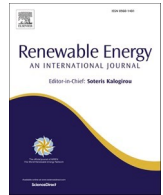


目录可在 [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com) 上查阅

## 可再生能源

期刊主页: [www.elsevier.com/locate/renene](http://www.elsevier.com/locate/renene)

## 考虑 V2G 响应和碳交易的 EV-HV 电氢耦合综合能源系统的合作经济调度

李瑞琦<sup>a</sup>, Hongbo Ren<sup>a,\*</sup>, 吴琮<sup>a,b,\*\*</sup>, 李启芬<sup>a,b</sup>, Weijun Gao<sup>c</sup><sup>a</sup> 上海电力学院能源与机械工程学院, 中国上海, 200090<sup>b</sup> 上海非碳能源转化利用研究所, 中国上海, 200240<sup>c</sup> 北九州大学环境工程学院, 日本北九州市 808-0135

## ARTICLE INFO

## 关键词:

电-氢耦合 汽车并网

碳交易 综合能源系统

## ABSTRACT

随着可再生能源的日益普及, 氢能转换技术加快了新能源汽车(包括氢能汽车(HV)和电动汽车(EV))的应用。同时, 车联网(V2G)技术的整合进一步促进了与交通系统耦合的电氢一体化能源系统的发展。在本研究中, 考虑到V2G响应和碳交易, 为EV-HV耦合的电氢一体化能源系统开发了一个优化调度模型。首先, 针对可再生能源和负荷的随机性, 采用了拉丁超立方采样法和 Kantorovich 场景还原法来生成和简化场景。其次, 为氢混合燃气轮机的运行以及电动汽车和高压电的能源管理开发了一个优化模型。为鼓励电动汽车和氢动力汽车的参与, 引入了V2G响应奖励机制, 并辅以分时电价, 以引导有序充电和放电。此外, 还研究了电动汽车和混合动力汽车的运行模式以及氢气混合比例对系统总成本和碳排放的影响。研究选取了一个工业园区作为示例, 展示了所提方法的有效性, 并展示了令人满意的经济和环境表现。

## 1. 引言

电力和氢气都是高效、清洁、灵活且应用广泛的能源载体。在未来以可再生能源为主导的能源系统中, 电和氢的协同集成和耦合将成为提高能效和低碳利用的关键途径[1]。电氢一体化能源系统遵循绿色低碳发展原则, 旨在优化资源配置。通过采用电解槽、氢能发电(燃料电池、燃气轮机等)、多种能源协调控制等技术, 实现氢与电的双向灵活转换。这促进了氢能的绿色供应和去碳化应用, 以及可再生能源的高渗透率整合[2]。这样, 电氢一体化能源系统既能促进从电到氢的单向转换, 也能促进从氢到电的双向转换。

电力和氢气之间的转换。

另一方面, 传统运输车辆严重依赖化石燃料, 是能源行业碳排放的主要来源。近年来, 由于储能和氢能技术的快速发展, 以电池为动力的电动汽车(EV)和以氢燃料电池为燃料的氢能汽车(HV)已成为促进交通领域能源转型的重要工具[3]。随着交通电子化程度的不断提高, 能源系统与交通系统之间的相互影响变得越来越重要。具体而言, 车辆对电网(V2G)技术的发展进一步促进了新能源汽车与能源网之间能源和信息交换双向互动系统的形成[4]。新能源汽车作为可控负载或移动储能装置, 可利用其灵活性为能源系统的高效、经济运行提供重要支持。

整合各种因素, 包括可再生能源

\* 通讯作者。上海电力学院能源与机械工程学院, 200090, 中国上海。

\*\* 通讯作者。上海电力学院能源与机械工程学院，200090，中国上海。

电子邮件地址: [tjrhb@shiep.edu.cn](mailto:tjrhb@shiep.edu.cn) (H. Ren), [wuqiongrrff@shiep.edu.cn](mailto:wuqiongrrff@shiep.edu.cn) (Q. Wu)。

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120488>

2023 年 10 月 25 日收到; 2024 年 3 月 2 日收到修订稿; 2024 年 4 月 9 日接受

2024 年 4 月 15 日可在线查阅

0960-1481/© 2024 爱思唯尔有限公司。保留所有权利。

在此基础上,通过对多种能源和技术的深度集成,包括可再生能源、电解槽、燃气轮机、电动汽车和燃料电池汽车,提高了电-氢一体化能源系统的灵活性。然而,多种能源和技术的深度集成,再加上可再生能源的可变性以及电动汽车和高压车辆行驶的不确定性,大大增加了系统运行和管理的复杂性。近年来,关于源-负载不确定性[5]、车-网互动[6]和电-氢一体化[7]的研究报道很多。关于综合能源系统中的不确定性优化,主要方法有随机优化、稳健优化和区间优化 [8]。随机优化使用随机情景来描述不确定性 [9]。稳健优化的目的是在不确定参数的变化范围内找到最坏情况下的最优解[10]。区间优化可以捕捉到不确定参数对系统的影响,而不需要为这些参数建立精确的概率分布模型,从而避免了因专注于最坏情况而导致的过于保守的结果[11]。

目前,有关车网互动的研究大多集中在电动汽车与电网之间的互动上,包括车网互动战略和电动汽车充放电预测。Sovacool 等人[12] 对与 V2G 技术相关的不同利益相关者和商业模式进行了综合评估。结果表明,V2G 技术可以提高电网效率和盈利能力,并减少车主的支出。Sharma 等人[13] 将基于价格的需求响应与 V2G 相结合,降低了用户的充电成本,提高了电动汽车负载的灵活性。Zheng 等人[14]探讨了电动汽车通过 V2G 技术在各种综合能源系统中实现节能的重要作用。然而,由于制氢成本相对较高,阻碍了氢能源技术的推广。Aguilar 等人[15]研究了利用电动汽车和氢能源技术实现交通部门去碳化的潜力。Qian 等人[16]通过将蒙特卡罗模拟与遗传算法相结合,讨论了燃料电池 V2G 的经济效益。He 等人[17]介绍了城市间能源迁移框架,以促进通过高压电多向能源共享和交易。

要促进氢能和可再生能源的应用,除了持续的技术进步,政策和碳交易等市场机制也将发挥关键作用[18,19]。Yan 等人[20]以电力综合能源系统为重点,引入了两级碳交易方案,考虑了用户的能源消费模式和低碳需求响应。然而,碳交易激励机制对包含多种氢使用模式的电氢综合能源系统的影响尚未得到深入研究。

在本研究中,为电动汽车和氢能汽车协调运行的电氢一体化能源系统开发了一个优化模型,同时考虑了 V2G 响应和汽车交易。通过求解该优化模型,确定了系统运行的最优策略。本研究的主要贡献如下。

- (1) 建议建立一个电氢一体化能源系统,以各种方式利用氢。这包括将氢作为一种存储介质,以促进能源的时空迁移;将氢与燃气轮机燃料混合,以实现低碳排放;以及将氢作为高压车辆的动力源,以减少交通部门的碳排放。
- (2) 探讨了通过使用新能源汽车和 V2G 技术实现脱碳的潜力。利用 V2G 技术建立了电动汽车和高压车辆的充放电模式,

实现了这些车辆与电网之间的能量交换。这种方法有助于平缓高峰需求和填补能源缺口,从而减少对公用电网的依赖。

(3) 氢能和新能源汽车可以在碳交易框架内有效利用绿色低碳技术的优势。通过案例研究和情景分析,证明了这种方法的经济效益。

因此,本研究报告分为七个主要部分。第 2 节介绍电-氢综合能源系统的结构。第 3 节为系统中的每个组件建模。第 4 节介绍优化调度模型。第 5 节提供了数值研究。第 6 节进行详细讨论,第 7 节得出结论。

## 2. 电-氢综合能源系统的结构

在本研究提出的电氢一体化能源系统中,外部能源输入包括电网电力、天然气和氢气。内部能源生成装置主要包括光伏板、风力涡轮机、氢气混合燃气轮机、电锅炉和余热回收锅炉。能量转换和储存组件包括电解器、储氢设施、电动汽车和高压电。光伏电池板和风力涡轮机的输出主要取决于当地的太阳辐照度和风力条件,光伏电池板的安装面积受到限制。燃气轮机掺入特定比例的氢气,在实现减碳的同时还能进行热电联产。余热回收锅炉利用燃气轮机产生的多余热量,电锅炉将电能转化为热能,共同满足热能需求。电解槽和储氢系统促进了电能和氢能之间的双向转换,同时还支持调峰和填谷操作。电动汽车和氢能源可实现能源时间转换,电动汽车在低电价时段或非高峰时段充电,在高峰时段放电。电解槽产生的氢气同时供应给燃气轮机和高压发电机,多余的氢气储存在储氢罐中。高压发电机在非高峰时段使用储存的氢气,并在高峰时段放电。此外,该系统还能灵活地从外部市场获取额外的电力、氢气和天然气,以应对可能出现的能源短缺。系统拓扑结构如图 1 所示。

采用 V2G 技术后,车辆可以有效地在高峰期响应负载需求,在非高峰期储存能量。这种创新为车辆提供了能源供应和消费的双重功能,实现了双向能源交换,使电网和车主都能从中受益。因此,这有助于稳定电网负荷和推进可再生能源的整合。通过对车辆的协调调度和管理,系统的储能能力得到了扩展,通过各种储能解决方案增强了系统的稳定性。

## 3. 电-氢综合能源系统的综合建模

### 3.1. 主要能源供应设备建模

电-氢一体化能源系统的关键部件,如气氢混合和电动汽车-混合动力汽车(EV-HV)耦合的精确建模,对于优化系统运行至关重要。下一节将全面介绍关键设备的数学模型,包括风能和太阳能发电、电解槽、储氢设施、氢气混合燃气轮机和电动汽车-混合动力汽车系统。

