

计及氢能的高速公路服务区综合能源站多阶段规划方法

胡雅媛¹, 张永熙¹, 殷子良¹, 詹润泽¹, 马瑞¹, 陈伏彬²

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410114; 2. 长沙理工大学土木工程学院, 长沙 410114)

摘要: 我国高速公路能源系统的运行严重依赖于外界电网, 可再生能源渗透率较低, 碳排放体量庞大。为此, 提出了一种考虑氢能的高速公路服务区综合能源站多阶段规划方法。首先, 构建包含电、冷/热、气、氢能的综合能源站架构, 模拟高速公路服务区内清洁能源汽车的充能需求。根据不同时期氢燃料电池汽车的市场保有量将规划周期划分为多个阶段, 以总投资成本和运行成本最小化为目标, 构建考虑氢能的高速公路服务区综合能源站多阶段规划模型, 决策电、热/冷、气、氢能设备的容量配置方案以及不同典型日场景下的运行策略。最后, 基于我国北方某高速服务区的实际能源负荷数据, 验证了所提出的多阶段规划模型能够有效提升综合能源站的经济性, 促进可再生能源的消纳。

关键词: 高速公路服务区综合能源站; 氢能; 多阶段规划; 自洽率; 清洁能源汽车

Multi-Stage Planning Method for Integrated Energy Stations at Highway Service Areas Considering Hydrogen Energy

HU Yayuan¹, ZHANG Yongxi¹, YIN Ziliang¹, ZHAN Runze¹, MA Rui¹, CHEN Fubin²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The current operation of China's highway energy system heavily relies on the external power grid, with low penetration rates of renewable energy and huge carbon emissions. Therefore, a multi-stage planning method for comprehensive energy stations in highway service areas considering hydrogen energy is proposed. Firstly, a comprehensive energy station architecture that includes electricity, cold/hot, gas, and hydrogen energy is constructed to simulate the charging needs of clean energy vehicles within the highway service area. Based on the market ownership of hydrogen fuel cell vehicles in different periods, the planning cycle is divided into multiple stages, with the goal of minimizing total investment and operating costs. A multi-stage planning model for comprehensive energy stations in highway service areas considering hydrogen energy is constructed to determine the capacity configuration schemes for electricity, heating/cooling, gas, and hydrogen energy equipment, as well as operational strategies under different typical daily scenarios. Finally, based on the actual energy load data of a high-speed service area in northern China, it is verified that the proposed multi-stage planning model can effectively improve the economy of comprehensive energy stations and promote the consumption of renewable energy.

Key words: highway service area integrated energy station; hydrogen energy; multi-stage planning; self-sufficiency; clean energy vehicles

0 引言

为应对全球能源结构转型和可持续发展的需

求, 中国政府提出了“30 碳达峰, 60 碳中和”的宏伟目标^[1]。交通运输行业作为化石能源消耗的主要领域, 其碳排放量约占全国终端碳排放总量的 11.69%, 其中公路交通的碳排放占比更是超过 80%^[2]。截至 2023 年末, 我国公路总通车里程已达 543.58 万 km, 其中高速公路里程为 17.7 万 km^[3]。2022 年, 我国高速公路的碳排放量高达

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278003)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52278003).

3 292.05 万 t。为实现“双碳”战略目标，高速公路能源系统的绿色转型显得尤为迫切^[4]。

一方面，我国高速公路边坡蕴藏着丰富的风能、光能、天然气等自然资源，具备巨大的资产能源化潜力。另一方面，随着多类型清洁能源车辆以及电池储能、氢储能等新型储能技术的迅猛发展，高速公路能源系统正从单一的“能源消费者”角色转变为“能源产消者”^[5]，逐步构建起以风光互补可再生能源发电为主，冷-热-电-氢联供为核心的综合能源体系。

近年来，高速公路综合能源系统的规划^[6-8]与运行研究^[9-11]已成为学术界关注的焦点。在相关研究中，文献[6]针对高速公路隧道、收费站、服务区等交通基础设施的供能问题提出了一种基于风光互补的多微网自洽能源系统配置模型，并深入分析了不同置信水平约束对系统容量配置、成本及供电可靠性的影响。针对高速路域源、荷端的不确定性特征，文献[7]提出了面向高速公路服务区光储充一体化系统的两阶段鲁棒优化规划模型，并采用嵌套列和约束生成算法进行求解。文献[6-7]均以成本最小化为目标，未充分考虑环保、可靠性等综合因素的影响。文献[8]首先构建了高速公路典型场景自洽能源系统的4种不同运行模式和管控方式，并在此基础上提出了一个综合考虑经济、系统、环保等多因素的多目标优化规划模型。

上述研究大多采用单阶段规划模型，导致规划结果往往出现“前期冗余，后期不足”的现象。在高速公路多能系统运行优化方面，文献[9]提出了一种兼顾经济和环保目标的高速公路自洽能源系统优化运行策略，并采用改进的模拟退火遗传算法进行求解。文献[10]还引入了清洁能源自洽率，提出了一种光储换一体化的高速公路服务区能源管理与服务策略，在确保电动汽车换电服务的前提下最大限度地提升系统运行的经济性和环保性。然而，这些文献[9-10]的研究均为日内优化调度，未能解决高速公路综合能源系统在“源-荷”时间维度上的不匹配问题。基于此，文献[11]进一步提出了一种基于深度强化学习的高速公路服务区日前-日内两阶段优化调度模型。

上述文献主要探讨了电、热、冷、气能源的协调配合，但未涉及氢燃料电池汽车、氢储能等新型技术接入对高速公路综合能源系统的影响。氢燃料

电池汽车因其续航里程长、补能时间短、绿色环保等优势成为氢能产业发展的重点领域^[12]。文献[13-14]针对氢能的生产和传输过程提出了高速公路加氢站选址优化模型，有效解决了氢能最优运输路径问题。此外，文献[15]还提出了一种综合考虑氢储能与需求响应的高速公路综合能源系统规划方法，旨在充分挖掘电-热-冷-氢的调节潜力，以提升系统的稳定性、经济性和用户舒适性。

总结现有研究不难发现：一方面，当前相关研究主要聚焦于电、热/冷、气等能源系统的协同优化，尚未触及氢能等新型技术接入对高速公路综合能源系统的影响；另一方面，尽管当前氢燃料电池汽车的市场保有量相对较低，但随着氢燃料电池汽车和氢储能系统在交通领域的进一步推广与应用，如何合理规划充氢设备和制氢设施，以引导各类清洁能源汽车用户的驾驶和补能行为，仍需深入研究。

针对上述不足，本文提出了一种计及氢能的高速公路服务区综合能源站多阶段规划模型。首先，构建了涵盖电、冷/热、气、氢能的综合能源站架构，模拟高速公路服务区清洁能源车的充电、加氢负荷需求，探讨综合能源站内各能源子系统在能源输送、转化、存储及消耗多个环节之间的耦合机制；其次，基于清洁能源车的增长速度，将规划周期划分为多个阶段，构建了计及氢能的高速公路服务区综合能源站多阶段容量规划模型；通过模型求解，获得了综合能源站在不同发展阶段的最优容量配置方案及不同场景下的运行策略。最后，通过算例验证，该方法能有效提升综合能源站的整体经济性，并促进可再生能源的消纳。

1 高速公路综合能源站

1.1 系统架构

高速公路路域的风/光资源及用能负荷均表现出随机性和无序性等特征。鉴于此，本研究综合考虑高速公路服务区内各类能源的禀赋特性，以及多类型清洁能源车辆、供能设备和用能设施的运行特性，构建了高速公路服务区综合能源站的架构，如图1所示。该架构具体涵盖能源侧、能源转换与存储侧、负荷侧3个部分。

1) 能源侧：涵盖光伏、天然气管道、氢运输车等设备，为系统提供电能、天然气和氢能，并可通过向外部电网购电作为补充。

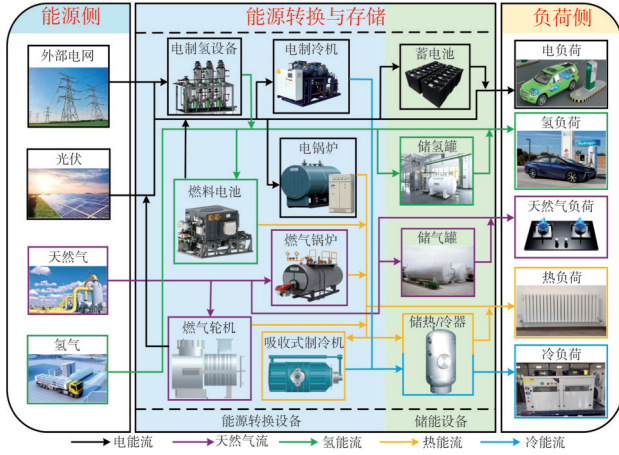


图1 高速公路综合能源站架构

Fig. 1 Architecture of integrated energy stations on expressways

2)能源转换与存储侧:包括能源转换设备和储能设备。其中,能源转换设备涵盖电解槽、燃料电池、燃气轮机、电制冷机等;储能设备则包括储能电池、储氢罐、储气罐、储热/冷器。

3)负荷侧:电负荷涉及电动汽车充电需求,以及整个高速公路服务区的生活、办公用能;氢能负荷主要来自氢燃料电池汽车;天然气负荷主要源于生活用气;冷/热负荷则主要包括服务区内的空调和采暖需求。

