

PEV 快速充电站的交通和电网耦合选址和选型

IEEE 的学生会员 Zhang Hongcai, IEEE 的 Scott J. Moura, 胡泽纯的 IEEE 和 IEEE 的宋永华的研究员

摘要—插电式电动汽车 (PEV) 充电站将未来的运输系统和动力系统耦合在一起。也就是说, PEV 的行驶和充电行为将同时影响两个网络。考虑运输和电网之间的相互作用, 本文研究了 PEV 快速充电站的最佳规划。地理规划区域是由高压配电网供电的公路运输网。首先, 我们提出了限流加油位置模型 (CFRLM), 以明确捕获在行驶里程限制下交通网络上的 PEV 充电需求。然后, 基于 CFRLM, 建立了考虑交通和电力约束的 PEV 快速充电站规划的混合整数线性规划模型, 可以通过确定的分支定界方法求解。进行了数值实验, 以说明所提出的规划方法。分析了 PEV 数量, 电力系统安全运行约束和 PEV 范围的影响。

索引词—插电式电动汽车, 充电站, 计划, 容量加油的位置模型, 混合整数编程。

i. 介绍

P与内燃机汽车相比, 低排放和低能耗的大功率电动汽车被认为是对抗能源可持续性和气候变化的有前途的工具。

因此, 政府, 汽车公司, 能源公司等已经做出了大力推进电动汽车发展[1]。

采用 PEV 的主要障碍是与内燃机车辆相比, 它们的行驶距离有限—被称为“范围焦虑”[2]。因此, 正确放置 PEV 充电系统以减轻距离焦虑至关重要。通常, PEV 充电可分为两类: 1) 目的地充电, 即当 PEV 到达目的地时发生, 包括家庭充电, 工作场所充电

充电; 2) 紧急充电, 发生在 PEV 途中且其充电状态 (SoC) 降至某个阈值以下时。由于大多数客户的日常行驶里程都低于市场上的电动汽车的行驶里程, 因此目的地充电是电动汽车的主要能源供应方式。然而, 在长途驾驶的情况下, 特别是在高速公路网络上, 仍然需要补充 PEV 紧急充电[2]。通过在私人或公共停车场中部署低功率 (或正常功率) 充电器的分布式充电点, 可以满足目的地的充电需求, 而快速充电站则可以满足紧急充电需求[3]。近年来, 分布式充电站和快速充电站都获得了巨额投资。这些投资仍然不足以满足不断增长的 PEV 车队的需求。例如, 在中国, 到 2020 年计划再建设 480 万个分布式充电站和 1.2 万个快速充电站[4]。

由于快速充电站将交通运输和电力网络耦合在一起, 因此它们的位置和大小不仅会影响 PEV 的驾驶行为, 而且还会显著影响交通运输和电力网络的运行。因此, 快速充电站的规划应同时考虑运输和电力方面的限制。运输网络中快速充电站的位置和大小应满足 PEV 的驾驶要求, 同时确保电力系统的安全运行约束, 例如配电线路电流限制和节点电压限制。此外, 适当的快速充电站规划方法应将充电站和相应电网升级的投资成本降至最低。

PEV 充电站的规划已成为近年来的研究热点。我们通常可以将这些文献分为三个类别。

A. 运输方式

加油站的规划已经研究了数十年, 相应的方法已被采用并重新开发用于 PEV 充电站的规划。这些方法可以进一步分为三种主要方法:

a) 基于节点需求的计划[5] – [7]; b) 基于运输模拟的计划[8], [9]; c) 基于交通流量的规划[10] – [16]。基于节点需求的计划方法假设 PEV 充电发生在目标计划区域的某些地理节点上, 并定位充电站以满足充电需求[5] – [7]。但是, 这些

2016 年 5 月 31 日收到手稿; 修订于 2016 年 8 月 7 日; 公认 2016 年 9 月 27 日。发布日期 2016 年 10 月 3 日; 日期为当前版本, 2018 年 6 月 19 日。这项工作部分由国家自然科学基金资助 51477082, 部分由中国国家基础研究计划 2013CB228202 资助。论文编号 TSG-00731-2016。

张华, 胡祖和宋 Song 在清华大学电气工程系, 北京 100084 (e-mail: zechhu@tsinghua.edu.cn)。

SJ Moura 在加利福尼亚大学伯克利分校的土木与环境工程系任职, 美国加利福尼亚州 94720。

本白皮书中一个或多个附图的彩色版本可在线获得, 网址为: <http://ieeexplore.ieee.org>。

数字对象标识符 10.1109 / TSG.2016.2614939

1949-3053 © 2016 IEEE. 允许个人使用, 但是重新发布/重新发行需要 IEEE 许可。

看到 http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html 想要查询更多的信息。

这些方法仅考虑充电节点之间的地理直线距离,而忽略了交通网络的拥塞约束。基于运输模拟的计划方法使用模拟来估计 PEV 的充电需求。模拟通常基于现实世界的综合个人旅行调查数据[8], [9]。对于某些目标计划领域而言,获取此类数据可能会付出高昂的代价。考虑到 PEV 的流动性,一些研究人员提出了基于交通流量的规划方法[10] – [16]。这些方法使用始发地(OD)流量来估计充电需求。在[10]中,提出了流量捕获位置模型(FCLM),该模型试图在运输网络上定位一定数量的站点,以便捕获尽可能多的交通流量(需求)。FCLM 不考虑 PEV 的行驶里程限制。参考文献[11]将 FCLM 修改为加油位置模型(FRLM),该模型使用加油概念来考虑行驶距离。FRLM 及其修改版本在[12] – [16]中也得到了使用。从运输角度[5] – [16]的文章忽略了电力系统的约束,并且计划结果可能需要根据电力系统的实际情况进行调整。

B. 电气方式

作为一种新型的电力需求,电力系统中的 PEV 充电站规划也引起了很多关注。现有工作通常旨在将充电站设在电力系统中,以满足电力系统的经济或安全运行约束,同时使充电站的投资成本和相应的电网升级最小化。在[17]中,开发了一种两步式筛选方法来在配电网中定位充电站,并提出了一种改进的原对偶内点算法来确定规模。参考文献[18]提出了基于生命周期成本分析的配电网中电池充电/交换站的最佳设计框架。在[19]中,研究了在配电网中具有车辆到电网能力的 PEV 充电站的最佳尺寸和位置。在[20]中,开发了一个多目标优化问题,以获得配电网中充电站和可再生能源的最佳选址和规模。参考文献[17]–[20]忽略了运输限制,结果可能需要根据实际运输条件进行调整。

C. 多学科方法

考虑到运输和电力限制,很少有研究 PEV 充电站规划的论文。在[21]中,在运输和电力耦合网络中提出了一个平衡建模框架。他等。[21]假设传输节点的电价将影响 PEV 的充电选择,从而影响交通流量。但是,节点电价可能几乎不会影响交通流量,因为两个传输节点之间的地理位置通常很长,而且 PEV 从一个传输节点出发的成本

另一个节点高。在[22]中,提出了一种多目标 PEV 充电站规划方法,以确保充电服务,同时减少配电网中的功率损耗和电压偏差。使用了 FCLM,并采用了启发式仿真程序来考虑行驶里程限制。姚等。[23]研究了基于多目标进化算法的综合配电网和 PEV 充电系统的协调规划。作者使用 FCLM 来考虑运输约束,而忽略了行驶里程约束。另外,[22]和[23]考虑了服务半径比典型 PEV 的行驶范围小得多的低压配电网,因此无法保证规划结果的最优性。参考文献[24]提出了一种混合整数非线性规划模型,用于通过遗传算法求解 PEV 充电站的最佳选址和规模。仅假设 PEV 充电需求在目标区域内均匀分布。罗等。[25]研究了充电站选址,该选址平衡了 PEV 所有者,充电站所有者和电网运营商的利益。仅假设 PEV 充电对电网的影响与充电功率成正比。

