

ДУ СИЧЖОУ, КАПСКИЙ Д.В.

МОДЕЛЬ РАЗМЕЩЕНИЯ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ В МЕГАПОЛИСАХ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ПОИСКА ПО ВОРОБЬЯМ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Электромобили обладают такими характеристиками, как низкое энергопотребление и низкий уровень шума, и поэтому широко используются в современном обществе, особенно для перемещения в городах и мегаполисах. Активное применение электромобилей (легковых автомобилей и маршрутных пассажирских транспортных средств рельсовых и безрельсовых) в городах и особенно в мегаполисах снижает вредную нагрузку на экосистему поселения и повышает качество жизни в целом. Перемещения становятся менее экологически опасными и способствуют сокращению вредных выбросов в атмосферу в местах проживания и активностей городских жителей и туристов. Использование электромобилей требует их интеграции с зарядными станциями, и выбор разумного места для размещения зарядных станций, что может обеспечить поддержку эксплуатации электромобилей в крупнейших и больших городах, а особенно в мегаполисах. Исходя из этого, в данной статье исследуется проблема размещения зарядных станций для городских электромобилей. Во-первых, основные факторы размещения зарядных станций электромобилей анализируются с разных точек зрения, строится многоцелевая модель выбора адреса зарядной станции, предлагается алгоритмическая модель для улучшения алгоритма поиска по воробьям в качестве основы конкретного метода решения, и, наконец, проверяется эффект применения модели и метода решения путём анализа примеров. Из результатов проверки видно, что по сравнению с традиционным генетическим алгоритмом, алгоритмом роя частиц и другими методами выбора адреса, алгоритм, предложенный в данной статье, является более оптимизированным, что способствует улучшению обоснованности выбора адреса зарядной станции электромобиля и может быть распространён в широких масштабах.

Ключевые слова: электромобили; зарядные станции; алгоритм поиска по воробьям

Введение

Выбор места для зарядной станции электромобиля должен учитывать множество факторов, только комплексное рассмотрение всех аспектов факторов, может повысить рациональность выбора места для зарядной станции. Благодаря многолетней практической работе стало известно, что при выборе места для зарядной станции электромобиля в основном учитываются три фактора, соответственно: Строительство зарядных станций требует больших затрат, таких как затраты на рабочую силу, оборудование, снос существующих зданий, последующие затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание и т. д. [1]. Современные электромобили имеют небольшой запас хода и не могут передвигаться на большие расстояния, поэтому их необходимо своевременно заряжать каждый раз, когда они находятся в движении в течение определенного периода времени. Для достижения этой цели при строительстве зарядных станций необходимо учитывать расстояние между двумя соседними зарядными станциями, т. е. расстояние зарядки [2]. Поэтому при строительстве зарядной станции следует обращать внимание на удовлетворенность пользователей [3]. Стремительный рост числа электромобилей заставляет общественность уделять большое внимание распо-

ложению зарядных станций для электромобилей, научный и разумный выбор места строительства зарядной станции не только может обеспечить пользователям более качественное обслуживание, но и способствует быстрому развитию сферы электромобилей [22-28].

Построение модели

На основе вышеуказанных влияющих факторов и анализа описания проблемы можно построить модель выбора места и компоновки зарядных станций для электромобилей, включающую:

Модель удовлетворенности расстоянием и временем. Из приведенного выше анализа видно, что расстояние зарядки является одним из основных факторов, влияющих на готовность пользователей взимать плату. Если расстояние зарядки короткое, легче получить удовлетворение пользователя, тем самым увеличивая готовность пользователя взимать плату. Наоборот, это снизит удовлетворенность пользователей. Однако следует отметить, что когда уровень удовлетворенности достигнет предела, готовность пользователя взимать плату не будет продолжать расти. Исходя из этого, можно построить модель удовлетворенности расстоянием и временем, и выражение имеет вид:

$$f_i(d_{ij}) = \begin{cases} 0 & d_{ij} > d_{\max} \\ \frac{1}{2} + \cos \left[\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{d_{\max} - d_{\min}} \left(d_{ij} - \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2} \right) \right] & d_{\min} \leq d_{ij} \leq d_{\max} \\ 1 & 0 < d_{ij} \leq d_{\min} \end{cases}, \quad (1)$$

где $f_i(d_{ij})$ – модель удовлетворенности расстоянием и временем, d_{ij} – расстояние между точкой спроса i и зарядной станцией j ; d_{\min} – минимальная удовлетворенность; d_{\max} – максимальная удовлетворенность.

