

# 基于典型服务设施截流模型的电动汽车 充电设施选址方案的分析与设计



颜磊<sup>a,1</sup>, 陈浩骏<sup>b,1</sup>, 林翰<sup>b,1</sup>, 缪晨轩<sup>c,1</sup> and 张会冉<sup>b,1</sup>

<sup>a</sup> 背景部分调研及 PPT 制作

<sup>b</sup> MATLAB 建模设计与分析

<sup>c</sup> LaTeX 排版调研报告制作

指导老师: 梁军

**摘要**—随着新能源技术的发展,电动汽车的普及量逐渐增大,如何切实保障电动汽车的能量来源成为了一个重要的问题。如何合理设置和部署充电桩对于保障新能源汽车用户乃至推进国家的“双碳”战略都具有重要意义。本课程小组通过综合运用运筹学中所学的 0-1 规划、图论等知识,选取了杭州市西湖区某区域的充电桩分布情况进行了建模和分析。本文在已有服务设施截流模型的基础上,提出了基于 MATLAB 仿真的改进算法,提升了优化的效果,提出的方案可对杭州市乃至其他城市的充电桩规划提供可靠的理论来源和优化保障。

**关键词**—电动汽车;充电桩;0-1 规划;图论;优化;服务设施截流模型

**Abstract**—With the development of new energy technology, the popularity of electric vehicles is increasing gradually. How to guarantee the energy source of electric vehicles has become an important issue. How to reasonably set up and deploy charging piles is of great significance to guarantee new energy vehicle users and even to promote the national “Dual-carbon” strategy. Based on the knowledge of 0-1 programming and graph theory, the course team built a model and analyzed the distribution of charging piles in a certain area of Xihu District in Hangzhou. Based on the existing Facility Location Problem about Flow Interception(FLPFI), this paper proposes an improved algorithm based on MATLAB simulation, which improves the optimization effect, the proposed scheme can provide reliable theoretical source and optimization guarantee for the charge pile planning in Hangzhou and other cities.

**Keywords**—Electric vehicle; charging pile; 0-1 programming; graph theory; optimization; Facility Location Problem about Flow Interception

## Contents

1 引言	1
2 背景分析	1
2.1 问题提出	1
2.2 杭州市情况	2
3 基于典型服务设施截流模型的分析与建模	2
3.1 典型服务设施截流模型阐述	2
3.2 分析与建模	2
3.3 模型改进	2
4 问题实例分析——以杭州市西湖区某区域为例	3
4.1 交通道路网络图绘制与相关数据集获取	3
4.2 使用改进前的模型分析	4
4.3 使用改进后的模型分析	5
5 方案总结与分析	7
6 展望	8

A 附录	8
A.1 附录 A	9
A.2 附录 B	10
A.3 附录 C	11
References	12

## 1. 引言

我 国和全世界都在大力推进零碳排放,这大大促进了新能源技术的发展。随着新能源技术的发展,电动汽车的普及量逐渐增大,如何切实保障电动汽车的能量来源成为了一个重要的问题。如何合理设置和部署充电桩对于保障新能源汽车用户乃至推进国家的“双碳”战略都具有重要意义。恰好杭州作为全国新能源改革与推进的“急先锋”,本课程小组通过综合运用运筹学中所学的整数规划、图论等知识,就近选取了杭州市西湖区某区域的充电桩分布情况进行了建模和分析。课程小组成员的数据全部采集自网上公开数据(如百度地图等),确保了数据的公开公正。已有的服务设施截流模型[2],可以在点线网络模型中线路模型、线路流向等均确定的情况下,在点线网络模型中设置合理的服务设施的数量和位置,从而达到服务流量最大化。但该模型存在考虑的交通道路网络较为简单、忽视电动汽车蓄电能力、仅截取充电设施所在路段交通流量等问题,为弥补上述缺陷,我们提出了基于 MATLAB 仿真的改进算法,综合考虑了现实的因素,有效提升了优化的效果,提出的方案可对杭州市乃至其他城市的充电桩规划提供可靠的理论来源和优化保障。

## 2. 背景分析

### 2.1. 问题提出

如今,随着工业化进程的深入,全球变暖与资源问题日益严峻,强化碳排放管理、节约化石能源消耗越来越不可忽视,我国已明确将“碳达峰、碳中和”作为经济社会发展全面绿色转型的目标方向。依靠新能源,将具有减排效益的电动车作为燃油车的主要替代品,受到了世界各国的广泛推崇。截至 2023 年底,我国新能源汽车保有量达 2041 万辆,其中纯电动汽车保有量 1552 万辆,占新能源汽车保有量的 76.04%。与此同时,我国充电基础设施建设亦增长迅速,截至 2023 年底,充电基础设施累计数量达到 859.6 万台,有效支撑了电动汽车的发展。尽管充电设施总量不少,但其未来发展空间仍然巨大。2023 年底,国内车桩比约为 2.4: 1, 和工信部计划 2030 年实现的车桩比 1: 1 目标相比,还有一定差距。同时,由于国内早期充电设施选址的考虑因素更加偏向于场地资源的可用性,导致部分充电设施布局的不合理,出现利用率低下的情况。因此,对充电设施开展合理、高效的布局规划至关重要。

为此，本案例提出电动汽车充电设施的布局优化问题，基于已有的模型，提出针对性的改进方案，对杭州市西湖区的充电设施布局进行实例分析与求解，为其充电设施布局的合理性判断提供参考。

## 2.2. 杭州市情况

杭州作为国家第一批新能源汽车推广应用城市之一，近两年来新增新能源汽车迅速，全市保有量规模迅速增大，伴随而来的是充电设施建设规模的爆发式增长。截至 2023 年 11 月底，全市已建成各类充电设施约 26.8 万个，其中自用充电设施约 23.6 万个，公共充电设施约 3.2 万个，在总体规模、充电桩密度、覆盖率等方面居全国主要城市前列，较好满足了新能源电动汽车的充电需求。