1.2 服务区综合能源站系统数学模型

1)多能输入:电能来源于光伏发电以及电网购电;天然气来源于站外输气管道;氢气来源于光伏发电制氢、站外购氢以及电网购电制氢。因此,能源输入矩阵如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} P_{e,t}^{\text{in}} \\ P_{g,t}^{\text{in}} \\ P_{h,t}^{\text{in}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\text{grid},t}^{\text{grid}} \\ P_{\text{grid},t}^{\text{grid}} \\ P_{\text{trans},t}^{\text{grid}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -P_{\text{grid},t}^{\text{grid,cl}} \\ 0 \\ P_{\text{grid},t}^{\text{grid,cl}} \eta^{\text{cl}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{\text{pv},t}^{\text{pv}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -P_{\text{pv},t}^{\text{pv,cl}} \\ 0 \\ P_{\text{pv},t}^{\text{pv,cl}} \eta^{\text{cl}} \end{bmatrix}, \quad \forall t \in T \quad (1)$$

式中: t 为时刻, $t = 1, 2, \dots, 24$; T 为一个场景日周期(24 h); $P_{e,t}^{\text{in}}$ 、 $P_{g,t}^{\text{in}}$ 、 $P_{h,t}^{\text{in}}$ 分别为 t 时刻能源侧电能、天然气、氢气输入到系统中的功率; $P_{\text{grid},t}^{\text{grid}}$ 、 $P_{\text{grid},t}^{\text{trans}}$ 分别为 t 时刻从外界购买的电能、天然气、氢气功率; $P_{\text{grid},t}^{\text{grid,cl}}$ 为 t 时刻外网购电中用来制造氢气的电功率; $P_{\text{pv},t}^{\text{pv}}$ 为 t 时刻光伏发电功率; $P_{\text{pv},t}^{\text{pv,cl}}$ 为 t 时刻光伏发电中用于制造氢气的电功率; η^{cl} 为电解槽的效率。

2)多能转换:通过电解槽、燃料电池、燃气轮机、电制冷机、电锅炉等设备可实现电、热/冷、

气、氢5种能源之间的相互转换。由于能源转换效率以及能源分配系数不同,因此,能源转换矩阵如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} P_{e,t}^{\text{out}} \\ P_{g,t}^{\text{out}} \\ P_{h,t}^{\text{out}} \\ P_{r,t}^{\text{out}} \\ P_{c,t}^{\text{out}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - \beta_e^{\text{eb}} - \beta_e^{\text{er}}) & \beta_g^{\text{gt}} \eta^{\text{gttc}} & \beta_h^{\text{hs}} \eta^{\text{hste}} \\ 0 & 1 - \beta_g^{\text{gt}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \beta_h^{\text{hs}} \\ \beta_e^{\text{eb}} \eta^{\text{eb}} & \frac{\beta_g^{\text{gt}} \eta^{\text{gttc}}}{\lambda_{e,r}^{\text{gt}}} & \frac{\beta_h^{\text{hs}} \eta^{\text{hste}}}{\lambda_{e,r}^{\text{hs}}} \\ \beta_e^{\text{er}} \eta^{\text{er}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{e,t}^{\text{in}} \\ P_{g,t}^{\text{in}} \\ P_{h,t}^{\text{in}} \end{bmatrix}, \quad \forall t \in T \quad (2)$$

式中: $P_{e,t}^{\text{out}}$ 、 $P_{g,t}^{\text{out}}$ 、 $P_{h,t}^{\text{out}}$ 、 $P_{r,t}^{\text{out}}$ 、 $P_{c,t}^{\text{out}}$ 分别为 t 时刻电能、天然气、氢气、热能、冷能输出到负荷侧的功率; β_e^{eb} 、 β_e^{er} 分别为输入的电能分配到电锅炉和电制冷机的比例系数; β_g^{gt} 为输入的天然气分配给燃气轮机的比例系数; β_h^{hs} 为输入的氢气分配给燃料电池的比例系数; η^{eb} 、 η^{er} 分别为电锅炉、电制冷机的效率; η^{gttc} 、 η^{hste} 分别为燃气轮机、燃料电池的制电效率; $\lambda_{e,r}^{\text{gt}}$ 、 $\lambda_{e,r}^{\text{hs}}$ 分别为燃气轮机、燃料电池的电热功率比。

3)多能负荷:在综合能源站配置电、天然气、氢、热/冷储能装置,可有效提高能源利用效率,减小负荷波动。因此,能源输出矩阵如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} L_{e,t} \\ L_{g,t} \\ L_{h,t} \\ L_{r,t} \\ L_{c,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{e,t}^{\text{out}} \\ P_{g,t}^{\text{out}} \\ P_{h,t}^{\text{out}} \\ P_{r,t}^{\text{out}} \\ P_{c,t}^{\text{out}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{e,t}^{\text{cs}} \\ P_{g,t}^{\text{gk}} \\ P_{h,t}^{\text{ht}} \\ P_{r,t}^{\text{rb}} \\ P_{c,t}^{\text{cs}} \end{bmatrix}, \quad \forall t \in T \quad (3)$$

式中: $L_{e,t}$ 、 $L_{g,t}$ 、 $L_{h,t}$ 、 $L_{r,t}$ 、 $L_{c,t}$ 分别为 t 时刻电负荷、天然气负荷、氢负荷、热负荷、冷负荷; $P_{e,t}^{\text{cs}}$ 、 $P_{g,t}^{\text{gk}}$ 、 $P_{h,t}^{\text{ht}}$ 、 $P_{r,t}^{\text{rb}}$ 、 $P_{c,t}^{\text{cs}}$ 分别为 t 时刻电能、天然气、氢气、热能、冷能储存装置的功率,这里规定吸收功率为负,发出功率为正。

2 服务区内多类型清洁能源车用能需求建模

基于高速公路汽车出行特性分别模拟电动汽车充电与氢燃料电池汽车充氢需求。一般来说,高速公路服务区的汽车驶入量可以近似为一个参数为 λ_z 的泊松分布^[16], 概率分布公式如下。

$$P(k) = \frac{\lambda_z^k}{k!} e^{-\lambda_z}, \quad k = 0, 1, \dots \quad (4)$$

式中: λ_z 为单位时间 Δt 内驶入高速公路服务区的平均车辆数量; z 为车辆类型, $z \in \{e_{\text{ev}}, h_{\text{hfcv}}\}$, e_{ev} 为

电动汽车, h_{hfcv} 为氢燃料电池汽车; $P(k)$ 为满足参数为 λ_z 的泊松分布下单位时间内驶入车辆数为 k 的概率。

因此, t 时刻电动汽车的充电需求 W_t^{ev} 与氢燃料电池汽车的充氢需求 M_t^{hfcv} 可通过式(5)计算。

$$\begin{cases} W_t^{\text{ev}} = \sum_{k=1}^{N_t^{\text{ev}}} (1 - S_{\text{soc, ev}}^k) E_{\text{ev}}^{k, \text{h}} \\ M_t^{\text{hfcv}} = \sum_{k=1}^{N_t^{\text{hfcv}}} (1 - S_{\text{soc, hfcv}}^k) E_{\text{hfcv}}^{k, \text{h}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $S_{\text{soc, ev}}^k$ 、 $S_{\text{soc, hfcv}}^k$ 分别为第 k 辆电动汽车和氢燃料电池汽车的剩余荷能状态; N_t^{ev} 、 N_t^{hfcv} 分别为 t 时刻在服务区内补能的电动汽车和氢燃料电池汽车的数量; $E_{\text{ev}}^{k, \text{h}}$ 、 $E_{\text{hfcv}}^{k, \text{h}}$ 分别为第 k 辆电动洗车、氢燃料电池汽车的电池容量。

3 综合能源站主要设备建模

3.1 电能系统建模

1) 光伏系统

$$0 \leq P_{\text{e, t}}^{\text{pv}} \leq P_{\text{e, rated}}^{\text{pv}}, \forall t \in T \quad (6)$$

式中: $P_{\text{e, t}}^{\text{pv}}$ 为光伏系统在 t 时刻的发电功率, kW; $P_{\text{e, rated}}^{\text{pv}}$ 为光伏发电的额定功率, kW。

2) 储能电池建模

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ch}}^{\text{es}} \leq \frac{E^{\text{es}}}{\eta_{\text{ch}}^{\text{es}} \Delta t} \\ 0 \leq |P_{\text{dis}}^{\text{es}}| \leq \frac{\eta_{\text{dis}}^{\text{es}} E^{\text{es}}}{\Delta t} \\ S_{\text{soc, min}}^{\text{es}} \leq S_{\text{soc, t}}^{\text{es}} = S_{\text{soc, t-1}}^{\text{es}} + \frac{(P_{\text{ch}}^{\text{es}} \eta_{\text{ch}}^{\text{es}} - P_{\text{dis}}^{\text{es}} / \eta_{\text{dis}}^{\text{es}}) \Delta t}{E^{\text{es}}} \leq S_{\text{soc, max}}^{\text{es}} \\ \forall t \in T \end{cases} \quad (7)$$

式中: $S_{\text{soc, t}}^{\text{es}}$ 为 t 时刻储能电池的荷电状态; $\eta_{\text{ch}}^{\text{es}}$ 、 $\eta_{\text{dis}}^{\text{es}}$ 分别为储能电池充/放电的效率; $P_{\text{ch}}^{\text{es}}$ 、 $P_{\text{dis}}^{\text{es}}$ 分别为储能电池充/放电的功率, kW; E^{es} 为储能电池的实际安装容量, kWh; $S_{\text{soc, max}}^{\text{es}}$ 、 $S_{\text{soc, min}}^{\text{es}}$ 分别为储能电池荷电状态的上、下限。