Модель удовлетворения времени ожидания. На зарядной станции установлено несколько зарядных станций. Каждая зарядная станция может одновременно заряжать только один автомобиль. Когда на станции нет простаивающих зарядных станций, другим пользователям приходится ждать напрямую, связанные с удовлетворенностью пользователя. Когда время ожидания превысит определенное значение, пользователи будут искать другие зарядные станции. Исходя из этого, можно построить соответствующую модель и получить выражение:

$$f(t_j) = \begin{cases} 0 & d_j > d_{\max} \\ \frac{1}{2} + \cos \left[\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{d_{\max} - d_{\min}} \left(d_j - \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2} \right) \right] & d_{\min} \leq d_j \leq d_{\max} \\ 1 & 0 < d_j \leq d_{\min} \end{cases}, \quad (2)$$

где $f(t_j)$ – модель удовлетворенности временем ожидания пользователя; t_j – время ожидания пользователя при выборе зарядной станции k ; t_{\max} – максимальное значение времени ожидания; t_{\min} – минимальное значение времени ожидания.

После объединения двух моделей удовлетворенности можно получить комплексную модель удовлетворенности в виде выражения:

$$\rho(w) = 0,0256 + 0,00039w + 0,000034w^2. \quad (3)$$

где $\max F_1$ – модель наивысшего общего удовлетворения; i – порядковый номер точки спроса; I – обозначает количество всех точек спроса в определенном диапазоне; j – порядковый номер зарядной станции кандидата; J – количество всех зарядных станций кандидата; q_i количество заявок на зарядку для точки спроса i ; Y_{ij} – переменная решения 0-1, например, если точка спроса i обращается к зарядной станции кандидата j для получения услуги зарядки, она принимает значение 1, и наоборот, она принимает значение 0.

Модель минимизации затрат. Строительство зарядной станции и последующее управление эксплуатацией и техническим обслуживанием требуют больших затрат, для того чтобы зарядная станция предоставляла пользователям качественные услуги, в то же время, снижая эксплуатационные расходы, можно создать более высокую экономическую выгоду для зарядной станции. В результате, модель

минимизации затрат может быть построена после интеграции различных затрат:

$$\min F_2 = \sum_{j=1}^J (O + \beta N_j + \mu N_j^2) \frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} + \alpha \sum_{j=1}^J (O + \beta N_j + \mu N_j^2) \quad (4)$$

где $\max F_2$ – модель минимизации затрат; r_0 – ставка дисконтирования; μ – коэффициент инвестиций в зарядную станцию за весь ее жизненный цикл; α – коэффициент отношения стоимости эксплуатации и обслуживания к стоимости строительства; β – цена каждой зарядной свай; O – постоянные инвестиционные затраты; N_j – общее количество зарядных свай на станции.

Для того чтобы оптимизационная модель размещения зарядных станций EV давала точные результаты, необходимо установить разумные ограничения на использование зарядных станций. К основным аспектам относятся следующие:

(1) Он должен удовлетворять потребности пользователей электромобилей в зарядке, т. е:

$$Y_{ij} \leq y_j \forall i \in I \forall j \in J, \quad (5)$$

где Y_{ij} – переменная принятия решения 0-1, которая принимает значение 1, если станция построена в точке j кандидата на строительство зарядной станции, и 0 в противном случае.

(2) Все точки спроса могут быть назначены на соответствующую зарядную станцию, т. е:

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} y_j \geq 1 \forall i \in I. \quad (6)$$

(3) Количество зарядных свай в зарядной станции находится между максимальным и минимальным количеством зарядных свай, необходимых пользователю, т. е:

$$N_{j_{\max \min}} \quad (7)$$

где N_{\min} обозначает минимальное значение количества зарядных свай, требуемых пользователем, а N_{\max} – максимальное значение количества зарядных свай, требуемых пользователем.

(4) Для каждой точки спроса можно посетить только одну зарядную станцию, т. е:

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1 \forall i \in I. \quad (8)$$

(5) Общее количество зарядных станций в регионе должно соответствовать фактическим потребностям региона, т. е:

$$\sum_{j \in J} y_j = H, \quad (9)$$

где H – спрос на зарядные станции в регионе.

Процесс работы улучшенного алгоритма поиска по воробьям (ISSA)

В современной компьютерной сфере существует множество методов решения математических моделей, таких как алгоритм серого волка, алгоритм муравьиной колонии, алгоритм поиска капуцинов, улучшенный алгоритм поиска по воробьям (ISSA – improved sparrow search algorithm) и т. д. [6-21], каждый алгоритм имеет свои характеристики, среди которых процесс работы алгоритма ISSA прост, скорость сходимости быстрая, а полученные результаты более точные и т. д., поэтому в данном исследовании алгоритм ISSA используется для расчета оптимизационной модели выбора места для зарядной станции электромобиля [4].

