



团 体 标 准

T/CCPITCSC XXX—202X

氢能源（碳中和）定价技术指引

Technical guidelines for hydrogen energy (carbon neutrality) pricing

（征求意见稿）

202X – XX – XX 发布

202X – XX – XX 实施

中国国际贸易促进委员会商业行业委员会 发 布

目 次

前言 III

引言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

 3.1 可再生能源 1

 3.2 氢能 1

 3.3 绿氢 1

 3.4 碳捕集利用与封存 1

 3.5 灰氢 1

 3.6 蓝氢 1

 3.7 生命周期评价 1

 3.8 碳足迹 2

4 总体原则和要求 2

 4.1 成本覆盖原则 2

 4.2 环境效益原则 2

 4.3 氢能源品质要求 2

 4.4 储存和运输安全要求 2

 4.5 加氢站建设与运营要求 2

5 定价基准与成本核算体系 2

 5.1 制氢成本核算 2

 5.2 储存成本核算 3

 5.3 运输成本核算 3

 5.4 加注环节成本核算 3

 5.5 定价修正 4

6 碳足迹核算 4

 6.1 评价目的和范围的确定 4

 6.2 生命周期清单分析 5

 6.3 生命周期影响评价 6

 6.4 生命周期结果解释 7

7 数据采集 7

 7.1 数据分类 7

 7.2 数据来源 7

 7.3 数据动态监测 8

附录 A（资料性）氢能源成本与碳排放核算模型 9

附录 B（资料性）代表性氢能源碳足迹核算方法 14

参考文献.....	16
-----------	----

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由西安交通大学、陕西智库科学技术研究院有限公司提出。

本文件由中国国际贸易促进委员会商业行业委员会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件响应了联合国2030可持续发展目标中的第7项“经济适用的清洁能源”、第12项“负责任的消费和生产”和第13项“气候行动”。

引 言

在全球加速迈向碳中和的时代背景下，氢能源凭借其来源丰富、应用广泛、清洁低碳的特性，已经成为实现能源转型与可持续发展的重要载体。然而，氢能源产业的健康发展不仅依赖于技术的突破，更需要科学合理的定价机制来引导市场资源配置与产业协同进步。

氢能源的定价涉及制备、储存、运输到加注等多个环节，各环节成本因素多样且相互关联。制氢方式的选择影响成本基础与环境效益，储存与运输方式的多样性影响了成本的高低与效率，加氢站的建设与运营也是影响氢能源终端应用的关键节点。此外，随着碳市场逐步完善，氢能源的碳足迹核算与环境价值评估也成为定价不可忽视的因素。

《氢能源（碳中和）定价技术指引》团体标准应运而生，立足于我国仍以煤制氢为主的客观现实，本文件旨在系统地梳理氢能源全生命周期的成本构成与核算方法，综合考虑制备技术、市场动态、区域差异以及环境效益等多方面因素，力求构建一个科学、透明的定价框架。通过明确各环节的成本核算要点、定价修正机制以及数据采集与监测建议，本文件致力于为政策制定者提供决策支持，为行业从业者提供定价参考，为企业投资与运营提供经济性分析依据，推动落实我国《氢能产业发展中长期规划（2021-2035年）》的阶段性任务，促进氢能源产业在碳中和目标下的高质量发展。

氢能源（碳中和）定价技术指引

1 范围

本文件结合氢能源在碳中和目标下的应用背景，围绕制备、储存、运输与加注环节，给出氢能源成本构成与碳排放核算方法。

本文件适用于政策制定、行业定价参考以及企业经济性分析。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 24499—2009 氢气、氢能与氢能系统术语

GB/T 24044—2008 环境管理 生命周期评价 要求与指南

3 术语和定义

GB/T 24499—2009与GB/T 24044—2008界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

可再生能源 renewable energy

可通过自然过程不断补充和再生的能源，包括水能、风能、太阳能、生物质能、地热能、海洋能等。

3.2

氢能 hydrogen energy

氢在物理与化学变化过程中释放的能量，可用于发电、各种车辆和飞行器用燃料、家用燃料等。

[来源：GB/T 24499—2009，2.2]

3.3

绿氢 green hydrogen

通过使用**可再生能源**（3.1）制取的氢气。

3.4

碳捕集利用与封存 carbon capture, utilization, and storage

将二氧化碳从能源利用、工业过程等排放源或大气中捕集分离，并输送到适宜的场地加以利用或者封存，以实现二氧化碳长期封存或转化利用的过程。

3.5

灰氢 grey hydrogen

以煤炭、天然气、石油等化石燃料为原料制取的氢气，以及在焦炉煤气、氯碱工业尾气、丙烷脱氢和乙烷裂解等过程中产生的工业副产氢。

3.6

蓝氢 blue hydrogen

以化石燃料和工业副产为原料，在生产过程中增加**碳捕集利用与封存**（3.4）技术制取的氢气。

3.7

生命周期评价 life cycle assessment (LCA)

