曲线

Figure 4.12 Total load curves of ordered charging under three response rates

将充电负荷叠加到基础负荷上之后,得到该区域配电网的总用电负荷如图 4-12 所示。通过分析可知,随着完全无序的充电负荷叠加到基础负荷后,使得负荷曲线出现“峰上加峰的现象”,拉大了用电负荷的高峰和低谷之间的差距,加重了用电负荷的波动,根据第三章的研究,这种现象必将会对电网运行产生严重的影响,因此对电动汽车的有序充电管理是非常必要的。而随着电动汽车参与有序充电的响应率的提高,负荷曲线整体上变得越加平缓。这是因为,当越来越多的电动汽车加入有序充电调度,充电负荷会在满足充电需求的情况下,从负荷高峰时段转移到非高峰时段进行充电,从而达到“削峰填谷”的效果,从而降低对电网运行的影响。

对总用电负荷进行计算后得到三种响应率下有序充电总负荷各项参数如表 4-3 所示。

表 4-3 三种响应率下有序充电总负荷参数比较表

Table4-3 Total load parameters of ordered charging under three response rates

响应率	最小负荷/kW	最大负荷/kW	峰谷差率	负荷标准差	充电费用/元
0%	1076	2755	60.94%	542.32	7952.79
50%	1313	2393	45.13%	340.61	6448.71
100%	1463	2239	34.66%	229.92	6024.02

通过分析可知，当有序充电响应率为 0%即没有电动汽车参与有序充电时，最大负荷为 2755kW，超过了该区域配电网可接受的最大容量 2448kW，且负荷峰谷差率和标准差较大，充电负荷对该区域配电网的运行造成了严重的影响。

而随着有序充电响应率的提高即越来越多的电动汽车参与到有序充电之后，可以显著改善电网运行和提高经济效益。在改善电网运行方面，50%响应率的总负荷相对于 0%响应率的总负荷，峰谷差率下降了 15.81%，负荷标准差也下降了 201.71；100%响应率的总负荷相对于 50%响应率的总负荷，峰谷差率得到进一步下降，为 10.47%，标准差也再次下降了 110.69。可以看出在有序充电策略下，充电负荷能够避免“峰上加峰”从而导致其超过配电网的最大容量，并对负荷曲线进行“削峰填谷”，减缓了负荷曲线的波动，保证了电网的安全稳定运行；另一方面，峰谷差率的降低，提高了配电网发电机组的设备利用率，使得在部署同等数量的发电机组时，配电网能够消纳更多的电动汽车充电负荷。

在提高经济效益方面，50%响应率的充电费用比 0%响应率的充电费用减少了 1504.08 元，100%响应率的充电费用比 50%响应率的充电费用减少了 424.69 元，可以看出有序充电策略将电动汽车在满足其充电需求的情况下，将充电负荷转移到了电价较低的时间进行充电，极大地降低了电动汽车的充电费用；此外，有序充电响应率的提高也使得负荷曲线更加平滑，减少了负荷的波动，根据式(4-6)，负荷波动越小线路中的损耗也就越小，进一步提升了电网运行的经济效益。

4.5 本章小结

本章的研究旨在探究有序充电策略的可行性和意义。首先，本章从理论上分析了有序充电策略在优化电网运行和降低充电费用两方面的作用；然后，以峰谷差率最小和负荷波动最小为目标，电网容量作为约束条件建立了电网侧优化模型，再以电动汽车充电费用最低为目标，充电需求和充电时间作为约束条件建立用户侧优化模型，并对双侧模型进行综合分析，将多个目标进行归一化，构建出多目标双侧优化有序充电策略模型，同时，本文选用 PSO 算法进行该模型的求解；但

是基于粒子群算法的局限性，本文提出 SCM-PSO 算法来改进，并通过 Ackley 函数验证该算法在提升收敛速度、精度和避免陷入局部最优的效果；最后，使用该算法对有序充电仿真算例进行求解，通过算例结果分析得出有序充电策略在改善电网运行和提高经济效益的有效性。

5 充电桩运营平台充电调度研究

随着电动汽车的不断普及，充电设施的建设和管理成为了一个备受关注的领域。在充电桩运营平台的管理下，如何优化充电桩的充电作业调度，提高充电桩的利用率，跟随负荷指导曲线充电，以及提高用户体验，具有重要的研究意义。本章将对充电桩运营平台的总体功能和架构进行设计，并研究在平台实际运营过程中的充电调度问题，提出相应的解决方案，为充电桩运营平台的优化调度提供一定的理论和实践参考。

5.1 充电桩运营平台总体设计

充电桩运营平台是现代化充电设施管理的核心，它是一套基于云计算和物联网技术的系统，它可以为电动汽车用户提供充电便利，也可以为充电桩运营商提供监管和管理服务。在本节研究中，我们将重点关注充电桩物联网终端、用户小程序客户端和运营管理平台云端这三个方面的功能，并对它们进行深入探讨，然后对物理架构进行设计。通过上述研究，我们可以更好地理解充电桩运营平台的运作方式，从而为进一步的实际应用研究奠定坚实的基础。

5.1.1 功能结构设计

（1）充电桩的物联网终端功能分析

充电桩的物联网终端是充电桩运营平台中的基础部件，其需要提供交流充电、桩车通信、地图定位、安全防护、故障诊断等功能，为用户提供更加便捷、安全、可靠的充电服务。在本文所依托的项目中所采用的充电桩主板总体框图如图 5-1 所示，该充电桩采用 STM32F407VGT6 芯片，通过外接不同模块并进行嵌入式开发来实现上述功能。

具体来说，充电桩首先要能够在用户把充电枪插入电动汽车并提交充电需求后，通过与云平台的通信，实现充电桩的智能管理，如实时监测充电桩的状态、进行充电调度等。充电桩还要能与电动汽车进行通信，获取电动汽车的状态信息，如电池电量等，以便对充电桩的充电计划进行调整和优化。充电桩需要具备地图定位功能，以便用户可以在地图上方便地查找充电桩的位置，同时也方便运营人员进行充电桩设备的管理维护。充电桩还需要具备安全防护功能，确保充电过程

