

北京市氢燃料电池汽车发展潜力预测分析

许晓敏, 彭露瑶, 纪正森, 郑世鹏, 管信侯, 崔灏旭

(华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206)

摘要: 氢能源具有来源丰富、高效转化等显著优势,在工业、交通等领域中有较好的应用前景。本文以北京市氢燃料电池商用车未来市场潜力为预测目标,设置乐观情景、基准情景与保守情景三种情景,构建基于麻雀算法优化支持向量机回归(SSA-SVR)的北京市氢燃料电池汽车发展潜力的智能预测模型,对北京市2022—2030年氢燃料电池汽车未来市场需求进行多情景的预测并提出相关建议。结果表明:①SSA-SVR智能预测模型能够克服单一模型参数选择较为敏感的问题,通过参数优化,有效预测北京市氢燃料电池商用车发展潜力;②在乐观情景下,技术进步因素对北京市氢燃料电池商用车发展潜力影响程度最大,在保守情景下,基础条件可作为推动氢燃料电池商用车快速发展的首要因素。

关键词: 氢能应用场景;情景分析;智能预测;氢燃料电池汽车;发展潜力

中图分类号: F572.88; U-9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002—980X(2023)3—0052—12

一、引言

当今世界,化石能源产生的二氧化碳等温室气体排放带来的环境消耗性行为越发凸显。因此,利用清洁、可持续的能源对未来社会的可持续性和全球的安全性至关重要(Dawood et al, 2020; 杜忠明等, 2022),寻找低碳及零碳排放的能源作为化石能源的优质替代,成为人类社会不断追求的目标。氢能源作为来源丰富、应用广泛的二次能源(Li et al, 2020),能够帮助可再生能源大规模消纳,实现电网大规模调峰与储能,在多种领域的低碳化转型过程中具有重要意义。

目前,由于全球脱碳化进程加快,发展氢能产业已成为全球应对气候变化和加快能源转型的重要举措,多数发达国家早已走在氢能产业发展的前列。美国在20世纪70年代就发现氢能的优质特性,较早实现了氢能技术的实际应用,为实现能源独立与可持续发展奠定了基础。20世纪90年代,日本便启动燃料电池车的开发,2013年,日本把发展氢能提升为国策,同时启动加氢站建设的前期工作。德国对于氢能的应用经验丰富,于20世纪末推出第一代燃料电池汽车。据国际氢能委员会统计,截至2021年,全球范围内氢能产业链已有已建、在建及规划项目228个。其中,欧洲已有126个项目,在已公开的项目数量方面处于全球领先水平,所占比例能够达到55%,澳大利亚、日本、韩国、中国和美国紧随其后。

与发达国家相比,我国氢能产业发展还处于初级阶段。2016年,《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》提出要提升纯电动汽车和插电式混合动力汽车产业化水平,推进燃料电池汽车产业化。2019年,政府工作报告提出保证交通领域汽车消费的平稳态势,继续落实与推动购车优惠政策与基础设施建设。2020年,国家能源局提出,制定实施氢能产业发展规划,组织实施技术重点、难点、要点攻关研发,积极扩大示范效应,推动氢能源应用向纵深拓展。2022年3月,《氢能产业发展中长期规划(2021—2035)》出炉,首次明确了氢的能源属性,是未来国家能源体系的组成部分。北京市氢能技术研究在我国起步最早,作为国家整体技术水平与产业化能力优势较高的城市,在氢能技术创新、标准规范、示范应用上具有得天独厚的发展条件,在产业发展、市场应用方面具有领先的消费潜力。

继碳达峰、碳中和的“双碳”目标提出之后,由于能源消费结构向清洁低碳加快转变,氢能的发展颇受关注(李跃娟等, 2022)。交通部门作为我国能源消费增长最快的领域,随着城市发展进程加快与经济水平持续

收稿日期:2022-11-21

基金项目:北京市社会科学基金项目“‘双碳’目标下北京市氢能源发展模式及消纳利用策略研究”(21JCC105)

作者简介:许晓敏,技术经济及管理专业博士,华北电力大学经济与管理学院副教授,研究方向:能源技术经济分析;彭露瑶,华北电力大学经济与管理学院硕士研究生,研究方向:电力预测与决策;纪正森,华北电力大学经济与管理学院博士研究生,研究方向:技术经济及管理;郑世鹏,华北电力大学经济与管理学院硕士研究生,研究方向:能源政策分析;管信侯,华北电力大学经济与管理学院硕士研究生,研究方向:数据分析与建模;崔灏旭,华北电力大学经济与管理学院硕士研究生,研究方向:预测与评价。

提升,我国机动车保有量及北京市机动车保有量均呈现稳步增长态势。因此,位于市场需求角度对未来车型的发展预测具有必要性。现代交通工具的过度利用导致了化石能源的危机与环境的恶化(问朋朋等,2012),氢燃料电池车(Hydrogen fuel cell vehicle, HFCV)本质上是一种以氢燃料作为动力的电动汽车,相对于纯电动汽车,具有其自身独特的优势:它所产生的废弃只有热能和蒸汽,在环保方面,具有混合动力车、电动汽车等其他环保汽车无法比拟的优势(刘春娜,2013;Bethoux et al,2020)。HFCV是现阶段在交通领域推广和应用氢能源的关键切入点之一,对未来构建以清洁能源为主体的多元能源体系具有很大程度的推动作用,同时,也为未来氢能产业的发展指明了方向(殷卓成等,2022)。因此,从长远来看,燃料电池汽车的绿色、可持续性的特点,使其在交通行业脱颖而出。

在“双碳”目标的大背景下,燃料电池的未来发展潜力巨大,相应的政策支持也将越来越多。近年来,我国的氢燃料电池汽车主要精力都放在了商用车领域,而且还处于试水阶段。氢燃料电池汽车的乘用车,可能还需要很长的一段时间才能落地。因此,北京市对氢燃料电池汽车商用车的重视程度也进一步提高,鼓励氢燃料商用车推广应用,战略布局不断加强,在新能源汽车,特别是氢燃料电池汽车的扶持和投入方面,出台了多种配套政策:2020年,北京市经济和信息化局发布《北京市氢燃料电池汽车产业发展规划(2020—2025)》,分两阶段提出氢燃料电池汽车发展目标;2021年,北京市发改委发布《北京市2021年能源工作要点》,推动延庆赛区氢燃料电池汽车规模化示范运营,建成大兴氢能示范区项目北区,新增3座加氢站;2022年,北京市经济和信息化局通过《关于开展2021—2022年度北京市燃料电池汽车示范应用项目申报的通知》明确北京市燃料电池汽车示范应用项目资金支持细则;同年,在《北京市氢能产业发展实施方案(2021—2025)》中明确2025年前,交通运输领域,实现燃料电池汽车累计推广量突破1万辆;2022年,北京市人民政府在《北京市“十四五”时期能源发展规划》中表明,要积极推动氢燃料电池汽车规模化应用,推动氢能与氢燃料电池全产业链技术进步与产业规模化、商业化发展,加快相关技术创新研发。

氢燃料电池汽车的开发利用将成为中国走可持续发展道路的重要议题,不难看出,在“双碳”目标的背景下,北京市致力于将氢能作为能源转型的重要资源,近年对氢燃料电池汽车产业发展重视程度不断提高,战略布局不断加强。政策层面的规范与引导能够使氢能应用明显提速,将极大促进氢燃料电池汽车的突破性发展与全方位应用。结合电动汽车推广路径,氢燃料电池汽车的推广正在经历从量变到质变的过程,而商用车正是重要突破口。通过商用车示范运行先行效应,将会拉动燃料电池汽车全产业链协同进步,带来成本下行等利好,为今后燃料电池乘用车的发展奠定必要基础。因此,站在市场需求角度探讨北京市未来氢燃料电池汽车商用车的发展潜力,具有十分积极的现实意义。