对评价对象的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价，包括确定评价目的和范围、清单分析、影响评价与解释等。

[来源：GB/T 24044—2008，3.2，有修改]

3.8

碳足迹 carbon footprint

衡量个体、组织、产品或国家在一定时间内直接或间接导致的二氧化碳排放量的指标,涵盖了产品或服务从生产、储存、运输、使用到废弃处理的全生命周期评价(3.7)。

4 总体原则和要求

4.1 成本覆盖原则

- 成本应反映与覆盖氢能源制备、储存、运输、加注及定价修正等环节;
- 成本核算需包括全生命周期的设备折旧、能耗、人工维护及安全防护费用;
- 对绿氢项目,需计算绿氢制取和使用的减排效果以平衡前期投资成本。

4.2 环境效益原则

- 采用生命周期评价核算制氢路径的碳排放强度,并衔接碳市场交易机制;
- 绿氢定价可规定绿色证书,通过溢价体现环境属性和收益;
- 对高碳制氢工艺征收碳税或限制补贴,推动清洁技术替代。

4.3 氢能源品质要求

- 工业氢的品质技术指标相关要求应符合 GB/T 3634.1—2006 相应部分的规定;
- 纯氢、高纯氢和超纯氢的品质技术指标相关要求应符合 GB/T 3634.2—2011 相应部分的规定;
- 燃料氢气的品质技术指标与试验方法应符合 GB/T 37244—2018 相应部分的规定;
- 其余氢气杂质控制应根据终端应用场景执行对应国家标准及行业专项标准。

4.4 储存和运输安全要求

- 氢气储存输送系统的总体设计、安全附件、安装调试、运行管理和风险评估的要求应符合 GB/T 34542.1—2017 相应部分的规定;
- 液氢储存和运输过程中的液氢贮罐设置、贮罐和罐式集装箱运输、吹扫与置换、安全与防护及事故处理应符合 GB/T 40060—2021 相应部分的规定;
- 长管拖车运输需执行 JT/T 617—2018 系列危险货物道路运输规则相应部分的规定。

4.5 加氢站建设与运营要求

- 加氢站的分类、供氢方式、设备及组件、氢品质、电气、控制系统、交付资料、加氢站测试、标志与铭牌、运行管理、检查和维护等的要求应符合 GB/T 43674—2024 相应部分的规定;
- 加氢站的选址、氢气运输、站内制氢、氢气储存、压缩、加注及安全与消防等的要求应符合 GB/T 34584—2017 相应部分的规定。

5 定价基准与成本核算体系

5.1 制氢成本核算

5.1.1 制氢方式

- 传统制氢技术:煤气化制氢、蒸汽甲烷重整制氢、石脑油重整制氢、工业副产气提取制氢、传统电解水制氢;
- 新型制氢技术:可再生能源电解水制氢(风电、光伏制氢)、热化学制氢、核能制氢、生物质制氢等。

5.1.2 成本构成

5.1.2.1 固定成本

- 制氢设备的购置与安装成本,如电解槽、反应器等;
- 设备折旧费用;

- 土建工程及配套设施投资；
- 技术许可费；
- 运营管理费用，如人员工资、设备维护等。

5.1.2.2 可变成本

- 原料成本，如煤炭、石油、天然气、甲醇、水、催化剂等；
- 能耗成本，如电力、蒸汽等；
- 碳捕集利用与封存成本、碳税等。

5.2 储存成本核算

5.2.1 储存方式

- 物理储氢：高压气态储氢、低温液态储氢、低温吸附储氢等；
- 化学储氢：金属氢化物储氢、有机氢载体储氢等。

5.2.2 成本构成

5.2.2.1 固定成本

- 储氢设备的购置与安装成本，如高压储氢罐、液氢储罐、固态储氢装置等；
- 设备折旧与维护费用；
- 土建工程及配套设施投资；
- 安全认证费用，如储氢容器通过 TSG 21—2016 等认证所需的费用。

5.2.2.2 可变成本

- 能耗成本，如压缩能耗、制冷能耗等；
- 高压储氢罐疲劳检测等维护成本；
- 储氢材料的损耗与更换成本。

5.3 运输成本核算

5.3.1 运输方式

- 气态储运：长管拖车、管道（纯氢管道、天然气管道混输）；
- 液态储运：液氢槽罐车、液氢运输船；
- 固态储运：货车。

5.3.2 成本构成

5.3.2.1 固定成本

- 运输设备的购置与安装成本，如长管拖车、液氢槽车、管道建设等；
- 设备折旧与维护费用；
- 土建工程及配套设施投资，如加氢站建设等。

5.3.2.2 可变成本

- 能耗成本，如运输过程中的压缩能耗、液化能耗等；
- 运输过程中的燃料成本，如柴油、电力等；
- 与运输规模、运输距离及运输频率相关的成本。

5.4 加注环节成本核算

5.4.1 加注方式

- 外供氢加氢站：氢气在站外生产后，通过长管拖车、管道等运输方式输送到加氢站，然后在站内进行压缩、存储和加注。
- 站内制氢加氢站：氢气在加氢站内直接生产，然后进行压缩、存储和加注。

