第 49 卷 第 1 期：105-119 高电压技术 Vol.49, No.1: 105-119
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20212032

考虑配电网与氢燃料汽车耦合影响的制氢加氢站布点优化策略

黄文涛[1]，邓明辉[1]，葛磊蛟[2]，何　俊[1]，贺忠尉[3]，罗　杰[1]
（1. 湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室，武汉 430068；
2. 天津大学电气自动化与信息工程学院，天津 300072；3. 国网恩施供电公司，恩施 445000）

摘　要：由于配电网组成复杂、运行多态，氢燃料汽车加氢具有强随机性的特点，使得制氢加氢站选址定容挑战大。为此，提出一种综合考虑配电网与氢燃料汽车耦合影响的制氢加氢站布点优化策略。首先，对氢燃料汽车用户用氢时序曲线进行蒙特卡罗仿真模拟，达成对制氢加氢站工作模式的深入分析；其次，以兼顾经济成本，交通路网与电力网的安全运行为目标，构建了在交通–电力网络框架下考虑配电网与氢燃料汽车耦合影响的制氢加氢站布点优化模型，进一步利用改进的樽海鞘群算法对模型进行求解；最后，案例验证了所提出的制氢加氢站布点优化策略可有效减少配电网电压偏差和电网网损，相较于初始方案线路功率裕度指标下降了 44.23%，综合指标降低了 13.6%，同时用户满意度提升了 19.28%，表明所提模型的求解更符合实际的需要。
关键词：配电网；氢燃料汽车；制氢加氢站；布点优化；樽海鞘群算法

Layout Optimization Strategy of Hydrogen Production and Refueling Stations Considering the Coupling Effect of Distribution Network and Hydrogen Fuel Vehicles

HUANG Wentao[1], DENG Minghui[1], GE Leijiao[2], HE Jun[1], HE Zhongwei[3], LUO Jie[1]
(1. Hubei Collaborative Innovation Center for High-efficiency Utilization of Solar Energy, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. State Grid Enshi Power Supply Company, Enshi 445000, China)

Abstract: Due to the complex composition and multi-state operation of distribution network, the hydrogen refueling of hydrogen fuel vehicles has the characteristics of strong randomness, which brings challenges to the location and capacity determination of hydrogen production and refueling stations. To this end, an optimization strategy for the layout of hydrogen production and refueling stations is proposed, in which the influences of the coupling between the distribution network and hydrogen fuel vehicles are comprehensively taken into consideration. First, the Monte Carlo simulation of the hydrogen time series curve used by hydrogen fuel vehicle users is carried out to achieve an in-depth analysis of the working mode of the hydrogen production and refueling station. Then, an optimization model for the layout of hydrogen production and refueling stations considering the coupling effect of distribution network and hydrogen fuel vehicles under the framework of transportation-power network is proposed, and the model is further solved by using the improved salp swarm algorithm. Compared with the initial scheme, the line power margin index is decreased by 44.23%, the comprehensive index is decreased by 13.6%, and the user satisfaction is increased by 19.28%, indicating that the solution of the proposed model is more in line with the actual needs.
Key words: distribution network; hydrogen fuel vehicles; hydrogen production and refueling stations; layout optimization; salp swarm algorithm

0　引言

第七届中国电动汽车百人会论坛(2021)指出在如今双碳背景下，只有实现新能源汽车大规模发展才能实现新能源革命，只有实现新能源革命才能实现中国碳中和目标。电池、氢能和新能源汽车是新能源革命的重要组成部分，汽车电动化是兑现《巴黎协定》减排目标的一项根本措施，开展交通汽车

基金资助项目：国家自然科学基金(51807134)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51807134).

和配电网融合研究，加快车网融合的技术创新是我国实现能源高效、清洁、绿色、低碳转型发展的必然需求[1]。氢燃料电池汽车(fuel cell vehicle，FCV)能有力推动氢能的应用，发展前景广阔。制氢加氢站(hydrogen producing and refueling stations，HPRS)是电–氢能源耦合枢纽，通过电解水制氢系统和储氢加氢装置，实现了对配电网和 FCV 的有效强耦合，已成为 FCV 规模化应用的关键，对其合理规划布局，意义重大[2]。

近年来，国内外学者对于 HPRS 的布点优化问题做了一些研究。在加氢站模型构建方面，文献[3]重点设计了整个氢气供应网络的数学模型，将氢供应链网络设计模型与加氢站规划模型结合，以生成新的模型公式，但在该模型中加氢需求并不是决策变量，忽略了加氢供应系统对需求的影响。文献[4]通过分析氢能源全寿命周期成本，构建多方面约束条件，以此提高氢能高速公路规划策略的适用性，但该模型没有与高速公路网相结合，模型应用价值将受到其服务区域的限制。文献[5]为 HPRS 提出最佳运营策略，通过向纯电动汽车和氢燃料电池汽车的用户出售电力和氢气来实现利润最大化。文献[6]以综合能源系统为规划对象,考虑了系统供电辐射区域内电动汽车随机充电需求，并对系统进行了容量配置优化。文献[7]基于共享车辆最新的加氢数据，对不同车辆规模的风力 HPRS 最优尺寸进行了研究，但单靠共享车辆的加氢数据进行模拟会与实际存在一定误差。文献[8]在优化模型中将现有加油站改造为氢油混合站，继承了交通路网的优势，但忽略了制氢对电网的冲击。文献[9]为加氢站提供了一个长期的位置规划，以满足不断增长的氢需求，但规划模型侧重于经济成本，未考虑到氢需求的增长对电网的影响。文献[10]在探讨发电低碳化给电网带来挑战的基础上，提出了西部电氢综合能源网初步方案及相应的关键技术需求。

简言之，现有文献大多考虑加氢站的模型与尺寸，且大多都是离网模式，难以描述 HPRS 对于电网的影响。在加氢站与电网互动方面，文献[11]建立了 HPRS 选址和规模的稳健模型，考虑了 FCV 充氢需求的不确定性，并将其接入电网时的附加损耗纳入模型，同时对加氢站各单元进行制氢规划和容量调整，来降低加氢站运行成本。文献[12]同时考虑交通网络约束、电力网络约束和设备运行约束，构建出风–氢–电耦合网络规划模型，但是该模型缺少对风电出力和加氢行为不确定性的分析。文献[13]提出一种风氢耦合并网系统能量管理控制策略，降低了并网功率波动。文献[14]提出一个综合投资均衡模型，考虑了电力、天然气和氢能交易，制定了三角耦合关系，但该模型不适应于考虑配电网与氢燃料汽车耦合影响的制氢加氢站布点优化。

总体而言，目前对于 HPRS 的布点优化研究主要集中在 HPRS 的建模、运行成本的优化以及制氢方式方面，且大多都是离网模式，较少考虑制氢对电网影响，以及较少将 HPRS 布点优化与交通网相结合，缺少对于路网因素的考虑，对于汽车加氢需求与服务范围都没有确定的模型。同时也较少考虑 FCV 的加氢波动和用户对 HPRS 的心理接受程度。

区别于电动汽车充电站的布局[15-16]，制氢加氢站因氢能的安全性要求和化学特性，在布点优化策略中不仅要考虑经济性、电网互动等，还需重点考虑周围住户的接受程度。为此，本文提出了一种考虑配电网与氢燃料汽车耦合影响的制氢加氢站布点优化策略，首先，通过蒙特卡罗模拟 FCV 充氢需求并提出 HPRS 工作模式；然后，将 HPRS 的整条运行线加入到布点优化中，同时基于 HPRS 对电网和交通网的影响，以及考虑用户对于 HPRS 的接受程度以及经济成本，构建考虑路–电影响和心理指标以及经济指标的联合布点模型，该模型首次将 HPRS、心理学、经济成本和路–电耦合网络规划相结合，通过层次分析法协调优化各影响元素在布点模型中的比重；最后，借助改进的樽海鞘群算法来对模型进行求解，获得了 HPRS 布点优化策略。该策略针对 HPRS 的制氢特性以及充氢需求不确定性，将 HPRS 布点优化问题与配电网和交通网相耦合。通过仿真验证，证明本文所提策略可有效减少 HPRS 在制氢时段对电网的影响，并保证 HPRS 在满足路网约束条件的同时考虑用户的心理因素，使用户对于布点优化策略的接受程度最大化，便于方案的实施。

1 HPRS 工作模式分析

1.1 FCV 出行规律

根据北京理工大学电动汽车国家工程实验室利用电动汽车服务与管理中心(SMC-EV)的数据对大型 FCV 的运行状况进行分析[17]，具体规律见表 1。

本文对表 1 中数据进行分析，通过蒙特卡罗对单座 HPRS 的日加氢车辆数和加氢量进行模拟，数学模型见附录 A 式 A(1)—式 A(5)。在考虑每个车

辆不同行驶里程区间内的加氢特性、每日的工作时间以及单次行驶里程和耗氢量的影响因素后，得到每日 HPRS 的充氢需求以及充氢时刻分布如图 1 所示。

按照 2 类 FCV 的工作区间，以 1.5 h 为一间隔，将加氢时段分为 11 段，可知在中午时段内加氢需求最高，对 1 个月内的数据进行归纳整理取均值，得到单座 HPRS 一天加氢需求约为 934.74 kg。

