



基于系统动力学的氢需求量中长期预测

袁铁江¹, 张一瑾¹, 杨紫娟^{1,2}, 蒋东方³

(1. 大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 西安科技大学 电控学院, 陕西 西安 710054;
3. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209)

摘要:“双碳”背景下氢能将在各种领域发挥巨大作用,开展氢需求中长期预测具有重要意义。基于系统动力学方法建立了省级氢需求中长期预测模型。首先将氢能需求分为工业、供热和交通 3 大领域,考虑各子系统内部因素的相互作用以及经济发展、政策支持等外部因素的影响,分析因果关系,构建系统预测方程;其次设定系统参数,采用最小二乘法方程回归得到方程常数,基于该省发展规划利用灰色模型设定表函数参数,并将模拟结果与历史数据进行对比,结果表明模型误差较小,适用于该省氢需求预测;最后利用所建立的系统动力学模型对该省的氢需求量进行了预测。

关键词:系统动力学;氢需求预测;因果分析;系统流程图;灰色模型

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202208038

0 引言

“双碳”目标极大地改变了能源消费行业的发展,氢能清洁高效、存储模式丰富,其消费潜力将不断提高,在综合能源系统中将发挥重大作用。氢需求中长期预测是合理规划含氢能源系统的重要环节,现有的预测方法主要有 2 类:回归预测法、时间序列预测法等传统预测方法以及支持向量机、神经网络^[1-3]等新兴预测方法。在相关研究中,文献[4]基于相对经济理论与系统动力学(system dynamics, SD),预测了中国 3 大产业在不同经济发展速度下的氢需求量,认为氢的需求应综合考虑能源发展、经济结构等因素的作用;文献[5]基于广义 Bass 扩散模型对氢燃料电池汽车数量进行了预测,并对氢燃料车降价率、加氢站数量等外部变量进行了敏感度分析;文献[6]通过地理数据和技术经济模型预测了 2045 年阿尔及利亚的氢需求量及其区域分布;文献[7]在统一能源系统背景下,提出计及原始数据检验

的灰色预测模型,对多场景的氢负荷进行预测;文献[8]利用支持向量机回归算法、灰色预测模型分别构建了工业、供热和交通领域氢负荷预测模型;文献[9]从石油炼制、合成氨和汽车市场 3 方面分析了中国氢气需求的演变过程,采用 Lotka-Volterra 种间竞争模型分析了氢能汽车与其他汽车之间的竞争关系。文献[10]将液体时间常数与递归神经网络结合,实现了对中长期电力负荷的精准预测。

目前,相关研究主要集中在氢燃料汽车用氢需求的短期预测,很少考虑政策、经济发展等外部因素的影响。氢能作为清洁、高效、存储形式灵活的能源,将在未来新一代综合能源系统中发挥重大作用,中长期氢负荷预测对于能源系统的规划和设计具有重要意义。

本文利用 SD 进行中长期氢需求预测。针对氢能发展复杂且动态变化的特点,根据行业划分,基于 SD 方法建立合成氨生产、原油加工、供热、交通 4 个子系统的氢需求中长期预测模型。分析因子之间的因果关系和内部的组织结构,建立省级氢需求预测模型,根据历史数据利用灰色预测方法结合该省发展规划设定方程参数。将模拟结果与历史数据进行对比,验证了模型的可行性,进而预测该省氢需求总量。

收稿日期: 2022-08-10; **修回日期:** 2023-08-01。

基金项目: 国网经济技术研究院有限公司自主立项项目(基于新能源云的电力系统碳排放达峰路径研究, ZZKJ-2021-03)。

1 基于系统动力学的氢需求预测

1.1 系统动力学氢需求预测原理

SD 以反馈控制理论为基础, 是一门认识系统问题和解决系统问题的交叉性、综合性学科^[1]。将系统定义为一个由相互区别、相互作用的诸多元素有机地联系在一起, 具有某种功能的集合体。

根据系统的整体性和层次性, 基于分解原理将总系统分成若干个相互关联的子系统, 即

$$S = \{S_i \in S_{1-p}\} \quad (1)$$

式中: S 代表整个系统; S_i 代表子系统, $i=1, 2, \dots, p$ 。

子系统之间的相互作用关系可以通过关系矩阵的非主导元素反映, 但在实际问题中, 各子系统之间的直接联系是少量且有限。

模型中包含状态变量、速率变量、辅助变量和常量 4 种类型的变量。状态变量是表示系统累积效应的变量, 即系统从初始时刻到某一时刻物质流和信息流的累积结果; 速率变量反映了状态变量变化的速率; 辅助变量相互独立, 可以由其他变量得到, 通过辅助方程表示; 常量则不会随着时间的改变而变化。各个变量方程如下。

1) 状态变量为

$$L(t) = L_0 + \int_0^t [R_{in}(t) - R_{out}(t)] dt \quad (2)$$

式中: $L(t)$ 为状态变量 L 在 t 时刻的值; L_0 为初始值; $R(t)$ 为状态变量的变化速率; R_{in} 和 R_{out} 分别为状态变量输入、输出流。

2) 速率方程为

$$R(t) = f[L(t), A(t), C] \quad (3)$$

式中: $A(t)$ 为辅助变量在 t 时刻的值; C 为常量。

3) 辅助方程为

$$A(t) = f[L(t), A_n(t), C] \quad (4)$$

式中: $A_n(t)$ 为除了待求辅助变量之外的其他辅助变量在 t 时刻的值。

4) 各变量之间关系为

$$\begin{bmatrix} R \\ A \end{bmatrix} = W \begin{bmatrix} L \\ A \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: W 为关系矩阵, 反映了速率变量 R 和状态变量 L 之间以及辅助变量 A 本身在同一时刻上的非线性关系, 当系统是线性时, W 为常阵。

与其他预测方法相比, SD 注重各个因素间的

相互影响, 包含反馈结构, 由于各领域中考考虑的内外因素不同, 建立的模型结构也存在差异。SD 从根本出发, 以整体的角度推寻系统的发展趋势, 适用于长期复杂动态变化、处理数据不足和高阶非线性的问题。文献 [12] 通过建立中国能源需求 SD 模型, 分析了能源、经济、环境、人口 4 大子系统之间的关系, 并对能源消费总量进行了仿真预测分析; 文献 [13-14] 基于 SD 方法分别对省级和工业园区的各产业及居民生活电力需求进行了模拟, 为用电管理提供了一定的参考基础; 文献 [15] 采用 SD 模型预测了电动汽车保有量, 并根据蒙特卡洛模拟方法模拟了未来电动汽车的负荷曲线。文献 [16] 基于 SD 模型评估了各类政策对哥伦比亚电动汽车行业发展的影响。