5.4.2 成本构成

5.4.2.1 固定成本

- 加氢站设备的购置与安装成本，如压缩机、加注机、储氢罐等；
- 设备折旧与维护费用；
- 土建工程及配套设施投资；
- 运营管理费用，如人员工资、场地租赁等。

5.4.2.2 可变成本

- 氢气压缩与加注过程中的能耗成本；
- 外供氢加氢站模式下的氢气采购成本；
- 加注过程中的损耗成本。

5.5 定价修正

5.5.1 技术迭代修正

- 定期更新成本参数库，反映技术进步，并调整市场定价；
- 对突破性技术的应用设置临时补贴系数修正定价。

5.5.2 定价机制与市场联动

建立与电价、天然气价等上游能源价格的动态联动机制，如将电解水制氢价格与分时电价挂钩。

5.5.3 区域差异定价修正

- 根据风光资源等级、天然气管道覆盖率等区域资源差异调整成本权重；
- 考虑高寒、高海拔等地区的运营附加成本，如高寒地区因保温能耗增加而产生的费用；
- 沿海地区液氢定价综合考虑国际市场价格及进口溢价。

6 碳足迹核算

结合生命周期评价方法进行氢能碳足迹核算，包括生命周期评价的四个阶段，即目的和范围的确定、生命周期清单分析、生命周期影响评价及生命周期结果解释，量化氢能源从制备、储存、运输、使用到回收的碳排放水平，识别和分析高碳排放关键因素。

6.1 评价目的和范围的确定

明确碳足迹核算的对象、生产工艺及核算边界，确定功能单位。

6.1.1 碳足迹核算对象

6.1.1.1 二氧化碳

二氧化碳（CO₂）是碳排放核算中最重要气体，主要产自化石燃料的燃烧、工业生产过程及土地利用变化等。

6.1.1.2 甲烷

甲烷（CH₄）是一种比二氧化碳更强效的温室气体，主要产自农业活动（如稻田和动物肠道发酵）、废弃物处理（如垃圾填埋场）和能源生产（如石油和天然气系统）等。

6.1.1.3 氧化亚氮

氧化亚氮（N₂O）主要产自农业活动（如肥料使用）、工业过程和化石燃料燃烧等。

6.1.1.4 含氟气体

主要包括氢氟碳化物（HFCs）、全氟化碳（PFCs）、六氟化硫（SF₆）和三氟化氮（NF₃），在制冷剂、空调系统和半导体制造等工业过程中被广泛使用。

6.1.2 核算边界

6.1.2.1 组织边界

涵盖氢能产业链各环节，包括生产、储存、运输、使用到废弃处理等环节的碳排放。

6.1.2.2 运营边界

碳排放包括直接排放（例如燃料燃烧、工艺生产、废弃物处理等的碳排放）与间接排放（例如外购电力、原材料生产、设备制造等隐含的碳排放）。

6.1.3 功能单位

6.1.3.1 质量基准单位

以单位质量（如 1kg、1 吨）氢气作为核算基准。适用场景：

- 生产环节（如电解水制氢、化石燃料制氢）。
- 储运环节的泄漏损耗（如每千克氢气的储运碳排放）。
- 废弃物处理（如每千克废弃催化剂的碳排放）。

6.1.3.2 体积基准单位

以单位体积（如 1m³、1Nm³）氢气作为核算基准。适用场景：

- 储运环节的碳排放核算（如高压气态储氢的压缩能耗）。
- 氢气混合燃气（如掺氢天然气）的碳排放分配。

6.1.3.3 能量基准单位

以单位能量（如 1MJ、1kWh）氢气的热值作为核算基准。适用场景：

- 氢能与其他能源（如天然气、汽油）的碳排放对比。
- 燃料电池发电效率分析（如每兆焦耳氢能的净碳排放）。

6.1.3.4 服务/运输距离单位

以提供的服务量（如 1km 行驶里程、1 吨货物运输）作为核算基准。适用场景：

- 氢燃料电池汽车（如每百公里行驶的碳排放）。
- 液氢长途运输（如每吨公里液氢的碳排放）。

6.2 生命周期清单分析

根据制备工艺，明确制备、储运、使用和废弃处理过程所涉输入（如能源、原材料）和输出（如废气、废水），完成活动水平数据采集，包括能源消耗、原材料使用、运输方式等数据。