的安全性和可靠性。充电桩终端也需要具备故障诊断功能，以便在发生故障时能够及时检测和修复。

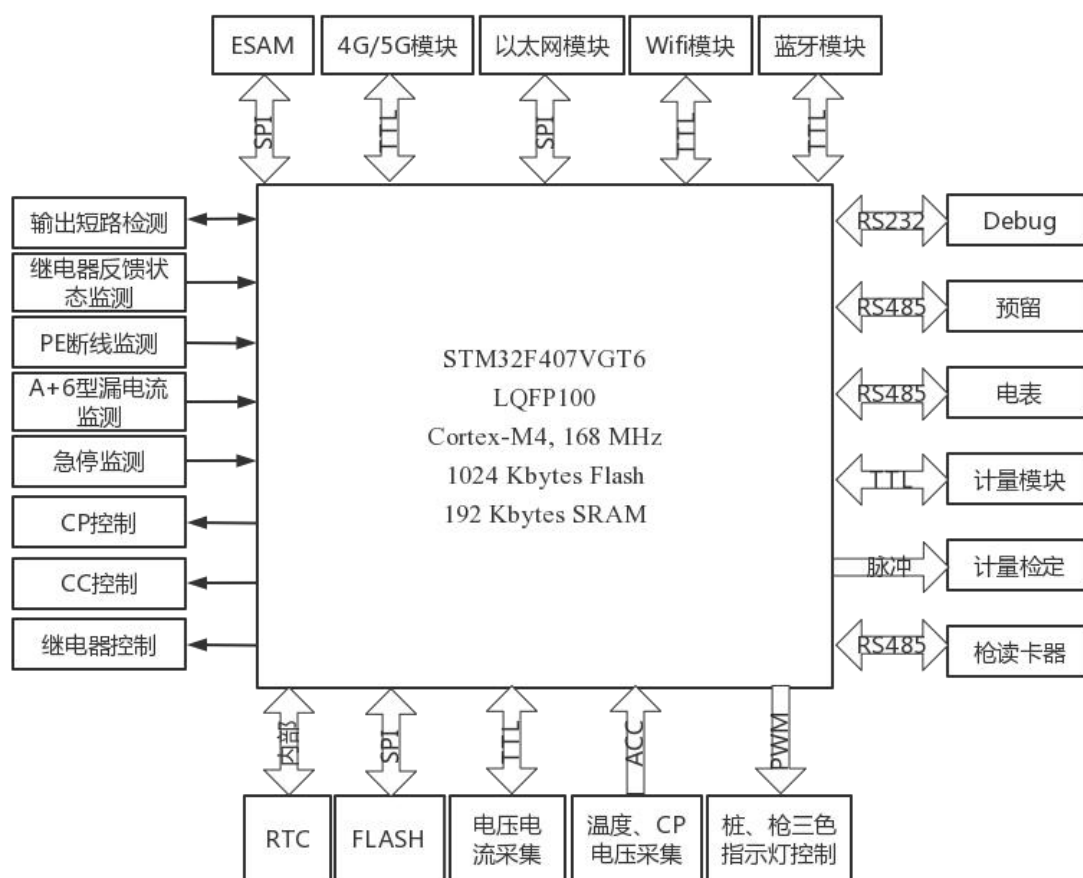


图 5-1 充电桩主板总体框图

Figure5-1 Charging pile motherboard overall block diagram

(2) 用户小程序的客户端功能分析

用户小程序客户端作为用户与系统交互的主要接口，需要具有简单易用、交互性强、信息实时性好等优点，为用户提供高效、便捷的充电服务。其功能涵盖用户的账户管理、智能导航、充电交易、状态反馈等。在本文所依托的项目中所使用的用户小程序客户端界面如图 5-2 所示，该小程序是通过 uni-app 技术开发的，主要是运行在微信环境中。

具体来说，小程序可以根据用户输入的目的地或者充电需求，结合地图信息和充电桩状态，智能推荐可用充电桩的位置，并提供导航功能，方便用户快速到达充电站点，如图 5-2(a)所示。然后，用户可以通过小程序进行充电交易，包括选择充电桩、开始充电、停止充电、支付费用等环节。同时，小程序还可以通过实时获取充电桩的状态信息，向用户提供实时状态反馈，包括充电桩工作状态、剩余充电时间等，如图 5-2(b)所示，方便用户进行出行和充电计划的决策。用户

还可以通过小程序注册账号、登录账号,进行个人信息的管理,包括充值余额、查询历史充电记录等。此外,用户还可以通过小程序客户端绑定车辆信息,以便后续进行充电交易,如图 5-2(c)所示。

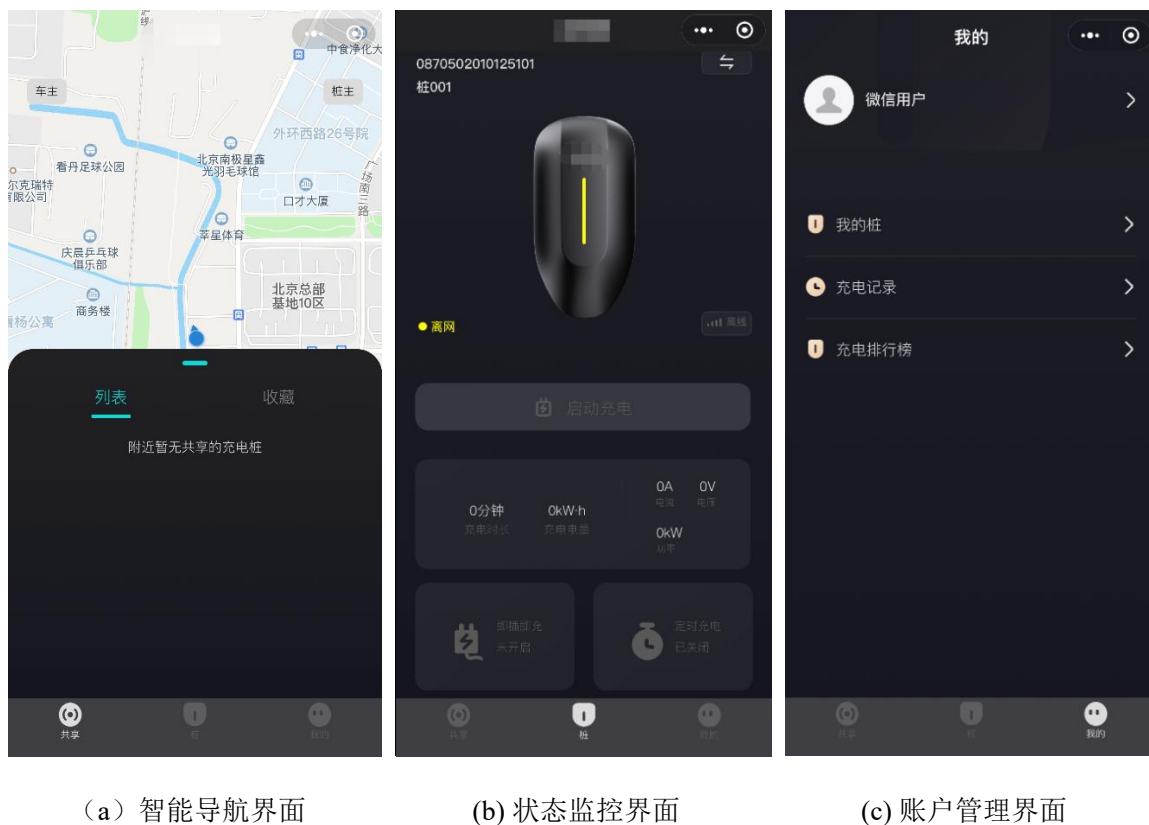


图 5-2 用户小程序客户端界面

Figure 5-2 User applets client interface

(3) 运营管理平台的云端功能分析

云端运营管理平台是充电桩运营平台的核心部分,通过对充电桩和用户小程序的数据进行汇总和分析,实现对充电桩运营情况的实时监控和全面管理,主要包括实时监控、充电调度、运营管理、数据分析等功能。在本文所依托的项目中所使用的云端运营管理平台的界面如图 5-3 所示,该平台是由 Spring Boot 和 Vue 的前后端分离框架实现的。

具体来说,平台可以对充电桩的状态进行实时监控,如电池充电状态、充电桩工作状态、故障警报等。同时,还能够监控用户的充电情况和交易信息,保证充电服务的稳定性和安全性。平台还需根据用户通过小程序提供的是否参与有序充电、用户出行计划等因素,制定平台管理下的所有充电桩充电计划,然后对充电桩进行智能调度,以提高充电桩的使用效率和用户的充电体验。运营管理主要是指对充电桩的设备信息、故障问题进行管理维护,以及对小程序用户的账户信息管理等管理。平台还要对充电桩和用户数据进行收集和分析,提取出有价值的信息。

比如，可以根据用户充电行为，预测未来的充电需求；可以根据用户地理位置，制定更科学合理的充电桩布局计划；同时，还可以对充电桩的使用情况进行统计和分析，为企业的战略决策提供数据支持。