1.2 HPRS 工作模式

根据 1.1 节所述 FCV 出行规律，在 22:00 之后，FCV 的加氢需求将急剧减少，且根据图 1 的氢气需求分布图可知，FCV 在早上和晚上的加氢需求较小。一辆 FCV 的加氢时间约为 3 min，24:00 之前，HPRS 基本上可以完成加氢任务，24:00 之后开始制氢工作，HPRS 的工作模型如图 2 所示。

本文通过分析 FCV 的出行特性和加氢规律，考虑到 24 h 制氢会在用电高峰时段增加电网供电压力，同时由于白天电价高，还会影响到 HPRS 经济成本，因此本文规定 HPRS 在白天进行 FCV 补给，夜晚制氢。但考虑到在夜间时段会有部分 FCV 存在加氢需求，因此在仿真模拟时，需考虑这部分的消耗对制氢时长的影响，使得 HPRS 既能及时为储氢罐补充燃料，也能满足 FCV 的需求。根据 HPRS 工作方式，设定 24:00 之后开始制氢工作，制氢时间为

$$T=\frac{L_m^d\left(1-S_{m,\mathrm{cqg}}^d\right)+M_m^d}{f_{m,\mathrm{cqg}}^{t,d}} \tag{1}$$

式中：L_m^d、$S_{m,\mathrm{cqg}}^d$ 分别为第 m 个 HPRS 在 d 天夜间的充氢负荷和 24:00 时储氢罐的剩余容量；$d\in D$，d 为工作日第 d 天，D 为一年工作日天数的集合；$m\in M$，M 为 HPRS 总数量；M_m^d、$f_{m,\mathrm{cqg}}^{t,d}$ 分别为第 m 个 HPRS 在 d 天夜间氢气需求量和 t 时刻流入储氢罐的氢气量，$t\in T$，T 为制氢时间。

2 考虑配电网与氢燃料汽车耦合影响的 HPRS 优化布点模型

2.1 考虑配电网与氢燃料汽车耦合影响的目标函数

基于第 1 章 FCV 运行特点和 HPRS 的工作模式，综合考虑电力网络影响指标、HPRS 交通路网指标和用户心理影响指标等多方面目标，构建 HPRS 优化布点模型，具体优化模型框图见图 3[18]。

在电力网络层面：设 S_1 为电压偏差，HPRS 接入配电网后通过布点优化减小 S_1；S_2 为交流线有功功率裕度，是衡量电力系统稳定运行的重要指标；

表 1 FCV 出行规律

Table 1 Fuel cell vehicle travel rules

参数名称	公交汽车	物流车辆
单次可行驶里程/km	500	305
日行驶里程/km	70~230	90~185
日均行驶里程/km	147	178
单次里程/km	17~25(49%) ≤29(80%)	13~21(47%) 37(80%)
单次平均里程/km	22	23
单程时长/min	60~90	30~60
日工作时长/h	5.5~7, 8.5~9.5	3~4.5
日起止工作时间	06:00—22:00	06:00—20:00

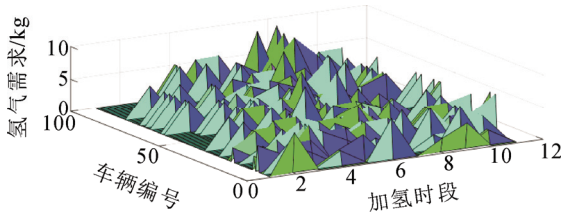


图 1 充氢需求分布

Fig.1 Distribution of hydrogen charging demand

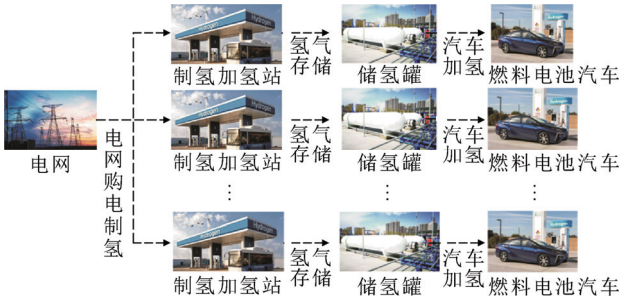


图 2 HPRS 工作模型

Fig.2 Working model of HPRS

S_3 为整体网损，S_3 过大会导致电能损失和能源浪费，降低 S_3 是重要的经济性目标[19]。

在交通网络层面：设 S_4 为 HPRS 捕获的交通流量，通过布点优化应尽可能捕获交通流量来满足用户充氢需求；S_5 为 HPRS 服务范围，大范围服务网是氢供应链与氢能交易模式成功运行的前提。

在用户心理层面：设 S_6 为用户满意度，国内外存在许多因未考虑用户接受程度而遭到强烈阻扰导致方案不能正常实施的案例，且国内外关于 HPRS 布点优化的文献也少有对用户满意度的考虑，S_6 是方案正常执行的基础条件。

在经济影响层面：设 S_7 为投资成本；S_8 为运营成本，通过布点优化策略尽可能降低 HPRS 的经济成本。

在实际布点优化中，以目标函数 S 最小化为优化目标，具体如下[20]：

$$\begin{cases} S=\min(k_1S_1+k_2S_2+k_3S_3+k_4S_4+ \\ \quad k_5S_5+k_6S_6+k_7S_7+k_8S_8) \\ k_1+k_2+k_3+k_4+k_5+k_6+k_7+k_8=1 \end{cases} \tag{2}$$

式中：k_1、k_2、…、k_8 为上述各分项指标的权重系数。在 HPRS 布点优化中，采用层次分析法(analytic hierarchy process，AHP)计算各分项指标权重系数

$$k_f=\frac{\sqrt[F]{\prod_{y=1}^{F}a_{fy}}}{\sum_{f=1}^{F}\sqrt[F]{\prod_{y=1}^{F}a_{fy}}},f=1,2,\cdots,F \tag{3}$$

式中：k_f 为第 f 个指标的权重系数；a_{fy} 为 AHP 判断矩阵内要素 f 与要素 y 的重要性比较结果；F 为矩阵阶数。

2.1.1 电力网络影响指标

1）电压偏差 S_1

本文将考虑电压波动水平的节点电压偏差作为优化目标，定义其为目标 S_1，计算式为

$$\begin{cases} S_1=\dfrac{S_{a1}}{NT}\sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}\dfrac{(U_{t,i}-U_{t,i\min})(U_{t,i\max}-U_{t,i})}{(U_N-U_{t,i\min})(U_{t,i\max}-U_N)} \\ S_{a1}=\dfrac{1}{NT}\sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}\left|\dfrac{U_{t,i}}{U_N}-\bar{U}_i\right| \\ \bar{U}_i=\dfrac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\left|\dfrac{U_N-U_{t,i}}{U_N}\right| \end{cases} \tag{4}$$

式中：N 为配电网节点数；$U_{t,i}$ 为 t 时刻 i 号节点的电压偏差；$U_{t,i\min}$、$U_{t,i\max}$ 分别为 t 时刻 i 号节点额定电压偏差的最小和最大值；U_N 为额定电压；S_{a1} 为电压波动水平指标；$\bar{U}_i$ 为节点 i 在计算时段内电压波动水平的均值[21]。

2）交流线有功功率裕度 S_2

本文通过方差的求取来体现每条线路潮流的离散程度，定义其为目标 S_2，计算式为

$$\begin{cases} S_2=S_{a2}\sqrt{\dfrac{1}{TK}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}(P_{t,i}-P_{k,t,i})^2} \\ S_{a2}=\dfrac{a}{TK}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}(P_{k,t,i}-P_{t,i})+ \\ \qquad \dfrac{b}{TK}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}\left(\dfrac{P_{k\max,i}-P_{k,t,i}}{P_{k\max,i}}\right) \\ P_{t,i}=\dfrac{\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}P_{k,t,i}}{TK} \end{cases} \tag{5}$$

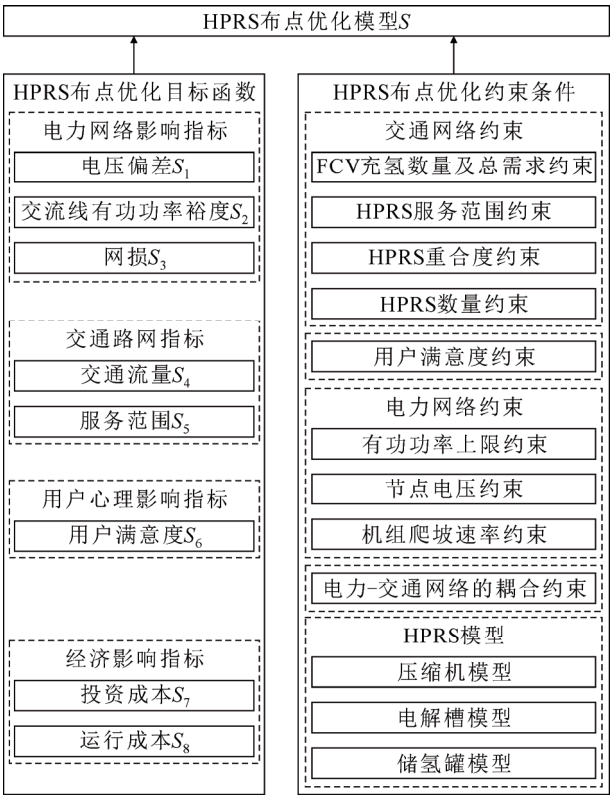


图 3 HPRS 优化布点模型框图

Fig.3 Block diagram of optimization model for hydrogen production and refueling station layout