#### (1) 风能和光伏发电装置

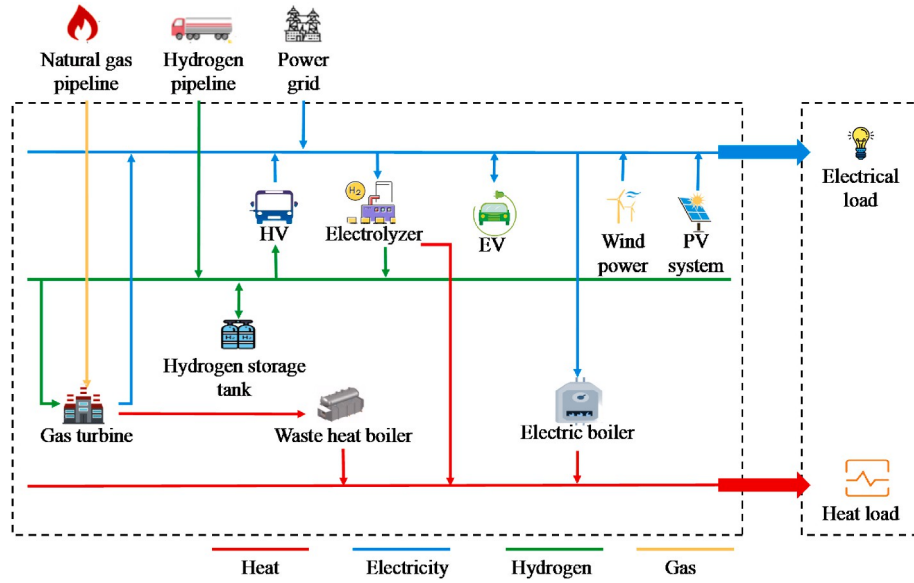


图 1. 电-氢综合能源系统拓扑图。

光伏装置的输出功率由太阳辐照度、光伏板面积和能量转换效率决定，如公式 (1) 所示[21]。

$$P_t^{PV} = Ra_t \cdot A^{PV} \cdot \eta^{PV} \quad (1)$$

其中  $P_t^{PV}$  为光伏输出。 $Ra_t$  是太阳辐照度。 $A^{PV}$  是光伏电池板的面积。

$\eta^{PV}$  是转换效率。

风力发电机的输出功率由设备特性和实际风速决定。如果实际风速超过切入风速，则输出功率降为 0。当风速在额定风速到切入风速之间时，风机以额定功率发电。当风速介于切入风速和额定风速之间时，输出功率为 0。与风速大致呈线性关系。实时模型

具体描述如下 [22]：

$$P_t^{WT} = \begin{cases} 0 & v_t \leq v^s \\ \frac{P_t^{WTf}}{v^f - v^s} (v_t - v^s) & v^s < v_t < v^f \\ P_t^{WTf} & v_t \geq v^f \end{cases} \quad (2)$$

其中， $P_t^{WT}$  为风力涡轮机的输出功率。 $C^p$  是风能利用效率。 $\rho$  是空气密度。 $A$  是叶片扫掠面积的投影。

$v_t$  为实际风速。

$v^s$  是切入风速。 $v^f$  是额定风速。 $v^f$  是切出风速。 $P_t^{WTf}$  为额定功率。

## (2) 氢能相关设备

水电解制氢过程需要向电解槽提供电能，从而产生氢气和氧气。产生的氢气随后被压缩并储存在储氢罐中。利用电解槽运行时产生的热量可以提高整体效率。电解槽的制氢和发热模型如下 [23]：

是电解槽产生的氢气流。 $Q^{EL}$  是电解槽运行时产生的热量。 $\eta^{EL,H}$  是电解槽的热效率。

## (3) 混氢燃气轮机

燃气轮机中典型的氢气混合比例范围为 10% 至 20%。燃烧器的设计保证了燃烧的安全性和稳定性[24]。通过燃烧混有氢气的天然气，燃气轮机实现了热电联产，有效减少了碳排放。相应的模型如下[25]：

$$P_t^{CHPNG} = Q + Q_t^{H_2} \cdot \eta^{CHP,E} \quad (5)$$

$$Q_t^{CHPNG} = Q + Q_t^{H_2} \cdot \eta^{CHP,H} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\text{热电}} = \frac{Q_t^{H_2}}{lhvng^{H_2} + Q_t^{NG}} \quad (7)$$

其中， $P_t^{CHP}$  是燃气轮机的电功率。 $Q^{CHP}$  是制热量

燃气轮机的功率。 $Q^{NG}$  是燃气轮机的天然气消耗量。 $Q^{H_2}$  是燃气轮机的氢气消耗量。 $lhvng^{NG}$  是天然气的摩尔热值。 $lhvng^{H_2}$  是氢气的摩尔热值。 $\eta^{CHP,E}$  是燃气轮机的电效率。 $\eta^{CHP,H}$  是热效率。 $e^{CHP}$  是燃气轮机的氢气混合比。

涡轮机。

## (4) 储氢罐

储氢罐可为燃气轮机 and 高压系统提供特定数量的氢气。储氢罐的模型如下[26]：

$$R_{CH_2H_2}^{H_2} = \frac{E_{CH_2H_2}^{H_2} + E_{CH_2H_2}^{H_2}}{V_t} = P_t \cdot \eta$$

$$Q_t^{EL} = P_t^{EL} \cdot \eta^{EL,H} \tag{4}$$

$P^{EL}$  是电解槽的输入功率。 $\eta^{EL}$  是电解槽的效率。 $v$  是单位氢气的耗电量。 $V^{EL}$  是

$$(8) \quad \eta_t^{DIS,H_2} = \frac{E_{CH_2H_2}^{H_2} - E_{CH_2H_2}^{H_2,t-1}}{E_{CH_2H_2}^{H_2,t-1}}$$

其中  $E^{H_2}$  是储氢罐的容量。 $P^{CH,H_2}$ ,  $P^{DIS,H_2}$  是储氢罐储存和释放的氢气、 $\eta^{CH,H_2}$  是储氢效率， $\eta^{DIS,H_2}$  是脱氢效率。

### 3.2. 电动汽车和高压电的建模

目前, 电动汽车的普及率很高, 可分为以下几类根据旅行目的和模式, 分为不同类型, 例如私人旅行汽车、公共汽车、政府车辆和出租车。随着电动汽车的日益普及, 将其纳入电网的方式也在逐步改变。

无序充电是指电动汽车车主根据自己的出行习惯随意充电的行为。有序充电是指电动汽车车主根据自己的出行习惯随意充电。在分时用电的指导下, 避开负荷高峰期的行为

定价。V2G 技术可使车辆在非高峰时段充电, 并在满足自身电力需求后, 协调通过集中控制与电网连接。这种方法允许在用电需求较低时, 可进行战略性充电, 而在用电高峰期, 则可利用汽车中储存的能量为电网供电。与已被广泛采用的电动汽车不同, 氢动力汽车仍处于试验阶段, 这主要是由于其成本较高。不过, 工业园区已经引进了氢动力重型卡车, 其显著特点是续航里程长、加油速度快。鉴于工业园区通常同时拥有电动汽车和重型卡车, V2G 技术提供了一个将这些车辆用作动态储能解决方案的机会, 在车辆不使用时与电网进行能量交换。

#### 3.2.1. 电动汽车和混合动力汽车的行驶特点

新能源汽车的出行模式具有高度随机性, 充电负荷受用户出行习惯、道路拥堵和出行目的等多种因素影响。这就造成了不同地理位置和时间尺度上的广泛不确定性。统计数据表明, 私人电动汽车完成一天中最后一次旅行的时刻 (标志着充电期的开始) 通常呈正态分布[27]。

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}} & (\mu_s - 12) \leq x \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_s \times 2\pi} e^{-\frac{(x-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}} & 0 \leq x \leq (\mu_s - 12) \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\mu_s$  是数学期望,  $\sigma_s$  是方差。

此外, 电动汽车的行驶里程可近似看作对数正态分布, 其概率密度函数如式 (10) 所示[28]。

$$f_d(x) = \frac{1}{x\sigma_d \cdot 2\pi} \exp \left[ -\frac{\ln x - \frac{\mu_d}{2}}{2\sigma_d^2} \right] \quad (10)$$

其中,  $\mu_d$  是数学期望,  $\sigma_d$  是方差。

同样, 氢燃料电池车的行驶里程和加氢开始时间的概率分布与电动汽车的行驶模式非常相似, 在此不再赘述。图 2 显示了根据每辆车的行驶特征, 通过蒙特卡罗模拟生成电动汽车和氢燃料电池汽车充电负荷的流程图。其中, "n" 表示车辆总数, "i" 表示每辆车的序列号。

图 3 显示了电动汽车和混合动力汽车充电时间和行驶里程的概率分布。图 3(a) 表示电动汽车充电和混合动力汽车加氢的开始时间分布。曲线的斜率表示概率, 电动汽车在上午 10 点左右出现一个明显的峰值, 表明此时开始充电的可能性较大。相反, 氢燃料电池车在下午 6 点左右开始加氢的概率更大。图 3 (a) 中的两条曲线都基本趋近于总概率 1, 证实所有车辆都在 24 小时内开始充电或加氢。图 3(b) 表示车辆行驶里程小于最大容量的概率。累计概率等于 1, 确保车辆的行驶里程不会超过规定的最大限度。

