

学校代号： 10536
学 号： 11101050120
密 级： 公开

长沙理工大学硕士学位论文

纯电动汽车充电站选址布局研究

学位申请人姓名 石悦悦
导师姓名及职称 周爱莲副教授
培 养 单 位 长沙理工大学
专 业 名 称 交通运输规划与管理
论文提交日期 二〇一四年四月
论文答辩日期 二〇一四年五月
答辩委员会主席 罗大庸教授

**Study on the Site Selection of Charging Stations for
Pure Electric Vehicles**

by
SHI Yueyue



B.E.(Changsha University of Science & Technology) 2011

A thesis submitted in partial satisfaction of the
Requirements for the degree of
Master of Engineering

in
Transportation Planning and Management

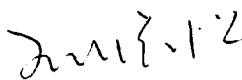
in
Changsha University of Science & Technology

Supervisor
Associate Professor Zhou Ailian
May, 2014

长沙理工大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：  日期：2014年 6月 3日


学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权长沙理工大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

本学位论文属于

- 1、保密□，在_____年解密后适用本授权书。
- 2、不保密□。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：  日期：2014年 6月 3日

导师签名：  日期：2014年 6月 3日

摘 要

面对日益严峻的环境问题和能源问题，高效节能污染少的新能源以及新能源产品亟待推广。汽车作为人们日常生活中必不可少的交通工具，既消耗大量石油又对环境产生严重污染，急需改革。电动汽车具有“零排放”、低噪音和能源高利用率等各种优点，是解决环境问题和能源问题的重要方式。然而，要想推动电动汽车的发展，就必须完善支撑电动汽车发展的基础设施。其中最为重要的就是充电站的建设，完成充电站的建设首当其冲就是完成充电站的选址。

针对充电站的选址问题，本文展开了一系列的研究。首先，通过阅读大量国内外相关文献，对充电站选址特点和相关选址理论有了深入的理解。对影响电动汽车选址的因素进行分析，建立了电动汽车选址评价指标体系和模型，运用模糊层次分析法对候选点进行了初选；其次，在此基础上建立了基于成本最低的双目标模型，上层目标函数以建设方建设成本和运营管理成本最低为目标，下层目标函数以充电用户充电路上行驶时间成本和充电等待时间成本最低为目标。本文在建模时考虑三个变量，第一，以充电站内充电机数为变量的建站成本函数；第二，考虑路网中各充电需求点到充电站候选点的最短距离这一变量；第三，以充电机数为变量的排队等待时间期望函数。针对本文建立的模型，运用遗传算法进行求解；最后，以临沂市电动汽车充电站的选址为实例，对本文的模型和算法进行了验证，用实践证明了模型和算法的正确性。

本文通过分析电动汽车充电站选址的特点分析，最终确定了一种充电站选址方法并进行了模型求解，具有一定的实际意义和价值。

关键词：电动汽车；充电站选址；FAHP；双目标；遗传算法

ABSTRACT

Facing the increasingly serious problems of environment and energy, the new energy and new energy products with the characteristics of high efficiency , energy saving and less pollution urgently need to be promoted. The car as people's daily life essential transportation tool, not only consume a large amount of oil but also cause serious pollution to the environment, so we need to reform. The electric vehicles having a "zero emissions", low noise and high energy utilization rate and other advantages, are an important way to solve the problems of environment and energy. However, in order to promote the technology of electric vehicles, it is necessary to improve the infrastructure to support the development of electric vehicles. The most important action is to construct the charging stations and the first step is to select the sites of charging stations.

According to the charging station location problem, the author did a series of research. Firstly, by reading a large number of domestic and foreign literatures, acquired a profound understanding of the charging station location characteristics and location theory. Analyzed the influence of the key factors on the location of the electric automobiles, established the evaluation index system and the model for location of electric vehicles, and primarily selected the candidate points by a fuzzy AHP method.

Secondly, built a double objectives model based on the lowest cost on the basis of last step, the upper-objective function aimed at minimizing the cost of construction and operation management cost, the lower-objective function aimed at minimizing the users' time spent on getting to the charging station and waiting. The author considered three variables in the model. First, the construction cost functions with the variable of the number of the charging machines; Second, the variable of the shortest distance between each demand point to the charging station candidate points; Third, the waiting time expectation function with the variable of the number of the chargers. Then, to solve the model with the genetic algorithm.

Finally, verified the model and the algorithm with the practical example of electric vehicle charging station site selection of Linyi, proved the correctness of the model and algorithm.

Key words: electric vehicle; site selection of charging stations; FAHP; double objectives; genetic algorithm

目录

摘 要	I
ABSTRACT	II
第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	2
1.3 国内外发展现状	2
1.3.1 国外发展现状	2
1.3.2 国内发展现状	4
1.4 国内外研究现状	5
1.4.1 国外研究现状	5
1.4.2 国内研究现状	6
1.5 本文主要研究工作思路	8
1.5.1 论文主要研究内容	8
1.5.2 论文主要思路	8
第二章 相关理论基础	10
2.1 电动汽车及充电站的概念	10
2.1.1 电动汽车	10
2.1.2 电动汽车充电方式	10
2.1.3 电动汽车充电站建设	11
2.1.4 充电站建设选址原则	12
2.2 排队论	13
2.2.1 排队过程的一般表示	13
2.2.2 基本组成和特征	14
2.2.3 排队系统分类	15
2.2.4 输入过程和服务分布	15
2.3 选址理论	17
2.3.1p-中位问题	17
2.3.2p-中心问题	18

2.3.3 覆盖问题	19
2.3.4 截流选址模型	21
2.4 本章小结	22
第三章 电动汽车充电站候选地址选择研究	24
3.1 指标体系的建立	24
3.1.1 影响因素分析	24
3.1.2 指标体系建立原则	25
3.1.3 指标体系	26
3.2 基于 FAHP 的电动汽车充电站候选地址选择	26
3.3 本章小结	29
第四章 电动汽车充电站选址模型研究	30
4.1 充电站选址特点	30
4.2 选址模型的构建	31
4.2.1 模型假设	31
4.2.2 模型参变量及符号	32
4.2.3 数学模型	33
4.3 相关变量求解	34
4.3.1 投资成本	34
4.3.2 排队等候时间期望	35
4.3.3 最短路径	36
4.4 模型求解	39
4.4.1 模型求解思路	39
4.4.2 遗传算法流程	40
4.4.3 编码方案	41
4.4.4 初始种群	43
4.4.5 适应度确认	43
4.4.6 遗传操作	44
4.5 本章小结	45
第五章 案例研究	46
5.1 临沂市电动汽车发展概况	46

5.1.1 背景介绍46

5.1.2 案例分析47

5.2 相关数据的确定49

5.3 模型求解50

5.3.1 模糊层次分析法初选50

5.3.2 遗传算法求解模型53

5.3.3 结果分析57

5.4 本章小结58

结论及展望.....59

 结论59

 展望59

参考文献61

致 谢64

附录 A 攻读学位期间发表论文目录65

第一章 绪论

1.1 研究背景

2013 年是雾霾大肆侵略的一年，我国大部分地区均长时间受大范围雾霾天气的影响，空气质量严重污染，其中北方部分地区 PM 逼近极值。虽然雾霾对人体的伤害短期内不易察觉，但是这并不能说明雾霾对人体的伤害不大。国外有研究表明，雾霾是造成心血管疾病的重要原因，也对肺癌的影响有长期慢性的作用，甚至还会引发心肌梗死，造成心肌缺血或者损伤等等。雾霾形成原因主要有地面灰尘、汽车尾气和工厂污染物等。而其中的地面灰尘和汽车尾气都是由于机动车产生的，可见汽车尾气对空气环境的污染是巨大的，贡献率已经超过了 60%。

我国作为发展迅猛的发展中大国，同样也是石油消耗大国，而石油储备量却很有限，大部分都需要进口，能源问题日益严重。而在全国的石油消耗中，有四分之一的消耗量是汽车耗油。

面对严峻的环境问题和能源问题，高效节能污染少的新能源以及新能源产品亟待推广。汽车作为人们日常生活中必不可少的交通工具，既消耗大量石油又对环境产生严重污染，急需改革。电动汽车的出现可以很好的解决上述问题，电动汽车具有“零排放”、低噪音和能源高利用率等各种优点，是解决环境问题和能源问题的重要方式。2001 年 10 月，“十五”国家 863 计划电动汽车重大专项启动，电动汽车必将成为汽车行业转型的重大突破口。

然而，电动汽车却难以得到推广。除了技术方面的一些原因，有一个重要因素就是支撑电动汽车发展的基础设施不完善。电动汽车充电站在电动汽车的发展过程中起到了至关重要的作用，包括直接作用和间接作用。直接作用主要包括三个方面：最重要的一个方面是为电动汽车提供能源补给；其次可以充当临时停车场；最后，还可以提供简单的日常维修。间接作用体现在稀疏覆盖水平有限的充电站会影响电动汽车用户正常出行，丧失行驶安全感，最终降低消费者的购买意愿。相反，充电站的分布若能保证用户的随时正常充电，将促进更多的消费者购买使用电动车，必将对电动汽车的发展起到推动作用，环境问题和能源问题将更快更好的得到解决。

因此，应当迅速建立起充电站等相关配套设施。建设充电站之前首先要考虑

充电站的选址布局问题，合理的选址和布局能更好的发挥充电站的作用。主要要考虑的因素包括以下几点。首先要考虑城市规划和电网规划；其次，要考虑充电需求者的分布和特点，尽量覆盖更多的需求者，满足用户的充电需求；最后，要考虑成本问题，使充电站的建设成本和用户使用成本之和最小。选址的合理与否将会严重影响到电动汽车用户的产生、用户的充电便利性，关系到建成后充电站的正常运营和更好的服务用户。

1.2 研究意义

电动汽车作为缓解环境问题和能源问题的重要工具，其重要性不言而喻。为了推动电动汽车的更快更好的发展，充电站的建设将起到至关重要的作用。本文正是针对充电站建设首先考虑的问题——充电站选址展开的，具有重要的意义，主要体现在一下几个方面。

（1）提高用户充电便利性。据调查，影响电动汽车购买者购买意愿的重要因素包括充电便利性，用户担心买回来的车无法进行充电，不能正常运行。本文综合考虑各方面的因素建立起来的模型着重考虑了用户充电成本，主要体现在充电路上成本和充电等待成本两个方面，旨在通过提高用户满意度来增加电动汽车的使用者。

（2）推动电动汽车地广泛使用和发展，缓解环境和能源问题。电动汽车作为新能源汽车，既可以减少能源的利用率又可以减少大气污染物的排放。电动汽车充电站的广泛大量建设必将推动电动汽车用户的大量增加。相应的传统的燃油汽车的使用者相对减少，在一定程度上对环境和能源问题起到缓解作用。

（3）本文所做的研究可以为充电站的选址提供一种方法，为相关的规划、设计人员的工作提供了依据。

1.3 国内外发展现状

1.3.1 国外发展现状

电动汽车的环保性和节能性越来越受到重视，在电动汽车充电站的建设和发展方面，各国均取得了可观的成就。就国外而言，美国、日本、以色列、法国、英国、德国等都已经制定了发展计划，并有了初步发展。

（1）美国

美国各地都开始建设电动汽车充电站，在建充电站大多是由公司、政府或者两者联合建设。在充电桩方面，加州北部一些城市已经开始在人流较集中、方便车辆停靠的场所安装充电桩，方便用户在工作、生活、娱乐时接受充电服务；美国电动汽车充电站制造商和光伏发电商将合作建设太阳能充电桩，并根据某些特定车型设计对应的充电桩。在充电站方面，俄勒冈州运输部计划建设一批大型快速充电站，并得到了美国政府 200 万的赞助，该批充电站能够在 15-20min 内充满电。美国多个公司都致力于电动汽车充电站或充电桩的建设，美国 SolarCity 公司和 BetterPlace 公司均投资建设充电站、完善充电网络^[1]。

(2)日本

面对日益严重的能源问题，一直以来，日本对电动汽车的发展特别重视。目前，日本拥有能在 30 分钟内为电动汽车充满 80%电力的快速电动汽车充电站超过 1700 个，普通电动汽车充电站超过 3000 个。计划到今年 10 月，将建设快速充电器的数量增加到 4000 个，普通充电器数量增加到 8000 个。日本相关企业对电动汽车充电站的建设大力支持，本田、丰田、日产和三菱公司发表声明，愿意共同承担用来增加日本国内快速充电站和普通充电站新增费用。日产汽车与 JX 日矿日石能源、住友商事等日企发表联合声明，计划到 2020 年将新建 4000 家电动汽车快速充电站^[2]。JCN 将与出光兴产、JX 日矿日石能源等 4 家汽油连锁店合作，以首都圈为中心，在他们经营的 30 多家加油站提供有料电动车充电服务。

(3)以色列

以色列政府、雷诺-日产汽车公司和美国 BetterPlace 公司三方按照“政府特许、公司运作、电池归公司所有、租换便捷”的模式开展合作，建成了覆盖全国的电动汽车充电网络。三方分别负责供应电动汽车；建设充电站基础设施，包括充电网络、交换服务站等；对电动汽车使用者将制定相关的优惠政策。

(4)法国

法国对电动汽车的关注较早，巴黎的公交车大部分都是纯电动公交车。同时，电动汽车的发展也不落后。为了推动电动汽车的发展和应用，巴黎市建立了数量较多的充电站，政府推出了可以查阅充电站位置的电动汽车充电站网络分布图，为充电用户提供更多方便。另外，法国对电动汽车示范项目还大力推广，典型的公交系统、环卫部门、市政部门、电力部门和邮政系统等都得到了广泛地应用。法国政府还和企业合作在住宅区、办公室、商场等场所建立大量充电站。如今，

法国电动汽车数量已经超过一万辆和电动汽车充电站的数量超过 200 座。

(5)英国

伦敦市电动汽车的发展水平在一定程度上代表了整个英国电动汽车充电站的发展水平，伦敦市有 60 个免费电动汽车充电桩，且在住宅区、办公楼、商场和道路都建有大量充电桩，充电成本非常低，每年只要交 75 英镑。计划在 2015 年前建立 2.5 万套电动汽车充电装置。

(6)德国

德国意昂公司完成了首个电动汽车充电站的建设，并提出未来公司的研究方向是缩短充电时间。威图公司的目标是在停车场内普及电动汽车充电桩。2009 年 4 月，柏林市提出将至少建立 550 个充电站。

1.3.2 国内发展现状

目前，我国电动汽车充电站的尚未得到广泛的建设，大多分布在少数发展较快的城市。像北京、上海、深圳等，分布区域较少。并且服务对象也较单一，大多数服务于电动公交车和少数集团车辆。下面对在建或已建的地区充电站进行介绍^[3]。

(1)北京

北京是国内较早开始建设电动汽车充电站的城市，2008 年之前就建设了第一座充电站，且在奥运会期间开始使用。截止至目前为止，北京已建成电动汽车充换电站超过 65 座，充电桩超过 1274 台，布局网络覆盖了市内所有区县，能够同时满足 3500 余辆电动汽车的充换电需求。北京电力公司计划在商场、交通设施附近等停车方便、需求点较大的地点建设直流充电桩，方便用户充电。

(2)深圳

早在 2006 年，比亚迪公司在深圳建设了深圳第一个电动汽车充电站。2009 年底，和谐站和大运中心站分别投入运行。两个站都配置了数个快速充电机，服务范围和服务车辆数都很广泛。2012 年，深圳市建设的充电桩已达 12750 个。根据预测，到 2015 年，深圳将推出新能源汽车 10 万辆，占深圳汽车保有量的 6%左右，充电站的需求量将大幅度增加。

(3)上海

上海市在电动汽车充电站建设方面发展的较全面，2009 年 8 月，上海市建成了曹溪充电站，与其他充电站不同的是，更具有商业运营价值。占地 400 平方米，

具有 10 个充电车位，主要对政府班车、社会电动公交车、电力工程车等车辆提供服务。上海市政府和国家电网公司对于充电站发展和建设方面给与了大力支持，计划完成 7 个充电站和 360 个充电桩的建设。在充电站的规划方面，上海市把包括电动汽车充放电在内的电力储能作为上海市智能电网产业发展的重点之一，计划在三年内建设 5000 个充电桩的规模，大力推进上海的充电站建设，从而带动上海市新能源汽车产业的发展。