本文采用多学科方法研究了公路 PEV 快速充电站的最佳规划,其中考虑了运输和电力约束。规划的目标是增加社会福利,我们假设社会规划者可以访问交通和电力系统信息。地理规划区域是由具有较大服务半径的高压配电网提供动力的公路运输网。与已发表的文献相比,本文的主要创新是双重的:

- 1) 提出了一种容量化的加油位置模型(CFRLM),其中明确纳入了电动汽车的行驶里程约束。CFRLM 利用 OD 流量估计 PEV 充电需求,并采用排队论对交通网络上 PEV 充电站的服务能力进行建模。
- 2) 建立了混合运输和配送网络中快速充电站规划的混合整数线性规划(MILP)模型,可以通过确定性的分支定界方法进行求解。该规划模型可以优化充电站和配电网的投资成本。同时考虑了 CFRLM 的运输约束和配电网的安全运营约束。

还进行了数值实验,以验证所提出的规划方法。还分析了 PEV 数量,电力系统安全操作约束,PEV 行驶距离和 PEV 到达/离开 SoC 等各种因素的影响。

CFRLM 在第二节中制定。第三部分介绍了用于高速公路快速充电站规划的混合整数线性规划模型。案例研究在第四节中介绍。第五节提供结论和讨论。

表 I
CFRLM 中使用的符号

i, j	Index of nodes for original transportation network. $i, j \in \Psi_{(q)}^{\text{in}}$
(i, j)	Index of arcs from node i to node j . $(i, j) \in A_{(q)}$
q	Index of paths of the transportation network. $q \in Q$
$\Psi_{(q)}^{\text{in}}$	Set of nodes of the original network (on path q).
$\hat{\Psi}_{(q)}^{\text{in}}$	Set of nodes of the expanded network (on path q).
$A_{(q)}$	Set of arcs of the original network (on path q).
$\hat{A}_{(q)}$	Set of arcs of the expanded network (on path q).
$d_{i,j}$	Distance between node i and node j .
$F_{(q)}$	Volume of traffic flow (on path q).
$Q_{(i)}$	Set of paths of the original network (travel through node i).
R	Driving range of PEVs, in km.
SoC_a	Arrival SoC of a PEV at the origin node of a path.
SoC_d	Departure SoC of a PEV at the destination node of a path.
$c_{1,i}$	Fixed costs for building a new charging station at node i , including buildings costs etc.
$c_{2,i}$	Costs for adding an extra charging spot in a station at node i , including land use costs, charging spot purchase costs etc.
c_p	Penalty for unsatisfied charging demand.
$g(y_i)$	Charging service ability, given y_i charging spots.
\hat{y}_i	Maximum possible number of charging spots in station i .
s_i	Binary variable denoting charging station location at node i : $s_i = 1$, if there is a station at node i ; $s_i = 0$, otherwise.
x_{ij}^q	Continuous variable, fraction of OD flow on arc (i, j) , path q .
y_i	Integer variable, number of charging spots in station at node i .

II. 容量加油位置模型

所提出的 CFRLM 基于[12]中提出并在[16]中使用的 FRLM 的灵活表述。与[12]和[16]相比, CFRLM 的优势是双重的。首先,在 CFRLM 中考虑了充电站的服务能力。由于 PEV 充电站的投资成本和最大充电功率与其容量(即充电点的数量)有关,因此考虑使用容量较大的充电站可使规划模型更加实用。定义每个充电站的服务能力,排队论

在 CFRLM 中实现。其次,我们使不满意

充电需求。具体地,由于有限的配电线路容量,满足充电需求可能是不可行的。在这里,我们使用惩罚项来惩罚 CFRLM 中未满足的收费要求。

A. 行驶里程逻辑与交通网络扩展

在这一部分中,我们回顾了[12]中的行驶里程约束逻辑(或加油逻辑)和相应的交通网络扩展技术,这是 CFRLM 的基础。相应的符号可以在表 I 中找到。我们以图 1 (a) 中的简单运输网络 $G(\backslash 11^n, A_q)$ 为例,该运输网络具有一条单一的行驶路径,即

路径 q 。该路径具有 4 个运输节点,即 $\backslash 11^n = \{A, B, C, D\}$ 和 3 条弧,即 $A_{(q)} = \{(A, B), (B, C), (C, D)\}$ 。

PEV 的流动,即 F_q , 后续行驶范围 $R = 100$ km。一次充电需要从起点节点 A 到目的地节点 D 不会耗尽能量。PEV 以等于 SoC_a 的 SoC 进入节点 A 的运输网络,并且它们需要离开节点 D 的运输网络

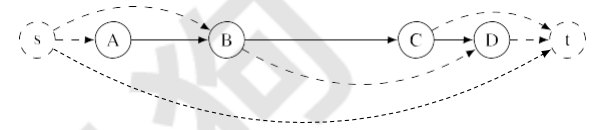
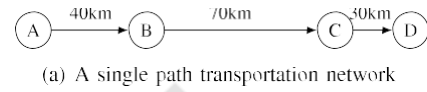


图 1. 运输网络扩展的示例。

SoC 比 SoC_d 高¹。计划者的目标是将充电站定位在 $\backslash 11^n$ 的候选位置集中满足驾驶需求。

原始的运输网络,即 $G(\backslash 11^n, A_q)$ (见图 1(a)), 被扩展为新的网络,即 $G(\backslash \hat{11}^n, \hat{A}_q)$ (请参见图 1(b)), 请按以下步骤操作:

- 1) 在源节点 A 和接收器之前添加源节点 s 和目标节点 D 之后的节点 t。定义 $\backslash \hat{11}^n = \backslash 11^n \cup \{s, t\}$ 。
- 2) 添加两个伪弧,即 $\{s, A\}$ 和 $\{D, t\}$ 。并让距离 $d_s, A = (1 - SoC_a) \times R$ 和 $d_D, t = SoC_d \times R$ 。
- 3) 定义路径 q 上 $\backslash \hat{11}^n$ 中每个节点的排序索引作为其从源节点 s 开始的索引号。例如, A 是路径 $q: sABCDt$ 上的第二个节点,其排序索引为 2。连接任意两个节点,例如 i 和 j。如果 j 的排序索引,则 $\backslash \hat{11}^n$ 中的 j 和 i 节点 i 小于节点 j,并且一次充电后即可从节点 i 到达节点 j。对于网络 $G(\backslash 11^n, A_q)$, 伪弧 $(s, B), (B, D), (C, t)$ 为添加。
- 4) 将新的伪弧 (s, t) 添加到网络,并令 $\hat{A}_q = A_q \cup \{(s, A), (s, B), (B, D), (C, t), (D, t), (s, t)\}$ 。在扩展网络 $G(\backslash \hat{11}^n, \hat{A}_q)$ 中,从 s 到 t 的每条路径 (不包括路径 $\{s, t\}$) 描述了一种可行的解决方案

节点集 $\backslash 11^n$ 中的充电站位置。例如, PEV_q 流量可以在充电站位于 B 和 D 的情况下通过路径 $\{s, B, D, t\}$ 传播。请注意,沿路径 q 的 PEV 流量需要至少一个位于 $\backslash 11$ 的站点ⁿ。规划者的目标是找到一些稳定 $\backslash 11^n$ 中的位置,以便 PEV 流量可以在扩展网络 $G(\backslash \hat{11}^n, \hat{A}_q)$ 中找到一条从 s 到 t 的路径。如果由于预算限制或配电网限制而没有可行的设置,则业务流必须经过伪路径 $\{s, t\}$, 在其上不需要充电站。这条路径捕获了未满足的充电需求。总之,这种扩展的交通网络模型结合了 PEV 行驶里程限制。