车辆的充电时间和数量主要取决于其行驶里程和当前的储能水平。由于氢燃料电池车的加氢时间相对较短, 因此这方面的问题并不突出。

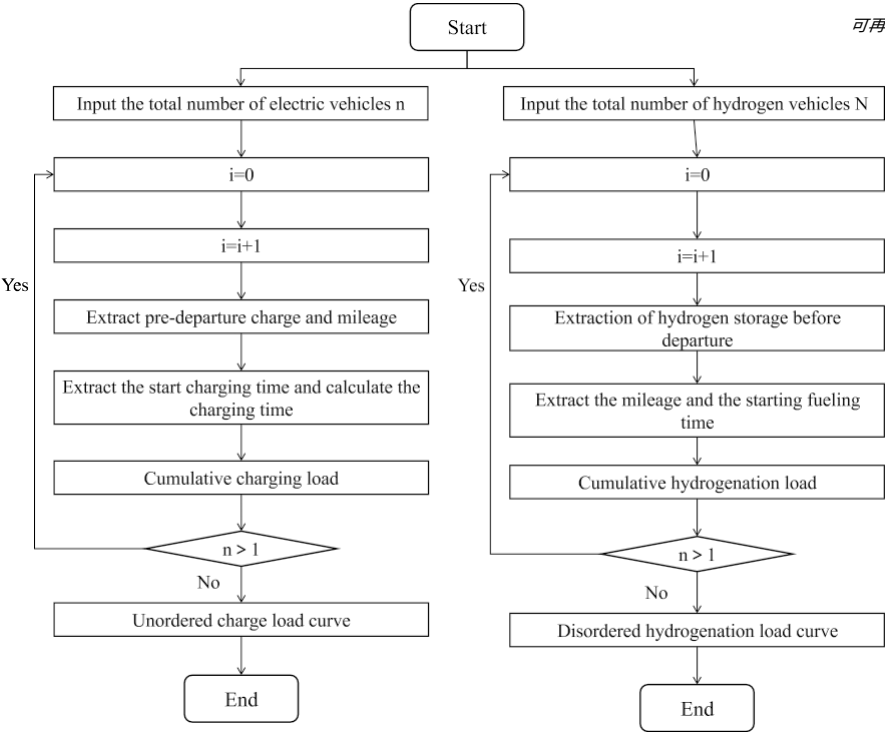


图 2.电动汽车和高压电无序充电流程图。



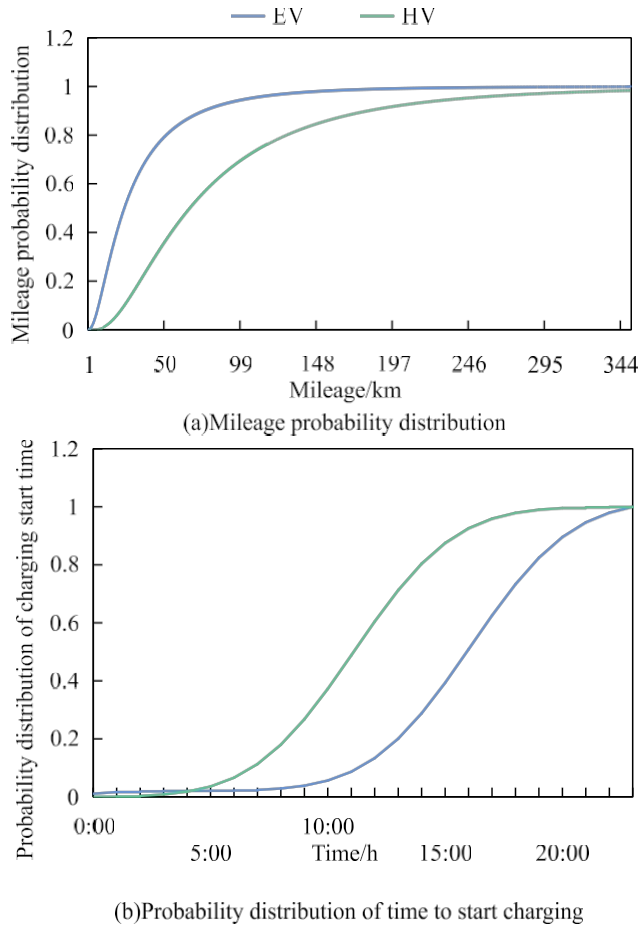


图 3. 无序状态下起始时间和行驶范围的概率分布

为电动汽车和高压电汽车  
充电。

本分析中考虑了这些因素。车主决定启动  
在行程开始或结束时充电，这基于两个关键因素：一旦储能达到  
以下预期水平，充电就会停止  
如果储能低于用户的预期水平或不足以满足下一次旅行的需要，  
则开始充电。

本研究采用蒙特卡罗算法来模拟车辆的随机充电行为。模拟时  
间跨度为 24 小时，以小时为间隔，目的是生成详细的每小时充电  
需求曲线。

### 3.2.2. V2G 模式下的车辆充放电模型

#### (1) 电动汽车集群的充放电模式

电动汽车集群的充放电模型如下[29]:

$$P_{NEV,CH}^t = \sum_{i=1}^{N_{NEV}} P_{EV,CH}^t W_{EV,CH}^t \quad (11)$$

表示连接电网进行充电或放电，0 表示不连接电网。

电动汽车电池的循环寿命受多种因素影响，如放电深度（DoD）、  
充放电效率、环境温度等。因此，更换电动汽车电池的成本也在  
考虑之列。在这些因素中，电池的放电深度对电池衰减有显著的  
可控影响。本研究主要关注放电深度对电池循环寿命的影响。公  
式 (13) 表示电池循环寿命以及与电池老化相关的成本。

$$\begin{cases} L^D = \frac{C_{max}}{aD_i} \\ C_{ev/ET}^D = C_{bat} L^D \end{cases} \quad (13)$$

其中， $L^D$  为电池循环寿命， $D_i$  为电池放电深度。 $a$  和  $b$  为曲线拟  
合参数，分别假定为 694 和 0.795 [30]。 $L^{ET}$  是电池的总放电量。  
 $C_{max}$  是电池容量。 $C_{ev}$  是汽车的电池损耗成本。

#### (2) 高压集群的充放电模式

目前，氢动力卡车的普及程度相对较低。本研究中的氢动力重  
型卡车主要由燃料电池堆、储氢罐、直流/直流转换器、电动马达  
和动力控制单元组成。为了简化模拟场景，我们做出了以下假设  
：氢变速器既是电氢转换装置，也是储能装置，将储氢罐和燃料  
电池都纳入其运行中。HV 的氢消耗量与车辆行驶距离直接相关  
。氢变速器从储氢罐中排出氢气，然后在燃料电池中用来发电，  
为车辆提供动力。氢动力车的运行模式描述如下：

$$E_{jt}^{HV,H2} = E_{jt}^{HV,H2} + P_{jt}^{HV,CH} \cdot \eta_{HV,CH} - \frac{P_{jt}^{HV,DIS}}{\eta_{HV,DIS}} \quad (14)$$

$$P_{jt}^{SHV} = P_{jt}^{HV,DIS} \cdot \eta_{hvng}^{H2} \cdot \eta_{jt}^{HV} \quad (15)$$

$$P = \sum_{j=1}^{N_{HV}} P_{jt}^{SHV} \quad (16)$$

式中： $E_{jt}^{HV,H2}$  表示第  $j$  台氢气发生器在  $t$  时刻的储氢量； $P_{jt}^{HV,CH}$  表  
示第  $j$  台氢气发生器的储氢量，即水力发电功率； $P_{jt}^{HV,DIS}$  表示第  $j$   
台氢气发生器的氢气消耗量； $\eta_{HV,CH}$  和  $\eta_{HV,DIS}$  表示氢气充放  
电效率； $P$  表示第  $j$  台氢气发生器的储氢量，即水力发电  
功率； $P_{jt}^{SHV}$  表示第  $j$  台氢气发生器的氢气消耗量； $\eta$  和  $\eta$  表示氢  
气充放电效率。 $P_{jt}^{SHV}$   
代表第  $j$  个 HV 的放电功率， $\eta_{HV}$  是 HV 的发电效率， $N_{HV}$  是 HV  
的数量， $P^{SHV}$  是集群中放电功率的总和。

### 3.3. 基于康托洛维奇距离的情景还原

风力发电和光伏发电的输出具有很大的随机性和波动性。风力  
发电用一个

W  
e  
i  
b  
u  
l  
l

分  
布  
可  
捕  
捉  
大  
规  
模  
风  
力  
发  
电  
输  
出  
的  
累  
积  
概  
率  
特  
征  
。  
光  
伏  
系  
统  
的  
输  
出  
为

$$P_t^{NEV,DIS} = \sum_{i=1} P_{i,t}^{EV,DIS} W_{i,t}^{EV,DIS} \tag{12}$$

其中， $P_t^{NEV,CH}$  是电动汽车集群的充电功率。 $P_t^{NEV,DIS}$  是电动汽车组的放电功率。 $P_{i,t}^{EV,CH}$  是第  $i$  辆车的充电功率、 $P_{i,t}^{EV,DIS}$  是车辆  $i$  的放电功率， $N^{EV}$  是电动汽车数量。 $W_{i,t}^{EV,CH}$  和  $W_{i,t}^{EV,DIS}$  表示电动汽车的状态值，数值 1 表示

采用贝塔分布建模，而负荷预测则采用正态分布模型。  
为了减少风能和太阳能输出的不确定性，一个多利用情景分析方法，将不确定因素转换为确定性情景，并检查与风能、太阳能和负荷相关的不确定性。最初，大量的风能、太阳能和负荷通过以下方法生成符合分配限制的情景拉丁超立方采样（LHS）技术[31]。随后，一个

通过利用 Kantorovich 距离来减少场景数量[32]。方法和综合程序概述如下。

以风力发电为例，给定风力发电输出功率的分布函数，确定采样规模为  $N$ ，长度为

为  $1/N$ 。得到每个区间采样点的累积概率，并将其代入分布式中。

通过上述方法进行  $N$  次采样，可生成  $N$  个采样值。通过上述方法采样  $N$  次，可生成  $N$  个采样值。重复上述步骤生成  $m \times N$  矩阵，随机排列生成  $N$  个风力发电场景。

光伏发电和负荷情景的生成过程与风力发电的生成过程相同。这种方法可确保对每个边际分布进行全面分层，保证全面覆盖所有变量的范围。

使用基于康托洛维奇距离的后向缩减法缩减生成的情景。LHS 采样生成的源负荷预测情景数为  $N$ ，康托洛维奇距离缩减后的预测情景数为  $n^*$ 。初始  $n$  个情景的  $n$  值，初始缩减后的情景数为  $n$ 。