3.2 氢能系统建模

1) 电解槽模型

$$\begin{cases} v_t^{\text{el}} = \frac{\eta^{\text{el}} P_{\text{e, t}}^{\text{el}}}{\eta^{\text{he}}} \\ 0 \leq P_{\text{e, t}}^{\text{el}} \leq P_{\text{e, rated}}^{\text{el}} \end{cases}, \forall t \in T \quad (8)$$

式中: v_t^{el} 为 t 时刻电解槽的氢气生产速率, kg/h; η^{el} 为电制氢气的效率; $P_{\text{e, t}}^{\text{el}}$ 为 t 时刻电解槽消耗的电

功率, kW; η^{he} 为电氢转换系数; $P_{\text{e, rated}}^{\text{el}}$ 为电解槽的额定电功率。

2) 燃料电池模型

$$\begin{cases} P_{\text{e, t}}^{\text{hs}} = \eta^{\text{hste}} v_t^{\text{hs}} \eta^{\text{he}} \\ P_{\text{r, t}}^{\text{hs}} = \frac{P_{\text{e, t}}^{\text{hs}}}{\lambda_{\text{e, r}}^{\text{hs}}} \\ 0 \leq P_{\text{e, t}}^{\text{hs}} \leq P_{\text{e, rated}}^{\text{hs}} \end{cases}, \forall t \in T \quad (9)$$

式中: $P_{\text{e, t}}^{\text{hs}}$ 、 $P_{\text{r, t}}^{\text{hs}}$ 分别为 t 时刻燃料电池的发电功率和制热功率, kW; v_t^{hs} 为 t 时刻氢气的消耗速率, kg/h; η^{hste} 为燃料电池的发电效率; $\lambda_{\text{e, r}}^{\text{hs}}$ 为燃料电池的电热功率比; $P_{\text{e, rated}}^{\text{hs}}$ 为燃料电池额定输出电功率, kW。

3) 储氢罐模型

$$\begin{cases} 0 \leq v_{\text{ch}}^{\text{ht}} \leq \frac{E^{\text{ht}}}{\eta_{\text{ch}}^{\text{ht}} \Delta t} \\ 0 \leq |v_{\text{dis}}^{\text{ht}}| \leq \frac{\eta_{\text{dis}}^{\text{ht}} E^{\text{ht}}}{\Delta t} \\ S_{\text{min}}^{\text{ht}} \leq S_t^{\text{ht}} = S_{t-1}^{\text{ht}} + \frac{(v_{\text{ch}}^{\text{ht}} \eta_{\text{ch}}^{\text{ht}} - v_{\text{dis}}^{\text{ht}} / \eta_{\text{dis}}^{\text{ht}}) \Delta t}{E^{\text{ht}}} \leq S_{\text{max}}^{\text{ht}} \\ \forall t \in T \end{cases} \quad (10)$$

式中: S_t^{ht} 为 t 时刻储氢罐的储氢状态(实际储氢量与容量的比值); $\eta_{\text{ch}}^{\text{ht}}$ 、 $\eta_{\text{dis}}^{\text{ht}}$ 分别为储氢罐充/放气的效率; $v_{\text{ch}}^{\text{ht}}$ 、 $v_{\text{dis}}^{\text{ht}}$ 分别为储氢罐充/放气的速率, kg/h; E^{ht} 为储氢罐的实际安装容量, kg; $S_{\text{max}}^{\text{ht}}$ 、 $S_{\text{min}}^{\text{ht}}$ 分别为储氢罐储氢状态的上、下限。

3.3 天然气系统建模

1) 燃气轮机模型^[17]

$$\begin{cases} P_{\text{e, t}}^{\text{gt}} = \eta^{\text{gttc}} \eta^{\text{ge}} v_t^{\text{gt}} \\ P_{\text{r, t}}^{\text{gt}} = \frac{P_{\text{e, t}}^{\text{gt}}}{\lambda_{\text{e, r}}^{\text{gt}}} \\ 0 \leq P_{\text{e, t}}^{\text{gt}} \leq P_{\text{e, rated}}^{\text{gt}} \end{cases}, \forall t \in T \quad (11)$$

式中: $P_{\text{e, t}}^{\text{gt}}$ 、 $P_{\text{r, t}}^{\text{gt}}$ 分别为 t 时刻燃气轮机的发电功率和制热功率, kW; v_t^{gt} 为 t 时刻天然气的消耗速率, kg/h; $P_{\text{e, rated}}^{\text{gt}}$ 为燃气轮机额定发电功率; η^{ge} 为天然气的低位热值。

2) 储气罐模型

$$\begin{cases} 0 \leq v_{\text{ch}}^{\text{gk}} \leq \frac{E^{\text{gk}}}{\eta_{\text{ch}}^{\text{gk}} \Delta t} \\ 0 \leq |v_{\text{dis}}^{\text{gk}}| \leq \frac{\eta_{\text{dis}}^{\text{gk}} E^{\text{gk}}}{\Delta t} \\ S_{\text{min}}^{\text{gk}} \leq S_t^{\text{gk}} = S_{t-1}^{\text{gk}} + \frac{(v_{\text{ch}}^{\text{gk}} \eta_{\text{ch}}^{\text{gk}} - v_{\text{dis}}^{\text{gk}} / \eta_{\text{dis}}^{\text{gk}}) \Delta t}{E^{\text{gk}}} \leq S_{\text{max}}^{\text{gk}} \\ \forall t \in T \end{cases} \quad (12)$$

式中: S_t^{gk} 为 t 时刻储气罐的储气状态; $\eta_{\text{ch}}^{\text{gk}}$ 、 $\eta_{\text{dis}}^{\text{gk}}$ 分别为储气罐充/放气的效率; $v_{\text{ch}}^{\text{gk}}$ 、 $v_{\text{dis}}^{\text{gk}}$ 分别为储气罐充/放气的速率, kg/h; E^{gk} 为储气罐的实际安装容量, kg; $S_{\text{max}}^{\text{gk}}$ 、 $S_{\text{min}}^{\text{gk}}$ 分别为储气罐储气状态的上、下限。

3.4 冷/热系统建模

1) 电制冷机模型

$$\begin{cases} P_{c,t}^{\text{er}} = \eta^{\text{er}} P_{c,t}^{\text{er}} \\ 0 \leq P_{c,t}^{\text{er}} \leq P_{c,\text{rated}}^{\text{er}} \end{cases}, \forall t \in T \quad (13)$$

式中: $P_{c,t}^{\text{er}}$ 为 t 时刻电制冷机的制冷功率, kW; $P_{c,t}^{\text{er}}$ 为 t 时刻电制冷机消耗的电功率, kW; $P_{c,\text{rated}}^{\text{er}}$ 为电制冷机的额定电功率, kW。

2) 储冷器模型

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ch}}^{\text{cs}} \leq \frac{E^{\text{cs}}}{\eta_{\text{ch}}^{\text{cs}} \Delta t} \\ 0 \leq |P_{\text{dis}}^{\text{cs}}| \leq \frac{\eta_{\text{dis}}^{\text{cs}} E^{\text{cs}}}{\Delta t} \\ S_{\text{min}}^{\text{cs}} \leq S_t^{\text{cs}} = S_{t-1}^{\text{cs}} + \frac{(P_{\text{ch}}^{\text{cs}} \eta_{\text{ch}}^{\text{cs}} - P_{\text{dis}}^{\text{cs}} / \eta_{\text{dis}}^{\text{cs}}) \Delta t}{E^{\text{cs}}} \leq S_{\text{max}}^{\text{cs}} \\ \forall t \in T \end{cases} \quad (14)$$

式中: S_t^{cs} 为 t 时刻储冷器的储冷状态; $\eta_{\text{ch}}^{\text{cs}}$ 、 $\eta_{\text{dis}}^{\text{cs}}$ 分别为储冷器的充/放效率; $P_{\text{ch}}^{\text{cs}}$ 、 $P_{\text{dis}}^{\text{cs}}$ 分别为储冷器的充/放功率, kW; E^{cs} 为储冷器的实际安装容量, kWh; $S_{\text{max}}^{\text{cs}}$ 、 $S_{\text{min}}^{\text{cs}}$ 分别为储冷器储冷状态的上、下限。

3) 电锅炉模型

$$\begin{cases} P_{r,t}^{\text{eb}} = P_{c,t}^{\text{eb}} \eta^{\text{eb}} \\ 0 \leq P_{c,t}^{\text{eb}} \leq P_{c,\text{rated}}^{\text{eb}} \end{cases}, \forall t \in T \quad (15)$$

式中: $P_{r,t}^{\text{eb}}$ 为 t 时刻电锅炉的供热功率, kW; $P_{c,t}^{\text{eb}}$ 为 t 时刻电锅炉消耗的电功率, kW; $P_{c,\text{rated}}^{\text{eb}}$ 为电锅炉的额定电功率, kW。

4) 储热器模型

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ch}}^{\text{rb}} \leq \frac{E^{\text{rb}}}{\eta_{\text{ch}}^{\text{rb}} \Delta t} \\ 0 \leq |P_{\text{dis}}^{\text{rb}}| \leq \frac{\eta_{\text{dis}}^{\text{rb}} E^{\text{rb}}}{\Delta t} \\ S_{\text{min}}^{\text{rb}} \leq S_t^{\text{rb}} = S_{t-1}^{\text{rb}} + \frac{(P_{\text{ch}}^{\text{rb}} \eta_{\text{ch}}^{\text{rb}} - P_{\text{dis}}^{\text{rb}} / \eta_{\text{dis}}^{\text{rb}}) \Delta t}{E^{\text{rb}}} \leq S_{\text{max}}^{\text{rb}} \\ \forall t \in T \end{cases} \quad (16)$$