(4)武汉

2010 年 8 月，武汉市首座电动汽车充电站——沌口车城西路充电站投入运营，其中配置了大型直流充电机 2 台、交流充电桩 8 个、中型直流充电机 4 台，该充电站可同时为 14 台不同型号的电动车提供充电服务。另外在东湖开发区将建一座中型充电站。还将在居民小区、停车场、商场和政府机关等建设 150 座充电桩。武汉市计划在近几年内，建成 30 座充电站、500 个充电桩，形成电动汽车的交通体系。

(5)长春

2010 年 8 月，长春高新电动汽车充电站投入运营。有 1 台大型直流充电站、5 台中型交流充电桩和 9 台中型直流充电桩，该充电站可同时为 15 辆电动车提供服务。截止 2012 年 9 月，长春市已在 6 个行政区建设了 11 座充电站。居民可在家附近购买电费充值卡，在安装充电桩的地点随意自助充电。到 2015 年，计划将加大充电基础设施的资金投入，更好地促进电动汽车的长足发展。

1.4 国内外研究现状

1.4.1 国外研究现状

面对来势汹汹的电动汽车，电动汽车充电站的建设问题亟待解决。充电站的选址研究也需尽早提上日程。目前，国内外对电动汽车充电站选址的研究较少，但是充电站也属于能源补给类设施，因此可以参考加油站、LNG 加气站等的选址布局。

Morrow (2008)^[4]等对不同类型区域的充电设施需求进行了分析，并运用一定的方法评价和对比了不同的充电设施建设成本。

Hatton (2009)^[5]等从分析建设电动汽车充电站的重要性出发，并提出建设充电站所需满足的条件，最后通过对各种充电设施分析总结出各类充电设施的最佳

服务对象。

Wang Heng-song (2010)^[6]等通过对充电站、充电用户特点及电网布局等因素，建立了一种基于多因素分析的多目标规划模型。

ReVelle (2005)^[7]等对一些经典的选址模型进行了总结和分析，并对这些模型的约束进行了扩展，以此来更好的分析和阐述模型。

F. Glover (1986)^[8]通过研究禁忌算法，最终证实禁忌算法可以找到全局最优解，可以运用于各种领域的模型求解。

Chiara Bersani^[9]等以加油站历史数据为基础，提出了加氢站的优化选址模型，经证实成本效益显著。

Michael^[10]等提出了一个考虑道路网络平均车流量、起讫点流量、加油站间的最大行驶距离等因素，提出了基于车辆最大流量的加氢站布点选址优化模型。并根据实例制定了加氢站设施规划。

Martin Frick^[11]等指出了对加气站网络进行严密的规划建设来确保天然气的充足供应的重要性，将共同效益分析法应用到瑞士加气站的最优选址方案中。

Holzman^[12]运用网络规划基本原理，并以所有用户到候选设施区位的距离平方和最小为目标，构建区位选择模型，并将其应用到实例中。

Hakimi^[13]以用户到候选设施点之间的最大距离最小化为目标，建立起网络内部多个设施的选址模型。并在实际中得到广泛应用。

1.4.2 国内研究现状

国内电动汽车行业开始有了初步的发展，关于电动汽车充电站选址问题已经有了一定研究。

寇凌峰 (2010)^[14]等通过对区域电动汽车充电站选址问题进行研究，以费用最少为目标建立模型，采用粒子群算法对模型进行求解，最终用实例证明了模型的合理性和正确性。

周洪超 (2011)^[25]等通过对传统选址方案分析，将博弈论的理论引入电动汽车充电站布局方法中，最终给出博弈论模型和相关算法。

任玉珑 (2011)^[16]等运用动态交通网络思想奖励了基于硬时间窗约束下的充电站布局及最佳规模确定的多目标优化模型，并将充电者的充电成本和投资者成本最小化为优化目标，运用两阶段启发式算法解决该问题。

李菱 (2011)^[17]等运用区域交通流量守恒定理，对电动汽车总量和分布进行预

测，建立了充电站的年最小费用模型，最后运用遗传算法进行求解。

张国亮（2011）^[116]等通过分析不同等级电动汽车充电站的特点，建立了以用户充电行驶时间成本和充电站建设成本之和最小的选址模型，并运用了改进的禁忌搜索算法对其进行了求解。

宋亚辉（2011）^[119]等运用不同预测方法对充电需求进行预测，并运用排队论的相关理论知识建立了充电站规模规划模型。运用重心法和设施区位理论相结合的方法建立了相关体系。

刘志鹏（2012）^[20]等建立了以规划期内充电站的总成本和网损费用之和最小为目标的数学模型，采用改进的原对偶内点法来求解。

葛少云（2012）^[24]等提出了一种全社会成本最小化的模型，并利用加权 voronoi 图来实现充电站服务范围的自动划分。

熊虎（2012）^[22]等建立起了用户充电成本和运行成本最低的目标函数，运用 voronoi 图和改进粒子群优化算法结合的方法进行求解。

谢林伟（2012）^[22]等通过分析影响充电站建设的多种因素，建立了以充电站建站位置最优和综合成本最低为目标的模型，采用自适应粒子群算法进行求解。

孙小慧（2012）^[24]等在研究充电行为和需求的基础上，建立了满足等待时间最短和服务最便利的时空间同时优化布局的动态模型，采用微观仿真方法进行了算例分析。

唐现刚（2012）^[25]等通过分析电动汽车充电站规模的若干因素，建立了电动汽车充电站规划的最大收益模型，采用 voronoi 图和粒子群优化算法相结合的方法进行模型的求解。

高赐威（2012）^[26]等综合考虑电力网络和交通网络因素，建立了集中型充电站的定址分容模型，通过比较验证模型的有效性。

何战勇（2012）^[27]建立了以充电站投资、运行成本和用户充电损耗成本之和最小的目标的区域内充电站的优化选址模型，最终利于粒子群算法进行求解。

高建平（2012）^[28]将兵棋推演的思想应用于电动汽车充电站网络建设规划模型中，建立了一种基于 voronoi 图与单源选址方法及 k-均值聚类算法结合的电动汽车充电站网络优化规划方法。

1.5 本文主要研究工作思路

1.5.1 论文主要研究内容

(1)通过分析电动汽车的使用情况和电动汽车的充电方式以及充电站的建设情况，提出了充电站的建设的必要性。

(2)介绍了关于选址理论的选址模型，包括 p -中位问题、 p -中值问题、覆盖问题和截流选址模型，为下文模型的建立提供了理论基础。

(3)本文先采用模糊 AHP 分析法对影响充电站选址的因素进行定性分析，以此来确定各个候选点的权重，然后根据排队论理论和选址理论建立起相应的模型。该模型加入了定性分析这一环节，准确性提高，且较贴合实际选址情况。

(4)对于模型的求解，本文采用遗传算法和 Dijkstra 算法想结合的方法求解模型，体现了该方法的准确性和可靠性。

(5)最后运用了一个案例来总结和验证本文提出的模型和相关算法的正确性。事实证明本文建立起的模型和算法都是可行的。

1.5.2 论文主要思路

本文从当下热点电动汽车充电站选址问题出发，建立起定性与定量分析想结合的模型，并运用遗传算法进行求解，以此为基础构架起了该论文的整体模型。本论文的主要思路如图 1.1 所示。

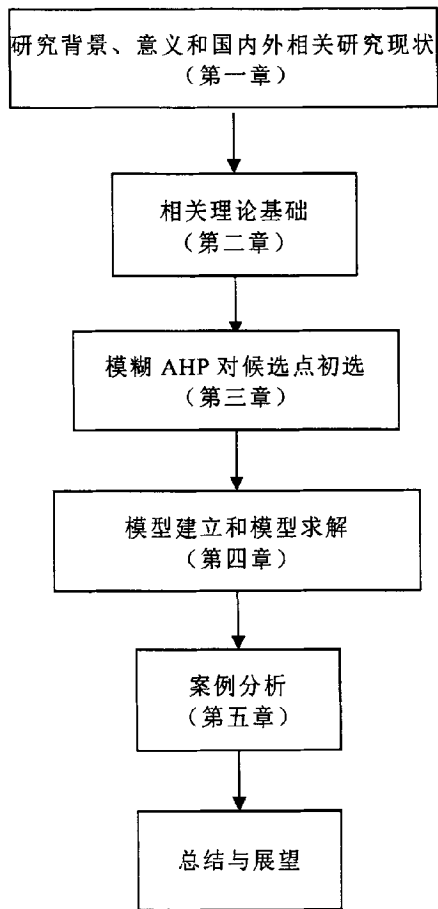


图 1.1 论文研究思路

第二章 相关理论基础

2.1 电动汽车及充电站的概念

2.1.1 电动汽车

电动汽车与普通燃油汽车基本类似，区别是电动汽车以车载电池为动力源，而普通燃油汽车则以燃料为动力源。电动汽车的种类主要有：纯电动汽车（BEV）、燃料电池汽车（FCEV）和混合动力汽车（HEV）^[29]。

纯电动汽车(BEV)是指以车载电源蓄电池为动力，用电机驱动车轮行驶。纯电动汽车的优点主要体现以下三个方面：第一，电能是二次能源，因此来源相对广泛，局限性相对较小；第二，纯电动汽车更加环保，整个行驶过程无废气排出，振动和噪声相对小很多，驾驶员和乘客舒适度相对较高；第三，与传统的内燃机相比，电机的能源利用率较高，且维修简单，结构稳定性高。但是，纯电动汽车有一个很致命的局限性，电动汽车的能源提供系统——电池。体现在两个方面，第一，质量大，且能量含量较低，因此在动力性能方面和功能方面与传统汽车相差较大；第二，成本高，电动汽车电池的成本和相应的充电设施成本较高。

燃料电池汽车（FCEV）是运用燃料电池提供车辆驱动的方式。燃料电池通过电极反应将储存在燃料和氧化剂中的化学能转化为电能。这种方式效率高、续航里程长并且绿色环保。

混合动力汽车（HEV）采用的是两种方式的能源提供系统，通常情况包括发动机和电动机。在电池能力过低不能进行正常运行时，发动机可以很好的发挥作用，既解决了纯电动汽车续航里程短这一问题，又能解决污染和噪音问题。

2.1.2 电动汽车充电方式

当前常用的电动汽车的充电方式主要有三种，分别是常规充电、快速充电和电池更换方式。

(1)常规充电方式

常规充电又叫慢速充电，充电时间较长是它的一大缺点，一般可以达到 6-8 个小时，有些甚至长达 10-20 小时。主要原因是采用小电流模式进行充电。优点是这种充电方式能够有效地解决电池充电过程中的发热问题，电池的使用寿命较

长。鉴于以上两点，常规充电适合在家庭车库或者停车时间较长的停车场使用。

(2)快速充电方式

快速充电方式与常规充电方式截然相反，通常是采用 150-400A 的大电流对电池进行充电。这种充电方式使电动汽车在较短的时间内重新获得电能，充电时间为 10-30min 左右，这已经与燃油汽车的加油时间差不多。但是，快速充电会对电池造成永久性的伤害，严重影响电池的使用寿命。

(3)电池更换方式

电池更换方式指的是将耗尽电量的车辆驾驶至专门的电池更换点，将耗尽的电池卸下并安装上充满电的电池，使电动汽车能正常行驶。整个装卸过程只需要几分钟，比快速充电方式还要节省时间。也可以在夜间集中充电，这样就能充分利用夜间谷电，减小日间用电高峰。

2.1.3 电动汽车充电站建设

当前纯电动汽车的续航里程一般都不超过 200km，因此要广泛建立起电动汽车充电站系统，保证电动汽车的能量供给，促进电动汽车的大力发展，做好节能减排工作。由于电动汽车充电方式的不同和用户选择充电方式的不同，对充电站的建设自然也呈现出不同的方式。常见的建设方式有三种，慢速充电桩、快速充电站和电池更换站，下面我们将分别介绍它们的特点。

(1)慢速充电桩

慢速充电桩的主要服务对象是采用常规充电方式进行充电的用户，主要有私家车、单位用车和集团用车等，一般采用较低功率的交流电进行充电，充电时间一般在 6-8h。其优点主要有两点：第一，经济性。和充电站相比，充电桩的建设和运营费用都较低，并且可以利用夜间时段进行充电，不会对整个电力系统产生较大冲击，既保护了电力系统又降低了成本；第二，充电桩占地面积小。在寸土寸金的城市更容易布点，可以停车的地方就可以进行建设，方便用户充电。并且易于操作，无需专业人员进行充电服务，用户停车就可以进行充电。但是它有一个很明显的缺点，该充电方式不能满足快速充电的需求，因为等待充电时间过长，只适合特殊人群的充电方式。

(2)快速充电站

快速充电站的主要服务对象是采用快速充电方式的用户，主要有公交车、私家车和出租车用户等，采用较大电流较高功率在短时间进行充电，充电时间一

一般为 10-30min。其优点是充电时间较短，能够满足用户紧急充电需求。缺点主要有两点：第一，充电站的建设成本、运营成本和对电网的要求较高，在电动汽车发展初期不宜过多建设；第二，由于电池在短时间内进行高压和大电流的冲击，在一定程度上会缩短电池寿命。

(3) 电池更换站

电池更换站的主要服务对象是采用电池更换方式的用户，包括公交车、出租车和私家车等，采用机械将耗尽的电池取下并安装充满电的电池的方式。从电池更换站的运营特点可以看出，该方式及其便利，只需花费极少的时间久可以对电动汽车进行续航，节省了用户的时间，且还可以对电池进行维修和保养。但是，它也存在一些问题，第一，随时进行更换的蓄电池和大量的装卸机械成本昂贵；第二，电池体积较大，因此存放电池的空间需求也很大，而一般的城市用地费用及其昂贵，因此电池更换站的成本很高，已经成为限制更换站发展的重要因素。但是电动汽车更换站的方便和便捷吸引越来越多人进行研究，发展前景相当广阔。

2.1.4 充电站建设选址原则

充电设施的建设必然对电动汽车的发展起到至关重要的作用，在鼓励大力建设充电站的同时要面对的问题是，我国充电站的建设还没有形成一定的标准和准则。比如充电站的选址问题，如何选址不仅关系到充电站的顺利运营还关系到电动汽车用户的便利使用。不仅关系到现在的利益还关系到后人的利益。因此，充电站的建设必须遵从一定的选址原则。

(1) 城市规划要求

充电站的建设属于城市规划的一部分，充电站布局的合理与否直接影响到整个城市规划和布局的合理与否，不仅影响到城市的外观，还影响到城市各种基础设施的关系。因此充电站的选址在满足自身需求的同时必须要满足城市规划的基本要求。

(2) 满足服务半径要求

正如加油站起到的作用一样，充电站同样是为了保证电动汽车的续航能力。因此，充电站的建设也要满足一定的密度要求，设置服务半径，保证电动汽车有电可充，满足用户的安全感和便利感。让用户对充电站认可，对电动汽车认可，从而促进电动汽车的发展。

(3) 安全性

包括交通安全、电力系统安全等。

交通安全指的是充电站的建设要满足基本的交通规则，做好交通影响评价。尽量选择交通便利、可达性强的地点，不仅降低了充电站建设者初期在交通设施的投入，还能保证充电用户方便充电。

电力系统安全指的是充电站的建设不能给电网产生强大冲击导致电力系统产生安全隐患，要满足电网规划的要求。保证电网的供电可靠性、电力平衡和电能质量。

(4)经济节约性

经济节约性主要体现在建设充电站所需用的土地方面。一般情况下，充电站的用地面积较大，除了充电站内设备占地外，还有电动汽车充电停车用地，另外还有部分预留面积。因此占地面积较大，但是从经济节约型分析，购买土地费用不宜太大，太大会引起成本增加，增加负担。

(5)满足充电需求

充电站既要满足电动汽车用户的续航，提供便利性，还要满足充电用户的需求。体现在两个方面，首先充电站要覆盖所有的充电用户，其次，充电站和充电机数量的配置要与充电需求的分布一致。