\*计算每个场景之间的康托洛维奇距离，并计算与场景  $j$  距离最短的场景  $i$  的康托洛维奇距离概率乘积。

更新方案  $i$  的概率，删除方案  $a$ ，更新方案数  $n^* = n^* - 1$ 。

重复上述步骤，直到最终方案为  $n^*$ 。

### 3.4. 碳交易模式

碳交易是通过建立合法的碳排放权，将碳排放转化为可交易商品的机制

可以买卖，从而形成一种控制机制

减少碳排放。碳排放的初始分布

在分配配额时，采用了现有文献中广泛使用的非补偿性分配方法。这种非补偿性分配是通过基线法确定的。接受碳排放权分配的

实体包括燃气轮机和部分电力设备。

如公式 (17) 所示，从电网购买的三电平。

$$P_e^t = \lambda_g \cdot \sum_{t=1}^T P_g^t + \lambda_c \cdot \sum_{t=1}^T P_{c, \text{热电厂}}^t + Q^{CHP} \quad (17)$$

其中， $P^{Grid}$  为从电网购买的电力。 $\lambda_c$  为碳排放量。

$\lambda_g$  是燃气的碳排放配额。

涡轮机组[33]。

式 (18)-(20) 是实际碳排放的模型。

$$E_t^{IES,a} = E_t^{Grid,a} + E_t^{CHP,a} \quad (18)$$

$$E_t^{Grid,a} = \sum_{t=1}^T \left( a_{1+1} \cdot P_{Grid,a}^t + b_{1+1} \cdot P_{Grid,a}^t \right) \quad (19)$$

交易。采用多情景方法模拟风能和太阳能输出以及负荷需求的不确定性。考虑到 V2G 技术、电动汽车和高压补偿激励措施以及电池衰减等因素，将各组成部分的运营成本和碳交易机制纳入分析。目标函数旨在使系统的总运营成本最小化，从而建立一个低碳经济优化模型。

### 4.1. 目标函数

考虑到调度周期为一天（分为 24 个时间间隔），运行调度模型旨在最大限度地降低系统的总运行成本。运营成本包括能源采购成本、维护成本、与碳交易相关的成本、电池退化导致的成本以及参与 V2G 的奖励。目标函数  $F$  的定义如式 (21) 所示。

$$\min F = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad (21)$$

$$C_1 = \sum_{t=1}^T c_{\text{网络}}^t \cdot P_t^{\text{网络}} + c^{NG} \cdot V^{NG} + c^{H_2} \cdot V^{H_2} \quad (22)$$

$$C_2 = \sum_{t=1}^T c^{m,OM} P^m \quad (23)$$

$$C_3 = cp \cdot E^{IES,a} - E^{IES} \quad (24)$$

$$C_4 = \sum_{t=1}^T C^{ev} \quad (25)$$

$$C_5 = \sum_{t=1}^T c^{V2G} \cdot P^{ev,dis} + P^{hw,dis} \quad (26)$$

其中  $C_1$  为能源购买成本，包括电力、天然气和氢气的成本。 $C_2$  是设备的运行和维护 (O&M) 成本， $C_3$  是碳交易成本， $C_4$  是电池损耗成本， $C_5$  是汽车用户参与 V2G 的激励费用， $C^{Grid}$  是

$P^{Grid}$  为从电网购买的电量， $c^{NG}$  为自然电量。

天然气价格， $V^{NG}$  是购买的天然气量， $c^{H_2}$  是购买的天然气量。

氢气价格， $V^{H_2}$  是氢气的购买量， $c^{m,OM}$  是  $m$  级设备的运行成本， $P^m$  是氢气的实际产量。

$cp$  是碳税价格， $E^{IES}$  是一个系统

一个周期内的碳配额， $E^{IES}$  是系统的实际碳排放量、 $E^{vac}$

$c^{V2G}$  是单位 V2G 激励费用， $P^{EV,DIS}$  和  $P^{HV,DIS}$  是电动汽车和高压电动汽车的放电容量。

### 4.2. 主要制约因素

本研究提出的系统调度模型的约束条件主要包括以下几个部分。



其中,  $P_{HV,H2}^{PV}$  为光伏发电输出功率,  $P_{HV,H2}^{WT}$  为风力发电机输出功率,  $P_{HV,H2}^{CHP}$  为高压发电机充电功率。 $P_{HV,H2}^{EV}$  是高压电源的充电功率。 $E^{EV}$  和  $E^{HV,H2}$  分别为光伏发电后的储能。最后,  $P_{Grid}$  为从电网购买的电力、 $P_{Grid}$  是电动汽车和高压电的 V2G 流程和  $E^{HV,H2}$  是预期的

$P_{DIS}^{EV}$  和  $P_{DIS}^{HV,H2}$  是电动汽车和高压电汽车的放电能力,  $P_{EL}$  是电动汽车和高压电汽车的放电能力。 $P_{Load}$  是电力负荷、 $P_{EB}$  是电锅炉的耗电量,  $P_{EV,CH}$  是充电量。 $t$

电动汽车的容量,  $Q_{EL}$  是电动汽车运行时产生的热量。 $Q_{WHB}$  是废热回收锅炉产生的热量,  $Q_{EB}$  是电锅炉产生的热量,  $Q_{Load}$  是热负荷。 $V_{EL}$  是

电解槽的制氢能力,  $P_{DIS,H2}$  是储氢罐的放电速度,  $V_{H2}$  是从  $V_{CHP}$  是燃气轮机的含氢量,  $P_{CH,H2}$  是储存量。

储氢罐的容量,  $V_{HV}$  是氢氧化钠的加氢量。

## (2) 主要设备的限制

为了保证运行过程的安全, 每个设备的运行功率必须限制在规定的范围内:

$$P_m \leq P_t \leq P_m^{\max} \quad (30)$$

其中  $m$  表示设备类型。  $P_m^{\min}$  和  $P_m^{\max}$  是最小和每个设备的最大运行功率。

## (3) 储能装置的制约因素

为确保安全运行, 对储氢罐的容量、存储和排放功率都有限制。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{CH,H2}^t \leq P_{CH,H2}^{\max} \cdot k_{CH,H2}^t \\ 0 \leq P_{DIS,H2}^t \leq P_{DIS,H2}^{\max} \cdot k_{DIS,H2}^t \end{cases} \quad (31)$$

$$0 \leq k_{DIS,H2}^t + k_{CH,H2}^t \leq 1 \quad (32)$$

$$SOH^{\min} \leq E_t^{H2} \leq SOH^{\max} \quad (33)$$

其中  $P_{CH,H2}^{\max}$  是储氢罐的最大储存能力,  $P_{DIS,H2}^{\max}$  是储氢罐的最大释放能力。 $k_{CH,H2}^t$  和  $k_{DIS,H2}^t$  是储氢的充填和放电状态用于限制同时充气 and 卸气。 $SOH^{\max}$  是储氢罐的上限,  $SOH^{\min}$  是储氢罐的下限。

储氢罐,  $E^{H2}$  是氢气储存的额定容量  
吨

## (4) 电动汽车和高压电的制约因素

为确保车辆安全并保持最小储能, 对电动汽车和高压车辆的充

能量。 $E^{EV}$  是 HV 在  $t$  时刻的储氢能力。

高压电源的额定存储容量。 $SOH^{HV}$  和  $SOH^{HV}$  是上下  
氢储存的限制。

单个电动汽车的充放电功率不得超过  
超过其额定功率时, 单个高压电源的放电功率必须

在不超过其额定放电功率的情况下, 氢气储存器的氢气储存能力为  
高压电源必须保持在其额定电压的上限和下限范围内。

当车辆结束 V2G 活动时, 电动汽车的容量不应低于预期水平, 而  
HV 的氢气储存量应低于预期水平。  
应相应保持容量。

## 5. 数值分析

本研究选择了一个风能和太阳能资源丰富的工业园区进行数值  
分析。其中包括 P2G、EV 和 HV 等灵活的可调度资源。为了实现低  
碳、经济、可持续的

要使整个能源系统高效运行, 就必须明智地操作所有设备。

### 5.1. 参数设置

为了验证所提出的优化调度模型的合理性和有效性, 假设了相  
关的基本参数。

(1) 工业园区内的电动汽车数量为 100 辆。电动汽车的充放电效率为  
95%。电动汽车的电池容量为 64 千瓦时。 $\mu$  为 3.2,  $\sigma$  为 0.88  
,  $\mu$  为 17.6,  $\sigma$  为 3.4。

(2) 园区内共有 3 辆氢动力重型卡车, 每辆卡车都配备了燃料  
电池, 最大功率可达 2.5 千瓦。  
功率输出为 240 千瓦, 氢气储存罐的  
最大容量为 116 千克 [34,35]。

(3) 园区内有一个综合能源站, 负责电动汽车的能源供应。  
充放电、高压加氢和反向充放电。  
放电操作。电动汽车充放电功率设定为 5 千瓦, 高压加氢  
速度为 15 千克/分钟, 最大放电功率为 240 千瓦。  
(4) 分时电价分为高峰电价、非高峰电价和低谷电价。