6.2.1 制备阶段

6.2.1.1 灰氢

以化石燃料（煤、天然气）或工业副产气为主要原料，依赖传统能源提供高温重整反应所需热能，由此产生碳排放。

6.2.1.2 蓝氢

在灰氢基础上增加碳捕集与封存设备，虽然能够减少碳排放，但二氧化碳压缩和运输也需额外消耗能源，由此产生碳排放，此外，封存设施的长期稳定性可能引发间接碳排放。

6.2.1.3 绿氢

可再生能源（光伏、风电）电力驱动电解水设备，理论上零碳排放，但电解槽制造（如贵金属催化剂）、设备运输安装过程仍存在碳排放。此外，在不同生产工艺的生产装置中的催化剂、反应介质等辅助材料的制备和使用，也会间接带来碳排放。

6.2.2 储运阶段

6.2.2.1 气态储运

高压压缩消耗能源，产生碳排放。

6.2.2.2 液态储运

液态储氢的深冷液化过程需要消耗能源，产生碳排放。

6.2.2.3 衍生物储运

氨/甲醇转化需额外能耗进而产生碳排放。

6.2.3 使用阶段

使用阶段氢气纯度需达99.97%以上，提纯过程可能产生含碳废气，虽然氢燃料使用仅生成水，但双极板制造（石墨/金属加工）、废弃质子交换膜（含氟材料）处理会产生碳排放。

6.2.4 废弃处理阶段

6.2.4.1 催化剂回收

催化剂（铂、铱）提炼再生耗能高，产生碳排放。

6.2.4.2 电解槽报废处理

废弃电解液处理可能释放挥发性有机物，氟树脂膜的热解可能释放全氟化合物。

6.2.4.3 储氢罐拆解

储氢罐拆解碳纤维增强复合材料难以回收，填埋处理产生碳排放。

6.2.5 数据采集

6.2.5.1 活动数据

各环节的能源消耗（电力、天然气）、原料使用量（水、化石燃料）、运输距离等。

6.2.5.2 排放因子

能源碳排放系数（如电网电力、天然气燃烧）、工艺过程排放参数（如电解水能耗、甲烷逃逸率）等。

6.2.6 数据来源

——实测数据（工厂运行记录、传感器监测等）。

——数据库（Ecoinvent、IPCC 排放因子库等）。

——文献（行业报告、学术论文等）。

6.3 生命周期影响评价

6.3.1 碳排放测算模型

碳排放量计算公式：

$$\text{碳排放量} = \sum (\text{活动数据} \times \text{排放因子}) + \sum \text{直接排放}$$

6.3.1.1 直接碳排放

工业生产过程中的直接排放分为两类，一是燃料，如煤炭、油品、天然气燃烧带来的二氧化碳排放量；二是采用碳质量平衡法核算出的工艺过程二氧化碳排放量。

燃料燃烧二氧化碳排放量基于分品种化石燃料燃烧量、燃料含碳量和碳氧化率计算，计算公式为：

$$E_{\text{燃料燃烧}} = \sum_{i=1}^n AD_i \times NCV_i \times CC_i \times O_i \times \frac{44}{12}$$

式中, $E_{\text{燃料燃烧}}$ 表示燃料燃烧二氧化碳排放量; i 表示化石燃料的种类; AD_i 表示第 i 种化石燃料的燃烧量; NCV_i 表示第 i 种化石燃料的平均低位热值; CC_i 表示第 i 种化石燃料的单位热值含碳量; O_i 表示第 i 种化石燃料的碳氧化率, 取值范围为 0~1。

工艺过程二氧化碳排放量基于碳元素的质量守恒计算, 假定所有损失的碳元素都转换为二氧化碳排出, 计算原料与产物的碳含量差值, 即可计算出二氧化碳排放量, 计算公式为:

$$E_{\text{工艺排放}} = \left(\sum_{r=1}^R r \cdot AD_r \times CC_r - \sum_{p=1}^P p \cdot Q_p \times CC_p \right) \times \frac{44}{12}$$

式中, $E_{\text{工艺排放}}$ 表示工艺过程二氧化碳排放量; r 、 p 分别表示原料、产物的种类; AD_r 表示第 r 种原料的投入量; CC_r 表示第 r 种原料的平均含碳量; Q_p 表示第 p 种产物的产出量; CC_p 表示第 p 种产物的平均含碳量。

6.3.1.2 间接碳排放

原材料的开采及加工、运输阶段, 氢气生产、储运、使用阶段, 以及废弃处理阶段都需要消耗电力、热力(蒸汽、热水)等, 电力、热力的产生依赖于化石燃料燃烧, 将带来隐含的碳排放。

能源供应隐含 CO₂ 排放量基于电力、热力的消耗量和对应的碳排放因子计算, 计算公式为:

$$E_{\text{能源隐含}} = E_{\text{电力}} + E_{\text{热力}} = AD_{\text{电力}} \times EF_{\text{电力}} + AD_{\text{热力}} \times EF_{\text{热力}}$$

