

基于系统动力学的交通领域氢能需求预测

周 专¹, 苗 帅², 袁铁江²

(1. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:为预测“双碳”目标下氢能的需求,充分挖掘与氢能需求相关的影响因素,构建了基于系统动力学的交通领域氢能需求预测系统。绘制了交通领域氢能需求预测系统的因果关系图和系统流图,重点考虑公共汽车、重型卡车和家用汽车的氢能替代,通过历史数据检验模型的有效性,以新疆地区为例,设置低速、中速、高速3个发展水平来分析政策支持 and 经济投入对交通领域氢能需求的影响。模拟结果表明,交通领域的转型在2030年前发展得较为缓慢,政策和经济投资的影响在之后会逐渐明显,发展水平越高各类交通工具的增长幅度会越来越大,至2050年高速发展水平下的平均氢能替代率会达到低速发展水平下的2.2倍,高速发展水平下的售氢回报会达到低速发展水平下的2.5倍。

关键词:交通领域;系统动力学;需求预测;发展水平分析;氢能替代

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202309020

0 引言

随着社会经济的不断发展,交通运输需求随之增加,使得交通领域对石油的消耗不断增加,二氧化碳的排放量大幅提升^[1]。二氧化碳是造成全球变暖的主要原因,全球升温已经对人类的生存环境产生了严重危害,如农作物减产、海洋酸化、极端天气频繁等。为积极应对气候变化,我国提出了碳达峰和碳中和目标。通过风、光等可再生能源电解得到绿氢,将其作为无碳原料,绿氢是推动能源转型的重要载体,可以有效减少交通领域用氢造成的碳排放,具有实现二氧化碳深度减排的潜力,从而应对气候变化,促进交通领域的深度脱碳^[2]。

目前,国内外学者对交通领域的负荷预测研究主要集中在电动汽车的电力负荷预测方面。例如,文献[3]根据电动汽车的行为特征和充电桩容量,计算电动汽车选用不同容量充电桩的概率,采用蒙特卡罗方法预测电动汽车充电负荷的时空分布。文献[4]基于时空特征变量建立了二维动态交通模型,考虑连续充电与集中充电的形式,对不同时间、不同地点的共享汽车充电负荷进行预测。文献[5]在建立预测模型时考虑不同地区的温度,以保证极端天气的预测精度,通过神经网络对混合预测模型进行实时预测。然而,由于电动汽车的电池能量密度较低,在兼顾电池尺寸和质量时,电动汽车的行驶里程较

短,低温时其续航能力会大幅衰减,并且电动汽车的充放电时间较长,而且其所用的电能大部分来自于火力发电,仍会造成环境污染。

相比而言,氢燃料电池汽车的优势显而易见,由于摆脱了电池重量和体积的束缚,氢燃料电池汽车具有快速加注的能力,其加注时间为8~13 min,具体加注时间会受到加氢站的压力、车辆储氢容量及加注设备性能的影响,并且由于氢气的高能力密度,其续航能力也大幅提升,在低温时具备更好的启动性能,而且氢能具有零排放、零污染的特点,使得氢燃料电池汽车具有广阔的发展前景,从而实现交通领域的低碳转型^[6-7]。当前针对交通领域中氢能需求预测的研究较少,文献[8]将真实数据进行分组,建立基于聚类 and 回归的局部模型预测氢燃料电池消耗的氢气体积。文献[9]考虑氢燃料电池电流的扰动,采用模型预测控制方案,通过动力学模型和能量管理预测燃料电池的功率需求,从而更好地调节氢气的供应和循环。文献[10]考虑阶梯式碳排放费用机制,通过优化耦合设备中热电比的可调性,建立了多时间尺度优化模型,对氢负荷需求进行预测。然而,上述文献中无论是针对电动汽车的电力负荷预测还是针对氢能需求的预测都没有考虑政策、经济发展和氢能供应对其的影响,同时也忽略了不同发展水平下的发展进程。

针对以往研究的不足,为了全面地分析交通领域氢能的发展规模,尤其是在“双碳”目标背景下,分析政策激励和经济投入对氢能发展的影响是十分重要的。交通领域氢能的发展与社会、经济、环境等多方面因素有关,氢能交通工具处于发展初期,容易受到各个因素的影响,并且由于缺乏足够的历史数据,通过常规的方法预测未来的氢能需求是十分困难的。而系统动力学从整体的角度出发,着重分析系

收稿日期:2023-04-19;修回日期:2023-07-22

在线出版日期:2023-09-27

基金项目:国网新疆电力有限公司科技项目(SGXJ0000FCJS2200443)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. (SGXJ0000FCJS2200443)

统中各因素的相互作用和反馈机制,考虑各因素间的时延效应和动态行为,从而描述复杂系统的动态行为,并且该方法可以评估不同政策对系统结果的影响,为未来分析氢能需求提供了一种系统性的分析方法^[11]。为此,本文从系统角度出发对交通领域的氢能需求进行预测,在确定交通领域氢能需求的影响因素及其因果关系的基础上建立系统动力学模型,研究不同因素影响下的效果。以新疆地区为例,对“双碳”目标背景下的氢能需求进行动态仿真,设置不同的发展水平,通过改变相关要素探究不同发展水平下交通领域中氢能需求的变化,为交通领域的绿色转型和“双碳”目标的实现提供科学依据。

1 系统动力学模型

1.1 建模流程

通过对交通网络中影响氢能需求的因素进行全面分析,梳理要素间的因果关系,绘制系统流图。根据交通领域氢能需求预测模型进行模拟与有效性分析,预测交通领域的氢能需求^[12],建模流程见图1。

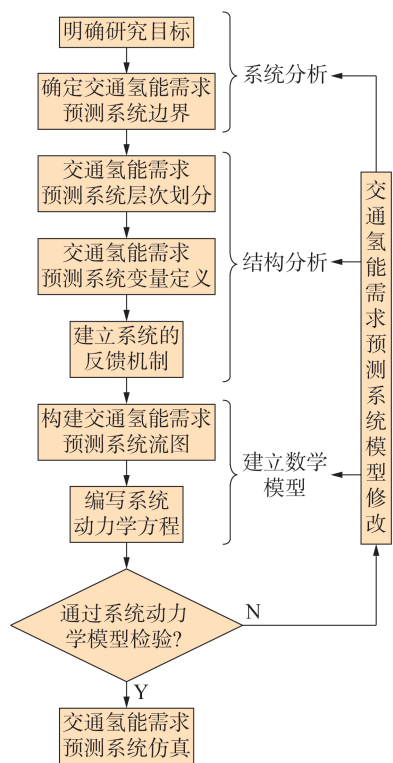


图1 交通领域氢能需求预测模型的构建流程

Fig.1 Construction process of hydrogen demand prediction model in transportation field

