

基于 Benders 分解的电动汽车充电站选址决策研究

张择策, 武泽辰, 聂克剑, 沈天时

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 电动汽车已成为未来汽车的发展方向, 而充电站作为其能量来源, 其选址的优化研究有着重要的意义。然而, 电动汽车在某时间段内只能到 1 个充电站接受充电的基本假设已经不再适应电力市场化的大趋势。在不同充电站有不同充电价格的考虑下, 为实现充电站初始建设成本及用户充电总成本最小化, 电动汽车充电站选址优化问题可以看成 1 个有容量限制的单商品物流的设施选址问题。该问题可以用 1 个线性混合 0-1 规划模型来描述, 十分适合用 Benders 分解算法求解。

关键词: 电动汽车; 充电站; 选址决策; Benders 分解

Abstract: Electric vehicles have become the future of vehicles. The charging station is the source of power for electric vehicles and its optimization study of site selection is of great importance. However, the basic assumption that an electric vehicle should be charged at one charge station at one time has no longer conformed to the trend of electricity market. Under the consideration that different stations can have different prices, the research on site selection of charging station for electric vehicles can be seen as a site selection problem with single capacity-limited goods flow in order to minimize the initial construction cost and the total users' charging service cost. This problem can be described with a mixed-integer programming problems and be easily solved by the Benders decomposition.

Key words: electric vehicles; charging station; site selection decision; Benders decomposition

中图分类号: U469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)05-0081-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.05.018

0 引言

现今, 国际油价日益攀升, 在全球性石化能源匮乏和节能减排需求的推动下, 电动汽车已成为未来汽车的发展方向。而作为电动汽车运营所必须的基础配套服务设施, 充电站的建设位置与规模对推广电动汽车有着重要的意义^[1]。

近年来, 许多学者对电动汽车充电站的分类、规划、建设做了大量研究, 其中不乏优秀和具有启发性的成果。文献[2]介绍了中国电动汽车充电站的发展现状, 提出了电动汽车充电站规划所需遵循的原则, 分析了影响规划的一些因素。文献[3]为模拟电动汽车的数量引入居民负荷的分布情况, 再将充电站的年最大化运营收益作为目标来进行规划。文献[4]出台了标准文件, 不仅规定了充电站的构成、功能、技术及安全要求, 还对充电站进行了等级划分。文献[5]将德尔菲法和灰色层次分析法集成作为一种新的综合评价方法, 并将其运用于电动汽车充

电站选址最优决策中。文献[6]采用遗传算法对基于用户充电费用和充电站运营费用总和最小化选址模型进行了算例验证。文献[7]则将博弈论引入了电动汽车充电站的选址研究中。

下面为电动汽车充电站的选址建立了更为简洁和灵活的模型。采用解决混合 0-1 规划问题极为有效的 Benders 分解法求解该模型, 并用算例进行了验证。为建立电动汽车充电站选址优化模型提供了思路, 对优化电动汽车充电站选址方案有一定指导作用。

1 模型建立

假定所有充电站的候选点都是经过一定的论证和分析得到, 即符合充电站的选址原则、安全条件和环境条件, 且已经考虑过需求点及需求量的分布, 即仅考虑充电站的修建与否。设充电站的候选地点集合为 $N = \{1, \dots, n\}$, 其中, 第 $j (j \in N)$ 个候选地点的建设费用为 f_j , 该地点所建充电站的动力蓄电池储

存能力为 u_j 。设需要充电的电动汽车集合为 $M = \{1, \dots, m\}$, 其中, 第 i ($i \in M$) 辆车所需要充电的电量为 b_i 。文献 [1] 认为电动汽车充电站的选址包含了如下假设: 电动汽车在 1 个固定的时间段内只能到同 1 个充电站接受充电服务。这与人们的实际经验是相符合的, 正如加油一样, 大部分人在加油的时候会选择加满, 而不会考虑去多个加油站加油。

