



团 体 标 准

T/CCPITCSC 178—2025

面向碳足迹的氢能源成本核算指南

Guidelines for carbon footprint-oriented cost accounting of hydrogen energy

2025 - 9 - 12 发布

2025 - 10 - 12 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 II

引言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总体原则 2

5 氢能源成本核算及碳足迹核算模型 2

6 成本核算体系 4

7 碳足迹核算 6

8 数据采集 9

附录 A（资料性） 氢能源成本与碳足迹核算示例 11

附录 B（资料性） 代表性氢能源碳足迹核算方法 13

参考文献 15

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。

本文件由中国国际贸易促进委员会商业行业委员会提出并归口。

本文件由本文件起草单位：陕西智库科学技术研究院有限公司、西安交通大学、方维（深圳）国际商业有限公司。

本文件主要起草人：单英骥、胡二江、杨秀汪、何慧敏、殷阁媛、张纯静、田李、刘昕、郭小叶、仪洋。

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，更需要科学合理的成本核算机制来引导市场资源配置与产业协同进步。

氢能源的成本核算涉及制备、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经济性分析不可忽视的因素。

《面向碳足迹的氢能源成本核算指南》团体标准应运而生。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，在系统性地整合氢能源制备、储存、运输、加注等环节成本要素的基础上，创新性地提出融合碳足迹核算的氢能源成本核算技术路径，推动构建绿色价值导向的能源成本核算机制，方便政策制定部门、氢能源生产机构、氢能源交易机构和使用机构等相关主体开展成本核算、经济性分析、环境评估等工作，促进氢能源交易市场繁荣。

面向碳足迹的氢能源成本核算指南

1 范围

本文件给出了面向碳足迹的氢能源在制备、储存、运输与加注环节的成本核算体系，以及基于生命周期评价的氢能源碳足迹核算方法。

本文件适用于政策制定、行业成本核算以及企业经济性分析等场景，实验室级制氢、氢能试验项目以及分布式制氢与用氢等场景可参照执行。

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 24044 环境管理 生命周期评价 要求与指南

GB/T 24499 氢气、氢能与氢能系统术语

3 术语和定义

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 (CCUS)

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、石油化工、煤化工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温室气体排放量的指标,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

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、加注及核算修正等环节;
- 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;
- 绿氢成本核算可引入绿色证书机制,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 质量核心原则

- 成本核算需关联氢能源质量等级,按氢气纯度差异划分核算维度,确保质量成本精准计入;
- 针对不同应用场景的质量要求,单独核算“质量达标成本”,对超标准提纯产生的额外成本需单独列明;
- 建立氢能源质量追溯与成本挂钩机制,将质量检测报告、纯度认证费用纳入核算体系。

4.4 安全优先原则

- 成本核算需全面覆盖氢能源全生命周期的安全投入,包括但不限于制氢设备安全防护装置购置折旧、储运环节防爆设施运维费用、加注站安全应急系统等支出;
- 将安全培训成本、安全检测成本纳入人工与维护费用范畴,不得遗漏安全相关隐性成本;
- 针对高风险环节,需单独核算“安全冗余成本”,若发生安全事故,需将事故处置、设备修复、环境修复等成本追溯计入对应环节的历史核算数据。