2.2 排队论

1909年，丹麦电话工程师爱尔朗第一次提出了排队问题。该问题在日常生活及其常见，除了电话系统外，银行服务系统、车站、码头、交通甚至网络收费管理中等都会见到。排队论也成为随机服务系统理论，用来解决拥堵排队问题。通过研究排队现象，寻找排队等待时间、排队长度等规律，然后将其更好的应用改善排队系统中^[30-33]。

2.2.1 排队过程的一般表示

顾客需要接受服务时，到达服务机构接受服务，根据服务机构的忙闲程度等待或者直接接收服务，若有排队则需等待，接收服务后离开该服务系统。排队系统一般包括三个部分：顾客到达、排队等候，接受服务，服务完成离开。下图即是一般的排队过程模型。

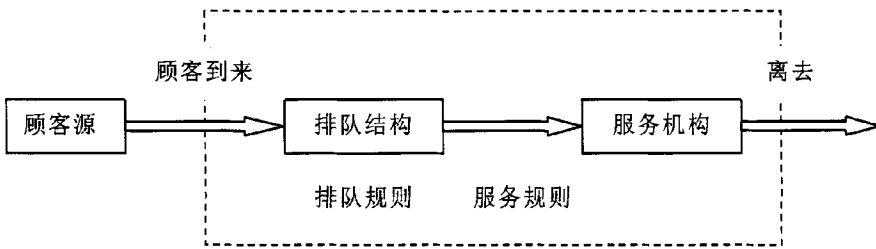


图 2.1 排队系统模型

2.2.2 基本组成和特征

排队系统主要由三部分组成：输入过程、排队规则、服务机构和数量指标，下面对这几个部分分别描述。

一、输入过程

输入过程主要描述的事顾客按怎样的方式和规律抵达排队系统，通常从三个方面描述。

(1)顾客源

即顾客的来源，顾客源可以是有限的也可以是无限制的。

(2)到达方式

描述的事顾客的到达方式，即顾客是如何到达系统的，可以是单个的也可以是批次到达。

(3)顾客相继到达的时间间隔分布

二、排队规则

排队规则指的是顾客按怎样的方式和顺序接受服务。一般包括损失制、等待制和混合制三种方式。

①损失制。顾客到达时，若不能及时接受服务则离开的方式。

②等待制。顾客到达时，若不能及时接受服务则排队等待服务的方式。

③混合制。指的是系统空间限制一定的数量，顾客到达时，当系统内超过该数量，顾客离去；系统内低于该数量，顾客排队等待，是损失制和等待制的两种情况的结合。

三、服务机构

服务机构主要包括三个方面：①服务台数量；②服务机构的结构；③服务时间。

四、主要数量指标

λ : 平均到达率;

μ : 平均服务时间;

S : 服务台数量;

ρ : 服务台的服务强度;

P_j : 系统中有 j 个顾客的概率;

L : 对长的期望值;

L_q : 等待对长的期望值;

W : 逗留时间的期望值;

W_q : 等待时间的期望值。

2.2.3 排队系统分类

排队模型用 kendall 记号表示。记作: $X/Y/Z/A/B/C$ 。其中:

X : 用户到达排队系统间隔时间分布方式;

Y : 排队系统服务时间分布方式;

Z : 服务台数量;

A : 排队系统对于容量的限制;

B : 顾客源数量;

C : 服务规则。

通常模型只用前三项来表示, 指的是 $X/Y/Z/\infty/\infty/FCFS$, $FCFS$ 代表先到先服务。

2.2.4 输入过程和服务分布

用户到达排队系统的时间间隔和排队系统服务用户的时间间隔的分布有很多不同的方式, 它或者是随机的或者是确定的, 在这里我们用 τ 表示, 则 τ_n 称作第 n 个到达间隔时间, 代表第 n 个顾客到达的时间点与第 $n-1$ 个顾客到达时间点的差。一般假设 $\{\tau_i\}$ 服从独立同分布, 它的分布函数被记做 $A(t)$ 。关于 $\{\tau_i\}$ 分布, 通常有以下几种情况。

一、定长分布 (D)

每隔固定时间间隔内就会有一个顾客到达。例如固定时间间隔是 c ，则分布函数为：

$$A(t) = P\{\tau_n \leq t\} = \begin{cases} 0, & \text{若 } t < c \\ 1, & \text{若 } t \geq c \end{cases} \quad (2.1)$$

二、泊松分布 (M)

到达过程服从参数为 λ 的泊松分布， $\{\tau_n\}$ 服从独立、同指数分布，密度函数为

$$a(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \lambda e^{-\lambda t}, & t \geq 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

设 N_t 表示在时间区间 $[0, t]$ 内到达的顾客数 $n(n \geq 0)$ ，令 $P_n(t_1, t_2)$ 表示在时间 $[t_1, t_2]$ ， $(t_2 > t_1)$ 内有 $(n \geq 0)$ 个顾客到达的概率，则：

$$P_n(t_1, t_2) = P\{N(t_2) - N(t_1) = n\} \quad (t_2 > t_1, n \geq 0) \quad (2.3)$$

$P_n(t_1, t_2)$ 必须同时满足下面的条件，才符合泊松分布。

① 无后效性，顾客到达服务系统的概率没有关联。

② 在充分小的时间 Δt 内，顾客到达的概率与 Δt 的长度成正比，与什么时间到达的没有关系，表达如下：

$$P(t, t + \Delta t) = \lambda \Delta t + o(\Delta t) \quad (2.4)$$

其中 $o(\Delta t)$ 是当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时关于 Δt 的高阶无穷小。

③ 在充分小的时间 Δt 内，不存在有多个顾客到达的情况，表达如下：

$$\sum_{n=2}^{\infty} P_n(t, t + \Delta t) = o(\Delta t) \quad (2.5)$$

则在时间 t 内到达 k 个顾客的概率服从泊松分布的概率，表达如下：

$$p_n\{N(t) = k\} = \frac{e^{-\lambda t} \lambda t^k}{k!} \quad (t > 0, k = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.6)$$

三、爱尔朗分布

$\{\tau_n\}$ 服从独立、同 k 阶爱尔朗分布，密度函数为

$$a(t) = \frac{\lambda(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda t} \quad t \geq 0 \quad (2.7)$$

分布函数为

$$A(t) = 1 - e^{-\lambda t} \left(1 + \frac{\lambda t}{1!} + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{k+1}}{(k+1)!} \right), t \geq 1 \quad (2.8)$$

若 $k=1$ ，就变成了指数分布。

平均数和方差分别为：

$$E[\tau_n] = \frac{k}{\lambda}, \quad D[\tau_n] = \frac{k}{\lambda^2}$$

2.3 选址理论

早在 1909 年，出现了最早的选址问题，为了在一个区域内找一个仓库的位置，使得所有顾客到这个仓库之间的总距离最小，这就是著名的 Weber 问题。选址问题的应用相当广泛，常见的有交通设施、水利设施、配送中心和物流中心等的选址。本文研究的是电动汽车充电站的选址问题，对于这类问题常用的方法主要有 p-中位问题、p-中心问题、覆盖问题和流量需求问题。

2.3.1 p-中位问题

1964 年，Hakimi^[34]提出的 p-中位问题，并给出了 p-中位问题的特性。该模型主要研究的问题是选择 p 个服务设施使得服务设施和需求点之间距离和需求乘积之和最小，即保证加权距离最小，该模型得到了广泛的应用。但是 p-中位问题属于 NP 难题，需要运用启发式算法解决问题。

具体相关变量及模型表达如下所示。

(1) 符号定义

I ：需求点集合

i ：需求点

J ：充电站候选集合

j ：充电站候选点

P ：准备建站的数目

d_{ij} : 需求点 i 到候选点 j 的距离

X_j : 决策变量, 如果在候选点 j 建站, 等于 1, 否则为 0

Y_{ij} : 决策变量, 如果需求点 i 到候选点 j 接受服务, 等于 1, 否则为 0

(2)模型

$$\min mize = \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (2.9)$$

s. t.

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2.10)$$

$$\sum_j X_j = p \quad \forall j \in J \quad (2.11)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.12)$$

$$X_j = 0, 1 \quad \forall j \in J \quad (2.13)$$

$$Y_{ij} = 0, 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.14)$$

其中, 目标函数 (2.9) 式表示充电需求点到候选站点的加权距离之和最小; 目标函数 (2.10) 式表示所有需求点均能得到满足; (2.11) 表示代建站的个数为 p ; (2.12) 表示候选点只有建站之后才能提供服务; 约束条件 (2.13)、(2.14) 表示 X_j 、 Y_{ij} 为 0-1 变量。

2.3.2p-中心问题

p-中心问题同样也是由 Hakimi 提出的。该模型主要研究如何在网络中选择 p 个服务设施使得任意的需求点到距离最近设施的最大距离最小化。随后 Hakimi 和 Kariv 一起证明了 p-中心问题也是 NP 难题。

具体相关变量及模型表达如下所示。

(1)符号定义

I : 需求点集合

i : 需求点

J : 充电站候选集合

j : 充电站候选点

P : 准备建站的数目

D : 需求点到距离该需求点最近服务站的距离

X_j : 决策变量, 如果在候选点 j 建站, 等于 1, 否则为 0

Z_{ij} : 决策变量, 如果需求点 i 到候选点 j 接受服务, 等于 1, 否则为 0

(2)模型

$$\text{Minimize } D \quad (2.15)$$

s. t.

$$\sum_j Z_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2.16)$$

$$\sum_j X_j = P \quad \forall j \in J \quad (2.17)$$

$$Z_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.18)$$

$$D \geq \sum_j d_{ij} Z_{ij} \quad \forall i \in I \quad (2.19)$$

$$X_j = 0, 1 \quad \forall j \in J \quad (2.20)$$

$$Z_{ij} = 0, 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.21)$$

其中, 目标函数 (2.15) 式表示各个需求点到距离其最近的服务站的最大距离最小; (2.16) 表示各个需求点的需求都能得到满足; (2.17) 表示待建的服务站数为 P ; (2.18) 表示候选点只有建站之后才能为各个需求点提供服务; 约束条件 (2.19) 表示确定任意需求点到距离该需求点最近的服务站的最大距离; 约束条件 (2.20)、(2.21) 表示 X_j 、 Z_{ij} 为 0-1 变量。

2.3.3 覆盖问题

覆盖模型主要研究通过建设服务设施, 将一些需求点纳入服务范围以内, 即覆盖, 而需求点不一定只被一个服务设施覆盖。这里的“服务范围”指的就是服务半径, 在服务范围内即被覆盖, 否则就没被覆盖。覆盖问题一般分为集合覆盖和最大覆盖两类。

(一) 集合覆盖

1971 年 Toregas 和 Roth^[55]提出了集合覆盖问题, 该模型主要研究的是在候选设施点和需求点都已知的情况下, 以覆盖所有需求点为前提, 即每个需求点至少

被覆盖一次，使得建设设施成本最低。经证明，集合覆盖问题同样也是 NP 难题。集合覆盖模型主要应用在必须要全部覆盖的问题上，比如消防中心和救护中心等应急设施的选址问题上。

具体相关变量及模型表达如下所示。

(1)符号定义

I : 需求点集合

i : 需求点

J : 充电站候选集合

j : 充电站候选点

c_j : 在候选点 j 建立服务设施的固定成本

N_j : 候选点 j 的充电机数量

d_{\max} : 充电站的服务半径

X_j : 决策变量，如果在候选点 j 建站，等于 1，否则为 0

(2)模型

$$\text{Minimize } \sum_j c_j X_j \quad (2.22)$$

s. t.

$$\sum_j X_j \geq 1 \quad \forall j \in J \quad (2.23)$$

$$X_j = 0,1 \quad \forall j \in J \quad (2.24)$$

其中，目标函数（2.22）式表示建设服务设施的成本最小；（2.23）表示任何一个需求点都至少被一个服务设施提供服务；约束条件（2.24）表示 X_j 为 0-1 变量。

（二）最大覆盖

1974 年 Church 和 Revell^[86]提出了最大覆盖问题，该模型主要研究的是在候选设施点数目（ p ）和其相应的服务半径都已知的情况下，选择 p 个设施使得覆盖的需求量最大。经证明，最大覆盖问题也是 NP 难题。由于集合覆盖以完全覆盖为前提，要求较高，而现实生活中资源比较有限，较难实现需求点的完全覆盖。因此最大覆盖模型应用的更为广泛。

具体相关变量及模型表达如下所示。

(1)符号定义

I : 需求点集合

i : 需求点

J : 充电站候选集合

j : 充电站候选点

q_i : 需求点 i 的需求量

P : 准备建站的数目

X_j : 决策变量, 如果在候选点 j 建站, 等于 1, 否则为 0

Z_i : 决策变量, 如果需求点 i 到候选点 j 接受服务, 等于 1, 否则为 0

(2)模型

$$\text{Maximize } \sum_i h_i Z_i \quad (2.25)$$

s. t.

$$\sum_j X_j \leq P \quad \forall j \in J \quad (2.26)$$

$$Z_i \leq \sum_j X_j \quad \forall i \in I \quad (2.27)$$

$$X_j = 0,1 \quad \forall j \in J \quad (2.28)$$

$$Z_i = 0,1 \quad \forall i \in I \quad (2.29)$$

其中, 目标函数 (2.25) 式表示尽量多的覆盖需求点的需求量; (2.26) 表示服务站的个数不超过 P ; (2.27) 表示当需求点在覆盖范围以内时, 才能被覆盖; 约束条件 (2.28)、(2.29) 表示 X_j 、 Z_i 为 0-1 变量。

2.3.4 截流选址模型

1990 年 Hodgson^[37]提出了截流选址模型 (FCLM), 该模型主要研究的是在需求路线和需求流量已知的情况下, 在网络中建立 p 个服务设施使得服务的需求量总和最大, 是流量需求模型的基础模型。

具体相关变量及模型表达如下所示。

(1)符号定义

V : 所有节点的集合

v_j : 代号为 j 的节点

A : 所有边的集合

a_i : 代号为 i 的边

Q : 交通流量不为 0 的线路的集合

P : 准备建站的数目

f_q : 第 q 条线路上的交通流量

V_q : 第 q 条线路上的节点的集合

X_j : 决策变量, 如果在第 v_j 个节点上建站, 等于 1, 否则为 0

y_q : 决策变量, 如果在第条路线上至少建站一个服务站, 等于 1, 否则为 0

(2)模型

$$\text{Maximize } \sum_q f_q y_q \quad (2.30)$$

s. t.

$$\sum_j X_j = p \quad \forall j \in J \quad (2.31)$$

$$\sum_{v_j} x_j \geq y_q \quad \forall q \in Q \quad (2.32)$$

$$y_q = 0,1 \quad \forall q \in Q \quad (2.33)$$

$$x_j = 0,1 \quad \forall v_j \in v \quad (2.34)$$

其中, 目标函数 (2.30) 式表示被服务设施覆盖的锅炉需求量最大; (2.31) 表示待建的服务站数为 P ; (2.32) 每条线路至少建设一个服务设施; 约束条件 (2.33)、(2.34) 表示 X_j 、 Y_{ij} 为 0-1 变量。

2.4 本章小结

本章主要论述了本文的理论基础内容, 首先介绍了电动汽车、电动汽车充电

方式、电动汽车充电站建设的类型以及充电站建设的选址原则；其次对排队论的基本组成和形式、排队系统分类、输入过程和服务方式做了介绍；最后又针对不同的选址理论，如 p -中值问题、 p -中心问题、覆盖问题和截流选址模型做了介绍。

第三章 电动汽车充电站候选地址选择研究

电动汽车充电站候选点的合理与否通常不能运用数学手段进行表述。比如影响电动汽车充电站选址的交通因素、电网因素、地价因素、经济因素、政策因素等等，这些因素是很难通过定量分析的方法进行描述，而是需要一些定性分析的方法。因此本章采用模糊层次综合评价法对影响充电站选址的因素进行定性分析，初步选取一定数量的候选点。这些经过定性分析筛选过的候选点符合电动汽车充电站的选址原则，并且合理性更强。

3.1 指标体系的建立

3.1.1 影响因素分析

通过分析充电站的选址原则和影响因素，本文主要从交通因素、电网因素、经济因素和其他因素四个方面进行分析，其中包括了四个一级指标和十个二级指标。

(1) 电网因素

电网容量：电网容量指的是电网允许带的总负荷，由于电动汽车充电使用的是 150-400A 的大电流，可供数量较多电动汽车充电的充电站接入电网必将对原电网产生较大的负荷。因此电网容量成为一个重要的影响因素。