式中：S_{a2} 为考虑功率波动和最大功率偏差对目标函数的影响系数；$k\in K$，k 为与节点 i 相连的第 k 条交流线，K 为与节点 i 相连的交流线总数；$P_{t,i}$ 为 t 时刻与节点 i 相连交流线的功率平均值；$P_{k,t,i}$ 为在 t 时刻与节点 i 相连线路 k 的有功功率水平；a、b 分别为功率波动和最大功率偏差在影响系数中的权重；$P_{k\max,i}$ 为与节点 i 相连线路 k 的传输功率上限。

3）网损 S_3

HPRS 接入配网后，网损计算式为[22]

$$S_3=\sum_{i\in N_L}G_{ij}\left(U_i^2+U_j^2-2U_iU_j\cos\left(\theta_i-\theta_j\right)\right) \tag{6}$$

式中：U_i、U_j 分别为节点 i、节点 j 的电压幅值；G_{ij} 为节点 i、j 间支路的电导；N_L 为输电线路集合；θ_i、θ_j 为节点 i、j 的电压相角。

2.1.2 交通网络影响指标

1）交通流量 S_4

$$S_4=\sum_{u\in N_{JT}}\frac{1.5d_{uv}}{F_uF_v},\ u\neq v \tag{7}$$

式中：F_u、F_v 分别为线路起点 u、终点 v 的车辆权重系数；d_{uv} 为交通路网中路径 uv 的长度；N_{JT} 为路网总节点。

2）服务范围 S_5

$$\begin{cases} S_5=\sum\limits_{m=1}^{M}\dfrac{\sqrt{\dfrac{1}{M}\sum\limits_{m=1}^{M}\left(S_m-\dfrac{1}{M}\sum\limits_{m=1}^{M}S_m\right)^2}}{S_m-\dfrac{1}{M}\sum\limits_{m=1}^{M}S_m} \\ S_{5.m}=\dfrac{P_m}{\lambda_u\left(\sum\limits_{l=1}^{L}d_l E_{\mathrm{FCV}}J_{\mathrm{FCV}}\right)} \end{cases} \tag{8}$$

式中：$S_{5.m}$ 为第 m 个 HPRS 对用户吸引力，为适应算法规则，S_5 为 HPRS 服务范围的倒数，即 S_5 越小，服务范围越大；P_m 为第 m 个 HPRS 功率；λ_u 为节点 u 影响因素权重；d_l 为 FCV 到达 HPRS 路径 l 的长度，$l\in L$，L 为交通路径集合；E_{FCV} 为单位距离耗氢量；J_{FCV} 为 HPRS 氢价。

2.1.3 用户心理影响指标

用户满意度 S_6 直接影响着 HPRS 后续的发展，而在国内外众多调研中发现，影响用户满意度的 2 个最主要指标分别为加氢站的数量和用户邻近度，加氢站的数量影响着用户对于氢能的接受程度，有数据显示当替代加油站占总加油站的百分比从 3%上升到 10%时，严重担忧的预购者百分比从 60%下降到约 20%。同样，当 HPRS 数量达到一定规模后，用户在心理上会大幅度减小对于氢能的担忧，数量对于用户满意度的影响为

$$S_{\mathrm{num}}=\begin{cases} 0.6, & 0.03\le\lambda<0.05 \\ 0.4, & 0.05\le\lambda<0.1 \\ 0.2, & 0.1\le\lambda<0.15 \end{cases} \tag{9}$$

式中：S_{num} 为 HPRS 的数量对于用户满意度的影响；$\lambda=M/N$ 为 HPRS 在路电耦合网络中的规模。用户与 HPRS 之间的距离将会直接影响用户的加氢意愿，距离越远，影响程度越大，邻近度对于用户满意度的影响为

$$S_{\mathrm{ljd}}=\frac{\sum\limits_{m=1}^{M}\left(\dfrac{N_m}{N_{\mathrm{JT}}}+\dfrac{\sum\limits_{k_m=1}^{K_m}l_{km}}{L_{\mathrm{JT}}}+\dfrac{\sum\limits_{t=1}^{T}\sum\limits_{n_m=1}^{N_m}n_{nm,t}}{TN_{\mathrm{EV}}}\right)}{M} \tag{10}$$

式中：S_{ljd} 为邻近度对于用户满意度的影响；$n_m\in N_m$，n_m、N_m 分别为第 m 个 HPRS 服务范围包含的第 n_m 个节点和总节点数；$k_m\in K_m$，k_m、K_m 分别为与第 m 个 HPRS 相连的第 k_m 条路径和路径总数；l_{km} 为与第 m 个 HPRS 相连的第 k_m 条路径长度；L_{JT} 表示路网中总的路径长度；$n_{nm,t}$ 表示 t 时刻路网节点 n_m 的车辆数；N_{EV} 表示交通路网总车辆数。

用户心理影响指标为

$$S_6=\frac{1}{\partial S_{\mathrm{num}}+(1-\partial)S_{\mathrm{ljd}}} \tag{11}$$

式中，∂ 为数量因素在用户满意度中的权重[23]。

2.1.4 经济影响指标

1）投资成本 S_7

$$\begin{cases} S_7=\sum\limits_{m=1}^{M}\dfrac{\tau(1+\tau)^{T_0}}{(1+\tau)^{T_0}-1}\left(C_{m,\mathrm{djc}}+C_{m,\mathrm{ysj}}+C_{m,\mathrm{cqg}}+C_{m,\mathrm{o}}\right) \\ C_{m,\mathrm{djc}}=c_{\mathrm{djc}}\max(P_{m,\mathrm{djc}}^{t,d}) \\ C_{m,\mathrm{ysj}}=c_{\mathrm{ysj}}P_{\mathrm{ysj}}^{\mathrm{ref}}\left(\dfrac{\max(P_{m,\mathrm{ysj}}^{t,d})}{P_{\mathrm{ysj}}^{\mathrm{ref}}}\right)^{c_{\mathrm{s}}}\left(\dfrac{F_{\mathrm{ysj}}}{F_{\mathrm{ysj}}^{\mathrm{ref}}}\right)^{c_{\mathrm{p}}} \\ C_{m,\mathrm{cqg}}=c_{\mathrm{cqg}}M_{\mathrm{cqg}}^{\mathrm{ref}}\left(\dfrac{M_{m,\mathrm{cqg}}F_{\mathrm{cqg}}^{\mathrm{ref}}}{M_{\mathrm{cqg}}^{\mathrm{ref}}F_{\mathrm{ysj}}}\right)^{t_{\mathrm{s}}}\left(\dfrac{F_{\mathrm{ysj}}}{F_{\mathrm{ysj}}^{\mathrm{ref}}}\right)^{t_{\mathrm{p}}} \end{cases} \tag{12}$$

式中：τ、T_0 分别为折现率和 HPRS 运行规划期；$C_{m,\mathrm{djc}}$、$C_{m,\mathrm{ysj}}$、$C_{m,\mathrm{cqg}}$、$C_{m,\mathrm{o}}$ 分别为第 m 个 HPRS 电解槽、压缩机、储氢罐的投资成本和其他有关费用；c_{djc} 为电解槽单位额定功率的成本；$P_{m,\mathrm{djc}}^{t,d}$ 为第 m 个 HPRS 在 d 天 t 时刻电解槽的输入功率；c_{ysj} 为压缩机单位参考额定功率的成本；$P_{\mathrm{ysj}}^{\mathrm{ref}}$ 为压缩机的参考额定功率；c_{s}、c_{p} 分别为压缩机的标度指数参数和压力指数参数；$P_{m,\mathrm{ysj}}^{t,d}$ 为 HPRS 所选压缩机的额定功率；F_{ysj} 为压缩机的正常工作压力；$F_{\mathrm{ysj}}^{\mathrm{ref}}$ 为压缩机的参考压力；c_{cqg} 为储氢罐单位参考容量的成本；$M_{\mathrm{cqg}}^{\mathrm{ref}}$ 为储氢罐的参考容量；$M_{m,\mathrm{cqg}}$ 为所选储氢罐的容量；$F_{\mathrm{cqg}}^{\mathrm{ref}}$ 为储氢罐的参考压力；t_{s}、t_{p} 分别为储氢罐的刻度指数参数和压力指数参数；$C_{m,\mathrm{o}}$ 相关参数见附录 D 表 D2。

2）运营成本 S_8

$$\begin{cases} S_8=\sum\limits_{m=1}^{M}\left(C_{m,\mathrm{el}}+C_{m,\mathrm{w}}+M_{m,\mathrm{cqg}}c_{\mathrm{st}}\right) \\ C_{m,\mathrm{el}}=\sum\limits_{d=1}^{365}\sum\limits_{t=1}^{T}\left(P_{m,\mathrm{djc}}^{t,d}+P_{m,\mathrm{ysj}}^{t,d}+M_m^{t,d}p_{\mathrm{c}}\right)J_{\mathrm{el}}^{t} \\ C_{m,\mathrm{w}}=\sum\limits_{d=1}^{365}\sum\limits_{t=1}^{T}\left(V_{m,\mathrm{djcw}}^{t,d}+V_{m,\mathrm{ysjw}}^{t,d}\right)J_{\mathrm{w}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} S_8=\sum\limits_{m=1}^{M}\left(C_{m,\mathrm{el}}+C_{m,\mathrm{w}}+M_{m,\mathrm{cqg}}c_{\mathrm{st}}\right) \\ C_{m,\mathrm{el}}=\sum\limits_{d=1}^{365}\sum\limits_{t=1}^{T}\left(P_{m,\mathrm{djc}}^{t,d}+P_{m,\mathrm{ysj}}^{t,d}+M_m^{t,d}p_{\mathrm{c}}\right)J_{\mathrm{el}}^{t} \\ C_{m,\mathrm{w}}=\sum\limits_{d=1}^{365}\sum\limits_{t=1}^{T}\left(V_{m,\mathrm{djcw}}^{t}+V_{m,\mathrm{ysjw}}^{t}\right)J_{\mathrm{w}} \end{cases} \tag{13}$$