式中, $E_{\text{能源隐含}}$ 表示能源供应隐含二氧化碳排放量; $AD_{\text{电力}}$ 、 $AD_{\text{热力}}$ 分别表示电力、热力的净投入量; $EF_{\text{电力}}$ 、 $EF_{\text{热力}}$ 分别表示电力、热力的碳排放因子。

6.4 生命周期结果解释

根据生命周期影响评价的量化结果, 识别高碳排放环节, 结合敏感性分析、不确定性分析及对比基准分析等方式提出降碳措施, 如优化生产工艺、提高能源效率、采用低碳原材料等。

6.4.1 敏感性分析

识别关键参数, 如电力碳强度、电解槽效率、运输距离、设备寿命等因素的变动对结果的影响, 识别核心驱动因素。

6.4.2 不确定性分析

评估数据误差范围, 明确取舍准则, 如甲烷逃逸率误差波动对总排放的影响。

6.4.3 对比基准分析

量化不同制氢路径的碳排放强度, 与国际或地区标准进行对比, 识别高排放环节、评估减排潜力。

7 数据采集

动态识别、监测与分析影响能源定价的关键特征数据, 明确数据分类、来源以及采集、保留的方式与频次。

7.1 数据分类

- 基础数据: 如氢价指数、碳市场价格等;
- 技术数据: 如能耗、设备效率等;
- 政策数据: 如补贴、准入要求等;
- 市场数据: 如供需关系、价格波动等。

7.2 数据来源

明确数据来源渠道, 如国家统计局、行业协会、企业内部系统、市场调研机构等。

7.3 数据动态监测

注重数据的动态性，明确不同类型数据的更新频次，如氢价指数周更新、市场价格日更新、能耗数据实时采集、政策法规按季度或年度更新等。

附录 A
(资料性)
氢能源成本与碳排放核算模型

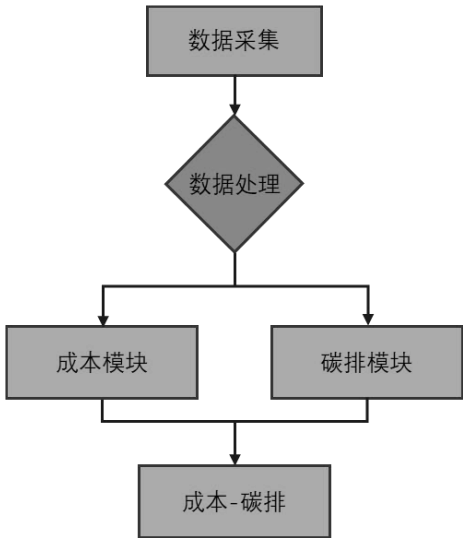


图 A.1 成本模型技术架构

A.1 成本模型技术架构

A.1.1 氢能成本模块：成本流驱动的经济核算

A.1.1.1 目标

量化全产业链成本，支撑市场定价与商业决策。

A.1.1.2 技术逻辑

$$\text{成本} = \sum_{i=1}^n (\text{固定成本}_i + \text{可变成本}_i)$$

A.1.1.3 核心要素

- 制备成本：设备折旧、原料；
- 储运成本：运输工具折旧、能耗（压缩、液化）、燃料费用；
- 加注成本：加氢站设备折旧、压缩能耗；
- 碳成本：碳排放量×碳价（作为可变成本嵌入各环节）。

A.1.1.4 数据类型

设备投资金额、原料价格、能耗量、运输距离、碳价政策等。

A.1.2 碳排核算模块：物质流驱动的环境核算

A.1.2.1 目标

量化全产业链碳足迹，支撑减排策略与政策合规。

A.1.2.2 技术逻辑

$$\text{总碳排} = \sum_{i=1}^n (\text{直接排放}_i + \text{间接排放}_i)$$

A. 1. 2. 3 基于LCA的核心要素

- 制备阶段：化石燃料燃烧排放（灰氢）、设备制造隐含排放（绿氢）；
- 储运阶段：能耗隐含排放（如压缩电耗的电网碳强度）、运输工具尾气排放；
- 加注阶段：压缩机能耗排放、外供氢的上游累计排放；
- 废气阶段：废弃阶段：催化剂回收、储氢罐拆解等末端排放。

A. 1. 2. 4 数据类型

能源消耗量、排放因子（如电网碳强度 0.5kgCO₂/kWh）、设备材料碳含量等。

A. 2 模型依据：数据同源与环节同步

A. 2. 1 数据同源性

氢成本与碳排放核算所需数据均来自氢能产业链的实际生产活动，且数据定义、统计口径和逻辑关系具有一致性，由此可确保成本与碳排数据在技术层面可以相互映射、交叉验证。部分成本-碳排关系见表A. 1。