电力平衡：电力网络是一个发、供、需实时平衡的系统。电力供应超出电力需求和电力需求大于电力供应都会影响电力系统的正常运行，甚至导致整个系统崩溃。充电站的接入势必会导致电力需求增加，给电力系统造成一定影响。

电能质量：电能质量指的是电力系统中电能的质量。即优质供电，包括电压质量、电流质量、供电质量和用电质量。电能质量不仅影响电动汽车充电时间的长短，还对电池的使用寿命产生影响。

(2) 交通因素

路网状况：充电站周边路网密度、路网完善程度在一定程度上影响充电站附近的交通便利性和可达性，从而影响该候选点充电站的权重。

交通状况：在保证路网状况的基础上，交通的拥堵情况和通畅情况影响着能否吸引到更多的用户，交通越是便利，越能节省用户的时间，从而吸引更多的用户。

(3)经济因素

土地价格：充电站的占地面积一般较大，在寸土寸金的城市，土地价格必将占初始建站成本很大一部分比例。因此在选择站址时，候选点的位置是必须要考虑的一个因素。可以适当的考虑远离市中心的站点。

其他：不同地点建站施工成本以及相对应的管理费等各类杂费有所差异。

(4)其他

安全性：安全性是充电站建设的最低保证。充电站周围的交通设施、救助设施和消防设施等公共基础设施在一定程度上可以起到预防和防护作用，为充电站的安全性提供了一定的保障。

环保性：充电站的建设会对周边的交通产生一定的影响，因此在建站之前就要做好环境影响评价，提前预防，及时治理，防治结合。

政策性：充电站的规划要满足现阶段的政策因素，还要满足未来政策趋势。根据政策支持度、政府的扩建规划和候选点的发展潜力等分析候选点的实力。

3.1.2 指标体系建立原则

本文将遵循指标体系选取的可操作性原则、完备性原则、客观真实性原则、独立性原则对评价指标体系内各个因素进行选取。

①可操作性原则。对充电站影响因素的选取要素易于操作和赋值，否则无法对各指标进行赋值和运算，在一定程度上限制和误导了选址的结果。在选址的初期就造成了失误。

②完备性原则。在指标体系的选取过程中要全面考虑各项指标，防止某些重要指标因素的遗漏。只有全面选择指标因素，才能为下文充电站选址的相关运算打好基础。

③客观真实性原则。对于指标的选取，很基础的一点是保证指标的客观真实性。选取的充电站各项指标必须能够客观反映充电站的真实情况，只有依托于客观真实的资料和数据，才能获得真实可靠的评价结果。

④独立性原则。对于指标因素的选取，要避免各个指标之间出现重复现象。比如从电网因素考虑充电站的选址问题时，就要区分开电网因素所涵盖的各个子

因素，否则就会造成指标的交叉现象，最终造成评价的偏差和失真，不能正确有效地反应实际。

⑤层次性原则。对各项指标因素进行层次划分，一定程度上保证了指标的完备性和独立性。符合 FAHP 的建模方式，更有利于对各项指标的后期处理。

3.1.3 指标体系

依据评价指标体系的构建原则和对以上各因素的分析 and 描述，最终建立评价指标体系如所示：

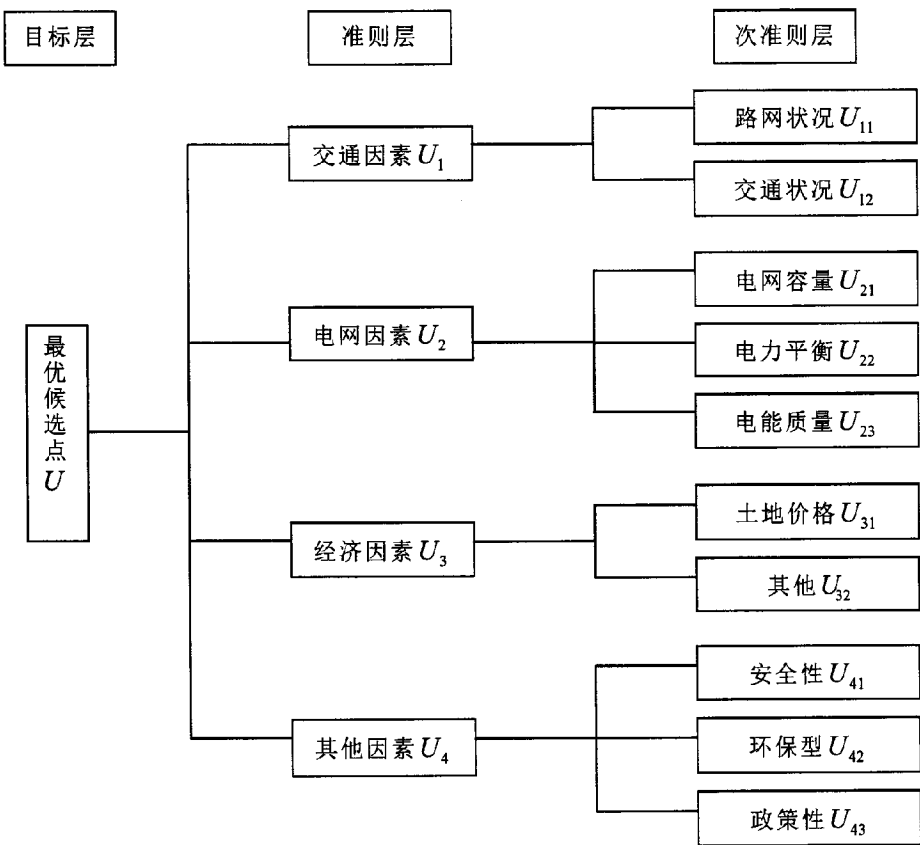


图 3.1 电动汽车充电站选址评价指标体系图

3.2 基于 FAHP 的电动汽车充电站候选地址选择

模糊层次分析法（FAHP），顾名思义，模糊数学和层次分析法相结合的一种分析方法。该方法结合了模糊数学处理客观事物不确定性的优点和层次分析法处

理指标权重的优点。将该方法引入充电站的初选中，既方便又简洁，能够发挥更好的作用。关于 FAHP 方法的线路如图 3.1 所示^[38]。

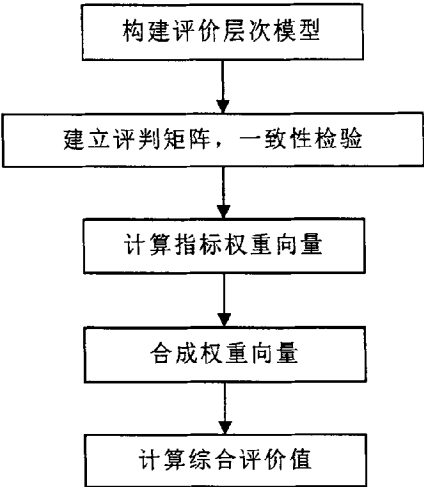


图 3.2 模糊综合评价线路图

根据本文建立的评价指标体系，各项因素均为模糊因素，因此本文采用的是根据隶属函数确定模糊综合评判的方式。具体步骤如下所示：

(1)建立评判因素集 U 和 V

通过对 3.1.3 建立起来的指标体系进行分析，相应地建立因素集。由准则层建立第一层因素集，由此准则层建立第二层因素集，具体表达如下：

第一层： $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\}$;

第二层： $U_1 = \{U_{11}, U_{12}\}$; $U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}\}$; $U_3 = \{U_{31}, U_{32}\}$; $U_4 = \{U_{41}, U_{42}, U_{43}\}$ 。

本文将候选站址的等级分为 3 个等级 $V = \{V_1, V_2, V_3\}$ ，分别表示选址的优异程度，即{优，中等，差}，给定的值分别为 80、60、40。

(2)确定评价指标权重

模糊层次分析法中权重的确定采用 AHP 法，具体步骤如下。

第一步：很据本文建立的指标体系，构建出层次模型。

第二步：构造判断矩阵。

表 3.1 判断矩阵形式表

A	A_1	A_2	...	A_n
A_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
A_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
A_n	a_{n1}	a_{n2}	...	a_{nn}

鉴于可能产生误差，判断矩阵必须进行一致性检验，具体方法如下：

定义一致性指标 CR ，其计算公式为：

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{3.1}$$

若一致性指标 $CR < 0.10$ ，则认为判断矩阵满足一致性要求，可以接受而不需重新估值。

RI 是平均随机指标，其取值表 3.2 所示。

表3.2 平均随机一致性指标 RI 取值表

阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52

第三步：计算判断矩阵的最大特征根与对应的特征向量。

第四步：计算各个指标的权重。

(3)建立模糊综合评判矩阵

通过对充电站选址的实际情况、选址指标体系的分析以及各因素集的分析，本文的隶属函数为：

$$U_{v1}(U_i) = \begin{cases} 1 & U_i \geq 80 \\ \frac{U_i - 60}{20} & 60 \leq U_i < 80 \\ 0 & U_i < 60 \end{cases}$$
$$U_{v2}(U_i) = \begin{cases} \frac{U_i - 40}{20} & 40 \leq U_i < 60 \\ \frac{80 - U_i}{20} & 60 \leq U_i < 80 \\ 0 & U_i \geq 80 \text{ 或 } U_i < 40 \end{cases}$$

$$U_{v3}(U_i) = \begin{cases} 0 & U_i \geq 60 \\ \frac{60-U_i}{20} & 40 \leq U_i < 60 \\ 1 & U_i < 40 \end{cases}$$

建立模糊综合评判矩阵，如下式所示：

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & r_{ij} & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

R 即是着眼因素论域 U 到抉择评语论域 V 的一个模糊关系， r_{ij} 表示因素对抉择等级的 v_j 隶属度。评判规则是：从最底层开始，利用低层结果进行上层评判，最完成所有层的评判。

(4)进行模糊综合评判。

本文模糊综合评判模型如下所示：

$$B = A.R = (a_1, a_2, \dots, a_n) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & r_{ij} & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$$

B 称为抉择评语集 V 评判所得等级模糊子集， $b_j (j=1,2,\dots,n)$ 为等级对 v_j 综合评判所得等级模糊子集 B 的隶属度。

3.3 本章小结

本章通过分析对电动汽车充电站选址影响因素进行分析和指标体系的建立原则，建立了电动汽车充电站选址指标体系。并介绍了 FAHP 应用到充电站候选地址选择中的方法和步骤。

第四章 电动汽车充电站选址模型研究

本章是论文的重点，主要通过分析第二章电动汽车和电动汽车充电站的特性以及充电站的选址理论和第三章模糊层次分析法对充电站候选地址的初选，建立起电动汽车充电站选址的双目标模型。充电站的选址是现实生活中应用较强的问题，随着环境问题和能源问题的不断加剧，电动汽车的不断发展，充电需求将变得越来越大。同时，充电站的广泛建设也在一定程度上推动了电动汽车的发展，缓解了环境问题和能源问题。本文建立的模型是成本最低为目标的双目标模型，包括两个方面。上层目标以充电站的建站成本和运营成本最低为目标，下层模型以用户的充电行驶成本和成本最低为目标。然后确定了候选站址的投资成本函数，应用排队论的相关概念确定模型的变量排队等候时间期望值函数，运用 Dijkstra 算法最终确定每个需求点的最短路径。

4.1 充电站选址特点

对电动汽车充电站的选址问题，必须理论联系实际。第二章已经对于选址理论有了详细的介绍，第三章根据影响电动汽车充电站的因素运用 FAHP 分析法进行分析，对候选站点进行了初选。本章将从数学的角度建立电动汽车充电站的选址模型，该选址模型从成本、时间和空间三个方面进行考虑。

(1)成本

电动汽车充电站的建设费用比较昂贵，含有四个快充和四个慢充的单个充电站成本约为 300-500 万元。充电站的建设成本在一定程度上抑制了充电站的发展。鼓励大力建设充电站和满足充电用户修的同时，必须考虑尽量节约建站成本。

(2)时间

考虑时间因素主要是从电动汽车用户方面考虑，电动汽车充电用户在充电过程中需要耗费较多时间。从需求点到充电站的行驶时间、排队等待充电站时间以及充电等待时间等。时间对于现代人的重要性不言而喻，因此本文在建模时着重考虑节约时间成本。

(3)空间

空间从两个方面影响着充电站的选址，首先，在充电站位置的确定上起到了直接的作用；其次，与需求点的空间位置密切相关，需求点的位置在一定程度上决定了充电站的选址。

因此，本文考虑从时间和空间两个因素出发，在满足充电需求的同时，达到成本最低的效果。

4.2 选址模型的构建

在选址问题中，经济因素通常是考虑最多的方面。对于电动汽车充电站的选址问题，本文从两个方面进行分析。第一，从充电站建设方出发，充电站建设运营成本，包括建设成本和运营成本；第二，从充电用户出发，包括充电用户充电路上行驶时间成本和充电等待时间成本两个方面。本文正是从建设方和充电用户两个角度出发，以成本最低为目标建立起来的双目标规划模型。从而确定需求点接受服务的候选充电站点，最终在候选点中选出使成本最低的站点作为充电站的建设点。这种定性定量结合的方法既从定性的方面反映了候选点的优越性，又解决了模糊层次评价法不能直观表达和反映问题的缺陷。

建模的具体思路如图 4.1 所示：

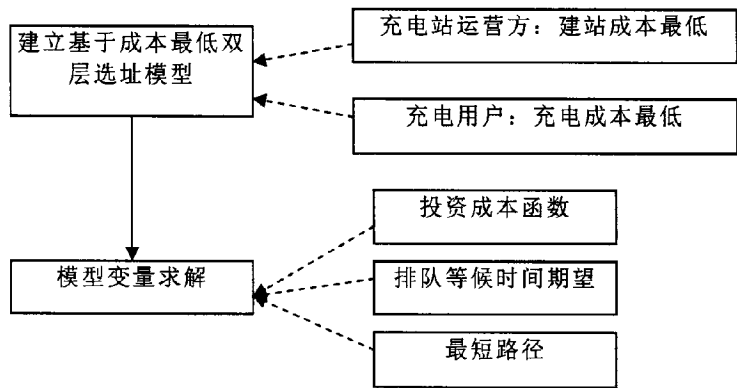


图 4.1 充电站选址建模思路

4.2.1 模型假设

现实生活中电动汽车充电用户的分布状况、充电需求和选择方式都很复杂，受到诸多因素影响，如果将这些因素全都考虑在内，整个研究将异常复杂。因此，本文为了研究的方便性、可行性以及建模的需要，大胆做出几条假设。

(1)所有电动车出行者对充电站的位置完全可知，并且总是选择离自己最近的充电站进行充电。

(2)每个需求点代表一个小型区域，因此每个需求点处的需求量代表了该小型区域内所有电动汽车充电需求数。

(3)不考虑道路交通状况的影响，电动汽车以相同的速度行驶。

(4)电动汽车需要充电时刻的剩余电量可以支持电动汽车行驶至充电站。

(5)当待充电车辆数大于某充电站充电桩个数时，车辆需要排队等待进行充电，可以将其看做一个排队服务系统，规律符合泊松分布。

(6)在不相重叠的时间段内顾客到达的数量相互独立。

(7)在充分小的时间间隔内，有一个电动汽车到达的概率只与该时间间隔区间长度成正比。

(8)在充分小的时间间隔内，有两个或者两个以上电动汽车到达的概率极小，可忽略不计。

4.2.2 模型参变量及符号

I ：需求点集合

i ：需求点

J ：充电站候选集合

j ：充电站候选点

F^u ：上层模型

F^d ：下层模型

q_i ：需求点 i 的需求量

P ：准备建站的数目

H_j ：候选站址 j 的投资成本函数

w_j ：候选点 j 的排队等候时间期望函数

N_j ：候选点 j 的充电机数量

d_{ij} ：需求点 i 到候选点 j 的最短路径

d_{\max} ：充电站的服务半径

α : 充电站运营成本与建设成本之间的折算系数

v : 平均行驶速度

r_0 : 贴现率

m : 充电站的折旧年限

X_j : 决策变量, 如果在候选点 j 建站, 等于 1, 否则为 0

Z_{ij} : 决策变量, 如果需求点 i 到候选点 j 接受服务, 等于 1, 否则为 0

4.2.3 数学模型

建立起来的模型如下所示:

$$\min F^u = \frac{r_0(1+r_0)^m}{(1+r_0)^m - 1} \left(\sum_j H_j X_j + \alpha \sum_j H_j X_j \right) \quad (4.1)$$

$$\min F^d = 365\beta \left\{ \sum_i \sum_j q_i Z_{ij} d_{ij} / v + \sum_j \left(w_j \sum_i q_i Z_{ij} \right) \right\} \quad (4.2)$$

s. t.