式中: S_t^{rb} 为 t 时刻储热器的储热状态; $\eta_{\text{ch}}^{\text{rb}}$ 、 $\eta_{\text{dis}}^{\text{rb}}$ 分别为储热器的充/放效率; $P_{\text{ch}}^{\text{rb}}$ 、 $P_{\text{dis}}^{\text{rb}}$ 分别为储热器的充/放功率, kW; E^{rb} 为储热器的实际安装容量, kWh; $S_{\text{max}}^{\text{rb}}$ 、 $S_{\text{min}}^{\text{rb}}$ 分别为储热器储热状态的上、下限。

4 高速公路服务区综合能源站多阶段规划模型

考虑到氢燃料电池汽车目前尚处于发展初期, 市场保有率相对较低, 为避免规划资源的浪费, 本文提出了一种计及氢能的高速公路服务区综合能源站多阶段规划模型, 旨在提高规划模型的准确性。具体而言, 将整个规划周期划分为 Y 个阶段, 并在各阶段分别进行各类能源设施的投资建设。每个规划阶段所对应的容量配置集序列如下。

$$P_{\text{rated}} = \begin{bmatrix} P_{\text{rated},1}^{\text{cp}} & P_{\text{rated},1}^{\text{hp}} & \cdots & P_{\text{rated},1}^{\text{cs}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{\text{rated},Y}^{\text{cp}} & P_{\text{rated},Y}^{\text{hp}} & \cdots & P_{\text{rated},Y}^{\text{cs}} \end{bmatrix}_{Y \times I} \quad (17)$$

式中: y 为规划阶段, $y = 1, 2, \dots, Y$; P_{rated} 为设备额定容量配置矩阵; $P_{\text{rated},y}^i$ 为设备 i 在 y 阶段的额定配置容量; $i \in I$, I 为高速公路综合能源站内所有能源设备的集合, $I = \{\text{充电桩、加氢机、光伏设备、储能电池、电解槽、燃料电池、电锅炉、电制冷机、燃气轮机、储氢罐、储气罐、储热器、储冷器}\}$ 。

4.1 目标函数

综合能源站多阶段规划模型以规划周期内总投资、运行成本最小为目标, 其一般表达式为:

$$\min C_{\text{total}} = \sum_{m \in M'} R_m (C_m^{\text{con}} + C_m^{\text{grid}} + C_m^{\text{op}}) \quad (18)$$

式中: C_{total} 为规划总成本; m 为年份; M' 为第 y 阶段规划的总年数; C_m^{con} 为第 m 年设备建设成本; R_m 为第 m 年的现值系数, $R_m = (1+r)^{-m}$, 其中, r 为折现率; C_m^{grid} 为第 m 年的外界购能成本; C_m^{op} 为第 m 年设备运行维护成本。需要指出的是, 本文仅对氢能相关设备(电解槽、加氢机、燃料电池、储氢罐)进行多阶段规划, 其他相关能源设备在规划首个周期一次性建成。因此, 综合能源站内的设备建设成本分为氢能设备建设成本和其他能源设备建设成本, 具体表达式如式(19)所示。

$$C_m^{\text{con}} = \sum_{s \in S} C_{s,m}^{\text{con}} + \sum_{h \in H} C_{h,m}^{\text{con}} \quad (19)$$

式中: $C_{h,m}^{\text{con}}$ 为第 m 年氢能相关设备的建设成本; $C_{s,m}^{\text{con}}$ 为第 m 年其他能源设备建设成本; $h \in H$, H 为氢能相关设备的集合, $H = \{\text{加氢机、电解槽、燃料电池、储氢罐}\}$; $s \in S$, S 为其他设备的集合, $S = \{\text{充电桩、光伏设备、储能电池、电锅炉、电制冷机、}$

燃气轮机、储气罐、储热器、储冷器}。

外界购能成本包括电能成本、天然气成本和氢气成本。其中，电网电价采用分时电价，而天然气与氢气的价格相对固定。

$$C_m^{\text{grid}} = C_{e,m}^{\text{grid}} + C_{g,m}^{\text{grid}} + C_{h,m}^{\text{trans}} \quad (20)$$

$$C_{e,m}^{\text{grid}} = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T d_j \pi_{e,t}^{\text{grid}} P_{e,m,j,t}^{\text{grid}} \Delta t \quad (21)$$

$$C_{g,m}^{\text{grid}} = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T d_j \pi_g^{\text{grid}} P_{g,m,j,t}^{\text{grid}} \Delta t \quad (22)$$

$$C_{h,m}^{\text{trans}} = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T d_j \pi_h^{\text{trans}} P_{h,m,j,t}^{\text{trans}} \Delta t \quad (23)$$

式中： $C_{e,m}^{\text{grid}}$ 、 $C_{g,m}^{\text{grid}}$ 、 $C_{h,m}^{\text{trans}}$ 分别为第 m 年外界购买电能、天然气、氢能的成本； d_j 为场景 j 的天数； $j \in J$ ， J 为场景的集合， $J = \{1(\text{春/秋季}), 2(\text{夏季}), 3(\text{冬季})\}$ ； $\pi_{e,t}^{\text{grid}}$ 为电网的分时电价； π_g^{grid} 为外界的天然价格； π_h^{trans} 为站外购氢的价格； $P_{e,m,j,t}^{\text{grid}}$ 、 $P_{g,m,j,t}^{\text{grid}}$ 、 $P_{h,m,j,t}^{\text{trans}}$ 分别为第 m 年场景 j 下 t 时刻外界输入的电能、天然气、氢气功率。

综合能源站的运行包含多种能源的生产、转换与存储，所有能源设备的运行成本可由下式计算得到。

$$C_m^{\text{op}} = \sum_{i \in I} \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T d_j \gamma_i \Delta t (P_{e,m,j,t}^i + P_{g,m,j,t}^i + P_{h,m,j,t}^i + P_{\tau,m,j,t}^i + P_{c,m,j,t}^i) \quad (24)$$

式中： γ_i 为第 i 类设备单位功率的运行费用，元/kWh； $P_{e,m,j,t}^i$ 为第 m 年场景 j 下设备 i 在 t 时刻的运行电功率； $P_{g,m,j,t}^i$ 为第 m 年场景 j 下设备 i 在 t 时刻的天然气运行功率； $P_{h,m,j,t}^i$ 为第 m 年场景 j 下设备 i 在 t 时刻的氢气运行功率； $P_{\tau,m,j,t}^i$ 为第 m 年场景 j 下设备 i 在 t 时刻的运行热功率； $P_{c,m,j,t}^i$ 为第 m 年场景 j 下设备 i 在 t 时刻的运行冷功率。

4.2 约束条件

1) 投资成本约束

$$C_{\text{total}} \leq C_{\text{CAP}} \quad (25)$$

式中 C_{CAP} 为最大规划成本。

2) 充电桩数量约束

$$N_{\min}^{\text{cp}} \leq N_y^{\text{cp}} \leq N_{\max}^{\text{cp}} \quad (26)$$

式中： $N_{\max}^{\text{cp}}$ 、 $N_{\min}^{\text{cp}}$ 分别为充电桩的安装数量上、下限； N_y^{cp} 为第 y 阶段充电桩的实际安装数量。

3) 充电负荷约束

$$N_y^{\text{cp}} P_{\text{em}}^{\text{cp}} \geq L_{\max}^{\text{ev}} \quad (27)$$

式中： $P_{\text{em}}^{\text{cp}}$ 为充电桩的额定功率，kW； $L_{\max}^{\text{ev}}$ 为电动

汽车的最大充电负荷。

4) 加氢机数量约束

$$N_{\min}^{\text{hd}} \leq N_y^{\text{hd}} \leq N_{\max}^{\text{hd}} \quad (28)$$

式中： $N_{\max}^{\text{hd}}$ 、 $N_{\min}^{\text{hd}}$ 分别为加氢机的安装数量上、下限； N_y^{hd} 为第 y 阶段加氢机的实际安装数量。

5) 加氢负荷约束

$$N_y^{\text{hd}} P_{\text{em}}^{\text{hd}} \geq L_{m,\max}^{\text{hfcv}} \eta^{\text{he}} \quad (29)$$

式中： $P_{\text{em}}^{\text{hd}}$ 为加氢机的额定加氢功率，kW； $L_{m,\max}^{\text{hfcv}}$ 为第 m 年氢燃料电池汽车的最大加氢需求。

除了满足式(6)~(16)设备基本运行约束外，高速公路综合能源站还需要满足以下运行约束。

6) 购能约束

$$\begin{cases} P_{e,\min}^{\text{grid}} \leq P_{e,m,j,t}^{\text{grid}} \leq P_{e,\max}^{\text{grid}} \\ P_{g,\min}^{\text{grid}} \leq P_{g,m,j,t}^{\text{grid}} \leq P_{g,\max}^{\text{grid}} \\ P_{h,\min}^{\text{trans}} \leq P_{h,m,j,t}^{\text{trans}} \leq P_{h,\max}^{\text{trans}} \\ \forall t \in T \end{cases} \quad (30)$$