式中：$C_{m,\mathrm{el}}$、$C_{m,\mathrm{w}}$ 分别为第 m 个 HPRS 耗电和净水成本；c_{st} 为氢储罐中储存每千克氢的成本；$M_m^{t,d}$ 为第 m 个 HPRS 在 d 天 t 时刻氢气需求量；p_{c} 为冷却

系统的有功耗率；J_{el}^{t}为 t 时刻的电价；$V_{m,\mathrm{djcw}}^{t}$、$V_{m,\mathrm{ysjw}}^{t}$分别为t时刻电解槽和压缩机消耗的净水量；J_{w}为当地净水销售价格。

2.2 约束条件

本文构建的HPRS优化布点模型所考虑的主要约束如下文所述。

2.2.1 交通网络约束

1）FCV充氢数量及总需求约束

$$N_{m,\mathrm{FCV}} \le N_{m,\mathrm{H}} \tag{14}$$

$$\sum_{m=1}^{M} M_{m,\mathrm{cqg}} \ge \sum_{e\in N_{\mathrm{EV}}} M_{e,\mathrm{FCV}} \tag{15}$$

式中：$N_{m,\mathrm{FCV}}$、$N_{m,\mathrm{H}}$分别为第 m 个HPRS中汽车充氢数量和允许充氢台数；$M_{e,\mathrm{FCV}}$为第 e 辆汽车容量。

2）HPRS数量约束

$$n_{u,\mathrm{H}} = 1 \tag{16}$$

式中，$n_{u,\mathrm{H}}$为路网节点 u 处HPRS数量，在规划过程中，每个路网节点只能建设一座HPRS。

3）HPRS服务范围约束

$$2 \le N_m \le 10 \tag{17}$$

4）HPRS重合度约束

$$\frac{\left|N_m \bigcap N_s\right|}{\left|N_m\right|} \le \xi, m \ne s, \left|N_m\right| \ne 0 \tag{18}$$

式中：N_s为第 s 个HPRS影响范围包含节点数，即HPRS服务范围；ξ为2个HPRS服务范围内相同节点数，即重合度，在本文布点优化策略中，HPRS的重合度不宜过高。

2.2.2 用户满意度约束

$$S_6 > 2 \tag{19}$$

式中，S_6为用户满意度，数量对于用户满意度的影响取最大值为0.6，每座HPRS连接支路数和支路数长度取均值，服务范围覆盖率取60%，所求数值代表了最基础情况下的用户满意度，即最低值为2。

2.2.3 电力网络约束

1）有功功率上限约束

$$P_{ij} \le P_{ij\max} \tag{20}$$

式中：P_{ij}和 $P_{ij\max}$分别为线路 l_{ij}的有功功率和有功功率上限[24]。

2）机组爬坡速率约束

$$-P_x \le P_x(t) - P_x(t-1) \le P_x \tag{21}$$

式中：$-P_x$和 P_x分别为机组 x 有功出力单位时间变化上下限；$P_x(t)$和$P_x(t-1)$分别为机组x在t时刻和$t-1$时刻的有功功率。

3）节点电压约束

$$U_{t,i\min} \le U_{t,i} \le U_{t,i\max} \tag{22}$$

2.2.4 电力–交通网络耦合约束

$$\begin{cases} P_{u,\mathrm{H}}^{t,d} = P_{m,\mathrm{djc}}^{t,d} + P_{m,\mathrm{ysj}}^{t,d} \\ P_{i,\mathrm{H}}^{t,d} = P_{u,\mathrm{H}}^{t,d} \\ P_{i}^{t,d} = P_{i,\mathrm{H}}^{t,d} + P_{i,\mathrm{base}}^{t,d} \\ Q_{i}^{t,d} = Q_{i,\mathrm{base}}^{t,d} \end{cases} \tag{23}$$

式中：$P_{u,\mathrm{H}}^{t,d}$为交通网中节点 u 处HPRS第 d 天 t 时刻消耗的有功功率；$P_{i,\mathrm{H}}^{t,d}$为电力网中节点 i 处HPRS第 d 天 t 时刻消耗的有功功率；$P_{i}^{t,d}$、$Q_{i}^{t,d}$分别为第 d 天 t 时刻节点 i 处负荷的有功和无功功率；$P_{i,\mathrm{base}}^{t,d}$、$Q_{i,\mathrm{base}}^{t,d}$分别为电力网中$i$节点初始负荷有功和无功功率。

2.2.5 HPRS系统设备模型约束

1）电解槽模型

电解槽通过向电网购电来满足制氢需求[25]，具体为

$$P_{m,\mathrm{djc}}^{t,d} = \frac{H_{\mathrm{h}} B_{m}^{t,d}}{\eta_{\mathrm{H}}} \tag{24}$$

式中：H_{h}为氢气的热值；$B_{m}^{t,d}$为第 m 个HPRS在第 d 天 t 时刻电解槽的氢气生产率；η_{H}表示电解槽能量效率。

2）压缩机模型

由电解槽产生的气态低压氢气与HPRS之间存在较大氢压差，需通过增压操作来增大其在储氢罐中的储存密度，压缩机在工作时消耗的电功率如下：

$$P_{m,\mathrm{ysj}}^{t,d} = \frac{f_{m,\mathrm{ysj}}^{t,d} E_{\mathrm{ysj}}^{\mathrm{ref}} \ln(F_{\mathrm{ysj}} / F_{\mathrm{ini}})}{\ln(F_{\mathrm{ysj}}^{\mathrm{ref}} / F_{\mathrm{ini}})} \tag{25}$$

$$f_{m,\mathrm{ysj}}^{t,d} = \left(1-\gamma_{\mathrm{ysj}}\right) B_{m}^{t,d} \tag{26}$$

式中：$f_{m,\mathrm{ysj}}^{t,d}$为第 m 个HPRS在 d 天 t 时刻流入压缩机的氢气量；$E_{\mathrm{ysj}}^{\mathrm{ref}}$为压缩机在参考压力下电力消耗；$F_{\mathrm{ini}}$为标准大气压力；$\gamma_{\mathrm{ysj}}$为电解槽到压缩机的氢耗散率。

3）储氢罐模型

电解槽产生的氢气并不能被实时消耗，需通过储氢罐来储存未消耗的氢，具体模型如下：

$$S_{m,\mathrm{cqg}}^{t+1,d} = S_{m,\mathrm{cqg}}^{t,d} - M_{m}^{t,d} + f_{m,\mathrm{cqg}}^{t,d} \tag{27}$$

$$f_{m,\mathrm{cqg}}^{t,d} = (1-\gamma_{\mathrm{cqg}}) f_{m,\mathrm{ysj}}^{t,d} \tag{28}$$

式中：$S_{m,\mathrm{cqg}}^{t,d}$和$S_{m,\mathrm{cqg}}^{t+1,d}$分别为第 m 个HPRS在 d 天 t 时刻和 t+1 时刻储氢罐中的氢气容量；γ_{cqg}为压缩机到储氢罐的氢耗散率。

3 MSSA 对模型求解

考虑配电网与氢燃料汽车的互相耦合影响，HPRS 优化布点模型是一个多变量、非线性的复杂优化问题。尤其是分析 HPRS 接入路电–耦合网络后的影响，对 M 个 HPRS 进行布点优化，约束条件复杂，计算量大，常规的解析式算法较难求解。因此，本文借助樽海鞘群优化算法(salp swarm algorithm，SSA)进行分析，相较于传统的粒子群算法，该算法求解精度高、求解误差小[26]。

但通过 SSA 对本文的优化布点模型进行求解，在迭代后期各指标适应度值差别较小，易陷入局部最优。且在 SSA 求解过程中所有领导者向最优适应度个体靠近，容易忽略种群内其他优秀个体，存在全局搜索与局部搜索不平衡问题。当应用到本文模型求解时，因为精确度的要求，该弊端会被放大，使求解陷入早熟。因此本文引进改进的樽海鞘群优化算法(modified salp swarm algorithm，MSSA)，通过对个体权重的设置来更新领导者与跟随者的位置计算式，使对模型的求解达到最优[27]。

当算法应用到本文 HPRS 布点优化问题时，具体求解过程如下文所述。

1）输入 HPRS 优化数量及寻优策略个数。

在初始阶段输入 H 个寻优策略，即搜索个体；同时输入单个寻优策略内对应 HPRS 数量 R，生成 $H\times R$ 的欧式空间为

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} x_1^1 & \cdots & x_r^1 & \cdots & x_R^1 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_1^h & \cdots & x_r^h & \cdots & x_R^h \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_1^H & \cdots & x_r^H & \cdots & x_R^H \end{bmatrix} \tag{29}$$

