

北京交通大学

硕士专业学位论文

基于排队论的电动汽车充电站选址定容研究

The location-sizing problem of electric vehicle charging station
deployment based on queuing theory

作者：卢 芳

导师：华国伟

北京交通大学

2015 年 6 月



学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解北京交通大学有关保留、使用学位论文的规定。特授权北京交通大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，提供阅览服务，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：卢芳

导师签名：华国伟

签字日期：2015 年 6 月 10 日

签字日期：2015 年 6 月 10 日

学校代码: 10004

密级: 公开

北京交通大学

硕士专业学位论文

基于排队论的电动汽车充电站选址定容研究

The location-sizing problem of electric vehicle charging station
deployment based on queuing theory

作者姓名: 卢 芳

学 号: 13125346

导师姓名: 华国伟

职 称: 副教授

工程硕士专业领域: 物流工程

学位级别: 硕士

北京交通大学

2015 年 6 月

致谢

短暂的硕士研究生涯即将结束，在这两年时间内，通过课堂学习和课后研究，让我收获了不少专业知识，同时也成长了不少。而这些收获与成长都离不开老师，同学，朋友，父母的帮助和支持。在这里，我向所有帮助和支持我的人表示衷心的感谢。

首先，我要感谢我的导师华国伟老师，感谢导师两年来对我学业上的督促，对我论文的指导和帮助，感谢导师成立的讨论班，通过拜读顶级期刊的文章，让我学习了学术大牛的写作的思路，了解了不少其他研究方向的知识，开拓了视野，同时也因为讨论班这个平台，让我认识了更多学习伙伴。在此，衷心感谢两年来给予我最大帮助和指导的华老师。

感谢在选址研究方向和排队论方向做出巨大贡献的学者们，他们的研究成果给予了我一定的理论基础。

感谢身边的同学和朋友，在我写作遇到瓶颈的时候，一直鼓励我，直到论文完成。

感谢北航软件学院的毛光明同学和北邮经管学院的李毅同学，在我写作过程对我模型的建立和求解问题上给予了很大帮助和支持。

最后，还要感谢我的家人，感谢他们物质上的资助和精神上的支持，让我能够专心地完成我的学业。

摘要

随着环境污染和石油危机问题的日益加重,具有节能减排特质的电动汽车的发展受到越来越多人的关注。随着电动汽车相关技术的增强和国家政策的支持,电动汽车市场规模逐渐壮大,但是,电动汽车充电设施网络的不完善仍然很大程度上阻碍着电动汽车使用的普及。因此,要推广电动汽车的使用,建立完善的充电设施网络十分重要。相对于传统燃油汽车而言,电动汽车的缺点在于续航里程短和充电时间长,因此电动汽车充电站的建设地址和站内的容量大小十分重要。对于充电设施网络建设,充电站的选址及其配备的充电装置数量直接影响到后期充电站的服务质量和运营效益,在一定预算费用限制下,如果建立多个充电站,那么相应的配备的充电桩数量就会减少,虽然可能使服务覆盖面积扩大,获得服务的电动汽车数量增加,但是却增加了充电站内排队等待的时间;如果选择在一个充电站内配备较多的充电桩,那么可选择建设的充电站数量就会减少,这样虽然减少了充电站内排队等待的时间,但是相应的服务覆盖面积可能减小,被满足的充电需求就会减少,因此,如何合理地选择充电站地点和配置充电桩数量是本文的研究目标。

基于选址问题研究,本文将电动汽车充电站分为两种类型,一种是高速公路网络上的充电站建设,一种是城区内的充电站建设。根据选址研究,可以按充电需求将充电站建设分为基于路径需求和基于点需求的充电站建设,结合电动汽车充电站排队论模型,分别研究不同需求模式下的充电站选址定容问题。针对路径需求模式,基于截流选址模型和排队论知识,建立了一个不超过给定的排队等待时间前提下,网络中接受充电服务的电动汽车数量最大的模型,利用算法对模型进行求解,确定最优的充电站地址及相应的充电桩数量;对于点需求模式,借助期望模型,以最大容忍响应时间内系统所服务充电需求的期望值最大为目标函数建立一个基于响应时长的电动汽车充电站选址定容模型。并且利用数值仿真实验进行灵敏度分析,分析不同需求模式下,各个影响因素对实验结果的影响。

关键词: 选址定容; 充电站; 电动汽车; 排队论

ABSTRACT

With the ever increasing problem of environmental pollution and the oil crisis, the electric vehicle (EV) with saving energy and decreasing emissions has become more and more popular. With the EV technology's improvement and the government's support, the EV market grows constantly. Meanwhile, the imperfect EV charging infrastructure network inhibits the promotion of the EV. So, building a good charging infrastructure network is very important for promoting the use of electric vehicles. Compared with traditional fuel vehicles, electric vehicles have two obvious disadvantages: short travel range and long charging time, so how to decide the location and sizing of the charging station is very important. For charging facilities network construction, the location of sites and the number of equipped charging spots in charging station directly affects the quality of charging service and operating efficiency. Given a specific budget fee, if we establish more charging stations, then the charging spots equipped in charging station will be less. That is, the coverage level increasing at the sacrifice of increasing waiting time. If we allocate more charging spots in one charging station, then the number of charging station will decrease. So, the waiting time decrease with the lower coverage level. Therefore, how to determine the location of charging station and the sizing of the charging spots is very important.

Based on the location problem, we can divide the charging station deployment into two types: charging station deployment on the highway network and the charging station deployment on the metropolis. According to the location studies, we can divide the location-sizing problem into two types based on the charging demand: path demand and node demand. Combined with the electric vehicle charging station queuing theory model, we developed different location-allocation model for electric charging station under different demand patterns. For the path-based demand patterns, we formulate a location-allocation model maximizing the number of EV that can be recharged in the path, considering the upper limit of waiting based on the knowledge of flow-refueling location problem and the queuing theory. For the charging demand caused in nodes, expectancy model was applied to study the EV charging station location-allocation problem. Given the max response time, we formulate a model to maximize the expected charging demand. Then, we did some sensitivity analysis with numerical experiments to analyze the impact with result of different impact factors.

KEYWORDS: Location-sizing; charging station; electric vehicle; queuing theory

目录

摘要 III

ABSTRACT IV

1 绪论 1

1.1 研究背景..... 1

1.2 电动汽车发展现状 2

1.2.1 国内电动汽车发展现状..... 2

1.2.2 国外电动汽车发展现状..... 3

1.3 电动汽车服务设施发展现状 4

1.3.1 充电设施数量快速增长..... 4

1.3.2 充电设施网络布局不完善 5

1.4 研究方法意义 6

1.4.1 研究方法..... 6

1.4.2 研究意义..... 7

1.5 研究内容..... 8

2 相关理论及研究综述11

2.1 电动汽车及服务设施简介.....11

2.1.1 电动汽车.....11

2.1.2 电动汽车充电服务设施.....11

2.2 电动汽车充电服务设施研究现状..... 13

2.2.1 定性研究..... 13

2.2.2 定量研究..... 14

2.3 排队论理论..... 15

2.3.1 排队论知识介绍 15

2.3.2 电动汽车充电站排队模型分析 16

2.4 选址理论研究综述 18

2.4.1 基于点需求选址问题研究 18

2.4.2 基于路径需求的选址问题研究 20

3 高速公路网络上的电动汽车充电站选址定容..... 23

3.1 问题描述..... 23

3.2 FRLM 理论.....	23
3.2.1 模型逻辑.....	23
3.2.2 FRLM.....	24
3.2.3 FRLM 中路径上流量的确定	25
3.3 基于 FRLM 的选址定容模型.....	26
3.3.1 模型假设.....	26
3.3.2 数学模型.....	27
3.3.3 模型求解.....	28
3.4 灵敏度分析.....	30
3.4.1 行驶范围对实验结果的影响	31
3.4.2 充电桩服务速率对实验结果的影响	32
3.5 本章小结.....	34
4 城区内的电动汽车充电站选址定容	35
4.1 问题描述.....	35
4.2 城区内电动汽车充电站选址定容模型	35
4.2.1 模型假设.....	36
4.2.2 数学模型.....	36
4.2.3 模型求解.....	37
4.3 灵敏度分析.....	40
4.3.1 预算费用对结果的影响	40
4.3.2 充电桩服务速率对结果的影响	41
4.4 本章小结.....	42
5 结论	43
5.1 总结	43
5.2 研究展望.....	44
参考文献	46
作者简历及攻读硕士/博士学位期间取得的研究成果	52
独创性声明	53
学位论文数据集.....	54

1 绪论

1.1 研究背景

全球对石油作为运输燃料的高度依赖已经造成了一系列的问题，例如：大气污染，油价上升，中东地区的政治不稳定性，以及全球气候变暖。这些广泛的负面影响引起社会上对减少石油使用的呼吁。尽管提高石油的使用效率可以在一定程度上减少能量的损耗，但是从长远来看，摆脱对石油的依赖型，更有效的方法是用另一种能量来源来代替石油，尤其是汽车和卡车的燃料来源。根据调查显示，中国是一个汽车消费大国，我国汽车的需求量年平均增长 21.8%，远远高于全球年平均 2.7% 的增长幅度，这些汽车的使用都依赖于石油。但是，随着汽车消费的快速增长，不仅使得石油供应安全面临严峻的形势，同时也带来了严重的环境污染问题。根据调查显示，目前汽车的有害排放物质已经成为世界性大气污染的重要来源，数据表明，目前，城市中 60% 的一氧化碳、50% 的氮氧化合物和 30% 的碳氢化合物污染均来源于机动车的尾气排放，同时交通车辆还带来了城市中 80% 的噪音污染。自上世纪 70 年代起，世界各国人民开始关注“可持续发展”相关的话题。央视主持人柴静制作的雾霾记录片《穹顶之下》，不到一天时间，视频的点击率就已突破三千万，这一数据表明，环境污染问题已成为全民关注的重点。而根据数据显示，笼罩 30 个省（市）的雾霾的最主要产生原因之一就是机动车的尾气，例如，北京雾霾颗粒中机动车尾气占 22.2%。大气环境的污染，加上全球石化能源的供应短缺问题，节能减排已成为刻不容缓的头等大事，寻找新型能源替代传统燃料也因此也成为未来的重要发展方向。

电动汽车在使用过程中具有零排放或者超低排放、低噪声且低热辐射等特性，同时，电能来源也越来越多样化、清洁化，因此既减少环境污染又降低碳排放的电动汽车，即兼具“节能”与“环保”特性的电动汽车在资源和环境的双重约束下，被社会普遍认为是理想的燃油汽车替代品。近年来，我国电动汽车领域已经攻克了许多决定性的技术难题，部分已实现跟欧、美、日同步发展。虽然电动汽车技术的发展促进了电动汽车产业的壮大，但是充电设施网络的不完善依然很大程度上阻碍了电动汽车的广泛应用。2010 年年初，国际气候组织对 40 多名电动汽车相关行业专家进行了访谈，访谈结果表明充电基础设施建设的重要程度在电动汽车发展众多影响因素中排名第 2，并且超过了购买价格因素，仅仅落后于电动汽车的电池技术因素。数据显示，我国新能源乘用车保有量 2014 年已经接近 9 万辆，但

建成的充电桩仅有 3 万多个，而在 2011 年的时候，北京充电桩与电动汽车的比例是 1:1，2013 年下降到 2:1，2014 年下降至 3:1，而且，这个差距还在日益扩大。数据表明，我国充电桩的建设未能跟上电动汽车的发展，充电基础设施建设的滞后，制约了电动汽车的发展。Johnson 和 Suskewicz (2009) 在《哈佛商业评论》上的一篇文章也指出实现传统能源经济向清洁技术经济转变，仅靠技术是不够的，还必须将商业模式、政策和市场纳入思考框架中。爱迪生发明电灯泡之后同样意识到无论发明的技术多么有创意，改变煤油照明行业仅仅依靠技术本身是没有效果的，必须具备一个经济实惠的完善的电灯照明网络进行支撑，利用新的电灯照明系统替代旧的煤油照明系统，而不仅仅通过新的照明技术替换旧的照明技术。电动汽车的发展也是这样，仅仅通过技术革新无法实现电动汽车的普及，必须要以电动汽车的系统去替换燃油汽车系统，通过建立起完善、高效的充换电站网络来支持电动汽车的推广使用。随着市场上电动汽车数量的增加，充电需求也随之增加，目前电动汽车的技术限制使得电动汽车的充电时间过长，如果站内充电设施数量设置得不合理，会造成充电站内堵塞或者资源浪费的情形，因此，高效、完善的充电站网络不仅要考虑充电站的建设位置，还应根据需求确定站内合理的充电设施数量。本文基于这样的社会背景，对不同交通网络中的电动汽车充电站的选址与定容问题进行了研究。

1.2 电动汽车发展现状

1.2.1 国内电动汽车发展现状

中国在电动汽车技术研发活动及示范推广工作上一直处于世界的前列，尤其是在电动汽车示范推广方面。“八五”时期，我国首次确立电动汽车研究项目；“十五”时期，确立“三横三纵”布局，研发样车，着手推广；“十二五”时期，加强市场试营和商业化推广。为了推动电动汽车在国内的普及范围，政府也先后相应出台了一系列相关利好政策，如：

2009 年 6 月 17 日，工业和信息化部发布了《新能源汽车生产企业及产品准入管理规则》，该管理规则按照相关指标将新能源汽车分为三个技术阶段，并指出不同技术阶段的相对应的管理方式，同时还规定了新能源汽车产品和企业的准入条件。

2010 年 6 月，财政部、科技部、工业和信息化部、国家发展改革委联合出台了《关于开展私人购买新能源汽车补贴试点的通知》，文件中提出对试点城市私人购买、登记注册和使用的插电式混合动力乘用车和纯电动乘用车给予一次性补贴。

2012 年三月,财政部、工信部和国家税务总局发出通知,为促进新能源的汽车、船舶的发展,节约能源,经国务院批准,从 2012 年 1 月 1 日起,节约能源的车船,可享受减半征收车船税的优惠;以新能源作为燃料的车船,可以不用缴纳车船税。

2014 年 3 月,《天津市小客车总量调控管理办法》中特别规定新能源车购置可直接申领号牌,没有限制购买的约束。

2014 年 8 月中旬,工信部公布了免征新能源汽车车辆购置税等相关事项,规定自 2014 年 9 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日,新能源汽车将免征车辆购置税。

2015 年 4 月,北京市政府在发布新一轮尾号限行措施时,也发布了消息称自 2015 年起,纯电动小客车不受尾号限行影响。

在这些政策的推广下,国内的电动汽车市场得到了迅速的发展。根据统计数据,截止到 2010 年底,全国加入“十城千辆”节能和新能源汽车示范推广项目的城市共有 25 个,各地示范运行的电动汽车总数超过 1 万辆。截至 2012 年 3 月底,25 个示范城市累计推广新能源与节能汽车超过 1.9 万辆。截至到 2012 年 6 月底,总共有 83 家企业的 454 款节能与新能源汽车产品进入《节能与新能源汽车示范推广推荐车型目录》。中国汽车工业协会(China Association of Automobile Manufacturers)发布的数据显示,中国的电动汽车在 2014 年上半年中的销量超过了 2013 年全年插电式混合动力汽车和纯电动汽车的总销量,达到了 2.04 万辆。作为全球最大汽车市场的国家,中国去年的汽车销量为 1800 万辆,但是,目前,中国的电动汽车保有量仅为 7.8 万辆左右,而且主要是公交车和出租车,由此可见,国内的电动汽车市场还有很大的发展空间,尤其是私家车市场这一部分。

1.2.2 国外电动汽车发展现状

在国外,电动汽车的发展主要经过了四个阶段。在 1973 年以前,电动汽车技术刚起步,发展缓慢,传统汽车占据着主导地位;1973 年到 1990 年期间,石油危机第一次催生电动汽车发展热潮;1990 年到 2005 年,排放法规驱动电动汽车迎来第二次热潮;2005 年以来,交通能源战略转型推动电动汽车进入第三次热潮。

为了更好地推动电动汽车市场的发展,各个国家也都相继推出一系列相关政策及规定。如:

在美国,2010 年 6 月确定进一步投入 60 亿美元补贴电动汽车发展,其中,包括支持研发汽车电池技术、帮助修建充电站、提供购车消费税抵免等。在这之前,已经支出 250 亿美元资金来帮助汽车制造商更新设备,投入 24 亿美元资金支持电池开发和其他项目,以及每辆 7,500 美元的电动汽车购车消费税抵免。

在日本,日本经济产业省在 2010 年 4 月提出,截止到 2020 年,HEV 和 EV 等“新一代汽车”占新车销量比例将达到 20~50%。具体指标为:到 2020 年达到普及目标:HEV(混合动力电动汽车)为 20~30%、EV/PHEV(插电式混合动力汽车)为 15~20%,FCV 为 1%以下,清洁柴油车为 5%以下。