SD 广泛应用于能源系统的分析, 基于反馈控制理论, 以系统思考、定性定量相结合的方法解决问题, 可以清晰表示各因素之间的作用关系。氢能在高速发展的情况下, 除了内部因素之外, 政策支持、技术升级、能源结构形态改变以及相关技术的发展等外部因素均会对氢需求产生影响, 其发展建设是一个动态反馈系统。因此, 采用 SD 作为氢气需求的预测系统框架, 分析系统各要素之间的影响关系, 可明确各领域在不同因素影响作用下氢需求量的发展趋势, 充分挖掘各部门用氢的动态规律, 其建模步骤主要包括系统分析、结构分析、构建模型、模型检验、模拟与分析等。

1.2 氢需求预测系统的目标和边界

从应用场景上看, 氢的使用主要集中在工业、交通、供热 3 大领域。工业方面, 氢主要用于合成氨、甲醇生产以及石油炼制。在中国, 合成氨是第一大耗氢产品^[17], 与其相比, 甲醇合成过程中耗氢量要小得多; 在炼油工业中, 氢作为石化产品用于加氢裂化和脱硫, 随着石油工业对硫含量的要求提高, 需氢量也将不断提高; 交通方面, 氢燃料电池可以取代石油等传统燃料, 减少污染气体的排放^[18]; 供热方面, 氢气按比例掺入天然气管道, 可以满足城市建筑供热需求, 提高燃烧效率并降低碳排放量。

本文中氢需求主要来自合成氨工业、石油炼制、交通行业和天然气掺氢。氢需求中长期预测的 SD 目标是针对各产业用氢特征以及发展趋

势，建立各产业用氢的 SD 子模型。各行业受社会经济、工业发展、国家政策、人口数量等多个因素的影响，但子系统之间相互独立，互不影响。初步分析经济因素与氢需求之间的关系，得到全社会氢需求因果回路如图 1 所示。

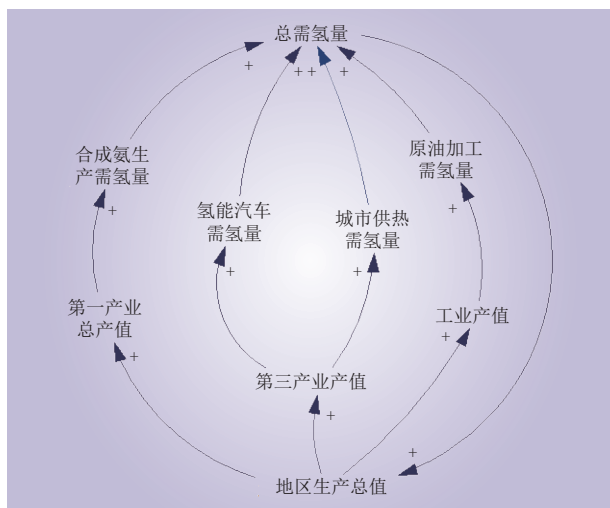


图 1 全社会氢需求系统结构图
Fig. 1 Structure of society-wide hydrogen demand system

从图 1 中可以看出，生产总值的增加会导致各产业生产总值增加，从而分别影响 4 个子系统的需氢量，进而使总需氢量增加，故总需氢量增加也会反映出生产总值的增长。

2 SD 氢需求量预测模型

2.1 因果关系分析

1) 合成氨子系统。

合成氨是中国第一大耗氢产品，约有 80% 的合成氨用于农业生产化学肥料，其余主要作为化工产品的原料^[9]，构建合成氨子系统的因果关系如图 2 所示。

合成氨用氢需求的主要影响因素为合成氨需求、单位氢消费、政策因素以及农业经济的发展。农业合成氨除受农作物种植面积、农作物单位产量的影响外，由于过量施用化肥会产生较为严重的环境问题，并加速矿产资源和社会资源的消耗^[20]，在政策和技术发展的影响下，有机肥的替代、化肥肥效的提高也会降低农业合成氨需求，且前一年的合成氨需求会影响粮食单位产

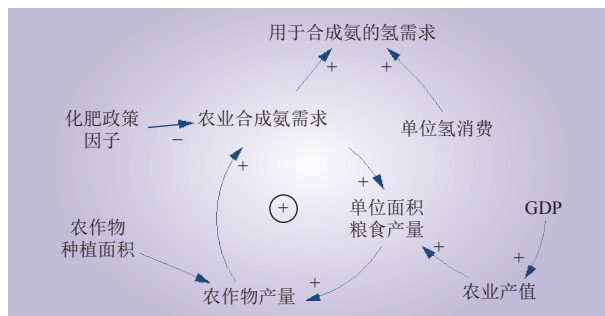


图 2 合成氨子系统因果关系
Fig. 2 Ammonia subsystem causality

量，形成反馈回路。

2) 原油加工子系统。

石油炼制工业用氢量仅次于合成氨，氢气的消耗量由加工原料和加工工艺决定，主要用于柴油加氢脱硫、燃料油加氢脱硫、加氢裂化等。根据该地区成品油的产量和合成不同油品的单位耗氢量，柴油和汽油的需氢量占原油加工用氢总量的 95% 以上，因此重点分析生产这 2 种成品油时的用氢需求。

根据 2 种油品的应用途径，初步选取地区生产总值、工业产值、交通业产值、人均可支配收入、私人汽车保有量、能源消费总量、原油加工量、公路里程和邮政业务总量作为影响汽油产量的因素；选取地区生产总值、工业产值、交通业产值、民用客货车数量、货运量、能源消费总量、原油加工量、公路里程和邮政业务总量作为影响柴油产量的因素。采用灰色关联法进一步筛选作用较大的影响因素，灰色关联法根据因素之间发展趋势的相似程度，判断因素之间的联系是否紧密，量化了因素间的关联程度。影响因素的关联度见表 1，根据结果对各变量的灰色关联度进行比较，系数越接近 1，代表关联程度越高。

分别选取灰色关联度排序前 4 的因素作为影响汽油、柴油产量的主要因素。原油加工子系统因果关系如图 3 所示，其中，箭头均为促进作用，变量之间的影响关系为单向递进关系。

3) 交通子系统。

中国氢燃料电池处于发展初期，市场规模较小，目前使用主要集中在公交车和物流车^[21]。因此交通子系统对氢的需求主要体现在燃料电池公交车和商用重卡（重型载货汽车）上。公交车对