式中： $P_{e,\max}^{\text{grid}}$ 、 $P_{e,\min}^{\text{grid}}$ 分别为购电功率的上、下限； $P_{g,\max}^{\text{grid}}$ 、 $P_{g,\min}^{\text{grid}}$ 分别为购买天然气功率的上、下限； $P_{h,\max}^{\text{trans}}$ 、 $P_{h,\min}^{\text{trans}}$ 分别为购氢功率的上、下限； $P_{e,m,j,t}^{\text{grid}}$ 、 $P_{g,m,j,t}^{\text{grid}}$ 、 $P_{h,m,j,t}^{\text{trans}}$ 分别为第 m 年场景 j 下 t 时刻从外界购买的电能、天然气和氢气功率。

7) 储能装置容量约束

$$\begin{cases} E_{m,\min}^{\text{es}} \leq E_m^{\text{es}} \leq E_{m,\max}^{\text{es}} \\ E_{m,\min}^{\text{ht}} \leq E_m^{\text{ht}} \leq E_{m,\max}^{\text{ht}} \\ E_{m,\min}^{\text{gk}} \leq E_m^{\text{gk}} \leq E_{m,\max}^{\text{gk}} \\ E_{m,\min}^{\text{rb}} \leq E_m^{\text{rb}} \leq E_{m,\max}^{\text{rb}} \\ E_{m,\min}^{\text{cs}} \leq E_m^{\text{cs}} \leq E_{m,\max}^{\text{cs}} \end{cases} \quad (31)$$

式中： $E_{m,\max}^{\text{es}}$ 、 $E_{m,\min}^{\text{es}}$ 分别为第 m 年储能电池安装容量的上、下限； $E_{m,\max}^{\text{ht}}$ 、 $E_{m,\min}^{\text{ht}}$ 分别为第 m 年储氢罐安装容量的上、下限； $E_{m,\max}^{\text{gk}}$ 、 $E_{m,\min}^{\text{gk}}$ 分别为在第 m 年储气罐安装容量的上、下限； $E_{m,\max}^{\text{rb}}$ 、 $E_{m,\min}^{\text{rb}}$ 分别为第 m 年储热器安装容量的上、下限； $E_{m,\max}^{\text{cs}}$ 、 $E_{m,\min}^{\text{cs}}$ 分别为在第 m 年储冷器安装容量的上、下限； E_m^{es} 、 E_m^{ht} 、 E_m^{gk} 、 E_m^{rb} 、 E_m^{cs} 分别为第 m 年储能电池、储氢罐、储气罐、储热器、储冷器的实际安装容量。

8) 自治率约束

$$\begin{cases} \zeta = \sum_{t=1}^T P_t^{\text{pv}} / \sum_{t=1}^T P_{e,t}^{\text{load}} \times 100\% \\ \zeta \geq \zeta_{\text{st}} \end{cases} \quad (32)$$

式中： ζ 为系统能源自治率； P_t^{pv} 为 t 时刻光伏发电功率； $P_{e,t}^{\text{load}}$ 为 t 时刻服务区的电负荷功率； ζ_{st} 为服务

区能源自洽率的最低标准。

9) 电能平衡约束

$$\begin{cases} P_{e,m,j,t}^{\text{out}} + P_{e,m,j,t}^{\text{es}} = L_{e,m,j,t} \\ P_{e,m,j,t}^{\text{in}} = P_{e,m,j,t}^{\text{grid}} + P_{e,m,j,t}^{\text{pv}} - P_{e,m,j,t}^{\text{grid,el}} - P_{e,m,j,t}^{\text{pv,el}}, \forall t \in T \\ P_{e,m,j,t}^{\text{out}} = P_{e,m,j,t}^{\text{in}} + P_{e,m,j,t}^{\text{hs}} + P_{e,m,j,t}^{\text{gt}} - P_{e,m,j,t}^{\text{cb}} - P_{e,m,j,t}^{\text{er}} \end{cases} \quad (33)$$

式中: $P_{e,m,j,t}^{\text{in}}$ 为第 m 年场景 j 下能源侧在 t 时刻输入到系统的电功率; $P_{e,m,j,t}^{\text{out}}$ 为第 m 年场景 j 下电能从 t 时刻输出到负荷侧的功率; $P_{e,m,j,t}^{\text{pv}}$ 、 $P_{e,m,j,t}^{\text{hs}}$ 、 $P_{e,m,j,t}^{\text{gt}}$ 分别为第 m 年场景 j 下光伏、燃料电池、燃气轮机在 t 时刻的发电功率; $P_{e,m,j,t}^{\text{grid,el}}$ 为第 m 年场景 j 下在 t 时刻的外网购电中用来制造氢气的电功率; $P_{e,m,j,t}^{\text{pv,el}}$ 为第 m 年场景 j 下在 t 时刻的光伏发电中用来制造氢气的电功率; $P_{e,m,j,t}^{\text{cb}}$ 、 $P_{e,m,j,t}^{\text{er}}$ 、 $P_{e,m,j,t}^{\text{es}}$ 分别为第 m 年场景 j 下电锅炉、电制冷机、储能电池在 t 时刻的电功率; $L_{e,m,j,t}$ 为第 m 年场景 j 下在 t 时刻的电负荷。

10) 天然气平衡约束

$$P_{g,m,j,t}^{\text{grid}} - P_{g,m,j,t}^{\text{gt}} + P_{g,m,j,t}^{\text{gk}} = L_{g,m,j,t}, \forall t \in T \quad (34)$$

式中: $P_{g,m,j,t}^{\text{gt}}$ 、 $P_{g,m,j,t}^{\text{gk}}$ 分别为第 m 年场景 j 下燃气轮机、储气罐在 t 时刻的天然气功率; $L_{g,m,j,t}$ 为第 m 年场景 j 下在 t 时刻的天然气负荷。

11) 氢能平衡约束

$$P_{h,m,j,t}^{\text{trans}} + P_{h,m,j,t}^{\text{el}} - P_{h,m,j,t}^{\text{hs}} + P_{h,m,j,t}^{\text{ht}} = L_{h,m,j,t}, \forall t \in T \quad (35)$$

式中: $P_{h,m,j,t}^{\text{el}}$ 、 $P_{h,m,j,t}^{\text{hs}}$ 、 $P_{h,m,j,t}^{\text{ht}}$ 分别为第 m 年场景 j 下电解槽、燃料电池、储氢罐在 t 时刻的氢气功率; $L_{h,m,j,t}$ 为第 m 年场景 j 下在 t 时刻的氢气负荷。

12) 热能平衡约束

$$P_{r,m,j,t}^{\text{cb}} + P_{r,m,j,t}^{\text{hs}} + P_{r,m,j,t}^{\text{gt}} + P_{r,m,j,t}^{\text{rb}} = L_{r,m,j,t}, \forall t \in T \quad (36)$$

式中: $P_{r,m,j,t}^{\text{cb}}$ 、 $P_{r,m,j,t}^{\text{hs}}$ 、 $P_{r,m,j,t}^{\text{gt}}$ 、 $P_{r,m,j,t}^{\text{rb}}$ 分别为第 m 年场景 j 下电锅炉、燃料电池、燃气轮机、储热器在 t 时刻的热功率; $L_{r,m,j,t}$ 为第 m 年场景 j 下在 t 时刻的热负荷。

13) 冷能平衡约束

$$P_{c,m,j,t}^{\text{er}} + P_{c,m,j,t}^{\text{cs}} = L_{c,m,j,t}, \forall t \in T \quad (37)$$

式中: $P_{c,m,j,t}^{\text{er}}$ 、 $P_{c,m,j,t}^{\text{cs}}$ 分别为第 m 年场景 j 下电制冷机、储冷器在 t 时刻的冷功率; $L_{c,m,j,t}$ 为第 m 年场景 j 下在 t 时刻的冷负荷。

4.3 求解方法

式(18)–(32)属于混合整数线性规划问题,涵盖连续变量与离散变量。因此,本文采用遗传算法与 Cplex 求解器相结合的方式求解,具体流程

详见图2。在初始建模阶段,首先构建清洁能源车用能需求模型。随后,输入电、气、热/冷、氢负荷曲线及光伏发电等基础数据,建立综合能源站能源设备模型。最终,运用遗传算法进行求解,设定种群数为100,迭代次数为100,交叉选择概率为0.7,变异概率为0.1。