然而, 在特殊的安全原则和环境要求下, 不同地点的充电站建设成本差异很大, 它们的动力蓄电池储存能力也不尽相同。文献 [2, 8-10] 都认为电动汽车充电站建设规划初期不应以盈利为目的; 但根据年初电改文件中的精神, 电力市场化已成为不可逆的趋势, 因此, 在电力市场的条件下, 应该考虑不同的充电站有着不同的充电价格。基于上述考虑, 对于充电用户来说最经济的做法不再是就近寻找充电站, 而是综合考虑充电站的充电价格和距离充电站的距离(距离远意味着消耗大, 成本高), 在此假设 x_{ij} 为第 i 辆电动汽车在第 j 个候选地点所充的电量, c_{ij} 为第 i 辆电动汽车去第 j 个候选地点充电的综合成本。显然, 若第 j 个候选地点没有修建充电站, 电动汽车不能在该地点充电。在此, 引入 0-1 变量 $y_j \in B^n$, $y_j = 1$ 表示在第 j 个候选地点修建了充电站, $y_j = 0$ 表示在第 j 个候选地点没有修建充电站。

至此, 电动汽车充电站选址优化问题抽象为 1 个有容量限制的单商品货物流的设施选址问题, 目标是实现充电站初始建设成本及用户充电总成本最小化。该问题可以用 1 个线性混合 0-1 规划模型来描述。

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} C_{ij} x_{ij} + \sum_{j \in N} f_j y_j \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{j \in N} x_{ij} = b_i, i \in M \\ & \sum_{i \in M} x_{ij} - u_j y_j \leq 0, j \in N \\ & x_{ij} \geq 0, i \in M, j \in N, y \in B^n \end{aligned}$$

值得一提的是, 该模型还有 1 个更具实用性的优点。即 c_{ij} 可以涵盖更多复杂的考虑, 比如电动车类型的不同和充电站等级的不同, 即使每 1 辆汽车在每个候选充电站的成本全部不同都不影响模型的准确性。更为复杂和精确的模型在该模型上进行嫁接也十分容易。

2 Benders 分解

Benders 分解算法是 J. F. Benders 在 1962 年首

先提出的, 是一种求解混合整数规划问题的算法。Benders 分解算法将具有复杂变量的规划问题分解为线性规划和整数规划, 用割平面的方法分解出主问题与子问题, 通过迭代的方法求解出最优值。由于 Benders 分解在求解其主问题之时, 往往通过求解子问题的对偶来求解单步子问题的最优解, 所以在论述 Benders 分解之前, 先介绍对偶定理。

2.1 对偶原理

对于 1 个代求解的线性规划(LP), 将其称之为原问题, 它可以被转换为 1 个等价的线性规划问题进行求解, 称转换后的问题为对偶问题。

不失一般性, 1 个线性规划的原问题一般可以表示为如下形式。

$$\begin{aligned} \text{Minimize } z &= c^T x \\ \text{s. t.} \quad & Ax \geq b \\ & x \geq 0 \end{aligned}$$

式中: c 和 x 是 n 维向量; b 是 m 维向量; A 是 $m \times n$ 的矩阵; 线性函数 $c^T x$ 称为目标函数。线性不等式称为约束, 它们形成了目标函数求解最小值的 1 个可行域。原问题的目标函数的可行域可以写为 $\{x \in R^n | Ax \geq b, x \geq 0\}$ 。这个问题与它的对偶问题同解, 它的对偶问题可以表示为

$$\begin{aligned} \text{Maximize } z &= b^T y \\ \text{s. t.} \quad & Ay \leq c \\ & y \geq 0 \end{aligned}$$

可以看出在对偶问题中, 原问题的约束个数变成了对偶问题中的变量个数, 原问题中的变量个数变成了对偶问题中的约束个数, 因此对偶问题和目标问题的维数不同。很明显如果 1 个 LP 问题其变量个数较少而约束个数较多, 那么转化为求解它的对偶将会是比较容易的。对偶转换的法则如表 1 所示。

表 1 对偶关系表

原问题(或对偶问题)		对偶问题(或原问题)	
目标函数	求最大	求最小	目标函数
	≥ 0	$\geq$	
变量(n)	≤ 0	$\leq$	约束(m)
	无约束	$=$	
	$\leq$	≥ 0	
约束(m)	$\geq$	≥ 0	变量(n)
	$=$	无约束	

2.2 Benders 分解模型

1 个混合整数规划问题通常具有以下表达式形式:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } z &= c^T x + d^T y \\ \text{s. t. } Ay &\geq b \\ Ex + Fy &\geq h \quad \text{P1} \\ x &\geq 0, y \in S \end{aligned}$$

式中: A 为 $m \times m$ 维矩阵; E 为 $q \times p$ 维矩阵; F 为 $q \times N$ 维矩阵; x, c 为 p 维向量; y, d 为 n 维向量, 其中 y 为整数向量; s 为 n 维整数域。