表 1 影响因素关联度

Table 1 Correlation of influencing factors

汽油产量影响因素	关联度系数	柴油产量影响因素	关联度系数
公路里程	0.9364	原油加工量	0.9020
能源消费总量	0.9363	工业产值	0.8419
工业产值	0.9044	能源消费总量	0.8162
原油加工量	0.8656	公路里程	0.8142
地区生产总值	0.8344	地区生产总值	0.7258
交通业产值	0.8260	货运量	0.7242
人均可支配收入	0.7571	交通业产值	0.7169
私人汽车保有量	0.6261	民用客货车数量	0.6337
邮政业务总量	0.5852	邮政业务总量	0.5528

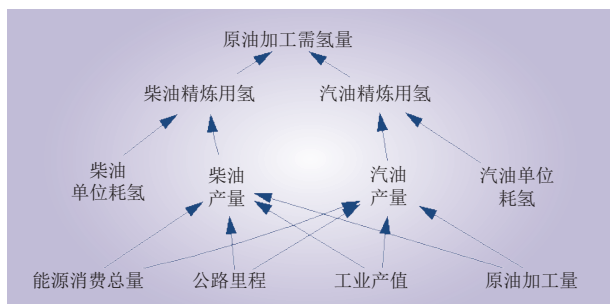


图 3 原油加工子系统因果关系

Fig. 3 Crude oil processing subsystem causality

公众运营，其运营模式稳定，加氢站数量需求较少；重卡续航里程长，加氢时间短，能够提高物流车队的作业效率。交通子系统的因果关系如图 4 所示。

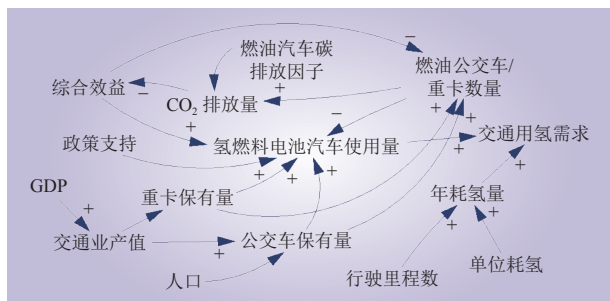


图 4 交通子系统因果关系

Fig. 4 Traffic subsystem causality

除政策支持和技术发展等宏观因素的影响外，当公交车和重卡的需求量，即最大容量一定时，燃油汽车和电动汽车数量也会与氢燃料电池汽车的数量相互影响。由于燃料电池汽车主要替代的能源品种为成品油，因此在模型构建中只考

虑氢燃料汽车对燃油汽车的替代关系。

4) 供热子系统。

与建设昂贵的氢气管道相比，将氢气掺混入天然气管网中用于城市供热，可显著降低成本。氢气掺入后将提高混合气体热值，在需热量一定的情况下，天然气需求将进一步减少，有助于降低碳排放量，提高环境效益。供热子系统需氢量设定为掺入天然气管道用于城市供热的氢气量，供热子系统因果关系如图 5 所示。

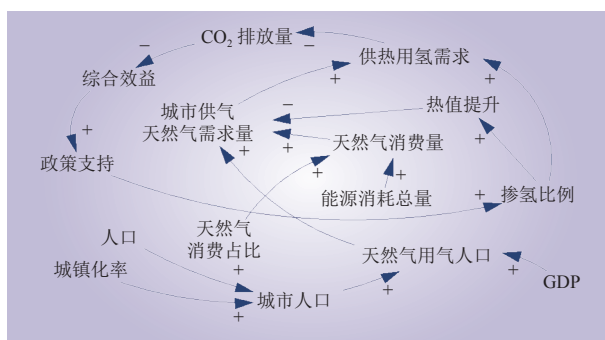


图 5 供热子系统因果关系

Fig. 5 Heating subsystem causality

2.2 系统方程构建

在明确 SD 各子系统的因果关系后，通过方程式表示出各个变量之间的关系，其中，地区生产总值、人口数量和能源消费总量等状态变量与速率变量之间的关系方程分别为

$$\theta_{\text{GDP}}^t = \theta_{\text{GDP}}^{t-1} + \int_{t-1}^t R_{\text{GDP}} dt \quad (6)$$

式中： θ_{GDP} 为生产总值； R_{GDP} 为生产总值增长量。

$$P^t = P^{t-1} + \int_{t-1}^t R_p dt \quad (7)$$

式中： P 为人口数量； R_p 为人口增长量。

$$C_e^t = C_e^{t-1} + \int_{t-1}^t R_{ce} dt \quad (8)$$

式中： C_e 为能源消费总量； R_{ce} 为能源消费增长量。

模型中其他变量关系方程如下。

1) 合成氨子系统方程。第 t 年合成氨氢需求量 H_s^t 为

$$H_s^t = Q_{as}^t \alpha_s \quad (9)$$

式中： Q_{as}^t 为合成氨需求量； α_s 为单位合成氨生产的耗氢量。

粮食产量设为 Q_g^t ，将化肥肥效提高及有机肥替代统一为化肥政策因子 γ_1 ，以抑制化肥过度使

用。合成氨需求量与时间、粮食产量、化肥政策因子之间的关系采用回归系数方法分析，即

$$Q_{as}^t = A_1 Q_g^t + A_2 \gamma_1 + A_3 \quad (10)$$

式中： A_1 、 A_2 、 A_3 为常数。

粮食年产量由粮食播种面积和粮食单位产量决定，播种面积近几年维持在一个稳定的水平，波动幅度不大。

$$Q_g^t = A^t q_g^t \quad (11)$$

式中： A^t 为粮食播种面积； q_g^t 为粮食单位产量。

$$q_g^t = A_4 \theta_{GDP-a}^t + A_5 Q_{as}^{t-1} + A_6 \quad (12)$$

式中： θ_{GDP-a}^t 为农业产值； A_4 、 A_5 、 A_6 为常数。

2) 原油加工子系统方程。第 t 年原油加工用氢需求量 H_0^t 为

$$\begin{cases} H_0^t = H_d^t + H_g^t \\ H_d^t = Q_d^t \alpha_d \\ H_g^t = Q_g^t \alpha_g \end{cases} \quad (13)$$

式中： H_d^t 、 H_g^t 分别为第 t 年柴油、汽油需氢量； Q_d^t 、 Q_g^t 分别为第 t 年柴油、汽油产量； α_d 、 α_g 分别为合成单位柴油、汽油的耗氢量。

根据灰色关联度分析结果，柴油和汽油产量分别与工业产值、原油加工量、能源消费总量、公路里程相关，可表示为

$$Q_d^t = C_1 \theta_{GDP-I}^t + C_2 Q_{op}^t + C_3 M_R^t + C_4 C_e^t + C_5 \quad (14)$$

$$Q_g^t = C_6 \theta_{GDP-I}^t + C_7 Q_{op}^t + C_8 M_R^t + C_9 C_e^t + C_{10} \quad (15)$$