二、文献综述

由于经济的快速增长,特别是在发展中国家,世界的能源需求有上升的趋势,这对地球的承载能力造成越来越大的负荷(Alanne and Cao,2017)。为了满足当今时代持续不断的能源需求,当务之急是寻找更绿色的替代能源,减少对化石燃料的依赖(Nagpal and Kakkar,2018),提高能源效率和增加对可再生和可持续能源资源的开发(Li et al,2013)。氢能是70年代中期形成的国民经济的未来发展方向之一,在早期被定义为“脱碳、可持续能源系统的关键和不可缺少的元素”,是一种能够提供安全、经济、环保的能源载体(Zhiznin et al,2020),被认为是未来能源的终极形式之一(张红等,2021)。

氢能制、储、运、用相关技术与装备逐渐成熟(韩利等,2022),具有巨大的战略意义与迫切的实际需求。目前,国内外多数研究集中在氢能产业链发展中,与氢的生产、储存、运输和使用相关的扩大研究结果表明了它的环境优势。Muller和Arlt(2014)综述了迄今为止氢能源运输和储存现状,并对不同的储氢技术进行了阐述说明。殷卓成等(2021)分析了氢能开发领域中各类氢能储运关键技术及相关装备的应用现状,提出了未来氢能储运技术及关键装备的发展方向。李建林等(2021)对氢能储运关键技术现状在电力工业中的应用进行研究,包括氢燃料电池发电及氢燃气轮机发电技术,并对现有主流氢能储运技术进行对比研究。李跃娟等(2022)提出京津冀、长三角和珠三角地区是我国氢燃料电池汽车最主要推广区域,并针对这3个区域,从制氢、储运、加注几个方面对车用氢能源产业及其经济性进行了深入分析。

在产业链的使用环节中,氢能具有十分丰富的应用场景,在交通方面,可以大大降低日常用车对燃料的依赖性,从而促进交通领域实现终端用能绿色低碳化发展。在氢能的应用场景中,氢燃料电池汽车是未来最有潜力发展方向之一(殷卓成等,2022),氢能用于交通领域,可以大规模进行油气替代,有效降低油气进口依存度。Hao等(2018)以中国为例,综述了中国部署燃料电池汽车的独特优势,提出应妥善解决车辆技术和制

氢问题,以确保生命周期的低碳性能。Apak等(2017)对氢燃料电池汽车进行了描述性评价,提出环保型汽车很有可能成为世界范围内恢复环保型投资的重要因素之一。Manoharan等(2019)对利用燃料电池生产氢能源及其在混合动力汽车中的应用进行了研究,分析了各种类型的燃料电池,并提出通过将氢燃料电池与电池、控制系统与策略相结合,可以生产出可持续的混合动力汽车。燃料电池汽车为清洁氢燃料的运输发电提供了一条可扩展的途径,Kast等(2017)对使用氢燃料电池的商用中型和重型(MD和HD)车辆进行建模和分析,以加深对这种车辆等级在使用氢燃料电池技术时能够带来的经济和环境效益的理解。Liu等(2018)通过分析燃料电池汽车的发展规划和制氢发展趋势,引入了5种情景来评估燃料电池汽车对中国道路车辆温室气体排放的影响,研究表明,燃料电池汽车具有显著的温室气体减排效果。

在各类新能源汽车中,氢燃料电池汽车以其高能量转化率和行驶阶段零排放的优点被认为具有广阔的发展前景,其发展潜力成为世界各大汽车厂商及研发机构的研究热点(王菊等,2013;高助威等,2022)。目前,针对氢燃料电池汽车,尤其是针对某一地区的氢燃料电池汽车预测研究尚属空白。但是国内外学者对于氢能源预测方面,已有一定研究,通常采用灰色预测法(Duan and Pang, 2021)、系统动力学(Xu et al, 2020)、支持向量机法(李顺昕等, 2019;霍娟等, 2019)、神经网络法(贾凌云等, 2022)及各种算法组合创新及优化(Li et al, 2021; Kavousi-Fard and Kavousi-Fard, 2013)。Liu等(2017)以2016—2025年深圳市氢能需求量和加氢站成本为研究对象,采用燃料电池汽车渗透率的3种情景预测燃料电池汽车数量和每日氢需求,以推动燃料电池汽车在深圳的应用。Long等(2022)提出了一种基于门控递归单元神经网络的氢燃料电池剩余使用寿命(remaining useful life, RUL)预测方法,结果表明:与其他基于反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)和长短期记忆(long short term memory, LSTM)的RUL预测方法相比,提出的基于门控循环单元(gated recurrent unit, GRU)的RUL预测方法具有更大的优势。Ma等(2010)从经济发展和系统动力学角度出发,在合理分析国内外氢能需求内外因素的基础上,对中国多个行业的氢需求进行预测研究。Rahmouni等(2016)基于人口量、人均汽车保有量、HFCV的渗透率等不同因素,对本区域的应用场景进行了划分,从而测算典型应用场景交通领域的氢气年需求量。

目前,多数国内外学者将研究集中在氢能产业链发展的技术与装备中,对于应用环节来说,大部分是氢能源经济和环境效益的探索与阐述。针对具体的氢能源应用场景,尤其针对某一地区的氢燃料电池汽车预测方面的研究较少。本文针对现有研究内容的不足,从氢能应用前景较大的氢燃料电池汽车出发,利用麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)(Xu et al, 2022; 张子阳和王珂珂, 2022),对支持向量机回归(support vector regression, SVR)进行参数寻优,提出了“双碳”目标下基于麻雀搜索算法优化支持向量机回归(SSA-SVR)的北京市氢燃料电池汽车发展多情景潜力预测模型,研究框架如图1所示。依据国家出台的一系