对于具有多个路径的网络,即 $G(\backslash 11^n, A)$, 每个路径使用相同的扩展方法,

相应的扩展网络,即 $G(\backslash \hat{11}^n, \hat{A})$ 。

¹ SoC_d 对应于驾驶员目的地与交通网络出口之间的距离。

B. 容量流量加油位置模型

基于扩展的网络, CFRLM 可以表示如下 (相应的符号请参见表 I) :

$$\min_{\substack{I \\ s_i, y_i, x_{ij} \\ q \in Q}} \left\{ \begin{aligned} & c1, isi + c2, i yi + cp x^q F_q \\ & i \in |I|^n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

受:

$$\begin{aligned} & x_{ij}^{q,t} - x_{ji}^{q,t} = \begin{cases} 1, & i = s \\ -1, & i = t \\ 0, & i \neq s, t \end{cases}, \quad \forall q \in Q, \forall i \in |I|^n \\ & x_{ij}^{q,t} \geq 0, \quad \forall q \in Q, \forall (i,j) \in \hat{A}_q, \end{aligned} \quad (2)$$

$$F_{qx}^{q,t} \leq g(y_i), \quad \forall i \in |I|^n, \quad (3)$$

$$y_i \leq \hat{y}_i s_i, \quad \forall i \in |I|^n, \quad (4)$$

$$y_i \in Z, \quad \forall i \in |I|^n, \quad s_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in |I|^n. \quad (5)$$

$$x_{ij}^{q,t} \geq 0, \quad \forall q \in Q, \forall (i,j) \in \hat{A}_q, \quad (6)$$

目标函数 (1) 中的第一项是每个充电站的投资成本之和, 包括每个充电站的固定成本和每个充电点数量的成本。

(1) 中的第二项是对未满足的充电需求的罚款, 它与直接流经伪源弧和宿弧的交通流量成正比, 即 $x^q F_q$ 。

公式 (2) - (3) 定义了交通流均衡约束, 这确保了流出量减去流入量必须等于节点的虚拟供求。等式 (4) 为

每个充电站的服务能力约束的。

仅当存在以下情况时, 流量流路径才能包括给定节点充电站和足够的充电点已安装。如果在该节点处有充电站, 则公式 (5) 会限制充电点的数量。

给定充电需求和充电的分布服务时间, 充电站的服务能力是

充电点数量的函数, 即约束 (4) 中的 $F = g(y)$ 。为简单起见, 计划者可以假设线性

关系 $g(y) = Ay$, 其中 A 是每个充电点可以满足的充电需求量。这个假设

用于先前的工作, 例如[26]。为了提高模型的准确性, 我们使用排队论[27]来估计 $g(y)$ 。²并且由于 $g(y)$ 是非线性的和凸的, 所以使得约束 (4) 是凹的, 因此 CFRLM 是不凸且难以缩放。因此, 我们使用分段线性化[28]将约束条件 (4) 重新构造为混合整数线性约束条件。附录中给出了排队建模和分段线性化的详细信息。

实际上, 充电站可以位于交通网络中的任何位置, 从而产生了无限的尺寸规划问题。这很棘手。在 CFRLM 中,

充电站只能位于预定义的运输节点, 即 $|I|^n$ 。为了提高建模精度, 我们可以在网络中较长的原始弧上添加辅助节点-从而增加网络粒度。结果, 扩展的运输网络具有更多的节点, 并且电弧距离减小。充电站可以位于在原始和辅助节点处, 沿着原始弧线。

III. 充电站规划模型

本节将 CFRLM 扩展为考虑了耦合运输的混合整数线性规划计划模型。

位置和电网约束。当 PEV 流量较小时, PEV 快速充电负载较小, 并且对电源系统的影响可忽略不计。但是, 随着 PEV 的迅速普及, 快速充电能力将显著增长

并可能威胁配电网的安全运行,

作品。这在高速公路上尤为突出
交通网络, 覆盖区域大部分为农村

传统上负载很低。PEV 快速充电负载可能成为总功率需求的主要部分。

我们研究 110 kV 高压配电网中的 PEV 充电站规划, 以直接解决有限的 PEV 行驶范围。实际上, PEV 充电站通常连接到中压配电网, 例如中国的 10 kV 网络。对于低压配电网, 可以进一步调整计划结果, 可以使用[22]和[23]中的先前工作。

A. 规划目标

规划模型的目标是最大程度地减少投资满足 PEV 充电需求的成本, 其计算公式如下 (相应的符号请参见表 II) :

$$\min_{\substack{I \\ \{s_i, y_i\}}} \left\{ \begin{aligned} & C_{sta} + C_{gri} + C_{pen} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

哪里 :

$$C_{sta} = c1, isi + c2, i yi \quad (8)$$

$$C_{gri} = \sum_{i \in |I|^n} c3, ili Pi + c4, i q^2 \quad (9)$$

$$C_{pen} = \sum_{q \in Q} F_q \quad (10)$$

其中, 式 (7) 中的第一项和第三项分别表示充电站的投资成本, 即 C_{sta} , 以及在 CFRLM 中对未满足的充电需求的惩罚, 即 C_{pen} 。(7) 中的第二项说明配电网络成本, 即 C_{gri} 。这包括配电线路的成本, 即 (9) 中的第一项, 以及变电站容量扩展的成本, 即 (9) 中的第二项。请注意, (7) 中的三个项具有相同的单位。

配电线投资成本大约与最大充电站功率 (即 P_i) 和所需配电线长度 (即 l_i [29]) 的乘积成正比。 P_i 可以计算为:

$$P_i = p y_i, \quad \forall i \in |I|^n. \quad (11)$$

²我们还可以采用更准确的模拟或经验数据进行估算 $g(y)$ 在实践中。

表二
计划模型中使用的符号

b	Index of branches of the distribution network. $b \in \Psi^{db}$
n	Index of nodes of the distribution network. $n \in \Psi^{dn}$
Ψ^{db}	Set of branches of the distribution network.
Ψ^{dn}	Set of nodes of the distribution network.
Ψ_n^{in}	Set of transportation nodes connected to distribution node n .
B	Investment costs budget.
$c_{3,i}$	Per-unit costs for distribution line at location i , in \$(/kVA \cdot km)\$.
$c_{4,i}$	Per-unit costs for substation capacity expansion at i , in \$/kVA.
d_n^{base}	Base load current at distribution node n .
\mathbf{d}^{base}	Column vector of nodal base load current, $[d_n^{base}]^T$.
\bar{f}_b	Upper limit of branch current of branch b .
g_n	Generation current injection at distribution node n .
\mathbf{g}	Column vector of the nodal generation injection, $[g_n]^T$.
l_i	Required distribution line length to install a charging station at location i .
p	Rated charging power of a charging spot.
$P_{i,0}^{sub}$	Initial substation capacity available at transportation node i .
\mathbf{S}	Node-branch incidence matrix for the distribution network.
$\underline{V}_n / \bar{V}_n$	Lower/upper limit of nodal voltage at distribution node n .
z_b	Impedance of branch b .
d_n^{ev}	PEV charging current at distribution node n .
\mathbf{d}^{ev}	Column vector of nodal PEV charging current, $[d_n^{ev}]^T$.
f_b	Current of branch b .
\mathbf{f}	Column vector of branch current, $[f_b]^T$.
P_i	Maximum PEV charging power at transportation node i .
$P_{i,0}^{sub}$	Substation capacity expansion at transportation node i .
V_n	Nodal voltage at distribution node n .
\mathbf{V}	Column vector of the nodal voltage, $[V_n]^T$.
\hat{V}	Reference voltage of the distribution network.