在德国,作为一个汽车生产大国,一直都在采取措施来发展对于具有节能减排特性的且具有很大大市场潜力的电动汽车,为了能够占据世界范围内更大的电动汽车市场,德国甚至动员了学术界、政界以及相关领域的工会、产业界以及社会团体的力量,并形成了一个强大的协调平台,这个协调平台由 7 个技术和政策方面的攻关团队或小组组成。德国提出的目标是,让德国在 2020 年前后成为电动汽车的主导市场和主要供应商。德国把实现这一目标视为能否“在工业、经济、科学和工艺技术上继续扩大德国领先地位的机会与挑战”。

在法国,自 2008 年起,法国政府的汽车补贴累计达到 23 亿欧元,扶持购买了 390 万辆新产低污染汽车。2012 年政府为每辆低碳汽车提供 2000 至 5000 欧元的激励补贴支持。

除了上述几个国家之外,其他一些国家,例如英国,以色列等也纷纷抓住新能源汽车的发展趋势,出台了一系列政策法规来鼓励大家购买电动汽车,从而推动电动汽车的市场占有率。

因此,在“节能减排”的号召和政府优惠政策的双重鼓励下,电动汽车在近几年内在全球得到了迅速的发展。电动汽车的技术不断进步和电动汽车的保有量逐渐增加,表明电动汽车具有很大的市场发展空间,并且会在未来汽车市场上占据举足轻重的地位。

1.3 电动汽车服务设施发展现状

电动汽车充电设施为电动汽车提供能源供给,是推动电动汽车发展的必不可少的配套设施,根据调查,目前的电动汽车车主,大多都是在充电问题得到解决之后才购买的电动汽车。因此,电动汽车基础设施的规划建设与电动汽车技术的提升需要同时进行。随着电动汽车市场的扩大,电动汽车使用的普及,电动汽车相配备的充电基础设施在近几年内也得到了较快地增长,但是,虽然电动汽车充电设施数量得到了快速增长,但是由于设施网络的不完善,我国充电桩的建设仍然未能跟上电动汽车的发展,很大程度上直接制约了电动汽车的发展。

1.3.1 充电设施数量快速增长

环境问题的日益严重，无污染、零排放的电动汽车被认为是传统燃油汽车的完美替代物，因此，为了改善环境问题，更好地普及电动汽车的使用，近年来，世界各地相继开展电动汽车充电站（桩）的建设工作。

在国外，德国 Daimler 与 RWE 合作，共同启动柏林区域电动汽车的示范项目，并投入 smart 和 Mercedes Benz 100 辆，建立 500 座充电站；在法国，拥有 3000 辆电动汽车车队的 EDF，积极参与电动汽车充电站建设并且已初步形成网络。

在国内，全国各个示范城市先后提出了电动汽车发展规划的蓝图，电动汽车充电设施的规划建设也逐步提上了日程，各个城市也都加入电动汽车推广行动中。北京市，截止至 2013 年 10 月，北京目前有 1274 个充电桩，5 座大中型充换电站。并且计划到 2015 年建成大中型充换电站 5 座、充电桩 3.57 万个。充电桩主要建在加油站、售电窗口、4S 店、科技园、停车场、高校等地方。根据官方数据，截止 2014 年底，北京市已安装的自用充电桩数量已经超过 1600 个，公共充电桩也超过 1400 个；天津市，截止至 2012 年底，已建设交流充电桩 471 个并投入运营，并且计划 2013 年到 2015 年建设公交车充换电站 16 座、乘用车充换电站 8 座，各类充电桩约 6900 个；上海市，截至到 2012 年底，建设充电桩 1460 个。未来计划按照满足 10000 辆新能源汽车运行的要求，新建交直流充电桩 6000 个左右、加氢站 1 座，其中 2013 年建设交直流充电桩 300 个、2014 年建设 1500 个、2015 年建设 4200 个及加氢站 1 座；截止到 2014 年 3 月，深圳已经建好充电站 81 座，安装的充电桩数量达到 3000 个；广州市，截止 2014 年 3 月，共建设充电站充电桩 52 个。计划 2013-2015 年，在公交车领域按充电桩桩车比 1:3 建设 1667 个快速充电桩，约合 168 座快速充电站，同时将充电桩作为综合（立体）公交场站的配套设施开展一体化建设；在出租车领域按充电桩桩车比 1:5 建设 500 个快速充电桩，约合 50 座快速充电站；在公务车领域，针对警务车特殊工作需求，一次性配置约 500 个快速充电桩；在物流、环卫、邮政车及私家车领域按充电桩桩车比 1.5:1 匹配建设慢速充电桩，同时配置 261 个快速充电桩作为辅助，满足各类型新能源汽车运行的需要。除了上述几个城市之外，其他各大城市都已大力开展电动汽车充电站（桩）的建设工程。

由此可见，电动汽车发展所配套的充电设施最近几年来随着电动汽车的普及也得到了迅速的发展。

1.3.2 充电设施网络布局不完善

目前，这些已建成或者在建的电动汽车充电设施大多都是示范性的充电站，而且在使用中的充电设施大部分是专用电动汽车充电站，还没有真正实现规模化的

商业运营，而其中主要的原因是充电设施网络布局的不合理。充电设施网络布局的不合理性使得目前市场上一部分车辆没地方充电的同时，另外却存在大量的充电设施处于闲置状态。例如，最早被列为充电桩试点的小区之一，深圳市莲花二村，目前，小区内露天停车场共安装的 60 个充电桩大部分已经黑屏；南昌建设的 150 个充电桩，由于接口不统一，目前均已处于闲置状态；上海市前期建成的电动汽车充电桩也没有很好地投入使用，目前被包裹得严严实实……通过调查发现，现在充电设施的不完善主要在于以下几个方面：

（1）忽略私人电动汽车服务

从电动汽车发展初期开始，我国的电动汽车推广对象主要在公共服务领域，如出租车、专用车、公交车等公共服务车辆，电动汽车充电设施的建设也主要根据公共服务车辆的需求进行网络布局。2014 年，私人电动汽车保有量迅速增长，但是充电设施建设商、政府和电力提供商等相关部门的观念并没有转变，仍然停留在服务公共领域方面，因此，造成了市场上无法满足私有电动汽车充电需求的现状。

（2）建设私人充电设施的环境不完善，盈利性低

目前，我国的充电设施建设基本上都是在政府的推动下进行的，且主要由大型国有企业承包。为了促进电动汽车车主的消费积极性，市场上的许多服务设施都低收费或者直接免费开放，由此一来，电动汽车充电设施运营企业无法获得利益。虽然国家电网表明，电动汽车充电设施的建设面对社会全面开放，但是盈利问题一直没有得到解决。

（3）电动汽车的发展变动性大

目前，电动汽车的技术虽然得到了很大的发展，但是，仍然存在较大的改动空间，电动汽车技术的发展随之也会引起对充电服务设施要求的变动。同时，目前市场存在多种充电技术和充电方式，比如充电、换电模型，无线充电、路灯充电灯技术，这些充电技术和充电方式使得电动汽车服务设施运营商迷惑于应如何建设服务设施，因此，也极大阻碍了电动汽车服务设施的建设工程。

1.4 研究方法及意义

1.4.1 研究方法

本文的研究方法主要有：文献研究法，概率与数学研究法和最优化方法。

（1）文献研究法

为了更好地建立完善的电动汽车充电设施网络，需要了解现有的电动汽车发

展现状,选择合适的电动汽车充电设施运营模式,同时研究现有的充电设施现状,因此,本文需要大量阅读已有的文献资料,以这些文献资料为基础,借鉴相关的理论及方法,在前人研究的基础上进行创新、延伸。

(2) 概率论方法

概率论方法指的是通过概率论知识解决一些随机的数学问题,或者建立合适的随机模型,从而解决确定的数学问题。本文的一个创新点,即考虑电动汽车的充电时间和排队时间,电动汽车到站和电动汽车充电服务时间的概率分布是随机的,不确定,因此,为了更直观地将这些分布表示,本文主要借鉴了概率分布中的泊松分布和负指数分布,将电动汽车到站和充电桩服务时间的分布随机现象数学化。

(3) 最优化方法

最优化方法,指的是通过数学方法研究各种系统的优化方案及途径,为决策者提供科学决策的依据。最优化方法是本文的核心部分,本文以交通网络中被服务的电动汽车数量最大为目标函数,建立最优化模型,并求出最优解情况。

1.4.2 研究意义

建设高效、完善的电动汽车充换电站网络是当今发展电动汽车的重要基础,同时,政府部门在“十二五”工作计划中也将其作为发展的重要内容,2014年下半年起,政府多次颁布相关法案鼓励社会投资建设充电设施网络,电动汽车充电设施建设已经成为政府和相关企业研究的重点。本文调查分析我国电动汽车充换电站规划的经验和教训,借鉴选址理论的相关研究内容,同时,结合排队论的相关知识,研究交通网络中电动汽车充电站的选址定容问题,这一研究不仅具有重要的实践指导意义,其研究结果也可以直接指导充电设施网络规划的具体实施。

(1) 科学规划充电设施网络,推动电动汽车的快速发展

目前,因为对行驶里程的限制而造成无法到达目的地的担忧情绪,是阻碍用户购买电动汽车的一大主要因素。电动汽车的普及推广很大程度上依赖于充换电的便捷性和充电效率,而这又取决于完善的充换电服务网络建设。因此,科学规划和建设智能充换电服务网络,是推动电动汽车快速发展的重要前提。只有建成覆盖全国的智能充换电服务网络,才能为电动汽车大规模发展提供充换电保障,消除市场对电动汽车续航里程短、充电不方便的顾虑,从而推动电动汽车的快速发展。

(2) 避免建设不合理的充电站,减少充电设施建设和运作成本

完善的充电设施网络能够使得在达到一定服务水平、保障覆盖面全的基础上,

尽可能地避免不必要的基础设施建设以及规模不合适的基础设施建设，从而减少充点设施的建设成本和运营成本。

（3）促进能源、环境问题的解决，进一步实现可持续发展

充换电设施网络完善之后，必将会吸引更多的电动汽车拥护者，促进电力终端能源利用，推动清洁能源的发展，减少对燃油原料的依赖，从而促进节能减排，减少环境污染和温室气体的排放，从而保护城市环境、缓解并逐步消除雾霾现象，进而实现社会的可持续发展。

1.5 研究内容

本文主要研究考虑充电时间的电动汽车充电站的选址定容研究，根据实际情况构建电动汽车充电站排队系统，按照适用范围，将充电站建设分为高速公路网络上充电站建设和城区内充电站网络建设，并结合选址问题研究，分别提出基于点需求和基于路径需求的电动汽车充电站选址定容问题模型，通过数值实验进行灵敏度分析，为电动汽车充电站建设提供管理洞察。

本文的研究思路如图 1.1 所示。

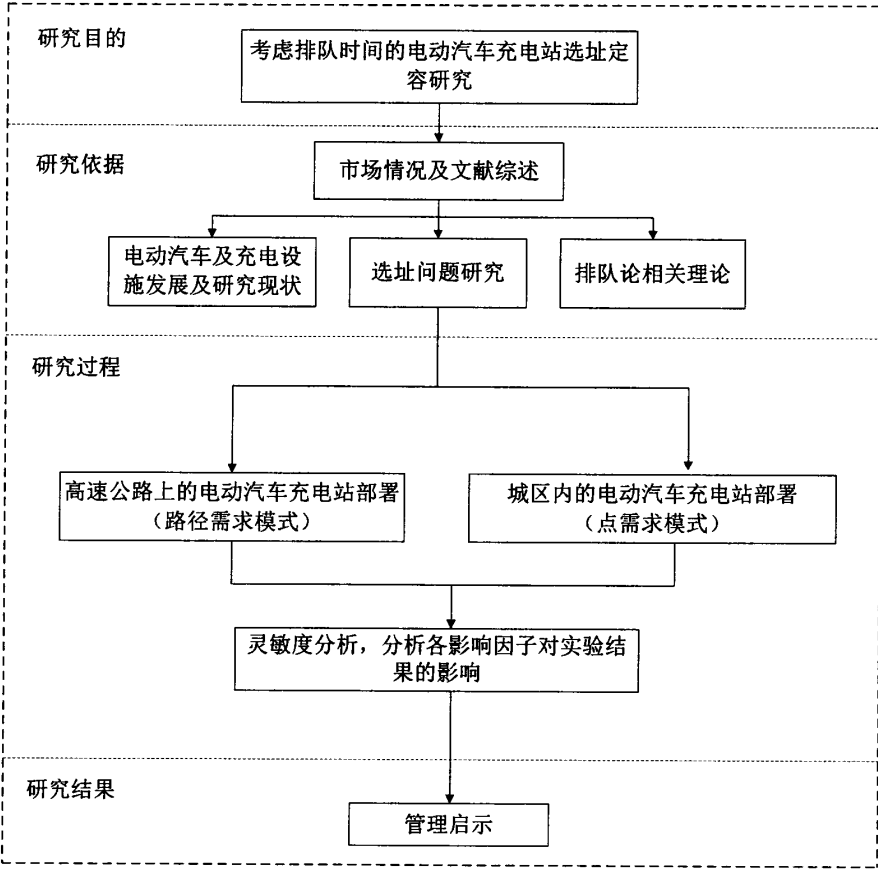


图 1.1 研究思路

Figure 1.1 Research design

就文章结构而言，本文主要包括六部分：绪论、相关理论及研究综述、高速公路网络上的电动汽车充电站选址定容研究、城区内的电动汽车充电设施选址定容模型和结论。

第一章，绪论。提出了电动汽车充电站选址定容问题的研究背景，介绍目前电动汽车市场及充电服务设施网络的发展现状，指出本文的研究方法和意义，并概述了全文的主要研究内容。

第二章，相关理论及研究综述。首先对电动汽车及电动汽车服务设施进行了简单的介绍，然后从定性和定量两个方面对电动汽车充电服务设施研究现状进行了阐述，并且对相应的排队论理论和选址理论研究进行了介绍。具体介绍了电动汽车的类型以及目前使用过程中存在的不足之处，电动汽车服务设施的运营模式，电动汽车充电服务设施的研究现状，现有的排队论模型，并基于电动汽车的实际情况，提出了电动汽车充电站的排队系统，最后分别从基于点需求模式和基于路

径需求模式对选址理论的研究现状进行了分析。

第三章，高速公路网络上的电动汽车充电设施选址定容模型。本章分析高速公路网络上的电动汽车充电需求来自过路需求，可借鉴选址问题中基于路径需求的截流模型，基于该模型，提出预算费用、排队时间上限约束条件，提出特定的电动汽车充电站选址定容模型，并提出相应的求解算法。最后通过算例仿真实验进行灵敏度分析，得到模型中各影响因子对实验结果的影响。

第四章，城区内的电动汽车充电设施选址定容模型。本章分析城区内的电动汽车充电需求大多产生自小区、购物中心、写字楼等特定节点上，因此，可借鉴选址问题中基于点需求的覆盖模型，求解在一定的响应时间内使得接受充电服务的电动汽车数量的期望值最大。

第五章，结论。本章对全文进行了总结。并根据现有模型的假设条件提出未来的研究方向。

2 相关理论及研究综述

2.1 电动汽车及服务设施简介

2.1.1 电动汽车

电动汽车以车载电源为动力,在使用过程中对环境影响较小,在空气污染及石油燃料不足的环境下,是传统汽车的最佳替代品。目前市场上的电动汽车主要分为三种:纯电动汽车、混合动力汽车和燃料电动汽车。纯电动汽车由电动机驱动;混合动力汽车的驱动包括可再充的电动存储装置和可消耗的燃料;燃料电动汽车则是以燃料电池作为动力电源。这三种电动汽车相对于传统汽车而言,最大的优点在于零排放或者近似零排放,从而减轻了给环境带来的污染。但是,与传统汽车相比,由于技术的限制,目前市场上的电动汽车仍然存在一些不足之处。

(1) 续航里程短

由于电池技术的限制,目前,市场上存在的电动汽车的续航里程基本处于 50 公里到 250 公里之间,少量高端车型续航里程达到 300 公里,大部分的电动汽车的续航里程不超过 150 公里,而普通的燃油汽车的续航里程都能达到 500 公里以上。对于在高速公路上行驶的电动汽车,在建设充电设施时,需要充分考虑电动汽车的续航里程问题。

(2) 充电时间长

电动汽车的主要驱动能源为电能,当车辆的电能耗尽时,需要及时给电能储备装置充电。目前的充电模式主要分为快速充电和常规充电。常规充电的充电时长为 5-8 小时,有的甚至需要 10-12 小时;快速充电的充电时间大致在 30 分钟左右。而传统的燃油汽车,很短的时间内即可将车辆加满油,一般不超过两分钟,车辆可以在到达加油站后,短时间内加满油离开,而电动汽车在充电站的等候时间则较长。因此,在建设电动汽车充电设施时,不能忽略电动汽车的充电时长。

2.1.2 电动汽车充电服务设施

电动汽车服务设施相当于传统汽车的加油站,是电动汽车发展的主要支撑。目前,市场上存在的电动汽车服务设施主要分为换电站和充电站两种形式,按照服务模式分为换电模式和整车充电模式,而其中整车充电又分为快速充电和常规充电两种形式,即,市场上存在的电动汽车三种有效充电形式包括:换电,常规充电和快速充电,这三种形式的充电方式都有各自的优缺点,也有各自的适用范