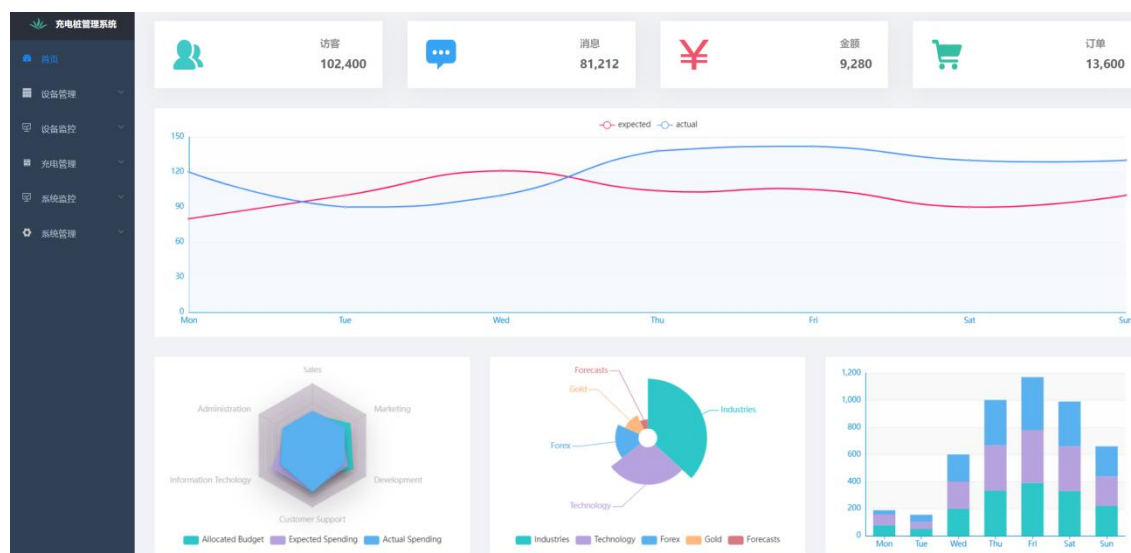


图 5-3 云端运营管理平台界面

Figure5-3 Cloud operation management platform interface

充电桩作为物联网终端，是平台为用户提供高质量充电服务的基础；用户小程序是用户请求和提供充电需求的主要接口，是平台与用户之间的桥梁；而运营管理平台，不仅能够提高实时数据支持，还能够进行充电桩的智能调度、平台运营管理和数据分析等工作，是充电桩运营的核心。充电桩运营平台的三部分功能相辅相成，共同构建起一个完整的充电桩运营平台，既能为用户提供高质量的充电服务，还能为平台运营管理者提供更好的管理手段。

综上所述，本文所研究的充电桩运营平台功能结构如图 5-4 所示。

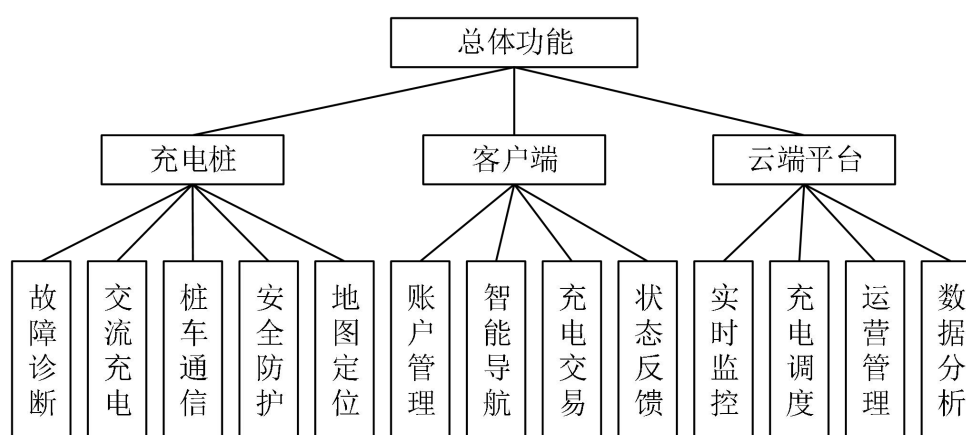


图 5-4 充电桩运营平台功能结构图

Figure5-4 Functional structure diagram of charging station operation platform

5.1.2 物理架构设计

在实现充电桩的智能化、互联化的过程中，物理架构设计是一个至关重要的环节。整个充电桩运营平台由三部分组成，分别是充电桩终端、用户小程序客户端、云端运营管理平台。它们通过物理架构连接在一起，构成一个完整的系统。

充电桩终端作为物联网设备，需要直接与云端进行通信，并通过用户小程序客户端向用户提供服务。因此，充电桩终端需要接入互联网，通过专网或蜂窝网络与云端进行通信^[76]。为了提供更加稳定的通信环境，可以在充电桩终端处部署4G/5G路由器，增强无线信号的覆盖范围和信号质量^[77]。

用户主要通过手机进行小程序客户端的使用，客户端需要通过互联网与云端进行通信，因此需要连接到公共的互联网。为了保证用户的隐私和数据安全，可以使用HTTPS等安全协议对数据进行加密和保护。同时，用户可以通过扫描充电桩设备的二维码，快速定位到具体充电桩并进行充电服务，这样可以大大提高用户的使用便利性^[78]。

云端运营管理平台则需要部署在云服务器上，通过互联网与充电桩终端和用户小程序客户端进行通信。为了提高云端的可靠性和稳定性，可以采用多个服务器进行集群部署，实现负载均衡和故障转移。同时，为了提高数据的安全性和保密性，可以采用防火墙、数据加密等技术进行数据保护。

总之，物理架构设计需要考虑到系统的可靠性、稳定性、安全性等因素，并在不同部分之间实现良好的连接，才能构建出一个高效、可靠、安全的充电桩运营平台。本文所设计的充电桩运营平台物理架构如图5-5所示。