实际上, 必须为每个候选位置确定所需的配电线长度。

在某些地区, 现有的变电站具有足够的容量来为增加的 PEV 充电站供电。如果现有变电站容量不足, 则必须扩展变电站。设 P_i^0 表示位置 i 处的剩余变电站容量。然后, 所需的变电站容量扩展可以计算为:

$$P_i^0 = \max\{0, P_i - \sum_{j \in \Psi_n^{in}} P_j\}, \quad \forall i \in \Psi^{dn}. \quad (12)$$

B. 规划约束

1) 运输约束: 必须使用计划模型

满足 CFRLM 约束 (2) - (6)。

2) 基尔霍夫定律约束[30]: 配电网的支路电流和节点电压必须满足基尔霍夫电流定律 (KCL) 和基尔霍夫电压定律 (KVL), 分别定义如下:

$$\mathbf{S}\mathbf{f} + \mathbf{g} = \mathbf{d}^{ev} + \mathbf{d}^{base}, \quad (13)$$

$$z_b f_b + [\mathbf{S}]_{\mathbf{V}}^T \mathbf{V} = 0, \quad \forall b \in \Psi^{db} \quad (14)$$

其中, 分配节点 n 处的 PEV 充电电流是其耦合传输节点处所有充电电流的总和:

$$d_n^{ev} = \sum_{i \in \Psi_n^{in}} P_i / \hat{V}, \quad \forall n \in \Psi^{dn}. \quad (15)$$

KCL 和 KVL 约束条件为配电网中的最佳潮流约束条件提供了线性近似, 这在[30]中也已使用。

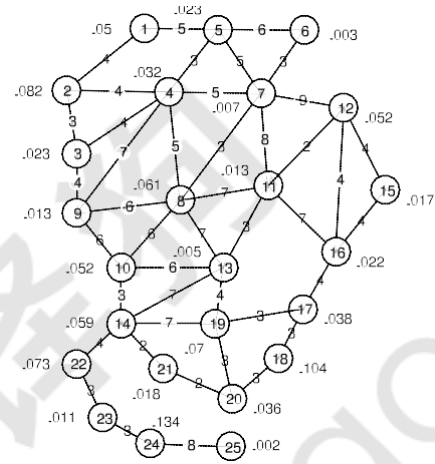


图 2. 一个 25 节点的运输网络用于案例研究。

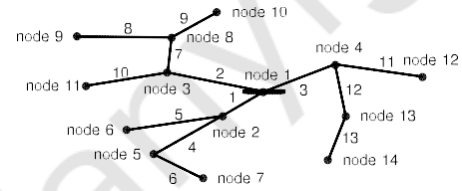


图 3. 用于案例研究的 110 kV 配电网络。

3) 配电线路电流和节点电压限制: 配电线路电流和节点电压不得超过其允许的范围, 分别定义如下:

$$|f_b| \leq \bar{f}_b, \quad \forall b \in \Psi^{db}, \quad (16)$$

$$\underline{V}_n \leq V_n \leq \bar{V}_n, \quad \forall n \in \Psi^{dn}. \quad (17)$$

4) 预算约束: 在某些情况下, PEV 收费系统计划者的可负担投资总额有限, 其定义如下:

$$C_{sta} + C_{grid} \leq B. \quad (18)$$

iv. 实例探究

A. 案例概述和参数设置

我们考虑 25 个节点的公路运输网络[31]

结合 14 节点 110 kV 高压配电网络来说明所建议的规划方法。

25 个节点的运输系统如图 2 所示。每个弧线上的数字表示相应的两个节点之间的距离。我们假设图 2 中的单位距离为 10 km。例如, 圆弧 (1, 2) 的距离是 4 个单位, 对应于 40 km。每个旁边的小数 node 是节点的权重, 即 w , 代表其流量流引力[31]。重力空间相互作用模型为用于基于节点权重和弧距生成 OD 流结构[10]:

$$F_{ij} = 1.5 w_i w_j / d_{ij}, \quad \forall i, j, i \neq j \quad (19)$$

$$F_{ij} = F_{\text{总}} \times F_{ij} / F_{ij}, \quad \forall i, j, i \neq j \quad (20)$$

其中 $F_{\text{总}}$ 是 PEV 的总流量 (在此运输网络中通过的 PEV 的平均数量)

表三
两个网络的节点耦合关系

Distribution Node ID	01	02	03	04	05	06	07
Transportation Node ID	-	13	08	12	22	14	24
Distribution Node ID	08	09	10	11	12	13	14
Transportation Node ID	04	02	05	09	15	17	20

高峰小时, 以 h^{-1} 为单位; F 聚乙烯醇是从节点 i 到 PEV 的流量

h^{-1} 中的节点 j 。

为了提高网络粒度, 我们添加了额外的辅助功能弧上距离超过 20 km 的节点。结果, 改进的交通网络有 93 个节点, 所有弧段的最长距离为 20 km。充电站可以位于原始节点和辅助节点处。辅助节点的权重设置为 0。

110 kV 高压配电网的示意图如图 3 所示。我们假设节点 1 连接到容量为 150 MVA 的 220 kV / 110 kV 变压器。由于篇幅所限, 本文省略了配电网络的参数, 但可以在以下位置下载 https://github.com/zhanghc09/PEV-charging-network-planning/blob/master/110kV_distribution_system.pdf。配送和运输网络之间的节点耦合关系记录在表 III 中。我们假定表 III 中未包括的运输节点在地理位置上连接到最近的配送节点。电压约束条件是 $V_n = 0.95$ 和 $V_n = 1.05$, 并且支路电流限值设置为其额定容量。

假设充电后的 PEV 行驶范围为 R 达到 200 km, 能耗为 0.14 kWh/km , 3 每个充电点 (p) 的额定充电功率为 44 kW,

充电效率 (η) 为 92% [7]。因此, 用空电池给 PEV 充电的平均服务时间约为 $\mu = (200 \text{ km} \times 0.14 \text{ kWh/km}) / (92\% \times 44 \text{ kW}) =$

42 分钟服务时间的方差系数, 即 c^2 ,

假定为 0.5 以反映随机驱动/充电行为, 能耗等的影响。^s 实际上, PEV 的充电功率不是恒定的, 典型的充电过程通常包括两个阶段: 1) 恒流充电, 当电池在其额定充电功率附近充电; 2) 恒压充电, 当充电功率逐渐降低以使电池 [32], [33] 充满电时。由于恒压阶段非常耗时, 特斯拉建议其客户仅在第一阶段对 PEV 充电, 即, 将 PEV 充电至约 80% SoC, 以节省时间 [33]。参考文献 [32] 还表明, 在峰值充电需求间隔期间, 在恒定电压阶段对 PEV 充电会不足以利用电站的服务能力。因此, 我们假设所有客户仅在高速公路网络的第一阶段为他们的 PEV 充电, 以节省时间, 因此可以认为充电功率是恒定的。