峰值和谷值时段。V2G 活动导致电池反复充电和放电, 这  
在很大程度上影响了电池的使用寿命。

电池降解会影响电池的使用寿命; 因此, 电池降解的成本  
也包括在内。

(5) 假定电动汽车和高压电汽车都愿意参与  
放电功率、储能容量和储氢容量施加了限制。此外, 还为储氢罐  
设定了上限和下限。



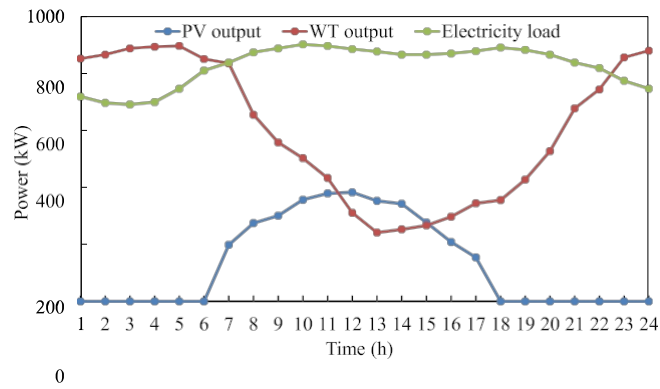


图 4.原始数据采样。

表 1

获得五种不同方案的概率。

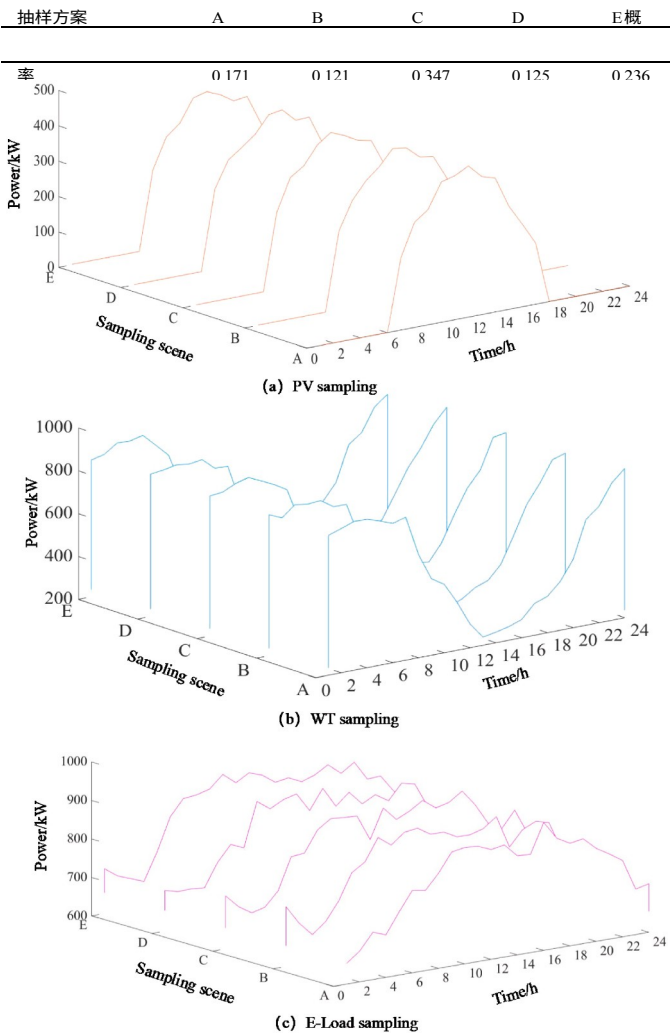


表 2

主要设备的技术和经济参数。

设备	运行和维护成本（元/千瓦·时）	效率	参考资料
混氢燃气轮机	0.01	0.3/0.45	[36]
PV	0.0296	-	[37]
WT	0.025	-	[38]
WHB	0.05	0.85	[22]
EB	0.05	0.95	[39]
HST	0.035	0.95	[40]
EL	0.0155	0.65	[23]

注：1 美元=7.2 元人民币。

表 3

TOU 费率。

时间	电价（元/千瓦时）
0:00~6:00, 22:00~24:00	0.48
6:00~8:00, 11:00~18:00, 21:00~22:00	0.78
8:00~11:00, 18:00~21:00	1.32

可再生能源和负荷需求。因此，假设有三种情况。

- 情景 1：车辆随机充电，不考虑碳交易。
- 情景 2：车辆在不考虑碳交易的情况下参与 V2G 调度。
- 情景 3：车辆参与 V2G 调度，考虑到车骨交易。

此外，还引入了能源自平衡率作为评价指标，以说明系统在电力供应方面的自给自足能力，如式 (38) 所示。

$$R_{self} = \frac{E_{self}}{P_{load}} \cdot 100\% = \frac{E_{self}}{P_{load}} \cdot 100\% \quad (38)$$

其中  $P_{grid}$  为从电网购买的电力  $P_{load}$  为电力负荷。

6. 结果和讨论

6.1. 不同方案下的模拟结果

6.1.1. 各种方案的经济和环境绩效

表 4 显示了三种方案的优化调度结果。与方案 1 相比，方案 2 的总体成本降低了 7.84%，天然气采购成本增加了 7.73%，电力采购成本降低，碳排放量增加。出现这种转变的原因是，在方案 2 中，电动汽车和高压车辆的运行模式从随机充电过渡到 V2G 模式，电动汽车和高压车辆参与反向放电活动。在整个调度间隔内，电动汽车和高压车辆会在电价、系统平衡和激励措施的指导下调整其充电和放电的时间和容量。因此，在情景 2 中，车辆的充电和放电活动比情景 1 中更加复杂，导致电动汽车的充电需求和高压车辆的加氢需求增加。

图 5.不确定情景的采样结果。

在一天内以 1 小时的数据间隔进行采样。利用拉丁超立方采样（LHS）方法和还原技术来解决以下问题  
使用 MATLAB 仿真平台进行不确定性分析。  
本研究旨在探讨车辆调度策略的影响  
和碳交易对不确定性条件下优化系统调度的影响

方案 1~3 的优化调度结果。

可再生能源 227 (2024) 120488

方案	总成本 (元)	购买天然气 (元)	购电成本 (元)	碳交易成本 (元)	碳排放 (公斤)
1	7208.45	4762.96	2097.1	-	3720.94
2	6643.64	5161.73	970.99	-	4263.83
3	6367.31	5163.80	958.43	-270.88	4246.68



6.1.2. 不同情况下的设备产出

图 6 展示了三种情况下各种设备的功率输出。从图 6 (a) 和 (b) 中可以看出, 电动汽车和重型车辆的充电和放电模式在从随机切换到 V2G 运行时发生了变化。这一转变影响了电解槽的输出, 由于高压车辆更多地参与 V2G, 电解槽的输出增加, 导致对氢化的需求增加。此外, 非高峰期购电量明显增加, 高峰期购电量下降。这一变化归因于电动汽车充电时间的调整和电解槽输出的增加。在高峰期, 电动汽车和高压电参与反向放电, 导致购电量减少。因此, 方案 2 中的购电成本低于方案 1。燃气轮机输出功率的增加和高压发电机对热量的需求是导致天然气采购成本增加的主要原因。在情景 2 中, 购电时间的改变以及电动汽车和高压发电机充放电活动的加强提高了系统的电力需求。这导致燃气轮机输出功率和碳排放量增加。

方案 3 引入了碳交易机制。根据表 4 显示, 与方案 2 相比, 方案 3 的碳排放量和总成本更低。这是因为从电网购买的每单位电力的碳排放量高于每单位天然气的碳排放量。在情景 3 中, 由于采用了碳交易机制, 系统更倾向于天然气和替代供电方式, 而不是从电网购电。由于碳交易对购电的限制, 系统的调度策略要求增加燃气轮机的输出以及电动汽车和高压车辆的逆向放电。此外, 仅靠电解槽无法完全满足更高的氢化需求, 必须从外部采购氢气, 从而导致情景 3 中的天然气采购成本上升。

从图 6(b)和(c)可以看出, 由于碳交易的限制, 在 2:00 至 3:00 期间, 从电网购买的电量减少。与此同时, 燃气轮机的输出功率也在这段时间内略有增加。出现这种调整的原因是, 此时电解槽的输出量减少, 因此必须增加燃气轮机的输出量, 以抵消从电网购买电力的减少, 这也是碳交易限制所决定的。因此, 在情景 3 中, 电动汽车的充电量与情景 2 相比有所下降, 而放电量则略有增加。高压车辆的放电量增加, 以弥补从电网采购电力的减少。

从情景 2 和情景 3 中的碳排放和碳交易成本分析可以看出, 引入碳交易机制会减少碳排放。这表明碳交易机制有效地抑制了输出

对碳排放强度较高的机组影响更大。同时, 碳交易机制的实施加强了电动汽车和高压车辆的逆向放电活动, 从而降低了对外部电网的依赖。

6.1.3. 电池退化和 V2G 激励的结果

表 5 显示了三种情况下与电池退化和 V2G 激励补偿相关的成本以及系统平衡率。在情景 1 中, 车辆充电无序, 电动汽车和高压电之间的能量流单向, 没有 V2G 参与, 因此 V2G 活动造成的电池退化相关成本不适用, 也没有 V2G 参与补偿。在方案 3 中, 与方案 2 相比, 电池退化成本较低, 而 V2G 补偿成本则有所增加。这是因为在情景 2 中, 电动汽车的电力部分来自电网。加入碳交易后, 从电网采购的电量减少。由于碳交易的限制, 电动汽车需要在参与 V2G 活动后达到用户预期的能量水平。这就需要在 V2G 运行期间降低电动汽车的功率输出比率, 并增加高压放电以抵消电动汽车放电的减少。在情景 2 中, 电动汽车和高压车辆的频繁充放电增加了对电力和氢气的额外需求。高压车辆氢化需求的增加提高了电解槽的输出, 导致从电网采购的电力和燃气轮机的输出增加, 进而降低了系统的平衡率。在情景 3 中实施碳交易后, 碳排放机组的输出量将受到限制。燃气轮机的碳排放系数低于从电网获取的电力。电动汽车和高压电覆盖了不足的电力负荷, 减少了对外部购电的依赖。因此, 燃气轮机的输出功率增加, 电动汽车和高压发电机的放电量增加, 从而提高了系统平衡率。

6.1.4. 电动汽车和高压电的最佳运营战略

图 7 展示了三种情况下电动汽车和混合动力汽车的充电、加氢和放电活动。负值表示充电和加氢行动, 正值表示放电行动。

表 5

电动汽车和高压电的输出和补偿。			
场景	电池损耗成本 (元 )	V2G 奖励费 (元 )	均衡汇率
情景 1	-	-	0.61
情景 2	6.10	231.00	0.61
情景 3	4.72	323.08	0.65