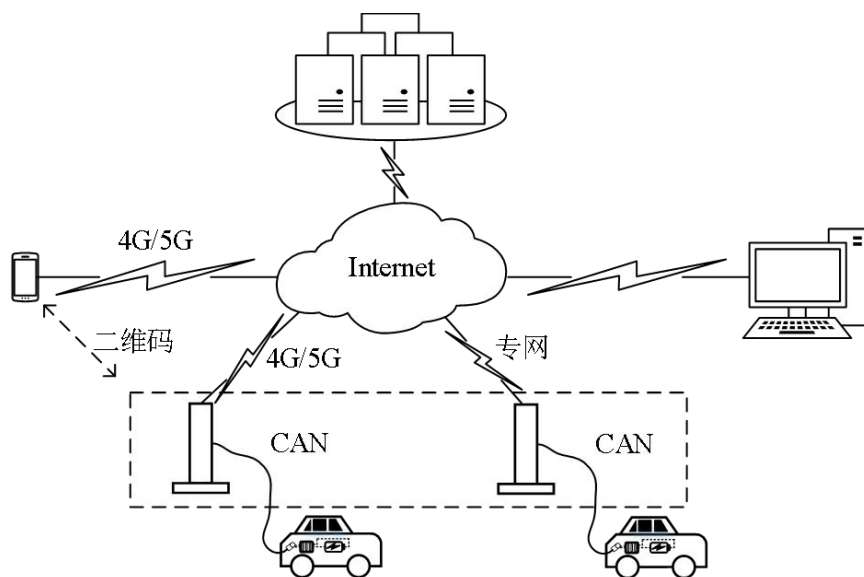


图 5-5 充电桩运营平台物理架构图

Figure 5-5 Physical Architecture diagram of charging station operation platform

5.1.3 电动汽车充电流程

在本文所研究的基于充电桩运营平台的电动汽车充电流程如图 5-6 所示。

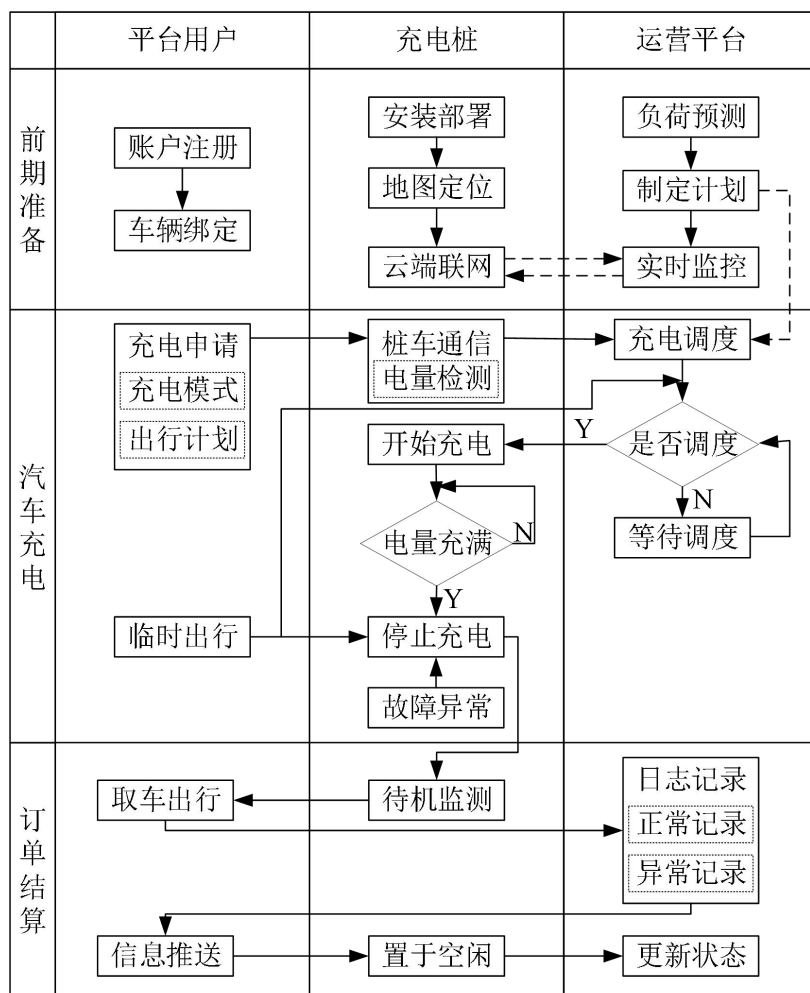


图 5-6 基于充电桩运营平台的电动汽车充电流程

Figure 5-6 The charging process for electric vehicles based on a charging station operation platform

具体来说,在前期准备工作中,平台用户需要通过小程序进行账户注册并绑定车辆,以方便平台对用户的管理。同时,运营商需要根据市场需求,将充电桩安装部署在合适的位置,并进行调试和地图定位,以确保用户的正常使用。然后,充电桩也需要跟云端的运营平台进行联网,使得云端可以对充电桩进行实时监控。在前期准备中,运营平台还需要通过蒙特卡洛方法对充电负荷进行预测,并通过 SCM-PSO 算法进行有序充电优化求解,从而得到负荷指导曲线,制定一天的充电计划。

在正式的电动汽车充电过程中,平台用户首先需要提交充电请求,其内容包括充电模式和出行计划等,然后将充电枪插在电动汽车的插座上,同时充电桩将会通过 pwm 与电动汽车通信,获取电池的初始 SOC,将这些信息全部都上传到

运营平台上。这时，运营平台会根据负荷指导曲线和用户充电请求进行充电调度，若还不满足调度条件则会等待调度，否则开始充电，直至电量充满充电桩便会停止充电。当然，平台用户的临时出行计划和充电桩的故障异常也影响上述的过程。

当电动汽车充电行为结束后，运营平台会向充电桩下发指令，使其置于一个待机的状态，并进行实时监测。直到电动平台取车出行，才算是完成此次充电订单，然后，运营平台会生成此次交易的订单，并对充电过程进行记录，并将相应信息通过小程序推送给平台用户。最终，已完成充电任务的充电桩将会置于空闲状态，并同步到运营平台，等待下个用户的使用。

5.2 充电桩运营平台的充电调度研究

在充电桩运营平台实际运行过程中，因为有许多不确定的人为因素存在，使得汽车用户的充电需求并非完全按照事先制定的充电计划执行。如电动汽车用户的充电需求可能会因为个人的出行计划改变而改变，影响整体的充电计划。此外，充电桩在进行充电时的状态也是多变的，如出现故障时则会导致用户无法按时充电。针对这些问题，本节将对充电桩运营平台的充电调度进行研究，以实现平台对充电桩的智能调度和最优利用，提高用户的充电体验和平台的运营效益。

本节将借鉴计算机操作系统中的作业调度算法来实现电动汽车的充电调度，将每个电动汽车的充电需求当成平台需要去调度的作业，跟随负荷指导曲线，在保证用户充电需求的前提下，合理安排充电作业执行顺序，提高资源的利用率。

5.2.1 常见作业调度算法

（1）先来先服务调度算法

先来先服务调度算法(First-Come-First-Serve, FCFS)是一种最基本的作业调度算法，也是最容易实现的一种算法。该算法按照作业的到达顺序，按照先来先服务的原则进行调度，即新到达的作业先被调度执行，直到完成后才进行下一个作业的调度。该算法不考虑作业的执行时间长短和作业紧迫程度，因此资源利用率较差。

（2）最短作业优先算法

最短作业优先算法(Shortest Job First, SJF)是一种常见的作业调度算法，其主要思想是在所有待处理作业中选择最短的作业进行处理。这里的“最短”通常是指作业所需的 CPU 处理时间最短，即处理时间最短的作业优先处理。SJF 算法可以实现最小化平均等待时间^[79]，因为作业的等待时间是其处理时间与其他已经在队

列中等待的作业所需时间之和。如果每次选择处理时间最短的作业，那么平均等待时间将会被最小化。SJF 算法存在一个问题，即可能出现“饥饿”现象。即如果一个长作业一直在队列的末尾等待处理，那么短作业将一直得到优先处理，长作业可能永远不会被处理。

(3) 最高响应比优先算法

最高响应比优先算法(Highest Response Ratio Next, HRRN)是一种调度算法，用于按照进程的相对响应比优先级进行作业调度。在 HRRN 算法中，相对响应比(Response Ratio)是一个动态的量，根据作业已等待时间的长短和作业所需服务时间的长短来动态计算。具体来说，HRRN 算法首先计算出每个作业的响应比 R ，如式(5-1)所示。然后从所有待处理作业中选择响应比最高的作业进行调度。

$$R = \frac{T+W}{T} = 1 + \frac{W}{T} \quad (5-1)$$

式中， T 为作业执行时间， W 为作业等待时间。

相对于 FCFS 和 SJF 等静态算法，HRRN 算法可以更好地适应不同类型的作业和系统状况，更为灵活和高效。

5.2.2 基于优先级队列的充电调度算法

为了在充电调度过程中保证用户的公平性，本节参照常见作业调度算法，建立一个优先级队列来调度充电桩，以尽量满足每个用户的充电需求。优先级队列进行充电调度的工作原理如图 5-7 所示。

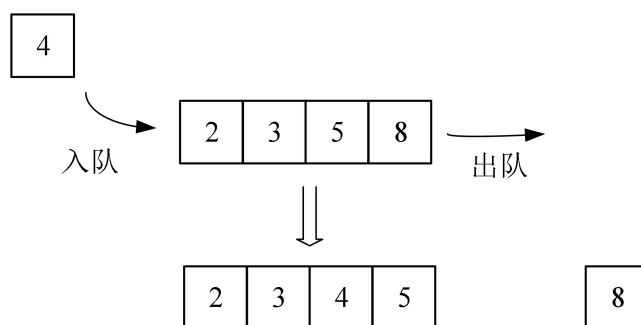


图 5-7 基于优先级队列的充电调度原理图

Figure 5-7 Schematic Diagram of Priority Queue-based Charging Schedule

该优先级算法的核心思想是，对于不参与有序充电的电动汽车，应该拥有最高的优先级，应该尽快安排其进行充电。对于参与有序充电的电动汽车，其等待时间越长，优先级应该较高，这样可以尽快得到充电服务，减少等待时间。对于需要充电时间较长的电动汽车，应该具有更高的优先级进行充电，因为在实际运