围。

(1) 电池更换

电池更换指的是直接更换电动汽车的电池组，从而达到在极短的时间内为电动汽车充满电的目的。

电池更换的方式既提高了车辆的使用效率，又很大程度上提高了电动汽车车主使用的便利性和快捷性。同时，通过采用电池与车身分离的方式，可以大幅降低电动汽车的购买成本，从而引进更多的电动汽车使用用户。而且，更换下来的电池将由专业人员进行统一管理，可以及时发现电池中存在的问题，从而减少因电池问题而造成的行驶事故。更换下来的电池充电时间具有灵活性，可以选择在低谷时段对替换下来的电池进行充电，错开电力使用高峰期，进而降低充电成本，减少对电力网络的损耗，并进一步提高车辆运行的经济性。

虽然，电池更换模式具有一定的方便性和快捷性，但是，在实际操作中仍然存在一些问题。首先，需要电动汽车的电池标准还没有统一，需要重新进行设计并规范同意电池标准，而这需要协调各大汽车制造商的观点，同时需要从技术上突破。另外，电池更换模式需要大量存储电池，这样会使初期的投资成本过高，尤其是目前电池的技术仍在不断发展，电池的发展，更换，将会导致因为存储电池而带来的风险成本。

因此，换电模式适用于电池技术得到一定的发展，且实现电池组标准化设计之后，现阶段不太适合广泛应用于普通的电动汽车。

(2) 常规充电

常规充电指的是通过较小的交流电流对车辆进行慢速充电的方式。这种充电方式的充电电流比较低，相应地充电时间也比较长，通常充电时间需要 5-8 小时，长的甚至需要 10-20 小时。

这种充电方式，电池组合充电机都固定在电动汽车内，充电运营服务商只要提供交流充电的相关标准，如通讯、接口等，就能够完成电动汽车的充电服务，因此交流充电设备的建设和安装的成本比较低。这种充电方式通过采用低流电充电，可以提高充电效率和延长电池的使用寿命，而且同样可以通过电力低谷期进行充电，降低充电成本；同时因为在家中安装充电装置的成本较低，因此，在家中充电可以提高电动汽车车主使用的便利性和快捷性。

但是，这种充电方式的充电时间过长，不适合长距离行驶的车辆。这种常规充电方式具有一定的局限性，通常只适用于晚间家中充电或者停车场充电。

(3) 快速充电

快速充电指的是通过较大的直流电流快速给整车充满电的方式。这种充电方式一般需要较大的充电电流，充电时间相对而言较短，通常只需要 10-40 分钟便可

以充满电。

快速充电模式相对于其他两种服务方式,不用局限于电池的技术标准和充电时间,因此应用性更广,也更加地便捷。同时,由于充电时间和目前加油站的加油时间相仿,因此,建设相应的充电站时不需要建设大规模的停车场。

本文研究的电动汽车充电设施选址定容,主要针对的是快速充电服务模式,目的在于在交通网络中合理规划快速充电站的地理位置以及配套充电装置数量。

2.2 电动汽车充电服务设施研究现状

由于电动汽车市场规模的不断壮大,电动汽车配套的充电设施建设问题也逐渐引起各个领域相关学者的重视。目前国内外对于电动汽车充电设施服务网络规划研究主要可以分为定性和定量两个方面。

2.2.1 定性研究

定性研究主要是从定性的角度来研究电动汽车充换电设施网络规划的标准、影响因素、方法和对电网的影响等多方面情形。

在国内,居勇 (2011)探讨了建设电动汽车充电站的约束条件及综合效益分析;许文超,牛涛 (2011)研究了电动汽车充电站需求影响因素。高瑞鑫 (2012)主要研究了我国电动汽车充电设施建设及标准化概览;鲁莽,周小兵,张维 (2010)介绍了国内外电动汽车充电设施的发展状况,同时对未来我国电动汽车充电的商业模式及发展前景进行了初步研究,提出积极推动电动汽车充电设施建设应是电网企业义不容辞的责任;冯超等 (2012)采用 Delphi 法建立电动汽车充电站站址综合评价指标体系,采用 GAHP 法量化定性影响因素,从而提出一种新的综合评价方法;张志伟和顾丹珍 (2012)综述了电动汽车充电对电网的影响。

在国外,Amoroso 和 Cappuccino (2011)提出对不同的充电效率收取不同的费用,从而协调充电效率和充电速率的关系;Amoroso 和 Cappuccino (2011)提出对不同的充电效率收取不同的费用,从而协调充电效率和充电速率的关系;Kley 和 Lerch (2011)提出为了最小化电动汽车对电力网络的影响,电动汽车应该选在非峰值晚间时段进行充电,因此,在电动汽车配置的第一阶段,大部分的车辆应该在晚间在家里充电,公共的充电网络只是偶尔使用;Egbue 和 Long (2012)指出虽然插入式电动汽车 (PEV) 对环境有利,但是在 PEV 被广泛应用之前,需要克服一些社会、文化等方面的挑战,其中一个就是非家庭式充电设施的有限利用度,例如,工作区域和商业中心的充电站;Jeremy 和 Eric (2014)利用 NREL 的电池生命

周期分析和模拟工具分析了行驶里程范围的担忧,以及不同的设施情景,如家庭充电桩、办公区域充电桩和公共充电桩对电动汽车使用效率的影响。

2.2.2 定量研究

定量研究主要是通过构建数学模型,设计算法等方式得到最优的充换电站的网络布局。其中常用的模型主要是选址模型,但是目前已有的研究主要是基于成本最小化为目标函数进行研究,并且没有考虑因为电动汽车充电时间而带来的站内拥堵问题。主要的研究成果如下:

在国内,李如琦,苏浩益(2011)基于排队论,以充电设施服务系统中费用最小为目标建立了充电设施费用最优模型;张国亮等(2011)建立了使充电站初始建设成本及用户充电总成本最小化的多等级充电站选址模型并提出了改进的禁忌搜索算法;同年,张国亮(2011)又提出通过截流选址模型研究城市内和城市间的充换电站选址问题,对城市内的选址建立了多等级充电站选址模型及提出了改进的禁忌搜索算法;张国亮(2012)以总成本最小为目标函数建立了求解城市内多等级充电站的选址问题,同时,利用 FRLM 解决城市间的充电站选址问题;周洪超和李海峰(2011)提出运用博弈论对电动汽车充电站规划布局方案进行评价,并给出了博弈优化模型和算法;寇凌峰等(2010)建立了一种电动汽车充电站选址定容的最优费用模型,并用粒子群算法求解;武力(2012)在负荷预测的基础上,对充电设施进行选址定容,确定充电设施的地址和容量,并根据配电网规划原则和实际建设的可行性对选址定容的方案进行校验;刘志鹏等(2012)研究了电动汽车充电站的最优选址和定容问题;李海峰等(2012)提出了一种基于混合遗传神经网络的评价方法,首先利用 Delphi 法建立起充电站候选站址综合评价指标体系,再应用自适应遗传算法优化神经网络的连接权值,利用三层神经网络对该指标进行评价,最后利用暂态误差方法,确定最优结果。

在国外,Frade 等(2011)以里斯本为例,提出一个在给定的距离内,最大化需求覆盖的选址模型;Ge(2011)展现了一个以最小化用户到充电站路上的损失为目标函数的充电站选址定容模型,并且利用遗传算法求解,但是没有考虑电力价格的变化;Wang(2010)通过结合考虑现有的加油站,道路交通地图,电力网络中的配电变压器的位置和公共设施的位置(如医院),提出了一个有关充电站的非线性的多目标计划;Dong, Liu 和 Lin(2014)为电动汽车提出了一个基于行为的充电设施配置系统,但是只考虑了三种不同类型的行为:在家,在工作和其他情形。得出充电站点应安装在最受欢迎的目的地,同时作者通过遗传算法来决定在有限的预算下如何选择更加便捷的充电站类型;McPherson(2011)等比较了几

种选址模型应用在充换电选址问题上的适用性，选定 FRLM 作为选址模型，研究澳大利亚电池交换站的最优地理位置，并且研究长期内市场如何阶段性推出交换站； Andrews（2012）等考虑充电站容量和充电时间的条件下，以电动汽车行驶到充电站总的驾驶距离最小为目标，建立了一个 MIP 选址优化模型；Mak 与 Shen 等(2013)通过建立两类鲁棒优化模型研究了电动汽车换电站的选址问题，一类目标是费用最小，一类目标是服务水平最高，然后用 CPLEX 软件求解；Chung 和 Kown(2015) 以韩国高速公路为例，基于 FRLM，提出了一个多时期充电站选址计划；Xi, Sioshansi 和 Marano（2013）通过建立模型来确定充电站的地理位置以及充电站的等级，并且通过论证得出一级和二级充电站的集合更优于只有二级充电站的情况。

2.3 排队论理论

2.3.1 排队论知识介绍

由于资源、设备或场地等因素的限制，排队现象已成为生活中常见的现象，比如说去超市购物结账，去医院挂号看病，去食堂打饭、在公共电话亭打电话等。这些都可认为是顾客与服务窗之间的服务关系，具体的排队过程可用下图表示：

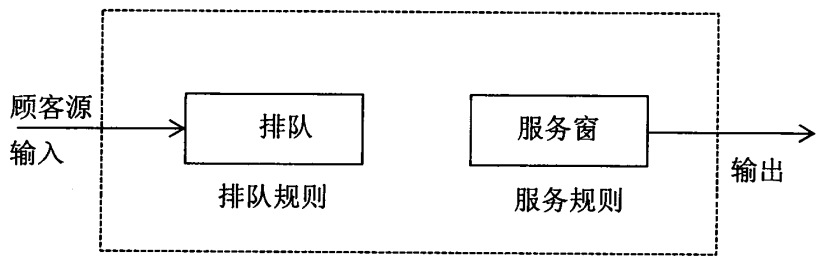


图 2.1 排队系统框图

Figure 2.1 queuing system framework

一个排队系统由输入过程、排队规则、服务规则和输出过程四个要素组成。输入过程是对顾客到达系统的一种描述，顾客到达的时间间隔可以分为确定性和随机性，顾客到达的系统也可以是独立的或者相关的。排队规则主要分为三种形式：损失制，顾客到达系统时，如果系统中所有的服务窗被占用，到达的顾客随即离去；等待制，顾客到达系统后，如果服务窗被占用，则顾客按先后顺序进行排队等待服务；混合制，此系统只允许有限个顾客等候排队，其余的顾客不再继

续排队等候。服务规则中，服务窗可以是无窗口、单个窗口或多服务窗，多服务窗的情况下，顾客排队可以平行多队排列，排成一行或者两者同时存在的混合排队，通常的服务规则包括先到先服务和后到先服务，各服务窗的服务时间可为确定型或者随机型。输出过程指的是顾客接受服务完之后离开的过程。

一个排队系统的好坏通常由一系列的运行指标进行评估。主要的运行指标包括：服务窗的服务强度、服务窗的设备利用率、平均排队队长、平均队列长度、平均排队等待时间、平均逗留时间等。

2.3.2 电动汽车充电站排队模型分析

在电动汽车充电设施排队系统中，输入过程主要指的是电动汽车达到充电站的行为，由于电动汽车的充电行为具有较大的灵活性和随机性，我们假设电动汽车达到充电站服从参数为 λ 的泊松分布；电动汽车充电设施的排队规则为多服务窗等待制，且服从先进先出的规则，即假设系统有 m 个服务窗口（即充电桩），且各个充电桩的工作是相互独立的，电动汽车按照先到先充的服务规则；假设充电桩每次给电动汽车充电的服务时间满足参数为 μ 的负指数分布。因此，电动汽车充电设施排队系统可表示为：电动汽车充电设施系统有 m 个服务窗口，且各窗口的工作是相互独立的；电动汽车按照泊松分布到达，到达的强度为 λ ；电动汽车到达后，如果充电站内有空闲的充电桩，则直接接受充电服务，如果，所有的充电桩都在使用，则进入排队队伍中等待，并按照先到先服务的规则进行排队，直到有空余的充电桩可以为自己充电；电动汽车接受充电桩服务的时间服从参数为 u 的负指数分布，具体的排队模型如图 2.2 所示。

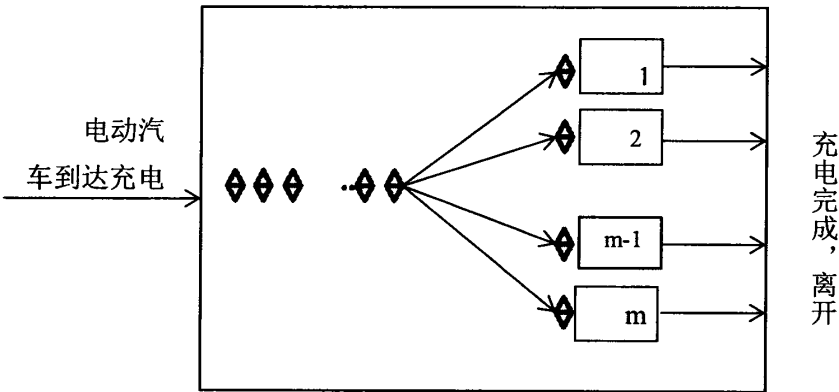


图 2.2 电动汽车充电站排队系统框图

Figure 2.2 Electric vehicle charging station queuing framework

由于电动汽车到达充电站的行为具有不确定性，电动汽车充电设施排队系统

没有顾客来源和系统容量的限制假设 n 表示到达的顾客数。则当 $n \leq m$ 时,则表示,充电站内有 n 个充电桩正在对电动汽车进行服务,而有 $(m-n)$ 个充电桩空闲着;当 $n > m$ 时,则表示到达充电站的顾客数超过了充电桩的个数,则会有 m 辆电动汽车接受充电服务,剩余 $(n-m)$ 辆车进行排队等待被服务。又约定在该排队系统中只允许存在一个排列等待队伍,哪个充电桩服务完空闲的时候,等待的电动汽车按照先后顺序依次前往空闲的充电桩进行充电。

根据电动汽车充电设施排队系统介绍和排队论相关理论,可以得到当系统处于平衡时,满足以下条件。

$$\lambda \cdot P_0 = u \cdot P_1$$

$$\lambda(P_n - 1) + u(n + 1)(P_n + 1) = (\lambda + nu)P_n, \quad n \leq m \quad (2.1)$$

$$\lambda(P_n - 1) + um(P_n + 1) = (\lambda + um)P_n, \quad n > m$$

平衡方程 (2.1) 中 P_n 表示系统中有 n 辆电动汽车接受充电桩服务的概率; n 表示接受充电桩服务的电动汽车数量; m 表示充电站内配置的充电桩数量; 当 $0 \leq n \leq m$ 时,系统内的充电桩数量大于电动汽车数,因此,有 $(m-n)$ 个充电桩处于闲置状态; 当 $n > m$ 时,则表示到达充电站的顾客数超过了充电桩的个数,则会有 m 辆电动汽车接受充电服务,剩余 $(n-m)$ 辆车进行排队等待被服务。

由正则性条件 $\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1$, 可求得:

$$P_0 = \left(\sum_{n=0}^{m-1} \frac{\rho_1^n}{n!} + \frac{\rho_1^m}{m!} \cdot \frac{1}{1 - \rho_0} \right)^{-1} \quad (2.2)$$

根据排队论知识,可以得到充电站服务设施的相关系统指标,具体如下:
 k 点处充电设施的服务强度:

$$\rho_1 = \lambda / \mu \quad (2.3)$$

充电设施的利用率:

$$\rho_0 = \lambda / (\mu m) \quad (2.4)$$

充电站内的平均排队长度:

$$L_q = \frac{\rho_1^{m+1}}{(m-1)!(m-\rho_1)^2} \cdot P_0 \quad (2.5)$$

充电站内的平均队列长度:

$$L_s = L_q + \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\rho_1^{m+1}}{(m-1)!(m-\rho_1)^2} \cdot P_0 + \frac{\lambda}{\mu} \quad (2.6)$$

由 Little 公式,在充电站内的平均等待时间可表示为:

$$W_q = L_q / \lambda = \frac{\rho_1^m P_0}{\mu m \cdot n! (1 - \rho_0)^2} \quad (2.7)$$

充电站内的平均逗留时间可表示为:

$$W_s = L_s / \lambda = \frac{\rho_1^m P_0}{\mu m \cdot n! (1 - \rho_0)^2} + \frac{1}{\mu} \quad (2.8)$$

2.4 选址理论研究综述

无论是商业领域还是生活领域，选址问题都频繁出现，选址问题是运筹学的一个分支，用于处理新的设施的选址问题，从而实现经济、安全、社会、环境或者其他指标中的某一个或某几个最优。比如：工业厂房，仓库，学校，医院，加油站，广告牌和应急设施等建筑的选址。选址问题最早由 Alfred Weber 于 1909 年提出，目的在于选择一个单一的仓库的地点，从而使得仓库到顾客之间总的行驶距离最小。之后，学者们将此问题进行延伸，通过考虑不同现实条件，提出不同的选址研究模型。根据目标函数和约束条件的不同，建立起了不同的设施选址模型。目前，网络选址问题根据需求点的不同，主要分为基于点需求的选址模型和基于路径需求的选址模型。