表 A. 1 成本-碳排关系

数据类型	成本模块	碳排模块	技术关联点
电力消耗	计算能耗成本	计算间接碳排放	电耗×电价=成本； 电耗×碳强度=碳排
燃料消耗	计算燃料成本	计算直接碳排放	油耗×油价=成本； 油耗×碳因子=碳排
设备投资 碳价政策	计算固定成本 计算碳成本	计算设备制造隐含碳排放 排放量化的货币转换	设备材料碳含量×投资占比 碳排×碳价=碳成本

注：“设备材料碳含量×投资占比”用于计算单位投资的碳排放强度。

其中，设备材料碳含量是指制造单位设备所需材料的累计碳足迹，单位为 kgCO₂ /万元（设备投资）或 kgCO₂ /吨（材料重量），数据可通过相关数据库或设备供应商获取。

投资占比是指设备投资金额站总投资的比例，或设备中某类材料成本占设备造价的比例，无量纲（用小数或百分比表示）。

A. 2. 2 示例

某电解槽设备总投资 1000 万元，其中金属材料成本占比 60%，非金属材料成本占比 5%，若制造该设备金属材料碳含量为 500kgCO₂/万元，非金属材料碳含量为 300kgCO₂/万元，则该电解槽单位投资碳排放强度=500×0.6+300×0.5=450kgCO₂/万元；该电解槽总设备隐含碳排=1000×450=4.5×10⁵kgCO₂。

A. 2. 3 环节同步性

成本模块与碳排模块均严格遵循“制备→储存→运输→加注”的产业链顺序，与现实流程深度绑定，可确保在时间和空间上的一致性。

A. 3 模型计算路径

A. 3. 1 数据采集与处理

A. 3. 1. 1 数据采集

动态采集设备运行数据（如电解槽电耗、压缩机功率）、原料采购数据（天然气量、电价）、碳价、电网碳强度等。

A. 3. 1. 2 数据处理

根据所得数据分别计算制备、储运及加注环节成本与碳排放。

A.3.2 成本与碳排放量计算

A.3.2.1 氢能成本公式

$$\text{氢价} = \sum_{i=1}^n (\text{固定成本}_i + \text{可变成本}_i)$$

在可变成本增加“碳成本”项，公式为：碳成本=碳排放量×碳价。

例如：灰氢制备环节碳排放 $10\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ，碳价 80 元/吨，则碳成本= $10 \times 0.08 = 0.8$ 元/kg。

A.3.2.2 碳排放量核算公式

$$\text{总碳排} = \sum_{i=1}^n (\text{直接排放}_i + \text{间接排放}_i)$$

A.4 整合案例

A.4.1 案例1：绿氢“制备-液氢储运-加注”成本及碳排放计算

A.4.1.1 制备环节

- 原料成本： $9\text{kg 水}/\text{kgH}_2 \times 0.003 \text{ 元}/\text{kg 水} = 0.027 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ ；
- 电力成本： $50\text{kWh}/\text{kgH}_2 \times 0.8 \text{ 元}/\text{kWh} = 40 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ ；
- 电力折合碳排： $50\text{kWh}/\text{kgH}_2 \times 0.5\text{kgCO}_2/\text{kWh} = 25\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ （电网碳强度 $1\text{kWh} = 0.5\text{kgCO}_2$ ）；
- 设备折旧： $200 \text{ 万元}/(10 \text{ 年} \times 300 \text{ 天} \times 1000\text{kgH}_2/\text{天}) = 0.67 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ ；
- 设备隐含碳排：电解槽制造隐含碳 $5\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ；
- 碳成本： $5\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2 \times 0.08 \text{ 元}/\text{kgCO}_2 = 0.4 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ （碳价 80 元/吨）；
- 员工工资及其他成本： $2.5 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ ；
- 制备环节合计成本： $40 + 0.67 + 2.5 + 0.4 + 0.03 = 43.60 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ ；
- 制备环节合计碳排： $25 + 5 = 30\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ 。

A.4.1.2 液态储运环节

- 电力成本： $15\text{kWh}/\text{kgH}_2 \times 0.8 \text{ 元}/\text{kWh} = 12 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ ；
- 电力折合碳排： $15\text{kWh}/\text{kgH}_2 \times 0.5\text{kgCO}_2/\text{kWh} = 7.5\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ；
- 设备折旧： $150 \text{ 万元}/(15 \text{ 年} \times 300 \text{ 天} \times 1000\text{kgH}_2/\text{天}) = 0.33 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ ；
- 设备隐含碳排：氢液化机隐含碳排 $3.5\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ；
- 运输成本（500 公里）：液氢槽车折旧+燃料成本=7 元/kgH₂；
- 运输燃料碳排： $3\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ；
- 员工工资及其他成本： $3 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ ；
- 碳成本： $(3.5 + 3) \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2 \times 0.08 \text{ 元}/\text{kgCO}_2 = 0.52 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ ；
- 储运环节合计成本： $12 + 0.33 + 7 + 3 + 0.52 = 22.85 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ ；
- 储运环节合计碳排： $7.5 + 3.5 + 3 = 14\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ 。