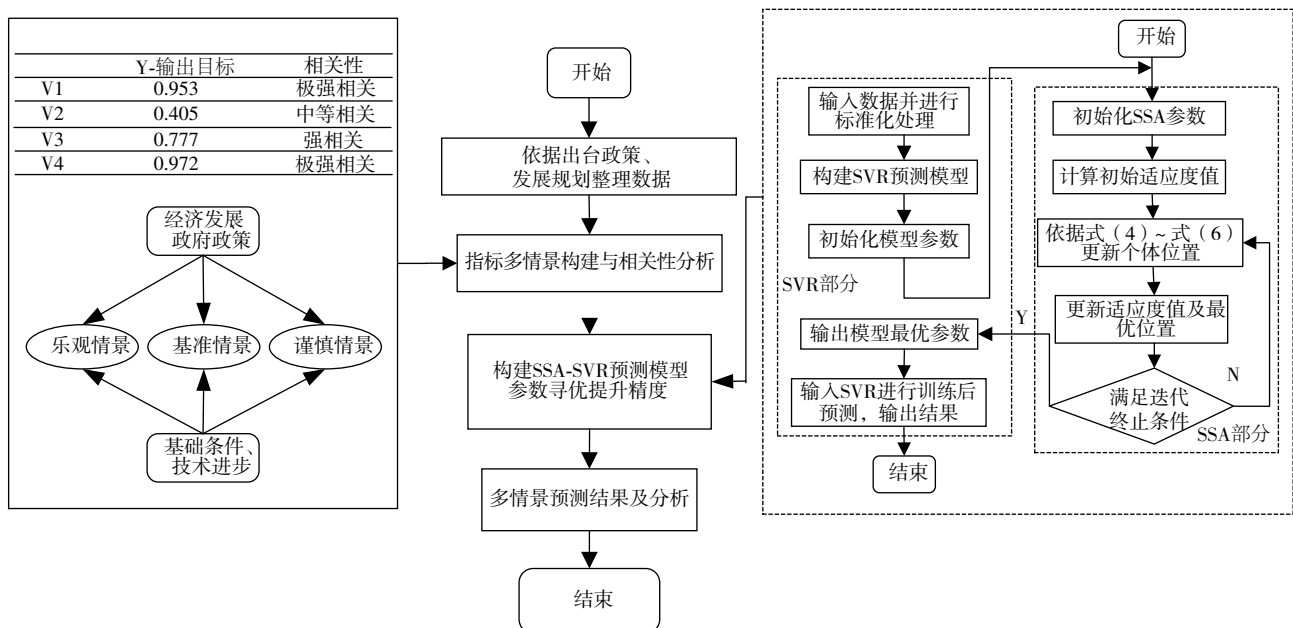


图 1 研究思路框架

列政策及北京市发展氢燃料电池汽车规划,数据处理中进行缺失值的补充及计算。基于情景分析和相关性分析,构建基准、乐观和保守三种情景,选取关键驱动指标,作为预测模型的输入。构建基于SSA-SVR的北京市氢燃料电池汽车发展潜力智能预测模型,对单一因素与综合因素下等多情景下的北京市2022—2030年氢燃料电池汽车发展潜力进行预测,然后运用斜率估计法进行分析,给出北京市氢能源汽车发展建议。

基于以上的研究思路,本文有以下几点创新。

(1)本文采用的麻雀搜索算法是一种新颖的群体优化算法,具有收敛速度快、搜索能力强等优势,可针对单一预测模型参数选择较为敏感的问题,对参数进行优化。SSA-SVR智能预测方法模拟了北京市燃料电池汽车的可能增长趋势,应用在氢燃料电池汽车潜力预测中具有较好表现。

(2)本文以2022—2030年的北京市氢燃料电池汽车商用车的发展潜力为研究对象。设置了基于经济发展、政府政策、基础条件与技术进步4种驱动因素的发展情景,通过多情景下的潜力预测分析,得出乐观情景与保守情景下北京市氢燃料电池汽车发展的潜力及不同驱动因素重要性程度,提出未来不同情景下北京市氢燃料电池汽车发展建议。

三、基于SSA-SVR的北京市氢燃料电池汽车多情景预测模型及实证分析

(一)模型与方法

1. 支持向量机回归

在机器学习中,支持向量机(support vector machine, SVM)回归算法称为支持向量回归(support vector regression, SVR),SVR最早是在20世纪90年代被提出的,后来,此模型随着算法进步有了快速发展并得到了更为广泛的应用(Ighravwe and Mashao, 2021)。

作为一种常用的机器学习算法,SVR的计算复杂度不依赖于输入空间的维度,且模型性能优秀。此外,它具有多种突出优点,如小样本学习、全局最优和推广能力强等,目前已成功应用于太阳能(Lima et al, 2021)及风速预测(Ren et al, 2016)等多种领域,并逐渐表现出比多层感知器等传统人工神经网络优越的泛化能力与预测性能。

SVR能够将输入的数据转换到高维空间,函数如式(1)所示。

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (a_i - a_i^*)k(x_i, x) + b^* \quad (1)$$

其中: b^* 为回归预测的偏差; a_i 为拉格朗日乘数; k 为核函数。

应用最小化适应函数,可以将式(1)转化为式(2):

$$R(f) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + c \sum_{i=0}^n L[f(x_i) - y_i] \quad (2)$$

其中: $\|w\|^2$ 由模型复杂性决定; c 为SVR复杂度和训练误差之间的权重。 L 如式(3)所示。

$$L[f(x) - y] = \begin{cases} 0, & |y - f(x)| \leq \varepsilon \\ |y - f(x)| - \varepsilon, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中: ε 为不敏感损失函数。

2. 麻雀搜索算法

麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)作为一种新型的群智能优化算法(Nguyen et al, 2022),来源于麻雀的觅食行为与反捕食行为,在SSA中每只麻雀有三种可能的行为(马飞燕和李向新, 2022):①作为发现者,负责搜索食物丰富的区域,从而为整个种群行动提供区域与方向;②作为加入者,利用前者来获取食物;③作为警戒者,在种群觅食过程中当危险靠近时,决定群体是否继续觅食。

在SSA中,由于发现者的职责所在,因此,它通常具有广泛的搜索位置。发现者在每次迭代过程中的位置更新描述如下:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \times \exp\left(\frac{-i}{\alpha \times iter_{max}}\right), & R_2 < ST \\ X_{i,j}^t + QL, & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (4)$$

其中： t 为当前的迭代次数； $iter_{max}$ 为常数，表示最大的迭代次数； X_{ij} 为第 i 个麻雀在第 j 维中的位置信息； $\alpha \in (0, 1]$ 是一个随机数； R_2 与 ST 分别为警示值与安全值； Q 是服从正态分布的随机数； L 为一个所有元素均为 1 的 $1 \times d$ 矩阵，其中，矩阵元素均为 1。

当 $R_2 < ST$ 时，发现者可以安全进行搜索操作；当 $R_2 \geq ST$ 时，表示有一些麻雀已经发现捕食者并发出警报，所有麻雀都要飞往安全地方觅食。

在觅食过程中，加入者进行位置更新描述如下：

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \times \exp\left(\frac{X_{worst}^t - X_{i,j}^t}{i^2}\right), & i > n/2 \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| A^+ \times L, & i \leq n/2 \end{cases} \quad (5)$$

其中： X_p 为当前发现者占据的最优位置； X_{worst} 为当前全局最差的位置； A 表示一个 $1 \times d$ 的矩阵，矩阵内每个元素随机赋值 1 或 -1。

在麻雀觅食的同时警戒者会负责警戒，当危险靠近时，他们会放弃当前食物，也会相应地进行位置更新：

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{best}^t + \beta |X_{i,j}^t - X_{best}^t|, & f_i > f_g \\ X_{i,j}^t + K \left[\frac{|X_{i,j}^t - X_{worst}^t|}{(f_i - f_w) + \varepsilon} \right], & f_i = f_g \end{cases} \quad (6)$$

其中： X_{best} 是当前全局最优位置； β 是符合标准正态分布的随机数； K 是在 $[-1, 1]$ 的均匀随机数； f_i 是当前麻雀个体的适应度值； f_g 表示当前全局最优的适应度值； f_w 表示当前最差位置的麻雀的适应度值； ε 为避免分母为 0 的一个较小的常数。

3. 基于 SSA-SVR 的北京市氢燃料电池发展潜力智能预测模型

支持向量机回归模型具有泛化能力优秀，采用小样本训练仍能得到较为准确结果的优点，在集成学习和神经网络算法没有表现出优越性能时，具有广泛的应用性。但是采用单一 SVR 进行预测研究时，由于其对参数较为敏感，因此 SVR 的惩罚系数、核函数等参数的不同选择会使结果产生较大的变动 (Zhang and Hong, 2021)，相同的时间序列采用不同的参数会得到差别较大的预测结果。因此，需要选择合适的回归参数才能获得较为精确的预测结果。通常，支持向量机回归算法的参数寻优过程多数使用网格搜索法 (grid search, GS)，具有耗时长、计算量大等缺点，遗传算法 (genetic algorithm, GA) (Wang et al, 2016)、粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) (冯瀚等, 2014) 等这些优化算法在寻优过程中常常会不同程度地陷入局部最优，也难以达到理想的预测效果。