5 氢能源成本核算及碳足迹核算模型

氢能源成本核算及碳足迹核算模型涵盖数据采集与数据处理,通过成本核算模块和碳足迹核算模块,共同实现氢能源全流程成本及全生命周期碳排放的系统核算。

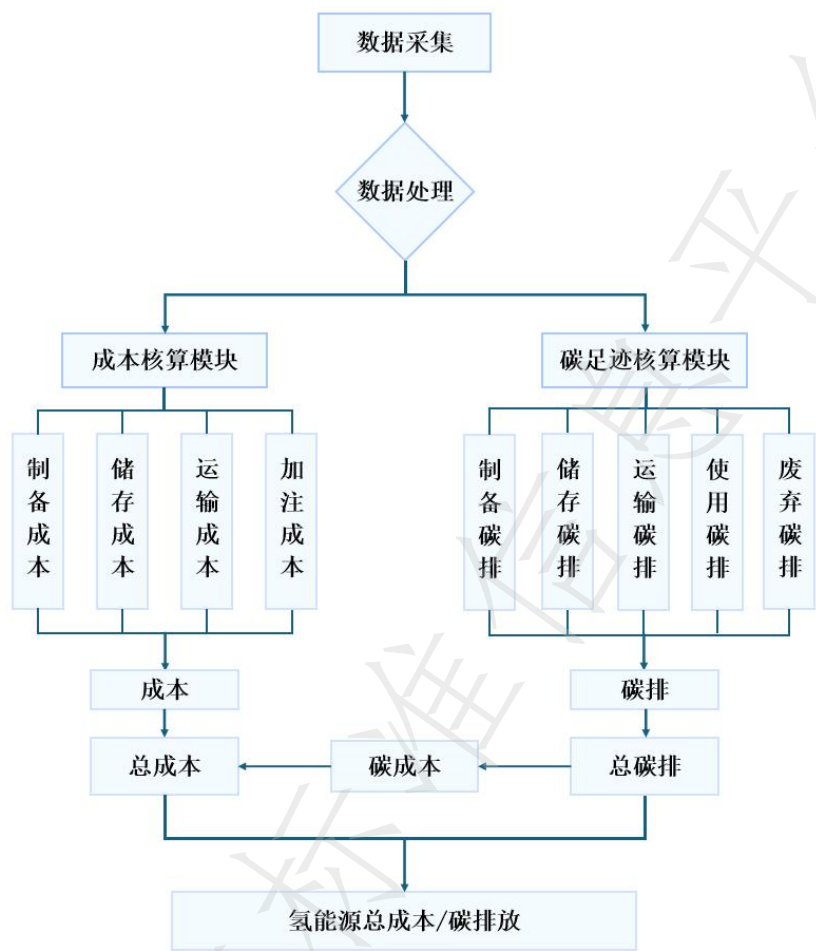


图1 氢能源成本核算及碳足迹核算模型

5.1 成本核算模块：成本流驱动的经济核算

5.1.1 目标

量化全流程成本，支撑市场定价与商业决策。

5.1.2 技术逻辑

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

式中，固定成本与可变成本可能涉及的具体参数项见第6章。

5.1.3 核心要素

- 制备成本：设备折旧、原料、制备能耗；
- 储存成本：储存设备折旧、储存能耗；
- 运输成本：运输工具折旧、运输能耗；
- 加注成本：加氢设备折旧、加注能耗；
- 碳成本：碳排放量 × 碳价（作为可变成本嵌入各环节）。

5.2 碳足迹核算模块：物质流驱动的环境核算

5.2.1 目标

量化全生命周期碳足迹，支撑减排策略与政策合格。

5.2.2 技术逻辑

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

5.2.3 核心要素

- 制备阶段：化石燃料燃烧碳排放（灰氢）、设备隐含碳排放；
- 储存阶段：储存设备能耗碳排放（如压缩电耗的电网碳强度）；
- 运输阶段：运输工具能耗碳排放；
- 使用阶段：加注设备能耗碳排放、外供氢的上游累计碳排放；
- 废弃阶段：催化剂回收、储氢罐拆解等末端碳排放。

6 成本核算体系

6.1 制备成本核算

6.1.1 制备方式

- 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（化石能源发电制氢）；
- 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。

6.1.2 制备成本构成

6.1.2.1 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；
- 土地租赁、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。

6.1.2.2 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。

6.2 储存成本核算

6.2.1 储存方式

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

6.2.2 储存成本构成

6.2.2.1 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；
- 土地租赁、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。

6.2.2.2 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。

6.3 运输成本核算

6.3.1 运输方式

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

6.3.2 运输成本构成

6.3.2.1 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。

6.3.2.2 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。

6.4 加注成本核算

6.4.1 加注方式

- 外供氢加注站：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注站，然后在站内进行压缩、存储和加注。
- 站内制氢加注站：氢气在加注站内直接生产，然后进行压缩、存储和加注。

6.4.2 加注成本构成

6.4.2.1 固定成本

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

6.4.2.2 可变成本

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

6.5 核算修正与更新

6.5.1 技术迭代修正

- 定期更新参数库，反映技术进步；
- 对突破性技术的应用设置临时补贴系数修正成本核算。

6.5.2 核算机制与市场联动

建立与电价、天然气价等上游能源价格的动态联动机制，及时更新因上游能源价格变动引起的成本变化，如将电解水制氢价格与分时电价挂钩。

6.5.3 区域差异成本核算修正

- 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；
- 沿海地区液氢成本核算综合考虑国际市场价格及进口溢价。