$$H_j = f(N_j) \quad \forall j \in J \quad (4.3)$$

$$W_j = g(N_j) \quad \forall j \in J \quad (4.4)$$

$$d_{ij} \leq d_{\max} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (4.5)$$

$$\sum_j Z_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (4.6)$$

$$\sum_j X_j = p \quad \forall j \in J \quad (4.7)$$

$$X_j = 0, 1 \quad \forall j \in J \quad (4.8)$$

$$Z_{ij} = 0, 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (4.9)$$

其中, 目标函数 (4.1) 式表示建站的年建站成本最低, 包括年固定投资成本和年运营成本最低; 目标函数 (4.2) 式表示用户充电成本最低, 包括途中年耗成本 and 年排队等候时间成本最低; (4.3) 表示候选点 j 固定投资成本函数; (4.4) 表示在候选点 j 充电排队等候时间期望值函数; 约束条件 (4.5) 表示用户最大出行距离小于充电站的服务半径; 约束条件 (4.6) 表示需求点选择一个候选充电站

进行充电；约束条件（4.7）表示在所有候选点中选择 p 个建立充电站；约束条件（4.8）、（4.9）表示 X_j 、 Z_{ij} 为 0-1 变量。

4.3 相关变量求解

4.3.1 投资成本

根据充电站的建设经验，充电站的建设成本与充电机的数量存在一定的关系。随着充电机数的增加，建设成本也不断增加，但是增加的幅度有所降低。

下表是针对电动汽车充电站的建设成本做的一系列调查，其中不考虑不同地区的地价差异，调查数据如表 4.1 所示：

表 4.1 充电站建设成本与充电机数关系表

充电机数（台）	0	4	6	8	10	12	14
成本（万）	200	330	365	375	415	430	440

从表中可以看出，在充电机数为零时，固定成本为 200 万，随着充电机数的增加，建站成本随之增加。根据上表得到充电机数散点分布图，如图 4.2 所示：

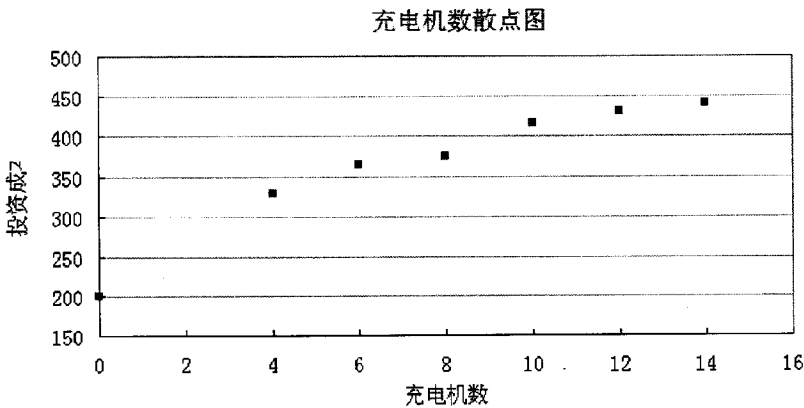


图 4.2 充电站机数散点图

由上图可知，充电机数与投资成本之间存在某种函数关系。本文通过拟合，最终得到图 4.3。

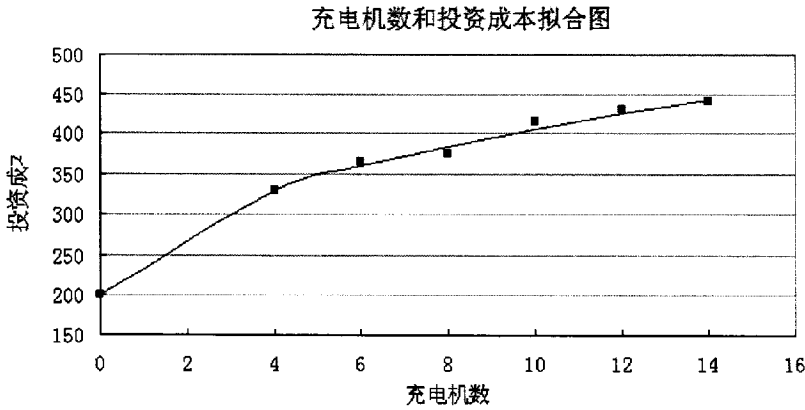


图 4.3 充电机数和投资成本拟合图

通过拟合得到投资成本与充电机数的函数表达式为：

$$H_j = f(N_j) = 200 + 65\sqrt{N_j} \quad (4.10)$$

4.3.2 排队等候时间期望

根据第三章的排队论理论，可知电动汽车充电过程符合排队论的描述，则充电站即是一个排队系统。通过观察分析电动汽车的充电状态，可假设知充电系统的输入过程符合泊松分布，且接受充电服务的时间服从负指数分布。因此充电系统模式是 $M/M/S$ 型。

相应的模型参变量及符号如下：

N ：充电站内的充电机数

n ：充电站服务区内电动汽车数量

p_i ：单车日快充概率

t ：单车快充时间

t_c ：充电站允许的快充时段

根据排队论可知，

充电用户到达率：

$$\lambda = np/t_c \quad (4.11)$$

充电机平均充电能力：

$$\mu = 1/t \quad (4.12)$$

系统服务强度：

$$\rho = \lambda / \mu = npt/t_c \quad (4.13)$$

充电设备全部空闲的概率

$$P_z = \left[\sum_{k=0}^{N-1} \frac{\rho^k}{k!} + \frac{N\rho^N}{N!(N-\rho)} \right]^{-1} \quad (4.14)$$

电动汽车排队等候时间期望：

$$W_q = \frac{N\rho^{N+1}P_z}{\lambda N!(N-\rho)^2} \quad (4.15)$$

具体数值要根据当地实际情况来确定，在案例研究中将有所涉及。

4.3.3 最短路径

本文假设需求点处的电动汽车司机对整个交通路网已知且总是选择距离自己最近的充电站进行充电，但是对最短路径的求解需要运用交通路网中的最短路径的求解方法。根据本文建立的模型，适合运用标号法来求解。最典型的标号法为 Dijkstra 算法^[39]。

针对 Dijkstra 算法我们做以下介绍。

1、定义和符号

定义有向图 $G = \{N, A\}$ ， N 为节点集； A 为弧集；节点数 $n = [N]$ ，弧数 $m = [A]$ ； s 表示源结点， t 表示目的结点。

定义 $d(i)$ 表示源结点 s 到节点 i 的加权距离； $l(i, j)$ 表示连接结点 i 和 j 的弧的权值； $S(j)$ 表示结点 j 的状态，分为未标记结点，临时标记结点和永久标记结点三种。

本文定义几个符号，将已经找到最短路径的点放置在集合 R 中；同理，将未找到最短路径的点放置在 V 中；而所有已经找到最短路径的点的路径距离放置在 D 中，比如 1 点到 5 点的最短距离为 20，则将 20 存储在 D 中。定义 $(l(v), p(v))$ 是对节点 v 进行相关性质的表达。 $l(v)$ 表示一段从起点 v_s 沿当前寻找的最短路径到节点 v 的距离。 $p(v)$ 表示为节点 v 在之前寻找的最短路径上前面的一个点。 $(l(v), p(v))$ 可能是永久标号也可能是临时标号，对应的路径是否为最短路径是评判标准。当被判定为永久标号时，不会再做出改变。否则将会再次改变。

根据 R 的定义, 我们同样可以得到 R' 的定义, 我们将从起点出发逐步运算后所有最短路径的节点放置在 R' 中。同理将从起点出发没有找到的节点放置在 V' 中。

v^* 表示为进行到这一步时 V' 中最小的点。

2、基本思路

Dijkstra 算法搜索最短路径的方法是从起点 v_s 出发, 逐步向外, 直到获取最优解。每一次迭代都将从本步根点 v^* 出发, 计算本步根点 v^* 到所有路段终点 v 的路程, 通过比较 v^* 到达 v 的路径与当前的临时标号对应的路径进行最优判断, 一旦比临时标号对应的路径更短则将 v^* 到达 v 的路径定义为当前的临时标号路径。对修改完临时标号之后, 选出标号值最小的节点存入 R' 中, 从 V' 中删除, 将其选为下次迭代的根点 v^* 。通过反复迭代计算, 直到将网络中所有节点都存入 S' 以后, 便可找出 v_s 到网络中各节点的最短路径。

3、算法步骤

Dijkstra 算法的具体步骤归纳如下。

Step 0: 初始化。令 $R^0 = \{v_s\}$, $v^* = v_s$, $l(v_s) = 0$, $p(v_s) = 0$, 对每一个 $v_i \neq v_s$, 令 $l(v_i) = +\infty$, $p(v_i) = 0$, $r = 0$ 。

Step 1: 考察每个使 $(v^*, v_j) \in A$ 且 $v_j \in V'$ 的节点 v_j 。如果 $l(v_j) > l(v^*) + w(v^*, v_j)$, 则把 $l(v_j)$ 修改为 $l(v^*) + w(v^*, v_j)$, 把 $p(v_j)$ 修改为 v^* 。若 $l(v_j) \leq l(v^*) + w(v^*, v_j)$, 则 $l(v_j)$ 和 $p(v_j)$ 保持不变; 依次考察所有的 v_j , 然后转入下一步。

Step 2: 将所有尚未找到最短路的节点 v_i , 即 $v_i \in V'$, 比较它们所有的 $l(v_i)$, 通过对比, 从中找到 $l(v_i)$ 最小的节点, 表达为 v^* , 即 $l(v^*) = \min_{v_i \in V'} l(v_i)$ 。令 $R^{r+1} = R^r \cup \{v^*\}$, $V^{r+1} = V' - \{v^*\}$, $r = r + 1$ 转入 Step 3。

Step 3: 如果 $V' = \emptyset$, 算法中止, 这时, 对每个 $v_i \in R'$, $d(v_s, v_i) = l(v_i)$; 否则, 转入 Step 1。

4、应用举例^[40]

以下图 4.4 所示的网络结构图为例, 假设点 4 和点 5 作为电动汽车的候选站点, 充电需求点在点 1 处。充电用户对具体的路网完全已知, 并且选择最短路径充电, 那么用户将选择哪个充电站进行充电呢? 下面我们将运用 Dijkstra 算法计算从起

始节点 1 到点 4 和点 5 的最短路径，并在两点间做出选择，选择一条最短路径进行充电。

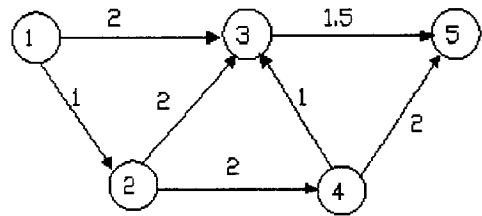


图 4.4 Dijkstra 算法的网络结构图

Step 1: 根据上文对集合 R 、 V 和 D 的定义，首先在计算之前对这三个集合进行初始化。在此定义 d_i 为计算进行到 i 时的最短路径长度，本文中则指到点 1 的距离；

Step 2: 根据上图网络分析结构，首先把起始站点 1 放入集合 R 中，把 2、3、4、5 四个站点放入 V 中；

Step 3: 然后遍历集合 V ，即从 2、3、4、5 中寻找与站点 1 距离最短的点，将这个点移动到集合 R 中。距离 1 点最近的点是 2，因此，将 2 从 V 移入 R 中。此时的 R 中包括点 1 和 2， V 包括 3、4 和 5 三个点；

Step 4: 对于集合 R 中的点 1 和 2，在集合 V 中 3、4 和 5 三个点中分别查找距离点 1 和 2 最近的点。本文实例中距离点 1 最近的点是点 3，距离为 2，距离 2 点最近的点是点 3 和 4，距离同样都是 2。因此，点 1 至点 3 的最短距离是 2，最短路径是 1→3。点 1 至点 4 的最短距离是 4，最短路径是中查找距离最近的临近站点，并求这些临近站点到起始站点的距离，将最短距离对应的站点从集合 V 移动到集合 R ；

Step 5: 同理，重复上述步骤，最终可以得到点 1 至点 4 和点 1 至点 5 的最短距离和最短路径。此时，所有集合 V 中的点已经全部移到集合 R 中。

对于上述步骤，用表格的方式表达更清晰明了，如表 4.2 所示：

表 4.2 Dijkstra 算法实现过程表

编号	V	R	i	d_i	最短路径
1	{2, 3, 4, 5}	{1}	2	1	1→2
2	{2, 3, 4, 5}	{1}	3	2	1→3
3	{4, 5}	{1, 2, 3}	4	3	1→2→4
4	{5}	{1, 2, 3, 4}	5	3.5	1→3→5

通过 Dijkstra 算法的计算结果总结出，充电用户距离候选点 4 的距离是 3，距离候选点 5 的距离是 3.5。因此，充电用户选择候选站点 5 进行充电。

对于本文建立的模型，首先由初始可行解 X_j 可以确定 P 个充电站的代建位置 $\{j_1, j_2, \dots, j_p\}$ 。令 $i=1$ ，通过 Dijkstra 算法计算需求点 i 与 j_p 之间的距离，从中寻找最小距离 d_{ij} 对应的候选点 j^* ，将需求点 i 分配给 j^* ，则 $Z_{ij}=1$ ，且分配给 j^* 处待建充电站的需求量为 q_i ；令 $i=i+1$ 。同理，依照此方法，所有的点都将找到距离最近的充电候选点，将每个点处的充电需求都分配至相应的充电站候选点。因此我们可以得到 $Q_{j_p} = \sum_{i \in I_{j_p}} q_i$ ，为其中 $i \in I_{j_p}$ 指所有分配给 j_p 的需求点。Dijkstra 算法在本文中主要起到配合遗传算法对双目标模型进行求解的作用。

本文所建立起来的充电站选址模型变量多、约束条件较多，属于 NP 难题，使用一般的方法难以求解。针对本文的选址特点，求解过程分两个步骤，首先，运用模糊层次分析法对候选点进行初选定，挑选合理候选点；其次，运用 Dijkstra 算法和遗传算法结合的方法对双层模型进行求解。

4.4 模型求解

4.4.1 模型求解思路

本文建立的选址方案首先是运用模糊层次分析法对候选站点进行初选，筛除掉不合理的候选点，保留较优点。然后，在此基础上建立了基于总成本最低的双目标选址模型，分别以建设方建站成本和运营成本最低为目标和以充电用户充电行驶成本和等待成本最低位目标建模。对于该类模型，通常运用多目标优化方法解决。然而多目标优化方法或多或少的存在些缺陷，且本文建立起来的双目标模

型较复杂，不适合运用多目标优化方法解决。本文将采用遗传算法结合 Dijkstra 算法的方式进行求解。本文第三章，对运用模糊层次法对候选点的初选做了详细的介绍，本章不再做介绍。本章主要针对遗传算法求解模型做深入详细的介绍。

4.4.2 遗传算法流程

1975 年 John Holland^[41]教授提出了遗传算法 GA (Genetic Algorithms)，是根据达尔文的进化论提出的。根据自然法则，通过模拟自然界生物的遗传过程，利用选择、交叉和突变等操作逐代产生候选解，这个过程将逐代保留适应度高的染色体，最终得到新的种群。由于新的种群继承了上一代的优良基因，因此更能适应环境。通过这样逐代遗传，反复迭代，最终将会得到适应环境的种群。遗传算法是一种随机优化搜索算法，能够解决很多无法解决的复杂问题，并且实用性很强，应用范围非常广泛。根据本文建立模型的具体的算法步骤如下^[42]：