传统预测方法对已知空间区域内的预测表现较好，但对于未来增长趋势的预测，本文提出的麻雀搜索算法能够加快收敛速度，克服 SVR 单一模型参数选择较为敏感的问题，从而提升求解精度。因此，本文使用 SSA 优化 SVR (sparrow search algorithm-support vector regression, SSA-SVR) 对北京市氢燃料电池汽车发展潜力进行预测。具体模型构建的流程图如图 2 所示。

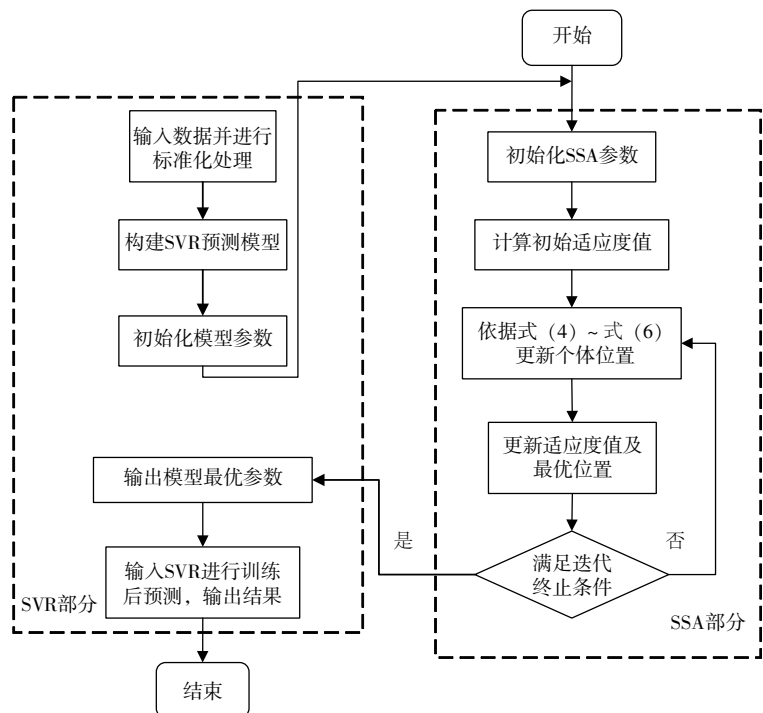


图 2 基于 SSA-SVR 模型构建流程图

(二)实证分析

1. 情景设置

情景分析法(scenario analysis)(Li et al, 2022)是通过设想、预测、模拟等手段对未来发展态势进行可能性描述的方法,在能源规划领域有着较为广泛的应用。该方法可以考虑不同因素对预测主体的影响,设定各影响因素发展的不同情况。本文通过相关性分析确定情景分析的关键驱动因素,通过设定不同情景下的因素发展水平,预测多情景下北京市氢燃料电池汽车的发展潜力。

(1)相关性分析。本文采用皮尔逊相关系数法(张姍等, 2022),借助 SPSS Statistics 26 软件工具,对四种影响因素与预测目标之间的相关性进行检验。已知 $(x_i, y_i)(i = 1, 2, \dots, n)$ 是来自总体 (X, Y) 的样本。则样本皮尔逊相关系数的计算如式(7)所示。

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

其中: $r_{x,y}$ 为样本 x_i 和 y_i 的皮尔逊相关系数; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 和 $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 是样本 x_i 和 y_i 的均值。

本文对人均GDP、政府补贴、加氢站数量、续航里程4个指标进行相关性分析,4种因素相关性分析结果见表1。通过皮尔逊相关系数法,可进一步分析出某些维度对输出影响较大。其中,0.8~1.0表示极强相关,0.6~0.8表示强相关,0.4~0.6表示中等程度相关,0.2~0.4表示弱相关,0.0~0.2表示极弱或无相关。V1~V4四种因素均与输出目标呈现较强的相关性。因此,本文将人均GDP、政府补贴、加氢站数量与续航里程作为影响指标进行情景设置与预测模型的输入。

(2)不同情景下的参数设置。本文基于经济发展、政府政策、基础条件与技术进步4种驱动因素的发展情景,根据氢燃料电池汽车发展态势分为乐观情景、基准情景与保守情景三种研究情景进行分析,见表2。

①经济发展。北京市经济的增长是氢燃料电池汽车行业不可或缺的因素,经济的发展为交通行业的发展奠定了经济基础,除此之外,经济发展需要交通行业的支撑。GDP是推动消费增长的主要因素,为了简化研究,本文仅引入人均GDP这一变量。

②政府政策。国家“十四五”规划明确了加大财政科技经费投入力度、激励企业增加研发投入等措施,体现了把创新摆在现代化建设全局核心位置的导向。政府支持对任何新产业来说都是至关重要的,今天的能源行业处于多元化竞争的局面,持续发展在需要各种能源自身的竞争力的基础上,补贴金额与补贴期也是重要一环。在2009年发布的《节能与新能源汽车示范推广财政补助资金管理暂行办法》中,燃料电池汽车与混合动力汽车、纯电动汽车一起被纳入补助对象。近年来,国家不断在政策层面引导氢燃料电池汽车的发展,不仅制定了各时间节点的量化目标,补贴不退坡更是成为发展燃料电池汽车的重要推动力。

③基础条件。加氢站主要用于氢燃料汽车氢气加注,是联系产业链上游制氢和下游应用的重要枢纽,高密度的加氢站建设是氢燃料汽车大规模推广的必备条件,是氢能产业重要的基础设施,从加氢站的数量变化、分布情况可以看出氢燃料电池汽车发展动态变化情况。2022年4月,北京市人民政府发布了《北京市“十四五”时期城市管理发展规划》,规划提出2025年前建成投运74座加氢站,其中2023年前建成并投运37座,形成布局合理、适度超前、供需匹配、安全有序的加氢站供给保障体系。

④技术进步。氢燃料电池中的氢气是能量密度较高的能源,这样的特性让氢燃料电池汽车拥有补能快、续航长的优势。据公开资料说明,目前中国氢燃料电池汽车商用车的续航里程保持在400千米左右,重型商用车要实现新能源化,续航里程表现尤为重要,作为消费因素之一,对购买力的有相当的影响作用。

本文根据影响氢燃料电池汽车发展的各因素设定高、中、低三种值,提出了三种未来发展情景,表3为情景设置具体参数值。

表1 相关性分析

输入指标	Y-输出目标	相关性
V1	0.953	极强相关
V2	0.405	中等相关
V3	0.777	强相关
V4	0.972	极强相关

注:V1为人均GDP;V2为政府补贴;V3为加氢站数量;V4为续航里程4种因素。

表2 情景分析

情景设置	情景分析
基准情景	基于当前因素发展趋势及国家现定发展规划,以政策目标为主要依据,不考虑其他影响变动,保持现有发展进程
乐观情景	在原有政策目标基础上增加发展推动力度,氢燃料电池汽车发展进程将明显加快
保守情景	在基准情景发展基础上减轻国家负担,放缓增速

表 3 情景设置参数

情景设置	因素			
	人均 GDP	政府补贴	加氢站建设数量	续航里程
基准情景	年均变化速率	占地区生产总值比重	规划时期年均增长率	我国中长期续航里程目标
乐观情景	+1%	+10%	+1%	参照日本
保守情景	-1%	-10%	-1%	参照日本