2.4.1 基于点需求选址问题研究

基于点需求的选址问题主要是假设待建设施的服务需求主要来源于网络中的固定节点上。目前最基本的基于点需求的选址模型主要有四种：p-中值问题，p-中心问题，覆盖问题和固定费用问题。

P-中值问题（也叫 P-中值问题）研究的是，在给定的 p 个服务站数量下，如何选择服务站的地址，从而使服务站和需求点之间的需求量与距离的乘积之和最小。大部分研究的是需求点产生于有限数量的节点上的离散选址问题，Chiu 提出了一个需求点连续产生在网络中连线上的连续选址问题。Hakimi 证明了 P-中位问题的服务站候选点限制在网络节点上时，至少存在一个最优解是与选址点处于网络中连线上任意一点位置时的最优解相同，也就是说，将连续选址的网 P-中位问题转化为离散选址问题不会影响其目标函数的最优值。Goldman 给出了在树网络和只有一个环的网络上单个服务站选址中位问题的简单算法。Garey 和 Johnson 证明了 P-中位问题是 NP 问题。Francis、Francis 和 Cabot、Chen 以及 Chen 和 Handler 研究了基于欧氏距离的 P-中位问题。P-中位问题主要可以用来研究商业中心或者公共设施（如图书馆）的选址问题。

P-中心问题也叫“最小化最大（Minmax）”问题，是一种集覆盖问题的转变形式，主要研究如何选择设施点的建设位置，使得在给定需求点、设施候选点和计划建设的设施点数量的条件下，任一需求点到达离它最近的设施点的最大距离最

小。网络中的 P-中心问题最先由 Hakimi 提出,之后, Kariv 和 Hakimi 证明了 P-中心问题为 NP-困难问题; Drezner 和 Wesolowsky 提出了通过 Drezner-Wesolowsky 方法解决多服务站的 P-中心问题; Francis 在平面上的 P-中心问题研究中取得一些进展, Wesolowsky 研究基于直线距离 P-中心问题;之后, Chen、Ward 和 Wendell 对基于欧几里德距离的 P-中心问题作了研究; C. Caruso 等将求解一系列集覆盖的问题的方法应用在求解 P-中心问题中; Hassin, Levin, Morad D 提出了通过词典区域局部搜索法来求解 P-中心问题; Yuri Levin, Adi Ben-Israel 对大规模 P-中心问题给出了启发式算法,并对一些典型的问题进行了分析。

覆盖问题分为最大覆盖问题和集覆盖问题两类。最大覆盖问题研究的是在服务设施站的数量和服务半径确定的条件下,怎样选择服务设施站的位置可以使得满足的服务需求最大。与其它基本选址问题一样,最大覆盖问题也属于 NP 难题 (Marks, Daskin)。Church RL 和 ReVelle C 最初提出最大覆盖问题概念,他们限制服务设施站的最优选址点处于网络节点上; Church RL 和 Meadows ME 给出了相应的求解办法,并指出如果最优解不是整数可以利用分枝定界法求解。Daskin, Hogan 和 ReVelle, Benedict 研究了考虑拥挤情况下的服务系统最大覆盖问题,建立目标函数,将服务站繁忙的概率当作外生变量,使得服务站可以覆盖的期望需求量最大; Haldun Aytug 和 Cem Saydam 提出利用遗传算法对期望覆盖最大问题进行; Fernando Y 等对最大期望覆盖问题中排队与不排队的情况进行了对比; Berman 研究了部分覆盖问题与最大覆盖问题之间的关系; Oded Berman 和 Dmitry Krass、Dmitry Krass 和 Zvi Drezner 都对最大覆盖问题进行了讨论,并提出了利用拉格朗日算法求解; Jorge H. Jaramillo、Joy Bhadury 和 Rajan Batta 在选址问题的遗传算法应用研究时介绍了最大覆盖问题遗传算法的操作策略。集覆盖问题通过优化布局设施点,使得在所有需求点被覆盖前提下,服务站总的建设费用和建站个数最小。集覆盖问题最早提出是用来解决救护车和消防中心等应急服务设施的选址问题,由 Roth 和 Toregas 等提出,他们分别提出了服务站建站成本相同和不同情况下的整数规划模型,用于解决集覆盖问题;在这之后, Plane 和 Hendrick、Daskin 和 Stern 通过建立服务站个数最小和备用覆盖的顾客最大的双目标函数模型来对集覆盖问题进行深入研究; Heung-Suk Huang 对集覆盖问题中产品会随时间变好或变坏情况的动态问题进行了研究;最近十几年来许多基于启发式的算法被用于解决集覆盖问题, M.L. Fisher 和 P.Kedia 提出了基于对偶的启发算法,用于解决需求一定数量的需求点和候选点的集覆盖问题; Beasley J.E. 和 Jornsten. K 将拉格朗日松弛算法和次梯度优化法相结合,并用来求解集覆盖问题; Marcos Alminana 和 Jesus T. Pastor 提出利用代理启发式算法求解集覆盖问题; J.E.

Beasley 和 P.C. Chu 给出了求解集覆盖问题中服务站建站成本不同情况下的遗传算法。Grossman 和 Wool 通过大量的实验结果,对比了九种用于求解集覆盖问题的启发式算法,并指出简单贪婪算法、随机贪婪算法和转换贪婪算法在求解集覆盖相关问题中都有较好的求解结果,其中随机贪婪算法表现最好,在 60 个随机问题中有 56 次获得最好的解。

固定费用模型通过建立模型使得总成本最低,其中包括设施的建设费用和设施和需求点之间产生的交通费用。这个模型最早是由 Balinski 于 1965 年提出的。这个模型主要是最优化运费和投资费用的权衡关系,如果建设更多的设施点的话,运输费用会减少,但是建设费用会增加。这是私营企业模型的基础,能够延伸至最优化供应链设施选址问题,比如说工厂、仓库和配送中心的选址问题。

在以上四个基本选址问题的基础上,学者考虑其他因素,从而形成了一些扩展选址问题。比如带固定费用和容量限制的选址问题、选址分配问题、随机选址问题、动态选址问题、竞争选址等。其中带固定费用和容量限制的选址问题主要是考虑服务站建站的固定费用和服务站的服务能力(容量)限制;选址-分配问题类似于 P-中位问题,主要研究选址分配问题;随机选址问题中将现实世界的复杂性,服务站的运行时间、建设成本、需求点位置、需求数量等部分或全部输入参数看作是不确定的,随机选址问题可分为随机概率问题和随机情景问题;动态选址问题研究的是未来若干时间段内服务站的最优选址问题,在动态选址模型中,参数值会随着时间段的变动而发生变化,G. Gunawardane 在研究公用设施的选址问题时,考虑了时间变动的因素,建立了动态的最大覆盖问题和集覆盖问题选址模型;竞争选址问题考虑市场上存在两个以上的同类产品和服务的提供者,或服务站提供多个产品和服务,目前的竞争选址研究集中在静态问题上,考虑确定和随机两种情况,研究背景多以连锁零售业为主。

2.4.2 基于路径需求的选址问题研究

在基于点需求选址模型中,一直都是考虑节点上的需求,但实际生活中,有些需求产生在路径上,比如说人们一般会选择在去旅行途中顺便去一下加油站,而不是专门从家出发去加油站。于是, Hodgson(1990)等提出了第一个基于路径流量需求的模型,截流选址模型(FCLM),FCLM 中,需求被定义为旅行中提前给定的带有始发点和终点的最短路径上的流量,是一个在给定设施数量条件下,使得网络中被覆盖的流量最大的,基于流量的最大覆盖问题。在 FCLM 中,只要路径中存在至少一个设施,流量就能被截获;在此基础上,Berman, Hodgson 和 Krass (1995)将 FCLM 进行了拓展,当截获流量的时候,允许从最短路径上偏离,并且提

出了四种偏离模型；在 FCLM 中，只有一个设施需要截获流量，并且对于沿着路径多建设施是没有好处的，但是，在一些特定的问题中，比如说广告牌的选址问题，在旅行途中多次出现广告牌是有好处的。对此，Hodgson 和 Berman (1997) 将 FCLM 进行延伸，重新建立一个模型；同时 FCLM 也被 Hodgson, Rosing 和 Zhang (1996) 用于车辆监控站的选址，用于截获危险的车辆，比如说有害垃圾和醉驾。在这个问题中，越早监控到越好，因此在这个模型中，只有设施下游的流量被考虑截获，设施上游的流量部分不被考虑，因为即使在这个点建设，车辆依然能够对网络造成伤害；类似地，Zeng(2007) 引进了一个捡起问题 (PUP)，这是 FCLM 的另一种延伸，在 PUP 中，路径上每一个设施点截获的流量位置的不同，收益也不同。比如说对于披萨店的选址，对于顾客而言，披萨店越靠近路径终点越有利，这样的话当他们到达家里或者办公室的时候，披萨还是热的。但是另一方面，咖啡店的选址应该尽可能接近路径的起点，这样的话，在行驶途中，他们便可以享用它。

由于 FCLM 中假设只要流量经过的路径上存在一个设施站，流量就能被截获，但是实际生活中，单个设施点可能无法服务于整条路径，这主要是考虑到现实中车辆行驶里程范围的限制。为此，Kuby 和 Lim(2005) 在 FCLM 的基础上，融入行驶里程范围的限制，建立了 FRLM (Flow-Refueling Location Model)。FRLM 目标是在给定数量的设施条件下截获的流量最大，FRLM 与 FCLM 最主要的不同在于，在 FCLM 中，如果在流量经过的路径上至少存在一个设施站，那么流量就能被截获，而在 FRLM 中，还需要考虑车辆的最大行驶范围，可能一条路径上的流量被截获的话需要两个或者更多设施的一个组合；FRLM 模型提出之后，便被大量应用到实际选址应用中。Kuby 和 Lines(2009) 利用 FRLM 求解佛罗里达州不同规模区域下，如何阶段性地建立一个氢气站站网络；Kuby, Lim 和 Wang (2004) 将 FRLM 应用到美国亚利桑那州沿着主干道和高速公路上的燃料补给站的选址.....虽然，FRLM 具有较大的实际应用性，但是模型中的前提假设依然与实际现象不太相符。FRLM 中假设多有的设施点建设在网络中现有的节点上，而且车辆只在路径过程中进行补给燃料，但是，实际生活中，设施点选在路径中间而非节点处可能比只选在节点处更优，或者现实生活中，车辆愿意偏离原有路径而去设施站。为此，Kuby 和 Lim(2007) 提出三种在原有网络中增加候选点的方法，在增加节点离散分布问题中，初始的顶点位置是固定的，通过算法在网络路径弧线上增加节点，文中对三种方法进行比较，证明 ANDP 法得到的解优于中间点区域法；Kim 和 Kuby (2012) 在优化加油站选址中，不仅考虑驾驶里程的限制，同时也考虑偏离最短路径去加油站加油的情形，提出了一个混合整数线性规划模型 (DFRLM)；考虑到现实生活中设施服务容量的限制，Upchurch, Kuby 和 Lim

(2009)重新建立了一个新的带有容量限制的模型(CFRLM),模型中以车辆最大行驶里程为目标函数,在FRLM的基础上建立了一个新的混合整数规划模型;大部分的选址分配模型都是带有0-1变量的整数规划或者混合整数规划模型,解决这个问题可以通过分支定界法进行求解,但是在实际数据中,用分支定界法通常需要花费较长的时间进行计算运行,因此,许多启发式算法被应用到模型求解中,但是,求解结果是局部最优解而不是全局最优解。Capar和Kuby(2013)等基于FRLM,提出数值运算更有效率的规划模型,并对几个现实关键问题提出管理视角;对于FRLM, Lim和Kuby(2010)提出了三种求解FRLM的启发式算法,贪婪算法、贪婪替代算法和遗传算法,并比较了三种启发式算法的优缺点和各自的适用情景。

选址问题分为基于点需求的选址问题和基于路径需求的选址问题,两者间最大的区别就是需求产生的点不同,基于点需求的选址问题,将需求产生点设定在固定的节点上,而基于路径需求的选址问题则是假设需求存在节点之间的路径上,以流量的形式存在。这两种选址模型都有各自的优点,应用领域也较广。

3 高速公路网络上的电动汽车充电站选址定容

3.1 问题描述

高速公路网络上的充电需求可以看作是过路需求，即需求产生在网络路径上，因此，我们可以参考基于路径需求的选址模型进行研究。基于路径需求的选址模型，假设服务需求产生在路径上，而非节点上，最早由 Hodgson(1990)提出，并建立了第一个基于路径流量需求的模型—截流选址模型（FCLM），但是 FCLM 中假设只要在一条路径中存在一个服务设施点，则流量就能被截获，但在电动汽车选址应用中，由于电动汽车具有行驶里程的限制，因此，有的时候路径中只存在一个充电站无法满足充电需求，而 Kuby (2005)提出的 FRLM，则充分考虑了行驶范围的限制因素。而由于电动汽车充电时间的要求，如果充电站内配备的充电桩数量较少，则会造成较大的排队等待时间。因此，本章中的数学模型在 FRLM 的基础上进行延伸，综合考虑行驶里程范围的限制和排队等待时间的限制建立新的选址定容模型。

3.2 FRLM 理论

3.2.1 模型逻辑

在 Kuby 的 FRLM 模型中，每一条路径都存在一个固定的需求，同时设定车辆的最大行驶范围，如果某一条路径上存在一个充电站组合，并且这条路径上的车辆能够在这些充电站内充电，而且在不超过行驶范围的情况下完成整条路径的旅行，那么，就成这条路径上的流量能够被这组充电站截获。文中还假设：如果在路径的起点存在充电站，那么在起点处电动汽车的电量为充满的情况；如果在起点处没有充电站，那么假定电动汽车的电量为一半。这是为了确保电动汽车能够在不耗完电的情况下返回到上一个充电站。同时，电量与行驶距离成线性关系。

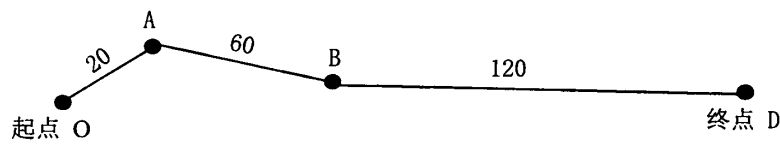


图 3.1 网络路线

Figure 3.1 network path

如图 3.1 中所示, 在 O-D 路径中, 可能存在的充电站组合有 $\{O\}, \{A\}, \{B\}, \{D\}, \{O, A\}, \{O, B\}, \{O, D\}, \{A, B\}, \{A, D\}, \{B, D\}, \{O, A, B\}, \{O, A, D\}, \{O, B, D\}, \{A, B, D\}, \{O, A, B, D\}$ 。

如果电动汽车在充满电的情况下最多能行驶距离小于 120, 那么没有哪个组合能够将这条路径上的流量截获; 如果电动汽车在充满电的情况下最多能行驶距离大于等于 120, 小于 160, 那么组合 $\{O, A, D\}, \{A, B, D\}, \{O, A, B, D\}$ 均能服务路径上的电动汽车; 如果电动汽车在充满电的情况下最多能行驶距离等于 160, 那么组合 $\{B, D\}, \{A, B, D\}, \{O, B, D\}, \{O, A, B, D\}$ 均能服务路径上的电动汽车; 如果电动汽车在充满电的情况下最多能行驶距离等于 220, 那么组合 $\{O, D\}, \{A, D\}, \{B, D\}, \{A, B, D\}, \{O, B, D\}, \{O, A, B, D\}$ 均能服务路径上的电动汽车; 如果电动汽车在充满电的情况下最多能行驶距离等于 280, 那么组合 $\{B\}, \{O, A\}, \{O, B\}, \{O, D\}, \{A, B\}, \{A, D\}, \{B, D\}, \{O, A, B\}, \{O, A, D\}, \{O, B, D\}, \{A, B, D\}, \{O, A, B, D\}$ 均能服务路径上的电动汽车; 如果电动汽车在充满电的情况下最多能行驶距离大于 400, 那么任一地方建立充电站均能服务路径上的电动汽车。

3.2.2 FRLM

FRLM 以充电站截获的流量最大为目标, 建立函数模型:

目标函数:

$$\max Z = \sum_{q \in Q} f_q y_q \quad (3.1)$$

约束条件:

$$\sum_{h \in H} b_{qh} v_h \geq y_q, \quad \forall q \in Q \quad (3.2)$$

$$a_{hk} x_k \geq v_h, \quad \forall h \in H, k \in K \setminus a_{hk} = 1 \quad (3.3)$$

$$\sum_{k \in K} x_k = p \quad (3.4)$$

$$x_k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K, q \in Q \quad (3.5)$$

$$v_h \leq 1, \quad \forall h \in H \quad (3.6)$$

$$y_q \leq 1, \quad \forall q \in Q \quad (3.7)$$

$$v_h, y_q \geq 0, \quad \forall h \in H, q \in Q \quad (3.8)$$

符号和集合定义如下:

q : 网络中的某一条线路;