由于 x 是个连续变量, y 是个整数变量, 所以 P1 是个混合整数规划问题, 如果把 y 固定那么目标就是 x 的线性函数。因此它也可以写成以下形式:

$$\text{Minimize}_{y \in R} \{ d^T y \mid Ay \geq b + \text{Min}\{ c^T x \mid Ex \geq h - Fy, x \geq 0 \} \}$$

式中, R 域表示满足以下条件 Y 的集合: 存在 $x \geq 0$, 使得 $Ex \geq h - Fy$, 并且 $y \in S$ 。

因此原问题 P1 可以被分解为 1 个主问题 (MP) 和 1 个子问题 (SP)。

首先求解主问题: MP

$$\begin{aligned} \text{Minimize } z_{\text{lower}} \\ \text{s. t. } z_{\text{lower}} &\geq d^T y \\ Ay &\geq b \quad \text{MP1} \\ y &\in S \end{aligned}$$

此处用 z_{lower} 来代替 $d^T y$ 来作为目标函数, 在求解主问题得到 1 个整数解 $\hat{y}$ 后, 考虑求解以下子问题。

$$\begin{aligned} \text{Minimize } c^T x \\ \text{s. t. } Ex &\geq h - F\hat{y} \quad \text{SP1} \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

SP1 通常通过求解它的对偶来求解, 现在给出其对偶形式如下:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } (h - F\hat{y})^T u \\ \text{s. t. } E^T u &\leq c \quad \text{SP2} \\ u &\geq 0 \end{aligned}$$

2.3 求解 Benders 模型的分支切割法

求解步骤如下:

1) 求解问题 MP1 得到一个起始的下界最优解 z_{upper} , 即此时的 $\hat{y}$ 。如果 MP1 不可行, 那么原始问题也一定不可行, 停止计算。如果 MP1 无界, 则令问题 MP1 中的 $z_{\text{lower}} = \infty$, 任取 1 个 $\hat{y}$, 进入步骤 2)。

2) 求解 SP1 或者 SP2, 以求解 SP2 为例, 就得到了原始问题的 1 个上界最优解为

$$z_{\text{upper}} = d^T \hat{y} + (h - F\hat{y})^T \hat{u}^p$$

如果 $|z_{\text{upper}} - z_{\text{lower}}| \leq \xi$, 则得

到最优解停止计算。否则产生 1 个新的限制为

$$z_{\text{lower}} \geq d^T \hat{y} + (h - F\hat{y})^T \hat{u}^p$$

用问题 MP2 代替问题 MP1 进行求解。

如果 SP2 无界, 那么在 MP2 中引入 1 个新的约束 $(h - F\hat{y})^T \hat{u}^r \leq 0$ 。 $\hat{u}^r$ 称之为极方向, 由以下问题求解得到

$$\begin{aligned} \text{Minimize } 1^T s \\ \text{St. } Ex + Is &\geq h - F\hat{y} \rightarrow u^r \\ x &\geq 0, s \geq 0 \end{aligned}$$

如果 SP2 不可行, 那么原问题要么不可行要么下无界停止计算。

3) 求解 MP2 得到 1 个新的下界最优解 z_{lower} 和 $\hat{y}$, 然后转步骤 2)。

$$\begin{aligned} \text{Minimize } z_{\text{lower}} \\ \text{s. t. } z_{\text{lower}} &\geq d^T y + (h - F\hat{y})^T u_i^p, i = 1 \cdots n_p \\ (h - F\hat{y})^T u_i^r &\leq 0, i = 1 \cdots n_r \\ Ay &\geq b \quad \text{MP2} \\ y &\in S \end{aligned}$$