2016—2021 年北京市人均 GDP 年均增长率为 8.32%，在经济发展情景设置中，依据往年的年均变化速率，可以推测出 2022—2030 年人均 GDP 将其设定为基准情景，乐观发展与保守发展模式下的人均 GDP 在此基础上每年段增速分别增加或降低 1%，计算得到相应变化率(王韶华等, 2021)。

从 2009 年开始，燃料电池汽车与混合动力汽车、纯电动汽车一起被纳入补助对象。随着氢燃料电池汽车技术逐步趋向成熟和中央补贴政策的变化，部分省市在地方性新能源汽车补贴政策上将燃料电池汽车与纯电动汽车区别开来。基准情景下氢燃料电池汽车商用车的补贴金额按照国家对燃料电池商用车补贴金额设定，乐观情景与保守情景下的补贴金额，依据国家过去发布的补贴退坡规划升降标准 10% 计算。

基准情景下至 2030 年加氢站建设数量依据北京市“十四五”规划时期年均增长率设定，目前加氢站处于产业发展的前期，补贴力度较大，随着技术进步和规模效应，加氢站的建设成本有望下降，建设数量进一步增加。因此，本文假定乐观发展与保守发展情景下未来每年段在基准情景上增加或降低 1%。

中国汽车工程学会、中国经济网、新华社《经济参考报》及现有文献(刘世闯等, 2021)提出我国氢燃料电池汽车商用车当前续航里程参数目标约为 400 千米，为基准情景下采用平均法得到我国 HFCV 续航里程发展提出了更为明确的要求与指引。对氢燃料汽车的研发和商业化应用进行追根溯源发现，日本曾经是最早研发和专利布局、最先进行商业化推广的国家。由日本媒体对氢动力汽车相关报道可知：2014 年，日本以第一款商用氢动力汽车—丰田 Mirai 问世；2016 年，本田推出了 Clarity；2020 年 12 月 9 日，丰田宣布第二代 MIRAI 正式在日本市场上市，最高续航里程可达 850 千米(WLTC 标准)。因此，本文参照日本氢燃料电池汽车续航里程设定我国的乐观发展情景，保守发展情景下的续航里程参照日本相应年份设定 2030 年为 480 千米。

2. 基于 SSA-SVR 的北京市氢燃料电池汽车多情景发展潜力预测分析

本文选择经济发展、政府政策、技术进步与基础条件 4 种驱动因素作为北京市氢燃料电池汽车发展潜力预测的影响因素，分别将人均 GDP、政府补贴、加氢站数量及续航里程作为具体影响指标。本文使用来源于国家统计局、北京汽车工业协会、《北京统计年鉴》中 2016—2021 年有关数据，采用平均法得到部分缺失数据后进行分析。

(1)数据预处理。由于可采用样本有限，为提高预测精确度，本文采用数据增强方法来帮助算法更好学习小样本特征。数据增强是一种数据扩充技术，指的是利用有限的的数据创造尽可能多的利用价值，本文使用有限的的数据产生较多等价数据后进行数据训练，既可缓解数据量较小问题，也可提升模型稳健性。

数据标准化处理是数据分析与研究的基础性工作，由于不同指标通常具有不同的量纲。因此，本文采用 Z-score 标准化方法进行数据预处理，以解决数据指标之间的量纲影响。Z-score 标准化基于原始数据的均值与标准差进行数据的标准化，经处理的数据符合正态分布，转化函数如式(8)所示。

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \tag{8}$$

其中： μ 为总体数据的均值； σ 为总体数据的标准差； x 为个体的观测值。

(2)参数设置。确定模型结构，初始化参数。根据上文情景设置，将数据增强后的 4 个因素对应数据作为模型输入指标，进而预测北京市 2022—2030 年氢燃料电池汽车发展潜力，将其作为输出指标进行模型搭建，SSA-SVR 模型参数设置见表 4。

(3)预测结果分析。本文基于乐观情景、基准情景、保守情景的 3 种情景设置，运用 SSA-SVR 智能预测方法，分别结合氢燃料电池汽车商用车的经济发展、政府政策、基础条件、技术进步四方面因素与氢燃料电池汽车商用车发展潜力之间的动态关系，对北京市 2022—2030 年氢燃料电池汽车商用车的发展分别进行单一因素与综合因素作用下的情景预测。

表 4 模型参数设置

模型	参数	值
SSA-SVR	迭代次数	100
	种群数量	20
	发现者比例	0.8
	警戒者比例	0.2
	C	9.96
	Epsilon	0.01

注：C 为惩罚参数；Epsilon 为偏差容忍度系数。

①北京市HFCV商用车发展潜力预测。基准情景下,本文基于当前因素发展趋势及国家现定发展规划,以政策目标为主要依据,对北京市2022—2030年氢燃料电池车型总体保有量进行发展潜力进行预测,结果如图3所示。

以北京市氢燃料电池汽车未来市场潜力为预测目标,本文结合相似车型发展认为,预计北京市在2025年商用车与乘用车类型占比达到7:3,预计到2035年达到1:1发展,在此设定下,各年间的车型比例依据平均法逐年算出。因此,在基准情景下,基于当前因素发展趋势及国家现定发展规划,保持现有发展进程时,本文得出,北京市2022—2030年的氢燃料电池汽车商用车未来市场需求预测见表5。

②多情景预测结果分析。在单一因素作用下,本文分别考虑了经济发展、政府政策、基础条件、技术进步四方面影响因素,以变动一种因素,其他因素保持基准发展为原则,对北京市氢燃料电池汽车总体保有量未来市场发展潜力进行预测。为了更直观地显示单一因素变化对结果的变动影响,将2022—2030年北京市氢燃料电池汽车市场需求预测值绘制于图4(a)~图4(d)中进行结果可视化。

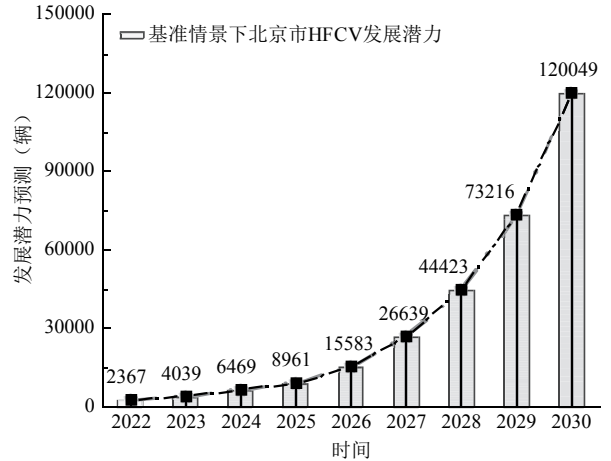
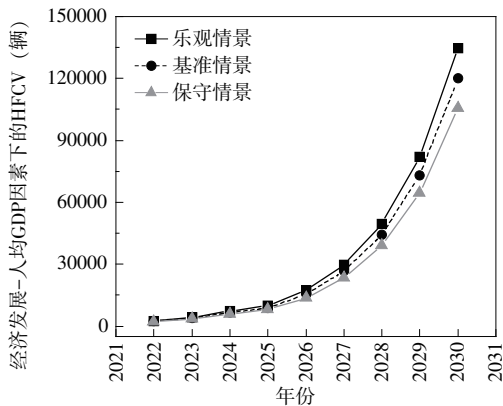