Q : 网络中所有线路的集合;

h : 充电站组合;

H : 所有的充电站组合集合;

k : 充电站候选点;

K : 所有的充电站候选点集合;

k_h : 组合 h 里所有的充电站点;

相关参数定义如下:

f_q : 路线 q 上的流量;

p : 代建的充电站数量

决策变量:

$$x_k = \begin{cases} 1 & \text{充电站选在 } k \text{ 点处} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$y_q = \begin{cases} 1 & \text{路径 } q \text{ 上的流量被截获} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$a_{hk} = \begin{cases} 1 & k \text{ 在组合 } h \text{ 内} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$b_{qh} = \begin{cases} 1 & \text{组合 } h \text{ 能够让车辆在路径 } q \text{ 上得到充电} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$v_h = \begin{cases} 1 & \text{组合 } h \text{ 内的充电站全部开放} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

其中, 目标函数 (3.1) 表示待建的 p 个充电站所截获的总的流量最大; 约束条件 (3.2) 表示, 如果路径 q 的流量被截获, 那么至少存在一个充电站组合满足路径 q 的充电需求; 约束条件 (3.3) 表示只有当组合 h 里所有的充电站都开放的时候, v_h 才为 1, 否则为 0; 约束条件 (3.4) 表示要建设的充电站数量为 p ; 约束条件 (3.5) 定义决策变量为 0-1 变量; 虽然 v_h 和 y_q 被定义为 0-1 变量, 但是, 仍然可以表示为连续变量, 如 (3.6) 和 (3.8), 这在 Kuby (2005) 的文章有提到。

3.2.3 FRLM 中路径上流量的确定

在确定路径上的流量时, 引入了 Fotheringham 和 O'Kelly 在 1989 年提出的空间引力模型。空间引力模型指的是某条路径上的流量与两个目的地的节点权重成正比, 与之间的距离成反比。这个模型中心思想来自于两个星球之间的引力与各自的质量成正比, 与他们之间的距离成反比。

在实验网络中, 某条特定路径上的流量可表示为:

$$f_q = OD_{ij} = \sqrt{\frac{(w_i \cdot w_j)^3}{d_{ij}}} \quad (3.9)$$

其中:

w_i 指的是路径起点 i 处的权重;

w_j 指的是路径终点 j 处的权重;

d_{ij} 指的是 ij 之间的最短路径距离。

因此, 根据试验网络中的节点权重和给出的距离, 可以求出每条路径上相对应的流量。

3.3 基于 FRLM 的选址定容模型

不同规模大小的电动汽车建设成本不同, 如果, 建设的充电站容量远远大于经过的电动汽车需求, 会造成资源的浪费; 如果建设的充电站太小, 经过的电动汽车需要等待排队的时间较长, 直接影响充电站的服务水平。因此, 合理规划充电站的大小也是充电站建设时需要考虑的一个重要因素。本文结合排队论的相关理论知识, 建立一个在满足一定的服务水平约束条件下, 使得网络中被服务的路径上的流量最大。由于预算费用的限制, 如果选择多个充电站, 那么相应的配备的充电桩数量就会减少, 虽然可能使获得服务的电动汽车数量增加, 但是却增加了充电站内排队等待的时间; 如果选择在一个充电站内配备较多的充电桩, 那么可选择建设的充电站数量就会减少, 这样虽然减少了充电站内排队等待的时间, 但是由于电动汽车行驶里程的限制, 却也可能使得可接受充电需求的电动汽车数量减少。因此, 本文在上一节 3.2 介绍的 FRLM 模型的基础上加入充电等待时间限制建立一个新的模型, 使得电动汽车在可接受的排队等待时间范围内, 网络中可获得充电服务的电动汽车数量最大, 并通过数值实验进行灵敏度分析, 得出各个影响因子对结果的影响。

3.3.1 模型假设

模型的假设条件主要有:

- (1) 网络中每条路径上的电动汽车通过量是一定的;
- (2) 每一对 $O-D$ 之间的路径上的流量 f_q 全部被分配到最短路径上;
- (3) 电动汽车只能被建设在所经过的路径上的服务设施服务;
- (4) 电动汽车到达充电站后按照先到先服务的排队规则进行充电;
- (5) 电动汽车的电量与行驶距离成线性关系;
- (6) 假设, 如果路径起点有充电站的话, 电动汽车的电量是饱和的状态; 如果路径起点没有充电站, 假设电动汽车的电量是饱和状态下的一半, 从而保证剩余的电量能够支撑返还到上一个充电站;
- (7) 不同充电站的充电桩服务时间服从同样的分布;

(8) 假设不考虑不同节点处的地价的差异。

3.3.2 数学模型

在上述假设条件下, 以被服务的电动汽车数量最大为目标函数建立函数模型。

目标函数:

$$\text{Max } Z = \sum_{q \in Q} f_q y_q \quad (3.10)$$

约束条件:

$$\sum_{h \in H} b_{qh} v_h \geq y_q, \quad \forall q \in Q \quad (3.11)$$

$$a_{hk} x_k \geq v_h, \quad \forall h \in H, k \in K, a_{hk} = 1 \quad (3.12)$$

$$m_k \leq U x_k, \quad \forall k \in K, U \sim \infty \quad (3.13)$$

$$W_k \leq T, \quad \forall k \in K \quad (3.14)$$

$$\sum_{k \in K} (c_1 + c_2 \cdot m_k) \leq B \quad (3.15)$$

$$x_k, v_h, y_q \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K, h \in H, q \in Q \quad (3.16)$$

$$m_k \in \{\text{nonnegative integer}\}, \quad \forall k \in K \quad (3.17)$$

符号和集合定义为:

q : 网络中的某一条线路;

Q : 网络中所有线路的集合;

h : 充电站组合;

H : 所有的充电站组合集合;

k : 充电站候选点;

K : 所有的充电站候选点集合;

k_h : 组合 h 里所有的充电站点;

相关参数定义为:

f_q : 路线 q 上的流量;

p : 代建的充电桩个数;

T : 最大能容忍的平均等待时长;

c_1 : 充电站建设的基本费用;

c_2 : 单个充电桩的成本及安装费用;

B : 充电站建设总的预算费用;

μ : 充电桩服务速率, 即单个充电桩平均每小时服务的电动汽车数量;

w_k : 电动汽车排队等待的平均时间。可根据排队理论中 (2.7) 的结果计算得出:

λ_k : 候选点 k 处电动汽车的到达率, 即平均每小时到达的电动汽车数量。

其中 λ_k 与被 k 点服务的流量有关, 假设:

$$\lambda_k = g \sum_{q \in Q} f_{qk} y_{qk} \quad (3.9)$$

其中 g 代表峰值单位时间段内经过的流量占总流量的百分比系数, 根据实际数据调查可得到, y_{qk} 是一个 0-1 变量, $y_{qk} = 1$ 表示路径 q 上的电动汽车被 k 点服务, 否则, 则为 0。且各个窗口的服务时间服从负指数分布, 平均的服务率为 μ 。

决策变量:

m_k : 在候选点 K 处安装的充电桩个数;

$$a_{hk} = \begin{cases} 1 & k \text{ 在组合 } h \text{ 内} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$b_{qh} = \begin{cases} 1 & \text{组合 } h \text{ 能够让车辆在路径 } q \text{ 上得到充电} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$x_k = \begin{cases} 1 & \text{在 } k \text{ 点建立充电站} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

目标函数(3.10)与 FRLM 一样表示被服务的电动汽车量最大; 约束条件(3.11)表示, 如果路径 q 的电动汽车被服务, 那么至少存在一个充电站组合满足路径 q 的充电需求; 约束条件(3.12)表示只有当组合 h 里所有的充电站都开放的时候, v_h 才为 1, 否则为 0; 约束条件(3.13)表示只有在 k 点建设充电站, 才能安装充电桩; 约束条件(3.14)表示电动汽车排队等待的平均时间应低于最大能容忍的平均等待时长; 约束条件(3.15)表示充电站网络规划的总的费用不超过预算费用; 约束条件(3.16)定义变量为 0-1 变量; 约束条件(3.17)定义 m_k 为非负整数。

3.3.3 模型求解

上文提出的选址定容问题是一个 NP 问题, 因此, 需要借助启发式算法进行求解。求解该模型时, 可以将模型分解为三个子模型。第一个子模型, 需要提出方法确定能够服务路径上的所有充电站组合; 第二个子模型需要确定充电站选址点; 第三个子模型则需要确定各个充电站内充电桩的个数。我们可以借助遗传算法来确定电动汽车充电站地点, 利用贪婪算法确定各个充电站应该配置的充电桩个数。因此, 在求解该模型时特别需要注意的则是充电站组合的确定。由于遗传算法与贪婪算法在本文中的计算过程与其他问题相似, 因此, 本文主要介绍确定充电站组合的算法。

在实际网络中有许多对 OD 路径, 并且每条路径都有几种可能出现的情况, 因此, 需要有一个单独的算法来确定每条路径上对应的充电站组合。为此, Kuby

和 Lim 提出了一个算法来确定满足充电需求的充电站组合。主要步骤如下：

第一步：初始化

- (1) 生成网络中所有的 OD 对的最短路径 q 。存储路径上的节点和线路。
- (2) 建立一个空的充电站组合总清单。

第二步：从列表里某一条路径开始，生成该路径上所有节点可能组成的充电站组合。如图 1 路径中可能的充电站组合有 $\{O\}$, $\{A\}$, $\{B\}$, $\{D\}$, $\{O,A\}$, $\{O,B\}$, $\{O,D\}$, $\{A,B\}$, $\{A,D\}$, $\{B,D\}$, $\{O,A,B\}$, $\{O,A,D\}$, $\{O,B,D\}$, $\{A,B,D\}$, $\{O,A,B,D\}$ 。

第三步：移除那些不能在给定的行驶里程范围内服务电动汽车的充电站组合。

(1) 从路径 q 的起点出发。如果在起点处有充电站，假设电动汽车在该点充满电，则电动汽车剩余的电量可行驶距离等于电动汽车的行驶里程范围。如果起点没有充电站，假设电动汽车剩余的电量可行驶距离为电动汽车行驶里程范围的一半。这是因为考虑车辆往返的原因，要使得电动汽车还能够回到上一个充电站，在该点处必须至少有一半的电量。

(2) 移动到往返路径中的下一个节点，上一个节点处剩余的电量减去行驶过程中耗去的电量，然后检查下面的四种情况。

① 如果剩余电量小于 0，电动汽车则在到达节点之前将电量消耗完，因此，将这组终点站组合从充电站组合列表中移除。

② 如果节点是终点，那么：

➤ 如果终点处有一个充电站，那么这个充电站组合能够满足充电需求，将该充电站组合加入到路径 q 的充电站组合列表中，并且返还到第三步继续检查下一个充电站组合。

➤ 如果没有话，则重新返回到第三步中的第二个步骤，继续向往返路径中的下一个节点移动，即从终点返回到倒数第二个节点。

③ 如果节点是起点，也就意味着电动汽车在没有消耗掉电量的情况下，实现了往返活动。因此，将该充电站组合加入到路径 q 的充电站组合列表中，并且返还到第三步继续检查下一个充电站组合。

④ 如果节点处有充电站，将电动汽车电量余量设置成电动汽车的可行驶里程范围，然后，返回到第三步中的第二个步骤。

⑤ 其他的话，则返回第三步中的第二个步骤。

(3) 当路径 q 上所有的充电站组合都被评估完之后，进入到第四步。

第四步：移除所有充电站组合中的超组合，也就是说，如果超组合有一个子集，那么就移除超组合。例如，如果，网络中组合 $\{A,B,D\}$ 可以满足电动汽车充电需求，而 $\{A,B\}$ 也能满足的话，那么就没有必要考虑更大的组合。这是因为更大的充电站组合会因为服务能力过剩而加大成本，因此，需要尽量减少充电站组合里

充电站的建设数量。

(1) 将路径 q 对应的充电站组合按照节点数量降序排列，这样的话，节点较多的充电站组合将排在节点较少的充电站组合上面。

(2) 从第一个组合开始，如果它是它之后任一充电站组合的超组合，则将该充电站组合从路径 q 的充电站组合列表中移除。

(3) 再比较下一个充电站组合，重复该流程直到到达列表中的最后一个充电站组合。

第五步：记录每一个路径 q 上的有效充电站组合 h 里的设施点 k 。如果该组合能满足路径 q 上的充电需求，则 b_{qh} 等于 1，否则为 0；另外，如果 k 在充电站组合 h 里，则 a_{hk} 等于 1，否则为 0。

(1) 如果充电站组合不在总清单中，则将该充电站组合加到清单中，并且将在组合 h 里的所有 k 设置为 a_{hk} 等于 1，并且 b_{qh} 等于 1。

(2) 如果充电站组合已经存在总清单中，则 b_{qh} 等于 1。

第六步：对于所有的网络中的路径 q ，重复第二步到第五步的操作。

3.4 灵敏度分析

本文以 Kuby(2005)用过的先前由 Berman 和 Simchi-Levi 提出的，后经 Hodgson 改进的 25 个节点的样本网络为测试网络，样本网络中规定了网络中各条路径的长度和节点权重，参照 Kuby 的研究，根据空间引力模型确定了每条路径上的顾客流量 f_q 。然后根据 (3.9)，得到充电高峰期时每个候选站址上电动汽车到达的泊松分布参数，通过给定行驶范围，充电桩平均服务时间以及最大平均等待时间，求出充电桩的选址及相应的数量配置。

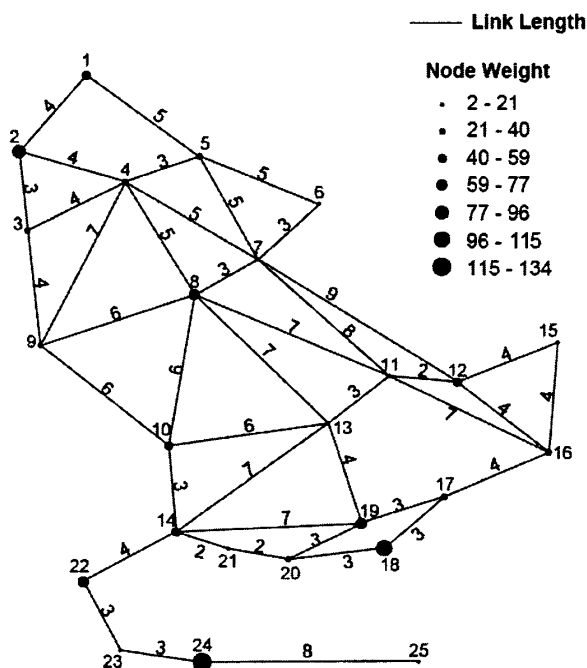


图 3.2 测试网络

Figure 3.2 test network

根据 Kuby 给出的计算每条路径上的充电站组合的方法, 利用 C 语言程序生成可能的充电站组合集, 求解问题的规模根据行驶范围限制的变不同而不同。行驶范围越长, 生成的可能的组合更多。

为了更好地反映不同因素对实验结果的影响, 我们进行了两组实验。两组实验中的顾客能接受的最大平均等待时间, 充电站的基本建设费用和充电桩单位成本保持不变。第一组实验中, 我们给定充电桩的服务速率, 计算电动汽车不同行驶范围内, 预算费用与试验网络中流量覆盖百分比的关系图; 第二组试验中, 我们假设电动汽车行驶范围固定, 分别计算不同充电桩服务水平变动下, 网络中覆盖的流量百分比的情况。

3.4.1 行驶范围对实验结果的影响

为了测试行驶范围对实验结果的影响, 我们假设充电桩的服务速率为 30, 然后分别测出行驶范围为 4, 8 和 12 时, 网络中流量覆盖水平随着预算费用变动而进行改变的情形, 具体实验结果如下图所示:

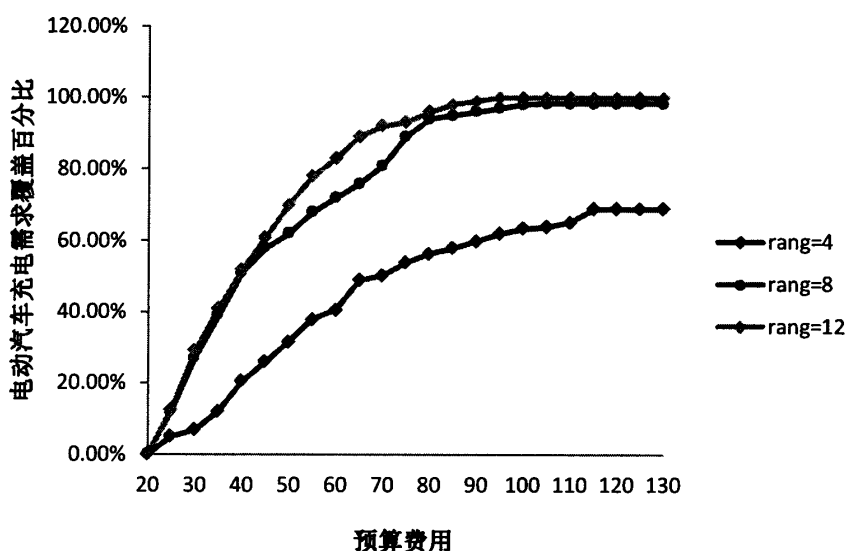


图 3.3 不同行驶范围下，电动汽车充电需求覆盖水平与预算费用的函数关系图

Figure 3.3 Tradeoff graph between budget fee and percentage of electric recharging, for different vehicle range