— 我们假设最大允许的平均等待时间 $T = 10$ 分钟。假定运输网络中所有路径的到达 SoC 和离开 SoC 均为

完全充电后 3R 不一定等于驱动范围。在高速公路网中, PEV 不太可能在充电站得到完全充电, 这将在本段稍后进行解释。

50%, 从而强制至少发生一次充电事件。每个充电站的最大点数 y^i 假定为 200。实际上, 可以根据土地使用限制等来定义 y^i defined i。

每个 PEV 充电站的固定成本假定为 $c1, i = \$ 163,000$ 。土地使用成本为 $407 \$ / m^2$, 每增加一个充电点需要 $20 m^2$ 土地。每单位一个充电点的购买成本为 23,500 美元 [7]。因此, 我们有 $c2, i = 407 \$ / m^2 \times 20 m^2 + \$ 23,500$ 。配电网

成本假定为 $c3, i = 120 \$ / (kVA \cdot km)$ [34]。Dis-

从 PEV 充电站到其最近的中低压变电站的距离, 即 li , 假定为 PEV 充电站与其最近的 110 kV 配电节点之间距离的 10%。假设变电站的扩展成本为 $c4, i = 788 \$ / kVA$ [23]。实际上, 土地使用和人工成本因地点而异。为了跨节点对该特征建模, 假定每个位置 i 处的单位成本 (即 $c1, i, c2, i$ 和 $c4, i$) 比上面介绍的基本值大 $5W_i \times 100\%$ 。我们假设每个原始运输节点都具有 1 MVA 的剩余变电站容量, 可以由充电站使用, 而辅助节点则没有备用变电站容量。对于未满足的充电需求 $c_p = \$ 10^4$ 和预算约束 $B = \infty$, 每单位罚款成本。这些参数值仅用于举例说明, 不一定代表特定的运输/电力系统网络。

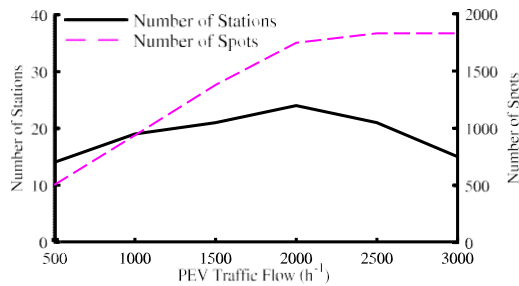
因为存在 93 个候选充电站位置, 所以投资变量包括 93 个整数变量 (即 y) 和 93 个二进制变量 (即 s)。我们使用三个线性段来近似 (4) 中的非线性函数 $g(y)$ 。结果是,

我能 $93 \times 4 = 372$ 个二进制变量和 372 个连续变量的重新制定 (4) (请参阅附录)。的

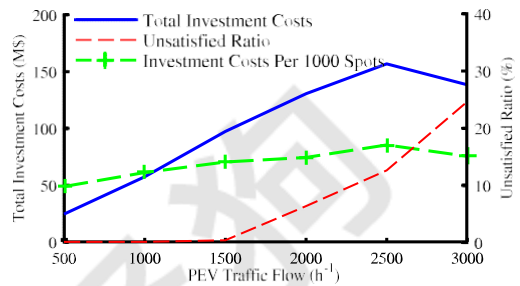
其他变量都是连续的, 包括交通流量 (即 x), 电压 (即 v) 等, 总数为 33,340。约束数量为 7,853。请注意, 问题的规模主要由运输和分销网络的规模 (整数和二进制变量) 确定。PEV 行驶距离和到达/离开 SoC 可能会影响扩展网络的结构, 因此会影响连续交通流量变量 (即 x) 的规模。例如, 更长的行驶里程会导致更复杂的扩展运输网络, 结果是更大的规模问题。但是, 由于 PEV 行驶里程和到达/离开 SoC 仅与连续变量有关, 因此它们的影响并不明显。PEV 交通流量的规模不能影响问题的规模。我们使用 CPLEX [35] 解决了具有四核 Intel Core i7 处理器和 8 GB 内存的笔记本电脑的最佳 PEV 充电站规划问题。解决上述单个计划问题所需的时间约为 40 分钟, 收敛差距为 0.5%。

B. 规划结果与分析

图 4 展示了在不同高峰时段 PEV 交通流量下的 PEV 充电站规划结果。表 IV 总结了 1,000 和 1,500 PEV / h 情景的规划结果, 图 4 展示了充电站在交通网络中的位置。5 和图 6,



(a) Number of charging stations and charging spots



(b) Investment costs and unsatisfied charging demand ratio

图 4. 不同 PEV 交通流场景下的规划结果。

表四
规划结果摘要 (1000 和 1500 pevs / h)

PEVs (h ⁻¹)	No. of Stations	No. of Spots	Investment costs (M\$)			Unsatisfied Demand
			Station	Grid	Total	
1000	19	938	35.03	22.22	57.25	0.00 %
1500	21	1382	50.37	46.83	97.20	0.28 %

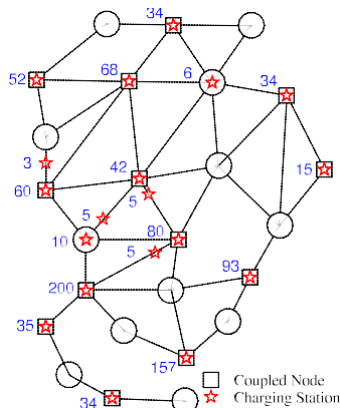


图 5. 站点位置 (1000 PEV / h) 。

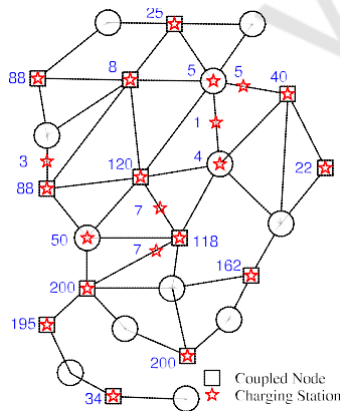


图 6. 站点位置 (1500 PEVs / h) 。

其中为每个站点标记了相应数量的充电点。注意，分配网络中的站点位置可以根据表 III 中的耦合关系获得。

不出所料，PEV 流量会增加点的数量。当 PEV 流量超过 1,500 PEV / h 时，

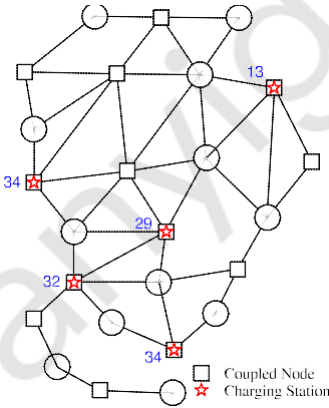


图 7. 车站位置 (R = 400 公里) 。

表 v
配电线路的拥堵度 (1500 pevs / h)

Line ID	01	02	03	04	05	06	07
Level (%)	94.4	99.9	63.8	58.6	76.1	22.7	89.6
Line ID	08	09	10	11	12	13	
Level (%)	62.3	11.4	29.0	14.5	75.6	57.8	

由于配电网络的运行限制，无法完全满足充电要求。系统中的最大充电点数量约为 1800。在这种情况下，有效约束是配电线路电流限制，即 (16)。在表 V 中列出了 1,500 PEVs / h 情况下每条配电线路的拥挤程度，即实际线路电流与相应线路容量的比率。表 02 中的线路电流达到上限。

与景点不同的是，当后来的电动汽车流量超过 2,000 PEVs / h 时，充电站的数量开始随着 PEV 交通流量的增加而减少。当 PEV 交通流量低时，规划模型会定位充电站以满足所有充电需求，因为不满足充电需求的代价很高。因此，充电站的数量倾向于随着交通流量而增加。但是，当业务量增加到超出系统容量时，规划模型仅会定位较少的集中充电站（前提是仍然充分利用充电站和配电系统以达到 1），从而降低固定成本在目标 (8) 和 (2) 中，在低成本节点上建立充电站。这种现象也可以通过以下方式可视化