式中： C_1 、 C_2 、 $\dots$ 、 C_{10} 为常数； Q_{op}^t 为原油加工量； θ_{GDP-I}^t 为工业产值； M_R^t 为公路里程。

3) 交通子系统方程。第 t 年氢燃料电池汽车用氢需求量 Q_{JT-H}^t 为

$$Q_{JT-H}^t = Q_{V-H}^t H_{lt}^n \quad (16)$$

式中： Q_{V-H}^t 为燃料电池汽车使用量，包括公交车和重卡； H_{lt}^n 为第 n 种燃料电池汽车全寿命耗氢量。

$$H_{lt}^n = M^n h_{lt}^n \quad (17)$$

式中： M^n 为第 n 种车年行驶里程数； h_{lt}^n 为第 n 种燃料电池汽车行驶 100 km 的单位耗氢量。

$$\begin{cases} Q_{bus-H}^t + Q_{bus-F}^t = Q_{bus}^t \\ Q_{HV-H}^t + Q_{HV-F}^t = Q_{HV}^t \end{cases} \quad (18)$$

式中： Q_{bus}^t 为公交车数量； Q_{bus-H}^t 、 Q_{bus-F}^t 为燃氢和

燃油公交车的数量； Q_{HV}^t 为重卡数量； Q_{HV-H}^t 、 Q_{HV-F}^t 为燃氢和燃油重卡的数量。以氢能公交车为例，政策支持和综合效益的影响作用可表示为

$$\begin{cases} Q_{bus-H}^t = r_{bus}^t Q_{bus}^t \\ r_{bus}^t = (1 + v_{ne}) \gamma_2 r_{bus}^{t-1} \end{cases} \quad (19)$$

式中： r_{bus}^t 为第 t 年氢能公交车占公交车总量的比值； v_{ne} 为新能源汽车与汽车总量比值的增长率，体现政策的支持作用； γ_2 为综合效益作用系数，体现在氢燃料电池汽车替代前后 CO_2 排放量与基准值的关系，可表示为

$$\gamma_2 = 1 + \frac{E_{bus-CO_2}^{before} - E_{bus-CO_2}^{after}}{E_{bus-CO_2}^{base}} \quad (20)$$

式中： $E_{bus-CO_2}^{before}$ 、 $E_{bus-CO_2}^{after}$ 为氢能公交车替代前后的年碳排放量； $E_{bus-CO_2}^{base}$ 为碳排放量基准值，设为 2020 年的碳排放量。重卡的政策作用关系式与式 (19) ~ (20) 类似，不再赘述。燃油汽车的 CO_2 排放量 E_{V-CO_2} 为

$$E_{V-CO_2} = \sum \varepsilon_{V-F}^n M^n \quad (21)$$

式中： ε_{V-F}^n 为第 n 种燃油汽车 CO_2 排放因子。

公交车数量与城市人口数量和交通业产值相关，即

$$Q_{bus}^t = V_1 P_{ur}^t + V_2 \theta_{GDP-V}^t + V_3 \quad (22)$$

式中： P_{ur}^t 为城市人口数量； θ_{GDP-V}^t 为交通业产值； V_1 、 V_2 、 V_3 为常数。

$$Q_{HV}^t = V_4 \theta_{GDP-V}^t + V_5 \quad (23)$$

式中： V_4 、 V_5 为常数。

4) 供热子系统方程。第 t 年供热用氢需求量 Q_{GR-H}^t 为

$$Q_{GR-H}^t = k_1 Q_{mix}^t \quad (24)$$

式中： Q_{mix}^t 为混合气体量； k_1 为掺氢比例，指氢气占混合气体的比例。不同种类气体的关系为

$$\begin{cases} Q_{mix}^t = Q_{ng-H}^t + Q_{GR-H}^t \\ q_{mix}^n Q_{mix}^n = q_{mix}^m Q_{mix}^m = E_{heat} \end{cases} \quad (25)$$

式中： Q_{ng-H}^t 为城市天然气供气量； Q_{mix}^n 、 Q_{mix}^m 为不同掺氢比的混合气体量； q_{mix}^n 、 q_{mix}^m 为混合气体热值； E_{heat} 为供热量。可根据天然气数据得到对应供热量以计算不同掺氢比例下的混合气体量。

$$Q_{ng-H}^t = H_1 Q_{ng}^t + H_2 P_{ng}^t + H_3 \quad (26)$$

式中： Q'_{ng} 为天然气消费总量； P'_{ng} 为城市天然气用气人口； H_1 、 H_2 、 H_3 为常数。

$$C'_{ng} = C'_e k_{ES} \quad (27)$$

式中： C'_e 为能源消费总量； k_{ES} 为天然气消费占比。

$$P'_{ng} = H_4 P'_{ur} + H_5 \theta'_{GDP} + H_6 \quad (28)$$

式中： H_4 、 H_5 、 H_6 为常数。

不同掺氢比下各参数的数值^[22]如表 2 所示。

表 2 不同掺氢比的参数数值
Table 2 Parameter values for different hydrogen blending ratio

掺氢比/%	CH ₄ 占比/%	H ₂ 占比/%	高热值/(MJ·m ⁻³)	密度/(kg·m ⁻³)
0	96.114	0.0350	35.785	0.706
5	91.308	5.0333	34.082	0.674
10	86.507	10.032	32.378	0.643
15	81.699	15.028	30.676	0.612
20	76.891	20.028	28.975	0.581

混合气体的 CO₂ 排放量 $E_{CO_2}^{mix}$ 可表示为

$$E_{CO_2}^{mix} = 0.717 k_2 Q'_{mix} \frac{44}{16} \quad (29)$$

式中： k_2 为 CH₄ 占比。

当系统需热量即混合气体供热量一定时，随着氢气占比的提高，CH₄ 质量会逐渐降低，燃烧产生的 CO₂ 减少，环境效益得以提高。为简化外界因素对子系统影响的复杂程度，将综合效益、政策支持简化为政策支持因子 γ_3 ，即

$$\gamma_3 = \frac{E_{H-CO_2}^{before} - E_{H-CO_2}^{after}}{E_{H-CO_2}^{base}} \quad (30)$$

式中： $E_{H-CO_2}^{before}$ 、 $E_{H-CO_2}^{after}$ 分别为掺氢前后供热系统的 CO₂ 排放量； $E_{H-CO_2}^{base}$ 为碳排放量基准值，根据式 (29) 计算出 2020 年末掺氢时天然气供气的碳排放量作为基准值。