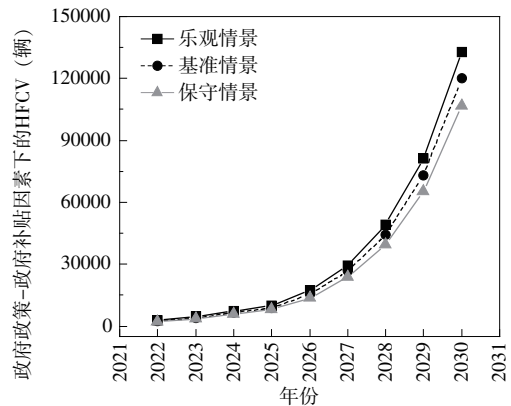
图3 基准情景下北京市HFCV发展潜力预测

表5 基准情景下氢燃料电池汽车商用车预测

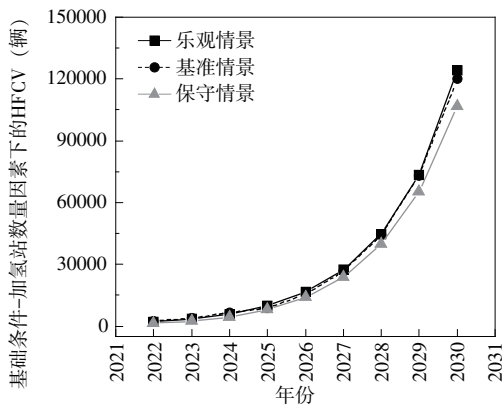
时间	预测数量(辆)
2022	2189
2023	3433
2024	5013
2025	6273
2026	10596
2027	17582
2028	28431
2029	45394
2030	72030



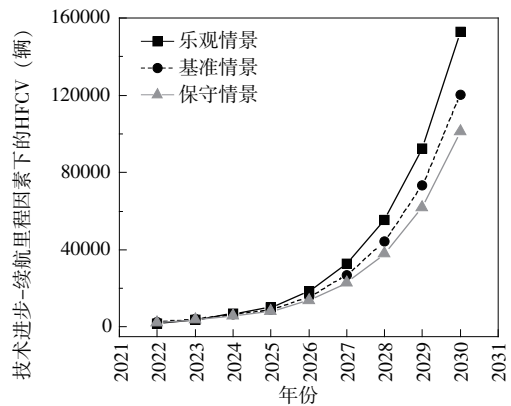
(a) 经济发展-人均GDP



(b) 政府政策-政府补贴



(c) 基础条件-加氢站数量



(d) 技术进步-续航里程

图4 单一变量情景预测可视化

由图 4 可知,分别考虑人均 GDP、政府补贴、加氢站建设数量与续航里程时,经过 SSA-SVR 智能预测,每种因素的影响都使北京市氢燃料电池汽车发展呈现或快或慢的增长趋势。

在单一因素预测的基础上,本文考虑了四种影响因素共同作用对氢燃料电池汽车总体车型发展潜力的影响。因此进行综合因素变动下的预测,预测结果如图 5 所示。针对氢燃料电池商用车的预测,现依据上文分析商用、乘用车比例进一步计算得出,见表 6。据本文预测,到 2030 年,乐观情景与保守情景下的北京市氢燃料电池汽车商用车发展将分别达到 74326 辆与 62021 辆。

③发展趋势评估。基于上文的预测结果,本文采用 Sen's 斜率估计法进行结果讨论,Sen's 斜率估计是在 20 世纪中期提出,而后逐步发展的一种估计数据趋势斜率的非参数检验法。

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

其中: x_j 和 x_k 分别是第 j 个和 k 个样本的时间序列值($j > k$), $N = \frac{n(n-1)}{2}$ 。

将 N 个 Q_i 值从小到大排列,则中值 Sen's 斜率估计为

$$Q_{\text{med}} = \begin{cases} Q_{[(N+1)/2]}, & N \text{ 为奇数} \\ \frac{Q_{[N/2]} + Q_{[(N+2)/2]}}{2}, & N \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (10)$$

其中: Q_{med} 反映数据趋势的陡峭程度, Q_{med} 大于 0 表明样本有向上的趋势,反之为下降趋势。

单一变量情景预测能够更清晰地反映出单个变量在不同情景下对未来北京市氢燃料电池汽车商用车发展的影响程度,基准情景下的预测基于当前因素发展趋势及国家现定发展规划,以政策目标为主要依据,保持现有发展进程。在单一变量情景预测中,本文将以预测结果为导向,分别分析乐观情景下与保守情景下因素的影响程度。由 Sen's 斜率估计法分别计算乐观情景与保守情景下的 4 种影响因素对氢燃料电池汽车商用车变动影响的斜率,估计发展趋势幅度,结果见表 7。

由表 7 可知,通过 Sen's 斜率估计法,基于乐观情景下,技术进步因素对北京市氢燃料电池汽车商用车发展潜力影响程度最大,经济发展因素与政府政策基本一致,基础条件影响最小。因此,在未来几年的中长期发展中,当以乐观情景下的氢燃料电池汽车发展为目标时,应着重考虑发展技术进步因素。基于保守情景下,基础条件对此发展模式呈现出重要影响力,可作为在保守情景下推动氢燃料电池汽车快速发展的首要因素,政府政策因素次之,经济发展与技术进步因素影响程度基本一致。同样地,在未来中长期发展中若想放缓氢燃料电池汽车发展幅度,则应首要降低基础条件的支持力度。

基于对北京市氢燃料电池汽车商用车型的发展分析,同样地,运用 Sen's 斜率估计法可以得出在乐观情景下,若北京市想大力发展氢燃料电池汽车总体车型,应着重运用技术因素

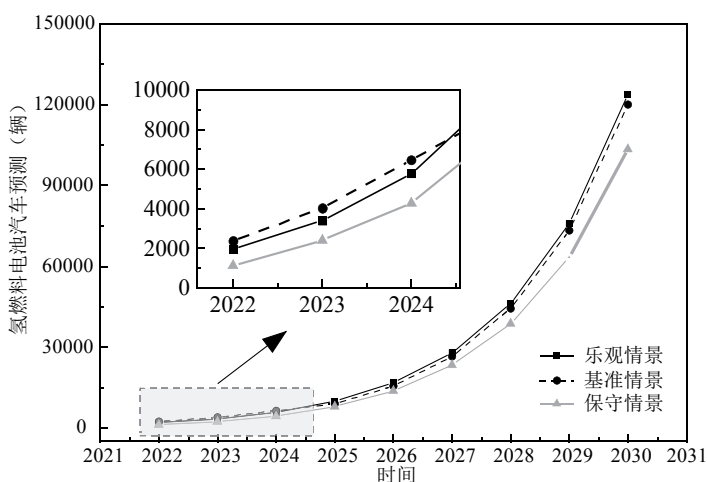


图 5 综合情景下北京市氢燃料电池汽车发展潜力预测

表 6 综合因素作用预测结果

年份	乐观情景(辆)	保守情景(辆)
2022	1801	1045
2023	2899	2051
2024	4486	3330
2025	6982	5574
2026	11424	9421
2027	18495	15437
2028	29548	24763
2029	46994	39313
2030	74326	62021

表 7 Sen's 斜率估计法计算结果

情景及幅度	经济发展 (人均 GDP)	政府政策 (政府补贴)	基础条件 (加氢站数量)	技术进步 (续航里程)
乐观情景	7377.49	7277.95	6509.13	8491.50
影响幅度	2	3	4	1
保守情景	5779.63	5857.92	5917.42	5540.36
影响幅度	3	2	1	4