近两年来，杭州市每年新增电动汽车超 20 万辆，占年度新增总量 60% 以上，据统计，杭州市新能源汽车保有量已达 72.8 万辆，约占全市机动车保有量的 18%。电动汽车的爆发式增长，对充电设施建设运营提出了更高的要求。为主动应对充电设施发展的新形势、新要求，结合杭州实际情况，杭州市人民政府修订出台了《实施办法》[3]，将高质量发展理念贯彻到充电设施规划、建设、运营、监管全过程，更有效满足人民群众的充电需求。为积极响应政府政策及时代需求，本文专门调研了杭州市西湖区某区域的充电桩情况，并对优化充电桩安排提出我们的方案。

## 3. 基于典型服务设施截流模型的分析与建模

### 3.1. 典型服务设施截流模型阐述

电动汽车充电设施选址布局即是在城市交通道路网络的点线模型内布置一定量的服务设施，与典型的服务设施截流模型相似。服务设施截流模型 (Facility Location Problem about Flow Interception, FLPFI) 最早由 Berman 等人提出 [2]，主要研究：点线网络模型中线路模型、线路流向等均确定的情况下，在点线网络模型中如何设置服务设施的数量、位置等，以实现服务设施截取的服务流量最大化问题。在本组的选题下，此模型中的点线网络模型即所研究区域的交通道路网络模型，服务设施即电动汽车充电设施，服务流量则为线路集合中各条路线上交通流量。

### 3.2. 分析与建模

基于上述典型电动汽车充电设施选址模型，我们对本组选题建立如下的符号说明和基本假设：

1. 建立所研究区域的交通道路网络模型  $\mathbf{G}(\mathbf{V}, \mathbf{A})$ ，此模型中  $\mathbf{V} = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$  表示交通道路网络中各个十字路口、道路拐点等节点的集合， $\mathbf{A} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_u\}$  表示交通道路网络中所有路段的集合。
2. 记交通道路网络中交通流量不为零的路段集合为  $\mathbf{P}$ ，并作如下基本假设：每一路段  $a_p$  的交通流量均不为零，即  $a_p \in \mathbf{P}$ 。
3. 记路段集合第  $a_p$  条路段上的交通流量为  $f_p$ （可通过所研究地的地理信息公共服务平台获得）。
4. 用  $x_j$  表示是否在第  $v_j$  个交通道路网络节点上布置充电设施，若规划，则记为  $x_j = 1$ ，否则记为  $x_j = 0$ 。
5. 用  $y_p$  表示在第  $a_p$  条路段上是否至少布置一个充电设施，若是，则记为  $y_p = 1$ ，否则记为  $y_p = 0$ 。

注：上述符号说明和基本假设中的“路段”均指的是相邻两个交通节点间的连接路径，区别于后文中的“（最短）路线”、“（最短）路径”等说法。

基于上述符号说明和基本假设，我们可建立如下的数学模型：

为了实现交通道路网络中布局的充电设施具有最大化的服务能力，我们构建所有交通流量不为零的路径集合上截取交通流量的总和为目标函数，即：

$$T = \sum_{a_p \in \mathbf{P}} f_p y_p$$

同时，在规划充电设施选址布局的过程中，假定拟布局的充电设施总数量为  $m$ ，则此模型应满足的等式约束条件是：

$$\sum_{j=1}^n x_j = m$$

此外，由于充电设施是布置在各节点所在位置，因此对于每一条路径，各节点布置的充电设施数量与该条路径的充电设施数量之间应满足如下关系：

$$\sum_{v_j \in a_p} x_j \geq y_p, a_p \in \mathbf{P}$$

其中的  $v_j \in a_p$  表示  $v_j$  是路段  $a_p$  的端点。

且根据上述分析，我们可知充电设施的布置与否为确定性的 0-1 变量，因此表示各节点是否布置充电设施的参变量  $x_j$  和表示各条路段是否布置充电设施的参变量  $y_p$  均应为 0-1 变量，即：

$$x_j, y_p \in \{0, 1\}$$

### 3.3. 模型改进

对3.2中已建立的典型电动汽车充电设施选址模型进行分析可知：该模型考虑的交通道路网络较为简单，存在充电设施候选位置不合理、仅截取充电设施所在路段的交通流量不合理、忽视电动汽车蓄电能力、充电设施的最大允许空白距离等局限性。

为弥补上述局限性，本部分在已建立的典型截流模型的基础上，我们仍沿用3.2中所建立的交通道路网络模型  $\mathbf{G}(\mathbf{V}, \mathbf{A})$ ，将原充电设施布置在网络节点处修正为布置在网络的道路边上，将截取交通流量不为 0 的各路段修正为截取交通网络中交通流量不为 0 的各最短路径，并综合考虑充电设施之间的最大距离以保证充电设施覆盖率，所作的所有修正如下：

1. 首先，将典型截流模型中充电设施布置在网络节点修正为布置在网络的道路边上，也就是避免将充换电设施布局在十字路口、交通枢纽等交通和路况复杂区域，而是布置在交通状况较简单的道路上。
2. 一般而言，并结合应用广泛的 GPS 导航系统，各条道路上的驾驶者在驾驶过程中均选择任意 2 点间的最短路径进行交通驾驶。由数学知识易知：对于节点总数为  $n$  的交通道路网络，网络中存在的最短路径总数量为  $n(n - 1)$ 。记交通道路网络中任意 2 个节点之间的最短路径集合为  $\mathbf{P}$ （即每一对节点之间的最短路径  $p$  都符合  $p \in \mathbf{P}$ ），路径  $p$  的路径长度为  $L_p$ ，该路径上所有节点的集合为  $V_p$ 。
3. 记路段集合第  $a_i$  条路段上的交通流量为  $f_i$ （可通过所研究

地的地理信息公共服务平台获得), 最短路径集合第  $p$  条最短路径上的总交通流量为  $F_p$ , 显然,  $F_p$  等于组成路径  $p$  的各条路段的交通流量之和。

4. 如果在路段  $a_i$  上布置充电设施, 则记为  $x_i = 1$ , 否则记为  $x_i = 0$ ; 如果第  $p$  条路线上至少布置一个充电设施, 则记为  $y_p = 1$ , 否则记为  $y_p = 0$ ; 显然参变量  $x_j$  和  $y_p$  均为 0-1 变量。
5. 此外, 为了保证充电设施的服务能力, 我们根据中国城市规划学会发布的《电动汽车充电设施布局规划导则》[4], 设定一个最大允许建站空白距离  $L_{max}$ , 即对于最短路径集合中的任意一条最短路径, 若无布置充电设施, 其长度不能超过  $L_{max}$ :  
$$L_p(1 - y_p) \leq L_{max}, p \in \mathbf{P}$$