1.2 系统边界确定

确定模型边界是使用系统动力学方法建模的前提。交通领域氢能需求系统是一个动态的复杂系统,与地区经济发展、不同类型交通工具对氢能的需求量、氢供应能力等密切相关。地区经济、人口和相

关政策影响着交通领域中各种交通工具对氢能的供需情况以及系统的运行,故将其作为系统的输入。重点考虑氢能源公共汽车、氢能源重型卡车和家用氢燃料汽车对氢能的终端消耗,并以此计算交通领域的氢能需求,将氢能需求量作为系统的输出。最后将模型的时间边界设定为2017—2050年,对交通领域的氢能需求进行模拟分析。

1.3 因果关系分析

本文考察10个状态变量、14个速率变量、19个常量、33个辅助量和3个外生变量,通过因果链描述交通领域中氢能需求要素间的关系,绘制出因果回路图,具体变量定义见附录A表A1。经济增长会增加相关部门对交通方面的投资,导致各种交通工具保有量和出行量的增加。在新能源政策的推动下,会加快新能源制氢技术的提升以及新能源交通工具占比的增加,从而降低制氢成本,提升供氢能力,以满足不断增加的氢能需求。此外,由于家用汽车的数量较多,为更准确地预测家用氢燃料汽车的数量,考虑出行成本对家用汽车增量的影响,分析停车位收费对家用氢燃料汽车增量的影响。交通领域氢能需求预测系统因果回路图如图2所示。图中:“+”“-”分别表示某一因素对另一因素具有积极和消极的影响。

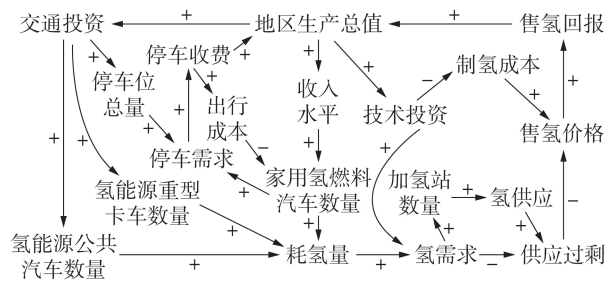


图2 交通氢能需求预测系统因果回路图

Fig.2 Causal loop diagram of traffic hydrogen demand prediction system

绘制出因果关系图后,需要对系统内部各要素间的因果关系进行分析。模型中的主要反馈回路有如下4条。

1) 地区生产总值 $\xrightarrow{+}$ 交通投资 $\xrightarrow{+}$ 停车位总量 $\xrightarrow{+}$ 停车需求 $\xrightarrow{+}$ 停车收费 $\xrightarrow{+}$ 地区生产总值(正反馈)。

地区生产总值的增加会带来更多的资源配置,这会促使政府加大对交通设施的投资,以提高通勤效率。该回路参考文献[13]的思想,考虑停车收费产生的出行成本对家用汽车数量的影响,日益增加的停车需求会不断增加停车收益,而停车收益增加会促进地区生产总值的增加。

2) 地区生产总值 $\xrightarrow{+}$ 交通投资 $\xrightarrow{+}$ 氢重型卡

车数量 / 氢能源公共汽车数量 $\xrightarrow{+}$ 耗氢量 $\xrightarrow{+}$ 氢需求 $\xrightarrow{+}$ 售氢回报 $\xrightarrow{+}$ 地区生产总值(正反馈)。

在新能源政策的激励以及交通投资的资金支持下,各种新能源交通工具的数量日益增加,对氢能的需求也大幅增加。氢能需求的增加会促进加氢站的持续建设,以保证氢能供应的充足,随着售氢回报的增加,地区生产总值也不断增加。

3) 地区生产总值 $\xrightarrow{+}$ 收入水平 $\xrightarrow{+}$ 氢燃料汽车数量 $\xrightarrow{+}$ 耗氢量 $\xrightarrow{+}$ 氢需求 $\xrightarrow{+}$ 售氢回报 $\xrightarrow{+}$ 地区生产总值(正反馈)。

新能源汽车的普及和收入水平的提升会刺激居民购买家用氢燃料汽车的需求,为保证居民出行的需要,加氢站数量及其覆盖范围会不断扩大,从中所得的售氢回报会继续促进经济发展。

4) 地区生产总值 $\xrightarrow{+}$ 技术投资 $\xrightarrow{-}$ 制氢成本 $\xrightarrow{+}$ 售氢价格 $\xrightarrow{+}$ 售氢回报 $\xrightarrow{+}$ 地区生产总值(负反馈)。

随着新能源研发投资的不断增加,可再生能源制氢技术会升级优化,从而减少能源消耗成本以降低制氢的总成本。该回路参考文献[14]的思想,考虑技术升级对氢能供需的影响,当制氢成本降低时,售氢价格会降低并且会刺激氢能需求的增长,通过售氢所得的利润能继续作用于经济的增长。

2 模型方程设计

2.1 系统流图

为了准确描述交通领域中不同的交通工具对氢能需求的累积效应,在因果关系图的基础上,绘制对应的存量流量图,见附录A图A1。由于交通领域中的氢能需求与众多因素有关,在分析过程中考虑主要影响因素,进行以下必要假设:①考虑各类交通工具向可再生能源的转型,将交通领域中氢需求来源分为氢能源公共汽车、氢能源重型卡车和家用氢燃料汽车3类;②后疫情时代社会经济的发展有着一定的不确定性,假定初始方案下经济、人口等因素以低速增长,保持当前的发展模式。

2.2 参数的确定

交通领域氢能需求的系统动力学模型考虑地区生产总值、人口、制氢技术情况、各种新能源交通工具的保有量和出行量等因素。在对模型进行仿真之前,要确定模型中的相关参数。新疆地区生产总值,总人口数量,公共汽车、重型卡车和家用汽车保有量的初始值,出生率和死亡率等数据来源于《新疆省统计年鉴》,出生率和死亡率的取值相对稳定,取值为近10 a数据的平均值^[15]。

参考文献[16]对停车策略的研究,停车场总量的初始值设为汽车数量的1.2倍,停车场的周转率和

使用率为国际基准水平。参考文献[14]和文献[17]中对电解水制氢成本的计算,将制氢成本分为生产成本和运营成本,其中生产成本主要包括水电的费用,运营成本主要包括固定换料和建设成本。参考文献[18]对各类交通工具耗氢水平的评估,将氢能源公共汽车的年行驶里程设为 6.5×10^4 km,平均百千米耗氢3.5 kg;氢能源重型卡车的年行驶里程设为 1×10^5 km,平均百千米耗氢4.5 kg;家用氢燃料汽车的年行驶里程设为 1.7×10^4 km,平均百千米耗氢0.7 kg。关键参数初始值见附录A表A2。