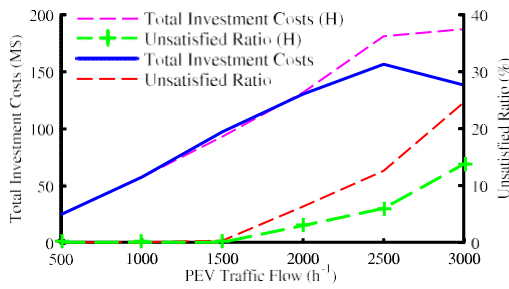


图 8. 图 4 (b) 中标称情况下的计划结果和高容量配电网 (H, 增加了 10%)。

图 4 (b) 中每 1,000 个充电点的平均投资成本。在第一阶段 (500–2,000 PEVs / h), 每个站点的平均投资成本会随着 PEV 交通流量的增长而增加, 因为规划方面的限制迫使新的充电站建设在成本较高的地区。然后, 由于充电站数量的减少, 第二阶段每个地点的平均投资成本下降了 (2,500–3,000 PEVs / h)。结果, 当交通流量增加到高于 2,500 PEVs / h 后, 总投资成本降低了 (请注意, 不满意的充电需求比率也会上升, 这将导致高额的罚款成本)。

C. 敏感性分析

1) 配电网络约束: 如第 IV-B 节所述, 配电网络约束限制了整个收费系统在运输网络中的服务能力。由于配电线路是配电网络中最昂贵的组件, 我们将每条配电线路的容量增加了 10%, 并比较了图 8 中的结果。当容量增加时, 随着流量增加到 1,500 PEV 以上, 可以满足更多的充电需求。/H。这种敏感的分析可以为电网升级提供指导。

2) 充电后的续航里程: 随着电池技术和制造的成熟, PEV 续航里程将随电池容量的增加而增加。图 9 展示了在不同 PEV 行驶距离情况下的规划结果。我们假设 PEV 在到达交通网络之前已经行驶了 100 km, 并且在离开目的地之前要离开网络再行驶 100 km。正如预期的那样, 投资成本和不满意的需求随着范围的增加而减少。当充电后的 PEV 行驶距离超过 500 km 时, 在此系统中无需建造充电站。图 7 在 400 km 行驶距离的情况下演示了站点位置及其对应的配置。

3) 收费状态: 到达的 SoC 取决于 PEV 到达运输网络之前的行驶距离。离开的 SoC 取决于 PEV 离开运输网络后到达其目的地的距离。图 10 中显示了不同 SoCa 和 SoCd 下所需的 PEV 投资成本。SoCa 越高, 投资成本就越低; 相反, SoCd 越低, 投资成本就越低。实际上, SoCa 和 SoCd

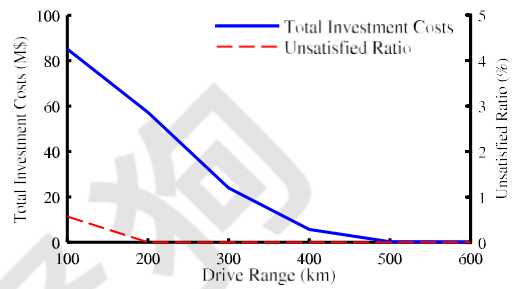


图 9. 行驶里程的影响 (1000 PEVs / h)。

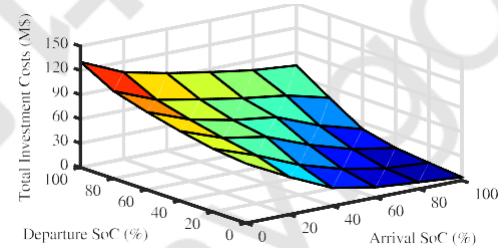


图 10. 到达和离开 SoC 的影响 (1000 PEVs / h)。

表六
最大弧长的影响

Maximum arc length (km)	10	20	30	40	50
Total costs (M\$)	55.20	57.25	57.48	58.40	58.61

应当在到达和离开运输网络之前通过调查 PEV 的机动性来获得。没有这些信息, 规划人员可以使用低 SoCa 和高 SoCd 做出最坏情况的规划决策。

4) 最大弧长: 正如我们在 CFRLM 中介绍的那样, 我们可以通过添加辅助节点 (候选位置) 将长弧分为短弧。减小最大电弧长度会增加候选充电站的选址粒度 (请参见表 VI)。但是, 增加候选位置会增加优化程序的大小。PEV 充电网络规划人员应适当选择最大电弧长度, 以在粒度与问题复杂性之间取得平衡。

五. 结论

本文通过考虑交通运输和电力网络之间的耦合相互作用来研究 PEV 快速充电站的选址。建议将 CFRLM 明确纳入 PEV 行驶里程和 OD 流量, 以估计 PEV 充电需求。此外, 采用 M / M / s 排队对每个充电站的服务能力进行建模。提出了一种基于 CFRLM 的混合整数线性规划 (MILP) 模型, 用于规划输电和高压配电网中的 PEV 快速充电站。我们纳入了配电网安全操作约束。数值实验表明了该方法的有效性。PEV 数量, 线路容量, 行驶距离, 到达和离开 SoC 以及网络粒度等各种敏感性对最佳计划结果都有显著影响。

在实践中, PEV 行驶距离和到达/离开

SoC 分别是异构的和随机的。将来, CFRLM 的随机表述将成为重要的研究重点。一种扩展方法

CFRLM 成为随机模型是分别为每种类型的 PEV 生成扩展的运输网络

(按行驶距离和到达/离开 SoC 等划分)。和

对于每种类型的 PEV, 都应满足交通流量均衡约束 (2), 即对于每个扩展的跨界车辆, 移植网络。这样, 可以对 CFRLM 进行建模作为一种随机编程模型, 其中可以满足多种类型的 PEV 的充电需求。在本文中, 所有

假设 PEV 具有一致的行驶范围和到达/离开 SoC。请注意, 基于此假设的规划模型提供了可行且保守的解决方案当我们考虑最短的行驶距离, 最低的到达时

SoC 和性能最高的 SoC⁴。该解决方案仍可为 PEV 充电设施投资提供有意义的指导, 并有助于在实践中促进 PEV 的采用。

此外, 本文仅考虑峰值 OD 流量。在实践中, 可以考虑动态 OD 流量[36]来模拟所有时间间隔的计费需求。这种增加的时间粒度可以提高模型的准确性, 这是未来工作的主题。

附录

排队建模和分段 约束的线性化 (4)

根据[32], PEV 的到来可以建模为参数等于 OD 流的泊松过程 F 和表征平均服务时间的参数 μ 具有一般分布。假设充电点

保持一致, 并根据先到先得的规则提供 PEV。然后可以用 $M/G/s/k$ 队列对具有不同地点编号的充电站的服务能力进行建模[32], 其中 M 代表泊松过程, G 代表一般服务时间分布, s 代表地点数量在车站中, k 是车站中的等候空间。高速公路快速充电站通常有足够的空间

等待空间, 以便在规划模型中为简单起见可以假设 $k = \infty$, 如[37]中所述。因此, 我们采用 $M/G/s$ 队列[27]。何时发行

在加油站给出交通流量和服务时间, 通过以下优化模型给出所需的最小充电点数量:

$$y = g^{-1}(F) = \min_{\{z\}} z \quad (21)$$

受:

$$EW(M/G/s) = \frac{EW(M/M/s) \cdot 1 + \frac{c^2 RD}{s}}{(2RD - 1) \cdot s^2 + 1} \leq \bar{T}, \quad (22)$$