行中,如果用户需要临时修改出行计划,需要更紧急地使用车辆时,就算立刻开始充电,也可能无法满足用户的出行需求;而需要充电时间较短的电动汽车,它们在充电前的电量较多,且充满电量的时间较短,因此可以更好地应对用户临时修改出行计划等突发状况,因此对它们的调度相对更灵活。这样可以更好地保证电动汽车用户的出行需求和电网的负荷平衡。同时,考虑到充电桩需要在规定时间内完成充电任务的限制,当前时间距离最晚充电时间越近的电动汽车,其优先级也应该越高,避免因调度不当导致无法完成充电任务。具体的优先级计算方法如式(5-2)所示。

$$Priority = \frac{T_n - T_b + T_c}{\zeta \cdot (T_{latest} - T_n)} \quad (5-2)$$

式中, $Priority$ 为电动汽车的优先级; T_n 为当前时间; T_b 为该电动汽车进入队列开始排队等待调度的时间; $T_n - T_b$ 为电动汽车已经等待的时间; T_c 为电动汽车充满电量所需要的时间; ζ 为一个二进制数,当值为1时代表该电动汽车参与有序充电,否则为0,此时优先级为 ∞ ; T_{latest} 为满足电动汽车充电需求的最晚充电开始时间; $T_{latest} - T_n$ 为当前时间距离最晚充电开始时间的剩余时间,可以反映出电动汽车充电的紧迫程度,当 $T_n \geq T_{latest}$ 时,优先级为 ∞ 。

5.2.3 充电负荷跟随策略

所谓基于充电桩运营平台下的充电负荷跟随策略,就是运营平台在每天开始时,对一天内的充电负荷进行预测,并与基础负荷叠加后进行有序充电优化模型求解,得到一天的负荷指导曲线,然后运营平台将此时已经通过用户小程序发起充电的请求进行统计分析,计算出各个待充电的电动汽车优先级,根据优先级进行调度。在保证满足每个用户充电需求的前提下,根据负荷指导曲线进行充电调度^[80]。对于所有已经被用户使用的充电桩,充电桩运营平台根据其工作状态将它们分别放入三个队列:等待充电队列 Q_{wait} ,正在充电队列 Q_{work} ,和充电结束队列 Q_{end} 。充电负荷跟随策略主要是对 Q_{wait} 里的充电桩进行调度,上一节介绍的充电调度算法是该队列的实现方式,当某个充电桩被调度开始充电时则会进入 Q_{work} ,直到对应的电动汽车充满电后,该充电桩进入 Q_{end} 中,等待用户出行用车后才会被空闲出来。

基于以上步骤的充电负荷跟随策略流程图如图 5-8 所示。

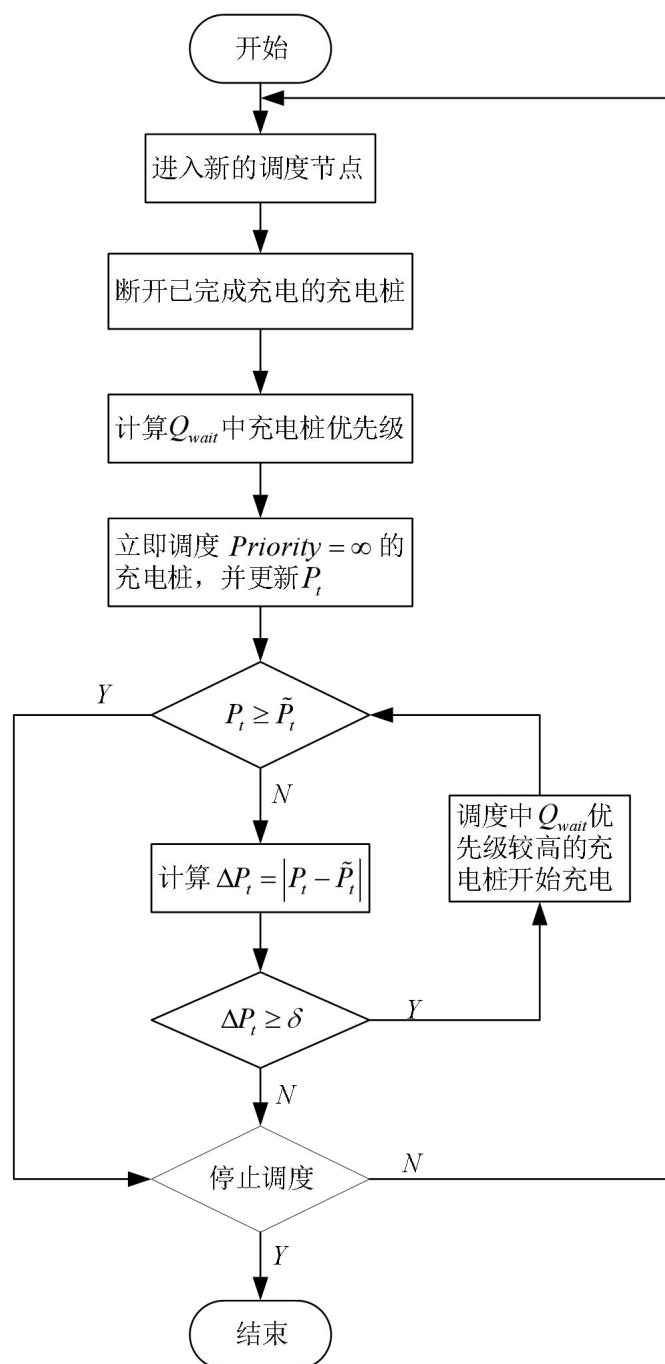


图 5-8 充电负荷跟随策略流程图

Figure5-8 Charge load following strategy flowchart

充电桩运营平台实施充电负荷跟随策略的具体步骤如下:

- (1) 每当进入新的充电调度时刻后, 运营平台对充电桩下发指令, 断开已经完成电动汽车充电任务的充电桩, 并将其从 Q_{work} 归并到 Q_{end} ;
- (2) 基于现在新的时刻, 对 Q_{wait} 中的充电桩优先级进行重新计算;
- (3) 运营平台对充电桩下达调度指令, 将所有优先级 $Priority = \infty$ 的充电桩立即开启充电作业, 并更新实时的总用电负荷 P_t ;

(4) 若此时总用电负荷已经超过平台指导负荷, 即 $P_t \geq \tilde{P}_t$, 则结束本时刻充电调度;

(5) 否则, 计算 $\Delta P_t = |P_t - \tilde{P}_t|$, 当 $\Delta P_t \geq \delta$ 时, 调度 Q_{wait} 中优先级较高的充电桩进入 Q_{work} 开始充电作业, 并更新实时的总用电负荷 P_t , 其中 δ 为负荷允许偏差, 一般取单台充电桩充电功率的一半, 即 $\delta = P_c / 2$;

(6) 重复步骤 5 直到 $\Delta P_t < \delta$ 时, 停止本时刻的调度, 直到进入下一个新的调度时刻, 从步骤 1 开始下一时段时刻;

(7) 达到调度停止时刻, 停止调度。

5.3 平台充电算例分析

在本节中, 将基于本章所研究的运营平台充电调度策略进行算例设计和分析, 以验证其可行性。

5.3.1 算例参数设计

在充电桩实际投入运营后, 并非所有用户都会参与到有序充电调度中, 而是选择结束一天的行程后便立即开始充电。除此之外, 即使有的用户已经参与了有序充电调度, 但也会因为行程的改变而不得不提前充电。因此, 本节算例的设计需对这些实际中可能存在的情况充分考虑。为了与前文进行对比, 选择 4.4 节中的响应率 $\delta = 50\%$ 作为本次算例, 并且在参与有序充电调度的用户中, 再选择 10% 的用户作为临时修改了出行计划的用户, 具体修改方式是出行提前时段服从均匀分布 $U(0, 20)$ 。