式中：$h\in H$，H 为寻优策略个数；$r\in R$，R 为种群数量，即寻优策略内 HPRS 数量；x_r^h 为第 h 个策略内第 r 个 HPRS 布点位置。

2）初始化 HPRS 布点位置。

通过 SSA 来初始化寻优策略内 HPRS 布点位置，空间中第 h 个 HPRS 布点优化策略表示为

$$\boldsymbol{X}_h=\begin{bmatrix} x_1^h & x_2^h & \cdots & x_R^h \end{bmatrix} \tag{30}$$

3）针对 HPRS 布点策略寻优。

领导者作为 $\boldsymbol{X}$ 矩阵的第 1 个向量，代表当前寻优过程的最优策略，在未达到结束条件前，引导后面的 HPRS 寻优策略朝着最优布点优化策略靠近，领导者的位置更新计算式为

$$x_r^1=\begin{cases} F_r+c_1((r_{\max}-r_{\min})c_2+r_{\min}), & c_3\ge 0.5 \\ F_r-c_1((r_{\max}-r_{\min})c_2+r_{\min}), & c_3<0.5 \end{cases} \tag{31}$$

式中：x_r^1、F_r 分别为领导者与 HPRS 最优布点策略在 r 维空间的位置；$r_{\max}$ 和 $r_{\min}$ 分别为 r 维空间取值的上下边界；c_1、c_2、c_3 为控制参数，c_2 和 c_3 是区间[0，1]内产生的随机数，c_2 决定移动长度，c_3 决定移动方向；c_1 为收敛因子，它与当前种群迭代次数有关，计算式为

$$c_1=2\mathrm{e}^{-\left(\frac{4t_z}{t_{z\max}}\right)^2} \tag{32}$$

式中：t_z、$t_{z\max}$ 分别为当前的迭代次数和最大迭代次数。

追随者的位置更新计算式为

$$x_r^h(t_z)=\frac{1}{2}(x_r^h(t_z-1)+x_r^{h-1}(t_z-1)) \tag{33}$$

式中：$x_r^h(t_z)$、$x_r^h(t_z-1)$ 分别为 t_z 次和 t_z–1 次迭代第 h 个 HPRS 布点优化策略在 r 维空间的坐标；$x_r^{h-1}(t_z-1)$ 表示 t_z–1 次迭代第 h–1 个 HPRS 布点优化策略在 r 维空间的坐标。

4）输出 HPRS 布点优化策略。

当满足终止条件后，输出 HPRS 最优布点策略，即当前欧式空间首相量 $\boldsymbol{X}_{h\min}$，计算式为

$$\boldsymbol{X}_{h\min}=\begin{bmatrix} x_{1\min}^h & \cdots & x_{r\min}^h & \cdots & x_{R\min}^h \end{bmatrix} \tag{34}$$

式中，$x_{r\min}^h$ 为输出的 HPRS 最优布点策略内第 r 个 HPRS 布点位置。

针对 x_r^1、$x_r^h(t)$ 在寻优过程中易陷入局部搜索的问题，对 H 个搜索个体设置权重，合理应用全局信息，避免限入局部范围内的最优值而提前结束搜索。权重计算式见附录 B 式 B(1)—B(2)，改进后的领导者为：

$$x_r^{1,\mathrm{re}}=\omega x_r^1+f_{\mathrm{rand}}(K_{\mathrm{W}}-x_r^1) \tag{35}$$

$$\omega=\left(\frac{t_z}{t_{z\max}}\right)^2 \tag{36}$$

式中：K_{W} 为总体权重；f_{rand} 为 0~1 之间均匀分布随机实数；x_r^1、$x_r^{1,\mathrm{re}}$ 分别为当前领导者和位置更新后的领导者在 r 维空间的坐标；ω 为个体位置控制参数[28]。

针对全局搜索与局部搜索不平衡问题，添加自适应惯性权重，在探索初期扩大搜索范围，后期增强局部搜索能力，自适应惯性权重 κ 如附录 B 式 B(3)所示，改进后的追随者位置计算式为

$$x_r^h(t_z)=\frac{1}{2}(x_r^h(t_z-1)+\kappa x_r^{h-1}(t_z-1)) \tag{37}$$

通过对搜索个体位置更新计算式的改进，避免

了模型在求解时陷入局部最优，算法流程如下文所述，寻优流程图见附录 C 图 C1。

1）初始化寻优策略。利用式(29)初始化一个规模为 $R\times H$ 的搜索群，R 为寻优策略中 HPRS 数量，H 为搜索规模。

2）计算每个策略里 R 个 HPRS 的适应度值。

3）按 HPRS 适应度进行排序，首端为当前最优 HPRS 布点策略。

4）按步骤 3 的排序，将目标函数排在前 1/2 的优化策略视为领导者，后 1/2 视为追随者。

5）根据式(35)和式(37)更新位置。

6）计算目标函数值，重新排序，通过比较筛选 HPRS 最优布点策略。

7）重复步骤 4)—6)，直至满足终止条件，即是否求得最优解或达到最大迭代次数，是则输出 HPRS 最优布点优化策略，否则返回步骤 3)。

4 仿真算例

4.1 算例介绍

本文采用 IEEE 30 标准算例与 30 路网节点的耦合框架进行仿真分析，对应交通路线–电力拓扑耦合框架如图 4 所示，图中单位距离为 1 km，相应 HPRS 位置用黄色节点六边形表示，HPRS 数量以 M=3 为例，图中所连虚线为路–电耦合节点。

最初 HPRS 布点位置为原先路网加油站位置，位于 9、12、21 节点。对于三级站，本文 HPRS 选取储氢罐模型为额定压力 35 MPa-35 000 L 的氢气瓶(车用：额定压力 35 MPa-140 L 的Ⅲ型氢气瓶)[29]。根据理想气体状态方程，夜间负荷需求如图 5 所示。

通过仿真求得该区域氢气总需求量为 2804.22 kg/d，在标准状态下一座 HPRS 的加氢能力约为 1079 kg/d。因此本文设该区域 HPRS 数量为 3 进行仿真验证。HPRS 具体参数如表 2 所示。

仿真参数、建设成本中其他相关费用、各个节点的影响因子权重分别见附录 D 表 D1、表 D2、表 D3。

4.2 仿真结果

4.2.1 优化布点模型验证分析

首先，对原始方案进行评估，获得的交通路网指标、电网线路影响指标、心理学指标等结果如图 6 所示。

在电网线路影响指标中，功率裕度过高，表明线路面临过载的风险，对应线路的有功功率见表 3。

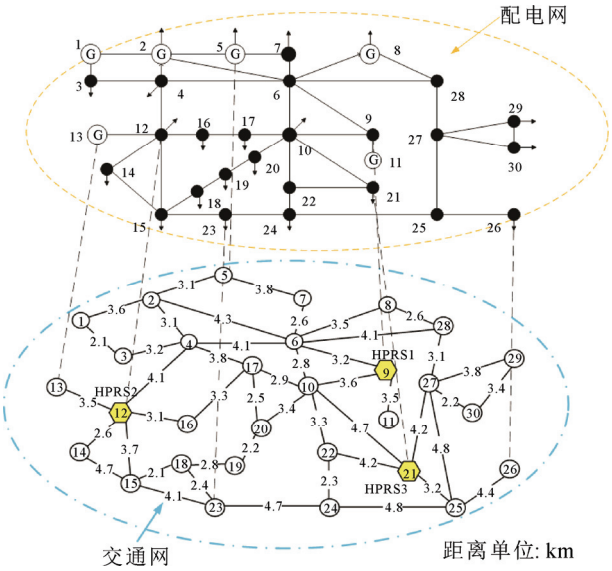


图 4 路–电耦合框架图

Fig.4 Road-electrical coupling frame diagram

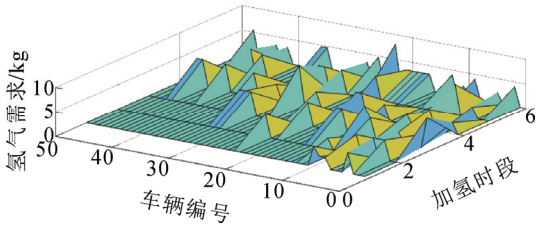


图 5 夜间负荷需求分布图

Fig.5 Distribution of night load demand

表 2 HPRS 参数

Table 2 HPRS parameters

氢气总需求量/(kg·d^{-1})	HPRS 数量	电解槽总额定功率/MW	压缩机总额定功率/kW
2804.22	3	7.34	951.09

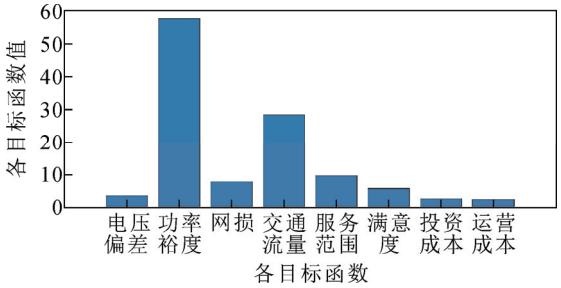


图 6 优化前制氢时段各定量指标

Fig.6 Quantitative indicators during the hydrogen production period before optimization