天然气掺氢后混合气体的密度、热值都有所改变，在保障系统安全稳定运行的前提下，目前可允许的最高掺氢比例为 20%^[23-29]，以 2021 年为起点设定初始掺氢比为 5%，上限为 20%，且掺氢比按 5% 的比例只增不减。掺氢比和政策支持因子的关系如表 3 所示。

表 3 掺氢比与 γ_3 的关系
Table 3 Relationship between hydrogen blending ratio and γ_3

第 $t-1$ 年 γ_3	第 t 年掺氢比/%
$0 \leq \gamma_3 < 0.0035$	5
$0.0035 \leq \gamma_3 < 0.007$	10
$0.007 \leq \gamma_3 < 0.0105$	15
$\gamma_3 \geq 0.0105$	20

2.3 总系统流程

在子系统因果关系分析、系统方程构建的基础上，利用 SD 软件 Vensim PLE 绘制总系统流程如图 6 所示，图 6 中包括状态变量、速率变量、辅助变量和常量。

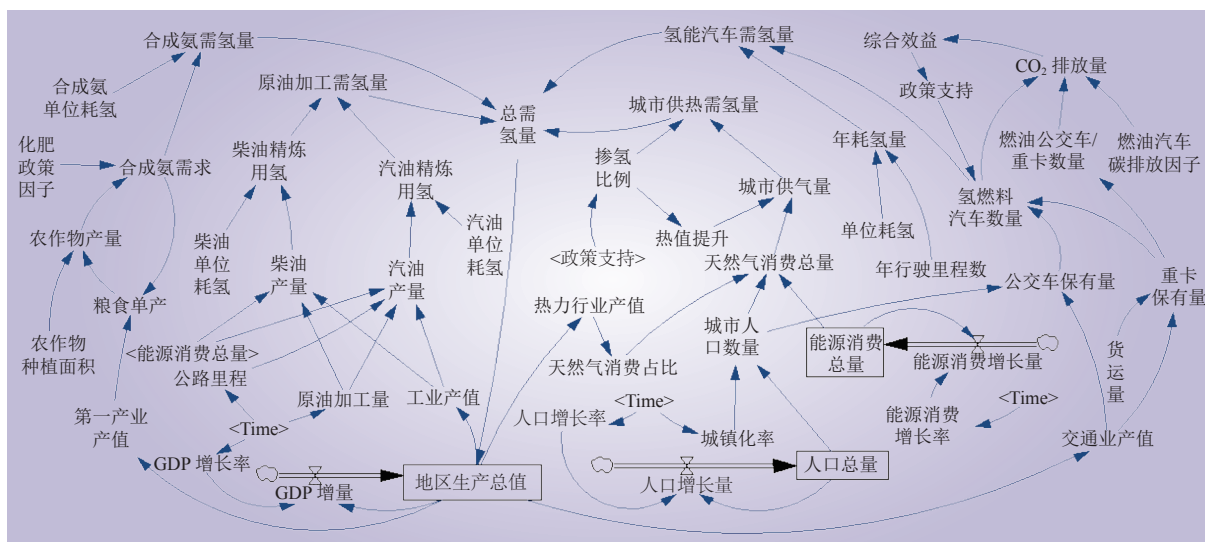


图 6 氢需求系统动力学预测模型

Fig. 6 Hydrogen demand system dynamics prediction model

3 算例分析

以甘肃省的实际数据为例进行算例分析，验证氢需求预测模型的合理性和有效性。从中国统计年鉴和国家统计局的网站中得到该省份原始数据和人口、地区生产总值、能源消费总量等社会数据。

3.1 模型参数估计

在氢需求 SD 预测模型中，包含常数和表函数 2 种参数。表函数指 SD 中的自定义函数，用于反映 2 个变量之间特殊的非线性关系。

合成氨子系统中化肥政策因子设为 0.8，单位合成氨生产的耗氢量 α_s 设为 0.1765^[25]。原油加工子系统中^[9]，合成单位柴油、汽油的耗氢量分别为 $\alpha_d=73.8(\text{kg 氢/t 柴油})$ 、 $\alpha_g=26.7(\text{kg 氢/t 汽油})$ 。交通子系统中，公交车年行驶里程为 $7 \times 10^4 \text{ km}$ ，重卡年行驶里程为 $10 \times 10^4 \text{ km}$ ，氢燃料电池汽车耗氢量为 0.05 kg/km ，燃油公交车 CO_2 排放因子为 0.2077 kg/km ，柴油重卡 CO_2 排放因子为 0.2716 kg/km 。根据该地区新能源汽车推广应用实施方案，2025 年前 v_{ne} 设为 0.5%，2025~2030 年设为 1%。设初始氢能公交车占公交车总量的 10%，氢能重卡占重卡总量的 5%。供热子系统中，根据该省印发的“十四五”能源发展规划，2021~2025 年 5 年的天然气消费占比累计增长量为 4.11%，设 2026~2030 年累计增长量为 2.5%。

其他常数利用最小二乘法进行方程回归得到，结果如表 4 所示。

根据该地区印发的“十四五”国民经济和社

会发展规划，2021~2025 年生产总值增长率设为 6.5%，2026~2030 年由于经济的高质量发展会导致其增长率逐渐下降，设为 6%；2021~2025 年城市化增长率设为 8%，2026~2030 年设为 5%；根据能源发展规划，天然气消费占比在 2021~2025 年间累计增长量为 4.11%，2026~2030 年累计增长量设为 2.5%。

规划中未体现的指标根据历史发展趋势利用灰色 GM(1,1) 模型进行预测，如能源消费总量、人口数量、原油加工量。选用该模型的原因在于能源消费总量、人口数量等参数的变化受大量复杂因素影响，而灰色预测模型适用于存在大量未知信息系统的模型，可以解决评价指标难以准确量化的问题。在灰色预测模型中，预测精度与原始数据量无正相关的关系，且输入数据越靠近预测年，预测精度越高^[7]。该地区原油加工量从 2012 年开始逐渐降低，在 2016 年后呈现缓慢上升的趋势，以 2016~2020 年的值作为历史数据进行预测；人口数量和能源消费总量选取 2011~2020 年的值作为历史数据，预测结果如图 7 所示。

3.2 模型检验

将 2008~2014 年用于合成氨生产的氢需求量的历史数据和模型计算数据进行对比，并计算误差，如表 5 所示，进一步验证模型的有效性。

将 2011~2020 年用于原油加工的氢需求量的历史数据和模型计算数据进行对比，并计算误差，如表 6 所示，验证模型的有效性。

由于目前城市供热系统和交通系统中未采用氢能替代，为检验系统可行性，将该地区 2011~2020 年的城市天然气供应量、公交车和重卡数量的历史数据与模拟结果进行对比，并计算误差，结果如表 7~8 所示。