提升氢燃料电池汽车发展速度,保守情景下,基础条件对放缓发展幅度影响最大。

四、北京市氢燃料电池汽车发展建议

作为氢能源的主要应用场景,氢燃料电池产业将成为我国发展氢能的重点方向。发展氢燃料电池汽车需要结合我国能源转型的需要,基于政策引导和技术水平,科学合理布局发展重点。既要发挥氢燃料电池的绿色低碳效益,利用其环境价值与使用发展价值,形成北京市新的经济增长点,同时也要兼顾技术水平,解决氢燃料电池汽车由于成本高、技术不成熟等问题。统筹多方资源和力量,共同促进氢燃料电池汽车产业的健康有序地发展。

本文以当前中国及北京市氢能产业政策为导向,结合碳达峰与碳中和的战略发展背景,对北京市2022—2030年氢燃料电池汽车发展潜力进行预测研究。本文基于4种驱动因素,利用SSA对SVR进行参数寻优,建立SSA-SVR智能预测模型,对乐观情景、基准情景与保守情景三种研究情景下的北京市氢燃料电池汽车发展潜力进行预测分析,并采用Sen's斜率估计法对不同情景下的指标重要性进行评估。通过研究,本文主要得出以下几点结论:

(1)针对传统回归算法的不足,使用麻雀搜索算法优化支持向量机回归对北京市2022—2030年氢燃料电池汽车总体发展潜力进行预测,与未优化的SVR预测模型相比,SSA-SVR较好模拟了北京市燃料电池汽车的可能增长趋势,为未来中长期的氢燃料电池汽车总体发展与氢燃料电池商用车发展分析建立较为合理支持。

(2)结合情景分析方法与氢燃料电池汽车发展的驱动因素,将发展态势分为乐观情景、基准情景与保守情景,能够考虑不同因素对预测主体的影响,从而增强预测的全面性。在乐观情景下,技术进步因素对北京市氢燃料电池汽车商用车发展潜力影响程度最大。在保守情景下,基础条件可作为在保守情景下推动氢燃料电池汽车商用车型快速发展的首要因素。

结合已有的分析和研究结果,本文对北京市氢燃料电池汽车未来发展提出几点发展建议:

(1)北京市政府应优化氢能发展的政策和法规,持续稳定地推动氢燃料电池汽车产业的有序发展。氢燃料电池汽车是氢能应用中的重要场景,也是我国新能源汽车发展的重要方向之一。政府应持续推进氢燃料电池汽车的发展,通过资金安排、技术研发等措施,并出台相关的政策支持产业有序发展,大力培养行业内龙头企业,稳步推进相关技术和产业的发展。北京市应针对氢燃料电池技术研发、示范运行、设施建设等关键环节,制定相应的支持政策,保障氢燃料电池汽车发展环境一体化。同时针对现阶段氢燃料电池汽车尚未形成商业化运营、资金需求量大的特点,加大资金投入与政府补贴力度,组建氢燃料电池汽车发展专项基金。

(2)在示范应用推广中,逐步解决成本高和核心技术等问题。我国氢燃料电池仍然存在核心技术尚未国产化等问题,导致各环节的成本相对较高。尽管近两年氢燃料各环节技术正在发展,成本下降趋势已形成。但与国外仍存在较大差距。目前国内外在氢能技术、燃料电池技术方面已经形成一批优势企业,并且开始燃料电池汽车小批量生产和示范运行。北京市可以选择引进优质企业,通过技术整合、企业并购等方式组建汽车企业与燃料电池研发企业协同发展,提升氢燃料电池汽车技术发展水平。同时,积极开展校院合作,围绕高校的优势学科领域,建立氢燃料电池汽车高校创新中心、产学研联合实验平台等,开展高校优势领域技术合作,完善氢燃料电池汽车性能。

(3)合理安排产业布局,形成京津冀氢能产业聚集区域。氢燃料电池汽车企业作为发展较快的氢能产业,已初步具备了产业化的条件。在京津冀地区已经形成了较为完善的氢燃料电池研发、生产、应用等产业链条。京津冀地区经济较为发达,央企、科研院校等较为聚集,创新能力较强。可以作为氢燃料电池研发和应用的主要区域,充分利用张家口等地区风电资源制氢,合理布局加氢站等基础设施,形成优势互补、协调创新的产业发展模式。

参考文献

- [1] 杜忠明,郑津洋,戴剑锋,等,2022.我国绿氢供应体系建设思考与建议[J].中国工程科学,24(6):64-71.
- [2] 冯瀚,刘冰漪,张玉鸿,等,2014.基于FCM和PSO-SVM的电力工程造价预测模型研究[J].华东电力,42(12):2713-2716.
- [3] 高助威,李小高,刘钟馨,等,2022.氢燃料电池汽车的研究现状及发展趋势[J].材料导报,36(14):74-81.