⁴ 请注意, 设计充电网络以满足所有可能的充电需求并不经济。例如, 一些短距离电动汽车, 仅适用于短途城市通勤的公路, 不应被视为高速公路充电站的目标客户。因此, 在实践中, 应该为行驶距离和到达 SoC 提供适当的进入阈值, 并为高速公路网络上的离开 SoC 提供可接受的服务标准。这些阈值和标准将成为计划的输入。

$$EW(M/M/s) = \frac{(z\rho)^z}{Fz!(1-\rho)^2} + \frac{(z\rho)^k}{k!} + \frac{(z\rho)^{z-1}}{z!(1-\rho)} \quad (23)$$

$$rd = \frac{1}{2} \frac{1}{1+F(\theta)} \frac{\rho}{1-\rho} \frac{1-e^{-F(\theta)(1-\rho)}}{F(\theta)} \quad (24)$$

$$F(\theta) = \frac{8(1+\theta)}{z-1} \frac{1-\theta^{-2}}{\rho} \quad (25)$$

$$\theta = \frac{z-1}{z+1} \mu, \quad \rho = \frac{F}{z+1} \quad (26)$$

其中 $EW(M/G/s)$ 是 $M/G/s$ 的平均等待时间队列, T 是其上限, z 是充电点的数量, c^2 是服务时间的方差系数, 受公式 (22) 限制以保证服务质量。由于 $EW(M/G/s)$ 随着 z 的增加而单调减少, 因此可以通过遍历 z 来启发式地解决问题 (22) - (26)。有兴趣的读者可以参考[27]以获得详细信息。

基于模型 (22) - (26), 我们可以遍历充电需求参数 F 以获得相应的最小充电点 y (最优 z), 从而得出 $y = g^{-1}(F)$ 和 $F = g(y)$ 。然后, 我们可以使用分段线性提前将约束条件 (4) 重新格式化为混合整数线性约束[28]。

假设 $g(y)$ 由三个线性段近似:

$$F = g(y) = \begin{cases} a_1 + b_1 y, & c_1 \leq y \leq c_2 \\ a_2 + b_2 y, & c_2 \leq y \leq c_3 \\ a_3 + b_3 y, & c_3 \leq y \leq c_4 \end{cases} \quad (27)$$

其中 a_i 和 b_i ($i = 1, 2, 3$) 是线性系数函数和 c_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 是断点。然后, 通过引入四个非负连续变量 y_i 和四个二进制变量 B_i ($i = 1, 2, 3, 4$), 可以将 (27) 等价地重新公式化为以下等式 (28) - (33):

$$F = g(y) = \sum_{i=1}^4 g(c_i) y_i \quad (28)$$

$$y = \sum_{i=1}^4 c_i y_i \quad (29)$$

$$y_i = 1 \quad (30)$$

$$y_i \leq \sum_{j=1}^4 B_j, \quad \forall i \in \{1, 2, 3, 4\}, \quad (31)$$

$$B_j \leq 2, \quad (32)$$

$$B_i + B_j \leq 1, \quad \forall i, j \in \{1, 2, 3, 4\} \text{ 和 } |i - j| = 1. \quad (33)$$

通过等式近似非线性函数 $g(y)$ 在 (28) - (33) 中, 凹约束 (4) 被重新构造为一组混合整数线性约束。分段线性化是一项成熟的技术。有兴趣的读者可以参考[28]以获得详细信息。