Анализ примеров применения и настройка параметров

В качестве объекта исследования для анализа эффективности применения описанной выше модели выбора площадки и алгоритма решения используется определенный условный регион. Регион находится в диапазоне $[0, 50] \times [0, 50]$, который содержит в общей сложности 30 точек спроса с 10 альтернативными площадками. Затем параметры модели и алгоритма устанавливаются в соответствии с вышеизложенным, в том числе: O – устанавливается на уровне 1000000

юаней; β – устанавливается на уровне 100 000 юаней за единицу; минимальное количество зарядных станций, N_{\min} , устанавливается на уровне 4, а максимальное – на уровне 20; μ – устанавливается на уровне 20 000 юаней за единицу; d_{\max} устанавливается на уровне 3 км, а d_{\min} – на уровне 1 км; время зарядки автомобиля устанавливается на уровне 60 минут; t_{\max} – 10 мин, t_{\min} – 3 мин, время амортизации оборудования – 20 лет, r_0 – 0,08, α – 0,1, общее количество зарядных станций – 6.

Для того чтобы проверить эффект от применения алгоритма ISSA sparrow при размещении зарядных станций. В данной работе в качестве сравнения выбраны четыре обычных алгоритма, а расчет и анализ размещения зарядных станций производится аналогичным образом. Среди них число итераций установлено на 100, а число популяций – на 30 для расчета выбора места. Кроме того, соответствующие параметры заданы в соответствии с процессом работы различных алгоритмов, как показано в таблице 1.

Анализ результатов

На основе вышеуказанных настроек параметров, путем расчета модели размещения, чтобы получить результаты размещения зарядных станций при различных условиях алгоритма, как показано в таблице 2.

Таблица 1 алгоритмов и их параметров [4-21]

| Алгоритм | Основные параметры |
|---------------------------------------|---|
| Базовый алгоритм поиска воробья (SSA) | Доля первооткрывателей (PD) установлена на 20 %, порог оповещения (R^2) установлен на 0,8, а доля разведчиков (SD) установлена на 10 % |
| Оптимизация роя частиц (PSO) | Коэффициент обучения установлен на 1, а вес инерции установлен на 0,3 |
| Алгоритм поиска ISSA Sparrow | Доля первооткрывателя (PD) установлена на 20 %, порог оповещения (R^2) установлен на 0,8, доля разведчика (SD) установлена на 10 %, максимальный вес инерции (ω_{\max}) установлен на 1, а минимальный вес инерционный вес (ω_{\min}) установлен на 0,4 |
| Алгоритм Харриса Хоука (ННО) | $E1$ линейно уменьшается от 2 до 0 |
| Генетический алгоритм (GA) | Вероятность кроссовера установлена на 0,99, а вероятность мутации – на 0,1 |

Таблица 2. Оптимальные результаты размещения зарядных станций

| Индикатор | SSA | PSO | ISSA | ННО | GA |
|-----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| номер | [2,3,5,6,7,9] | [4,2,7,10,8,5] | [4,6,10,2,7,5] | [5,10,6,7,8,2] | [2,8,5,6,4,7] |
| целевая функция F1 | $7,349 \times 10^{-2}$ | $5,884 \times 10^{-2}$ | $7,894 \times 10^{-2}$ | $7,241 \times 10^{-2}$ | $7,620 \times 10^{-2}$ |
| целевая функция F2 | $4,035 \times 10^{-3}$ | $3,878 \times 10^{-3}$ | $4,196 \times 10^{-3}$ | $4,871 \times 10^{-3}$ | $5,789 \times 10^{-3}$ |
| целевая составная функция F | 0,1544 | 0,2398 | 0,1259 | 0,1875 | 0,1930 |

Из результатов анализа видно, что среди пяти алгоритмов F-значение алгоритма SSA составляет 0,1544, F-значение алгоритма PSO – 0,2398, F-значение алгоритма ISSA – 0,1259, F-значение алгоритма ННО – 0,1875, а F-значение алгоритма GA – 0,1930, самое высокое среди алгоритма PSO и самое низкое среди алгоритма ISSA, что указывает на то, что результаты, полученные алгоритмом ISSA, являются наиболее оптимальными. С точки зрения сходимости значения пригодности, алгоритм ISSA сходится быстрее и имеет самое низкое значение пригодности, которое уменьшается до 0,125 при количестве итераций 30; алгоритм PSO и алгоритм SSA сходятся

быстрее, но значение пригодности находится на высоком уровне, составляя около 0,24 и 0,15 соответственно. Алгоритм ISSA дает оптимальные результаты и работает лучше других четырех алгоритмов.