2.3 系统方程确定

1) 停车收费。停车收费与停车需求直接相关,考虑停车收费政策对停车位收费的影响,计算得到总的年停车收费,其中表示重要关系的方程如下:

$$S_{\text{GRP}}^{\text{total}}(t) = \sum_{t=t_0}^T S_{\text{GC}}(t) + S_{\text{GRP}}^{\text{total}}(t_0) + \lambda H_{\text{HB}} \quad (1)$$

$$S_{\text{GC}}(t) = S_{\text{GRP}}^{\text{total}}(t) r_{\text{GRP}}(t) \quad (2)$$

$$P_{\text{TZ}} = T_{\text{JT}} B_{\text{TC}}(t) + P_{\text{SF}} \quad (3)$$

$$P_{\text{XQ}} = S_{\text{TPC}}^{\text{total}}(t) P_{\text{TR}} P_{\text{UR}} \quad (4)$$

$$P_{\text{SF}} = P_{\text{XQ}} (r_{\text{DY}} - Z_{\text{TC}}) \quad (5)$$

$$S_{\text{TPC}}^{\text{total}}(t) = \sum_{t=t_0}^T S_{\text{PI}}(t) + S_{\text{TPC}}^{\text{total}}(t_0) \quad (6)$$

式中: t_0 为初始时间; t 为时间; T 为仿真年限; $S_{\text{GRP}}^{\text{total}}(t)$ 、 $S_{\text{GC}}(t)$ 、 λ 、 H_{HB} 、 $r_{\text{GRP}}(t)$ 分别为地区生产总值、地区生产总值增量、回报系数、售氢回报、地区生产总值增长率, $r_{\text{GRP}}(t)$ 取值来源于《新疆省统计年鉴》; P_{TZ} 、 T_{JT} 、 $B_{\text{TC}}(t)$ 、 P_{SF} 分别为停车位投资、交通投资、停车位投资比重、停车收费; P_{XQ} 、 r_{DY} 、 Z_{TC} 、 P_{TR} 、 P_{UR} 分别为停车需求、需求收益率、停车收费政策因子、停车场周转率、停车场使用率; $S_{\text{TPC}}^{\text{total}}(t)$ 、 $S_{\text{PI}}(t)$ 分别为停车位总量、停车位增量。

2) 氢能源公共汽车的氢需求。公共汽车的增长率与运营线路长度和投资密切相关,基于氢能源公共汽车的出行量和单辆氢能源公共汽车的年耗氢需求,可得到公交的总氢能需求,其中表示重要关系的方程如下:

$$r_{\text{GJ}} = a_1 e^{-b_1 T_{\text{GJ}}} + c_1 L_{\text{BL}} \quad (7)$$

$$S_{\text{BOW}}^{\text{total}}(t) = \sum_{t=t_0}^T (S_{\text{BI}}(t) - S_{\text{BS}}(t)) + S_{\text{BOW}}^{\text{total}}(t_0) \quad (8)$$

$$S_{\text{BI}}(t) = S_{\text{BOW}}^{\text{total}}(t) r_{\text{GJ}} \quad (9)$$

$$S_{\text{BS}}(t) = S_{\text{BOW}}^{\text{total}}(t) r_{\text{BS}} \quad (10)$$

$$H_{\text{BO}} = S_{\text{BOW}}^{\text{total}}(t) B_{\text{HB}}(t) + \gamma_1 Z_{\text{TC}} \quad (11)$$

$$H_{\text{BD}} = H_{\text{BT}} H_{\text{GX}} \quad (12)$$

式中: r_{GJ} 、 T_{GJ} 、 L_{BL} 分别为公共汽车增长率、公共汽车投资、公共汽车运营线路长度; a_1 、 b_1 、 c_1 为回归分析拟合得到的常数; $S_{\text{BOW}}^{\text{total}}(t)$ 、 $S_{\text{BI}}(t)$ 、 $S_{\text{BS}}(t)$ 、 r_{BS} 分别为公共汽车保有量、公共汽车增量、公共汽车报废量、公

共汽车报废率; H_{BO} 、 $B_{HB}(t)$ 分别为公共汽车保有量、公共汽车比重; γ_1 为停车政策系数; H_{BD} 、 H_{BT} 、 H_{GX} 分别为公共汽车氢需求量、公共汽车出行量、单辆公共汽车对氢能的消耗量。

3) 氢能源重型卡车的氢需求。由于以汽油为燃料的重型卡车具有高排放和高污染的特征, 而氢能的能量密度较高, 更适合替代重型内燃车辆, 其中表示重要关系的方程如下:

$$r_{ZK} = a_2 \ln T_{ZK} + b_2 \quad (13)$$

$$S_{HTR}^{total}(t) = \sum_{t=t_0}^T (S_{HI}(t) - S_{HS}(t)) + S_{HTR}^{total}(t_0) \quad (14)$$

$$S_{HI}(t) = S_{HTR}^{total}(t) r_{ZK} \quad (15)$$

$$S_{HS}(t) = S_{HTR}^{total}(t) r_{TS} \quad (16)$$

$$H_{TO} = S_{HTR}^{total}(t) B_{HT}(t) + \gamma_2 Z_{GC} \quad (17)$$

$$H_{TD} = H_{TT} H_{TX} \quad (18)$$

式中: r_{ZK} 、 T_{ZK} 分别为重型卡车增长率、重型卡车投资; a_2 、 b_2 为回归分析拟合得到的常数; $S_{HTR}^{total}(t)$ 、 $S_{HI}(t)$ 、 $S_{HS}(t)$ 、 r_{TS} 分别为重型卡车保有量、重型卡车增量、重型卡车报废量、重型卡车报废率; H_{TO} 、 $B_{HT}(t)$ 分别为重型卡车保有量、重型卡车比重; γ_2 、 Z_{GC} 分别为购车政策系数、购车补贴政策因子; H_{TD} 、 H_{TT} 、 H_{TX} 分别为重型卡车氢需求量、重型卡车出行量、单辆重型卡车对氢能的消耗量。