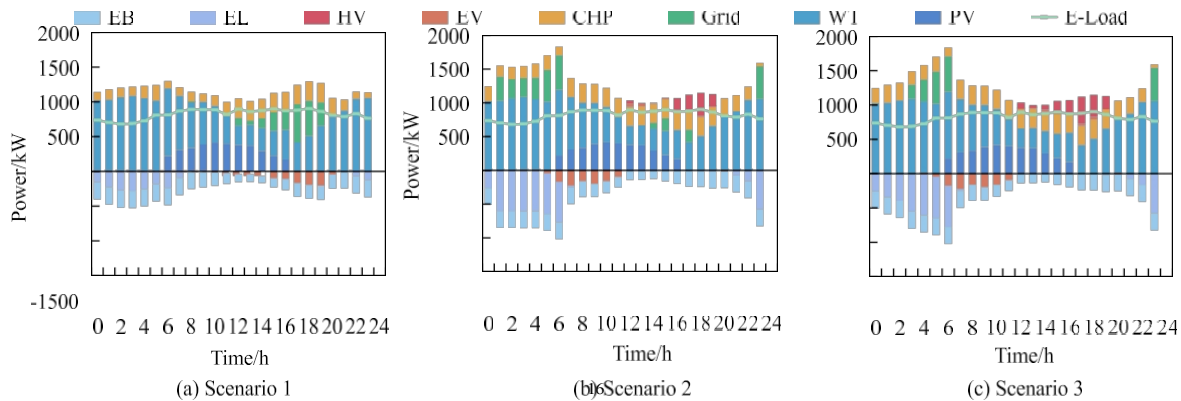


图 6.不同情况下的电力平衡。

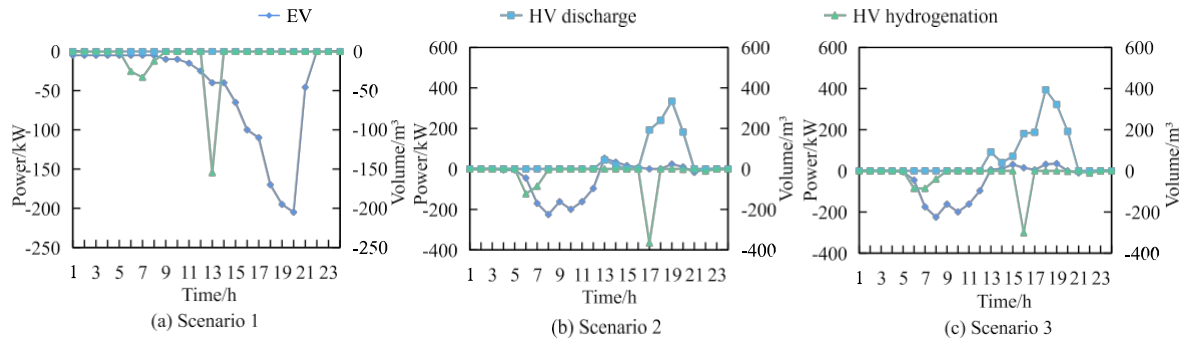


图 7.电动汽车和高压车辆的充电和放电。

系统放电。在情景 1 中，电动汽车充电需求先增加后减少，反映了该情景中电动汽车充电的无序性。这种模式的出现是由于电动汽车用户的驾驶距离和充电开始时间的分布，导致充电负荷先升后降。在这种情况下，电动汽车只进行充电，没有任何放电活动。加氢时间安排在 5:00 至 9:00 和 13:00。根据图 6(b)，在情景 2 中，电动汽车充电主要发生在 6:00 至 12:00，放电时段为 13:00 至 15:00 和 18:00。高压放电时间为 12:00、16:00 至 19:00，加氢时间为 5:00 至 6:00 和 16:00。在方案 3 中，电动汽车充电需求及其时间分布与方案 2 相同，但电动汽车放电时段调整为 15:00-16:00 和 18:00-19:00。同时，高压放电窗口扩大至 12:00-21:00，加氢阶段为 5:00-9:00 和 16:00。

与方案 1 相比，方案 2 中电动汽车的充放电模式受系统运行的指导。在情景 2 中，电动汽车充电主要安排在中午之前，与 7:00 之前的非高峰时段可再生能源发电量高、电费低的时段相吻合。从 7:00 到 11:00，系统普遍电力过剩，促使电动汽车充电，并将多余电力用于氢气生产，同时进行高压氢化。午后，由于可再生能源输出减少，无法满足系统的电力需求，系统会安排电动汽车和高压电放电，帮助平衡电力负荷。方案 3 在方案 2 的基础上引入了碳交易机制，导致电网购电减少，燃气轮机发电量略有增加。系统内的电力缺口通过电动汽车和高压电的放电来弥补。因此，在情景 3 中，电动汽车放电略有增加，而高压电放电的持续时间更长。这种调整归因于碳交易限制，它减少了电网电力采购，迫使电动汽车和高压电增加输出以维持电力平衡。然而，仅靠电动汽车的补偿性放电不足以抵消电网电力采购的减少，因此必须更大幅度地增加高压电输出。

高压氢化所需的氢气主要来自于电解槽的输出。在这两种情况下，凌晨 5 点之前，电解槽产生的部分氢气被分配用于与燃气轮机输入的氢气混合，而大部分则储存在氢气储存设施中。随着碳交易的开始，电网电力采购减少，导致电解槽活动减少，氢储存水平也随之下降。回顾图 5 所示的电力平衡，可以明显看出，在情景 3 中，电网电力采购在 15:00

至 16:00 之间降至零，而情景 2 中没有出现这种情况。为了维持情景 3 中的系统平衡，高压电和电动汽车都进行了反向放电。与情景 2 相比，高压车辆的加氢调度被调整到更早的时间段，反向放电量也随之增加。

根据对三种方案结果的比较和分析，V2G 技术明显减少了从电网购买的电力，同时为系统提供了大量电力支持。加入碳交易计划后，碳排放量进一步减少了 0.4%，总成本降低了 276.33 元，改善系统平衡 4%，降低 V2G 活动导致的电动汽车电池衰减 22.62%，减少对 V2G 激励措施的需求 28.5%。

## 6.2. 系统中的氢混合分析

在上述分析中，氢气混合比例假定为 10%。实际上，燃气轮机可以在混合比高达 20% 的情况下安全稳定地运行。为了研究不同氢气混合比对系统成本、CO<sub>2</sub> 排放量和各种设备输出的影响，我们进行了一项敏感性分析。

### 6.2.1. 不同氢气混合比例下的系统运行策略

图 8 展示了不同氢气混合比例下的系统运行策略。随着氢气混合比例的增加，从电网购买的电力呈下降趋势。当混合比从 10% 增加到 20% 时，从电网购买的电力减少了约 56%。相反，随着氢气掺混率的增加，燃气轮机组的输出功率呈轻微上升趋势。与混合比为 10% 时的数值相比，混合比为 15% 和 20% 时燃气轮机组的输出功率分别增加了约 3% 和 5%。这一增长归因于经济优化目标，即较高的氢气掺混率可提高燃气轮机组的输出功率，从而降低与公用电网相关的成本。此外，它还能通过减少碳排放实现碳交易利润。

至于高压电源的输出量，它随着功率的增加而减少。氢气混合比。这是因为氢气的市场价格相对较高，导致大部分氢气来自现场安装的电解槽。随着氢气混合比的增加，氢动力车的氢气供应量也会减少。考虑到高压发电机对氢气储存的最低要求，其功率输出也会相应降低。

此外，当氢气混合比例从 10% 增加到 20% 时，电动汽车的放电能力会在基准值的基础上先减后增。这种波动主要归因于在考虑碳交易机制和 V2G 激励政策的同时，平衡电动汽车和氢动力车的经济利益。

此外，从图中可以看出，高压电和电动汽车的放电时段集中在 15:00 至 21:00。这一规律主要是由于可再生能源的输出在减少。考虑到 TOU 电价，电解槽通常在 21:00 至 8:00 之间运行。相反，燃气轮机组在白天以额定功率运行。

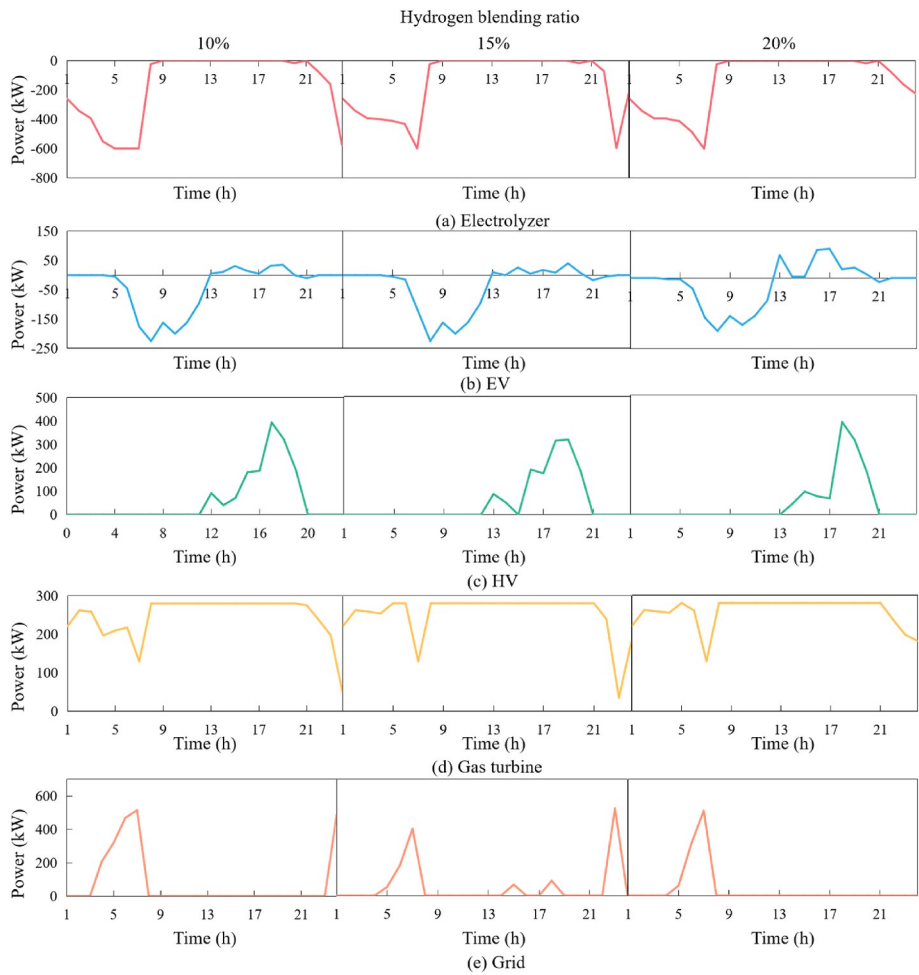
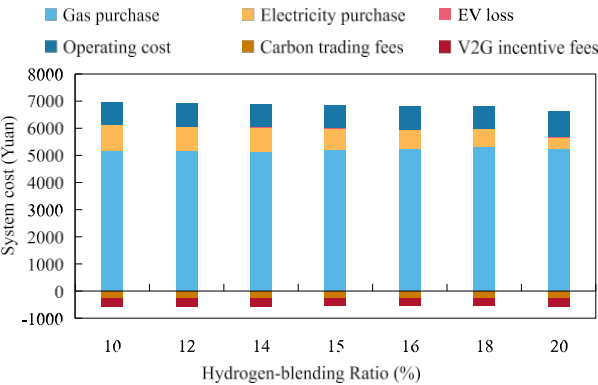