参考资料

- [1] Z. Xu, W. Su, Z. Hu, Y. Song 和 H. Zhang, “中国插电式电动车协调充电的分层框架”, IEEE Trans. 智能电网, 卷. 7 号 1, 第 428–438 页, 2016 年 1 月。
- [2] T. Franke 和 JF Krems, “电动汽车用户对行驶里程有何偏好?” 运输政策, 第一卷 30 页, 第 56–62 页, 2013 年 11 月。
- [3] H. Zhang, Z. Hu, Z. Xu 和 Y. Song, “具有单输出多电缆充电点的 PEV 充电站的最佳规划”, IEEE Trans. 《智能电网》将于 2016 年 2 月 15 日发布。[在线]。可用的: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7390308/>
- [4] 中国日报。中国将在 2020 年之前制造 12,000 个 Nev 充电器。2016 年 4 月 20 日访问。[在线]。可用的: http://www.chinadaily.com.cn/商业/汽车/2015-10/13/content_22170160.htm
- [5] H. Xu, S. Miao, C. Zhang 和 D. Shi, “用于将纯电动汽车大规模集成到电网中的充电基础设施的最佳布置”, 《诠释》。J. 当选。电力能源系统, 第一卷. 53 号 1, 第 159–165 页, 2013 年。
- [6] J. Cavadas, GH de Almeida Correia 和 J. Gouveia, “一种 MIP 模型, 用于确定市区内电动汽车的慢速充电站, 以解决驾驶员的出行问题”, Transp. Res. 电子物流员。运输版本, 卷. 75, 第 188–201 页, 2015 年 3 月。
- [7] H. Zhang, Z. Hu, Z. Xu 和 Y. Song, “针对城市中不同类型的 pev 充电设施的综合规划框架”, IEEE Trans. 智能电网, 卷. 7 号 5, 第 2273–2284 页, 2016 年 9 月。
- [8] H. Cai, X. Jia, ASF Chiu, X. Hu 和 M. Xu, “使用出租车的大数据知悉出行方式, 在北京选址公共电动汽车充电站”, Transp. Res. D 运输环境卷 33, 第 39–46 页, 2014 年 12 月。
- [9] N. Shahraki, H. Cai, M. Turkay 和 M. Xu, “使用实际车辆行驶模式的电动汽车公共充电站的最佳位置”, Transp. Res. D 运输环境卷 41 页, 第 165–176 页, 2015 年 12 月。
- [10] MJ Hodgson, “一种流量捕获位置分配模型”, Geogr. 肛门, 卷. 22 号 3, 第 270–279 页, 1990 年。
- [11] M. Kuby 和 S. Lim, “代用燃料车辆的加油位置问题,” Socio Econ. 计划。科学, 卷. 39 号 2, 第 125–145 页, 2005 年。
- [12] SA MirHassani 和 R. Ebrazi, “加油站位置问题的灵活改写”, Transp. 科学, 卷. 47, 没有 4, 第 617–628 页, 2013 年。
- [13] H.-Y. Mak, Yong Rong 和 Z.-JM Shen, “带电池更换的电动汽车的基础设施规划”, Manag. 科学, 卷. 59, 没有 7, 第 1557–1575 页, 2013 年。
- [14] P.-S. 悠和 Y.-C. Hsieh, “一种针对车辆充电站位置的混合启发式方法”, Comput. 工业工程, 第 1 卷. 70, 第 195–204 页, 2014 年 4 月。
- [15] R. Riemann, DZW Wang 和 F. Busch, “电动汽车无线充电设施的最佳位置: 具有随机用户平衡的流量捕获位置模型”, Transp. Res. C 新兴。技术, 卷. 58 页, 第 1–12 页, 2015 年 9 月。
- [16] SH Chung 和 C. Kwon, “电动汽车充电站位置的多期规划: 以韩国高速公路为例”, Eur. J. Oper. 水库卷 242 号 2, 第 677–687 页, 2015 年。
- [17] Z. Liu, F. Wen 和 G. Ledwich, “配电系统中电动汽车充电站的最佳规划”, IEEE Trans. Power Del., 第一卷 28 号 1, 第 102–110 页, 2013 年 1 月。
- [18] Y. Zheng 等人, “配电系统中的电动汽车电池充电/交换站: 比较研究和最佳规划”, IEEE Trans. 电力系统, 第一卷 29 号 1, 第 221–229 页, 2014 年 1 月。
- [19] K. Khalkhali, S. Abapour, SM Moghaddas-Tafreshi 和 M. Abapour, “数据包络分析定理在插电式混合动力汽车充电站规划中的应用”, IET Gener. 传输卷, 卷. 9, 没有 2015 年 4 月, 第 7 页, 第 666–676 页。
- [20] MH Moradi, M. Abedini, SMR Tousi 和 SM Hosseini, “基于差分演化算法的可再生能源和充电站的最佳选址和选型”, 国际。J. 当选。电力能源系统, 第一卷. 73, 第 1015–1024 页, 2015 年 12 月。
- [21] F. He, D. Wu, Y. Yin 和 Y. Guan, “插电式混合动力汽车的公共充电站的最佳部署”, Transp. Res. B Methodol., 第一卷. 47, 第 87–101 页, 2013 年 1 月。
- [22] G. Wang, Z. Xu, F. Wen 和 KP Wong, “电动汽车充电站的交通约束多目标规划”, IEEE Trans. Power Del., 第一卷 28 号 4, 第 2363–2372 页, 2013 年 10 月。
- [23] W. Yao 等人, “集成配电和电动汽车充电系统的多目标协作计划策略”, IEEE Trans. 电力系统, 第一卷 29 号 2014 年 7 月, 第 4 页, 第 1811–1821 页。
- [24] P. Sadeghi-Barzani, A. Rajabi-Ghahnavieh 和 H. Kazemi-Karegar, “最佳快速充电站的位置和尺寸,” 应用。能源卷 125, 第 289–299 页, 2014 年 7 月。
- [25] C. Luo, Y.-F. Huang 和 V. Gupta, “电动汽车充电站的位置•平衡多个实体之间的收益”, IEEE Trans. 聪明网络, 即将发布。在 2016 年 2 月 20 日访问。[在线]。可用的: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7368203/>
- [26] C. Upchurch, M. Kuby 和 S. Lim, “容量较大的代用燃料站的位置模型”, Geogr. 肛门, 卷. 41 号 1, 第 127–148 页, 2009 年。
- [27] T. Kimura, “多服务器队列的近似值: 系统插值”, 排队系统, 第一卷. 17 号 3, 第 347–382 页, 1994 年。
- [28] M.-H. Lin, JG Carlsson, D. Ge, J. Shi 和 J.-F. 蔡, “分段线性化方法的回顾”, 数学。问题工程, 卷. 2013, 2013, 艺术。没有。101376。
- [29] W. Qi, Y. Liang 和 Z.-JM Shen, “风能发电的能量存储和传输联合计划”, Oper. 水库卷 63 号 6, 第 1280–1293 页, 2015 年。
- [30] S. Haffner, LFA Pereira, LA Pereira 和 LS Barreto, “具有分布式发电的配电扩展规划的多阶段模型-第一部分: 问题表述”, IEEE Trans. Power Del., 第一卷 23 号 2, 第 915–923 页, 2008 年 4 月。
- [31] D. Simchi-Levi 和 O. Berman, “网络上旅行推销员位置问题的启发式算法”, Oper. 水库卷 36 号 3, 第 478–484 页, 1988 年。
- [32] P. Fan, B. Sainbayar 和 S. Ren, “带有电动汽车能量需求控制的快速充电站的运行分析”, IEEE Trans. 智能电网, 卷. 6 号 2015 年 7 月, 第 4 页, 第 1819–1826 页。
- [33] 特斯拉。增压器。2016 年 7 月 26 日访问。[在线]。可用的: <https://www.tesla.com/supercharger>
- [34] W. Yao, CY Chung, F. Wen, M. Qin 和 Y. Xue, “基于情景的配电系统综合扩展计划, 考虑了插入式电动汽车的集成”, IEEE Trans. 电力系统, 第一卷 31 号 1, 第 317–328 页, 2016 年 1 月。
- [35] IBM. Ibm Ilog Cplex Optimization Studio12.5。2015 年 2 月 15 日访问。[在线]。可用的: http://www-01.ibm.com/support/knowledgecenter/SSSA5P_12.5.1/maps/ic-homepage.html
- [36] X. Zhou 和 HS Mahmassani, “使用自动车辆识别数据的动态起点-目的地需求估计”, IEEE Trans. 智力运输系统, 卷. 7 号 1, 第 105–114 页, 2006 年 3 月。
- [37] G. Li 和 X.-P. Zhang, “在概率潮流计算中对插电式混合动力汽车充电需求建模”, IEEE Trans. 智能电网, 卷. 3 号 1, 第 492–499 页, 2012 年 3 月。



张宏 (S'14) 于 2010 年在中国北京清华大学获得电气工程学士学位, 目前正在攻读博士学位。电气工程学位。他目前是加州大学伯克利分校能源、控制和应用实验室的交换学生研究员。

他目前的研究兴趣包括电动汽车电网集成、充电站规划和需求响应。



Scott J. Moura (S'09-M'13) 于 2006 年获得美国加州大学伯克利分校的理学学士学位以及硕士学位和博士学位。分别于 2008 年和 2011 年获得美国密西根州阿伯斯密歇根大学的机械工程博士学位。

他目前是加州大学伯克利分校土木与环境工程学院的助理教授兼能源、控制与应用实验室 (eCAL) 主任。

从 2011 年到 2013 年, 他是加州大学圣地亚哥分校力学中心的博士后研究员。2013 年, 他在法国巴黎 MINES ParisTech 的自动化与系统中心担任客座研究员。他目前的研究兴趣包括最优和自适应控制, 偏微分方程控制, 电池, 电动汽车和储能。

Moura 博士曾获得美国国家科学基金会 (National Science Foundation) 研究生研究奖学金, 加州大学 (UC) 总统博士后奖学金, O. Hugo Shuck 最佳论文奖, ACC 最佳学生论文奖 (作为顾问), ACC 和 ASME 动态系统与控制会议最佳学生论文决赛入围者 (作为学生), Hellman Fellows 基金, 密歇根大学杰出 ProQuest 论文荣誉奖, 密歇根大学 Rackham 优异奖学金和工程学院杰出领导奖。



胡泽纯 (M'09) 获得理学学士和博士学位。分别于 2000 年和 2006 年获得西安交通大学电气工程学士学位。

他曾于 2009 年至 2010 年在上海交通大学和巴斯大学任研究人员。他于 2010 年加入清华大学电气工程系，目前是该系的副教授。他的主要研究兴趣包括电力系统，电动汽车和储能系统的最佳规划和运行。



宋永华 (F'08) 于 1984 年获得中国成都科技大学的电子工程学士学位和博士学位。1989 年获得中国电力科学研究院（中国北京）博士学位。

1989 年至 1991 年，他是北京清华大学的博士后研究员。随后，他于 1991 年至 1996 年在英国布里斯托尔的布里斯托大学，英国巴斯的巴斯大学和英国利物浦的约翰·摩尔大学担任过各种职位。1997 年，他担任权力教授

自 2004 年以来一直担任 Brunel 大学系统研究专业副总理。2007 年，他在利物浦利物浦大学获得了副校长和电气工程教授职位。他曾在清华大学电气工程系任教授，2009 年担任低碳能源实验室副总裁兼副主任。2012 年，他成为浙江大学常务副院长。他目前的研究兴趣包括智能电网，电力经济学以及电力系统的运行和控制。

宋教授是理学硕士。因其在电力系统研究方面的原始成就而于 2002 年获得布鲁内尔大学奖。他于 2009 年当选为中国电机工程学会 (CSEE) 副主席，并被任命为 CSEE 国际事务委员会主席。2004 年，他当选为英国皇家工程院院士，英国