4) 家用氢燃料汽车的氢需求。随着新能源汽车补贴及扶持政策的不断出台, 加强了居民购买氢燃料汽车的意愿, 家用氢燃料汽车在家用汽车中的占比逐渐增加, 其中表示重要关系的方程如下:

$$r_{QC} = a_3 \ln R_{GRP} - b_3 R_{CX} + c_3 \quad (19)$$

$$S_{PCO}^{total}(t) = \sum_{t=t_0}^T (S_{CI}(t) - S_{CS}(t)) + S_{PCO}^{total}(t_0) \quad (20)$$

$$S_{CI}(t) = S_{PCO}^{total}(t) r_{QC} \quad (21)$$

$$S_{CS}(t) = S_{PCO}^{total}(t) r_{QS} \quad (22)$$

$$H_{QO} = S_{PCO}^{total}(t) B_{HQ}(t) + \gamma_3 Z_{NE} \quad (23)$$

$$H_{QD} = H_{QT} H_{QX} \quad (24)$$

式中: r_{QC} 、 R_{GRP} 、 R_{CX} 分别为家用氢燃料汽车增长率、人均生产总值、人均出行成本; a_3 、 b_3 、 c_3 为通过回归分析拟合得到的常数; $S_{PCO}^{total}(t)$ 、 $S_{CI}(t)$ 、 $S_{CS}(t)$ 、 r_{QS} 分别为家用氢燃料汽车保有量、家用氢燃料汽车增量、家用氢燃料汽车报废量、家用氢燃料汽车报废率; H_{QO} 、 $B_{HQ}(t)$ 分别为家用氢燃料汽车保有量、家用氢燃料汽车比重; γ_3 、 Z_{NE} 分别为新能源政策系数、新能源补贴政策因子; H_{QD} 、 H_{QT} 、 H_{QX} 分别为家用氢燃料汽车氢需求量、家用氢燃料汽车出行量、单辆家用氢燃料汽车对氢能的消耗量。

5) 售氢回报。制氢技术的持续投资促使制氢的生产和运营环节不断升级, 售氢回报继续促进制氢技术的发展, 其中表示重要关系的方程如下:

$$S_{HPC}^{total}(t) = \sum_{t=t_0}^T S_{PC}(t) + S_{HPC}^{total}(t_0) \quad (25)$$

$$S_{SHC}^{total}(t) = \sum_{t=t_0}^T S_{HG}(t) + S_{SHC}^{total}(t_0) \quad (26)$$

$$H_{CB} = S_{HPC}^{total}(t) + S_{HPO}^{total}(t) \quad (27)$$

$$H_{ES} = H_{TS} - H_{ZD} \quad (28)$$

$$H_{ZD} = H_{BD} + H_{TD} + H_{QD} \quad (29)$$

$$H_{HB} = (S_{HPR}^{total}(t) - H_{CB}) H_{ZD} \quad (30)$$

式中: $S_{HPC}^{total}(t)$ 、 $S_{PC}(t)$ 分别为制氢生产成本、生产成本变化量; $S_{SHC}^{total}(t)$ 、 $S_{HG}(t)$ 分别为单个加氢站供应量、氢供应能力增长量; $S_{HPR}^{total}(t)$ 、 H_{CB} 、 $S_{HPO}^{total}(t)$ 分别为售氢价格、制氢成本、制氢运营成本; H_{ES} 、 H_{TS} 、 H_{ZD} 分别为氢能供应过剩量、氢能总供应量、氢能总需求量。

3 交通领域氢能需求模拟预测

根据系统流程图以及不同变量的结构方程, 借助 Vensim 软件模拟新疆地区 2017—2050 年交通领域的氢能需求趋势。其中, 将 2017—2021 年的数据用于模型模拟与实际情况检验, 将 2022—2050 年的数据用于氢能需求预测, 积分步长确定为 1 a。

3.1 模型有效性检验

为确保模型的合理性和准确性, 在开始模拟前要进行有效性的历史检验。本文选取地区生产总值、家用氢燃料汽车保有量和重型卡车保有量的仿真模拟数据与实际数据进行相对误差检验。检验结果见表 1。

表 1 模型检验结果

Table 1 Model test results

年份	项目	地区生产总值 / 亿元	家用氢燃料汽车保有量 / 万辆	重型卡车保有量 / 万辆
2017	输入值	11 159.9	300.32	14.76
	真实值	12 809.4	329.21	16.01
2018	模拟值	12 811.6	327.47	16.22
	相对误差 / %	0.017	0.53	1.31
	真实值	13 597.1	362.41	17.41
2019	模拟值	13 593.2	361.06	17.88
	相对误差 / %	0.029	0.37	2.70
	真实值	13 800.7	390.33	19.39
2020	模拟值	13 797.2	399.63	19.74
	相对误差 / %	0.025	2.38	1.81
	真实值	16 311.6	432.44	22.35
2021	模拟值	16 308.3	426.14	21.81
	相对误差 / %	0.02	1.46	2.42

经过对比可得, 2018—2021 年新疆的地区生产总值、家用汽车保有量和重型卡车保有量的相对误差均在 3% 以内, 由此可得本文模型有着较高的精确度, 通过有效性检验, 可知使用该模型对交通领域氢能需求进行动态仿真分析是准确的。

3.2 系统模拟预测

加氢站作为氢能大规模应用发展的关键性设

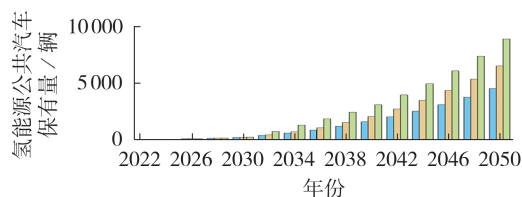
施,在相关政策的驱动下,加氢站的配套设备和建设运营规模不断扩大。自2019年以来建成的加氢站供应能力已达到 500 kg/d ,而这也是未来加氢站的最低供应能力要求,本文设置一座加氢站的氢供应能力为 $800\text{ kg/d}^{[19-20]}$ 。为了分析在不同数量氢能源交通工具下的氢能需求,本文从低速、中速、高速3个发展水平进行模拟分析。

1)低速发展水平:在现有政策的规划下,按照当前发展趋势延续下去,各类交通工具的氢能替代率主要取决于市场行为。

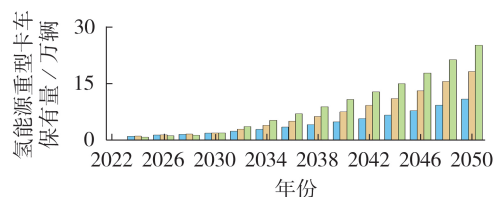
2)中速发展水平:在低速发展水平的基础上,将技术投资比重、新能源政策因子和购车政策因子提升30%,政策支持应细化到氢能专项研究,积极提升新能源车在交通领域中的比例。