Заключение

Авторами предлагается модель размещения зарядных станций для электромобилей, основанная на улучшенном алгоритме ISSA. Благодаря применению разработанной модели можно определить наилучшее местоположение зарядной станции и снизить затраты на строительство, эксплуатацию и обслуживание зарядных станций.

REFERENCES

1. **Xiao Zhiliang, Wang Lijuan, Zheng Yanyu.** Research on site selection strategy for new energy vehicle charging stations based on particle swarm optimization algorithm [J]. *Transportation Technology and Management*, 2024, 05(04): 38-40.
2. **Jiang Jinjian, Zhu Weigang.** Optimization of electric vehicle charging pile layout based on adaptive particle swarm algorithm [J]. *Journal of Anqing Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 29(04): 47-51.
3. **Zeng Xueqi.** Research trends on location optimization of electric vehicle charging facilities in transit - Comparative study of network-based and meta-network modeling solution methods [J]. *Urban Transportation*, 2023, 21(05): 125-127.
4. **Hao Huimin, Wang Gaili, Zhang Bo.** Research on location selection of new energy vehicle charging stations based on accurate center of gravity method - taking Urumqi as an example [J]. *China Storage and Transportation*, 2023, 22(05): 79-80.
5. **Liu Liang, Liu Fuhua, Gong Tao, etc.** A brief discussion on the location and capacity optimization strategies of charging stations (piles) based on charging needs [J]. *Times Automobile*, 2022, 30(14): 116-118.
6. *Analiz algoritmov obnaruzhenija dorozhno-transportnyh incidentov na skorostnyh avtomagistraljah, ispol'zujushih stacionarnye detektory transporta* / D.B. Navoj, D.V. Kapskij, N.V. Filippova, I.N. Pugachev // *Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika*. – 2023. – № 4. – P. 37-49. – DOI: 10.21122/2309-4923-2023-4-37-49.
7. *Analiz mirovogo opyta v primenenii iskusstvennogo intellekta v sistemah upravlenija dorozhnym dvizheniem razlichnogo urovnja* / D. B. Navoj, D. V. Kapskij, N. A. Filippova, I. N. Pugachev // *Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika*. – 2024. – № 1. – P. 26-36. – DOI 10.21122/2309-4923-2024-1-26-36. – EDN YFVQAE.
8. **Yang X.S., Deb S.** Engineering optimisation by cuckoo search // *Int. J. Math. Modell. Numer. Optim.* 2010. V. 1. No. 4. P. 330–343.
9. **Mirjalili S., Lewis A.** The whale optimization algorithm // *Advanc. Engin. Software*. 2016. V. 95. P. 51–67.
10. **Mirjalili S.** SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems // *Knowledge-Based Syst.* 2016. V. 96. P. 120–133.
11. **Heidari A.A., Mirjalili S., Faris H., et al.** Harris hawks optimization: Algorithm and applications // *Future Generat. Comput. Syst.* 2019. V. 97. P. 849–872.
12. **Jain M., Singh V., Rani A.** A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm // *Swarm Evoluti. Comput.* 2019. V. 44. P. 148–175.
13. **Fathollahi-Fard A.M., Hajiaghaei-Keshteli M., Tavakkoli-Moghaddam R.** Red deer algorithm (RDA): a new nature-inspired meta-heuristic // *Soft Comput.* 2020. V. 24. P. 14637–14665.
14. **Xue J., Shen B.** A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm // *Syst. Sci. Control Engine.* 2020. V. 8. No. 1. P. 22–34.
15. **Braik M., Sheta A., Al-Hiary H.** A novel meta-heuristic search algorithm for solving optimization problems: capuchin search algorithm // *Neural Comput. Appli.* 2021. V. 33. P. 2515–2547.
16. **Abualigah L., Yousri D., Abd Elaziz M., et al.** Aquila optimizer: a novel metaheuristic optimization algorithm // *Comput. Indust. Engin.* 2021. V. 157. P. 107250.
17. **Braik M.S.** Chameleon Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for solving engineering design problems // *Expert Syst. Appl.* 2021. V. 174. P. 114685.
18. **Yang Z., Deng L., Wang Y., et al.** Aptenodytes forsteri optimization: Algorithm and applications // *Knowledge-Based Syst.* 2021. V. 232. P. 107483.
19. **Xue J., Shen B.** Dung beetle optimizer: A new meta-heuristic algorithm for global optimization // *J. Supercomput.* 2023. V. 79. No. 7. P. 7305–7336.
20. **Zhong C., Li G., Meng Z.** Beluga whale optimization: A novel nature-inspired metaheuristic algorithm // *Knowledge-Based Syst.* 2022. V. 251. P. 109215.
21. **Wang Z., Liu P., Cui J., Xi Y., Zhang L.** Research on quantitative models of electric vehicle charging stations based on principle of energy equivalence // *Mathematical Problem In Engineering*. – 2013. – № 3. – P. 959–965.