6-9 支路与 9-10 支路的功率传输大小相差 2.5 倍，12-14，12-16 与 4-12 支路的功率传输大小相差近 3.3 倍，10-21 与 21-22 支路的功率传输大小相差

近 14 倍。存在功率传输不平衡的问题，不利于电网的稳定运行。夜间以 15 min 为间隔，各节点电压基准值为 135 kV，电压波动如图 7 所示。在交通路网指标中，具体的节点交通流量与服务范围如表 4、5 所示。

表 3 中 $S_{5.1}$、$S_{5.2}$、$S_{5.3}$ 分别为第 1、第 2、第 3 个 HPRS 对用户吸引力。

表 3　优化前各线路有功功率

Table 3　Active power of each line before optimization

节点	相连线路对应节点	有功功率/MW
9	6	13.7740
9	11	–20.0000
9	10	33.7740
12	4	25.8253
12	13	–20.0000
12	14	7.8165
12	15	18.858
12	16	7.0267
21	10	16.4932
21	22	–1.1849

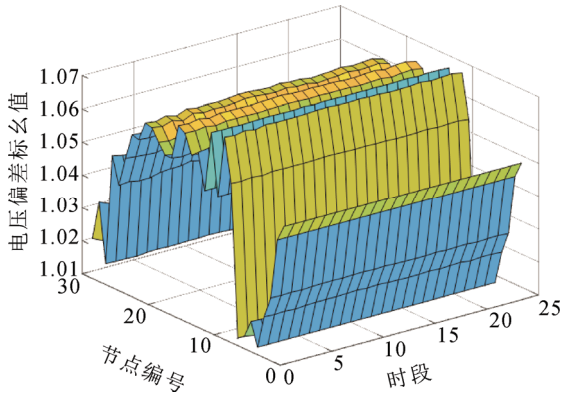


图 7　优化前制氢时刻各节点电压偏差

Fig.7　Voltage deviation of each node at the time of hydrogen production before optimization

表 4　优化前路网因素表

Table 4　Road network factor table before optimization

参数名称	策略	S_4 目标函数值	S_5 目标函数值			服务范围(节点数)
			$S_{5.1}$	$S_{5.2}$	$S_{5.3}$	
取值	原始策略	27.38	3.34	4.05	1.81	9，8，10

表 5　优化前服务范围信息表

Table 5　Service scope information form before optimization

参数名称	策略	范围覆盖率/%	无覆盖节点数	重合比率/%	无覆盖百分比/%
取值	原始策略	90.00	3	10.00	10.00

结合表 4、5 和图 8 可看出当 HPRS 布点在原先加油站位置时，继承了原本交通优势，在交通路网指标中交通流量与服务范围都占优，服务覆盖率达到了 90%，具体的服务范围节点图如图 8 所示。

初始策略用户满意度为 2.93，具体 HPRS 支路数、距离、数量、车流量对用户满意度的影响如表 6 所示。且对一年内的经济成本进行分析，如表 7 所示。

根据各指标评估的结果，当 HPRS 布点位置代替原有加油站位置时，虽在交通路网指标中继承了原有优势，但由于 HPRS 的负荷特性，使其对于电网影响较大，不利于电网的稳定运行，现通过 MSSA 对优化布点模型进行求解，优化策略如表 8 所示。优化后各指标结果如图 9 所示。

相较于初始布点策略，优化后的策略减小了对电网的影响，功率裕度等指标有了明显的降低，网损降低了 1.48 MW，各节点电压偏差如图 10 所示，各节点电压基准值为 135 kV，具体每条线路的有功功率如表 9 所示。

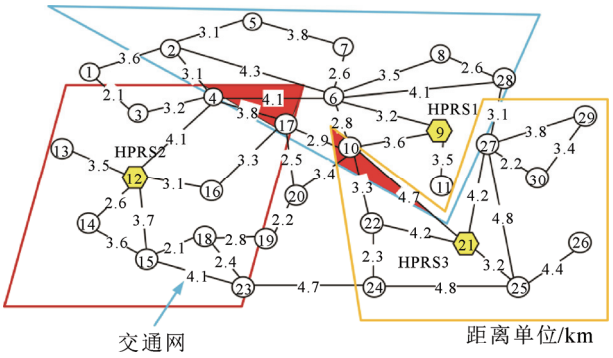


图 8　优化前服务范围图

Fig.8　Service scope map before optimization

表 6　优化前用户满意度影响表

Table 6　User satisfaction impact table before optimization

定量指标	数量	支路数	距离	车流量
满意度影响值	0.2	0.25	0.14	0.09

表 7　初始方案经济指标

Table 7　Initial program economic indicators

参数名称	策略	HPRS 布点位置	投资成本/(万元·a^{-1})	运营成本/(万元·a^{-1})
取值	原始策略	9, 12, 21	923	847

表 8　优化方案

Table 8　Optimization plan

HPRS 编号	1	2	3
节点	30	18	17

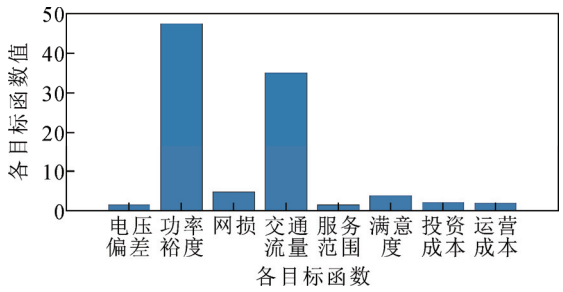


图 9 优化后制氢时段各定量指标

Fig.9 Quantitative indexes of hydrogen production period after optimization

表 9 优化后各线路有功功率

Table 9 Active power of each line after optimization

节点	相连线路对应节点	有功功率/MW
30	27	6.06
30	29	3.41
18	15	5.14
18	19	2.58
17	16	3.23
17	10	5.11

每条线路功率传输都在约束条件之内，未出现线路过载情况，优化后的功率裕度指标为 47.66，比初始方案下降了 34.59，更有利于电网的稳定运行。各节点电压波动如图 10 所示。

相较原方案，各节点电压偏差幅值更小，且更趋向于额定电压，减小了越界的风险。在交通路网指标中，具体的节点交通流量与服务范围如表 10、11 所示。

由表 9、10、11 和图 10 可知，通过 MSSA 求得的优化策略与原策略相比，虽在交通路网侧略失优势，服务覆盖范围下降了 6.67%，交通流量指标升高了 7.76，但在电力网络影响指标中，电压偏差，功率裕度与网损都有了明显的降低，总体来看，综合指标下降了 0.4456，相较于原策略，减小了对电网运行指标的影响。具体的服务范围节点图见图 11。

用户满意度为 3.78，上升了 0.85，远高于最低标准，表明用户对优化策略的接受程度更高，支路数、距离、数量、车流量对用户满意度的影响如表 12 所示。

由表 12 可知节点支路数与路径长度对于用户满意度的影响有了明显降低，虽然车流量的影响指标略微升高，但从用户满意度指标来看，影响不大。对优化布点后一年内的经济成本进行分析，各成本如表 13 所示。

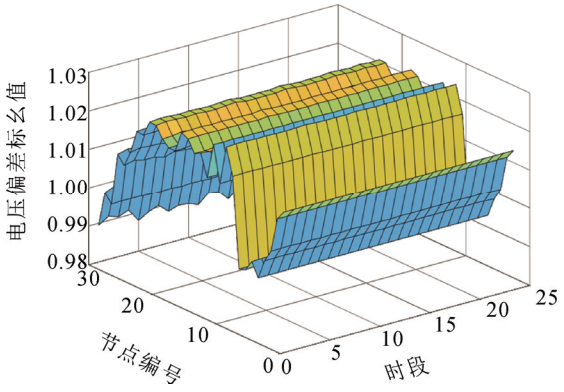


图 10 优化后制氢时刻各节点电压偏差

Fig.10 Voltage deviation of each node at the time of hydrogen production after optimization

表 10 优化后路网因素表

Table 10 Table of road network factors after optimization

参数名称	策略	S_4 目标函数值	S_5 目标函数值			服务范围(节点数)
			$S_{5.1}$	$S_{5.2}$	$S_{5.3}$	
取值	优化策略	35.14	4.58	3.87	1.03	7，8，10

表 11 优化后服务范围信息表

Table 11 Information table of service scope after optimization

参数名称	策略	范围覆盖率/%	无覆盖节点数	重合比率/%	无覆盖百分比/%
取值	优化策略	83.33	5	13.33	16.67

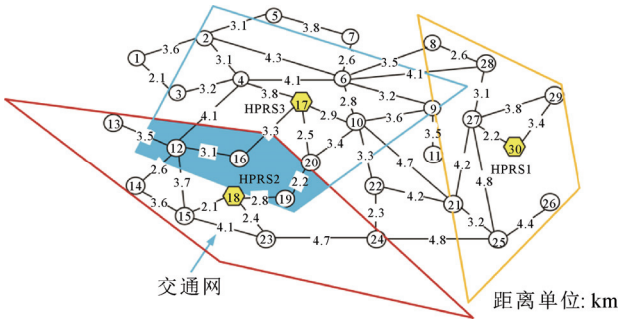


图 11 优化后服务范围图

Fig.11 Service scope after optimization

表 12 优化后用户满意度影响表

Table 12 Table of impact on user satisfaction after optimization

定量指标	数量	支路数	距离	车流量
满意度影响值	0.2	0.15	0.08	0.13

优化后的经济成本明显低于初始方案，进一步体现了 HPRS 布点优化策略的有效性。

当 M=2 时，因区域充氢需求的限制，致使 2 座 HPRS 无法满足实际的需求，本文取 M=4 对优化模型进行求解，求得的优化方案为(3，23，6，27)，各指标如表 14 所示，用户满意度为 3.92，较优化后的布点优化策略提升了 0.14，但 4 座 HPRS 的经济成本远高于所提优化方案，且对于交通路网和配电网的影响相较于优化方案差别不大，综合指标升高了 0.0126，所以 M=3 为最优方案。