3)高速发展水平:在低速发展水平的基础上,将技术投资比重、新能源政策因子和购车政策因子提升60%,完善氢能顶层政策设计,健全氢能市场供需协调制度,统筹各环节产业链的氢能规划。

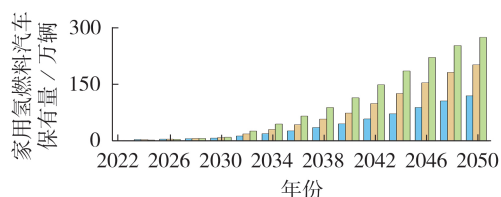
通过设置不同的发展水平,模拟预测3种不同发展水平下的新疆地区不同氢能交通工具的保有量,模拟结果如图3所示。



(a) 氢能公共汽车保有量



(b) 氢能重型卡车保有量



(c) 家用氢燃料汽车保有量

— 低速发展水平, — 中速发展水平
— 高速发展水平

图3 氢能交通工具保有量的模拟结果

Fig.3 Simulative results of hydrogen vehicle ownership

由模拟结果可得,政策和经济方面的投入会影响氢能需求的增幅。在低速发展水平下,氢能源公共汽车、氢能源重型卡车和家用氢燃料汽车到2050

年会分别增长到4535辆、10.95万辆和120.81万辆;在中速发展水平下,相关新能源政策的陆续出台为氢能交通工具的增长不断提供推动力,制氢技术投资的增加会降低氢燃料电池的成本,提高其工作效率,此情景下氢能源交通工具数量从2030年快速增长,至2050年氢能源公共汽车、氢能源重型卡车和家用氢燃料汽车会分别增长到6525辆、18.26万辆和203.1万辆;在高速发展水平下,随着氢能政策支持力度的继续增大,技术的成熟和可靠性进一步增强,氢燃料电池技术逐渐达到商业化水平,市场对氢能交通工具的需求变得更高,至2050年,氢能源公共汽车、氢能源重型卡车和家用氢燃料汽车会分别增长到8894辆、25.19万辆和275.99万辆。

根据图3所示交通工具保有量的模拟结果可得,由于政策具有延迟效应,在2030年以前不同发展水平下氢能交通工具的数量差别不大,随着时间推移,政策激励对氢能交通工具的影响逐渐显现,至2050年不同氢能交通工具的数量差额达到最大,为直观观察不同发展水平下的氢能替代率,列出2050年各种交通工具的氢能替代率,如表2所示。

表2 2050年不同发展水平下的氢能替代率

Table 2 Hydrogen substitution rates under different development levels in 2050

发展水平	公共汽车氢能替代率/%	重型卡车氢能替代率/%	家用氢燃料汽车氢能替代率/%
低速	20.62	30.20	8.69
中速	29.67	50.34	14.60
高速	40.41	69.42	19.81

由表2可得:随着政策的支持和经济的投入,氢能替代率显著增加,在保持变化趋势的低速发展水平下,到2050年公共汽车、重型卡车和家用氢燃料汽车的氢能替代率分别为20.62%、30.20%和8.69%;在加大政策支持的中速发展水平下,到2050年公共汽车、重型卡车和家用氢燃料汽车的氢能替代率分别为29.67%、50.34%和14.60%,中速发展水平下的技术投资比重和相关政策因子是低速发展水平下的1.3倍,而在2050年,各类交通工具的平均氢能替代率达到低速发展水平下的1.6倍;在进一步加大政策支持的高速发展水平下,到2050年公共汽车、重型卡车和家用氢燃料汽车的氢能替代率分别为40.41%、69.42%和19.81%,高速发展水平下的技术投资比重和相关政策因子是低速发展水平下的1.6倍,而在2050年时,各类交通工具的平均氢能替代率达到低速发展水平下的2.2倍,由此可见政策激励和技术投资可以有效加速交通领域的能源转型,进一步提升氢能交通工具的占比。

随着越来越多的氢能源交通工具投入使用,氢能的需求也随之不断增加,根据2.2节中所述的各类

交通工具的百千米能耗和年行驶里程,计算出各类交通工具的年氢能需求,最后得到交通领域的总氢能需求,如图4所示。

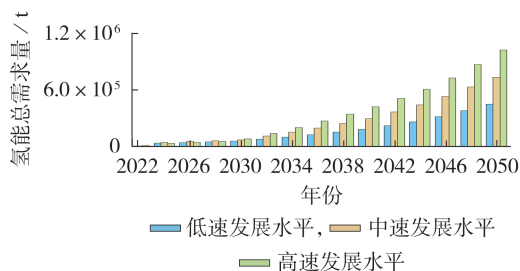


图4 交通领域的总氢能需求

Fig.4 Total hydrogen demand in transportation field

根据图4可得:氢能总需求随着时间推移在迅速增加,在低速发展水平下2030年的总氢能需求量为 5.77×10^4 t,2040年的总氢能需求量为 1.812×10^5 t,2050年的总氢能需求量为 4.477×10^5 t;在中速发展水平下,随着各类氢能交通工具的增加,至2030年总氢能需求量为 7.09×10^4 t,2040年总氢能需求为 2.932×10^5 t,2050年总氢能需求为 7.332×10^5 t;在高速发展水平下,随着氢能交通工具的进一步增加,氢能的需求也大幅增加,至2030年总氢能需求为 8.03×10^4 t,2040年总氢能需求为 4.214×10^5 t,2050年总氢能需求为 1.0217×10^6 t。由此可得,在不同的政策激励下,氢能需求的差别是巨大的,大量的新能源优惠政策会促进氢能设施的建设与发展,促进更多的投资者和消费者进入氢能市场,从而推动交通领域的氢能需求增长。

为了给使用氢能交通工具的居民提供便捷的加氢服务,提升氢能交通的可行性和便利性,需要加快加氢站的建设进程并不断改进制氢技术。随着氢能需求的日益增加,加氢站的供应能力在不断提升,而供应过剩会影响到售氢价格的变化,售氢价格与制氢成本相互作用得到的售氢回报会继续反馈于地区生产总值和技术投资,售氢回报如图5所示。

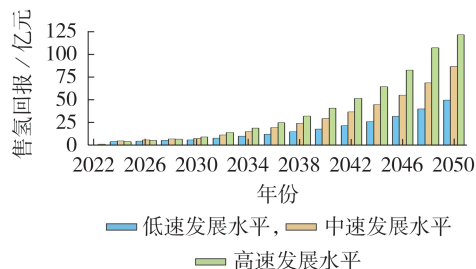


图5 交通领域的售氢回报

Fig.5 Hydrogen sales return in transportation field

由图5可知,至2050年,低速发展水平下的售氢回报为49.42亿元,中速发展水平下的售氢回报为86.58亿元,高速发展水平下的售氢回报为121.59亿元。

政策的不断激励和技术投资的增加会促进售氢回报的不断增加,售氢回报一部分可以用于加氢站的持续运营成本,确保加氢站提供稳定的加氢服务,另一部分用于技术的研发和创新,推动氢能产业链的发展。