从模拟结果可以看出，合成氨子系统除了 2012 年结果差值较大之外，其他年份的准确度较高，整体平均误差为 3.29%；原油加工子系统氢需求量 SD 模型具有较高的预测精度，平均误差仅为 1.20%；供热子系统平均误差为 4.13%，交通子系统平均误差为 3.11%，均在可接受的范围内。综合来看，在对合成氨生产、原油加工、交通、城市供热子系统的模拟检验中，本文构建的 SD 模型效果稳定且误差较小，可用于该地区的氢需求量预测。

表 4 各方程式参数估计结果

Table 4 Parameter estimation results for each equation

方程序号	参数估计值
(10)	$A_1=0.045; A_2=-1061.35; A_3=1229$
(12)	$A_4=1.319; A_5=-5.176; A_6=3152.22$
(14)	$C_1=0.1587; C_2=0.03547; C_3=-14.7019;$ $C_4=-0.0999; C_5=680.6551$
(15)	$C_6=-0.0873; C_7=0.2671; C_8=25.3917;$ $C_9=0.02941; C_{10}=-373.0887$
(22)	$V_1=-1.0347; V_2=8.2429; V_3=2857.612$
(23)	$V_4=3.2224; V_5=0.1233$
(26)	$H_1=0.6013; H_2=0.0197; H_3=-5.6195$
(28)	$H_4=1.0513; H_5=-0.01623; H_6=-706.22$

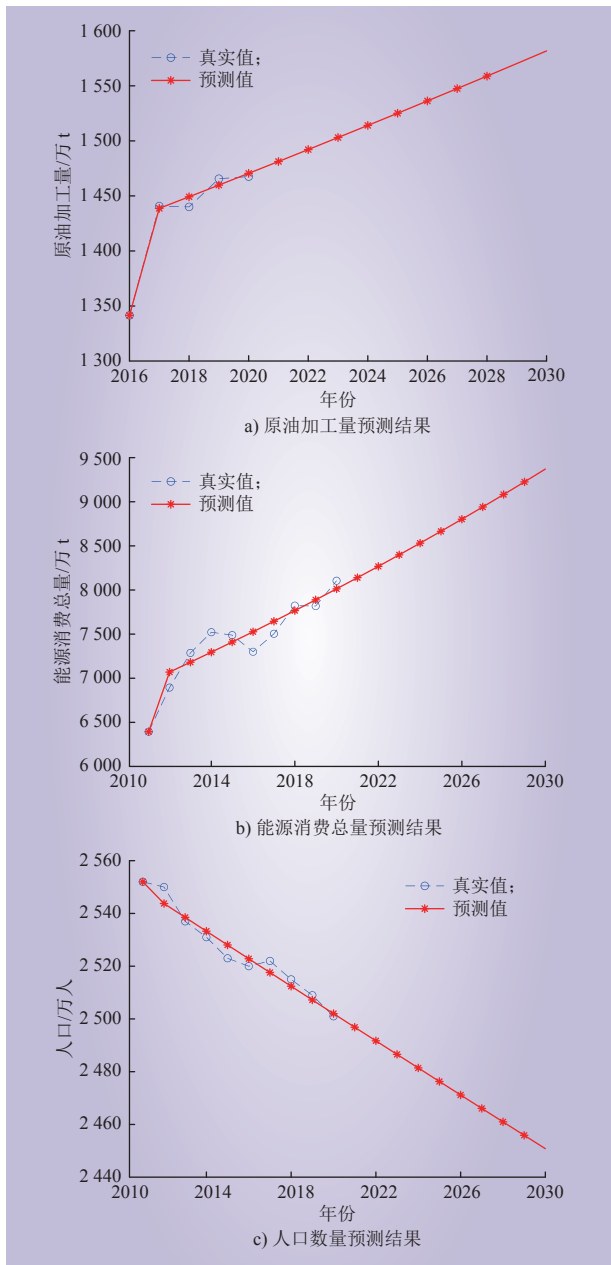


图 7 灰色模型预测结果
Fig. 7 Gray model prediction results

3.3 氢需求预测结果

利用 4 个子系统模型对该省的氢需求量进行中长期预测，2021~2030 年该省各子系统及总氢需求量变化趋势如图 8 所示。2021、2025、2030 年该省各子系统及总氢需求量预测值如表 9 所示。

从图 8 中可以看出，合成氨和原油加工子系统氢需求量稳定增长；交通子系统由于氢燃料电池汽车对燃油汽车替代后，碳排放量不断减少及

表 5 合成氨子系统用氢模拟结果
Table 5 Hydrogen simulation results for ammonia subsystem

年份	真实值/t	模拟值/t	相对误差/%
2008	116 261.34	120 653.26	-3.64
2009	134 320.52	132 948.70	1.03
2010	134 816.54	135 149.83	-0.25
2011	129 440.86	126 231.25	2.54
2012	76 131.14	69 089.26	10.19
2013	123 665.63	122 645.21	0.83
2014	101 556.86	106 445.71	-4.59

表 6 原油加工子系统用氢模拟结果
Table 6 Hydrogen simulation results for crude oil processing subsystem

年份	真实值/t	模拟值/t	相对误差/%
2011	64 960.63	65 089.34	0.20
2012	60 567.31	59 888.43	-1.12
2013	59 165.66	59 780.53	1.04
2014	56 554.02	55 507.57	-1.85
2015	53 686.56	51 691.33	-3.72
2016	49 206.54	49 719.33	1.04
2017	50 648.84	51 946.83	2.56
2018	50 402.01	51 966.85	3.10
2019	52 077.10	53 138.54	2.04
2020	52 074.54	50 614.46	-2.80

表 7 城市天然气供应量模拟结果
Table 7 Simulation results of urban natural gas supply

年份	真实值/10 ⁸ m ³	模拟值/10 ⁸ m ³	相对误差/%
2011	7.29	6.91	-5.23
2012	8.81	8.15	-7.44
2013	11.21	11.42	1.88
2014	13.40	13.78	2.86
2015	15.92	15.70	-1.40
2016	16.19	17.14	5.88
2017	16.86	18.18	7.82
2018	20.37	20.65	1.37
2019	23.51	22.51	-4.26
2020	25.20	23.83	-5.46

新能源汽车占比逐渐提高，氢需求量增长率逐渐增加；供热子系统需氢量的增长率呈现先上升后平稳的特点，这是由于前期随着掺氢比的提高，

表 8 公交车、重卡数量模拟结果
Table 8 Simulation results of the number of buses and heavy trucks