A.4.1.3 加注环节

- 加注能耗： $2\text{kWh}/\text{kgH}_2 \times 0.8 \text{ 元}/\text{kWh} = 1.6 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ ；
- 电力折合碳排： $2\text{kWh}/\text{kgH}_2 \times 0.5\text{kgCO}_2/\text{kWh} = 1\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ；
- 设备折旧： $100 \text{ 万元}/(10 \text{ 年} \times 365 \text{ 天} \times 1000\text{kgH}_2/\text{天}) = 0.27 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ ；
- 设备隐含碳排：氢加注机隐含碳排 $2.5\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ；
- 碳成本： $2.5\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2 \times 0.08 \text{ 元}/\text{kgCO}_2 = 0.2 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ ；
- 员工工资及其他成本： $3 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ ；
- 加注环节合计成本： $1.6 + 0.27 + 3 + 0.2 = 5.07 \text{ 元}/\text{kgH}_2$ ；
- 加注环节合计碳排： $1 + 2.5 = 3.5\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ 。

A. 4. 1. 4 成本与碳排放量汇总

表 A. 2 成本汇总表（元/kgH₂）

环节	电力/原料	折旧	碳成本	运输	人工/其他	小计
制备	40.03	0.67	0.4	——	2.5	43.60
储运	12	0.33	0.52	7	3	22.85
加注	1.6	0.27	0.2	——	3	5.07
总计						71.52

表 A. 3 碳排放汇总表（kgCO₂/kgH₂）

环节	电力碳排	隐含碳排	运输碳排	小计
制备	25	5	——	30
储运	7.5	3.5	3	14
加注	1	2.5	——	3.5
总计				47.5

A. 4. 2 案例2：灰氢“制备-高压储运-加注”成本及碳排放计算

A. 4. 2. 1 制备环节

- 煤耗：6kg 煤/kgH₂；
- 煤价：300 元/吨→0.3 元/kg；
- 原料成本=6kg 煤/kgH₂×0.3 元/kg 煤=1.8 元/kgH₂；
- 水耗：20kg 水/kgH₂；
- 水价：3 元/吨；
- 电耗：1.5kWh/kgH₂；
- 电价：0.8 元/kWh；
- 能源与辅助成本=20kg 水/kgH₂×0.003 元/kg 水+1.5kWh/kgH₂×0.8 元/kWh=1.26 元/kgH₂；
- 电力折合碳排：1.5kWh/kg×0.5kgCO₂/kWh=0.75kgCO₂/kgH₂；
- 设备折旧：150 万元/（10 年×300 天×1000kgH₂/天）=0.5 元/kgH₂；
- 设备隐含碳排：2kgCO₂/kgH₂；
- 人工与其他成本：1.5 元/kgH₂；
- 直接排放：20.9kgCO₂/kgH₂；
- 碳成本：（20.9+2）kgCO₂/kgH₂×0.08 元/kgCO₂=1.83 元/kgH₂；
- 制备环节总成本：1.8+1.26+0.5+1.5+1.83=6.89 元/kgH₂；
- 制备环节总碳排放：20.9+0.75+2=23.65kgCO₂/kgH₂。

A. 4. 2. 2 储运环节

- 压缩能耗成本：2kWh/kgH₂×0.8 元/kWh=1.6 元/kgH₂；
- 电力折合碳排：2kWh/kgH₂×0.5kgCO₂/kWh=1kgCO₂/kgH₂；
- 设备折旧：100 万元/（10 年×300 天×1000kgH₂/天）=0.33 元/kgH₂；
- 运输成本：14.01 元/kgH₂；
- 运输燃料碳排：4.5kgCO₂/kgH₂；
- 设备隐含碳排：1.2kgCO₂/kgH₂；
- 碳成本：（4.5+1.2）kgCO₂/kgH₂×0.08 元/kgCO₂=0.46 元/kgH₂；
- 员工工资及其他成本：3 元/kgH₂；
- 储运环节总成本：1.6+0.33+14.01+0.46+3=19.4 元/kgH₂；
- 储运环节总碳排放：1+4.5+1.2=6.7kgCO₂/kgH₂。

A. 4. 2. 3 加注环节

- 加注能耗： $2\text{kWh/kgH}_2 \times 0.8 \text{ 元/kWh} = 1.6 \text{ 元/kgH}_2$ ；
- 电力折合碳排： $2\text{kWh/kgH}_2 \times 0.5\text{kgCO}_2/\text{kWh} = 1\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ；
- 设备折旧： $100 \text{ 万元} / (10 \text{ 年} \times 365 \text{ 天} \times 1000\text{kgH}_2/\text{天}) = 0.27 \text{ 元/kgH}_2$ ；
- 设备隐含碳排：氢加注机隐含碳排 $2.5\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ；
- 碳成本： $2.5\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2 \times 0.08 \text{ 元/kgCO}_2 = 0.2 \text{ 元/kgH}_2$ ；
- 员工工资及其他成本： 3 元/kgH_2 ；
- 加注环节合计成本： $1.6 + 0.27 + 3 + 0.2 = 5.07 \text{ 元/kgH}_2$ ；
- 加注环节合计碳排： $1 + 2.5 = 3.5\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ 。