根据图 3.3,我们可以得出以下结论:

(1) 随着预算费用的增加，网络中电动汽车充电需求覆盖率先增加，然后保持不变。随着预算费用的增加，可建的充电站和充电桩数量增加，因此，可服务的电动汽车数量也相应增加。但是，由于受到电动汽车行驶里程的限制，当行驶里程较短时，无论预算费用增加到多大，电动汽车充电需求的覆盖水平也无法到达 100%。比如，当行驶里程等于 4 时，最大的电动汽车充电需求的覆盖水平为 68.94%；当行驶里程为 8 时，也仍然有 1.67% 的充电需求无法覆盖到，这主要是因为实验网络中，节点 7 和节点 12 之间的距离为 9，超过了 8，因此，所有包含这条弧线的路径上的电动汽车都无法被服务；而当行驶里程为 12 时，随着预算费用的增加，最终可实现 100% 的充电需求覆盖水平。

(2) 在相同的预算费用下，行驶范围里程越大，电动汽车充电需求的覆盖水平越高。也就是说，可行行驶里程越长，达到相同充电需求覆盖水平下所需要的预算费用越少。如要想充电需求覆盖水平达到 65% 以上，当行驶范围为 4 时，需要的预算费用为 110；当行驶范围为 8 时，需要的预算费用为 60；当行使范围为 12 时，则只需要 50。

3.4.2 充电桩服务速率对实验结果的影响

为了方便计算，更迅速地得出实验结果，我们假设电动汽车在充满电的情况下可行驶的距离为 4，分别取充电桩服务速率为 30,6 和 2，然后，计算这三种情况下流量覆盖百分比水平与预算费用的关系，结果如下图所示：

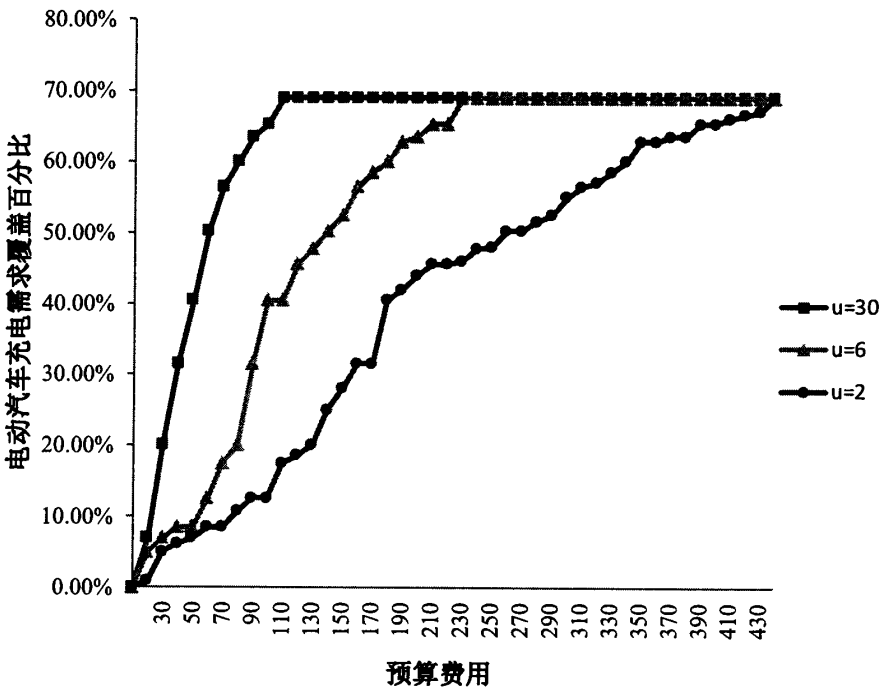


图 3.4 不同充电速率下，电动汽车充电需求覆盖水平与预算费用的函数关系图

Figure 3.4 Tradeoff graph between budget fee and percentage of electric recharging, for different service rate

根据实验结果，图 3.4，我们可以得出以下结论：

- (1) 在相同行驶范围限制条件下，充电桩的不同服务速率随着预算费用的增加，最终都将趋于一个固定值。网络中流量的覆盖率先随着预算费用的增加而增加，之后保持不变；根据图 3.4 中可以看出，无论充电桩的服务时间多长，随着预算费用的增加，最终的流量覆盖率都会趋于一个固定的值，值的大小等于 68.94%，此时，所有的充电站内都配备足够多的充电桩，但由于电动汽车行驶范围限制的因素，当充电站建在节点上时，网络中某些路径的电动汽车充电需求无法被满足。
- (2) 随着充电桩服务速率的增加，达到同样流量覆盖水平所需要的预算费用更多。当服务速率足够大时，这时可以忽略充电服务时间，使得一个充电站内配备一个充电桩而不会出现排队现象，此时的结果与 FRLM 的结果一样，只需要选址决策就行。

3.5 本章小结

本章研究了高速公路网路上的电动汽车充电设施选址定容问题，提出了一个基于路径需求的电动汽车选址定容模型，路径需求指的是网络中电动汽车的充电需求产生于路径中，通过空间引力模型可以计算出各条路径上的服务需求量。本章在 FRLM 的基础上，加入电动汽车充电等待时间的限制，结合排队论相关理论知识，建立了一个电动汽车充电设施选址定容模型。并通过案例分析，得到各个影响因素对实验结果的影响。根据实验结果，可以得到，电动汽车充电需求覆盖率与电动汽车行驶里程范围，预算费用和充电桩服务速率正相关。

4 城区内的电动汽车充电站选址定容

城区内的电动汽车充电需求大部分产生在居住小区、购物中心和写字楼等节点上,因此,我们可以借鉴基于点需求的选址问题进行研究。基于点需求的电动汽车设施选址定容模型主要指的是充电需求产生在网络节点上时,且各个需求点之间是相互独立且随机产生的,如何选择充电站的地址及相应的配置数量,能够在最大的响应时间内,使得接受充电服务的电动汽车数量最大。

4.1 问题描述

为了更好地推广电动汽车的使用,政府及相关企业需要建设完善的充电设施网络,保证电动汽车在行驶过程中能够及时充电,车主不用担心在行驶过程中电动汽车电量耗完却无法充电的情形。同时,当电动汽车发出充电需求到到达充电站接受充电并离开的响应时间不应太长。本节引入响应时间的概念,响应时间包括从需求点到充电站之间的旅行时间和到达充电站后,在站内的逗留时间(逗留时间包括排队等待时间和充电服务时间),电动汽车应在承诺的响应时间范围内完成充电服务。

本章节建立了非线性整数规划模型,并对该模型给出了相应的启发式算法。本章提出的模型,目标在于确定充电站的地址及站内配备的相应的充电桩数量,从而使得接受充电服务的电动汽车数量的期望值最大。因此,该模型的决策变量有两个,一个是选择决策,一个是定容决策。由于预算费用的限制,如果选择多个充电站,那么相应的配备的充电桩数量就会减少,虽然减少了从需求点到充电站之间的旅行时间,但是却增加了充电站内排队等待的时间;如果选择在一个充电站内配备较多的充电桩,那么可选择建设的充电站数量就会减少,这样虽然减少了充电站内排队等待的时间,但是也相应增加了从需求点到充电站之间的旅行时间。Benedict, Daskin, ReVelle 和 Hogan 研究的拥挤情况下的服务系统最大覆盖问题中,建立了一个使得服务站可以覆盖的期望需求量最大的模型,他们的研究为本文的研究提供了理论基础。本文通过建立相应的模型确保选址和定容两个决策变量最优。

4.2 城区内电动汽车充电站选址定容模型

4.2.1 模型假设

为了简化模型，便于求解，本章所建立的模型基于以下几个假设条件：

- (1) 充电站内的排队系统服从 $M/M/n$ 的多服务窗排队模型。各充电站单位时间内的电动汽车充电需求服从泊松分布，充电服务服从“先到先充”的原则，充电桩的服务时间服从负指数分布；
- (2) 不同充电站点内单个充电桩的建设和安装成本一致；
- (3) 所有充电桩的服务速率相等；
- (4) 电动汽车选择最近的充电站进行充电，且需求点到充电站之间的距离小于电动汽车在充满电情况下可行驶距离的 20%，即不考虑电动汽车的可行驶里程限制。

4.2.2 数学模型

(1) 参数定义

本模型中需要用到的有关参数符号定义如下：

I : 需求点的集合, $I = \{i|1, \dots, n\}$;

K : 设施候选点的集合, $k = \{k|1, \dots, j\}$;

d_i : 需求点 i 处的需求量, 服从参数为 λ_i 的泊松分布;

s_{ik} : 需求点 i 到充电站 k 的旅行时间;

t_{ik} : 需求点 i 到充电站 k 完成充电的响应时间;

T : 最大能容忍的响应时长;

w_k : 在充电站 k 处的平均逗留时间;

c_k : 候选点 k 处建设充电站的基本建设费用;

c_2 : 单个充电桩的成本及安装费用;

B : 充电站建设总的预算费用;

μ : 充电桩平均服务速率, 即单个充电桩平均每小时服务的电动汽车数量;

λ_i : 电动汽车到达需求点 i 处的到达率, 即平均每小时到达的电动汽车数量;

λ_k : 充电站 k 处电动汽车的到达率, 即平均每小时到达的电动汽车数量;

决策变量:

m_k : 设施点 k 上安装的充电装置数量;

$$x_k = \begin{cases} 1 & \text{在 } k \text{ 点建立充电站} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{候选点 } k \text{ 为 } i \text{ 点的充电需求提供充电服务} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

(2) 数学模型

根据前面的定义，基于点需求的电动汽车充电设施选址定容模型可表示为：

目标函数：

$$\max Z = E(\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (d_i \cdot x_{ik} P(t_{ik} \leq T))) \quad (4.1)$$

约束条件：

$$x_{ik} \leq x_k, \quad \forall k \in K, i \in I \quad (4.2)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ik} = 1, \quad \forall i \in I \quad (4.3)$$

$$m_k \leq Ux_k, \quad \forall k \in K, U \sim \infty \quad (4.4)$$

$$\sum_{j \in K | d_{ij} \leq d_{ik}} x_{ij} \geq x_k, \quad \forall k \in K, i \in I \quad (4.5)$$

$$\sum_{k \in K} (c_k + c_2 m_k) \leq B, \quad \forall i \in I \quad (4.6)$$

$$t_{ik} = s_{ik} + w_k, \quad \forall k \in K, i \in I \quad (4.7)$$

$$\lambda_k = \sum_{i \in I} \lambda_i x_{ik}, \quad \forall k \in K \quad (4.8)$$

$$\lambda_k \prec \mu m_k, \quad \forall k \in K \quad (4.9)$$

$$x_k, x_{ik} \in \{0, 1\} \quad (4.10)$$

$$m_k \in \{\text{nonnegative integer}\} \quad (4.11)$$

目标函数（4.1）在响应时间不超过给定的时间范围内的系统所处理的充电需求量的期望最大；约束条件（4.2）防止充电需求被分配到没有建设充电站的候选点上；约束条件（4.3）确保所有需求点上的充电需求都能被且只能被一个充电站满足；约束条件（4.4）规定只有在候选点 k 处建立充电站之后才能安装充电桩；约束条件（4.5）确保各个需求点产生的充电需求在最近的充电站接受充电服务；约束条件（4.6）表示充电站网络设施建设的总费用不超过预算费用；约束条件（4.7）表示响应时间包括从需求点到充电站的旅行时间和到达充电站后逗留的时间；约束条件（4.8）表示充电站内到达的电动汽车充电需求率与各个需求点上的需求率之间的关系表达式；约束条件（4.9）确保了系统的稳定性，避免排成无限长队的情形；约束条件（4.10）定义两个决策变量为 0-1 变量；约束条件（4.11）定义候选点 k 处建设充电桩的个数为非负整数。

4.2.3 模型求解

(1) 相关理论与证明

根据排队论相关知识，结合胡丹丹等(2011)令($T_{ik} = T - s_{ik}$)，则目标函数(4.1)

可转变为:

$$\begin{aligned}\max Z &= E(\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (d_i x_{ik} P(t_{ik} \leq T))) = E(\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (d_i x_{ik} P(w_k + s_{ik} \leq T))) \\ &= E(\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (d_i x_{ik} P(w_k \leq T_{ik}))) = E(\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (d_i x_{ik} F(T_{ik})))\end{aligned}$$

其中, $F(t_{ik})$ 表示电动汽车在充电站中逗留的时间不超过 T_{ik} 的概率分布函数。根据第三章介绍的电动汽车充电站排队论模型, 我们可以得到:

充电站内没有电动汽车的概率 P_0 为:

$$P_0 = (\sum_{n=0}^{m-1} \frac{\rho_1^n}{n!} + \frac{\rho_1^m}{m!} \cdot \frac{1}{1-\rho_0})^{-1};$$

充电站内有 m 辆电动汽车的概率 P_m 为:

$$P_m = \frac{\rho_1^m}{m!} \cdot P_0$$

其中, $\rho_1 = \lambda/\mu$, $\rho_0 = \rho_1/m$ 其中, λ 表示电动汽车充电需求的平均产生率, m 表示充电桩数量, μ 表示单个充电桩单位时间内服务的电动汽车平均数量。

而电动汽车在充电桩为 m 的充电站系统中逗留时间不超过 t 的概率分布函数 $F(t, m)$ 为 (郭占宽等, 2008):

当 $m=1$ 时, $F(t, 1) = 1 - e^{-(\mu-\lambda)t}$;

当 $m>1$ 时,

$$F(t, m) = \begin{cases} 1 - (1 + \frac{P_m \cdot \mu t}{1 - \rho_0}) e^{-\mu t}, & \rho_1 = m-1 \\ 1 - (1 + \frac{P_m}{(m-1-\rho_1)(1-\rho_0)}) e^{-\mu t} + \frac{P_m}{(m-1-\rho_1)(1-\rho_0)} e^{-m\mu(1-\rho_0)t}, & \rho_1 \neq m-1 \end{cases}$$

在充电桩数量为 m 的充电站中, 排队等待的时间 t 的分布函数为 $W_q(t, m)$:

$$W_q(t, m) = 1 - \frac{P_m}{1 - \rho_0} e^{-\mu(m-\rho_1)t};$$

在含有 m 个充电桩的充电站内, 充电需求无法立刻得到满足的延迟概率 $DT(m)$ 为:

$$DT(m) = 1 - W_q(0, m) = P_m / (1 - \rho_0);$$

引理 1. 令 $g(m) = DT(m)e^{-\mu(m-\rho_1)t}$, 对 $g(m)$ 进行求导, 可得 $g(m)$ 是关于 m 的凸函数。

证明:

$$\begin{aligned}g'(m) &= DT'(m)e^{-\mu(m-\rho_1)t} - \mu DT(m)e^{-\mu(m-\rho_1)t}, \\ g''(m) &= DT''(m)e^{-\mu(m-\rho_1)t} + \mu^2 DT(m)e^{-\mu(m-\rho_1)t} - 2DT'(m)e^{-\mu(m-\rho_1)t},\end{aligned}$$

因为 $DT(m)$ 是关于 m 的非递增凸函数 (Jagers and VanDoorn, 1991), 即 $DT'(m) \leq 0$; $DT''(m) \geq 0$, 所以, $g''(m) \geq 0$ 。

定理 1. $F(t, m)$ 是关于 m 的凹函数。

证明：由引理 1 可知， $g(m)$ 是凸函数，则电动汽车排队等待时间分布函数 $W_q(t, m) = 1 - g(m)$ 是关于参数 m 的凹函数，即 $W_q(t, m) \leq 0$ 。因为系统的逗留时间 $w = q + v$ ，其中 q 代表电动汽车排队等待时间， v 表示接受充电桩服务的充电时间，因此，

$$F(t, m) = \int_0^t W_q(t - tv, m) d(1 - e^{-\mu tv}) = \int_0^t W_q(t - tv, m) \mu e^{-\mu tv} dtv$$

$$\frac{\partial^2 F(t, m)}{\partial m^2} = \int_0^t \frac{\partial^2 W_q(t - tv, m)}{\partial m^2} \mu e^{-\mu tv} dtv, \text{ 由于 } \frac{\partial^2 W_q(t - tv, m)}{\partial m^2} \leq 0, \text{ 所以, } \frac{\partial^2 F(t, m)}{\partial m^2} \leq 0,$$