Step0:随机产生初始种群。

Step1:通过 Dijkstra 算法计算所有需求点与所有由初始建站点之间的最短路径，比较每个需求点与所有初始建站之间的距离，选择最短距离，将所有需求点分配给距离它最近的候选点。具体操作见 4.3.3。

Step2: 将 Step1 获得的需求点和需求量的分配运用到适应度函数中，计算每个个体的适应值。并判断是否满足迭代停止的条件，若满足，则停止并输出；否则，进入下一步。

Step3:根据上一步计算个体适应值选择父代，适应值大的个体被选中的概率也大，适应值小的个体被选中的概率小，本文运用轮盘赌法进行选择操作。

Step4:按照相应的交叉概率运用交叉方法，生产新的个体。

Step5:按照相应的变异概率运用变异方法，生产新的个体。

Step6:根据上述两个步骤生产新的种群，返回 Step1，进行判断。依次循环往复直到满足输出解。可以用下图表示遗传算法的进化过程。

用图表示如图 4.5 所示：

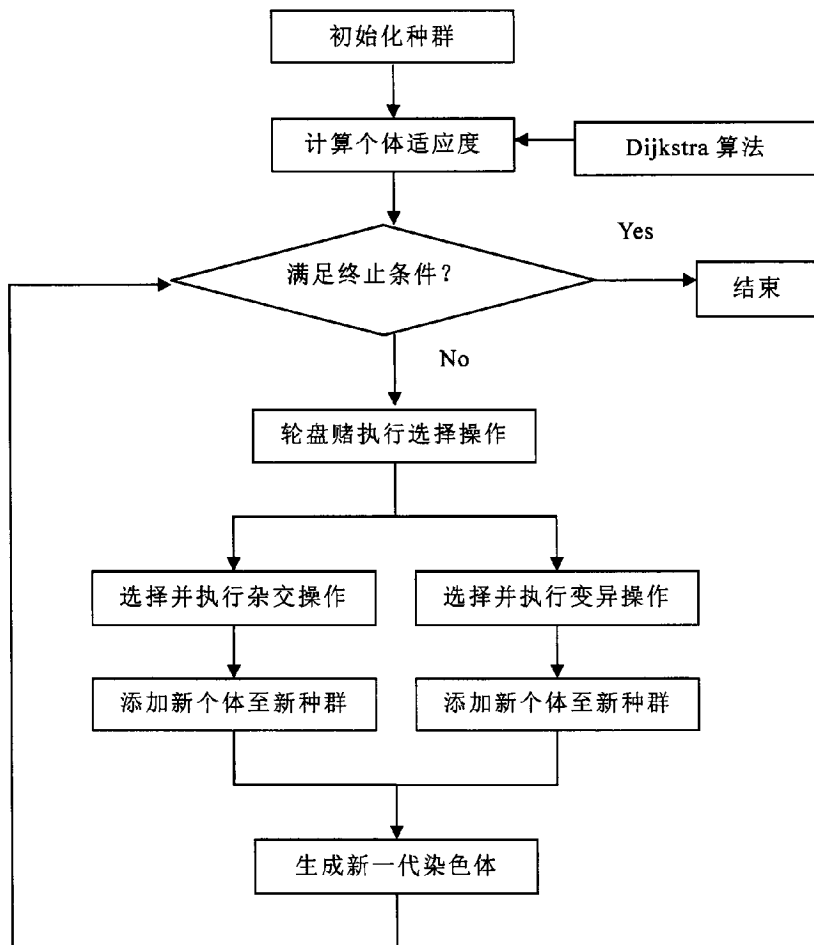


图 4.5 基本遗传算法进化过程示意图

4.4.3 编码方案

编码问题是遗传算法最基本也是最关键的问题，编码的好坏将直接关系到遗传运算的效率和方式。常见的编码技术有二进制编码、浮点数编码、字符编码和变成编码。二进制编码简单易行且符合最小字符集编码原则，是最常见的编码方法，但是二进制编码在连续函数离散化时容易产生映射误差，局部搜索能力较差。浮点数编码又叫真值编码，适合用于精度要求较高的算法。

根据模型特点，将变量分为两类，充电站候选点选择变量 x_j 和候选充电站 j 的充电机数量 N_j 。其中共有 j 段基因，每段基因的编码可以分成两部分。

(1)候选点选择变量 X_j 的编码

选取哪些候选点作为充电站的建设地点,用 X_j 表示,该变量为0、1变量。 $X_j=1$ 表示在建立充电站,反之不建。因此,对于 X_j 变量,采用二进制编码方法最适合不过。其中编码长度为,元素1的个数为,其余全都是0。如图4.6所示,是其中一个编码方案,表示第1号、j-1和j号候选点被选中。

1	0	...	0	...	1	1
1	2	...	j	...	J-1	J

图 4.6 候选站址编码方案

(2)候选点 j 的充电机数量 N_j 的编码

对于候选点 j 的充电机数量 N_j 的编码,其中充电机数 N_j 的范围为 $[N_{\min}, N_{\max}]$,本文取值为 $[4, 12]$ 。我们采用浮点数编码法。每一段有 j 个基因,如图4.7所示:

N_1	N_2	...	N_j	...	N_{J-1}	N_J
1	2	...	j	...	J-1	J

图 4.7 充电机数编码方案

但是这两个决策变量存在一定的关系,决策变量 X_j 对充电机数 N_j 起到决定性的作用。只有当 X_j 为1时, N_j 才真正地存在,否则 N_j 为0。在充电站选址的实际中,只有当某个候选站点被选中,用二进制表示即为1时,该候选点才有可能建设一定的充电机数。

根据这两种变量之间存在的特殊关系,本文采用一种混合并行编码方案^[43]:决策变量 X_j 采用二进制编码, N_j 采用浮点数编码的方式。最终将这两类变量的编码方案结合起来,组成了完整的基因,如图4.8所示:

1	0	...	0	...	1	1
N_1	0	...	0	...	N_{J-1}	N_J
1	2	...	j	...	J-1	J

图 4.8 混合编码方案

4.4.4 初始种群

假设群体的规模为 popsize ，随机产生 popsize 个染色体作为初始群体。初始化的方法根据问题的不同而不同，通常产生初始种群的方法有两种。一种方法是完全随机的，一般试用于求解无先验知识的情况；另外一种则是把先验知识作为必须要满足的要求里，在满足此条件的解里面随机的选取，这种方法能够更快的得到最优解。本文采用随机方法产生初始种群，为了满足成本最小这一目标。

4.4.5 适应度确认

本文建立的模型是双目标模型，双目标模型通常情况是无法得到每个目标函数的最优解的，只能通过对两个目标函数处理的尽可能优化每个目标函数。遗传算法对于处理多目标问题占有很大的优势，针对现实生活中出现较多的多目标问题，越来越多的人研究遗传算法应用与多目标的问题。在这个过程中，要面对的一个难点是适应度函数的确定，有多种方法可以运用。本文采用的是线性加权的方式，将双目标模型转化为单目标模型。

(1) 化多目标函数为单目标函数

给模型中的每一个目标函数加一个权重，并把变换后的目标函数相加构成一个目标函数，从而将多目标函数转化为单目标函数。如下所示，其中 $\mu_1 + \mu_2 = 1$ ， $\mu_1, \mu_2 > 0$ 。

$$\begin{aligned} \min F = \mu_1 F^u + \mu_2 F^d = \mu_1(1 + \alpha) \frac{r_0(1 + r_0)^m}{(1 + r_0)^m - 1} \sum_j H_j X_j \\ + 365 \mu_2 \beta \left\{ \sum_i \sum_j q_i Z_{ij} d_{ij} / v + \sum_j \left(W_j \sum_i q_i Z_{ij} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4.16)$$

(2) 确定适应值函数

适应度函数是用来评价染色体的好坏程度。适应度函数对应自然界环境要求物种的适应性，遵从环境的改变自我调整性越强的物种适应性就越强。同样在遗传算法中，适应度函数值越大越说明所对应解越接近最优解。适当度函数的合理选择更有利于最优解的获取。

本文建立的模型是求最小值问题，因此，将适应值模型定义为下式，其中， M 是当前 $F(x)$ 的最大值。

$$Fit(x) = \begin{cases} M - F(x), & \text{若 } F(x) < M \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (4.17)$$

4.4.6 遗传操作

(1) 选择操作^[44]

选择操作是按照适应度函数的要求按照一定的方法从当前一代的种群中选择更符合适应度函数要求的个体遗传到下一代的过程。目前常用的选择方法有：轮盘赌方法、最佳个体保留法、排序选择法和锦标赛方法等。本文采用的是轮盘赌方法。

(2) 交叉操作

交叉操作也称为基因重组，通过将两个父代染色体的某些基因相互交换，从而得到两个新的染色体的过程。交叉操作是遗传算法中最重要的步骤，能更好的获得新的个体，体现了信息交换的思想。常见的交叉操作方法有单点交叉、多点交叉、一致交叉等，但最常使用的是单点交叉。本文采用单点交叉操作进行，将 popsize 个染色体分成均匀的两个部分，然后依次进行两两配对，交叉概率 P_c 取值为 0.5，具体操作如图 4.9 所示：

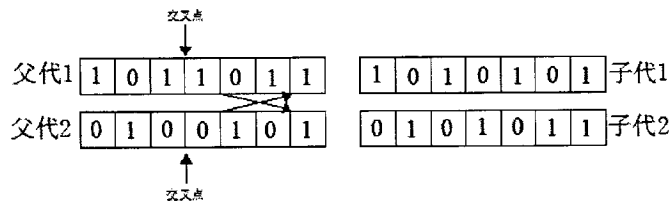


图 4.9 单点交叉示意图

(3) 变异操作

变异操作是指按照一定变异概率选择种群中的个体，并随机地改变这些个体的某些基因值，从而产生新的染色体结构的过程。变异算子可以有效地克服遗传算法陷入局部最优的弊端。常见的变异方法有基本变异因子、逆转算子和自适应变异因子。本文运用的变异方法是基本变异方法，变异概率 P_m 为 0.005。操作见图 4.10：

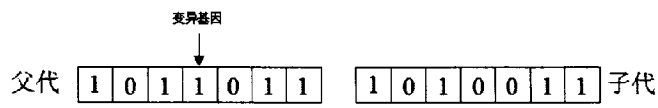


图 4.10 基因位变异示范图

4.5 本章小结

本文根据电动汽车的特性，建立了基于建设方和用户成本最低的双目标模型，其中上层目标以建设方的建设成本和运营成本最低为目标；下层目标以充电需求用户行驶成本和等待成本最低为目标。另外对模型中的投资成本函数、排队等候时间期望和最短路径三个变量进行求解。并概括了本文的求解思路，详细介绍了遗传算法及其在多目标优化中的应用，将遗传算法的编码、初始种群的产生、适应度确定和遗传操作运用到本文模型中。

第五章 案例研究

5.1 临沂市电动汽车发展概况

5.1.1 背景介绍

临沂市位于山东省东南部，是中国华东地区的特大城市，中国商贸物流之都。面积 17184 平方公里，人口 1084 万人。临沂地处鲁中南低山丘陵区东南部和鲁东丘陵南部，交通便利，京沪高速、日东高速、长深高速、枣临岚高速、青兰高速等多条高速遍布临沂各地。国道 205、206、327 等国道以及多条省道连接临沂各地。

近年来，随着新能源汽车的大力发展和环境问题、能源问题的日益严重，临沂市也大力发展新能源汽车，尤其是电动汽车。

(1) 电动公交车

自 2010 年 2 月份开始公交线路示范运行纯电动公交车，目前，临沂市公交总公司共有 K9、K10、K13、K15、K20、K87、K18 七路电动公交车上路运行。临沂市在路运营的新能源公交已达 490 辆，运营规模已经超过了几个“十城千辆”示范城市。

山东沂星电动汽车有限公司，前身是临沂汽车改装厂，隶属于市运输公司，以生产“飞燕”牌客车为主，是临沂唯一一家客车制造企业。该公司生产的电动客车续航里程可以达到 300 多公里，在目前续航里程里排名靠前的电动客车。车速可以达到 100km/h，同样属于车速较快的电动客车。公司年产能力已达到 900 台，计划于 5 月底开工建设一个 5000 平方米的大车间，预计到 2015 年，公司电动公交车年产量将实现 2000 台。公司正在研发一些新产品，主要是针对特殊行业的特殊车辆，比如城际电动公交车。其中，首辆城际电动公交车将于 5 月底下线。山东沂星电动汽车有限公司，公司旗下两款车型也已经获得工信部《节能与新能源汽车示范推广应用工程推荐车型目录》。

(2) 电动汽车

临沂市生产的小型纯电低速电动车的主要运用于旅游休闲和特殊行业的商用车辆。

沂南县电动车产业集群已成规模，建有专业电动车园区，是重要电动车生产地及。拥有澳柯玛、绿源、格仑特、新大洋等电动车整车生产企业 12 家、配套企业 90 余家，从业人员近万人，年产能突破 200 万辆，被评为“山东省优质电动自行车生产基地”，成为全国继江苏、浙江、天津之后新崛起的电动车生产基地。

临沂沂达电动汽车有限公司于 2010 年 8 月成立，是由江苏常州普其特轴承有限公司、武汉理工大学及临沂四方机械制造有限公司共同投资建设。公司地址位于临沂经济技术开发区。2011 年 5 月底首款电动轿车成功下线并实现量产，现已行销 10 多个省份。沂达电动汽车新厂区 2012 年完工后，电动汽车年产量达 20000 辆，2015 年全部项目建设完成后，年生产能力 5 万辆。

临沂凯迪工程机械有限公司位于中国山东临沂经济开发区，公司专业从事搬运机械及农机具的生产及研发，现主导产品为 ZL936 型以下 30 余种内燃轮式装载机。公司开发了 M8 系列电动汽车整车整备质量：880kg，动力电池采用可维护铅酸电池，电池容量 1200AH(12V/120AH*10 只)，电池重量：32KG/只，电机功率：4KW，电力控制系统 12V 直流电，控制器电压 60V，充电电压 220V，充电器输出电压 60V，充电时间 7 个小时。

临沂市的电动汽车发展受到了省政府的大力支持，将其作为推广试点城市。同时临沂市还具有生产电动汽车的资质，临沂市生产的纯电动汽车的种类丰富，生产厂家数量较多，综合数量超过万辆。到 2015 年末，临沂市计划建立起完善的充电站、电动汽车修理厂和一系列的检测运营中心。将电动汽车产业推广到全市，大力提高销售收入。

5.1.2 案例分析

从上述内容我们可知临沂市出现了数量较多的电动汽车，需要建立相应数量的充电站来满足充电需求。据调查，电动汽车需求点主要分布在下图三十个需求点位置，根据电动汽车的分布及数量，现拟建一定数量的充电站，已经确定好了十个备选站址，首先初选五座充电站。并根据充电站的服务能力和充电需求量最终确定建站数目。关于临沂市路网图、充电站候选站址和需求点的位置见图 5.1。其中粗实线表示外环线，细实线表示城市道路，红色三角形表示候选点位置，蓝色圆点表示需求点位置。