图 8.不同氢气混合比例下的系统运行策略。

6.2.2. 不同氢气混合比例下的系统成本

图 9 显示了不同氢气混合比例下的成本明细。一般来说，随着氢气混合比例的增加，系统总成本趋于下降。具体来说，当氢气混合比例从 10% 提高到 20% 时，总成本下降约 5%。在本研究分析的电氢一体化能源系统中，系统总成本主要包括购电成本、购气（包括天然气和氢）成本、运行和维护成本、电动汽车电池降解成本，同时还包括碳交易费用和 V2G 激励费用。由于

图 9.不同氢气混合比例下的成本构成。



如图 9 所示, 天然气采购成本占系统总成本的最大部分, 其次是电力采购成本和运行维护成本。相反, 与电池退化相关的成本相对较小。此外, 碳交易费用显示为负值, 表明系统可以通过碳交易产生一定的收入。这种收益归因于该系统相对较低的碳排放量, 这是通过整合可再生能源、氢气以及使用电动汽车和高压车辆实现的。

此外, 如前所述, 随着氢气混合比例的增加, 天然气和氢气的消耗量都会增加, 从而导致天然气采购成本的增加。在电力方面, 消耗量的减少同样会导致电力采购成本的降低。当氢气混合比例从 10% 增加到 20% 时, 购电成本降低了约 56%。

运行和维护成本与燃气轮机、电解槽等各种设备的产量有关。随着氢气混合比例的增加, 运行和维护成本呈波动上升趋势。具体来说, 电解槽产量的波动对运行和维护成本有很大影响。此外, 由于  $\text{CO}_2$  排放量的减少 (参见图 10), 碳交易收入随着氢气混合比例的增加而增加。

#### 6.2.3. 不同氢气混合比例下的 $\text{CO}$ 排放量

图 10 显示了不同氢气混合比的  $\text{CO}_2$  排放组成。一般来说, 随着氢气混合比的增加,  $\text{CO}_2$  排放量呈下降趋势。当氢气混合比从 10% 提高到 20% 时,  $\text{CO}_2$  排放量增加了。

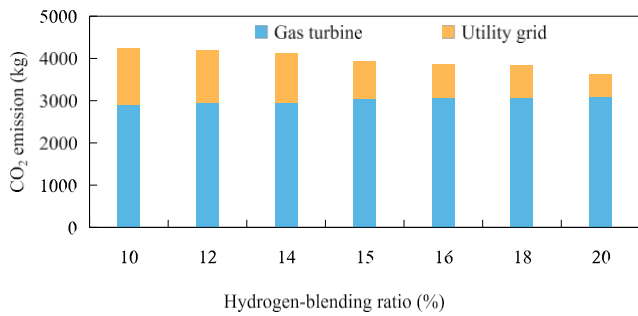


图 10.不同氢气混合比例下的 CO<sub>2</sub> 排放组成。

减少约 15%。

在所研究的电氢一体化能源系统中，二氧化碳<sub>2</sub> 排放的主要来源是燃气轮机和公用电网。如前所述，随着氢气混合比例的增加和经济优化，燃气轮机组的输出量会增加，从而导致燃料消耗量成比例增加。虽然天然气在燃料组合中的比例有所下降，但燃料消耗的总增加仍会导致天然气用量的小幅上升。因此，燃气轮机组的 CO<sub>2</sub> 排放量略有增加。另一方面，如前所述，从电网购买的电力大幅减少，导致 CO<sub>2</sub> 排放量相应减少。

### 6.3. 运行模式的影响

在本研究中，考虑到 V2G 响应，对三种运行模式进行了比较分析：电动汽车单独模式、高压单独模式和电动汽车-高压耦合模式。表 6 从经济和环境角度列出了这些模式的优化结果。总体而言，EV-HV 耦合模式的系统总成本最低，而 HV 单独模式的 CO<sub>2</sub> 排放量最低。以电动车单独运行模式为参考，电动车-高压电耦合模式的系统总成本和 CO<sub>2</sub> 排放量分别降低了 12% 和 11%。相反，与单独的高压模式相比，耦合模式的经济效益更好，但排放量相对更高。从本质上讲，电动汽车-高压电模式是一种最佳折衷方案，可有效平衡经济效益与环境影响。

如图 11 所示，在电动汽车单独运行模式下，氢气仅用于燃气轮机组，因此天然气采购成本相对较低。然而，由于电动汽车充电需要大量电力，从电网采购的电力增加，导致碳排放量相对增加。相反，在单用高压电模式下，会消耗大量氢气，主要是通过本地水电解产生的氢气。氢动力车的功率输出也相当高，这就减少了对电网电力的需求，从而减少了碳排放。此外，在电动汽车-高压电耦合模式下，电动汽车和高压电之间的协同互动可减少氢气消耗和高压电输出。尽管如此，燃气轮机组的输出也会增加，从而进一步减少对电网电力的需求，降低整个系统的成本。

此外，从图 11 中可以明显看出，与电动汽车单独模式相比，在电动汽车-高压电耦合模式中加入高压电后，电动汽车的充电和放电能力都会降低，从而使电动汽车电池的衰减率降低约 20.8%

相反，与单独的氢电压模式相比，耦合模式的电动汽车充电要求可能会降低电解槽的输出。考虑到综合能源系统的热负荷需求，燃气轮机的氢气混合需求优先于高压发电机的氢气加注需求。因此，这将导致燃气轮机组输出功率的增加，进而减少从电网的电力采购并减少碳排放。

## 7. 结论

。

本研究针对电动汽车和高压电的综合能源系统开发了一个调度优化模型，同时考虑了 V2G 响应和碳交易机制。为了管理可再生能源生产和需求的不确定性，基于 V2G 技术建立了电动汽车和高压电的充放电模型。此外，还引入了氢混合燃气轮机、碳交易和 V2G 功能，以显著降低碳排放，提高电动汽车和高压车辆的性能和收益，并降低系统的运营成本。通过对各种方案的分析，可以得出以下结论。

- (1) 各种方案的比较显示了 V2G 技术的经济优势。在 V2G 模式下，与随机充电方案相比，总成本降低了 7.8%，从电网购买电力的成本降低了 53.7%。
- (2) 在燃气轮机运行中引入氢气可显著减少碳排放。提高氢气混合比例可进一步减少碳排放。当氢气掺混率为 20% 时，碳排放量减少了 15%。
- 与 10% 的比例相比。在氢气混合比例保持在安全范围内的

- 情况下，较高的氢气混合比例对脱碳的影响更为明显。随着氢气混合燃气轮机技术的发展，尽管目前对混合比例有限制，但脱碳潜力将会增加。
- (3) 从电动汽车和高压运行模式的角度来看，电动汽车-高压耦合运行可减少电池损耗。与电动汽车单独运行模式相比，耦合模式下的电池损耗减少了 20.8%。此外，与电动汽车单独运行模式相比，耦合模式下的碳排放量减少了 12%。

随着新能源和 V2G 技术的不断发展，氢能利用和车网互动技术逐渐成为国家战略的组成部分。本研究有望为未来新能源汽车与电网的互动提供理论基础和参考方向。

CRediT 作者贡献声明

**李瑞琦**：写作--原稿、可视化、软件、方法学。**Hongbo Ren**：写作--审阅和编辑、调查、概念化。**吴琼**写作--审阅和编辑、监督、获取资金。**李启芬**：资源、调查、指导。**高伟军**指导。

表 6  
各种运行模式下的优化结果。

运行模式	总成本（元）	购气成本（元）	购电成本（元）	碳交易费用（元）	电动汽车损耗成本（元）	碳排放量（千克）
电动汽车	7230.60	3345.62	2830.61	-228.72	5.96	4798.89
HV	7526.57	4957.86	1576.39	-289.48	0	4003.03
EV-HV	6367.31	5163.79	958.426	-270.88	4.72	4246.68