因此整个算法的流程图如图 1。

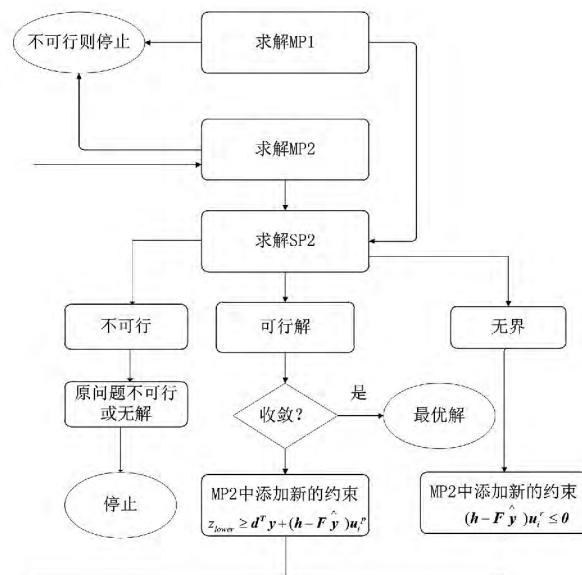


图 1 整个算法的流程图

3 算例研究

结合调研实际和所提模型的标准形式, 研究如下两个案例来验证模型和求解方法的有效性。假定在某一区域内有 10 个候选地点和 200 辆电动汽车。即 $N = \{1, \cdots, 10\}$, $M = \{1, \cdots, 200\}$ 。

案例 1 为候选地点的初始建设成本差别不大,

而动力电池存储容量差别较大的情形,数据见表 2 所示。

案例 2 为候选地点的动力蓄电池存储容量差别不大,而初始建设成本而较大的情形,数据见表 3 所示。

在此,成本初始建设(万元)用 S 表示,力蓄电池存储容量($\text{kW} \cdot \text{h}$)用 W 表示。

表 2 候选地点数据(案例 1)

候选地点	S	W	候选地点	S	W
1	150	1 360	6	155	870
2	150	960	7	160	790
3	140	1 280	8	160	1 290
4	140	740	9	165	2 200
5	155	1 060	10	165	1 020

表 3 候选地点数据(案例 2)

候选地点	S	W	候选地点	S	W
1	150	800	6	150	830
2	200	820	7	160	820
3	220	805	8	180	805
4	140	795	9	170	800
5	220	790	10	300	815

各充电汽车的充电需求量和去各候选地点充电的综合成本由于数据表格过大,在此没有给出。

经过计算,得到两个案例最后的决策情况如表 4 和表 5 所示。

表 4 决策结果(案例 1)

候选地点	是否修建充电站	候选地点	是否修建充电站
1	不修建	6	修建
2	修建	7	不修建
3	修建	8	修建
4	不修建	9	修建
5	修建	10	修建

表 5 决策结果(案例 2)

候选地点	是否修建充电站	候选地点	是否修建充电站
1	修建	6	修建
2	不修建	7	不修建
3	不修建	8	修建
4	修建	9	修建
5	不修建	10	不修建

对计算结果的分析如下:

1) 在案例 1 中(初始建设费用差别不大),从总的趋势上看,动力电池存储容量较大的会修建,而存储容量较小的不会。这符合生产实际的基本常识。但也有例外,比如候选地点 1 的存储容量比地点 6 大很多,但决策结果却显示在地点 1 处不修建,而在地点 6 修建。推测其原因是由于车辆到地点 1 处的综合成本较高,并且其影响已将大于初始建设费的影响。

2) 在案例 2 中(动力电池存储容量差别不大),从总的趋势上看,初始建设费用较低的会修建,而费用较高的不会。但也有例外,比如候选地点 7 的初始建设费用比地点 8 低,但决策结果却显示在地点 7 处不修建而在地点 8 修建,其原因同上。

4 结论与展望

1) 在电力市场的条件下,应取缔汽车在某时间段内只能到 1 个充电站接受充电的基本假设,转而考虑不同的充电站有不同的充电价格。用户最经济的做法不再是就近寻找充电站,而是综合考虑充电站的充电价格和前往充电站的消耗成本。

2) 电动汽车充电站选址优化问题本质上是一个有容量限制的单品物流的设施选址问题。该问题可以用 1 个线性混合 0-1 规划模型来描述。给出两个案例,采用 Benders 分解算法,用割平面分解出主问题与子问题,通过迭代的方法求解出了最优决策,验证了模型与方法的正确性。

3) 数学模型中的 C_{ij} 可以涵盖许多复杂的考虑,使得模型简洁而灵活,有良好的可移植性。随着电动车在汽车中的渗透率越来越高,也许会出现一种专用 App 可以为用户提供当前综合成本最低的最优充电地点。

参考文献

- [1] 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(工学版),2011,41(6): 136-142.
- [2] 徐凡,俞国勤,顾临峰,等. 电动汽车充电站布局规划