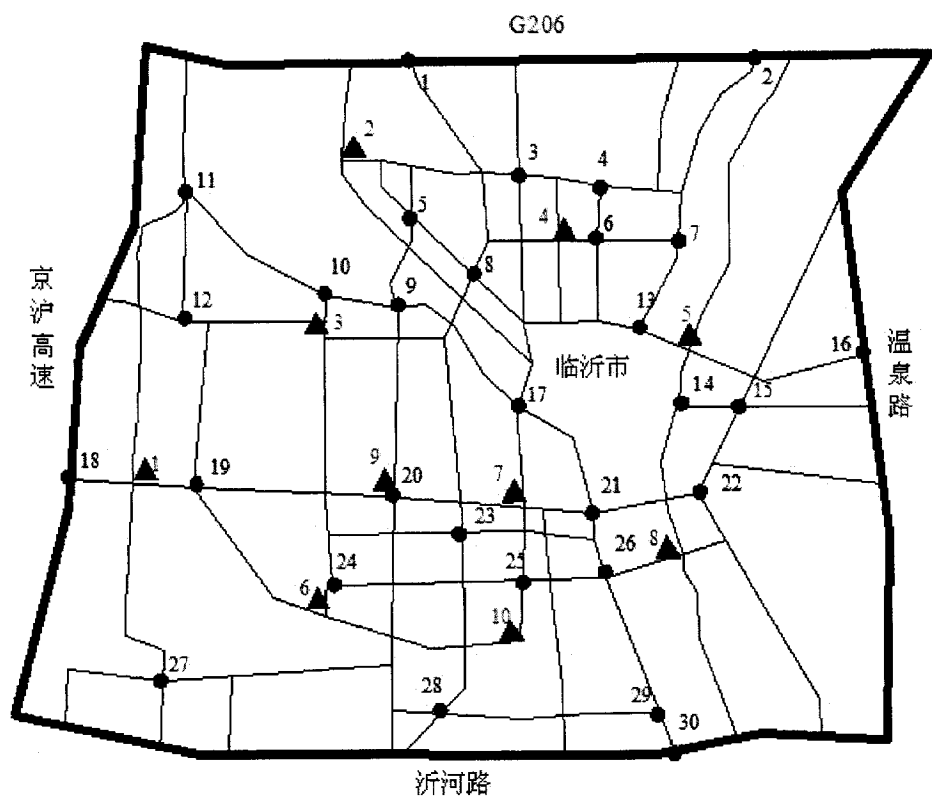


图 5.1 路网及布局图

临沂市各充电需求点的基本情况见表 5.1:

表 5.1 临沂市各需求点的需求量表

需求点序 号	需求量 (辆)	需求点序 号	需求量 (辆)	需求点序 号	需求量 (辆)
1	9	11	6	21	14
2	10	12	5	22	11
3	11	13	12	23	13
4	9	14	11	24	9
5	9	15	10	25	10
6	11	16	8	26	11
7	12	17	15	27	8
8	13	18	9	28	10
9	14	19	7	29	8
10	8	20	10	30	7

5.2 相关数据的确定

(1) 排队等候时间相关数据

本文对于充电站允许的快充时段的设定采取早高峰（7:30—9:30）或晚高峰（5:30—7:30）两个小时，单车快充时间 t 为 15min。

因此，可得以下数据：

充电用户到达率 $\lambda = n/1200$ ，

充电机平均充电能力 $\mu = 1/15$ ，

系统服务强度 $\rho = \lambda/\mu = n/80$ ，

其中 n 表示的是在某充电站充电的所有用户。

(2) 模型相关系数

本文设定充电站运营成本与建设成本之间的折算系数 α 为 10%，临沂市出行时间成本系数 β 为 20 元/h。

(3) 建站数目

标准站的理想最大服务能力可以用公式 5.1 表示：

$$C = M \times \mu \times t \quad (5.1)$$

其中，

C ：充电站的最大服务能力；

M ：充电机数，本文假设充电机数范围[4-12]台；

μ ：每台充电机的服务率，为 4 辆/h，15min/辆；

t ：充电站的服务时间，本文为 4 小时。

根据公式 5.1，本文 $C \in [64, 192]$ ，由于本文的充电需求量为 300 辆，因此，建站数量为[2,4]个。

本文通过对临沂市电动汽车充电站建设的相关政策和电动汽车充电需求用户的分布情况分析，考虑到建站数目对建站成本和服务能力的双层影响，最终选择三个站址进行充电站的建设。因此，本文建站数目 $p=3$ 。

(4) 临沂市的平均行驶速度 v 为 40km/h。

(5) 服务半径

充电站的最大服务半径 d_{\max} 取值为 50 Km。

(6)贴现率 r_0 为 0.08，充电站的折旧年限 m 为 20 年。

(7)目标权重系数

根据对建设方和充电用户两者之间的利益分析，最终作出以下取值决定， $\mu_1 = 0.4$ ， $\mu_2 = 0.6$ 。

5.3 模型求解

5.3.1 模糊层次分析法初选

根据本文建立的指标体系和评价模型，以及相应的因素集，本文运用模糊层次分析法以候选点 1 为例进行详细的计算。

(1)确定模糊评价矩阵

根据隶属函数计算公式，可以建立起各候选点各因素的隶属度，从而建立起相应的判断矩阵。

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.75 & 0.25 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0.25 & 0.75 & 0 \\ 0.75 & 0.25 & 0 \end{bmatrix}, R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.75 & 0.25 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

(2)确定指标权重

同样请充电站建设和选址方面的 15 位专家。采用德尔菲法对充电站选址指标体系的准则层进行打分，然后按照层次分析法得到指标权重的步骤进行权重的获取，具体步骤如下所示。

首先，确定准则层指标权重。

准则层指标权重分析，见表 5.2 所示。

表5.2 U-U1, U2, U3, U4权重分析表

U	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄
U ₁	1	1/2	2	2
U ₂	2	1	4	2
U ₃	1/2	1/4	1	3
U ₄	1/2	1/2	1/3	1

构造判断矩阵并进行归一处理，得到：

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} 0.250 & 0.222 & 0.273 & 0.250 \\ 0.500 & 0.444 & 0.545 & 0.250 \\ 0.125 & 0.111 & 0.136 & 0.375 \\ 0.125 & 0.222 & 0.045 & 0.125 \end{bmatrix}$$

求出U的权向量W， $W = [0.264 \quad 0.444 \quad 0.174 \quad 0.119]^T$

对判断矩阵进行一致性检验：

$$UW = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 4 & 2 \\ 1/2 & 1/4 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.264 \\ 0.444 \\ 0.174 \\ 0.119 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.071 \\ 1.904 \\ 0.774 \\ 0.531 \end{bmatrix}$$

根据公式 $\lambda_{\max} = \max \left\{ \frac{(UW)_i}{W_i} \right\}$ ，其中 n=4 得：

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^4 \frac{[UW]_i}{nW_i} = (1.071/0.264+1.904/0.444+0.774/0.174+0.531/0.119)$$

$$/4=4.316$$

一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ 得： $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.105$ ， $CR = \frac{CI}{RI} = 0.094 < 0.1$ ，因此，

该矩阵满足一致性要求。

候选点评价权重为 $W = [0.264 \quad 0.444 \quad 0.174 \quad 0.119]^T$ 。

同理可计算得到其他指标的权重，然后确定层次总排序。对于各个指标层的层次单排序结果，计算得出层次总排序序的结果，即可得到各指标的总权重。层次总排序的结果如表 5.3 所示。

表5.3 层次总排序结果

目标层	准则层	次准则层	权重
充电站候 选点选址	交通因素 0.264	路网状况	0.635
		交通状况	0.365
		电网容量	0.374
	电力因素 0.444	电力平衡	0.329
		电能质量	0.297
		土地价格	0.769
	经济因素 0.174	其他	0.231
		安全性	0.438
		环保性	0.327
	其他因素 0.119	政策性	0.235

(3)综合评价

运用模糊综合评价法进行评价，对电动汽车充电站的各项评价指标进行模糊评价，建立相应的模糊评价矩阵。同样可以得到单因素模糊评价矩阵 R_i ，从而得到综合评判集 $B_i = W_i R_i$ ，得到综合评价结果。

$$B_1 = W_1^T R_1 = [0.476 \quad 0.528 \quad 0]$$

$$B_2 = W_2^T R_2 = [0 \quad 0.636 \quad 0.365]$$

$$B_3 = W_3^T R_3 = [0.368 \quad 0.624 \quad 0]$$

$$B_4 = W_4^T R_4 = [0 \quad 0.427 \quad 0.578]$$

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.476 & 0.528 & 0 \\ 0 & 0.636 & 0.365 \\ 0.385 & 0.614 & 0 \\ 0 & 0.427 & 0.578 \end{bmatrix}$$

最终，可以得到评价的隶属度 B 为：

$$B = W^T R = \begin{bmatrix} 0.264 \\ 0.444 \\ 0.174 \\ 0.119 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0.476 & 0.528 & 0 \\ 0 & 0.636 & 0.365 \\ 0.385 & 0.614 & 0 \\ 0 & 0.427 & 0.578 \end{bmatrix} = [0.193 \quad 0.580 \quad 0.23]$$

针对本文的十个候选点，同理可得各个充电站隶属度 B 的值，如表 5.4 所示：

表5.4 各充电站隶属度表

候选站点	隶属度 B
1	[0.193, 0.580, 0.231]
2	[0.534, 0.372, 0.094]
3	[0.483, 0.313, 0.214]
4	[0.276, 0.592, 0.132]
5	[0.715, 0.161, 0.124]
6	[0.473, 0.376, 0.141]
7	[0.251, 0.653, 0.096]
8	[0.328, 0.470, 0.212]
9	[0.403, 0.476, 0.121]
10	[0.514, 0.314, 0.172]

根据最大隶属度原则，从上表可以看出，2、3、5、6 和 10 号充电站选址优的隶属度分别为 0.534，0.483，0.715，0.473，0.514，其他五个站点隶属度均属于中等。因此，经过模糊层次法初选获得的五个站点是 2、3、5、6 和 10 号。下文将运用遗传算法和 Dijkstra 算法进一步选址。

5.3.2 遗传算法求解模型

通过模糊层次分析法初选获得 2、3、5、6 和 10 号，通过对临沂市电动汽车充电站建设的相关政策和电动汽车充电需求用户的分布情况分析，以及建站数目对建站成本和服务能力的双层影响，最终选择三个站址进行充电站的建设。现从通过初步选择的五个候选点中选出三个点建设电动汽车充电站，充电站分布和个需求点情况如图 5.2 所示：

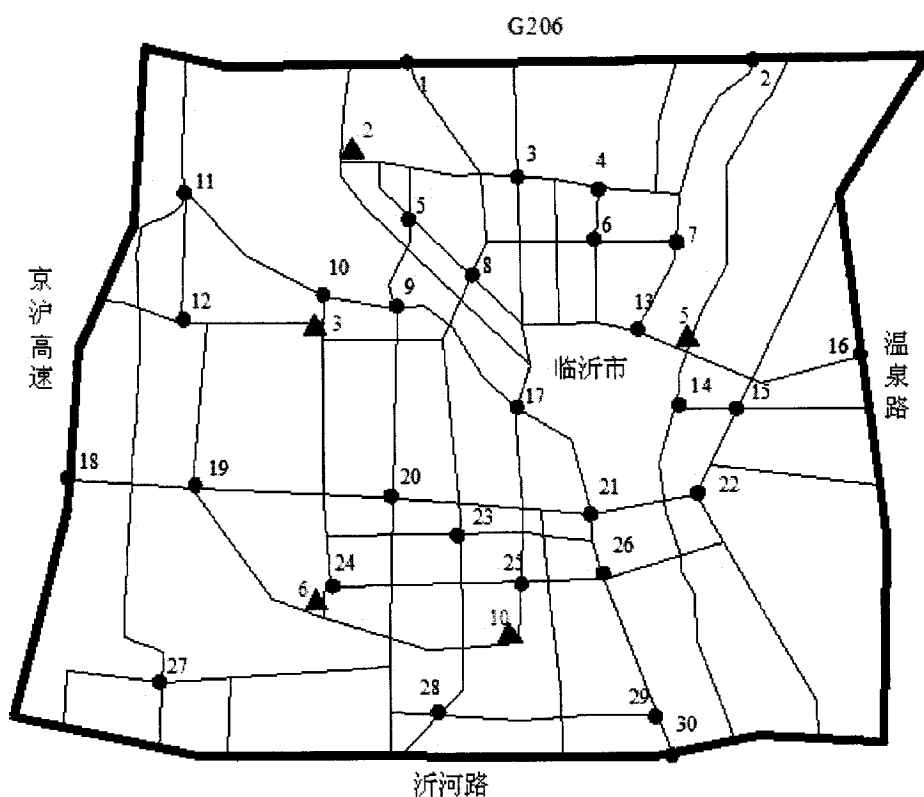


图 5.2 初选后分布图

根据第四章建立的以成本最低为目标的双层模型和遗传算法求解双目标模型的方法对该案例进行求解。本文通过遗传算法和 Dijkstra 算法结合的求解方法对模型进行求解，每次生成初始种群，都要运用 Dijkstra 算法求解每个需求点到候选点的最短距离。在进行求解运用 MATLAB 软件，在模型求解之前先进行算法测试。最大迭代次数为 150、种群规模为 50、交叉率为 0.5、变异率为 0.005。 M 取较大的数值使得 $F(x)$ 为正值，在此 M 取为 50000。

程序运行后，随着迭代次数的增加，目标函数值不断变化并趋于稳定，跟踪其性能可以得到随着迭代次数的增加而不断变化的曲线图，如图 5.3 所示，从图中可以看出，图线逐渐趋于平稳。同时也可以得到该问题的最优解，如图 5.4 所示。