5.3.2 算例结果分析

基于本节设计的算例, 采用上节所述充电桩运营平台冲掉调度策略进行仿真, 在平台实际运行过程中的负荷曲线如图 5-6 所示。由图可知, 实时负荷曲线基本全程跟随了指导负荷曲线, 即本文所提出的充电负荷跟随策略具有良好的实际应用效果。

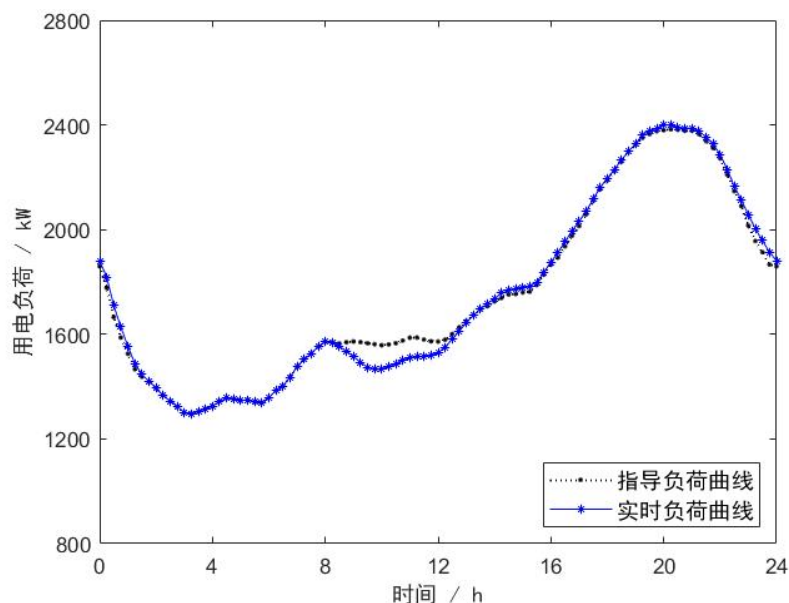


图 5-6 运营平台充电调度负荷曲线

Figure5-6 Dispatched load curve of the charging station operation platform

但是从图中可以看出，在 8-12 时，实时负荷与指导负荷之间具有较大的空隙，通过计算得到实时负荷曲线的充电电量比指导负荷曲线的充电电量少 $38.5 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。出现该现象的原因是，部分参与了有序充电的用户临时调整了出行计划，导致电动汽车并未能充电至目标容量，便提前结束了充电。同时，为了尽量减少因用户提前修改计划对充电电量的影响，在用户通过小程序修改计划后，平台也将会实时更新其充电需求，并更新该用户电动汽车的最晚充电开始时间 T_{latest} ，若当前时间 $T_n \geq T_{latest}$ ，则平台会对其对应的充电桩立即发起充电指令，这也是实时负荷在部分时间超过指导负荷的原因。

表 5-1 运营平台充电调度负荷参数比较表

Table5-1 Comparison of charging dispatch load parameters for charging station operation platform

类型	最小负荷/kW	最大负荷/kW	峰谷差率	负荷标准差	充电费用/元
指导负荷	1266	2391	47.05%	348.85	6369.29
实时负荷	1266	2429	47.88%	360.85	6372.84

本次仿真的运营平台运行中的指导负荷和实时负荷各项参数如表 5-1 所示。通过分析可知，运营平台在实际运行时，不会因部分用户修改了出行计划而导致实时负荷参数与指导负荷参数出现较大的偏差，进一步验证了本文所提出的充电负荷跟随策略的有效性。其中，指导负荷曲线与实时负荷曲线的相关系数计算结果如式(5-3)所示。

$$\rho(P, \tilde{P}) = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T \left(\frac{P_t - \mu_P}{\sigma_P} \right) \left(\frac{\tilde{P}_t - \mu_{\tilde{P}}}{\sigma_{\tilde{P}}} \right) = 0.996 \quad (5-3)$$

可以看出，指导负荷与实时负荷呈正相关性。其中，时段数目 $T=96$ ； μ_P 为实时负荷的均值； σ_P 为实时负荷的标准差； $\mu_{\tilde{P}}$ 为指导负荷的均值； $\sigma_{\tilde{P}}$ 为指导负荷的标准差。

5.4 本章小结

在本章中，对充电桩运营平台的总体功能结构和物理架构进行了设计，主要包括充电桩、用户小程序和云端平台所需要具备的功能和对应物理实现方法，并基于此给出在本文所研究场景下的电动汽车充电流程。同时，为了解决因实际运行中随机因素对充电计划的影响，本章基于常见作业调度算法进行改进，提出基于优先级队列的充电调度算法，并通过充电负荷跟随策略进行了实现。最后，通过算例结果分析得出结论：在本章所提出的充电调度策略下，实时负荷曲线与指导负荷曲线的相关系数为 0.996，呈正相关性，实时负荷曲线基本全程跟随了指导负荷曲线，并且能够应对部分用户临时修改出行计划，验证了该策略的有效性。

6 总结与展望

6.1 本文总结

随着电动汽车技术的不断发展和国家政策的推动，电动汽车的保有量将会持续增加，大规模电动汽车接入电网充电势必将会对电网的运行带来严重影响。为了解决这一问题，本文基于充电桩运营平台场景，对有序充电调度策略的实际应用进行相关研究，具体研究成果如下：

（1）对影响充电负荷的关键因素进行分析：从电动汽车充电特性方面，分析了不同充电方式对充电负荷的影响，然后对比了常见的三种电池性能，并对锂离子电池的充电特性进行分析，基于实际情况，可以将锂离子电池的充电过程看成是恒功率充电；从电动汽车用户出行模式方面，分析了不同用途电动汽车的充电规律，提出私家车和商务车类型在本文应用场景进行有序充电的可行性，然后对 NHTS2017 数据进行处理后得到汽车用户的出行规律数学模型；从电力系统相关政策方面，充电桩的安装位置及数量会从充电的便利性和规模层面影响充电负荷的数值大小，而电力价格则会在时间尺度上去影响充电负荷的分布情况。

（2）建立电动汽车无序充电负荷模型：首先从理论层面分析了电动汽车充电负荷对电网运行的影响，在输电网方面，因中国发点资源相对丰富，所以电能供应不会成为主要矛盾，而在配电网方面，充电负荷的特性会对配电网的电能质量、系统可靠性和运行经济性产生较大的影响；随后，基于第二章的研究采用蒙特卡洛模拟方法建立了电动汽车无序充电负荷模型，通过图 3-5 验证了该方法的可行性；最终，通过仿真算例结果表明，随着电动汽车渗透率的增加，会导致负荷曲线“峰上加峰”并引起更大的负荷波动，对电网运行将会造成严重影响。

（3）立足于充电桩运营平台角色，研究建立基于电网侧、用户侧双侧优化的有序充电策略：首先从理论层面分析了有序充电的作用，有序充电通过将峰时段的充电负荷分散到谷时段，可以起到“削峰填谷”、平滑负荷曲线和降低充电费用的作用；其次，通过分析电网侧和用户侧在充电过程中的优化目标和约束条件，建立双侧优化的有序充电策略模型；然后，基于 PSO 算法在收敛速度和陷入局部最优的局限性，提出 SCM-PSO 改进算法，并用 Ackley 函数测试该改进方案的有效性；最后，设计仿真算例，采用 SCM-PSO 算法进行求解得到有序充电负荷曲线，结果表明随着用户响应有序充电策略的比例越高，优化电网运行和降低充电费用的效果越明显。

(4) 对充电桩运营平台进行总体设计, 并为实际运行过程中的充电调度提出解决方案: 首先, 以物联网终端、小程序客户端和运营平台云端三个方面对平台功能结构进行设计, 并设计相应的物理架构模型, 然后给出基于充电桩运营平台的电动汽车充电流程; 其次, 借鉴计算机操作系统中的作业调度算法, 设计出基于优先级队列的充电调度算法, 并搭配负荷跟随策略, 实现运营平台在实际运行过程中的充电调度; 最后, 通过仿真算例模拟, 指导负荷曲线与实时负荷曲线的相关系数为 0.996, 呈正相关性, 表明运营平台跟随了指导负荷进行实时充电。