同3.2理, 为了实现交通道路网络中布局的充电设施具有最大的服务能力, 我们构建所有最短路径上截取交通流量的总和为目标函数, 即:

$$T = \sum_{p \in \mathbf{P}} F_p y_p$$

同时, 在规划充电设施选址布局的过程中, 假定拟布局的充电设施总数量为  $m$ , 则此模型应满足的等式约束条件是:

$$\sum_{i=1}^u x_i = m$$

其中,  $u$  为路段的总数量。

表示各条路段是否布置充电设施的参变量  $x_i$  和表示各条最短路径是否布置充电设施的参变量  $y_p$  均应为 0-1 变量, 即:

$$x_i, y_p \in \{0, 1\}$$

综上所述, 我们所构建的充电设施选址布局模型为最优化模型, 其目标函数为实现道路截取交通流量最大的单目标函数, 其约束条件包括充电设施数量约束、最大允许建站空白距离约束、决策变量 0-1 约束等。

## 4. 问题实例分析——以杭州市西湖区某区域为例

### 4.1. 交通道路网络图绘制与相关数据集获取

杭州市西湖区某区域是市内交通道路网络较为复杂的区域, 该区内电动汽车流量大, 具有较为明确的电动汽车充电设施服务需求。为了在该区域内合理布局电动汽车充电设施, 本组成员首先对该区域的交通网络、电动汽车流量等进行了有效分析; 经分析, 该区域内部的道路网络十分复杂, 但其内部的大量交通道路由于道路狭窄、禁止机动车辆行驶等原因并不具备电动汽车通行能力, 因此仅将该区域内部可以有效行驶电动汽车车辆的道路绘制出来。同时, 为了有效表示该区域的交通道路网络, 我们采用3.2和3.3中所述的交通道路网络模型, 将各个十字路口、丁字路口、道路拐点等定义为网络节点, 并对各节点和各路段进行编号, 绘制得到的点线式交通道路网络图如 Fig. 1 所示。

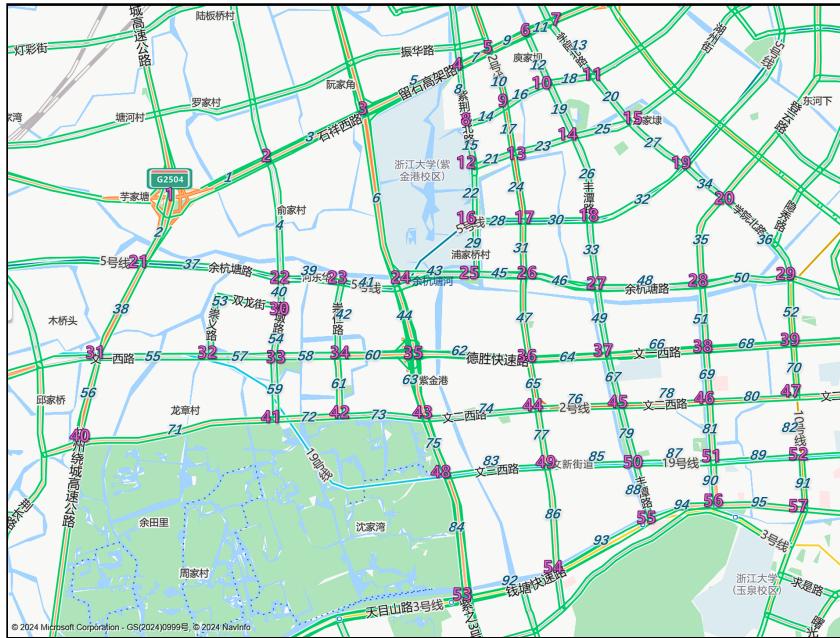


Figure 1. 杭州市西湖区某区域交通道路网络图

显然，将绘制的该区域的点线式交通道路网络包含网络节点 57 个，有效电动汽车行驶道路 95 条，可以采用图论的形式将该区域的交通道路网络表示为 3.2 和 3.3 中所述的交通道路网络模型  $G(V, A)$ 。

通过百度地图和杭州市地理信息公共服务平台，我们可以得到各路段的道路长度数据集和电动汽车车流量数据集，如 Fig. 2 所示。

#### 4.2. 使用改进前的模型分析

结合杭州市现有电动汽车保有量和电动汽车充电设施布局的初步预算经费，拟在该区域内构建 20 座充电设施（即模型中的  $m = 20$ ），以提高该区域内电动汽车驾驶者的电动汽车使用效能。

通过 Matlab 仿真分析（具体代码可见于附录 A）得知，选定在该区域中的 2、4、13、16、18 等 20 个网络节点处布置电动汽车充电设施，将所研究区域中布置电动汽车充电设施的网络节点在图中标示出来，可得杭州市西湖区某区域电动汽车充电设施选址布局如 Fig. 3 所示。