因此为加快新疆地区交通领域用能终端的绿色转型,需要加强统筹政策支持和提高经济投入,政策的大力支持对交通工具的氢能替代效果是显著的,制氢技术的投资也会带来巨大的售氢回报,这表明新疆交通领域的绿色转型具有较大的发展潜力,可推动二氧化碳排放尽早达峰并实现碳中和目标。

4 结论

本文对交通领域的氢能需求系统进行详细的分析,考虑不同类型交通工具对氢能的消耗,通过系统动力学方法建立了“双碳”目标下的氢能需求预测模型,以新疆地区为案例进行模拟分析,对比分析了低速、中速和高速3个发展水平下氢能需求的变化趋势,得到如下结论。

1)由于政策的出台和实施具有延迟效应,在2030年之前新疆地区在不同发展水平下的氢能需求较为接近,2030年时公共汽车、重型卡车和家用汽车的平均氢能替代率分别为2.23%、6.3%、1%,交通领域的转型在前期的发展较为缓慢。

2)2030年之后,政策支持力度的影响逐渐明显,中速发展水平下各种氢能交通工具的平均增长幅度会达到低速发展水平下的1.6倍,而高速发展水平下的平均增长幅度会达到低速发展水平下的2.2倍。因此推动相关部门出台氢能领域的相关政策和保障措施,可以加速交通领域的绿色转型。

3)通过对制氢技术的不断投资,售氢所得的回报随着氢能需求的增加而增加,在中高速发展水平下,由于制氢技术投资较高,售氢回报同样远高于低速发展水平。售氢回报的增加表明了对制氢技术的投资具有巨大的收益潜力,为满足增长的氢能需求,需要加大制氢技术的投资,售氢回报的增加会继续促进制氢技术的创新升级,促进氢能产业的自主发展。

本文构建的模型可为新疆地区未来氢能产业的发展提供理论指导,同时促进相关政策的制定。未来的研究可进一步考虑其他类型交通工具的氢能替代,并且细化地讨论燃料电池的制造成本和电动车辆的竞争对氢能替代的影响,从而更加深入地预测氢能需求的变化。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 江里舟,别朝红,龙涛,等. 能源交通一体化系统发展模式与运行关键技术[J]. 中国电机工程学报,2022,42(4):1285-1301.
JIANG Lizhou, BIE Zhaozhong, LONG Tao, et al. Development

- model and key technology of integrated energy and transportation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1285-1301.
- [2] 潘光胜, 顾钟凡, 罗恩博, 等. 新型电力系统背景下的电制氢技术分析与展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 1-13.
PAN Guangsheng, GU Zhongfan, LUO Enbo, et al. Analysis and prospect of electrolytic hydrogen technology under background of new power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 1-13.
- [3] 肖白, 高峰. 含不同容量充电桩的电动汽车充电站选址定容优化方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 157-166.
XIAO Bai, GAO Feng. Optimization method of electric vehicle charging stations' site selection and capacity determination considering charging piles with different capacities[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 157-166.
- [4] 王浩林, 张勇军, 毛海鹏. 基于时空特征变量数据分析的共享汽车充电负荷预测方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 169-175.
WANG Haolin, ZHANG Yongjun, MAO Haipeng. Charging load prediction method of shared vehicles based on data analysis of spatiotemporal characteristic variables[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 169-175.
- [5] LÓPEZ M, VALERO S, RODRIGUEZ A, et al. New online load forecasting system for the Spanish transport system operator[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 154: 401-412.
- [6] 周建力, 乌云娜, 董昊鑫, 等. 计及电动汽车随机充电的风-光-氢综合能源系统优化规划[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 30-40.
ZHOU Jianli, WU Yunna, DONG Haoxin, et al. Optimal planning of wind-photovoltaic-hydrogen integrated energy system considering random charging of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 30-40.
- [7] 江岳文, 杨国铭, 朱振山. 考虑交通流量捕获的风-氢-电耦合网络规划[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 19-28.
JIANG Yuewen, YANG Guoming, ZHU Zhenshan. Wind-hydrogen-electricity coupled network planning considering traffic flow capture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 19-28.
- [8] MONTERO-SOUSA J A, ALÁIZ-MORETÓN H, QUINTIÁN H, et al. Hydrogen consumption prediction of a fuel cell based system with a hybrid intelligent approach[J]. Energy, 2020, 205: 117986.
- [9] QUAN S, WANG Y, XIAO X, et al. Disturbance prediction-based enhanced stochastic model predictive control for hydrogen supply and circulating of vehicular fuel cells[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 238: 114167.
- [10] 李天格, 胡志坚, 陈志, 等. 计及电-气-热-氢需求响应的综合能源系统多时间尺度低碳运行优化策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(1): 16-24.
LI Tiange, HU Zhijian, CHEN Zhi, et al. Multi-time scale low-carbon operation optimization strategy of integrated energy system considering electricity-gas-heat-hydrogen demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1): 16-24.
- [11] 程宏波, 商子轩, 郭源曦, 等. 车网互动过程的系统动力学分析[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 4125-4133.
CHENG Hongbo, SHANG Zixuan, GUO Yuanxi, et al. Research on vehicle-to-grid process based on system dynamics[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 4125-4133.
- [12] 刘泽扬, 荆朝霞, 孙启星, 等. 基于系统动力学的发电容量充裕度机制分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 109-118.
LIU Zeyang, JING Zhaoxia, SUN Qixing, et al. Analysis on generation capacity adequacy mechanism based on system dynamics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 109-118.
- [13] 陈振, 胥哲. 郑州市交通政策影响的系统动力学模型与仿真[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(5): 917-927.
CHEN Zhen, ZAN Zhe. Modeling and simulation of urban traffic policy impact based on system dynamics of Zhengzhou city[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(5): 917-927.
- [14] GAO J, ZHANG T. Effects of public funding on the commercial diffusion of on-site hydrogen production technology: a system dynamics perspective[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2022, 175: 121380.
- [15] 彭光博, 向月, 陈文淑乐, 等. “双碳”目标下电力系统风电装机与投资发展动力学推演及分析[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11): 70-77.
PENG Guangbo, XIANG Yue, CHEN Wenxue, et al. Kinetic deduction and analysis of installed capacity and investment development for wind power in power system under “dual carbon” target[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 70-77.
- [16] 苏腾, 许定源, 许子兴. 城市更新与冬奥背景下老城停车改善策略: 以崇礼为例[J]. 城市发展研究, 2023, 30(4): 31-36.
SU Teng, XU Dingyuan, XU Zixing. Improvement strategy of parking problem in old town under the background of urban renewal action and Olympic winter games[J]. Urban Development Studies, 2023, 30(4): 31-36.
- [17] 崔杨, 曾鹏, 仲悟之, 等. 考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 10-17.
CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 10-17.
- [18] 全球能源互联网发展合作组织. 绿氢发展与展望[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022: 133-137.
- [19] 黄文涛, 邓明辉, 葛磊蛟, 等. 考虑配电网与氢燃料汽车耦合影响的制氢加氢站布点优化策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 105-117.
HUANG Wentao, DENG Minghui, GE Leijiao, et al. Layout optimization strategy of hydrogen production and refueling stations considering the coupling effect of distribution network and hydrogen fuel vehicles[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 105-117.
- [20] 吕洪, 郑乾辉, 周伟, 等. 长三角G15氢能高速公路加氢站布点建模[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 121-128, 137.
LÜ Hong, ZHENG Qianhui, ZHOU Wei, et al. Location modeling of hydrogen refueling station layout of G15 hydrogen energy highway in Yangtze River Delta[J]. Journal of Tongji University(Natural Science Edition), 2022, 50(1): 121-128, 137.