6.2 未来展望

通过仿真模拟实验表明, 本文所研究的电动汽车有序充电调度策略在充电桩运营平台的应用具有一定的实用意义。但是, 目前充电桩运营平台依旧处于初级阶段, 还未完全应用有序充电调度策略, 仅是为汽车用户提供充电接口, 实现即插即充的功能。因此, 依旧有一些研究工作需要进一步完善和改进, 主要包括:

(1) 本文在建立电动汽车充电负荷模型采用的是对全美家庭出行数据进行处理分析, 在实际运行时该模型不够准确。随着国内基础充电设施的不断完善, 可以应用实际的充电负荷数据, 基于不同地区、天气情况以及节假日等因素建立起更加符合实际运行的充电负荷模型。

(2) 本文有序充电优化模型的求解算法采用的是经典优化算法的改进算法, 当未来在实际运营后, 有越来越多的用户参与到有序充电, 拥有了更多的数据集后可以采用当下最流行的深度学习、大数据等人工智能算法对求解算法进行重构, 得到更加智能化的有序充电策略。

(3) 本文所研究有序充电调度策略的能量流动是单向对电动汽车充电行为的控制, 随着 V2G 技术的发展, 未来的能量流动必定是电网与电动汽车的双向互动, 同时, 还可以将可再生能源参与到电动汽车和电网的智能互动中, 从而平衡电网负荷和提高可再生能源利用率, 推进可持续化发展。

参考文献

- [1] 田慧芳. 国际碳中和的进展、趋势及启示[J]. 中国发展观察, 2020(23): 72-74.
- [2] 何蛟, 张谦然. "双碳"背景下电动汽车充电基础设施软硬件发展趋势研究[J]. 科技与创新, 2021(18): 92-93, 96.
- [3] 罗艳托, 汤湘华. 全球电动汽车发展现状及未来趋势[J]. 国际石油经济, 2018, 26(7): 58-64.
- [4] X, Zhou, et al. The Current Research on Electric Vehicle[C]. 2016 Chinese Control and Decision Conference(CCDC), Yinchuan, 2016:5190-5194.
- [5] EA. (2023). Global EV Data Explorer. [Online]. Available: <https://www.ica.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>.
- [6] 王晓娟. 中国新能源汽车的发展现状及未来展望[J]. 时代汽车, 2022(4): 107-108.
- [7] 汪善进, 程远. 欧洲新能源汽车现状与发展趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(2): 135-49.
- [8] 马建, 刘晓东, 陈轶嵩等. 中国新能源汽车产业与技术发展现状及对策[J]. 中国公路学报, 2018, 31(08): 1-19.
- [9] 国家发展改革委, 国家能源局, 工业和信息化部, 等. 国家发展改革委等部门关于进一步提升电动汽车充电基础设施服务保障能力的实施意见[J]. 财会学习, 2022(7): 前插 1-前插 2.
- [10] 《泛在电力物联网白皮书 2019》摘要[N]. 国家电网报, 2019-10-15(002).
- [11] 孙毅, 黄婷, 崔晓昱等. 互联网视角下的泛在电力物联网[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(04): 3-12.
- [12] K. Clement-Nyns, E. Haesen and J. Driesen. The Impact of Charging Plug-in Hybrid Electric Vehicles on A Residential Distribution Grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 371-380.
- [13] K. Qian, C. Zhou, M. Allan and Y. Yuan. Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 802-810.
- [14] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10.
- [15] 李秋硕, 肖湘宁, 郭静, 等. 电动汽车有序充电方法研究[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 32-8.
- [16] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.
- [17] Qi Wei, Xu zhiwei, Shen Zuo-Jun Max, et al. Hierarchical Coordinated Control of Plug-In Electric Vehicles Charging in Multifamily Dwellings[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1465-1474.
- [18] S. Divyapriya, Amutha and R. Vijayakumar. Design of Residential Plug-in Electric Charging Station with Time of Use Tariff and IoT Technology[C]. 2018 International Conference on Soft-Computing and Network Security(ICSNS), Coimbatore, India, 2018:1-5.
- [19] 程杉, 赵孟雨, 魏昭彬. 计及动态电价的电动汽车充放电优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(10): 31-36, 42.
- [20] 蒋怡静, 于艾清, 黄敏丽. 考虑用户满意度的电动汽车时空双尺度有序充电引导策略[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 122-130.

- [21] 孙晓明, 王玮, 苏粟, 等. 基于分时电价的电动汽车有序充电控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 191-195.
- [22] Rotering N, Ilic M. Optimal Charge Control of Plug-in Hybrid Electric Vehicles in Deregulated Electricity Markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1021-029.
- [23] 周步祥, 何飞宇, 魏金萧, 等. 基于实时最优恒定功率的电动汽车有序充电策略[J]. 电测与仪表, 2021, 58(12): 18-23.
- [24] 段然. 考虑有序充电的电动汽车充电站与主动配电网协同规划研究[D]. 江苏: 东南大学, 2019.
- [25] K. M. Hazazim, et al. Optimal Planning of Distributed Generators for Loss Reduction Voltage Profile Enhancement Considering the Integration of Electric Vehicles[C]. TENCON 2018 IEEE Region 10 Conference, Jeju, Korea, 2018:883-888.
- [26] Sortomme E, Hindi M M, Macpherson S D J, et al. Coordinated Charging of Plug-in Hybrid Electric Vehicles to Minimize Distribution System Losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 198-205.
- [27] 常方宇, 黄梅, 张维戈. 分时充电价格下电动汽车有序充电引导策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2609-2615.
- [28] 陈奎, 马子龙, 周思宇, 等. 电动汽车两阶段多目标有序充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 65-72.
- [29] 李敏, 苏小林, 阎晓霞, 等. 多目标分层分区的电动汽车有序充放电优化控制[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3556-3562.
- [30] Kang Miao Tan, Vigna K R, Jia Ying Yong. Integration of Electric Vehicles in Smart Grid: A Review on Vehicle to Grid Technologies and Optimization Techniques[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 51: 720-732.
- [31] 王博, 艾欣. 考虑 V2G 用户响应度的峰谷电价时段优化有序充电[J]. 现代电力, 2016, 3(2): 39-44.
- [32] 董龙昌, 陈民铀, 李哲, 等. 基于 V2G 的电动汽车有序充放电控制策略[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(1): 1-15.
- [33] R. Asghar, M. H. Sulaiman, et al. Integration of Electric Vehicles in Smart grids: A Review of the Advantages and Challenges of Vehicle-to-grid Technology[C]. 2022 International Conference on IT and Industrial Technologies (ICIT), Chiniot, Pakistan, 2022: 1-7.
- [34] Wu D, Liu B, Chen Z J, Xie W Y. Cloud Computing in Electric Vehicles Charging Control and Dispatch Optimization[C]. 2014 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing(PIC), 2014: 597-600.
- [35] A. Kovacs, D. Marples, R. Schmidt and R. Morsztyn. Integrating EVs into the Smart Grid[C]. 2013 13th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Tampere, 2013: 413-418.
- [36] 宁剑, 江长明, 张哲, 等. 可调节负荷资源参与电网调控的思考与技术实践[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 1-8.
- [37] 殷树刚, 龚桃荣, 刘瑞, 等. 基于云平台的电动汽车智能充电系统设计与应用[J]. 供用电, 2015(7): 43-47.
- [38] 刘维扬, 王冰, 曹智杰. 基于区块链的电动汽车共享充电桩平台设计[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(9): 2690-2696.