路段	流量 (辆/ s)	长度 (m)	路段	流量 (辆/ s)	长度 (m)	路段	流量 (辆/ s)	长度 (m)
1	3.9	1200	33	1.8	700	65	2.6	500
2	3.2	800	34	1.9	500	66	2.9	1100
3	2.9	1200	35	2.6	1000	67	2.1	600
4	0.9	1300	36	2	1200	68	3.2	1000
5	4.8	1100	37	1.8	1500	69	2.9	600
6	2.2	1900	38	3	1100	70	2.2	600
7	4.6	400	39	2.4	700	71	1.8	2200
8	2.4	600	40	1.7	300	72	1.9	700
9	4.1	500	41	2.7	600	73	1.9	1000
10	2.7	600	42	1.9	800	74	2	1200
11	4.3	300	43	2.6	900	75	2.3	700
12	2.1	600	44	3.8	700	76	2.3	900
13	1.8	700	45	2.1	500	77	2	600
14	1.7	500	46	2.1	800	78	2.4	1000
15	2.3	500	47	2.7	900	79	1.7	700
16	1.6	500	48	1.9	1200	80	1.8	1000
17	2.7	500	49	1.7	700	81	1.6	600
18	1.9	500	50	1.8	1000	82	0.3	600
19	1.9	600	51	2.4	700	83	1.6	1100
20	1.7	700	52	2.3	700	84	2.6	1400
21	2.5	500	53	1.2	1400	85	1.5	1000
22	2.3	600	54	1.1	600	86	1.9	1200
23	2	700	55	1.9	1200	87	1.4	900
24	3	800	56	2.2	1000	88	1.5	600
25	1.9	700	57	1.7	700	89	1.6	1000
26	2.2	1000	58	1.9	700	90	1.3	500
27	2.1	700	59	1.3	700	91	1.7	600
28	2.3	500	60	2.7	800	92	2.6	1000
29	2.2	600	61	2.2	800	93	2.4	1200
30	2.1	700	62	2.3	700	94	2	700
31	2.8	600	63	3.5	700	95	1.8	1000
32	2	1000	64	2.5	900			

Figure 2. 各路段的道路长度数据集和电动汽车车流量数据集

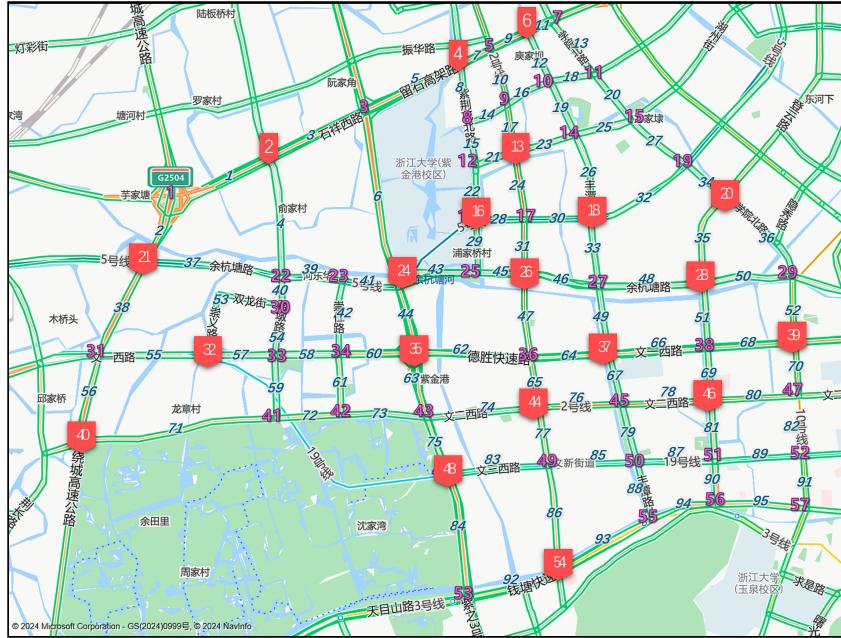


Figure 3. 杭州市西湖区某区域电动汽车充电设施选址布局（改进前）

#### 4.3. 使用改进后的模型分析

对于改进后的模型，我们首先利用 Matlab 定义网络拓扑（包括各节点和各路段的信息），值得注意的是：此模型中的网络拓扑图仅为一有权无向图，由4.2已知：该区域的点线式交通道路网络包含网络节点 57 个，有效电动汽车行驶道路 95 条，具体地，我们分别采用邻接矩阵和权重向量的方式表示各节点间的连通性和各路段的长度，并借助 Matlab 中强大的 graph 函数来处理图形数据结构和进行图形分析（具体代码可见于附录 B），由此，我们便通过图论的形式可视化地得到了该区域的交通道路网络拓扑结构图，如 Fig. 4(a) 所示。