作者简介:

周 专(1987—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电力系统规划、氢能与电力(**E-mail**: zhouzhuan916106@163.com);

苗 帅(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为氢能与电力、储能与新能源发电并网技术(**E-mail**: m951528666@mail.dlut.edu.cn);

袁铁江(1975—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为氢能与电力、化石能源系统集成、储能与新能源发电并网技术(**E-mail**: yjt1975@dlut.edu.cn)。

(编辑 李玮)

(下转第47页 continued on page 47)

GAO Junyun. Study on loads simulation of wind turbines generator system under typhoon condition[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019(6):79-81.

能源电力系统动态分析与控制、氢储能系统建模与控制、主动配电网和电力设备故障诊断与健康状态预测(**E-mail**: zhaohshcn@ncepu.edu.cn);

林诗雨(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为风电机组可靠性评估(**E-mail**: lin17778884717@163.com)。

(编辑 任思思)

作者简介:

赵洪山(1965—),男,教授,博士,主要研究方向为新

Reliability evaluation of wind turbine competitive failure considering extreme weather impact process

ZHAO Hongshan, LIN Shiyu, QU Yuehan, YANG Ao, CHANG Jieying

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Aiming at the problem that the operation reliability of wind turbines is easily affected by extreme weather, a reliability evaluation method of competitive failure of wind turbines considering the process of extreme weather impact is proposed. Considering the natural degradation of wind turbines, the instantaneous degradation caused by extreme weather impact and the accelerated degradation caused by the continuous process of extreme weather, a comprehensive degradation model of wind turbines under extreme weather is constructed. Considering the influence of wind turbine degradation process on its impact resistance ability, a competitive failure model of wind turbine is established to evaluate the reliability of wind turbine. Based on the engineering data of a wind farm in northern China and the historical data of extreme weather, the reliability of a 2 MW wind turbine is evaluated and the parameter sensitivity is analyzed. The results show that by the fifth year, the reliability of wind turbine is 0.84 by considering only natural degradation, and 0.178 by considering extreme weather impact process, which is more in line with engineering practice. Through the sensitivity analysis of model parameters, it is found that after the operation time exceeds 3 years, the degradation failure begins to gradually affect the reliability of wind turbines.

Key words: wind power; wind turbine reliability evaluation; extreme weather impact; impact duration process; competition failure; hard failure threshold drops

(上接第39页 continued from page 39)

Prediction of hydrogen demand in transportation field based on system dynamics

ZHOU Zhuan¹, MIAO Shuai², YUAN Tiejia²

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China;

2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to predict the hydrogen demand under the “double carbon” target, by fully excavating the influence factors related to the hydrogen demand, the prediction system of hydrogen demand in the transportation field based on system dynamics is constructed. The causality diagram and system flow diagram of the hydrogen demand prediction system in the transportation field are drawn, focusing on the hydrogen energy substitution of buses, heavy trucks and household cars. The validity of the model is tested by historical data. Taking Xinjiang as an example, three development levels of low speed, medium speed and high speed are set to analyze the impact of policy support and economic input on the hydrogen demand in the transportation field. Simulative results show that the transformation of the transportation field is relatively slow before 2030. The impact of policy and economic investment is gradually obvious, and the higher development levels, the larger the growth rate of various types of transportation vehicles. By 2050, the average hydrogen energy substitution rate at the high-speed development level will reach 2.2 times that at the low-speed development level, and the return on hydrogen sales will reach 2.5 times that at the low-speed development level.

Key words: transportation field; system dynamics; demand prediction; analysis of development level; hydrogen energy substitution