年份	公交车			重卡		
	真实值/辆	模拟值/辆	相对误差/%	真实值/万辆	模拟值/万辆	相对误差/%
2011	4965	4766	-4.00	7.40	7.38	-0.28
2012	5214	5379	3.17	8.12	8.02	-1.20
2013	5359	5523	3.06	8.78	8.73	-0.56
2014	5488	5649	2.93	9.56	9.14	-4.41
2015	5275	5386	2.10	9.40	9.31	-0.95
2016	5233	5634	7.67	9.45	9.63	1.91
2017	5850	6161	5.32	9.78	9.97	1.96
2018	6519	6503	-0.25	10.34	10.54	1.96
2019	7314	7102	-2.90	10.78	11.09	2.82
2020	7307	6815	-6.73	11.66	11.28	-3.23

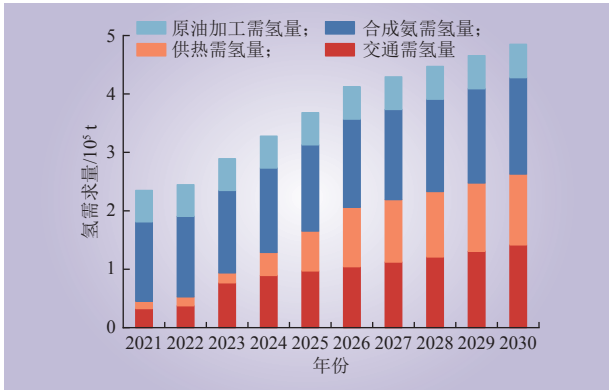


图 8 2021~2030 年氢气需求量
Fig. 8 Hydrogen demand from 2021 to 2030

表 9 2021、2025、2030 年氢需求量预测值
Table 9 Hydrogen demand projections for 2021, 2025, 2030

年份	合成氨系统/t	原油加工系统/t	供热系统/t	交通系统/t	总需氢量/t
2021	135936.43	53639.29	12554.15	32649.42	234779.29
2025	147731.64	54908.92	68923.98	97411.11	368975.65
2030	165003.69	57085.43	121284.44	141629.52	485003.08

需氢量增长率迅速提高，在掺氢比达到 20% 上限之后，增长率趋于稳定。

4 结论

1) 明确了 SD 的基本原理和建模步骤。以甘

肃省为例，分别建立了 4 个子系统的氢需求预测 SD 模型，其中，合成氨子系统平均误差为 3.29%、原油加工子系统平均误差仅为 1.95%、供热子系统平均误差为 4.13%、交通子系统平均误差为 3.11%，各系统的相对误差均在可接受范围内。

2) 预计甘肃省 2025 年工业需氢 202 640 t，2030 年达到 222 088 t；交通子系统作为新兴用氢产业，预计 2025 年需氢 97 411 t，2030 年达 141 629 t；城市供热子系统氢需求量随着掺氢比的增加而提高，预计 2025 年城市供热需氢 68 924 t，2030 年达 121 284 t。

3) 利用 SD 构建省级工业、交通、供热领域的氢需求量预测模型，结合发展规划及灰色预测模型进行参数设定具有一定可行性。在未来的工作中将进一步考虑更多的氢消费行业，如电力、甲醇生产等。

参考文献：

[1] KHATOON S, IBRAHEEM, SINGH A K, *et al.* Analysis and comparison of various methods available for load forecasting: an overview[C]//2014 Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH). Ghaziabad, India. IEEE, 2015: 243–247.

[2] 李开卷. 地区电网中长期电力负荷预测研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2020.

LI Kaijuan. Study on medium and long-term electricity load forecasting in regional power grids[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.

[3] 廖旋焕, 胡智宏, 马莹莹, 等. 电力系统短期负荷预测方法综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 147–152.

LIAO Nihuan, HU Zhihong, MA Yingying, *et al.* Review of the short-term load forecasting methods of electric power system[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(1): 147–152.

[4] MA T, JI J, CHEN M. Study on the hydrogen demand in China based on system dynamics model[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(7): 3114–3119.

[5] PARK S Y, KIM J W, LEE D H. Development of a market penetration forecasting model for hydrogen fuel cell vehicles considering infrastructure and cost reduction effects[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(6): 3307–3315.