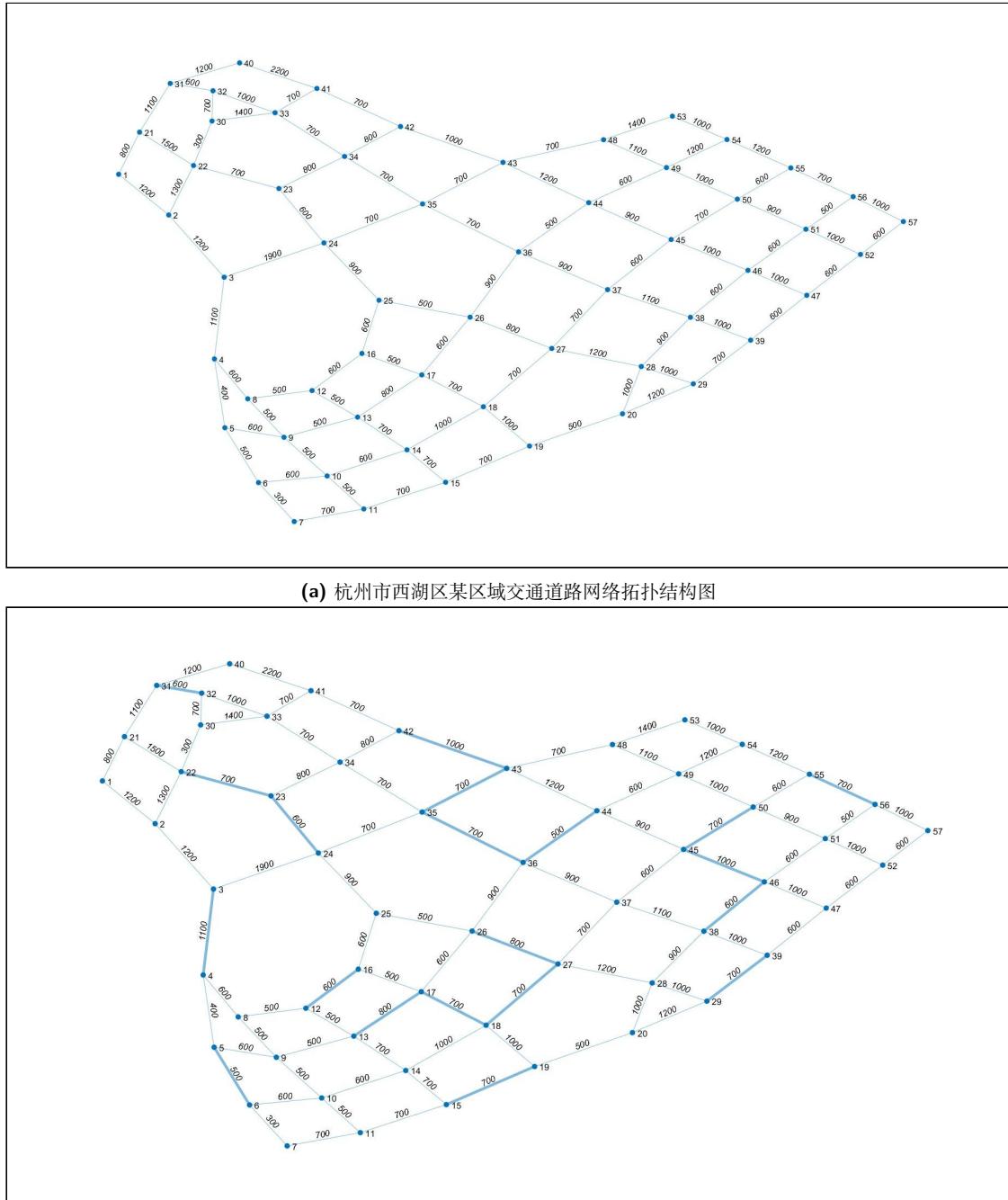


Figure 4. 改进前后充电设施选址布局拓扑图

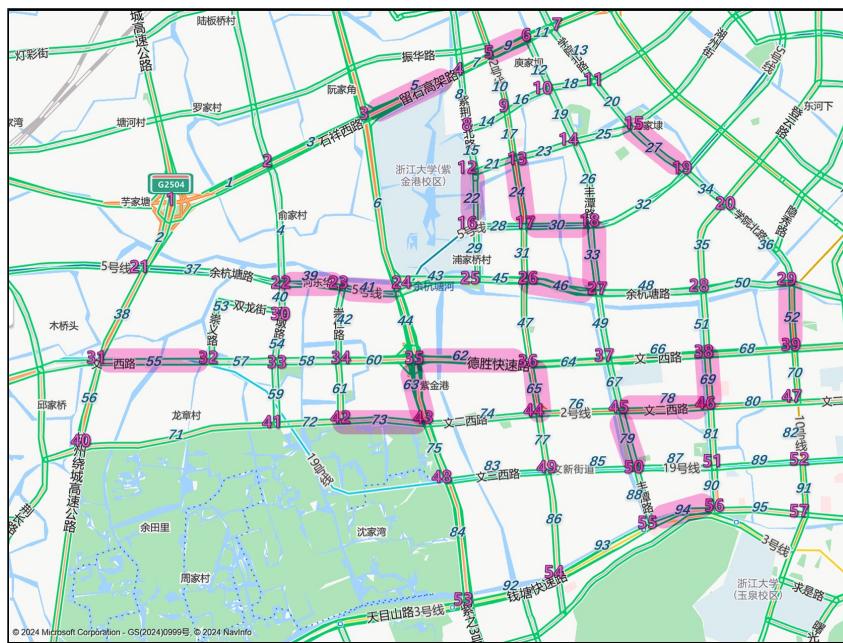


Figure 5. 杭州市西湖区某区域电动汽车充电设施选址布局（改进后）

变量 - d														
d	x													
57x57 double														
1	0	1200	2400	3500	3900	4400	4700	4100	4500	5000	5400			
2	1200	0	1200	2300	2700	3200	3500	2900	3300	3800	4200			
3	2400	1200	0	1100	1500	2000	2300	1700	2100	2600	3000			
4	3500	2300	1100	0	400	900	1200	600	1000	1500	1900			
5	3900	2700	1500	400	0	500	800	1000	600	1100	1500			
6	4400	3200	2000	900	500	0	300	1500	1100	600	1000			
7	4700	3500	2300	1200	800	300	0	1800	1400	900	700			
8	4100	2900	1700	600	1000	1500	1800	0	500	1000	1500			
9	4500	3300	2100	1000	600	1100	1400	500	0	500	1000			
10	5000	3800	2600	1500	1100	600	900	1000	500	0	500			
11	5400	4200	3000	1900	1500	1000	700	1500	1000	500	0			
12	4600	3400	2200	1100	1500	2000	2300	500	1000	1500	2000			
13	5000	3800	2600	1500	1100	1600	1900	1000	500	1000	1500			
14	5600	4400	3200	2100	1700	1200	1500	1600	1100	600	1100			
15	6100	4900	3700	2600	2200	1700	1400	2200	1700	1200	700			

Figure 6. 部分最短路径的长度

值得注意的是：此处在利用 graph 函数绘制该区域的交通道路网络拓扑结构图时，除了使用邻接矩阵和权重向量外，我们还引入一个名为 flow 的矩阵用于存放各路段的交通流量，以便后续模型的代码化和求解。

进一步地，为提高计算效率和简化编码工作，我们利用基于 Dijkstra [1] 算法的 distances 函数来计算上示网络拓扑结构图中任意两个节点之间的最短距离（具体代码可见于附录 B），部分最短路径的长度如 Fig. 6 所示。

得到上示网络拓扑结构图中任意两个节点之间的最短距离后，我们根据3.3中建立的模型，在 Matlab 中进行仿真分析。注：拟在该区域内构建 20 座充电设施（即模型中的  $m = 20$ ），且根据中国城市规划学会发布的《电动汽车充电设施布局规划导则》，我们设定的最大允许建站空白距离  $L_{max} = 4000m$ 。

通过 Matlab 仿真分析（具体代码可见于附录 C）得知，选定在该区域中的 5、9、22、24、27 等 20 条路段边上布置电动汽车充电设施，将所研究区域中布置电动汽车充电设施的路段在图中以加粗形式标示出来，可得杭州市西湖区某区域电动汽车充电设