7 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、使用到废弃处理阶段的碳排放水平，识别和分析高碳排放关键因素。

7.1 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。

7.1.1 碳足迹核算对象

7.1.1.1 二氧化碳

二氧化碳（ CO_2 ）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。

7.1.1.2 甲烷

甲烷（ CH_4 ）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。

7.1.1.3 氧化亚氮

氧化亚氮（ N_2O ）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。

7.1.1.4 含氟气体

主要包括氢氟碳化物（HFCs）、全氟化碳（PFCs）、六氟化硫（ SF_6 ）和三氟化氮（ NF_3 ），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。

7.1.2 核算边界

7.1.2.1 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。

7.1.2.2 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）。

7.1.3 功能单位

7.1.3.1 质量基准单位

以单位质量（如 1 kg、1 t）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 1 kg 氢气的储运碳排放）。
- 废弃物处理（如 1 kg 废弃催化剂的碳排放）。

7.1.3.2 体积基准单位

以单位体积（如 1 m^3 、1 Nm^3 ）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。

7.1.3.3 能量基准单位

以单位能量（如 1 MJ、1 kWh）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 1 MJ 氢能的净碳排放）。

7.1.3.4 服务/运输距离单位

以提供的服务量（如 1 km 行驶里程、1 t 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）。

7.2 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。

7.2.1 制备阶段

7.2.1.1 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。

7.2.1.2 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。

7.2.1.3 绿氢

可再生能源（光伏、风电）电力驱动电解水设备，按电源接入方式分为并网电解和离网可再生直供电两类分别核算：并网电解采用电网年度平均碳排放因子；离网可再生直供电在可再生电量占比100 % 时取碳排放因子0 kg CO₂ e/kWh。除电力输入外，电解槽制造、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，也会间接产生碳排放。

7.2.2 储存阶段

7.2.2.1 气态储存

高压压缩消耗能源，产生碳排放。

7.2.2.2 液态储存

液态储氢的深冷液化过程需要消耗能源，产生碳排放。

7.2.2.3 化学储存

化学储氢的整个过程（包括储氢和放氢）需要额外的能源消耗，产生碳排放。

7.2.3 运输阶段

7.2.3.1 气态运输

运输车辆消耗柴油等化石燃料，产生碳排放。

7.2.3.2 液态运输

液氢槽车消耗柴油等化石燃料，产生碳排放。

7.2.3.3 管道运输

氢气压缩（管道沿线增压站）需要消耗能源，可能产生碳排放。

7.2.4 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。

7.2.5 废弃处理阶段

7.2.5.1 催化剂回收

催化剂（铂、铱）提炼再生耗能高，产生碳排放。

7.2.5.2 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。

7.2.6 数据采集

7.2.6.1 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。

7.2.6.2 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。

7.2.7 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）。

7.3 生命周期影响评价

7.3.1 碳排放测算模型

碳排放量计算公式：

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

7.3.1.1 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；

$\frac{44}{12}$ 为转换系数，二氧化碳与碳的分子量比率。

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；

$\frac{44}{12}$ 为转换系数，二氧化碳与碳的分子量比率。

7.3.1.2 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、热力的二氧化碳排放因子。

7.4 生命周期结果解释

7.4.1 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。

7.4.2 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。

7.4.3 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。

8 数据采集

8.1 数据分类

为确保氢能源成本（含碳排放）核算过程中数据的系统性、完整性与关联性，避免因数据维度缺失或分类混乱导致核算偏差，需按氢能源产业链核算需求及数据属性特征，对核算所需数据进行科学分类。不同类别数据分别对应核算模型中的关键参数、技术支撑参数、政策调节参数与市场参考参数，具体分类如下：

- 基础数据：原材料采购价、人工成本、土地使用成本、能耗基础数据等；
- 技术数据：制氢设备效率、储运损耗率、设备寿命衰减曲线、碳捕集效率等；
- 政策数据：碳配额价格、绿氢认证标准、地方补贴细则、进出口关税税率等；
- 市场数据：氢能源市场交易量与成交价、上游能源价、替代能源价格、国际氢价波动数据等。