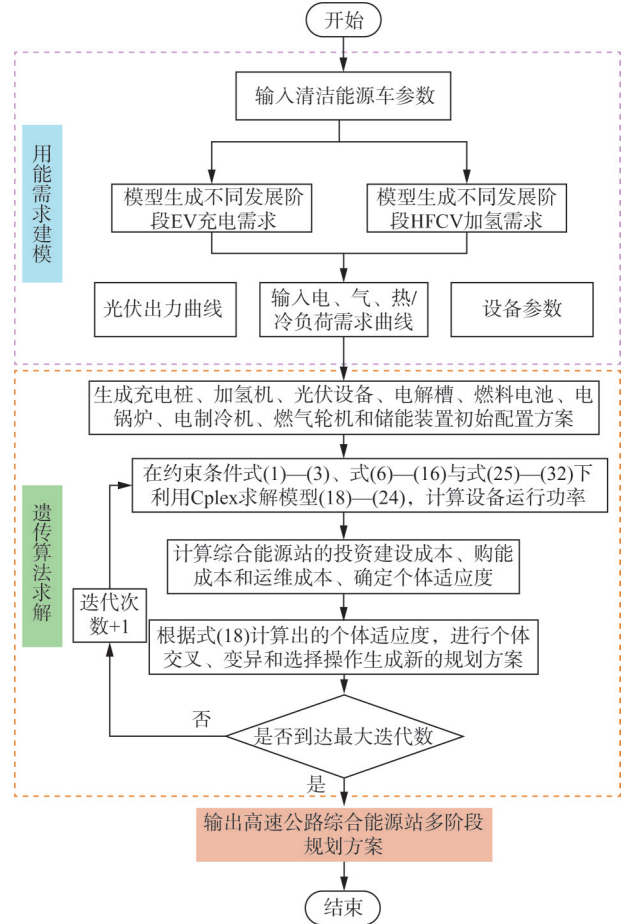


图2 模型求解流程图

Fig. 2 Flowchart of model solving

5 算例分析

5.1 基础参数设置

首先,本研究将全年划分为3个典型季节:春/秋季(102 d)、夏季(153 d)和冬季(110 d),并选取各季节的典型日作为参考^[15]。考虑到占地面积、地区太阳辐射等实际因素,设定高速公路服务区及其周边地区的光伏系统最大安装容量为4 500 kW,其典型日光伏出力特性如图3所示。本项研究所选取的冷/热、气负荷数据来源于文献[16–18]。鉴于现阶段氢燃料电池汽车市场保有率相对较低,将氢能

相关设备的规划分为两个阶段,每阶段持续时间为 5 a,并以此为基础估算氢负荷数据。论文假设典型日内服务区汽车驶入量为 1 000 辆^[15],不同规划阶段的清洁能源车数据详见表 1。

表 1 不同阶段清洁能源车数据

Tab. 1 Data on clean energy vehicles at different stages

阶段	渗透率		电池容量		单位里程能耗	
	HFCV	EV	HFCV /kg	EV /kWh	HFCV /(kg·km ⁻¹)	EV /(kWh·km ⁻¹)
1	0.1	0.2	6	100	0.2	0.195
2	0.2	0.3	6	100	0.2	0.195

注: HFCV 为氢燃料电池汽车(hydrogen fuel cell vehicle);EV 为电动汽车(electric vehicle)。

本文规定综合能源站每日从外界购买电能、天然气、氢气的功率均不超过 2 000 kW。此外,高速公路服务区综合能源站的能源管道和线路损耗忽略不计。同时,加氢机与充电桩的安装数量的上下限分别设定为 10 台和 2 台。其中,单台充电桩的充电功率为 100 kW,充电效率为 90%,建设成本为 2.1 万元;单台加氢机的平均加氢速率为 30 kg/h^[19]。具体加氢流程为:氢气从储氢罐经加氢机加压冷却后注入氢燃料汽车中(此过程中的能量损耗与时间

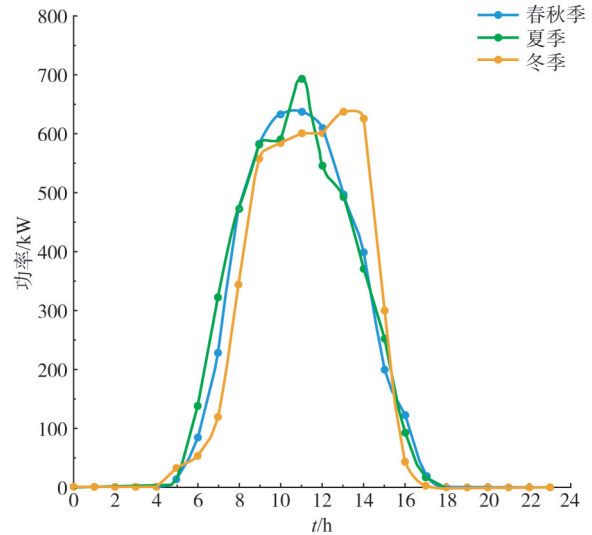


图 3 高速公路服务区光伏出力

Fig. 3 Photovoltaic power outputs in highway service areas

成本忽略不计)^[20]。一台加氢机的建设费用为 11.9 万元。不同阶段下 3 种典型日场景用能变化曲线如图 4 所示。

此外,规定在每个发展阶段,高速公路服务区综合能源站的能源自洽率^[21]均不得低于 0.5,即光伏设备所发电量需满足该服务区综合能源站内超过 50%的电负荷需求。光伏系统的单位建设成本为

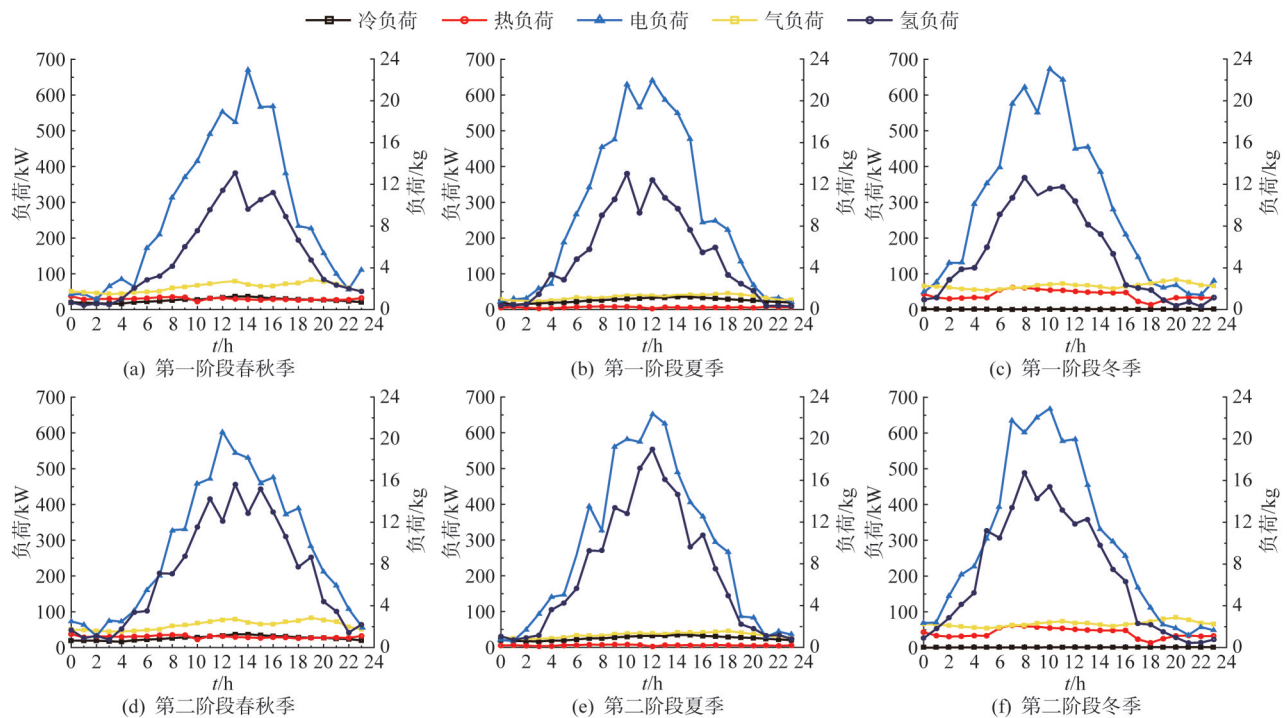


图 4 不同阶段下 3 种典型日场景用能变化曲线

Fig. 4 Energy consumption variation curves for three typical daily scenarios at different stages

0.32 万元/kW^[22], 单位运维成本为 0.01 元/kWh。本文所规划的能源设备经济技术参数源自文献[18], 表 2 涵盖各类储能设备的经济技术参数, 表 3 为电解槽、电锅炉等其他设备的经济技术参数。电网电价采用分时电价机制, 电价数据取自北方某城市, 具体如图 5 所示^[23]。天然气价格固定为 2.2 元/kg。考虑到相关制氢技术发展对氢气成本的影响, 两阶段氢气价格分别设定为 20 元/kg 和 15 元/kg^[24], 其他相关参数详见表 4。

为了验证本文所提规划方法的有效性, 在本算例中设置了 2 个场景进行对比分析。

场景 I: 不考虑氢负荷增长速率, 所有能源设备进行一次性规划配置;

场景 II: 考虑氢负荷增长速率, 氢能相关设备采用多阶段规划, 其他设备进行一次性规划配置。

表 2 储能设备经济技术参数

Tab. 2 Economic and technical parameters of energy storage equipment

设备	充/放效率	最小状态	最大状态	单位运维成本/(元·kWh ⁻¹)	单位建设成本/(万元·kWh ⁻¹)	寿命/a
储能电池	0.95	0.10	0.90	0.096	0.150 0	8
储氢罐	0.90	0.10	0.90	0.008	0.200 0	10
储气罐	0.90	0.10	0.90	0.018	0.020 0	10
储热器	0.90	0.10	0.90	0.016	0.003 5	10
储冷器	0.90	0.10	0.90	0.016	0.003 5	10

表 3 其他设备经济技术参数

Tab. 3 Other economic and technical parameters of the equipment

设备	效率	单位运维成本/(元·kWh ⁻¹)	单位建设成本/(万元·kW ⁻¹)	寿命/a
电解槽	0.85	0.03	0.28	20
燃料电池	0.6(发电)	0.08	0.3	20
电锅炉	0.9	0.04	0.1	25
电制冷机	0.9	0.015	0.097	15
燃气轮机	0.35(发电)	0.02	0.6	30