因此， $F(t, m)$ 是关于 m 的凹函数。

根据定理 1， $F(t, m)$ 是关于 m 的凹函数，则可以得到：

- 1) $F(t, m)$ 是关于 m 的非递减函数；
- 2) $F(t, m)$ 是关于 m 的凹函数，即 $F(t, m+1) - F(t, m)$ 是关于 m 的非增函数。

由 1) 和 2) 两点特点，我们可以确定在给定所有电动汽车选址点的条件下，可以通过贪婪算法求得最优充电桩的分配结果（Aboolian et al., 2009; Berman and Drezner, 2007; 胡丹丹, 2011）

（2）算法

本章中提出的选址定容问题是个 NP 难题，需要利用启发式算法进行求解。求解主要包括两个部分：通过 $F(t, m)$ 的函数性质对充电桩进行分配和利用启发式算法寻找最优选址点。就本章中所提出的模型，利用贪婪算法对充电桩进行分配，通过遗传算法确定充电站地址。具体算法如下：

1) 遗传算法（Genetic Algorithm）

遗传算法（Genetic Algorithm）是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型，是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。通过交叉、变异、选择来识别优秀的染色体，确定充电站地址，染色体的适应值为目标值，通过贪婪算法分配充电桩数量求得，具体的操作与一般问题求解一样，本章利用遗传算法求解的主要技术如下：

① 编码

采用 0-1 编码，其中 1 表示在相应的位置建设充电站，0 表示相应的位置不建设充电站，编码位数为 $|K|$ ， $|K|$ 表示候选充电站的数量。随机产生 n 条染色体，产生初始种群。

② 交叉、选择、变异

按 P_c 交叉概率对 n 条染色体进行交叉，形成子代染色体。父代、子代染色体合并则形成 $2n$ 条染色体，删掉重复的染色体后形成新的种群，选择目标值最大的前 n 条染色体，并且将这 n 条染色体和到目前为止取得的最优值放入到另一个集合中。当种群的数量小于 n 时，则再随机产生数量差添加到中群众，使得种群的数量为 n 。随机选择一条染色体，按照一定的变异率选择变异点进行变异，重复上

面的步骤形成新的父代。

③ 染色体可行性操作

生成的初始个体、交叉或者变异得到的个体都有可能产生不可行解，即不能满足 (4.6) 预算费用的限制。因此，为了保持种群的多样性、防止陷入局部最优解，需要随机对编码为 1 的基因改为 0，直到满足预算约束条件。

2) 贪婪算法

贪婪算法是指，在对问题求解时，总是做出在当前看来是最好的选择。本章利用贪婪算法来求解充电桩的分配问题。一致充电站系统逗留时间分布函数 1) 和 2)，可以通过贪婪算法求最优的充电桩的分配数量 (Berman and Drezner, 2007)。已知所选的充电站地址为 S ， S 包含于 K 。则具体操作步骤如下：

第一步：计算每个充电站 k 的平均充电需求率 λ_k ($k \in K$)；

第二步：对所选择的充电站点分配充电桩数量， $n_k = \lfloor \lambda_k / \mu \rfloor$ ；

第三步：如果 $\sum_{k \in S} (c_k + c_2 * n_k) > B$ ，无可行解，结束；如果 $B - b < \sum_{k \in S} (c_k + c_2 * n_k) \leq B$ ，那么 n_k 则为充电桩分配数量结果；否则，则进行第四步；

第四步：如果 $\sum_{k \in S} (c_k + c_2 * n_k) \leq B - b$ ，对剩余的充电桩进行分配，给每一个充电站内增加一个充电桩，设 $A(k)$ 表示分配给充电站 k 上的充电桩的需求点的集合，计算每个充电站增加一个充电桩时目标值的增量， $\Delta k = \sum_{i \in A(k)} \lambda_i (F(t_i, n_k + 1) - F(t_i, n_k))$ 。将充电桩分配给 Δk 值最大的充电站，并且令， $n_k = n_k + 1$ ，重复第四步，直到所有的充电桩分配完成。

4.3 灵敏度分析

该问题利用 Matlab 进行仿真实验，在 $5*5$ 的平面上随机产生 25 个点，假设所有的需求点均为充电站候选点，即有 25 个候选点，假设各个需求点的平均充电需求随机产生于 $[10, 20]$ 区间，各点的选址费用在 $[10, 30]$ 区间随机产生，单个充电桩的成本及安装费用为 5，最大能容忍的响应时间为 0.5。然后，分别计算不同的预算费用、充电桩平均服务速率对目标值的影响。

设计遗传算法时，将相应的参数设置为：种群大小为 25，交叉率为 0.8，变异率为 0.02，演化代数数为 100。

4.3.1 预算费用对结果的影响

测试预算费用对目标函数值的影响时，我们将设定单个充电桩的服务速率为 8，则通过给定不同的预算费用值，我们得到不同的目标函数值，具体实验结果如图

4.1 所示。

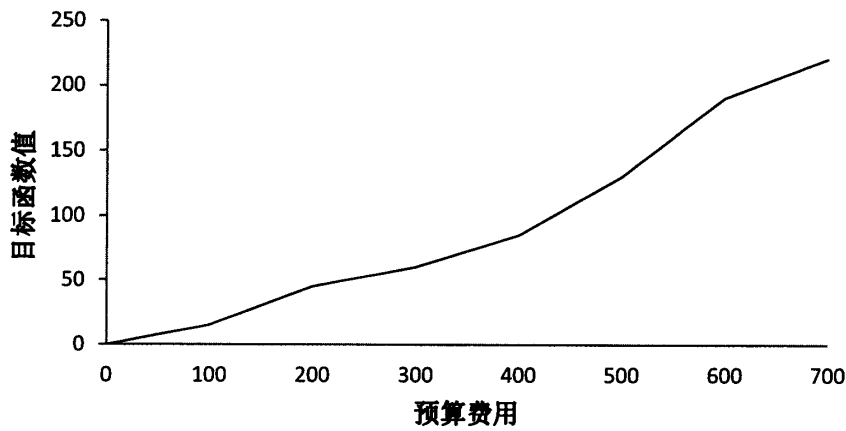


图 4.1 预算费用与目标函数值之间的关系图

Figure 4.1 Tradeoff graph between budget fee and objective function value

根据图 4.1 的实验结果，我们可以得知，随着预算费用的增加，可建设的充电站和充电桩数量增加，目标函数值增加，也就是说在承诺的最大响应时间内完成充电服务的平均需求率越多。与上一章高速公路网络上的电动汽车充电站选址定容问题中的算例分析不同的是，上一章数值实验时，各条路径上的充电需求已确定，因此，目标函数值存在一个最大值，而本章的数值实验中，需求总量不确定，因此，目标函数值没有上限值，但是当预算费用越来越大时，电动汽车充电需求的增长会越来越小。

4.3.2 充电桩服务速率对结果的影响

测试充电桩平均服务速率对目标函数值的影响时，我们给定预算费用为 600，则通过给定不同的平均服务速率，我们得到不同的目标函数值，具体实验结果如图 4.2 所示。

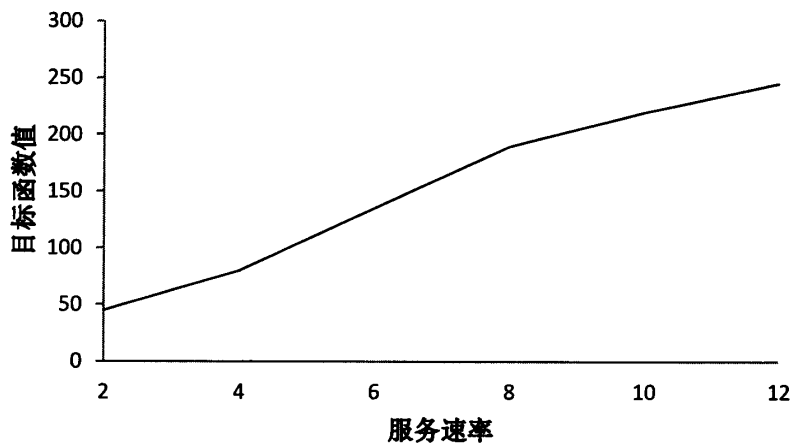


图 4.2 服务速率与目标函数值之间的关系图

Figure 4.2 Tradeoff graph between service rate and objective function value

根据实验结果图 4.2 可知，随着服务速率的增加，充电桩单位时间内平均处理的充电需求增加，充电站内需要配置的充电桩数量减少，可建设的充电站数量增加，因此，可以服务更多的电动汽车，从而在最大响应时间内服务的电动汽车充电需求量增加。当充电桩服务速率特别小时，即充电桩服务时间特别长，且大于最大能容忍的响应时长时，此时，电动汽车无法在响应时间内完成充电，因此，目标函数值为零；当充电桩服务速率足够大，大到可以忽略电动汽车充电时间时，充电站内不存在排队现象，响应时间等于电动汽车到充电站之间的旅行时间，此时，电动汽车充电站选址定容问题则变为了普通的选址覆盖问题。

4.4 本章小结

本章研究了城区内的电动汽车充电站选址定容问题，即充电需求产生于网络中节点上的选址问题，通过结合现实中电动汽车充电情况，给定电动汽车车主能接受的充电服务响应时间，以覆盖模型为基础，建立一个带有响应时间承诺的电动汽车充电站选址定容模型。并通过启发式算法进行求解，同时分析了预算费用与充电桩平均服务速率对最优目标函数值的影响。结果表明，随着预算费用的增加，可用于建设的充电站和充电桩数量增加，缩短了充电需求点到充电站内的旅行时间或者平均排队时间，因此，在承诺的响应时间范围内，可服务的充电需求期望值越高；随着充电桩平均服务速率的增加，单个充电桩可服务的电动汽车充电需求增多，相同需求情况下，充电站内需配备的充电桩数量减少，相同的预算费用情况下，可服务的充电需求期望值也相应增加。

5 结论

5.1 总结

在节能减排的号召下,电动汽车成为传统燃油汽车的替代物,加快推广电动汽车的使用十分重要。为了消除电动汽车在行驶过程中电量耗尽而没有充电设施的顾虑,建设配套合理的充电站网络迫在眉睫。与传统燃油汽车相比,电动汽车充电的时间比较长,不可忽略,较少的站内配套设施数量将会造成较长的排队队伍。由于预算费用的限制,如果选择多个充电站,那么相应的配备的充电桩数量就会减少,因此,虽然充电站提供的服务覆盖水平增加,但是却也相应增加了充电站内排队等待的时间;如果选择在一个充电站内配备较多的充电桩,那么可选择建设的充电站数量就会减少,这样虽然减少了充电站内排队等待的时间,但是也相应减少了充电站的服务范围。因此,在规划充电设施网络时,除了要考虑服务数量之外,还应考虑服务水平。本文以电动汽车发展现状为背景,主要研究了带有时间效率的电动汽车充电站选址定容问题。

本文结合排队论相关知识和现有选址理论知识,分析不同场景下电动汽车充电站的选址定容问题,建立不同需求模式下的电动汽车充电站选址定容问题。本文的研究中,假设电动汽车充电需要的产生服从泊松分布,充电时间服从负指数分布,即电动汽车充电站排队系统为 $M/M/n$ 模式。基于充电站的排队模型,通过分析、建模和数值实验等步骤,研究了不同条件下的充电站选址定容问题。本文主要研究了基于路径需求和基于点需求的电动汽车充电站选址定容问题。

(1) 高速公路网络上的电动汽车充电站选址定容问题

高速公路网络上的电动汽车充电站选址定容问题,是一种基于路径需求的选址定容问题,以网络中的起点到终点路径中的电动汽车流为需求对象,研究了如何决策充电站地点和站内配备的充电桩数量,使得在最大容忍排队等待时间范围内,网络中服务电动汽车充电需求最大的问题。

首先,介绍了不考虑时间效率的能量再补充截流选址模型—FRLM。该模型是由 Kuby 等人于 2005 年提出的,主要是用于解决燃料可选择性的车辆进行能量再补充问题,该模型在基础的截流选址模型基础上,考虑了车辆行驶里程限制的约束,对电动汽车充电站选择有较大的适用性。本文在 FRLM 的基础上,给出最大容忍电动汽车充电排队等待时间,以此为约束条件,同样以服务的电动汽车数量为目标函数,建立了一个新的电动汽车充电站选址定容模型。利用启发式算法求解,并通过数值实验得到各个影响因子对实验结果的影响。

通过数值实验,可以看出:1) 网络中被服务的电动汽车服务覆盖率先随着预

算费用的增加而增加,随后保持不变,而且最大的服务覆盖率与电动汽车行驶范围直接相关,其结果与单纯的选址模型结果相等。2)在相同的预算费用条件下,充电桩服务速率越大,电动汽车的服务覆盖水平越高,即充电时间越快,站内需配备的充电桩数量将会减少,可建设的充电站数量增加,因此,服务覆盖率达到提升。

(2) 城区内的电动汽车充电站选址定容问题

城区内的电动汽车充电站选址定容问题,电动汽车充电需求产生于网络中的节点上,假设产生充电需求的电动汽车选择最近的充电站进行充电服务,在此基础上,研究如何选址充电站地址和配备的充电桩数量,使得在响应时间内充电站所服务的电动汽车数量最大问题。

本文利用排队论知识,引入期望值模型,建立一个以最大容忍响应时间之内充电站网络所处理的电动汽车充电需求数量的期望值最大化为目标函数的选址定容模型。利用遗传算法和贪婪算法进行求解,得到不同影响因素对实验结果的影响。

根据数值实验,我们可以得出以下结论:1)随着预算费用的增加,充电设施服务质量提高,可用于建设的充电站或充电桩数量增加,接受充电需求的电动汽车数量也相应增加;2)预算费用固定的情况下,充电桩的服务速率越大,单个充电桩单位时间内服务的电动汽车充电需求越多,因此,交通网络中接受充电服务的电动汽车数量的期望值越大。

5.2 研究展望

充电站网络规划建设是一项长期、复杂的工程,需要考虑的情形也较多。本文提出不同需求模式下的基于时间效率的电动汽车充电站的选址定容模型,虽然对于规划建设电动汽车充电设施网络有一定的指导意义,但是由于假设条件的约束,仍然存在很大的不足,有待未来更进一步的研究。未来的研究中,主要可以从以下几个方面进行深入探讨:

(1) 本文中假设充电站的排队系统为 $M/M/n$ 模式,这一假设可以使得计算变得方便,但是实际生活中,电动汽车的充电需求产生和充电时间可能并不完全服从泊松分布和负指数分布,因此,在未来的研究中可以考虑研究其他排队模型;

(2) 随着电动汽车产业的发展,电动汽车的数量会逐渐增多,因此,可以将需求预测模型与选址定容模型相结合,共同研究;

(3) 电动汽车充电设施有多种模式,本文主要研究的是快速充电模式,但是,除了快充模式,还有换电模式,因此,如何将快速充电桩与换电设施结合,合理

规划，实现服务质量与经济效益双重目标，也是未来的重要研究方向；

（4）本文高速公路网络上的选址定容问题中，假设充电站建设在路径中的某一节点，不考虑将充电站建在路径之外，但实际生活中，电动汽车也有可能选择偏离路径去完成充电服务，因此，在未来的研究中可以加入偏离成本，考虑电动汽车偏离既定路径去完成充电服务的情形。

参考文献

- [1] Andrews M, Dogru MK, Hobby JD et al. Modeling and Optimization for Electric Vehicle Charging Infrastructure [OE]. Working paper, 2009.
- [2] Avci B, Girotra K, Netessine S. Electric vehicles with a battery switching station adoption and environmental impact [OE]. Working paper, INSEAD, 2013.
- [3] Averbakh I, Berman O. Locating flow-capturing units on a network with multi-counting and diminishing returns to scale[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 91(3): 495-506.
- [4] Bailey J, Miele A, Axsen J. Is awareness of public charging associated with consumer interest in plug-in electric vehicles[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 36: 1-9.
- [5] Beasley J. E., Chu P. C. A genetic algorithm for the set covering problem[J].European Journal of Operational Research, 1996, 94: 392-404
- [6] Bento N. Building and interconnecting hydrogen networks: insights from the electricity and gas experience in Europe[J]. Energy Policy, 2008, 36(8): 3019-3028.
- [7] Benysek, G., Jamut, M. Electric vehicle charging infrastructure in Poland[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16: 320-328.
- [8] Berman O, Larson RC, Fouska N. Optimal location of discretionary service facilities [J].Transportation Science 1992, 26(3):201-211
- [9] Berman O. The maximizing market size discretionary facility location problem with congestion[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 1995, 29(1): 39-46.
- [10] Bersani C, Minciardi R, Sacile R, Trasforini E. Network planning of fuelling service stations in a near-term competitive scenario of the hydrogen economy [J].Socio Economics Planning Science 2009, 43(1):55-71.
- [11] Brandeau M L, Chiu S S. An overview of representative problems in location research[J]. Management science, 1989, 35(6): 645-674.
- [12] Buket Avci, Karan Girotra, Serguei Netessine. Electric Vehicles with a Battery Switching Station: Adoption and Environmental Impact[J]. Management Science, 2014: 1-23.
- [13] Capar I, Kuby M, Leon V J, et al. An arc cover-path-cover formulation and strategic analysis of alternative-fuel station locations[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 227(1): 142-151.
- [14] Capar I, Kuby M. An efficient formulation of the flow refueling location model for alternative-fuel stations[J]. IIE Transactions, 2012, 44(8): 622-636.
- [15] Chambari A H, Rahmaty S H, Hajipour V, et al. A bi-objective model for location-allocation problem within queuing framework[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011, 78: 138-145.
- [16] Chambari A H, Rahmaty S H, Hajipour V, et al. A bi-objective model for location-allocation problem within queuing framework[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011, 78: 138-145.
- [17] Chunlin, Guo, Wenbo, Qi, Li, Wu et al. A method of electric vehicle charging load forecasting