附录 A

表 A1 变量定义

Table A1 Variable definition

变量类型	变量名称	简写	变量类型	变量名称	简写
状态变量	地区生产总值	$S_{GRP}^{total}(t)$	辅助量	氢能源重型卡车出行量	H_{TT}
	总人口	$S_{POP}^{total}(t)$		氢能源重型卡车氢需求量	H_{TD}
	公共汽车保有量	$S_{BOW}^{total}(t)$		人均生产总值	R_{GRP}
	重型卡车保有量	$S_{HTR}^{total}(t)$		家用汽车增长率	r_{QC}
	家用汽车保有量	$S_{PCO}^{total}(t)$		人均出行成本	R_{CX}
	制氢生产成本	$S_{HPC}^{total}(t)$		家用氢燃料汽车比重	$B_{HC}(t)$
	制氢运营成本	$S_{HPO}^{total}(t)$		家用氢燃料汽车保有量	H_{QO}
	售氢价格	$S_{HPR}^{total}(t)$		家用氢燃料汽车出行量	H_{QT}
	停车位总量	$S_{TPC}^{total}(t)$		家用氢燃料汽车氢需求量	H_{QD}
	单个加氢站供应量	$S_{SHC}^{total}(t)$		氢能总需求量	H_{ZD}
速率变量	地区生产总值增量	$S_{GG}(t)$	辅助量	技术投资	T_{JS}
	增加人口	$S_{IP}(t)$		制氢成本	H_{CB}
	死亡人口	$S_{DP}(t)$		售氢回报	H_{HB}
	公共汽车增量	$S_{BI}(t)$		供应能力增长率	r_{GQ}
	公共汽车报废量	$S_{BS}(t)$		加氢站数量	H_{SN}
	重型卡车增量	$S_{BI}(t)$		氢能总供应量	H_{TS}
	重型卡车报废量	$S_{BS}(t)$		氢能供应过剩量	H_{ES}
	家用汽车增量	$S_{CI}(t)$		交通投资比重	B_{TI}
	家用汽车报废量	$S_{CS}(t)$		停车投资转化率	P_{IR}
	生产成本变化量	$S_{PC}(t)$		停车场周转率	P_{TR}
	运营成本变化量	$S_{OC}(t)$		停车场使用率	P_{UR}
	售氢价格变化	$S_{HP}(t)$		需求收益率	r_{DY}
	停车位增量	$S_{PI}(t)$		公共汽车投资比重	B_{GI}
	氢供应能力增长量	$S_{HG}(t)$		公共汽车运营线路长度	L_{BL}
				公共汽车报废率	r_{BS}
辅助量	地区生产总值增长率	$r_{GDP}(t)$	常量	单辆氢能源公交对氢能的消耗量	H_{GX}
	停车位投资比重	$B_{TZ}(t)$		重型卡车投资比重	B_{ZK}
	停车位投资	P_{TZ}		重型卡车报废率	r_{TS}
	停车需求	P_{XQ}		氢能源重型卡车出行比例	r_{HT}
	停车收费	P_{SF}		单辆氢能源重卡对氢能的消耗量	H_{TX}
	交通投资	T_{JT}		出生率	R_{CS}
	公共汽车投资	T_{GJ}		死亡率	R_{SW}
	公共汽车增长率	r_{GJ}		家用汽车报废率	r_{QS}
	氢能源公共汽车比重	$B_{HB}(t)$		家用氢燃料汽车出行比例	r_{HQ}
	氢能源公共汽车保有量	H_{BO}		单辆家用氢汽车对氢能的消耗量	H_{QX}
	氢能源公共汽车出行量	H_{BT}		技术投资比重	B_{JS}
	氢能源公共汽车氢需求量	H_{BD}		停车收费政策因子	Z_{TC}
	重型卡车投资	T_{ZK}		购车补贴政策因子	Z_{GC}
	重型卡车增长率	r_{ZK}		新能源补贴政策因子	Z_{NE}
	氢能源重型卡车比重	$B_{HT}(t)$			
	氢能源重型卡车保有量	H_{TO}			

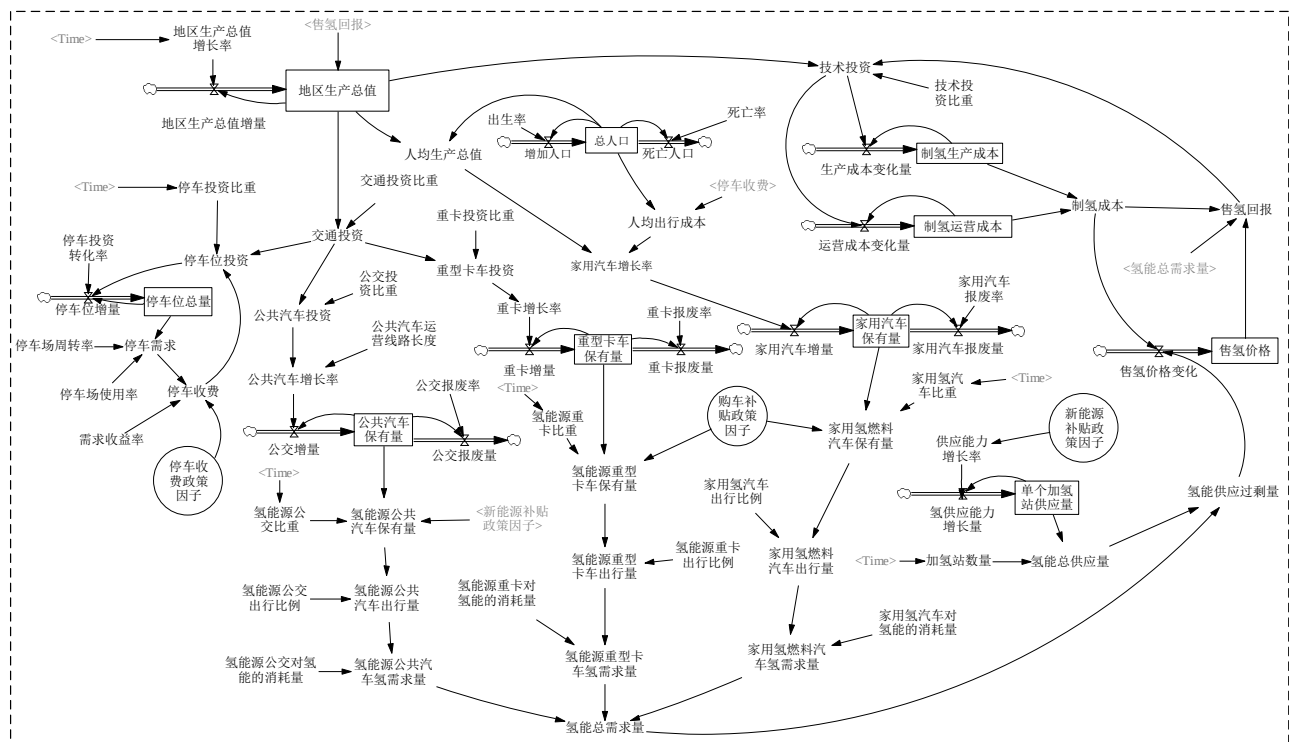


图 A1 交通氢能需求预测的系统流程图

Fig.A1 System flow diagram of traffic hydrogen demand forecast

表 A2 关键参数初始值

Table A2 Key parameter initial value

参数	初始值	单位
地区生产总值	11159.9	亿元
总人口	2480	万人
家用汽车保有量	300.32	万辆
公共汽车保有量	8919	辆
重型卡车保有量	14.76	万辆
制氢生产成本	18000	元/t
制氢运营成本	24800	元/t
售氢价格	53000	元/t
单个加氢站供应量	292	t/a
出生率	13.01	‰
死亡率	4.72	‰
停车位总量	360.38	万辆
停车场周转率	90	%
停车场使用率	80	%
公共汽车运营线路长度	13206.5	km
氢能源公共汽车耗氢量	2.275	万 t/a
氢能源重型卡车耗氢量	4.5	万 t/a
家用氢燃料汽车耗氢量	0.119	万 t/a