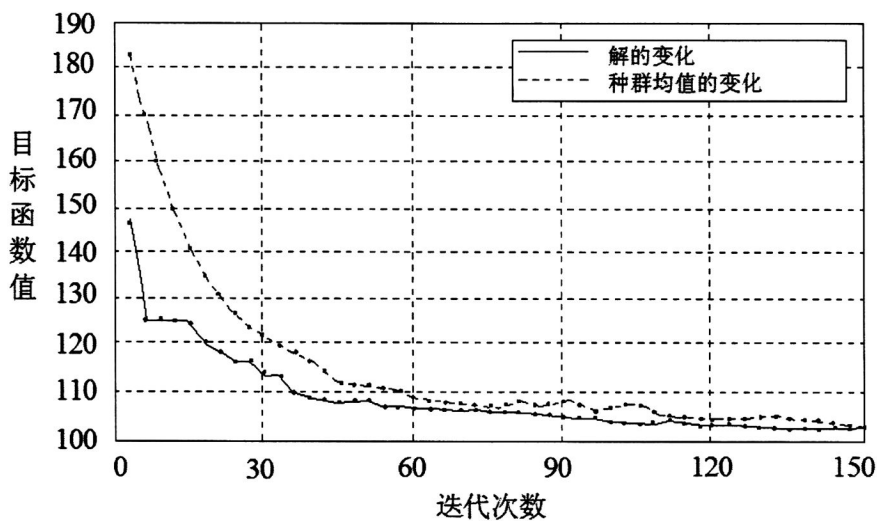


图 5.3 经过 150 次迭代后目标函数值及性能追踪

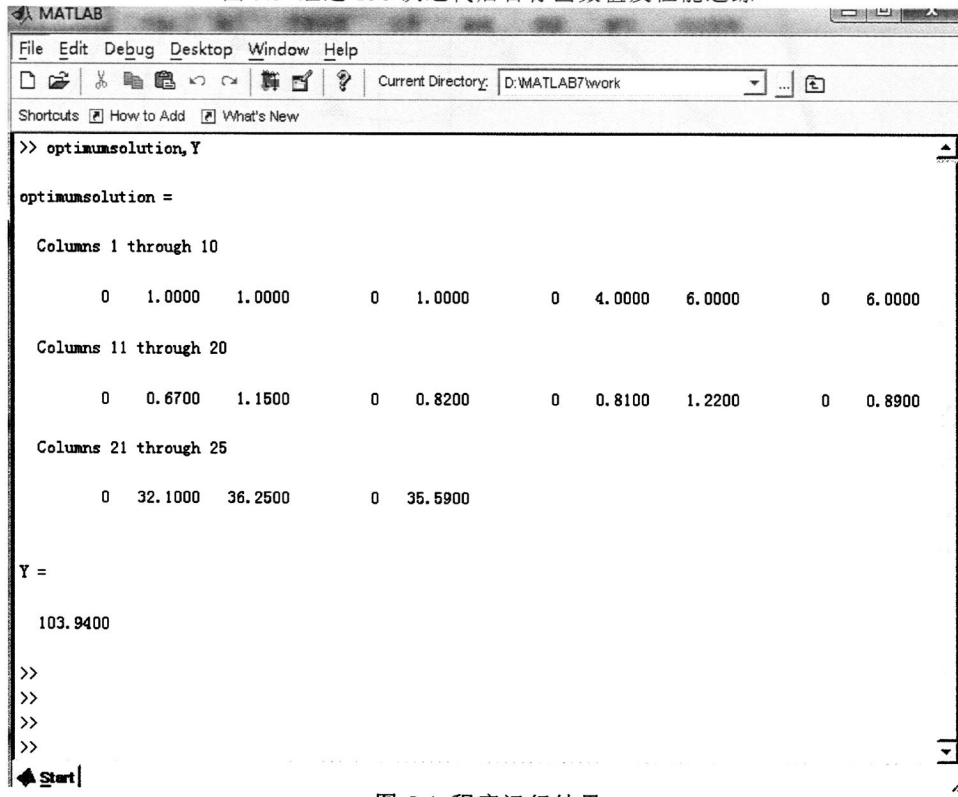


图 5.4 程序运行结果

通过遗传算法和 Dijkstra 算法两种方法结合的方式，结合上图可以得到充电站选址的最终结果和服务区域的划分，用图 5.5 所示。

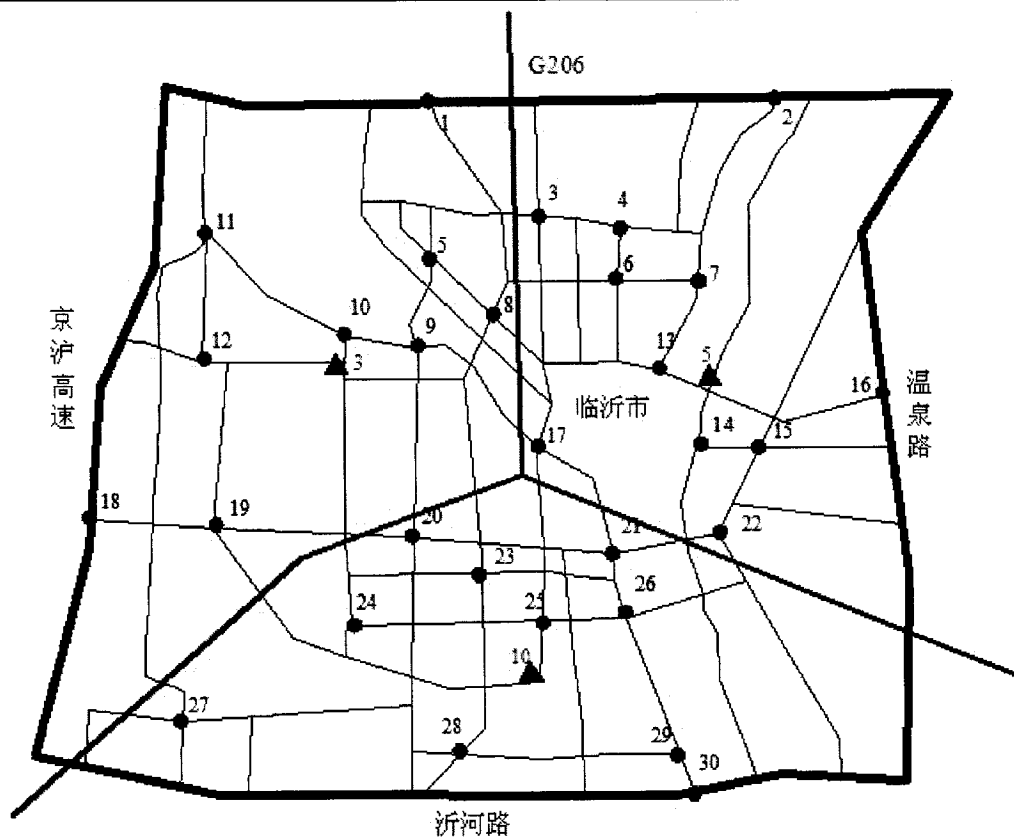


图 5.5 充电站选址结果及服务区域划分

从上图可以看出，最终选择 3、5 和 10 号作为充电站建设点，其中各个站点服务的需求点、需求量和年建站花费见表 5.5。

表 5.5 充电站选址结果

选址结果	3 号	5 号	10 号
服务的需求点	1、5、8、9、 10、11、12、 18、19	2、3、4、6、7、 13、14、15、 16、17、22	20、21、23、24、 25、26、27、28、 29、30
充电机数（个）	4	6	6
服务车辆数（辆）	80	120	100
固定投资（万元）	27.84	30.80	30.80
运营成本（万元）	2.78	3.08	3.08
途中时间成本（万元）	0.67	1.15	0.82
等待时间成本（万元）	0.81	1.22	0.89
各站点总成本（万元）	32.10	36.25	35.59
合计（万元）		103.94	

5.3.3 结果分析

充电站选址问题是随着电动汽车的发展新兴的一个问题，这个问题与一般的选址问题有相同点，也有它的不同之处。本文首先运用模糊 AHP 对电动汽车充电站进行初选，随后又运用选址理论建立双层模型，并运用遗传算法对其进行求解。最终以临沂市电动汽车充电站选址为实例研究。可以得到以下结论：

(1)充分考虑影响电动汽车充电站选址的交通因素、电网因素、地价因素、经济因素、政策因素等，建立评价指标体系，运用模糊 AHP 对电动汽车充电站进行初选，这些经过定性分析筛选过的候选点符合电动汽车充电站的选址原则，并且合理性更强。

(2)将现状路网考虑到选址问题中，通过分析整个路网的现状，寻求网络中各需求点和充电站候选点之间的最短路径，从而求得整个网络的最短路径，达到充电用户充电路上行驶时间最小这一目的。并将排队论理论引进模型，建立起以用户充电成本最低的下层模型。

(3)针对本文建立起来的双层模型，运用 Dijkstra 算法和遗传算法想结合的方法进行求解。证明了该方法的实用性和正确性。

5.4 本章小结

本章运用模糊层次分析法进行初选，结合 Dijkstra 算法和遗传算法对模型求解，并通过一个实例对第四章的模型和第三章、五章的算法进行了验证，证实了模型的实用性和算法的正确性。

结论及展望

结论

电动汽车比传统燃料汽车更节能更环保，是缓解环境问题和能源问题的重要工具。因此必须大力发展电动汽车，电动汽车的续航问题亟待解决。解决电动汽车续航问题的重要因素是电动汽车充电站，充电站起到了补给的作用，相当于传统汽车的加油站。归根结底，大力推动电动汽车更好的发展，充电站的建设将起到至关重要的作用。充电站建设的初期必须规划好充电站的位置，也就是对充电站做好规划和选址。本文正是基于此背景，详细阅读大量相关文献，基于选址理论、排队论、最短路径等建立的相关模型。并运用模糊层次分析法、Dijkstra 算法和遗传算法对模型进行求解。本文的研究成果主要有一下几个方面：

(1)通过详细阅读大量的国内外文献，分析电动汽车充电站选址的研究现状以及选址理论及其他理论，总结了充电站选址的主要方法和特点，给本文模型的建立提供了理论基础。

(2)运用模糊层次分析法对模型进行初选，经过定性分析筛选过的候选点符合电动汽车充电站的选址原则，选址的合理性更强。

(3)本文建立的模型是以成本最低为目的的双层模型，上层模型以建设方建站成本和运营成本之和最低为目标；下层模型则以充电站用户充电路上行驶成本和等待成本之和最低为目标。其中，通过分析充电站建设成本和充电机数的数量关系，建立了两者之间的函数；将城市路网情况考虑到模型中，并运用 Dijkstra 算法求解各需求点和各候选站点之间的距离；将排队论引入模型，提出排队等待时间期望函数。

(4)根据一个实例，运用模糊层次分析法初选候选站址，并运用 Dijkstra 算法和遗传算法相结合的方法证明模型的可行性和算法的正确性，理论上起到效果。

展望

本文通过对大量理论的分析，建立的模型以及求解方法通过实例的验证是合理的，有了一定的研究成果。然而由于作者的准备时间和科研水平有限，且电动汽车和电动汽车充电站建设还处在初步发展阶段，很多问题尚未出现。因此，关

于电动汽车充电站选址的研究还需进一步加深。以下几点可以作为一个参考：

(1)本文将城市路网加入模型中，考虑需求点与充电站候选点之间的最短距离，在一定程度上考虑了交通问题。然而，实际的交通问题远远不止现存的路网，还要考虑早晚高峰引起的堵车，交通量的变化引起的行车速度的变化，最终导致时间成本增加等。

(2)本文采用 Dijkstra 算法对最短路径进行求解，计算相对较慢，可以尝试采用其他智能方法解决问题。

参考文献

- [1]鲁莽,周小兵,张维.国内外电动汽车充电设施发展状况研究[J].华中电力, 2010, 23(5):17-18.
- [2]国外电动汽车发展现状.<http://www.2lask.com/htmls/v277536.html>
- [3]张岚.国内电动汽车充电站建设情况[J].高科技与产业化, 2010, (6):60-61
- [4] Morrow, K, Karner, D, Francfort, J. Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Infrastructure Review. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy. 2008.
- [5] Hatton, C.E., Beella, S.K., Brezet, J.C., et al. Charging station for urban settings:the design of a product platform for electric vehicle infrastructure in Dutch cities.International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, 13-16th, 2009.
- [6] WANG Heng-song, HUANG Qi, ZHANG Chang-hua, etc. A novel approach for the layout of electric vehicle charging station. International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis (ICACIA). 2010: 64-67.
- [7] ReVelle, C S, Eiselt, H A. Location analysis: A synthesis and survey. European Journal of Operational Research. 2005, 165(1): 1-19.
- [8] F. Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. Computers & Operations Research. 1986, 13(5): 533-549.
- [9] Chiara Bersania, b, Riccardo Minciardi, Roberto Sacileb, Eva Trasforini. Network planning of fuelling service stations in a near-term competitive scenario of the hydrogen economy [J].
- [10] Michael Kuby, Lee Lines, Ronald Schultz, Zhixiao Xie, Jong-Geun Kim, Seow Lim.Optimization of hydrogen stations in Florida using the Flow-Refueling Location Model [J].
- [11] Martin Frick, K.W. Axhausen, Gian Carle, Alexander Wokaun. Optimization of the distribution of compressed natural gas (CNG) refueling stations: Swiss case studies[J], Transportation Research. D, Transport and Environment, 2007, 12(1):65-86.

- [12] Holzman, D, Pope, C.and Xu, X.An assoeialion between air pollution and mortality in six US cities[M].New England J.Med.1993, P.173-175.
- [13] Hakimi, wojciech W.Charemza, Derek F.Deadman.New Diretion in Eeonometnic Practice[M].Edward Elgar Publishing Limited, UK.Lyme, US.1997.
- [14]寇凌峰, 刘白发, 周欢.区域电动汽车充电站规划的模型与算法[J].现代电力, 2010, 27(4): 44-48.
- [15]周洪超, 李海锋.基于博弈论的电动汽车充电站选址优化模型研究[J].科技和产业, 2011, 11(2): 51-54.
- [16]任玉珑, 史乐峰, 张谦, 韩维建, 黄守军.电动汽车充电站最优分布和规模研究[J].电力系统自动化, 2011, 35(14): 53-57.
- [17]李菱, 李燕青, 姚玉海, 葛曼.基于遗传算法的电动汽车充电站的布局规划[J].华东电力, 2011, 39(6): 1004-1006.
- [18]张国亮, 城市内和城市间电动汽车充电站的选址布局研究, 硕士学位论文, 天津大学管理与经济学部, 2011.
- [19]宋亚辉, 城市电动汽车充电站设施规划布局研究, 硕士学位论文, 北京交通大学, 2011.
- [20]刘志鹏, 文福栓, 薛禹胜, 辛建波.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.
- [21]葛少云, 冯亮, 刘洪, 王龙.电动汽车充电站规划布局与选址方案的优化方法[J].中国电力, 2012, 45(11): 96-101.
- [22]熊虎, 向铁元, 祝勇刚, 宋旭东, 陈浩, 陈红坤.电动汽车公共充电站布局的最优规划[J].电力系统自动化, 2012, 36 (23): 65-70.
- [23]谢伟林.基于自适应粒子群算法的电动汽车充电站优化规划[J].新能源, 2012, 11: 34-37.
- [24]孙小慧, 考虑时空限制的电动汽车充电站布局模型, 硕士学位论文, 大连理工大学, 2012.
- [25]唐现刚, 刘俊勇, 刘友波, 冯瀚, 谢连芳, 马玮.基于计算集合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.
- [26]高赐威, 张亮, 薛飞, 刘红超.考虑集中型充电站定址分容的电网规划研究 [J].中国电机工程学报, 2012, 32(7): 40-46.

- [27]何战勇, 电动汽车充电站规划方法及运营模型研究, 硕士学位论文, 北京交通大学, 2012.
- [28]高建平, 电动汽车充电站网络规划优化研究, 硕士学位论文, 山东大学, 2012.
- [29]刘清虎.纯电动汽车整车能量建模与仿真分析 [D].湖南:湖南大学硕士学位论文, 2003
- [30]甘应爱, 田丰等, 运筹学(第三版).北京:清华大学出版社, 2006
- [31]董泽清.排队论及其应用.北京:中国人民大学出版社, 1980
- [32]温斯顿著; 李乃文等译.运筹学-概率模型应用范例与解法(第四版).北京:清华大学出版社, 2006.321-411
- [33]唐应辉, 唐小我.排队论-基础与分析技术.北京:科学出版社, 2006
- [34] Hakimi. Optimum locations of switching centres and the absolute centers and medians of a graph. Operations Research, 1964, (12): 450-459.
- [35] Toregas, C. ,Swain, R., ReVelle, C, et al. The location of emergency service facilities. Operational Research. 1971, 19(6): 1363-1375.
- [36] Church, R.L., ReVelle, C. The maximal covering location problem. Regional Science Association.1974, 32(1): 101-118.
- [37] Hodgson M J. A Flow Capturing Location Allocation Model [J]. Geographical Analysis,1990, 22(3) : 270-279.
- [38]王家顺.一种基于模糊层次分析法的供应商评价模型的研究.微电子学与计算机, 2001, 7(2):59-64
- [39]严蔚敏, 吴伟民.数据结构(C语言版).北京:清华大学出版社, 2004, 186-190
- [40]陆化普.交通规划理论与方法.北京:清华大学出版社, 2007, 151-152
- [41] Holland , J. Adaptation in Natural and Artificial Systems [M].Ann Arbor,MI:University of Michigan Press. 1975:21-24
- [42]周明, 孙树栋.遗传算法原理及应用.北京:国防工业出版社, 1999
- [43]黄耀华, 改进遗传算法在物流中心选址中的应用与研究, 硕士学位论文, 辽宁工程技术大学, 2008
- [44]沈晶, 基于供应链的制造类企业库存管理研究, 硕士学位论文, 长沙理工大学, 2012

致 谢

硕士研究生的学习生活即将结束，在过去三年里，我的理论视角和专业视角都有了很大的提高。本论文是我在读研期间的一个总结，同样也包含了我的老师、同学、家人的关心和支持，在此表示诚挚的谢意。

首先我要感谢我的导师周爱莲教授，正是因为有了周老师的悉心指导和全力支持，我的论文才能顺利完成。整个论文过程，从选题、定题到写作、定稿得到了周老师的悉心指导，在一次次的修改过程中，周老师都给与了无私的帮助。周老师用他特有的魅力指导我学习上的点点滴滴，更在生活上给我大力的帮助和支持。在论文即将完成和毕业之际，周老师，请接受我最诚挚的谢意。

在读研学习期间，还有特别要感谢的是我的任课老师。各位老师每一堂课不辞劳苦地讲解，为我论文的书写打好基础，正是因为你们默默的付出，我才能顺利地完论文，顺利地进行答辩。在此，我要向你们表达我深刻的敬意。

在过去的三年里，我交到了让我一生难忘的好友，十分开心能有你们的陪伴。不管是在生活上还是在学习上，感谢各位同学给予我的支持和帮助。还要感谢陪我一起讨论论文，一起进步的同门师姐妹们，正是有你们的鞭策和鼓励，我才能顺利完成论文。

一直以来总是不经意间忽视我的家人，在此，我要深深地表达我的歉意，同时感谢你们对我的支持和鼓励，有了你们的支持和鼓励我才能有信心走的更远。

最后，感谢在百忙之中评审我硕士学位论文的各位专家和学者！

石悦悦

2014年4月8日

附录 A 攻读学位期间发表论文目录

- [1] 周爱莲, 石悦悦. 基于物元可拓的报废汽车回收企业评价. 长沙理工大学学报 (自然科学版), 2013, 10(2), 15-21
- [2] 石悦悦, 周爱莲. 自行车出行综合评价方法研究. 交通科技与经济, 2013, 5, 51-54