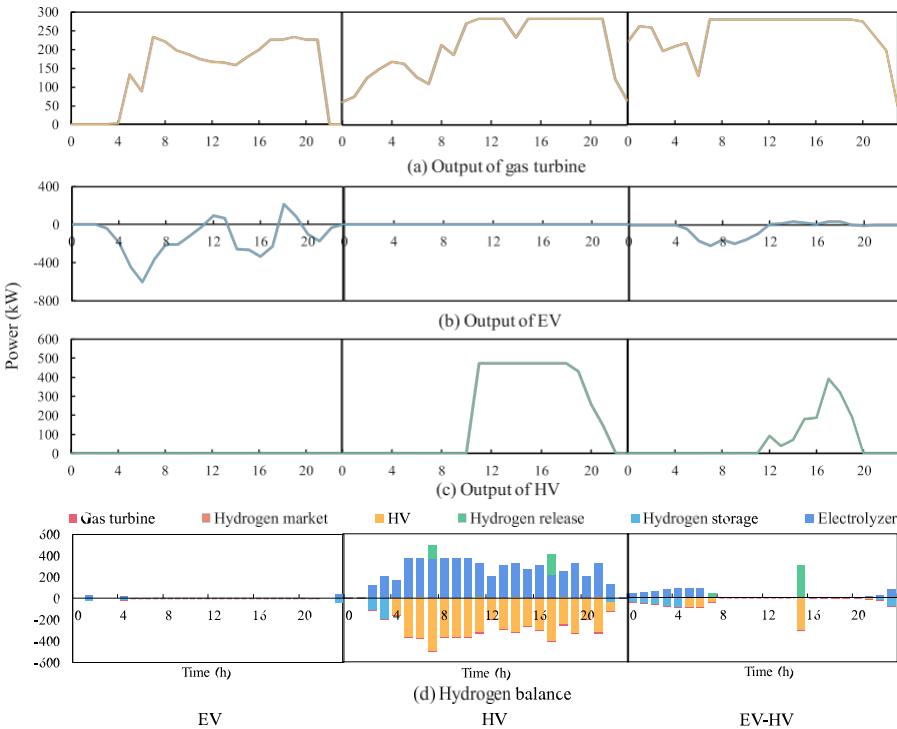


图 11.各种运行模式下的系统运行策略。

利益冲突声明

作者声明，他们没有任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

致谢

该研究工作得到了上海市科技新星计划（22QA1403900）、国家自然科学基金（U2066214）和上海市第四类高峰学科发展计划非碳能源转化与利用研究所的支持。

参考资料

[1] J.Gawlick, T. Hamacher, 《2050 年零排放欧洲能源系统中电力和氢气部门耦合的影响》，《能源政策》，第 180 (2023) 113646 页。180 (2023) 113646。  
[2] H.Dong、Z. Shan、J. Zhou、C. Xu、W. Chen, 带混合储能电-氢-热-气综合能源系统的精细建模与协同优化，《应用能源》351 (2023) 121834。  
[3] M.Tahir、S. Hu、T. Khan、H. Zhu, 基于多重属性的电动汽车充电和氢能汽车加油的可持续混合动力站设计框架，Energy Convers.Manag.300 (2024) 117922。  
[4] X.Li、Z. Wang、L. Zhang、F. Sun、D. Cui、C. Hecht、J. Figgenger、D.U. Sauer, Electric vehicle behavior modeling and applications in vehicle-grid integration: an overview, Energy 268 (2023) 126647。  
[5] B.Liu、J. Dong、J. Lian、T. Kuruganti、X. Wang、F. Li, Enhanced deep neural networks with transfer learning for distribution LMP considering load and PV uncertainties, Int.J. Electr.Power Energy Syst.147 (2023) 108780。  
[6] J.Geng、B. Bai、H. Hao、X. Sun、M. Liu、Z. Liu、F. Zhao, Assessment of vehicle side costs and profits of providing vehicle-to-grid services, eTransportation 19 (2024) 100303。  
[7] T.Shi、C. Xu、W. Dong、H. Zhou、A. Bokhari、J.J. Klemes、N. Han, 基于深度强化学习的氢电耦合系统能源管理研究，Energy 282 (2023) 128174。  
[8] Q.Wang、L. Zhao, Data-driven stochastic robust optimization of sustainable utility system, Renewable Sustainable Energy Rev. 188 (2023) 113841。

[9] D.Zhou、Z. Zhu, 多重不确定性下的城市综合能源系统随机鲁棒优化调度，《能源报告》，9 (7) (2023) 1357-1366。  
[10] M.Wu、J. Xu、L. Zeng、C. Li、Y. Liu、Y. Yi、M. Wen、Z. Jiang, 基于动态编程的园区综合能源系统两阶段鲁棒优化模型，Appl. Energy 308 (2022) 118249。

- [11] X.Liu, M. Hou, S. Sun, J. Wang, Q. Sun, C. Dong, Multi-time scale optimal scheduling of integrated electricity and district heating systems considering thermal comfort of users: an enhanced-interval optimization method, *Energy* 254 (2022) 124311.
- [12] B.K. Sovacool, J. Kester, L. Noel, G.Z. R. Actors, Business models, and innovation activity systems for vehicle-to-grid (V2G) technology: a comprehensive review, *Renew.Sustain.Energy Rev.* 131 (2020) 109963.
- [13] S.Sharma, P. Jain, Risk-averse integrated DR and dynamic V2G scheduling of parking lot operator for enhanced market efficiency, *Energy* 275 (2023) 127428.
- [14] Y.Zheng, Z. Shao, Y. Shang, L. Jian, Modeling the temporal and economic feasibility of electric vehicles providing vehicle-to-grid services in the electricity market under different charging scenarios, *J. Energy Storage* 68 (2023) 107579.
- [15] P.Aguilar, B. Gross, Battery electric vehicles and fuel cell electric vehicles, an analysis of alternative powertrains as a mean to decarbonise the transport sector, *Sustain.能源技术. Assessments* 53 (2022) 102624.
- [16] F.F.Qian, W. Gao, Y. Yang, D. Yu, 大型建筑物燃料电池汽车并网 (FCV2G) 系统的经济优化与潜力分析, *Energy Convers.Manag.*205 (2020) 112463.
- [17] Y.He, Y. Zhou, J. Liu, Z. Liu, G. Zhang, An inter-city energy migration framework for regional energy balance through daily commuting fuel-cell vehicles, *Appl. Energy* 324 (2022) 119714.
- [18] Q.Nie, L. Zhang, S. Li, How can personal carbon trading be applied in electric vehicle subsidies?私家车中的斯塔克尔伯格博弈方法, 《应用能源》 313 (2022) 118855。
- [19] W.Li, R. Long, H. Chen, T. Yang, J. Geng, M. Yang, Effects of personal carbon trading on the decision to adopt battery electric vehicles: analysis based on a choice experiment in Jiangsu, China, *Appl. Energy* 209 (2018) 478-488.
- [20] Z.Yan, C. Li, Y. Yao, W. Lai, J. Tang, C. Shao, Q. Zhang, Bi-level carbon trading model on demand side for integrated electricity-gas system, *IEEE Trans.Smart Grid* 14 (4) (2023) 2681-2696.
- [21] Y.Wu, L. Zhong, 用于评估氢基储能系统在加拿大实现净零能耗建筑和城市中的应用的综合能源分析框架, 《能源转换与管理》, 286 (2023) 117066。
- [22] L.Wang, J. Lin, H. Dong, Y. Wang, M. Zeng, 基于需求响应综合激励机制的园区综合能源系统多时段优化调度, *能源* 270 (2023) 126893。
- [23] M.Shi, H. Wang, C. Lyu, P. Xie, Z. Xu, Y. Jia, A hybrid model of energy scheduling for integrated multi-energy microgrid with hydrogen and heat storage system, *Energy Rep.* 7 (2021) 357-368.
- [24] A.Xuan, X. Shen, Q. Guo, H. Sun, A conditional value-at-risk based planning model for integrated energy system with energy storage and renewables, *Appl. Energy* 294 (2021) 116971.
- [25] D.Chen, F. Liu, S. Liu, Optimization of Virtual Power Plant scheduling coupling with P2G-CCS and Doped with Gas hydrogen based on Stepped carbon trading, *Power Syst.Technol.*46 (2022) 2042-2054.

- [26] J.Lin, R. Cai, Optimal planning for industrial park-integrated energy system with hydrogen energy industry chain, *Int. J. Hydrogen Energy* 48 (2023) 19046-19059.
- [27] A.Buonomano, Building to Vehicle to Building concept: a comprehensive parametric and sensitivity analysis for decision making aims, *Appl. Energy* 261 (2019) 114007.
- [28] M.El-Hendawi, Z. Wang, R. Paranjape, S. Pederson, D. Kozoriz, J. Fick, 城市住宅区电动汽车充电模型, 《能源》 15 (2022) 13。
- [29] D.Thomas, O. Deblecker, C.S. Ioakimidis, 考虑光伏不确定性和随机电动汽车驾驶时间表的并网智能建筑能源管理系统优化运行, 《应用能源》 210 (2018) 1188-1206。
- [30] Y.He, Y. Zhou, Z. Wang, J. Liu, Z. Liu, G. Zhang, Quantification on fuel cell degradation and techno-economic analysis of a hydrogen-based grid-interactive residential energy sharing network with fuel-cell-powered vehicles, *Appl. Energy* 303 (2021) 117444.
- [31] D.Wyssg, K.H. Jorgensen, 《LHS 用户指南: 桑迪亚的拉丁超立方采样软件》, 1998 年。
- [32] J.Dupacova, N. Growe-kuska, W. Romisch, Scenario reduction in stochastic programming-an approach using probability metrics, *Math. Program.* 95 (3) (2003) 493-511.
- [33] Z.He, C. Liu, Y. Wang, X. Wang, Y. Man, Optimal operation of wind-solar-thermal collaborative power system considering carbon trading and energy storage, *Appl. Energy* 352 (2023) 121993.
- [34] S.Cao, A. Kari, 零能耗建筑的现场 H2 和可再生能源混合系统与 H2 车辆的技术可行性, 《应用能源》 158 (2015) 568-583。
- [35] S.Cao, Comparison of the energy and environmental impact by integrating a H2 vehicle and an electric vehicle into a zero-energy building, *Energy Convers.Manag.* 123 (2016) 153-173.
- [36] N.Nima, A.M. Saatloo, M.A. Mirzaei, S.N. Ravadanegh, K. Zare, B. Mohammadi-ivatloo, M. Marzband, A robust bi-level optimization framework for participation of multi-energy service providers in integrated power and natural gas markets, *Appl. Energy* 340 (2023) 121047.
- [37] Y.Luo, Y. Gao, D. Fan, 基于价格和激励的智能电网多能源实时需求响应策略: 一种双层优化方法, *电力与能源系统* 153 (2023) 109354。
- [38] G. Lin, S. Lu, K. Guo, C. Gao, X. Feng, Stackelberg game based incentive pricing mechanism of demand response for power grid corporations, *Autom.Electr.Power Syst.* 10 (44) (2020) 59-67.
- [39] X.Fang, W. Dong, Y. Wang, Q. Yang, 基于氢的多能源微电网的多时间尺度能源管理策略, *应用能源* 328 (2022) 120195.
- [40] J. Hou, W. Yu, Z. Xu, Q. Ge, Z. Li, Y. Meng, Multi-time scale optimization scheduling of microgrid considering source and load uncertainty, *Elec.Power Syst.* 216 (2022) 109037.