- [39] 陈丽丹, 张尧, ANTONIO FIGUEIREDO. 电动汽车充放电负荷预测研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 177-191.
- [40] 康继光, 卫振林, 程丹明, 等. 电动汽车充电模式与充电站建设研究[J]. 电力需求侧管理, 2009, 11(5): 64-66.
- [41] 刘艳红, 黄雪涛, 石博涵. 中国"新基建": 概念、现状与问题[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2020, 20(6): 1-12.
- [42] 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.
- [43] 宋永华, 阳岳希, 胡泽春. 电动汽车电池的现状及发展趋势[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 1-7.
- [44] Lukic S M, Cao J, Bansal R C, et al. Energy Storage Systems for Automotive Applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2258-2267.
- [45] Department of Transportation. National Household Travel Survey 2017[R]. U.S. Department of Transportation, 2018.
- [46] M. J. Chihota, C. T. Gaunt. Impact of Input Model Accuracy on Probabilistic Load Flow Outputs[C]. 2018 IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power System(PMAPS), Boise, USA, 2018:1-6.
- [47] 曲大鹏, 范晋衡, 刘琦颖, 等. 考虑配电网综合运行风险的充电桩接纳能力评估与优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 131-139.
- [48] Machiels N, Leemput N, Geth F, et al. Design Criteria for Electric Vehicle Fast Charge Infrastructure Based on Flemish Mobility Behavior[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 320-327.
- [49] 潘樟惠, 高赐威. 基于需求响应的电动汽车经济调度[J]. 电力建设, 2015, 36(7): 139-145.
- [50] Stanton W. Hadley, Alexandra A. Tsvetkova. Potential Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Regional Power Generation[J]. The Electricity Journal, 2009, 22(10): 56-68.
- [51] Steven L. Plug-in Hybrid Electric Vehicles and the Vermont Grid: A Scoping Analysis[R]. Vermont: University of Vermont Transportation Center, 2007.
- [52] Carthy D M, Wolfs P. The HV System Impacts of Large Scale Electric Vehicle Deployments in A Metropolitan Area[C]. 20th Australasian University Power Engineering Conference. Christchurch: IEEE, 2010: 1-6.
- [53] E. Veldman, R. A. Verzijlbergh. Distribution Grid Impacts of Smart Electric Vehicle Charging from Different Perspectives[J]. IEEE Transactions on Smart, 2015, 6(1): 333-342.
- [54] Robert C, Green II, Wang Lingfeng, et al. The Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Distribution Networks: A Review and Outlook[C]. IEEE Power & Engineering Society General Meeting. Minneapolis: IEEE, 2010: 1-8.

- [55] Papadopoulos P, Cipcigan L M, Jenkins N, et al. Distribution networks with Electric Vehicles[C]. Universities Power Engineering Conference. Glasgow: IEEE, 2009: 1-5.
- [56] Richardson P, Flynn D, Keane A. Impact Assessment of Varying Penetrations of Vehicles on Low Voltage Distribution Systems[C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis: IEEE, 2010: 1-6.
- [57] 王建. 电动汽车充电对电网的影响及有序充电研究[D]. 山东: 山东大学, 2013.
- [58] Putrus G A, Suwanaping karl P, et al. Impact of Electric Vehicles on Power Distribution Networks[C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Michigan: IEEE, 2009: 827-831.
- [59] 郭建龙, 文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 1-9, 30.
- [60] A. Sanchez, et al. Smart Charging of PEVs to Reduce the Power Transformer Loss of Life[C]. 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America(ISGT Latin America), Quito, Ecuador, 2017: 1-6.
- [61] Huachun Han, Haiping Xu, et al. Interactive Charging Strategy of Electric Vehicles Connected in Smart Grids[C]. Proceedings of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, Harbin, China, 2012: 2099-2103.
- [62] Kelly L, Rowe A, Wild P. Analyzing the Impacts of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks in British Columbia[C]. Electrical Power Energy Conference. Montreal: IEEE, 2009: 1-6.
- [63] 陈学有, 文明浩, 陈卫等. 电动汽车接入对电网运行的影响及经济效益综述[J]. 陕西电力, 2013, 41(9): 20-28.
- [64] 张洪财, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2014(1): 13-20.
- [65] 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.
- [66] Yudong Tang, Hongkun Song, Funian Hu, Yun Zou. Investigation TOU principles[C]. 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Dalian, 2005: 1-9.
- [67] 张鑫源, 胡晓敏, 林盈. 遗传算法和粒子群优化算法的性能对比分析[J]. 计算机科学与探索, 2014(1): 90-102.
- [68] Kaidirkamanathan V, Selvarajah K, Fleming P J. Stability Analysis of the Particle Dynamics in Particle Swarm Optimizer[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 245-255

- [69] Bergh F, Engelbrecht A P. A Cooperative Approach to Particle Swarm Optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 225-239.
- [70] R. C. Eberhart and Y. H. Shi. Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources[C]. Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary, Seoul, Korea, 2001: 81-86.
- [71] Y. Shi and R. C. Eberhart. Empirical Study of Particle Swarm Optimization[C]. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99, Washington, USA, 1999: 1945-1950.
- [72] 陈贵敏, 贾建援, 韩琪. 粒子群优化算法的惯性权值递减策略研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(1): 53-56, 61.
- [73] Zhan Zhihui, Zhang Jun, Li Yun, et al. Adaptive Particle Swarm Optimization[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part B Cybernetics, 2009, 39(6): 1362-1381.
- [74] P. N. Suganthan. Particle Swarm Optimizer with Neighborhood Operator[C]. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99, Washington, USA, 1999: 1958-1962.
- [75] K. Deb and H. G. Beyer. Self-adaptive Genetic Algorithms with Simulated Binary Crossover[J]. Evolutionary Computation, 2001, 9(2): 197-221.
- [76] Huang X, Xu C, Wang P, et al. LNSC: A Security Model for Electric Vehicle and Charging Pile Management based on Blockchain Ecosystem[J]. IEEE Access, 2018, 6: 13565-13574.
- [77] 付萍萍, 郑富永, 王华, 等. 基于云平台的充电桩智能管理系统及移动应用开发[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(6): 180-183.
- [78] 李兴建. 电动汽车充电桩运行管理系统设计与实现[D]. 四川: 电子科技大学, 2020.
- [79] M. A. Alworafi, A. Dhari, et al. An Improved SJF Scheduling Algorithm in Cloud Computing Environment[C]. 2016 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer and Optimization Techniques(ICEECOT), Mysuru, India, 2016: 208-212.
- [80] 肖建康, 邱晓燕, 潘胤吉, 等. 考虑多方利益的居民小区电动汽车有序充电策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(10): 1-7, 26.

学位论文数据集

表 1.1: 数据集页

关键词*	密级*	中图分类号	UDC	论文资助
充电桩运营平台；充电负荷；有序充电；PSO的改进；充电调度策略	公开			
学位授予单位名称*		学位授予单位代码*	学位类别*	学位级别*
北京交通大学		10004	工学硕士学位	硕士
论文题名*		并列题名		论文语种*
基于充电桩运营平台的有序充电调度策略研究				中文
作者姓名*	陈杰		学号*	20121255
培养单位名称*		培养单位代码*	培养单位地址	邮编
北京交通大学		10004	北京市海淀区西直门外上园村3号	100044
学科专业*		研究方向*	学制*	学位授予年*
机械电子工程		有序充电	3年	2023年
论文提交日期*	2023年6月			
导师姓名*	陈科山		职称*	教授
评阅人	答辩委员会主席*		答辩委员会成员	
	王爽心		齐红元，周明连，肖燕彩，王耀东	
电子版论文提交格式 文本（） 图像（） 视频（） 音频（） 多媒体（） 其他（）				
推荐格式：application/msword； application/pdf				
电子版论文出版（发布）者		电子版论文出版（发布）地		权限声明
论文总页数*	85			
共 33 项，其中带*为必填数据，为 21 项。				