8.2 数据来源

数据来源的合规性、真实性与可追溯性是保障氢能源成本（含碳排放）核算结果有效、可信的核心前提，需优先选取权威度高、覆盖面广、更新及时的数据源，确保核算数据能够客观反映氢能源产业链实际情况及外部环境变化。具体数据来源包括但不限于以下类别：

- 企业内部公开数据：生产运营台账、财务报表、技术研发记录等；
- 行业公开数据：行业协会发布的统计报告、第三方机构能源数据库等；
- 政府官方数据：国家发展和改革委员会价格监测数据、税务部门碳税征收标准、生态环境部门碳排放核算报告等；
- 市场交易数据：能源交易所行情、能源交易中心等。

附录 A

(资料性)

氢能源成本与碳足迹核算示例

A.1 整合示例

A.1.1 灰氢“制备-高压储运-加注”成本及碳足迹核算

山西某煤化工企业(A公司)依托当地煤炭资源优势,采用煤制氢工艺生产灰氢,核心业务聚焦制氢环节;委托河北某能源储运公司(B公司)负责灰氢的高压储存与跨省运输;最终由山西某新能源服务公司(C公司)完成加氢站加注与商用车客户销售,形成“制备-储存-运输-加注”分工明确的灰氢产业链,各环节成本与碳排放核算核心数据如下:

A公司: 300吨/年煤制氢生产线投资300万元,设备折旧按20年年限分摊;原料端采用当地优质动力煤,煤价600元/吨;生产过程中,煤耗6 kg/kgH₂,水耗20 kg/kgH₂(水价3元/吨)、电耗1.5 kWh/kgH₂(电网标杆电价0.8元/kWh);人工巡检、维护及管理成本1.5元/kgH₂;碳成本方面,按80元/吨计算。

B公司: 采用30 MPa高压储氢罐储存、高压管束车运输,运输距离500 km(从A公司厂区至C公司加氢站)。

储存环节:储氢设备投资120万元,按15年折旧;压缩能耗2 kWh/kgH₂;人工操作与设备维护成本1.5元/kgH₂;

运输环节:运输设备(高压管束车)投资40万元,按10年折旧;运输燃料、车辆维护等综合运输成本14.01元/kgH₂;司机薪酬与调度管理成本1.5元/kgH₂。

C公司: 加注过程能耗0.8 kWh/kgH₂;加氢设备(加氢机、储氢瓶组等)投资100万元,按10年折旧计算;加氢站运营人员薪酬、场地租金及安全检测成本2元/kgH₂。

A.1.1.1 制备环节

- 煤耗: 6 kg 煤/kgH₂;
- 煤价: 600 元/t → 0.6 元/kg;
- 原料成本: 6 kg 煤/kgH₂ × 0.6 元/kg 煤 = 3.6 元/kgH₂;
- 水耗: 20 kg 水/kgH₂;
- 水价: 3 元/吨;
- 电耗: 1.5 kWh/kgH₂;
- 电价: 0.8 元/kWh;
- 能耗与辅助材料成本: 20 kg 水/kgH₂ × 0.003 元/kg 水 + 1.5 kWh/kgH₂ × 0.8 元/kWh = 1.26 元/kgH₂;
- 电力折合碳排: 1.5 kWh/kg × 0.5 kgCO₂/kWh = 0.75 kgCO₂/kgH₂;
- 设备折旧: 300 万元 / (20 年 × 300 天 × 1000 kgH₂/天) = 0.5 元/kgH₂;
- 设备隐含碳排: 0.02 kgCO₂/kgH₂;
- 人工与其他成本: 1.5 元/kgH₂;
- 直接排放: 20.9 kgCO₂/kgH₂;
- 碳成本: (20.9 + 0.02) kgCO₂/kgH₂ × 0.08 元/kgCO₂ = 1.67 元/kgH₂;
- 制备环节总成本: 3.6 + 1.26 + 0.5 + 1.5 + 1.67 = 8.53 元/kgH₂;
- 制备环节总碳排放: 20.9 + 0.75 + 0.02 = 21.67 kgCO₂/kgH₂。