综上所述，HPRS 若在原有加油站位置进行布点，虽继承了交通路网的优势，但对电网的运行指标影响较大，通过 MSSA 对本文优化布点模型进行求解，新的策略虽在交通流量和服务范围方面略逊于原始策略，但明显降低了对电网的影响以及经济成本，相较于初始方案，更有利于电网的稳定运行。

4.2.2　算法优越性对比分析

针对本文 HPRS 布点优化问题，将 MSSA 与 SSA 寻优过程进行比较，比较结果如图 12 所示。

在 500 次迭代范围内，MSSA 都先于 SSA 寻得最优值，更快达到收敛条件，且寻得的最优值更小。通过 2 种算法对模型进行求解，求得的结果见表 14。

相较于 SSA，MSSA 在求解模型时，电网指标与路网指标都略优于 SSA 求得的结果，且收敛速度和求解精度上都优于 SSA，MSSA 在满足求解精度的同时，求解速度更快，所占内存更小，表明 MSSA 更适合 HPRS 优化布点模型的求解。

本文建立了 HPRS 优化布点模型。得到了在考虑配电网与氢燃料汽车耦合影响下的 HPRS 最优布点策略。仿真结果表明：

1）HPRS 工作模式可建立在 FCV 出行规律基础之上，对 FCV 加氢规律进行分析，借助蒙特卡罗生成 FCV 日充氢需求分布，是求解 HPRS 优化布点模型的先决因素。

2）HPRS 优化布点模型针对 HPRS 的制氢特性以及充氢需求的不确定性，将 HPRS 布点优化问题与配电网和交通网相耦合，减小了经济成本的同时，降低了网损，减小了节点电压偏差，稳定了线路功率的传输，同时扩大了服务范围网，减小了用户心理负担，满足了 FCV 的加氢需求。

3）HPRS 优化布点模型通过 MSSA 进行求解，所得策略解决了在考虑配电网与氢燃料汽车耦合影响条件下配电网运行不稳定、交通网服务范围与交通流量不均衡的问题。

表 13　优化方案经济指标

Table 13　Optimizing the program economic indicators

参数名称	策略	HPRS 布点位置	投资成本/(万元·a^{-1})	运营成本/(万元·a^{-1})
取值	优化策略	30, 18, 17	751	689

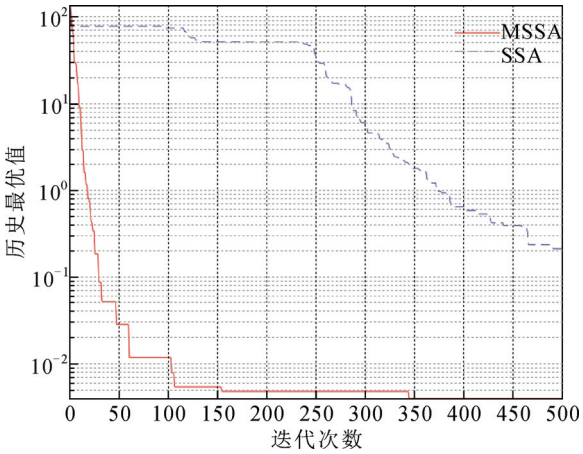


图 12　MSSA 与 SSA 寻优过程比较

Fig.12　Comparison of optimization process between MSSA and SSA

表 14　算法比较信息表

Table 14　Algorithm comparison information table

参数名称	SSA	MSSA	MSSA(M=4)
优化方案(X_1,X_2,X_3)	(30, 12, 28)	(30, 18, 17)	(3, 23, 6, 27)
电网指标(S_1,S_2,S_3)	(3.44, 55.22, 4.86)	(1.45, 47.66, 4.67)	(1.47, 46.34, 4.88)
路网指标(S_4,S_5)	(37.26, 1.34)	(35.14, 1.36)	(34.93, 1.40)
心理指标 S_6	3.43	3.78	3.92
经济成本(S_7,S_8)	(778, 713)	(751, 689)	(923, 847)

5　结论

1）本文提出了一种考虑配电网与氢燃料汽车耦合影响的 HPRS 布点优化策略，构建了 HPRS 优化布点模型，该模型首次结合 HPRS 交通路网指标、电网影响指标、经济指标和心理学指标，并通过 MSSA 对 HPRS 优化布点模型进行求解。

2）优化后的策略不仅可满足 HPRS 对于服务范围和交通流量的要求，同时还能减小对电网的影响以及增大周围用户对于优化策略的接受程度，便于方案的实施。

今后的研究将对 FCV 的出行规律进行更细致与全面的分析，同时优化 HPRS 和用户心理指标的建模，以及对 HPRS 布点优化问题进行更深入的探讨，不断优化目标函数和寻优方法来得到更优的布点优化策略。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 董旭柱，华祝虎，尚 磊，等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.

[2] 陈艳波，林予彰，马 进. 综合能源系统状态估计[M]. 北京：中国电力出版社，2021：179-193.
CHEN Yanbo, LIN Yuzhang, MA Jin. State estimation of integrated energy system[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2021: 179-193.

[3] TARHAN C, ÇIL M A. A study on hydrogen, the clean energy of the future: hydrogen storage methods[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 40: 102676.

[4] OGDEN J, JAFFE A M, SCHEITRUM D, et al. Natural gas as a bridge to hydrogen transportation fuel: insights from the literature[J]. Energy Policy, 2018, 115: 317-329.

[5] HE C M, SUN H R, XU Y, et al. Hydrogen refueling station siting of expressway based on the optimization of hydrogen life cycle cost[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(26): 16313-16324.

[6] XU X, HU W H, CAO D, et al. Optimal operational strategy for an offgrid hybrid hydrogen/electricity refueling station powered by solar photovoltaics[J]. Journal of Power Sources, 2020, 451: 227810.

[7] 周建力，乌云娜，董昊鑫，等. 计及电动汽车随机充电的风–光–氢综合能源系统优化规划[J]. 电力系统自动化，2021，45(24)：30-40.
ZHOU Jianli, WU Yunna, DONG Haoxin, et al. Optimal planning of wind-photovoltaic-hydrogen integrated energy system considering random charging of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 30-40.

[8] GRÜGER F, DYLEWSKI L, ROBINIUS M, et al. Carsharing with fuel cell vehicles: sizing hydrogen refueling stations based on refueling behavior[J]. Applied Energy, 2018, 228: 1540-1549.

[9] SUN H R, HE C M, WANG H K, et al. Hydrogen station siting optimization based on multi-source hydrogen supply and life cycle cost[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(38): 23952-23965.

[10] 丁 剑，方晓松，宋云亭，等. 碳中和背景下西部新能源传输的电氢综合能源网构想[J]. 电力系统自动化，2021，45(24)：1-9.
DING Jian, FANG Xiaosong, SONG Yunting, et al. Conception of electricity and hydrogen integrated energy network for renewable energy transmission in western China under background of carbon neutralization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 1-9.

[11] LI Y S, CUI F M, LI L F. An integrated optimization model for the location of hydrogen refueling stations[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(42): 19636-19649.

[12] 江岳文，杨国铭，朱振山. 考虑交通流量捕获的风–氢–电耦合网络规划[J]. 电力系统自动化，2021，45(22)：19-28.
JIANG Yuewen, YANG Guoming, ZHU Zhenshan. Wind-hydrogen-electricity coupled network planning considering traffic flow capture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 19-28.

[13] 邓 浩，陈 洁，焦东东，等. 风氢耦合并网系统能量管理控制策略[J]. 高电压技术，2020，46(1)：99-106.
DENG Hao, CHEN Jie, JIAO Dongdong, et al. Control strategy for energy management of hybrid grid-connected system of wind and hydrogen[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 99-106.

[14] YANG G M, JIANG Y W. Siting and sizing of the hydrogen refueling stations with on-site water electrolysis hydrogen production based on robust regret[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(11): 8340-8361.

[15] CHEN Y B, CHEN H, JIAO Y, et al. Data-driven robust state estimation through off-line learning and on-line matching[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(4): 897-909.

[16] 陈艳波，于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京：科学出版社，2021：66-87.
CHEN Yanbo, YU Erkeng. Power system state estimation[M]. Beijing, China: Science Press, 2021: 66-87.

[17] LI L, AL CHAMI Z, MANIER H, et al. Incorporating fuel delivery in network design for hydrogen fueling stations: formulation and two metaheuristic approaches[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 152: 102384.

[18] 王守相，梁 栋，葛磊蛟. 智能配电网态势感知和态势利导关键技术[J]. 电力系统自动化，2016，40(12)：2-8.
WANG Shouxiang, LIANG Dong, GE Leijiao. Key technologies of situation awareness and orientation for smart distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 2-8.