- based on the number of vehicles[C].//International Conference on Sustainable Power Generation and Supply.2012:1-5.
- [18] Dandan H, Chao Y, Jun Y. Budget constrained flow interception location model for congested systems[J]. Systems Engineering and Electronics, Journal of, 2009, 20(6): 1255-1262.
- [19] Daskin M., Coullard C., Shen Z.-J. An Inventory-Location Model: Formulation, Solution Algorithm and Computational Results [J]. Annals of Operations Research, 2002, 110,83-106.
- [20] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 2002, 6(2): 182-197.
- [21] Dong J, Liu C, Lin Z. Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: An activity-based approach using multiday travel data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 38: 44-55.
- [22] Egbue O, Long S. Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions[J]. Energy Policy, 2012, 48: 717-729.
- [23] Frade I, Ribeiro A, Gonçalves G, et al. Optimal location of charging stations for electric vehicles in a neighborhood in Lisbon, Portugal[J]. Transportation research record: journal of the transportation research board, 2011, 2252(1): 91-98.
- [24] Ge S, Feng L, Liu H. The planning of electric vehicle charging station based on grid partition method[C].//Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on. IEEE, 2011: 2726-2730.
- [25] González J, Alvaro R, Gamallo C, et al. Determining Electric Vehicle Charging Point Locations Considering Drivers' Daily Activities[J]. Procedia Computer Science, 2014, 32: 647-654.
- [26] Hajipour V, Khodakarami V, Tavana M. The Redundancy Queuing-Location-Allocation Problem: A Novel Approach[J]. Engineering Management, IEEE Transactions on, 2014, 61(3): 534-544.
- [27] He F, Wu D, Yin Y, et al. Optimal deployment of public charging stations for plug-in hybrid electric vehicles[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2013, 47: 87-101.
- [28] He F, Wu D, Yin YF, Guan YP. Optimal deployment of public charging stations for plug-in hybrid electric vehicles [J]. Transportation Research--Part B, 2013, 47: 87-101.
- [29] Hodgson M J. A Flow - Capturing Location - Allocation Model[J]. Geographical Analysis, 1990, 22(3): 270-279.
- [30] Hu D, Liu Z W, Hu W. Congestion Service Facilities Location Problem with Promise of Response Time[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013.
- [31] Jia H P, Liu S G, Xie S L, et al. The Location Model of the Electric Vehicle Charging Station Based on Simulated Annealing Algorithm[J]. Advanced Materials Research, 2013, 805: 1895-1899.
- [32] Jian Liu. Electric vehicle charging infrastructure assignment and power grid impacts assessment in Beijing[J]. Energy policy, 2012, 51(Dec.): 544-557.
- [33] Jung J, Chow J Y J, Jayakrishnan R, et al. Stochastic dynamic itinerary interception refueling location problem with queue delay for electric taxi charging stations[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 40: 123-142.
- [34] Kim J G, Kuby M. The deviation-flow refueling location model for optimizing a network of refueling stations[J]. international journal of hydrogen energy, 2012, 37(6): 5406-5420.
- [35] Kim J-G, Kuby M. A network transformation heuristic approach for the deviation flow refueling

- location model [J]. *Computers and Operations Research*, 2013, 40:1122-1131.
- [36] Kim J-G. Location of refueling stations for alternative fuel vehicles considering driver deviation behavior and uneven consumer demand: model, heuristics, and GIS [D]. PhD dissertation. United States: Arizona State University; 2010.
- [37] Kley F, Lerch C, Dallinger D. New business models for electric cars—A holistic approach[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(6): 3392-3403.
- [38] Kubly MJ, et al. Optimization of hydrogen stations in Florida using the flow-refueling location model [J]. *International Journal of Hydrogen Energy* 2009, 4(15):6045-6064.
- [39] Kubly MJ, Lim S. Location of alternative-fuel stations using the flow-refueling location model and dispersion of candidate sites on arcs [J]. *Netw Spat Econ* 2007, 7(2):129-152.
- [40] Kubly MJ, Lim S. The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles [J]. *Socio Economics Planning Science* 2005, 39(2): 125-145.
- [41] Lili Li, Xubo Ge, Yibin Zhang 等. Development of Electric Vehicles: Opportunities and Challenges for Power Grid Companies [C]. // 第五届中国国际供电会议 (GIRED) 论文集. 2012: 1-7.
- [42] Lim S, Kubly MJ. Heuristic algorithms for siting alternative fuel stations using the flow-refueling location model [J]. *European Journal of Operations Research* 2010, 204(1): 51-61.
- [43] Lim S. Heuristic algorithms and a spatial decision support system for locating hydrogen-refueling stations [M]. Arizona State University, 2007.
- [44] Liu ZF, Zhang W, Ji X, Li K. Optimal Planning of charging station for electric vehicle based on particle swarm optimization [C]. *IEEE PES ISGT ASIA* 2012, 1-5.
- [45] Mak HY, Rong Y, Shen ZJM (2013) Infrastructure planning for electric vehicles with battery swapping. *Management Sci.* 59(7):1557-1575.
- [46] Marianov V, ReVelle C. The queueing maximal availability location problem: a model for the siting of emergency vehicles [J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, 93(1): 110-120.
- [47] McPherson C, Richardson J, McLennan O, Zipper G. Planning an Electric Vehicle Battery-Switch Network for Australia [C]. *Australasian Transport Research Forum 2011 Proceedings* 28 - 30 September 2011, Adelaide, Australia.
- [48] Miranda P A, Garrido R A. A simultaneous inventory control and facility location model with stochastic capacity constraints [J]. *Networks and Spatial Economics*, 2006, 6(1): 39-53.
- [49] MirHassani S A, Ebrazi R. A flexible reformulation of the refueling station location problem [J]. *Transportation Science*, 2012, 47(4): 617-628.
- [50] Moeen Moghadas F. A New Heuristic Solution Method for Maximal Covering Location-Allocation Problem with M/M/1 Queueing System [J]. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 2012, 23(1): 67-75.
- [51] N. Schofield, H.T. Yap, C.M. Bingham, A H₂ PEM fuel cell and high energy dense battery hybrid energy source for an urban electric vehicle, in: *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, May 15, 2005, pp. 1793-1800."
- [52] Neubauer J, Wood E. The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 257: 12-20.
- [53] Nicholas MA, Handy SL, Sperling D. Using geographic information systems to evaluate siting and networks of hydrogen stations [J]. *Transportation Research Record* 2004, 1880: 126-134.

- [54] Optimal location of charging stations for electric vehicles in a neighborhood in Lisbon
- [55] Pasandideh S H R, Niaki S T A. Genetic application in a facility location problem with random demand within queuing framework[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2012, 23(3): 651-659.
- [56] Pasandideh S H R, Niaki S T A. Genetic application in a facility location problem with random demand within queuing framework[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2012, 23(3): 651-659.
- [57] Rahmati S H A, Ahmadi A, Sharifi M, et al. A multi-objective model for facility location-allocation problem with immobile servers within queuing framework[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, 74: 1-10.
- [58] ReVelle C, Hogan K. The maximum availability location problem[J]. *Transportation Science*, 1989, 23(3): 192-200.
- [59] Şahin G, Süral H. A review of hierarchical facility location models[J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(8): 2310-2331.
- [60] Şahin G, Süral H. A review of hierarchical facility location models[J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(8): 2310-2331.
- [61] Shun-Neng Yang et al. Charge scheduling of electric vehicles in highways [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2011
- [62] Simchi-Levi D, Berman O. A heuristic algorithm for the traveling salesman location problem on networks[J]. *Operations research*, 1988, 36(3): 478-484.
- [63] Sioshansi Ramteen. Modeling the Impacts of Electricity Tariffs on Plug-In Hybrid Electric Vehicle Charging, Costs, and Emissions [J]. *Operations Research*, 2012, 60(3): 506-516.
- [64] T. Winkler, P. Komarnicki, G. Mueller, G. Heideck, M. Heuer, Z.A. Styczynski, Electric vehicle charging stations in magdeburg, in: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC*, September 2009, pp. 60-65.
- [65] Tanaka K, Furuta T. A hierarchical flow capturing location problem with demand attraction based on facility size, and its Lagrangian relaxation solution method[J]. *Geographical Analysis*, 2012, 44(1): 15-28.
- [66] Upchurch C, Kuby M, Lim S. A Model for Location of Capacitated Alternative - Fuel Stations[J]. *Geographical Analysis*, 2009, 41(1): 85-106.
- [67] Upchurch C, Kuby M. Comparing the p-median and flow-refueling models for locating alternative-fuel stations[J]. *Journal of Transport Geography*, 2010, 18(6): 750-758.
- [68] Upchurch C, Kuby MJ, Lim S. A model for location of capacitated alternative-fuel stations[J]. *Geographical Analysis* 2009, 41: 85-106.
- [69] W. Kempton and J. Tomic. Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large—scale renewable energy[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 33(1): 280-294
- [70] Wang H, Huang Q, Zhang C, et al. A novel approach for the layout of electric vehicle charging station[C]//*Apperceiving Computing and Intelligence Analysis (ICACIA)*, 2010 International Conference on. IEEE, 2010: 64-70.
- [71] Xi X, Sioshansi R, Marano V. Simulation-optimization model for location of a public electric vehicle charging infrastructure[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2013, 22: 60-69.
- [72] Xiong H, Xiang T, Zhu Y, et al. Electric vehicle public charging stations location optimal planning[J]. *Dianli Xitong Zidonghua(Automation of Electric Power Systems)*, 2012, 36(23): 65-70.

- [73] Zheng J, Zhao L, Ou K, et al. Queuing-based approach for optimal dispenser allocation to hydrogen refueling stations[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(15): 8055-8062.
- [74] 埃森哲. 中国电动汽车充换电服务模式研究及对电网企业的建议[J]. 2011.
- [75] 德勤. 全球消费者对电动汽车的购买意愿调查 [OE]. <http://auto.163.com/11/0421/08/725BJM1100084IJJ.html>. 2011. 4.
- [76] 邓晨, 梁艺. 电动汽车充电市场运营模式研究[J]. 贵州商业高等专科学校学报, 2011,24(3): 29-34.
- [77] 邓飞. 埃森哲近日发布的“插电式电动汽车: 转变观念, 全面兼顾”研究报告显示, 多数消费者愿意购买插电式电动汽车, 然充电设施仍存挑战[N]. 中国经济导报, 2011.
- [78] 冯超, 周步祥等. Delphi 和 GAHP 集成的综合评价方法在电动汽车充电站选址最优决策中的应用[J]. 电力自动化设备, 2012,32(9):25-29.
- [79] 郭春林, 肖湘宁. 电动汽车充电基础设施规划方法与模型 [J]. 电力系统自动化, 2013,37(13):70-75
- [80] 郭占宽, 常利胜, 尹健等. 一类排队系统等待时间的分布. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2008, 39(4):375-37
- [81] 国家电网. 《国家电网“十二五”智能充换电服务网络发展规划》出台 [N]. 国家电网报, 2012-2-15.
- [82] 国家电网公司. 国家电网公司电动汽车充电设施建设指导意见 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [83] 胡丹丹. 拥塞型设施的选址问题 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011
- [84] 节能与新能源汽车网. 全国 48 个新能源汽车推广应用城市 已建 309 座充换电站、13995 个充电桩 [EB/OL]. <http://www.caam.org.cn/hangye/20140310/1605115529.html>. 2014-03-10.
- [85] 居勇. 建设电动汽车充电站的约束条件及综合效益分析 [J]. 华东电力, 2011, 4:547-550
- [86] 寇凌峰, 刘自发, 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.
- [87] 李海峰, 康中敏. 基于混合遗传神经网络的电动汽车充电站最优选址的研究 [J]. 四川电力技术, 2012, 35(4): 49-52.
- [88] 李立理, 张义斌, 周原冰, 葛旭波. 我国发展电动汽车充电基础设施若干问题分析 [J]. 能源技术经济, 2011, 23, 1: 6-10.
- [89] 李如琦, 苏浩益. 基于排队论的电动汽车充电设施优化配置 [J]. 电力系统自动化, 2011,35(14):58-61.
- [90] 刘文霞, 仇国兵, 张建华. 电动汽车快速充电站需求分析与设备优化方法 [J]. 天津大学学报, 2012, 45(12): 1110-1115.
- [91] 刘潇潇, 廉国海. 电动汽车充电设施商业化运营模式研究 [J]. 湖南电力, 2011, 31(1): 59-62.
- [92] 刘欣. 北京市电动公交、环卫、出租车充电站布局规划研究 [J]. 中国科技成果, 2012, (14): 43-45.
- [93] 刘志鹏, 文福拴等. 电动汽车充电站的最优选址和定容 [J]. 电力系统自动化, 2012,36(3): 54-59.
- [94] 鲁莽, 周小兵等. 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): 16-30
- [95] 孙逢春. 电动汽车发展现状及趋势 [J]. 科学中国人, 2006(8): 44-47
- [96] 孙元, 丁茂生, 柳劲松等. 电动汽车充电设施分层递进式定址定容最优规划 [J]. 电测与仪表,

2014, 51(11): 114-119.

[97] 唐敏, 徐解宪, 顾月蕾. 电动汽车充电站建设与运营的模式研究[J]. 华东电力, 2011, 39(2): 202-206

[98] 万波. 公共服务设施选址问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011

[99] 魏昭峰. 中国电动汽车技术路线和充电模式的选择[J]. 中国电力企业管理, 2012, 7: 14-18.

[100] 夏德建. 电动汽车研究综述[J]. 能源技术经济, 2010, 22(7): 49-55

[101] 熊虎, 向铁元等. 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.

[102] 徐凡, 俞国勤, 顾临峰. 电动汽车充电站布局规划浅析[J]. 华东电力, 2009, 37(10): 78-82.

[103] 许文超, 牛涛等. 电动汽车充电站需求影响因素及预测方法[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(3): 41-43.

[104] 杨珺. 网络服务设施的截流一选址问题研究[D]. 华中科技大学博士论文, 2005.

[105] 杨渊, 张红霞. 我国电动汽车消费者态度的测量和改变[J]. 科技情报开发与经济, 2011, 26(21): 144-146.

[106] 岳思, 李艳. 电动汽车充电模式及方式浅析[J]. 通讯电源技术, 2012, 29(2): 38-40

[107] 张国亮, 李波, 王运发. 多等级电动汽车充电站的选址与算法[J]. 山东大学学报, 2011, 41(6): 136-141.

[108] 张国亮. 城市内和城市间电动汽车充电站的选址布局研究[D]. 天津大学硕士论文, 2011

[109] 张志伟, 顾丹珍. 电动汽车充电策略综述[J]. 上海电力学院学报, 2012, 28(4): 336-340.

[110] 甄子健. 电动汽车基础设施研究[J]. 中国汽车工程学会, 2009

[111] 中国电力企业联合会电动汽车充电设施调研组[R]. 我国电动汽车充电设施发展研究报告. 2011

[112] 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[J]. 科技和产业, 2011, 11(2): 51-54.

作者简历及攻读硕士/博士学位期间取得的研究成果

一、作者简历

卢芳，女，1991年11月10日出生于湖南省岳阳市，2013年7月毕业于北京交通大学物流管理专业，获得学士学位；2013年9月进入北京交通大学经济管理学院开始研究生生涯，所学专业为物流工程，研究方向为供应链管理。

二、发表论文


A location-sizing model for electric vehicle charging station deployment based on queuing theory.

三、参与科研项目

电动汽车充换电站网络布局优化研究（2014.3至今），项目来源：国家自然科学基金

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京交通大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 

签字日期： 2015 年 6 月 10 日

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
电动汽车	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	工程硕士	硕士	
论文题名*	并列题名		论文语种*	
基于排队论的电动汽车充电站选址定容研究			中文	
作者姓名*	卢芳	学号*	13125346	
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	
工程领域*	研究方向*	学制*	学位授予年*	
物流工程	电动汽车充电站网络规划	2 年	2015 年	
论文提交日期*	2015 年 6 月 12 日			
导师姓名*	华国伟	职称*	副教授	
评阅人	答辩委员会主席*	答辩委员会成员		
	傅少川	傅少川，田源，耿勇		
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*	63 页			
共 33 项，其中带*为必填数据，为 21 项。				