- 浅析 [J]. 华东电力, 2009, 37(10): 1672 - 1678.
- [1] 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.
- [2] 北京市质量技术监督局. DB11 / Z 728 - 2010 电动汽车电能供给与保障技术规范: 充电站 [S]. 北京: 国家标准出版社, 2010.
- [3] 冯超, 周步祥, 林楠, 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.
- [4] 应夏晖, 李锦霞, 陈锦生. 电动汽车充电站的选址优化研究 [J]. 交通科技与经济, 2014, 16(1): 43 - 46.
- [5] 周洪超, 李海峰. 基于博弈论的电动汽车充电站选址优化模型研究 [J]. 科技和产业, 2011, 11(2): 51 - 54.
- [6] 康继光, 卫振林, 程丹明, 等. 电动汽车充电模式与充电站建设研究 [J]. 电力需求侧管理, 2009, 11(5): 64 - 66.
- [7] NANSIAK, TOHNOB, KONOCM, et al. Life - cycle Analysis of Charging Infrastructure for Electric Vehicles [J]. Applied Energy, 2010, 70(3): 251 - 265.
- [8] 王芳芳. 多等级纯电动公交充电站选址问题研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [9] 默哈莫德·夏班, 刘皓明, 李卫星, 等. 静态安全约束下基于 Benders 分解算法的可用传输容量计算 [J]. 中国电机工程学报, 2003(8): 8 - 12.
- [10] 王成山, 张义. 基于 Bender's 分解和内点法的无功优化规划 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003(4): 46 - 50, 62.
- [11] 张义. 基于 Bender's 分解和内点法的无功优化规划 [D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [12] Binato, S.; Pereira, M. V. F. Granville, S., A New Benders Decomposition Approach to Solve Power Transmission Network Design Problems [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2001, 16(2): 235 - 240.
- [13] Yuan Li; McCalley, J. D. A General Benders Decomposition Structure for Power System Decision Problems [C]. Electro/Information Technology, EIT 2008, IEEE International Conference on, 2008: 71 - 77.
- 作者简介:
- 张择策(1992), 西安交通大学在读硕士生, 主要研究方向为特高压直流过电压、电力系统可靠性;
- 武泽辰(1991), 西安交通大学在读硕士生, 主要研究方向为电力市场、新能源并网;
- 聂克剑(1992), 西安交通大学在读硕士生, 主要研究方向为电力系统稳定性与控制;
- 沈天时(1993), 西安交通大学在读硕士生, 主要研究方向为电力系统无功优化。
- (收稿日期: 2015 - 07 - 23)

(上接第66页)

14 Ω , 可以降低 220kV 侧短路电流 8 kA 以上。

3) 500 kV 自耦变压器自身的中性点绝缘水平能够满足因变压器中性点经小电抗接地造成的中性点电压偏移的绝缘要求。

参考文献

- [1] 王非, 李群炬. 京津唐电网限制短路电流问题探讨 [J]. 华北电力技术, 2007(4): 17 - 19.
- [2] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制措施 [J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42 - 45.
- [3] 张弘, 甘德强. 500 kV 变压器经小电抗接地的应用分析 [J]. 电力建设, 2009, 29(11): 38 - 40.
- [4] 朱天游. 500 kV 自耦变压器中性点经小电抗接地方式在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 1999, 23(4): 15 - 18.
- [5] 杨雄平, 李力, 李扬絮, 等. 限制广东 500 kV 电网短路电流运行方案 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 104 - 107.
- [6] 胡志广, 王峰, 蔡泽祥. 变压器直流偏磁抑制装置及其对继电保护影响的分析 [J]. 广东电力, 2007, 20(10): 20 - 23.
- [7] 周坚, 胡宏, 庄侃沁, 等. 华东 500 kV 电网短路电流分析及其限制措施探讨 [J]. 华东电力, 2006, 34(7): 55 - 59.
- [8] 吴荻. 限制大电网的短路电流水平的措施的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [9] 李琥, 黄河, 张谦. 江苏电网限制单相接地短路电流措施的研究 [J]. 江苏电机工程, 2009, 28(1): 19 - 21.
- [10] 郑玉成, 潘瑾. 对大型变压器零序阻抗与正序阻抗之间的关系研究 [J]. 河北电力技术, 2001, 20(1): 4 - 6.
- 作者简介:
- 李 燕(1986), 工程师, 从事电力系统分析相关工作。
- (收稿日期: 2015 - 07 - 21)