5.2 规划结果及分析

5.2.1 不同场景规划结果及分析

通过遗传算法分别对规划场景 I、II 进行求解, 得到不同场景下综合能源站的建设成本、运维成本、购能成本如表 5 所示, 表 6 则为两种场景下的综合能源站的能源设备容量配置方案。

由表 5—6 可以看出, 场景 II 的光伏设备、电

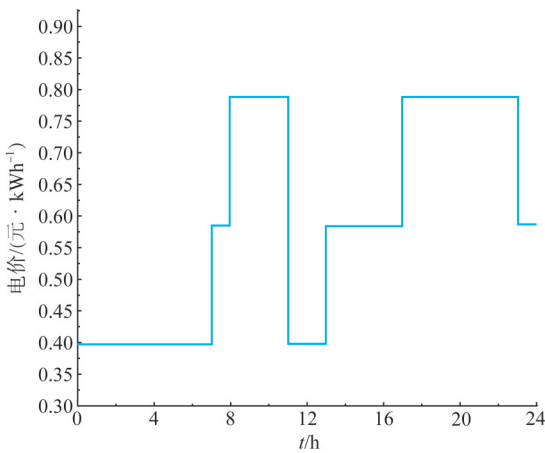


图 5 分时电价

Fig. 5 Time-of-use electricity pricing

表 4 规划模型其他参数

Tab. 4 Other parameters of the model

参数	数值
折现率	0.068
燃料电池电热功率比	1.71
燃气轮机电热功率比	0.78
电氢转换系数/(kWh·kg ⁻¹)	37.38
天然气低位热值/(kWh·kg ⁻¹)	12.55

表 5 两种场景下综合能源站规划成本

Tab. 5 Planning costs of the integrated energy station in the two scenarios

场景	建设成本	运维成本	购能成本	总成本
场景 I	1 515.83	72.10	634.30	2 222.23
场景 II	1 482.23	70.78	614.87	2 167.88

解槽和燃料电池的总规划容量高于场景 I, 而燃气轮机、储能电池、电锅炉、储热器、储气罐和储氢罐的总规划容量则低于场景 I, 其他设备的容量基本持平。这主要是因为: 1) 引入氢储能系统在一定程度上提升了高速公路服务区综合能源站对光伏发电的消纳能力; 2) 通过对燃料电池氢转电过程的余热利用, 在一定程度上减少了对燃气轮机和电锅炉的依赖, 从而提高了能源生产和转化的效率。

进一步从规划和运行两个层面分析成本差异的原因。在规划层面, 根据表 6 的数据显示, 场景 II 中第一阶段加氢机、储氢罐的配置容量仅为场景 I 的三分之二, 电解槽的配置容量为场景 I 的五分之四, 燃料电池的配置容量约为场景 I 的五分之三。相较于场景 I, 场景 II 的建设成本减少了约 33.6 万元, 降幅为 2.2 %。因此, 本文提出的多阶段规

表 6 两种场景下综合能源站能源设备容量配置方案

Tab. 6 Energy equipment capacities configuration schemes for integrated energy stations in the two scenarios

设备	场景 I	场景 II	
		阶段 I	阶段 II
加氢机/kg	180	120	60
电解槽/kW	386	295	102
储氢罐/kg	152	100	31
燃料电池/kW	116	71	60
光伏设备/kW	2 768	2 800	
储能电池/kWh	2 310	2 217	
电制冷机/kW	243	241	
燃气轮机/kW	159	142	
电锅炉/kW	112	98	
充电桩/kW	400	400	
储气罐/kg	80	56	
储热器/kWh	278	262	
储冷器/kWh	236	234	

划方案能够在满足综合能源站用能需求的前提下,有效降低投资成本,避免因超前建设和资源冗余而造成的浪费。

在运行层面,以不同场景下春/秋季综合能源站的运行情况为例进行分析。图 6 展示了春/秋季典型日不同场景下高速公路服务区综合能源站的购电、天然气、氢气功率曲线。图 7 则呈现了春/秋季典型日氢能相关设备的出力情况。从图 6—7 可以看出,受分时电价影响,在 00:00—07:00 期间,购电制氢的成本低于直接购氢,因此综合能源站向外界购电量相应增加;在 11:00—13:00 的光伏出力高峰期,光伏发电制氢的成本低于向外界购电购

氢,此时向外界购电和购氢量均相应减少;而在 17:00—23:00 电价上升时段,购电制氢成本升高,因此选择直接购氢。

在第一阶段,场景 II 向外界购买的氢气和电能较多,导致其购能成本相对于场景 I 略高;在第二阶段,由于场景 I 配置的电解槽总容量较小,需购买更多氢气以满足用能需求。如图 7 所示,场景 II 在第二阶段增加了燃料电池安装容量,将多余的氢能转化为电能,这在一定程度上降低了场景 II 的购电成本。相较于场景 I,场景 II 的总购能成本减少了 19.43 万元,年均总成本减少约 54.35 万元,从而证明了本文提出的多阶段规划方法更为经济、合理。

5.2.2 不同求解算法收敛特性对比分析

图 8 展示了遗传算法、粒子群优化算法以及差分进化算法在规划求解过程中的收敛特性对比。在求解过程中,3 种算法的种群规模和最大迭代次数均设置为 100,并进行了 10 次独立重复实验以取平均值。结果表明,在给定条件下,3 种算法均能收敛至同一目标,但遗传算法的收敛速度显著优于其他两种算法。

6 结论

本文提出了一种计及氢能的高速公路服务区综合能源站多阶段规划方法。首先,构建了涵盖电、热/冷、气、氢的综合能源站架构,并考虑氢燃料电池保有量的增长速率,进一步建立了不同类型清洁能源汽车的耗能概率模型,以模拟清洁能源汽车的充电和加氢需求。在此基础上,以总成本最小化

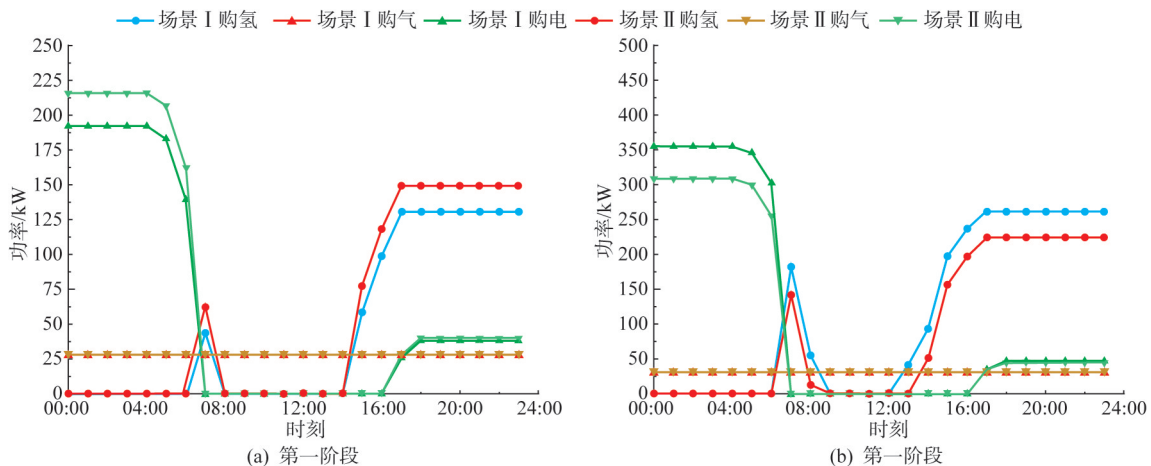


图 6 春/秋季典型日购电、氢气、天然气功率

Fig. 6 Typical daily power procurement, hydrogen, and natural gas powers in spring/autumn