- [4] 韩利, 李琦, 冷国云, 等, 2022. 氢能储存技术最新进展[J]. 化工进展, 41(S1): 108-117.
- [5] 霍娟, 孙晓伟, 张明杰, 2019. 电力负荷预测算法比较-随机森林与支持向量机[J]. 电力系统及其自动化学报, 31(7): 129-134.
- [6] 贾凌云, 云斯宁, 赵泽妮, 等, 2022. 神经网络短期光伏发电预测的应用研究进展[J]. 太阳能学报, 43(12): 88-97.
- [7] 李建林, 李光辉, 马速良, 等, 2021. 氢能储运技术现状及其在电力系统中的典型应用[J]. 现代电力, 38(5): 535-545.
- [8] 李顺昕, 汲国强, 康辉, 等, 2019. 冀北地区年度最大负荷的支持向量机建模预测[J]. 科学技术与工程, 19(36): 179-183.
- [9] 李跃娟, 赵梓茗, 姚占辉, 等, 2022. 中国典型区域车用氢能源产业及经济性分析[J]. 北京工业大学学报, 48(3): 331-344.
- [10] 刘春娜, 2013. 国外氢燃料电池车最新研究动态[J]. 电源技术, 37(4): 534-535.
- [11] 刘世闯, 孙桓五, 王瑞鑫, 等, 2021. 大功率型氢燃料电池重卡动力系统匹配设计[J]. 汽车工程, 43(2): 196-203.
- [12] 马飞燕, 李向新, 2022. 基于改进麻雀搜索算法-核极限学习机耦合算法的滑坡位移预测模型[J]. 科学技术与工程, 22(5): 1786-1793.
- [13] 王菊, 尤可为, 于丹, 2013. 燃料电池公共汽车在北京和上海载客示范评价[J]. 汽车技术, (10): 19-22.
- [14] 王韶华, 刘晔, 张伟, 2021. 京津冀碳排放强度影响因素的动态效应分析及情景预测[J]. 城市问题, (5): 42-51.
- [15] 问朋朋, 黄明宇, 倪红军, 等, 2012. 燃料电池车发展概况及展望[J]. 电源技术, 36(4): 596-598, 610.
- [16] 殷卓成, 王贺, 段文益, 等, 2022. 氢燃料电池汽车关键技术研究现状与前景分析[J]. 现代化工, 42(10): 18-23.
- [17] 殷卓成, 杨高, 刘怀, 等, 2021. 氢能储运关键技术研究现状与前景分析[J]. 现代化工, 41(11): 53-57.
- [18] 张红, 袁铁江, 谭捷, 2021. 统一能源系统氢负荷中长期预测[J]. 中国电机工程学报, 41(10): 3364-3372, 3662.
- [19] 张姗, 冬雷, 纪德洋, 等, 2022. 基于NWP相似性分析的超短期光伏发电功率预测[J]. 太阳能学报, 43(4): 142-147.
- [20] 张子阳, 王珂珂, 2022. 基于灰色关联和麻雀搜索算法的电力负荷预测[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 41(3): 283-288.
- [21] ALANNE K, CAO S L, 2017. Zero-energy hydrogen economy(ZEH(2)E)for buildings and communities including personal mobility[J]. Renewable&Sustainable Energy Reviews, 71: 697-711.
- [22] APAK S, ATAY E, TUNCER G, 2017. Renewable hydrogen energy and energy efficiency in Turkey in the 21st century[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 42(4): 2446-2452.
- [23] BETHOUX O, 2020. Hydrogen fuel cell road vehicles and their infrastructure: An option towards an environmentally friendly energy transition[J]. Energies, 13(22): 6132.
- [24] DAWOOD F, ANDA M, SHAFIULLAH G M, 2020. Hydrogen production for energy: An overview[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 45(7): 3847-3869.
- [25] DUAN H M, PANG X Y, 2021. A multivariate grey prediction model based on energy logistic equation and its application in energy prediction in China[J]. Energy, 229: 120716.
- [26] HAO H, MU Z X, LIU Z W, et al, 2018. Abating transport GHG emissions by hydrogen fuel cell vehicles: Chances for the developing world[J]. Frontiers in Energy, 12(3): 466-480.
- [27] IGHRAVWE D E, MASHAO D, 2021. Analysis of support vector regression kernels for energy storage efficiency prediction [J]. Energy Reports, 6: 634-639.
- [28] KAST J, VIJAYAGOPAL R, GANGLOFF J J, et al, 2017. Clean commercial transportation: Medium and heavy duty fuel cell electric trucks[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 42(7): 4508-4517.
- [29] KAVOUSI-FARD A, KAVOUSI-FARD F, 2013. A new hybrid correction method for short-term load forecasting based on ARIMA, SVR and CSA[J]. Journal of Experimental&Theoretical Artificial Intelligence, 25(4): 559-574.
- [30] LI Z, ZHANG W D, ZHANG R, et al, 2020. Development of renewable energy multi-energy complementary hydrogen energy system(a case study in China): A review[J]. Energy Exploration & Exploitation, 38(6): 2099-2127.
- [31] LI D H W, YANG L, LAM J C, 2013. Zero energy buildings and sustainable development implications—A review [J]. Energy, 54: 1-10.
- [32] LI Z, HOU S D, CAO X, et al, 2021. Modeling and analysis of hydrogen storage wind and gas complementary power generation system[J]. Energy Exploration & Exploitation, 39(4): 1306-1323.
- [33] LI H, REN Z Y, FAN M, et al, 2022. A review of scenario analysis methods in planning and operation of modern power systems: Methodologies, applications, and challenges[J]. Electric Power Systems Research, 205: 107772.
- [34] LIMA M A F B, RAMIREZ L M F, CARVALHO P C M, et al, 2021. A comparison between deep learning and support vector regression techniques applied to solar forecast in Spain[J]. Journal of Solar Energy Engineering—Transactions of the ASME, 144(1): 010802.
- [35] LIU F Q, ZHAO F Q, LIU Z W, et al, 2018. The impact of fuel cell vehicle deployment on road transport greenhouse gas emissions: The China case[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 43(50): 22604-22621.

- [36] LIU X T, ZHANG S Y, DONG J, et al, 2017. A short-term analysis of hydrogen demand and refueling station cost in Shenzhen China[J]. *Energy Procedia*, 104: 317-322.
- [37] LONG B, WU K P, LI P C, et al, 2022. A novel remaining useful life prediction method for hydrogen fuel cells based on the gated recurrent unit neural network[J]. *Applied Sciences-Basel*, 12(1): 432.
- [38] MA T, JI J, CHEN M Q, 2010. Study on the hydrogen demand in China based on system dynamics model[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(7): 3114-3119.
- [39] MANOHARAN Y, HOSSEINI S E, BUTLER B, et al, 2019. Hydrogen fuel cell vehicles; current status and future prospect [J]. *Applied Sciences-Basel*, 9(11): 2296.
- [40] MULLER K, ARLT W, 2014. Status and development in hydrogen transport and storage for energy applications[J]. *Energy Technology*, 1(9): 501-511.
- [41] NAGPAL M, KAKKAR R, 2018. An evolving energy solution: Intermediate hydrogen storage[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(27): 12168-12188.
- [42] NGUYEN T T, NGO T G, DAO T K, et al, 2022. Microgrid operations planning based on improving the flying sparrow search algorithm[J]. *Symmetry-Basel*, 14(1): 168.
- [43] RAHMOUNI S, SETTOU N, NEGROU B, et al, 2016. GIS-based method for future prospect of hydrogen demand in the Algerian road transport sector[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4): 2128-2143.
- [44] REN Y, SUGANTHAN P N, SRIKANTH N, 2016. A novel empirical mode decomposition with support vector regression for wind speed forecasting[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 27(8): 1793-1798.
- [45] WANG S X, ZHANG N, WU L, et al, 2016. Wind speed forecasting based on the hybrid ensemble empirical mode decomposition and GA-BP neural network method[J]. *Renewable Energy*, 94: 629-636.
- [46] XU X M, NIU D X, XIAO B W, et al, 2020. Policy analysis for grid parity of wind power generation in China[J]. *Energy Policy*, 138: 111225.
- [47] XU X M, PENG L Y, JI Z S, et al, 2022. Research on substation project cost prediction based on sparrow search algorithm optimized BP neural network[J]. *Sustainability*, 13(24): 13746.
- [48] ZHANG Z C, HONG W C, 2021. Application of variational mode decomposition and chaotic grey wolf optimizer with support vector regression for forecasting electric loads[J]. *Knowledge-Based Systems*, 228: 107297.
- [49] ZHIZNIN S Z, TIMOKHOV V M, GUSEV A L, 2020. Economic aspects of nuclear and hydrogen energy in the world and Russia[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56): 31353-31366.

Analysis on Development Potential of Hydrogen Fuel Cell Vehicle in Beijing

Xu Xiaomin, Peng Luyao, Ji Zhengsen, Zheng Shipeng, Guan Xinyu, Cui Haoxu

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Hydrogen energy has significant advantages such as abundant sources and efficient conversion, and has good application prospects in the fields of industry and transportation. The future market potential of hydrogen fuel cell commercial vehicles in Beijing was taken as the prediction target, and three scenarios of optimistic scenario, optimistic scenario, baseline scenario and conservative scenario were set up. An intelligent prediction model of the development potential of hydrogen fuel cell vehicles in Beijing based on sparrow search algorithm optimized support vector regression (SSA-SVR) was constructed to predict the future market demand of hydrogen fuel cell vehicles in Beijing from 2022 to 2030 and put forward relevant suggestions. The results show that SSA-SVR intelligent prediction model can overcome the sensitive problem of single model parameter selection, and effectively predict the development potential of hydrogen fuel cell commercial vehicles in Beijing through parameter optimization. In the optimistic scenario, technological progress has the greatest impact on the development potential of hydrogen fuel cell commercial vehicles in Beijing. In the conservative scenario, basic conditions can be used as the primary factor to promote the rapid development of hydrogen fuel cell commercial vehicles.

Keywords: hydrogen application scenarios; scenario analysis; intelligent prediction; hydrogen fuel cell vehicles; development potential