[19] CHEN Y B, WU C, QI J J. Data-driven power flow method based on exact linear regression equations[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(3): 800-804.

[20] 葛磊蛟，李元良，陈艳波，等. 智能配电网态势感知关键技术及实施效果评价[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2269-2280.
GE Leijiao, LI Yuanliang, CHEN Yanbo, et al. Key technologies of situation awareness and implementation effectiveness evaluation in smart distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2269-2280.

[21] 李大虎，袁志军，何 俊，等. 面向台风气象的电网运行风险态势感知方法[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2301-2311.
LI Dahu, YUAN Zhijun, HE Jun, et al. Situation awareness method of power grid operation risk under typhoon weather[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2301-2311.

[22] CHEN Y B, YAO Y, ZHANG Y. A robust state estimation method based on SOCP for integrated electricity-heat system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 810-820.

[23] CHEN Y B, YAO Y, LIN Y Z, et al. Dynamic state estimation for integrated electricity-gas systems based on Kalman filter[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(1): 293-303.

[24] 王守相，葛磊蛟，王 凯. 智能配电系统的内涵及其关键技术[J]. 电力自动化设备，2016，36(6)：1-6.
WANG Shouxiang, GE Leijiao, WANG Kai. Main contents and key technologies of smart distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 1-6.

[25] 葛磊蛟，王守相，瞿海妮. 智能配用电大数据存储架构设计[J]. 电力自动化设备，2016，36(6)：194-202.
GE Leijiao, WANG Shouxiang, QU Haini. Design of storage framework for big data of SPDU[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 194-202.

[26] CHEN Y B, ZHAO J Y, MA J. Fast decoupled multi-energy flow calculation for integrated energy system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(5): 951-960.

[27] ABADI M Q, RAHMATI S, SHARIFI A, et al. HSSAGA: designation

and scheduling of nurses for taking care of COVID-19 patients using novel method of Hybrid Salp Swarm Algorithm and Genetic Algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2021, 108: 107449.

[28] 陈艳波，高瑜珑，赵俊博，等. 综合能源系统状态估计研究综述[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2281-2292.
CHEN Yanbo, GAO Yulong, ZHAO Junbo, et al. Review on integrated energy system state estimation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2281-2292.

[29] 段青熙，袁铁江，梅生伟，等. 风电–氢储能与煤化工多能耦合系统能量协调控制策略[J]. 高电压技术，2018，44(1)：176-186.
DUAN Qingxi, YUAN Tiejiang, MEI Shengwei, et al. Energy coordination control of wind power-hydrogen energy storage and coal chemical multi-functional coupling system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 176-186.



黄文涛
1984—，男，博士，副教授，硕导
主要从事大电网安全稳定与控制、抽水蓄能的研究工作
E-mail: 280515123@qq.com

HUANG Wentao
Ph.D.
Associate professor



邓明辉
1997—，男，硕士生
主要从事大电网安全稳定与控制、新能源互联网规划设计的研究工作
E-mail: 964583443@qq.com

DENG Minghui



葛磊蛟(通信作者)
1984—，男，博士，副教授，硕导
主要从事智能配电网态势感知、新能源并网优化控制和智能配用电大数据云计算技术等研究
E-mail: legendglj99@tju.edu.cn

GE Leijiao
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2021-12-23 在线出版日期 2022-04-26 编辑 程子丰

附录 A

对于 G 辆公交车和 W 辆物流车的加氢时刻定义如下：

$$\begin{cases} T_{\mathrm{JQ}}=\sum_{g=1}^{G}T_g+\sum_{w=1}^{W}T_{\mathrm{w}} \\ T_g=\dfrac{S_{\mathrm{jq},g}-S_{\mathrm{cs},g}}{S_{\mathrm{d},g}} \\ T_w=\dfrac{S_{\mathrm{jq},w}-S_{\mathrm{cs},w}}{S_{\mathrm{d},w}} \end{cases} \tag{A1}$$

式中：T_{JQ}为加氢总时刻集合；T_g和 T_w为第 g 辆公交和第 w 辆物流车的加氢时刻；$S_{\mathrm{jq},g}$和 $S_{\mathrm{jq},w}$为第 g 辆公交和第 w 辆物流车的加氢里程；$S_{\mathrm{cs},g}$和 $S_{\mathrm{cs},w}$为第 g 辆公交和第 w 辆物流车的当天初始里程；$S_{\mathrm{d},g}$和 $S_{d,w}$为第 g 辆公交和第 w 辆物流车的单位行驶里程。一天内需加氢车辆总数如下：

$$N_{\mathrm{jq}}=\sum_{g=1}^{G}n_g+\sum_{w=1}^{W}n_w \tag{A2}$$

$$n_g=\begin{cases}1 & ,0\le T_g\le 24\\ 0 & ,T_g>24\end{cases} \tag{A3}$$

$$n_w=\begin{cases}1 & ,0\le T_w\le 24\\ 0 & ,T_w>24\end{cases} \tag{A4}$$

式中：N_{jq}为一天加氢车辆总数，n_g、n_w分别为第 g 辆公交车和第 w 辆物流车的加氢判断系数，若时刻分布在 24 小时之内，则满足充氢条件，否则不加氢。

一天内的的加氢总量 J_{q} 如下：

$$J_{\mathrm{q}}=\sum_{g=1}^{G}\frac{n_gS_{\mathrm{jq},g}M_g}{S_{\mathrm{z,g}}}+\sum_{w=1}^{W}\frac{n_wS_{\mathrm{jq},w}M_w}{S_{\mathrm{z},w}} \tag{A5}$$

式中：M_g、M_w分别为第 g 辆公交车和第 w 辆物流车的储氢容量；$S_{z,g}$、$S_{z,w}$分别为第 g 辆公交车和第 w 辆物流车满氢条件下的行驶里程。

附录 B

权重计算式如下：

$$K_{\mathrm{W}}=\frac{\sum_{h=1}^{H}x_r^h\left(\dfrac{f_{\mathrm{b}}-f_{xh}}{q}\right)+x_{1\min}^h\left(\dfrac{f_{\mathrm{b}}-f_{\mathrm{F}}}{q}\right)}{H+1} \tag{B1}$$

$$q=\sum_{h=1}^{H}\left(f_{\mathrm{b}}-f_{xh}\right)+\left(f_{\mathrm{b}}-f_{\mathrm{F}}\right) \tag{B2}$$

式中：f_{b}为当前排序末尾处 HPRS 优化布点目标函数；f_{F}，f_{xh}为当前所有 HPRS 寻优策略目标函数最优值和第 h 个寻优策略目标函数值；q 为适应度差值的集合；$x_{1\min}^h$为 HPRS 最优布点策略内第 1 个 HPRS 布点位置。

自适应惯性权重如下：

$$\kappa=\lambda_{\mathrm{z}}^{\frac{-\varphi t_{\mathrm{z}}}{t_{\mathrm{zmax}}}}\cos\left(\pi t_{\mathrm{z}}\right) \tag{B3}$$

式中：λ_{z}、φ 为控制参数。

附录 C



图 C1　寻优流程图

Fig.C1　Optimization flow chart

附录 D

表 D1　仿真参数表

Table D1　Simulation parameter table

参数名称	取值	参数名称	取值
c_{djc}/(元·kW^{-1})	1457	$E_{\mathrm{ysj}}^{\mathrm{ref}}$/(kWh·kg^{-1})	2.43
c_{ysj}/(元·kW^{-1})	1963	γ_{cqg}/%	0.01
$P_{\mathrm{ysj}}^{\mathrm{ref}}$/kW	4000	F_{ysj}/bar	350
c_s	0.80	$F_{\mathrm{ysj}}^{\mathrm{ref}}$/bar	200
c_p	0.18	F_{ini}/bar	1
c_{cqg}/(元·kW^{-1})	1323	γ_{ysj}	0.01
$M_{\mathrm{cqg}}^{\mathrm{ref}}$/kg	227	k_1	0.125
$f_{\mathrm{cqg}}^{\mathrm{ref}}$/bar	200	k_2	0.125
t_s	0.75	k_3	0.125
t_p	0.44	k_4	0.123
$M_{m,\mathrm{cqg}}$/kg	900	k_5	0.123
c_{st}/(元·kg^{-1})	1.3	k_6	0.123
p_{c}/(kWh·kg^{-1})	0.18	K_7	0.128
J_{w}/(元·L^{-1})	0.3389×10^{-3}	K_8	0.128
H_{h}/(kWh·kg^{-1})	39	ξ/个	5
$B_m^{t,d}$/%	85	λ_z	2
η_{H}/%	73	φ	4/3

表 D2　其他成本

Table D2　Other costs

项目	因子值
维护	0.02
保险	0.1
安全	0.3
建筑	0.125
公用事业	0.05

表 D3　影响因子权重表

Table D3　Impact factor weight table

节点	影响因子	节点	影响因子	节点	影响因子
1	1.3	11	0.8	21	0.9
2	1.4	12	1.0	22	0.7
3	1.5	13	1.2	23	1.4
4	1.3	14	1.3	24	1.2
5	0.7	15	1.3	25	1.1
6	0.9	16	1.1	26	1.0
7	0.7	17	0.9	27	0.9
8	0.6	18	0.7	28	0.7
9	1.2	19	1.2	29	0.6
10	1.1	20	1.2	30	0.2