A. 4. 2. 4 成本与碳排放量汇总

表 A. 4 成本汇总表（元/kgH₂）

环节	电耗/原料	折旧	碳成本	运输	人工/其他	小计
制备	3.06	0.5	1.83		1.5	6.89
储运	1.6	0.33	0.46	14.01	3	19.4
加注	1.6	0.27	0.2		3	5.07
总计						31.36

表 A. 5 碳排放汇总表（kgCO₂/kgH₂）

环节	电耗/原料碳排	隐含碳排	运输碳排	小计
制备	21.65	2	——	23.65
储运	1	1.2	4.5	6.7
加注	1	2.5	——	3.5
总计				33.85

附录 B

(资料性)

代表性氢能源碳足迹核算方法

B.1 生命周期评价

生命周期评价是碳足迹核算的核心方法，包括以下阶段：

- 目的和范围的确定：明确碳足迹核算的对象、生产工艺及核算边界，确定功能单位。
- 生命周期清单分析：根据制备工艺，明确制备、储运、使用和废弃过程所涉输入（如能源、原材料）和输出（如废气、废水），完成活动水平数据采集，包括能源消耗、原材料使用、运输方式等数据。
- 生命周期影响评价：构建碳排放测算公式，考虑直接碳排放与间接碳排放。
- 生命周期结果解释：根据生命周期清单分析与生命周期影响评价的量化结果，识别高碳排放环节，结合敏感性分析、不确定性分析及对比基准分析等方式提出降碳措施。

B.2 不同制氢技术的碳足迹核算

B.2.1 灰氢（化石燃料制氢）

B.2.1.1 技术路线

天然气蒸汽甲烷重整或煤气化。

B.2.1.2 主要排放源

- 直接排放：生产过程中产生的 CO_2 （约 $9\text{--}12 \text{ kg CO}_2/\text{kg H}_2$ ）。
- 间接排放：天然气开采、运输中的甲烷泄漏（甲烷的全球变暖潜能值 GWP 是 CO_2 的 28–36 倍）。

B.2.1.3 核算公式

碳足迹=直接 CO_2 排放+间接甲烷排放×GWP 碳足迹=直接 CO_2 排放+间接甲烷排放×GWP

B.2.2 蓝氢（化石燃料制氢+碳捕集利用与封存）

B.2.2.1 技术路线

灰氢技术基础上增加碳捕集利用与封存（捕获率约 85 – 95%）。

B.2.2.2 主要排放源

- 未被捕获的 CO_2 （约 $1\text{--}4 \text{ kg CO}_2/\text{kg H}_2$ ）。
- 碳捕集利用与封存过程的能耗（增加电力或燃料消耗）。
- 甲烷泄漏（与灰氢类似）。

B.2.2.3 关键参数

碳捕获效率、封存技术能耗。

B.2.3 绿氢（可再生能源电解水制氢）

B.2.3.1 技术路线

利用风电、光伏等可再生能源电解水。

B.2.3.2 主要排放源

- 电解槽制造（材料如镍、铂的碳足迹）。
- 可再生能源设备（风机、光伏板）的制造与退役。
- 电力输送损耗（若电网补电需计入电网排放因子）。

B.2.3.3 核算公式

碳足迹=电解槽制造排放+可再生能源设备排放+电网补电排放

若100%可再生能源供电，碳足迹可低至0.5–2 kg CO₂/kg H₂。

B.2.4 其他制氢技术

B.2.4.1 粉氢（核能制氢）

核反应堆供电电解水，碳排放主要来自核电站建设与燃料循环。

B.2.4.2 生物质制氢

需核算生物质种植、运输及转化过程的碳排放。

参 考 文 献

- [1] 《中华人民共和国能源法》（中华人民共和国主席令2024年第37号）
 - [2] GB/T 3634.1—2006 氢气 第1部分：工业氢
 - [3] GB/T 3634.2—2011 氢气 第2部分：纯氢、高纯氢和超纯氢
 - [4] GB/T 37244—2018 质子交换膜燃料电池汽车用燃料 氢气
 - [5] GB/T 34542.1—2017 氢气储存输送系统 第1部分：通用要求
 - [6] GB/T 40060—2021 液氢贮存和运输技术要求
 - [7] GB/T 43674—2024 加氢站通用要求
 - [8] GB/T 34584—2017 加氢站安全技术规范
 - [9] GB/T 24067—2024 温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南
 - [10] JT/T617—2018 危险货物道路运输规则
 - [11] TSG 21—2016 固定式压力容器安全技术监察规程
-