施选址布局如 Fig. 5 所示以及其网络拓扑结构图如 Fig. 4(b) 所示。

## 5. 方案总结与分析

相比于改进前的典型模型，改进后的模型避免了在十字路口、丁字路口等交通和路况复杂区域布置充电设施，而是将其布置在交通状况较简单的道路旁，这利于实际生活中车辆进出充电站，避免重要交通节点发生拥堵，从此角度来看，改进后的模型更为合理；同时，相比于仅截取端点布置有充电设施的路段，改进后的模型截取所有布置有充电设施的最短路径，符合现实生活中绝大多数驾驶者的驾驶习惯，更为合理；且改进后的模型设定了一个最大允许建站空白距离  $L_{max}$ ，有效保证了充电设施的服务能力；此外，根据 Fig. 4(b) 所示的充电设施选址布局可知，采用改进后的模型时，建设电动汽车充电设施的道路主要为繁华区域或主干道路，此类区域人口流量大、电动汽车交通流量大，这与《电动汽车充电设施布局规划导则》 [4] 中的相关原则相匹配。总的来说，改进后的充电设施选址布局模型属于比较行之有效的方案。

## 6. 展望

展望未来，本文提出的基于 MATLAB 仿真的充电桩优化算法在充电设施的规划中展现了显著的潜力。然而，要进一步提升方案的应用效果，还需要综合考虑更多的复杂因素。例如，在模型中加入充电时间、建站成本等实际问题，将使得规划结果更加符合现实需求。此外，当前采用的优化算法虽然有效，但在面对大规模问题时可能会出现计算爆炸等问题。为此，可以考虑采用选址布局问题中的主流算法，如遗传算法、粒子群算法等，以提高求解精度和效率。

具体而言，遗传算法通过模拟自然选择和遗传机制，能够有效避免局部最优解的问题，从而在复杂的选址布局问题中找到更优解。粒子群算法通过模拟群体行为，能够快速收敛到最优解，适用于大规模计算。因此，将这些先进的算法引入充电桩优化模型，可以显著提升模型的优化能力和稳定性。

充电设施的合理规划具有重要意义。首先，它能够有效保障电动汽车用户的能量需求，提升用户的使用体验，从而促进电动汽车的普及。其次，合理的充电桩布局可以优化资源配置，减少电网压力，提高能源利用效率。最后，这对于推进国家的“双碳”战略，实现碳中和目标具有重要的推动作用。

总之，未来在充电桩规划中结合更多实际因素和先进算法，不仅能提升模型的精度和适用性，还能为城市能源管理和可持续发展提供坚实的理论和技术保障。充电设施的科学规划，将为电动汽车产业的健康发展和国家环境目标的实现贡献重要力量。