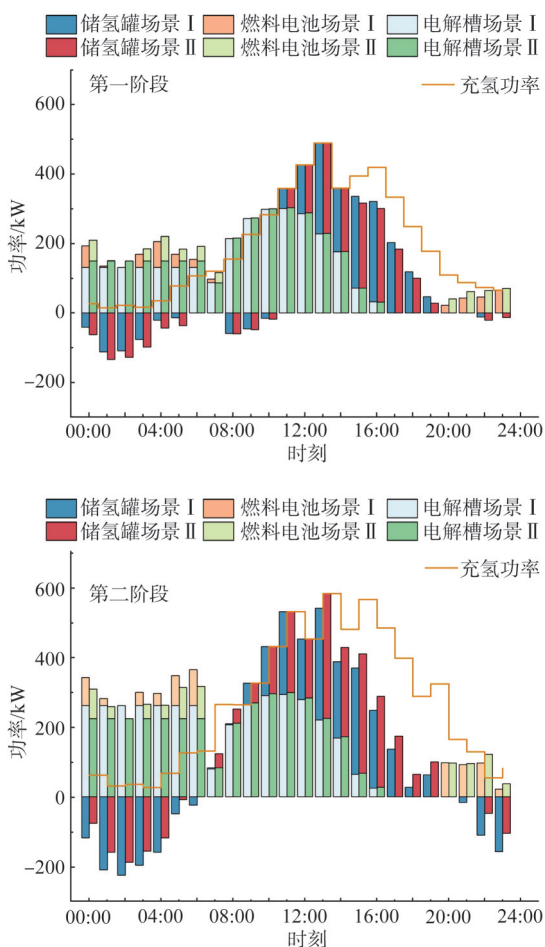


图7 春/秋季典型日氢能相关设备出力

Fig. 7 Output power curves of hydrogen-related equipment in spring and autumn

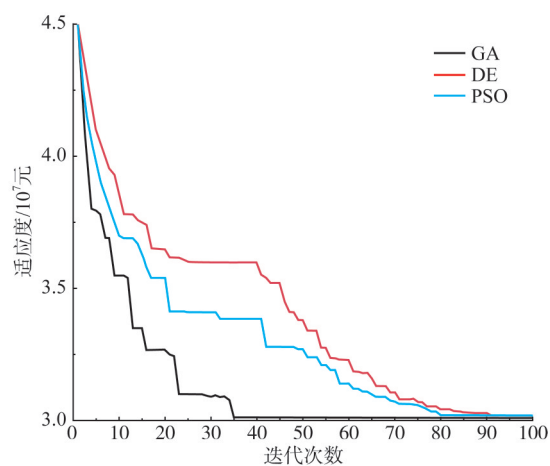


图8 不同算法求解收敛速度

Fig. 8 Convergence speed solved by different algorithms

为目标,建立了综合能源站的分阶段规划模型。最后,基于我国北方某高速服务区的实际能源负荷数据,对规划模型进行了仿真验证。

结果表明:1)多阶段规划方案具有更高的经济性。具体而言,建设成本减少了约33.6万元,运维和购能成本减少了约20.75万元,年均总成本减少了约54.35万元,降幅约为2.4%;2)通过分阶段规划氢能设备,有效避免了“前期冗余,后期不足”的问题。针对氢能设备与其他能源设备的耦合机制,未来将拓展至综合能源站全站能源设备的多阶段规划,并考虑不同政策和价格机制,以更好地匹配用能需求的变化趋势。

参考文献

- [1] 卓映君,周保荣,姚文峰,等.“双碳”目标下南方区域能源电力消费及负荷特性预测[J].南方电网技术,2023,17(9):132-140.
ZHUO Yingjun, ZHOU Baorong, YAO Wenfeng, et al. Prediction of energy and electricity consumption and load characteristics in the southern region under the carbon peak and carbon neutrality target [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(9): 132-140.
- [2] 杜鹏.新时期我国交通运输业碳减排的任务与对策——“交通7+1论坛”第六十次会议[J].交通运输系统工程与信息, 2024, 24(6): 1-4.
DU Peng. Tasks and countermeasures of carbon emission reduction in China's transportation industry in the new era: the 60th meeting of the "Transportation 7+1 Forum" [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(6): 1-4.
- [3] 中国政府网.2023年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202406/content_6957901.htm.
- [4] 陈艳波,刘镇湘,田昊欣,等.高速公路绿色能源系统研究综述及展望[J].中国电机工程学报, 2025, 45(8): 3016-3030.
CHEN Yanbo, LIU Zhenxiang, TIAN Haoxin, et al. Research review and prospect of highway green energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8): 3016-3030.
- [5] 贾利民,师瑞峰,吉莉,等.我国道路交通与能源融合发展战略研究[J].中国工程科学, 2022, 24(3): 163-172.
JIA Limin, SHI Ruifeng, JI Li, et al. Research on the integrated development strategy of road transportation and energy in China [J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2022, 24(3): 163-172.
- [6] 黄仙,纪文童,叶笑蓉,等.基于机会约束的高速公路自洽能源系统规划方法[J].长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(5): 36-46.
HUANG Xian, JI Wentong, YE Xiaorong, et al. Highway self-consistent energy system planning method based on opportunity constraint [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(5): 36-46.
- [7] 陈艳波,田昊欣,刘宇翔,等.计及电动汽车需求响应的高速公路服务区光储充鲁棒优化配置[J].中国电机工程学报, 2025, 45(5): 1752-1766.
CHEN Yanbo, TIAN Haoxin, LIU Yuxiang, et al. Robust optimal allocation of optical storage and charging in highway service area considering demand response of electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(5): 1752-1766.
- [8] 赵天宇,贾利民,任利军.高速公路典型场景自洽能源系统

- 配置优化[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版), 1-14 [2025-03-31]. <http://cnki.wenx.top/kcms/detail/10.1999.tm.20250123.1741.007.html>.
- ZHAO Tianyu, JIA Limin, REN Lijun. Optimization of self-consistent energy system configuration in typical scenarios of expressway [J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 1-14 [2025-03-31]. <http://cnki.wenx.top/kcms/detail/10.1999.tm.20250123.1741.007.html>.
- [9] 李艳波, 李若尘, 史博, 等. 基于改进模拟退火遗传算法的高速公路服务区自治能源系统高效能优化[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(1): 197-207, 216.
- LI Yanbo, LI Ruochen, SHI Bo, et al. High energy efficiency optimization of self-consistent energy system in highway service area based on improved simulated annealing genetic algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(1): 197-207, 216.
- [10] 王颢, 赵微微, 林少军, 等. 基于改进的多目标量子遗传算法的高速服务区综合能源管理[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1742-1751.
- WANG Biao, ZHAO Weiwei, LIN Shaojun, et al. Integrated energy management of high-speed service area based on improved multi-objective quantum genetic algorithm [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1742-1751.
- [11] 周健树, 向月, 张新, 等. 基于深度强化学习的高速公路服务区新能源充电桩两阶段优化调控策略[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(11): 4130-4143.
- ZHOU Jianshu, XIANG Yue, ZHANG Xin, et al. Two-stage optimal control strategy for new energy charging stations in highway service area based on deep reinforcement learning [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(11): 4130-4143.
- [12] 李佳琪, 徐潇源, 严正. 大规模新能源汽车接入背景下的氢能能源与交通系统耦合研究综述[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(3): 253-266.
- LI Jiaqi, XU Xiaoyuan, YAN Zheng. A review of the research on the coupling of electric hydrogen energy and transportation system in the context of large-scale new energy vehicle access [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(3): 253-266.
- [13] 王书征, 单婷婷, 赵洋, 等. 考虑不同制氢方法的高速公路加氢站布局规划[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4): 9-17.
- WANG Shuzheng, SHAN Tingting, ZHAO Yang, et al. Layout planning of highway hydrogen refueling station considering different hydrogen production methods [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 9-17.
- [14] 周军, 常恒, 梁光川, 等. 基于氢供应链优化的加氢站选址与用氢成本分析[J]. 可再生能源, 2023, 41(7): 861-867.
- ZHOU Jun, CHANG Heng, LIANG Guangchuan, et al. Analysis of hydrogen refueling station site selection and hydrogen cost based on hydrogen supply chain optimization [J]. Renewable Energy, 2023, 41(7): 861-867.
- [15] 梁俊鹏, 张高航, 李凤婷, 等. 计及氢储能与需求响应的路域综合能源系统规划方法[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4918-4927.
- LIANG Junpeng, ZHANG Gaoang, LI Fengting, et al. Planning method of road-area integrated energy system considering hydrogen energy storage and demand response [J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4918-4927.
- [16] 葛少云, 朱林伟, 刘洪, 等. 基于动态交通仿真的高速公路电动汽车充电站规划[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 2991-3001.
- GE Shaoyun, ZHU Linwei, LIU Hong, et al. Planning of highway electric vehicle charging station based on dynamic traffic simulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 2991-3001.
- [17] 林达, 钱平, 张雪松, 等. 考虑储能寿命特性的综合能源系统经济-灵活多目标优化运行策略[J]. 浙江电力, 2022, 41(1): 26-34.
- LIN Da, QIAN Ping, ZHANG Xuesong, et al. Economic-flexible multi-objective optimal operation strategy of integrated energy system considering energy storage lifetime characteristics [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(1): 26-34.
- [18] 金泰, 李娜, 秦建华, 等. 基于混合整数非线性规划的综合能源系统优化配置研究[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 131-140.
- JIN Tai, LI Na, QIN Jianhua, et al. Research on the optimization of integrated energy system allocation based on mixed integer nonlinear programming [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 131-140.
- [19] 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.
- [20] ZHANG Hongcai, QI Wei, HU Zechun, et al. Planning hydrogen refueling stations with coordinated on-site electrolytic production [C]// 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, June 16-20, 2017, Chicago, IL, USA. New York: IEEE, 2017: 1-5.
- [21] 刘宇翔, 陈艳波, 田昊欣, 等. 基于两阶段鲁棒优化的轨道交通自治能源系统新能源-储能规划配置[J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4713-4723.
- LIU Yuxiang, CHEN Yanbo, TIAN Haoxin, et al. New energy-energy storage planning and configuration of rail transit self-consistent energy system based on two-stage robust optimization [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4713-4723.
- [22] 中国光伏行业协会. 中国光伏产业发展路线图(2023-2024年) [EB/OL]. (2024-02-28) [2025-3-31]. https://www.chinapv.org.cn/Industry/resource_1380.html.
- [23] 山西省发展和改革委员会. 晋发改商品发[2021]479号-关于完善分时电价机制有关事项的通知 [EB/OL]. (2023-04-13) [2025-3-31]. <http://www.sx.sgcc.com.cn/articles/202304/a1156582.html>.
- [24] International Energy Agency. Global hydrogen review 2024 [EB/OL]. (2024-10-02) [2025-3-31]. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>.

收稿日期: 2025-04-08; 网络首发日期: 2025-08-26

作者简介:

胡雅媛(2002), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制, ap@stu.csust.edu.cn;

张永熙(1986), 女, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向为电力系统规划与运行、新能源并网与储能电池, is-suki330@126.com;

殷子良(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车充电设施规划, 3020858872@qq.com。