- [6] RAHMOUNI S, SETTOU N, NEGROU B, *et al.* GIS-based method for future prospect of hydrogen demand in the Algerian road transport sector[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(4): 2128–2143.
- [7] 张红, 袁铁江, 谭捷. 统一能源系统氢负荷中长期预测 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(10): 3364–3372.
- ZHANG Hong, YUAN Tiejia, TAN Jie. Medium and long-term forecast of hydrogen load in unified energy system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(10): 3364–3372.
- [8] 彭生江, 孙传帅, 妥建军, 等. 面向统一能源系统的中长期氢负荷预测 [J]. *中国电力*, 2022, 55(1): 84–90.
- PENG Shengjiang, SUN Chuanshuai, TUO Jianjun, *et al.* Medium and long-term hydrogen load forecast for unified energy system[J]. *Electric Power*, 2022, 55(1): 84–90.
- [9] HUANG J S, LI W, WU X Y. Forecasting the hydrogen demand in China: a system dynamics approach[J]. *Mathematics*, 2022, 10(2): 205.
- [10] 邓斌, 张楠, 王江, 等. 基于 LTC-RNN 模型的中长期电力负荷预测方法 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2022, 55(10): 1026–1033.
- DENG Bin, ZHANG Nan, WANG Jiang, *et al.* Medium- and long-term power load forecasting method based on LTC-RNN model[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2022, 55(10): 1026–1033.
- [11] 王其藩. 系统动力学-修订版 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [12] 李肖冰. 基于系统动力学的中国能源供求预测模型研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2015.
- LI Xiaobing. Research on China energy supply and demand forecasting model based on system dynamics[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015.
- [13] 陈智锴. 基于系统动力学的工业园区电力需求分析与预测 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- CHEN Zhikai. Analysis and forecast of power demand in industrial parks based on system dynamics[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [14] 刘亚琼. 基于系统动力学的广东省电力需求预测模型的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- LIU Yaqiong. Research on Guangdong power demand forecasting model based on system dynamics[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [15] 陈蓉珺, 何永秀, 陈奋开, 等. 基于系统动力学和蒙特卡洛模拟的电动汽车日负荷远期预测 [J]. *中国电力*, 2018, 51(9): 126–134.
- CHEN Rongjun, HE Yongxiu, CHEN Fenkai, *et al.* Long-term daily load forecast of electric vehicle based on system dynamics and Monte Carlo simulation[J]. *Electric Power*, 2018, 51(9): 126–134.
- [16] LOPEZ-ARBOLEDA E, SARMIENTO A T, CARDENAS L M. Policy assessment for electromobility promotion in Colombia: a system dynamics approach[J]. *Transportation Research Part D:Transport and Environment*, 2023, 121: 103799.
- [17] 熊亚林, 刘玮, 高鹏博, 等. “双碳”目标下氢能在我国合成氨行业的需求与减碳路径 [J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(12): 4048–4058.
- XIONG Yalin, LIU Wei, GAO Pengbo, *et al.* Demand of hydrogen energy in China's synthetic ammonia industry and carbon reduction path under the goal of “double carbon” [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(12): 4048–4058.
- [18] SHARIFZADEH M, SIKINIOTI-LOCK A, SHAH N. Machine-learning methods for integrated renewable power generation: a comparative study of artificial neural networks, support vector regression and Gaussian process regression[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 108: 513–538.
- [19] 贾亮. 我国合成氨及下游产品工业消费现状与预测 [J]. *化学工业*, 2012, 30(增刊1): 38–41.
- JIA Liang. Consumption situation and prediction of ammonia and its downstream industries in China[J]. *Chemical Industry*, 2012, 30(S1): 38–41.
- [20] 张卫峰, 季玥秀, 马骥, 等. 中国化肥消费需求影响因素及走势分析: I 化肥供应 [J]. *资源科学*, 2007, 29(6): 162–169.
- ZHANG Weifeng, JI Yuexiu, MA Ji, *et al.* Factors affecting fertilizer demand and supply in China[J]. *Resources Science*, 2007, 29(6): 162–169.
- [21] 王健建, 胡辰树. 我国氢燃料电池专用车发展现状与趋势分析 [J]. *专用汽车*, 2021(4): 51–55.
- WANG Jianjian, HU Chenshu. Development status and trend analysis of special purpose vehicle for hydrogen fuel cell in China[J]. *Special Purpose Vehicle*, 2021(4): 51–55.
- [22] 周静. 天然气管线掺混氢气的特性分析 [D]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2020.
- ZHOU Jing. Characteristic analysis of natural gas pipeline mixed with hydrogen[D]. Fushun: Liaoning Shihua University, 2020.
- [23] 白雪松. 国内外氢气的生产和消费 [J]. *化工技术经济*, 2003, 21(12): 18–25.
- BAI Xuesong. An analysis on the production and consumption of hydrogen in the world and China[J]. *Chemical Techno-Economics*, 2003, 21(12): 18–25.

- [24] 张洪玮, 赵杰, 李敬法, 等. 天然气掺氢输送环境下的腐蚀与氢脆研究进展 [J]. 天然气工业, 2023, 43(6): 126–138.
- ZHANG Hongwei, ZHAO Jie, LI Jingfa, *et al.* Research progress on corrosion and hydrogen embrittlement in hydrogen-natural gas pipeline transportation[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(6): 126–138.
- [25] WITKOWSKI A, RUSIN A, MAJKUT M, *et al.* Analysis of compression and transport of the methane/hydrogen mixture in existing natural gas pipelines[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2018, 166: 24–34.
- [26] 彭生江, 杨德州, 孙传帅, 等. 基于氢负荷需求的氢能系统容量规划 [J]. 中国电力, 2023, 56(7): 13–20, 32.
- PENG Shengjiang, YANG Dezhou, SUN Chuanshuai, *et al.* Capacity planning of hydrogen production and storage system based on hydrogen load demand[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 13–20, 32.
- [27] 尚娟, 鲁仰辉, 郑津洋, 等. 掺氢天然气管道输送研究进展和挑战 [J]. 化工进展, 2021, 40(10): 5499–5505.
- SHANG Juan, LU Yanghui, ZHENG Jinyang, *et al.* Research status-in-situ and key challenges in pipeline transportation of hydrogen-natural gas mixtures[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(10): 5499–5505.
- [28] 卢子敬, 李子寿, 郭相国, 等. 基于多目标人工蜂鸟算法的电-氢混

合储能系统最优配置 [J]. 中国电力, 2023, 56(7): 33–42.

LU Zijing, LI Zishou, GUO Xiangguo, *et al.* Optimal configuration of electricity-hydrogen hybrid energy storage system based on multi-objective artificial hummingbird algorithm[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 33–42.

- [29] 魏震波, 魏平桢, 郭毅, 等. 考虑需求侧管理和碳交易的电-气互联网络分散式低碳经济调度 [J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 33–44.

WEI Zhenbo, WEI Pingan, GUO Yi, *et al.* Decentralized low-carbon economic dispatch of electricity-gas network in consideration of demand-side management and carbon trading[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 33–44.

作者简介:

袁铁江 (1975—), 男, 博士, 教授, 从事氢能与电力、化石能源系统集成技术等研究, E-mail: ytj1975@dlut.edu.cn;

张一瑾 (1998—), 女, 通信作者, 硕士, 从事氢负荷预测、电源低碳规划研究, E-mail: 754097877@qq.com;

杨紫娟 (1998—), 女, 硕士研究生, 从事氢能与电力、化石能源系统集成研究, E-mail: 1315633224@qq.com.

(责任编辑 蒋东方)

Medium and Long-Term Hydrogen Load Prediction Based on System Dynamics

YUAN Tiejiang¹, ZHANG Yijin¹, YANG Zijuan^{1,2}, JIANG Dongfang³

(1. College of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. School of Electronic Control, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: Hydrogen energy will play a great role in various fields under the background of “double carbon”, it is important to carry out medium and long-term forecasting of hydrogen demand, and propose a medium and long-term forecasting model of provincial hydrogen demand based on the system dynamics approach. Firstly, the hydrogen demand was divided into three major areas, namely, industry, heating and transportation, and the interaction of internal factors of each subsystem and the influence of external factors such as economic development and policy support were considered to analyze the cause-effect relationship and construct the prediction equation, and on this basis, a flow chart of the total system hydrogen demand prediction was drawn. Secondly, the system parameters are set, and the equation constants are obtained by least squares equation regression, and the table function parameters are set based on the development plan of the province and the gray model. Finally, the system dynamics model built was used to forecast the hydrogen demand in the province.

This work is supported by the Set Up Projects of State Grid Economic Research Institute Co., Ltd. (Study on Peak Path of Carbon Emission in Power System Based on New Energy Cloud, No.ZZKJ-2021-03).

Keywords: system dynamics; hydrogen load prediction; causal analysis; system flow chart; grey model