## A. 附录

## A.1. 附录 A

```
1 clc
2 clear
3 close all
4
5 % 各条路段的新能源汽车车流量(单位:辆/s)
6 flow = [3.9 3.2 2.9 0.9 4.8 2.2 4.6 2.4 4.1 2.7 ...
7     4.3 2.1 1.8 1.7 2.3 1.6 2.7 1.9 1.9 1.7 ...
8     2.5 2.3 2.0 3.0 1.9 2.2 2.1 2.3 2.2 2.1 ...
9     2.8 2.0 1.8 1.9 2.6 2.0 1.8 3.0 2.4 1.7 ...
10    2.7 1.9 2.6 3.8 2.1 2.1 2.7 1.9 1.7 1.8 ...
11    2.4 2.3 1.2 1.1 1.9 2.2 1.7 1.9 1.3 2.7 ...
12    2.2 2.3 3.5 2.5 2.6 2.9 2.1 3.2 2.9 2.2 ...
13    1.8 1.9 1.9 2.0 2.3 2.3 2.0 2.4 1.7 1.8 ...
14    1.6 0.3 1.6 2.6 1.5 1.9 1.4 1.5 1.6 1.3 ...
15    1.7 2.6 2.4 2.0 1.8 ...
16 ];
17 % 各条路段的长度(单位:m)
18 L = [1200 800 1200 1300 1100 1900 400 600 500 600 ...
19     300 600 700 500 500 500 500 600 700 ...
20     500 600 700 800 700 1000 700 500 600 700 ...
21     600 1000 700 500 1000 1200 1500 1100 700 300 ...
22     600 800 900 700 500 800 900 1200 700 1000 ...
23     900 700 700 1400 600 1200 1000 700 700 700 ...
24     800 700 700 900 500 1100 600 1000 600 600 ...
25     2200 700 1000 1200 700 900 600 1000 700 1000 ...
26     600 600 1100 1400 1000 1200 900 600 1000 500 ...
27     600 1000 1200 700 1000 ...
28 num = 20; % 拟布局的充电桩数量
29 Lmax = 1000; % 充电桩布局的最大允许空白距离(单位:m)
30 x = zeros(57,1); % 若在第 i 个节点有充电桩, 则 xi = 1, 否则 xi = 0
31 y = zeros(95,1); % 若在第 i 条路段有充电桩, 则 yi = 1, 否则 yi = 0
32 % dv 为决策向量, 包括 x 和 y
33 dv = [x;y];
34 % objfun 为目标函数的系数向量, 加负号表示求最大值
35 objfun = -[zeros(1,57) flow];
36 intcon = 1:(57+95);
37
38 % 约束条件1: 对于每条路段, 两端节点的xi的和应大于该路段的yi
39 A1 = [zeros(95,57) eye(95,95)];
40 A1(1 ,[1 ,2 ]) = -1;A1(2 ,[1 ,21]) = -1;A1(3 ,[2 ,3 ]) = -1;A1(4 ,[2 ,22]) = -1;
41 A1(5 ,[3 ,4 ]) = -1;A1(6 ,[3 ,24]) = -1;A1(7 ,[4 ,5 ]) = -1;A1(8 ,[4 ,8 ]) = -1;
42 A1(9 ,[5 ,6 ]) = -1;A1(10,[5 ,9 ]) = -1;A1(11,[6 ,7 ]) = -1;A1(12,[6 ,10]) = -1;
43 A1(13,[7 ,11]) = -1;A1(14,[8 ,9 ]) = -1;A1(15,[8 ,12]) = -1;A1(16,[9 ,10]) = -1;
44 A1(17,[9 ,13]) = -1;A1(18,[10,11]) = -1;A1(19,[10,14]) = -1;A1(20,[11,15]) = -1;
45 A1(21,[12,13]) = -1;A1(22,[12,16]) = -1;A1(23,[13,14]) = -1;A1(24,[13,17]) = -1;
46 A1(25,[14,15]) = -1;A1(26,[14,18]) = -1;A1(27,[15,19]) = -1;A1(28,[16,17]) = -1;
47 A1(29,[16,25]) = -1;A1(30,[17,18]) = -1;A1(31,[17,26]) = -1;A1(32,[18,19]) = -1;
48 A1(33,[18,27]) = -1;A1(34,[19,20]) = -1;A1(35,[20,28]) = -1;A1(36,[20,29]) = -1;
49 A1(37,[21,22]) = -1;A1(38,[21,31]) = -1;A1(39,[22,23]) = -1;A1(40,[22,30]) = -1;
50 A1(41,[23,24]) = -1;A1(42,[23,34]) = -1;A1(43,[24,25]) = -1;A1(44,[24,35]) = -1;
51 A1(45,[25,26]) = -1;A1(46,[26,27]) = -1;A1(47,[26,36]) = -1;A1(48,[27,28]) = -1;
52 A1(49,[27,37]) = -1;A1(50,[28,29]) = -1;A1(51,[28,28]) = -1;A1(52,[29,39]) = -1;
53 A1(53,[30,32]) = -1;A1(54,[30,33]) = -1;A1(55,[31,32]) = -1;A1(56,[31,40]) = -1;
54 A1(57,[32,33]) = -1;A1(58,[33,34]) = -1;A1(59,[33,41]) = -1;A1(60,[34,35]) = -1;
55 A1(61,[34,42]) = -1;A1(62,[35,36]) = -1;A1(63,[35,43]) = -1;A1(64,[36,37]) = -1;
56 A1(65,[36,44]) = -1;A1(66,[37,38]) = -1;A1(67,[37,45]) = -1;A1(68,[38,39]) = -1;
57 A1(69,[38,46]) = -1;A1(70,[39,47]) = -1;A1(71,[40,41]) = -1;A1(72,[41,42]) = -1;
58 A1(73,[42,43]) = -1;A1(74,[43,44]) = -1;A1(75,[43,48]) = -1;A1(76,[44,45]) = -1;
59 A1(77,[44,49]) = -1;A1(78,[45,46]) = -1;A1(79,[45,50]) = -1;A1(80,[46,47]) = -1;
60 A1(81,[46,51]) = -1;A1(82,[47,52]) = -1;A1(83,[48,49]) = -1;A1(84,[48,53]) = -1;
```

```

61 A1(85,[49,50]) = -1;A1(86,[49,54]) = -1;A1(87,[50,51]) = -1;A1(88,[50,55]) = -1;
62 A1(89,[51,52]) = -1;A1(90,[51,56]) = -1;A1(91,[52,57]) = -1;A1(92,[53,54]) = -1;
63 A1(93,[54,55]) = -1;A1(94,[55,56]) = -1;A1(95,[56,57]) = -1;
64 b1 = zeros(95,1);
65
66 % 约束条件2: 长度超过 Lmax 的路段必须分布有充电桩
67 A2 = [zeros(95,57) diag(-L)];
68 b2 = Lmax*ones(95,1)-L';
69
70 % 不等式约束 A*dv <= b
71 % A 为不等式约束方程组的系数矩阵, b 为不等式约束方程组的系数向量
72 A = [A1;A2];
73 b = [b1;b2];
74
75 % 等式约束 Aeq*dv = beq
76 % Aeq 为等式约束方程组的系数矩阵, beq 为等式约束方程组的系数向量
77 Aeq = [ones(1,57) zeros(1,95)];
78 beq = num;
79
80 % 变量 dv 的下界和上界, 使解始终在 lb    dv    ub 范围内
81 lb = zeros(1,57+95);
82 ub = ones(1,57+95);
83
84 % 求 min objfun*dv 即 max -objfun*dv 的整数解
85 [dv,fval] = intlinprog(objfun,intcon,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
86 x = dv(1:57);
87 y = dv(57+(1:95));

```

**Code 1.** MATLAB 仿真选定充电设施位置（优化前）

## A.2. 附录 B

```

1 clc
2 clear
3 close all
4
5 % 节点对组, 指定为节点索引, graph 在 s 和 t 中的对应节点之间创建边
6 s = [1 1 2 2 3 3 4 4 5 5 6 6 7 8 8 9 9 10 10];
7 t = [2 21 3 22 4 24 5 8 6 9 7 10 11 9 12 10 13 11 14];
8 s = [s 11 12 12 13 13 14 14 15 16 16 17 17 18 18 19 20 20];
9 t = [t 15 13 16 14 17 15 18 19 17 25 18 26 19 27 20 28 29];
10 s = [s 21 21 22 22 23 23 24 24 25 25 26 26 27 27 28 28 29 30 30];
11 t = [t 22 31 23 30 24 34 25 35 26 27 36 28 37 29 38 39 32 33];
12 s = [s 31 31 32 33 33 34 34 35 35 36 36 37 37 38 38 39 40];
13 t = [t 32 40 33 34 41 35 42 36 43 37 44 38 45 39 46 47 41];
14 s = [s 41 42 43 43 44 44 45 45 46 46 47 48 48 49 49 50 50];
15 t = [t 42 43 44 48 45 49 46 50 47 51 52 49 53 50 54 51 55];
16 s = [s 51 51 52 53 54 55 56];
17 t = [t 52 56 57 54 55 56 57];
18 % weights 为边权重向量, 表征各路段的长度(单位:m)
19 weights = [1200 800 1200 1300 1100 1900 400 600 500 600 ...
20             300 600 700 500 500 500 500 600 700 ...
21             500 600 700 800 700 1000 700 500 600 700 ...
22             600 1000 700 500 1000 1200 1500 1100 700 300 ...
23             600 800 900 700 500 800 900 1200 700 1000 ...
24             900 700 700 1400 600 1200 1000 700 700 700 ...
25             800 700 700 900 500 1100 600 1000 600 600 ...
26             2200 700 1000 1200 700 900 600 1000 700 1000 ...
27             600 600 1100 1400 1000 1200 900 600 1000 500 ...
28             600 1000 1200 700 1000 ]';
29 % flow 为边信息向量, 表征各路段的车流量(单位:辆/s)
```

```

30 flow = [3.9 3.2 2.9 0.9 4.8 2.2 4.6 2.4 4.1 2.7 ...
31     4.3 2.1 1.8 1.7 2.3 1.6 2.7 1.9 1.9 1.7 ...
32     2.5 2.3 2.0 3.0 1.9 2.2 2.1 2.3 2.2 2.1 ...
33     2.8 2.0 1.8 1.9 2.6 2.0 1.8 3.0 2.4 1.7 ...
34     2.7 1.9 2.6 3.8 2.1 2.1 2.7 1.9 1.7 1.8 ...
35     2.4 2.3 1.2 1.1 1.9 2.2 1.7 1.9 1.3 2.7 ...
36     2.2 2.3 3.5 2.5 2.6 2.9 2.1 3.2 2.9 2.2 ...
37     1.8 1.9 1.9 2.0 2.3 2.3 2.0 2.4 1.7 1.8 ...
38     1.6 0.3 1.6 2.6 1.5 1.9 1.4 1.5 1.6 1.3 ...
39     1.7 2.6 2.4 2.0 1.8 ]';
40 % 创建一个边信息表，其中包含变量 EndNodes, Weight, Flow
41 EdgeTable = table([s' t'],weights,flow, ...
42     'VariableNames',{'EndNodes' 'Weight' 'Flow'});
43 % 使用节点和边表创建图
44 G = graph(EdgeTable);
45 H = plot(G,'EdgeLabel',G.Edges.Weight);
46 % 求所有节点对组的最短路径距离，d(i,j) 是节点 i 和节点 j 之间的最短路径的长度
47 d = distances(G);