A.1.1.2 储存环节

- 压缩能耗成本: 2 kWh/kgH₂ × 0.8 元/kWh = 1.6 元/kgH₂;
- 电力折合碳排: 2 kWh/kgH₂ × 0.5 kgCO₂/kWh = 1 kgCO₂/kgH₂;
- 设备折旧: 120 万元 / (15 年 × 300 天 × 1000 kgH₂/天) = 0.27 元/kgH₂;
- 设备隐含碳排: 0.07 kgCO₂/kgH₂;
- 碳成本: 0.07 kgCO₂/kgH₂ × 0.08 元/kgCO₂ = 0.006 元/kgH₂;
- 员工工资及其他成本: 1.5 元/kgH₂;
- 储氢环节总成本: 1.6 + 0.27 + 0.006 + 1.5 = 3.376 元/kgH₂;

——储氢环节总碳排： $1 + 0.07 = 1.07 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$ 。

A. 1. 1. 3 运输环节

——设备折旧： $40 \text{ 万元} / (10 \text{ 年} \times 300 \text{ 天} \times 1000 \text{ kgH}_2/\text{天}) = 0.13 \text{ 元/kgH}_2$ ；
 ——运输成本： 14.01 元/kgH_2 ；
 ——运输燃料碳排： $0.45 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ；
 ——设备隐含碳排： $0.06 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ；
 ——员工工资及其他成本： 1.5 元/kgH_2 ；
 ——碳成本： $(0.45+0.06) \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2 \times 0.08 \text{ 元/kgCO}_2 = 0.041 \text{ 元/kgH}_2$ ；
 ——运氢环节总成本： $0.13 + 14.01 + 1.5 + 0.041 = 15.681 \text{ 元/kgH}_2$ ；
 ——运氢环节总碳排： $0.45 + 0.06 = 0.51 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$ 。

A. 1. 1. 4 加注环节

——加注能耗： $0.8 \text{ kWh/kgH}_2 \times 0.8 \text{ 元/kWh} = 0.64 \text{ 元/kgH}_2$ ；
 ——电力折合碳排： $0.8 \text{ kWh/kgH}_2 \times 0.5 \text{ kgCO}_2/\text{kWh} = 0.4 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ；
 ——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 $0.001 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ；
 ——碳成本： $0.001 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2 \times 0.08 \text{ 元/kgCO}_2 = 0.00008 \text{ 元/kgH}_2$ ；
 ——员工工资及其他成本： 2 元/kgH_2 ；
 ——加注环节合计成本： $0.64 + 0.27 + 0.00008 + 2 = 2.91008 \text{ 元/kgH}_2$ ；
 ——加注环节合计碳排： $0.4 + 0.001 = 0.401 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$ 。

A. 1. 1. 5 碳排量与成本汇总

表 A. 1 碳排量汇总表 ($\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$)

环节	电耗/原料碳排	隐含碳排	运输碳排	小计
制备	21.65	0.02	——	21.67
储存	1	0.07	——	1.07
运输	——	0.06	0.45	0.51
加注	0.4	0.001	——	0.401
总计				23.651

表 A. 2 成本汇总表 (元/ kgH_2)

环节	电耗/原料	折旧	碳成本	运输	人工/其他	小计
制备	4.86	0.5	1.67	——	1.5	8.53
储存	1.6	0.27	0.006	——	1.5	3.376
运输	——	0.13	0.041	14.01	1.5	15.681
加注	0.64	0.27	0.00008	——	2	2.91008
总计						30.49708

注：电力成本部分，本附录示范计算统一采用 $0.8 \text{ 元} / \text{kWh}$ 标杆电价；若采用离网可再生直供电，可按能源平准化成本 (Levelized Cost of Energy, LCOE, 约 $0.4 \text{ 元} / \text{kWh}$) 重新核算。

设备折旧方法均采用直线折旧法；制备、储运装置年运行天数取 300 d/a (含计划检修、故障维护及淡季减产)；加注装置年运行天数取 365 d/a (城市加氢站通常实行全年无休运营)。

设备隐含碳排即图 1 氢能源成本核算及碳足迹核算模型中废弃碳排，具体数值计算参照 GB/T 24067。

电力折合碳排计算中，不同地区因能源结构不同，电力排放因子存在差异，本文件取中间值 $0.5 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$ 。

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、储存、运输、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 不同制备技术的碳足迹核算

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。

注：甲烷的全球变暖潜能值（Global Warming Potential, 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 $\times$ 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（捕集率约 85%–95%）。

B.2.2.2 主要排放源

- 未被捕集的 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

碳捕集效率、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。

参 考 文 献

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