22. Cui S., Zhao H., Wen H., Zhang C. Locating multiple size and multiple type of charging station for battery electricity vehicles // Sustainability. – 2018. – № 10. – P. 32–47.
23. Wolpert D.H., Macready W.G. No free lunch theorems for optimization // IEEE Transactions on Evoluti. Comput. 1997. V. 1. No. 1. P. 67–82.
24. Frade I., Ribeiro A., Goncalves G., Antunes A. Optimal Location of Charging Stations for Electric Vehicles in a Neighborhood in Lisbon, Portugal // Transportation Research Record. – 2011. – № 2. – P. 91–98.
25. Gimenez-Gaydou D. A., Ribeiro A. N., Gutierrea J., Antunes A.P. Optimal location of battery electric vehicle charging stations in urban areas: A new approach // International Journal of Sustainable Transport. – 2016. – № 10. – P. 393–405.
26. Ghamami M., Nie Y., Zockaie A. Planning charging infrastructure for plug-in electric vehicles in city centers // International Journal of Sustainable Transport. – 2016. – № 10. – P. 343–353.
27. He S., Kuo Y.H., Wu D. Incorporating institutional and spatial factors in the selection of the optimal locations of public electric vehicle charging facilities: A case study of Beijing, China // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2016. – № 7. – P. 131–148.
28. Mehrjerdi H., Hemmati R. Stochastic model for electric vehicle charging station integrated with wind energy // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2020. – № 37. – P. 157–177.

DU SIZHUO, KAPSKI D.V.

A MODEL FOR PLACING ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS IN MEGAPOLIS BASED ON THE SPARROW SEARCH ALGORITHM

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Electric vehicles have such characteristics as low energy consumption and low noise level, and therefore are widely used in modern society, especially for movement in cities and megacities. Active use of electric vehicles (passenger cars and rail and trackless passenger transport) in cities and especially in megalopolises reduces the harmful impact on the ecosystem of the settlement and improves the quality of life in general. Movements become less environmentally hazardous and help to reduce harmful emissions into the atmosphere in places of residence and activities of city residents and tourists. The use of electric vehicles requires their integration with charging stations, and the choice of a reasonable location for the placement of charging stations, which can support the operation of electric vehicles in the largest and large cities, and especially in megalopolises. Based on this, this article examines the problem of placing charging stations for urban electric vehicles. First, the main factors of placing electric vehicle charging stations are analyzed from different points of view, a multi-purpose model for choosing the address of the charging station is built, an algorithmic model is proposed to improve the sparrow search algorithm as the basis for a specific solution method, and finally, the effect of applying the model and solution method is verified by analyzing examples. From the verification results, it can be seen that compared with the traditional genetic algorithm, particle swarm algorithm and other address selection methods, the algorithm proposed in this paper is more optimized, which helps to improve the validity of choosing the address of the electric vehicle charging station and can be widely distributed.

Keywords: *electric vehicles; charging stations; sparrow search algorithm*

Ду Сичжоу, аспирант кафедры «Транспортные системы и технологии» Белорусского национального технического университета, магистр. Область интересов: моделирование транспортных процессов и систем, развитие экологически чистых видов транспорта и проектирование «зеленых» транспортных систем городов и мегаполисов.

Du Sizhuo, postgraduate student of the Department of Transport Systems and Technologies of the Belarusian National Technical University, master's degree. Area of interest: modeling of transport processes and systems, development of environmentally friendly types of transport and design of "green" transport systems of cities and megalopolises.

Капский Денис Васильевич, доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры «Транспортные системы и технологии» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования в области организации движения, технических средств регулирования и информационно-алгоритмического обеспечения управления движением, транспортного планирования и математического моделирования процессов транспортных систем.

Kapski Denis Vasilievich, Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor of the Department of Transport Systems and Technologies of the Belarusian National Technical University. Conducts research in the field of traffic management, technical means of regulation and information and algorithmic support for traffic control, transport planning and mathematical modeling of transport systems processes.

E-mail: d.kapsky@bntu.by