```

Code 2. 基于 Dijkstra 算法的最短距离计算

### A.3. 附录 C

```

1 num = 20;          % 拟布局的充电桩数量
2 Lmax = 4000;       % 充电桩布局的最大允许空白距离(单位:m)
3 x = zeros(95,1);   % 若在路段i的边上充电桩，则 xi=1, 否则 xi=0
4 y = zeros(1596,1); % 若在最短路径p上至少有1个充电桩，则 yp=1 ,否则 yp=0
5
6 % dv 为决策向量，包括 x 和 y
7 dv = [x;y];
8
9 % objfun 为目标函数的系数向量，负号表示求最大值
10 objfun = zeros(1,95);
11 for i = 1:56
12     for j = i+1:57
13         P = shortestpath(G,i,j);
14         flowsum = 0;
15         for k = 1:(length(P)-1)
16             index1 = find(G.Edges.EndNodes(:,1)==min(P(k:k+1)));
17             index2 = find(G.Edges.EndNodes(index1,2)==max(P(k:k+1)));
18             index = index1(index2);
19             flowsum = flowsum+G.Edges.Flow(index);
20         end
21         objfun = [objfun -flowsum];
22     end
23 end
24 intcon = 1:length(dv);
25
26 % 约束条件1：对于每条最短路径p，所经过每个路段的xi的和应大于该路径的yp
27 A1 = [zeros(1596,95) eye(1596,1596)];
28 for i = 1:56
29     for j = i+1:57
30         P = shortestpath(G,i,j);
31         p = (114-i)*(i-1)/2+j-i;
32         for k = 1:(length(P)-1)
33             index1 = find(G.Edges.EndNodes(:,1)==min(P(k:k+1)));
34             index2 = find(G.Edges.EndNodes(index1,2)==max(P(k:k+1)));
35             index = index1(index2);
36             A1(p,index) = -1;
37         end
38     end

```

```

39 end
40 b1 = zeros(1596,1);
41
42 % 约束条件2: 长度超过 Lmax 的最短路径 p 上必须分布有充电桩
43 A2 = [zeros(1596,95) eye(1596,1596)];
44 b2 = zeros(1596,1);
45 for i = 1:56
46     for j = i+1:57
47         p = (114-i)*(i-1)/2+j-i;
48         A2(p,95+p) = -d(i,j);
49         b2(p) = Lmax-d(i,j);
50     end
51 end
52
53 % 不等式约束 A*dv <= b
54 % A 为不等式约束方程组的系数矩阵, b 为不等式约束方程组的系数向量
55 A = [A1;A2];
56 b = [b1;b2];
57
58 % 等式约束 Aeq*dv = beq
59 % Aeq 为等式约束方程组的系数矩阵, beq 为等式约束方程组的系数向量
60 Aeq = [ones(1,95) zeros(1,1596)];
61 beq = num;
62
63 % 变量 dv 的下界和上界, 使解始终在 lb    dv    ub 范围内, 即0-1规划
64 lb = zeros(1,length(dv));
65 ub = ones(1,length(dv));
66
67 % 求 min objfun*dv 即 max -objfun*dv 的整数解
68 [dv,fval] = intlinprog(objfun,intcon,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
69 x = dv(1:95);
70 y = dv(95+(1:1596));
71
72 % 在图中突出分布有充电桩的各个路段
73 result = find(round(x)==1);
74 highlight(H,'Edges',result)

```

**Code 3.** MATLAB 仿真选定充电设施位置 (优化后)

## References

- [1] E. W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs,” *Numerische Mathematik*, vol. 1, pp. 269–271, 1959. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:123284777>.
- [2] R. Aboolian, O. Berman, and D. Krass, “Competitive facility location and design problem,” *European Journal of Operational Research*, vol. 182, no. 1, pp. 40–62, 2007, ISSN: 0377-2217. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.021>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221706008009>.
- [3] 杭州市人民政府. “杭州市推进新能源电动汽车充电基础设施建设实施办法.” (2016), [Online]. Available: [https://www.hangzhou.gov.cn/art/2016/6/1/art\\_1176017\\_3793.html](https://www.hangzhou.gov.cn/art/2016/6/1/art_1176017_3793.html).
- [4] 电动汽车充电设施布局规划导则, [https://www.planning.org.cn/solicity/view\\_news?id=1838](https://www.planning.org.cn/solicity/view_news?id=1838), T/UPSC 0008-2021, 中国城市规划学会, 2021.