中国生态学学会团体标准

《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 水力发电机》

编制说明

标准编制组

2026 年 10 月

目录

1 标准编制背景 1
1.1 标准起草单位 1
1.2 参编单位工作分工 1
1.3 标准主要起草人及分工 1
2 规范性引用文件标准编制的必要性分析 2
2.1 国家碳达峰碳中和战略对产品碳足迹标准要求 2
2.1.1 国家顶层政策明确要求建立碳足迹标准体系 2
2.1.2《“十四五”工业绿色发展规划》对电工装备行业提出明确要求 2
2.1.3《工业领域碳达峰实施方案》对电工装备产品碳足迹的要求 3
2.1.4《质量强国建设纲要》对产品碳足迹的要求 3
2.2 水力发电行业绿色低碳转型和高质量发展的需要 3
2.2.1 水力发电机制造具有高耗材、高碳排的行业特征 3
2.2.2 绿色制造与绿色采购对碳足迹管理提出迫切需求 4
2.2.3 节能降碳技术改进需要碳足迹核算提供量化支撑 4
2.2.4 行业高质量发展对碳足迹管理提出新期待 5
2.3 应对国际贸易绿色壁垒和提升国际竞争力需要 5
2.3.1 欧盟碳边境调节机制带来的间接挑战 5
2.3.2 国际供应链碳管理对碳足迹数据提出明确要求 5
2.3.3 “一带一路”绿色发展对碳足迹标准提出新需求 6
2.4 当前存在的主要问题 6
2.4.1 碳足迹核算边界缺乏统一规定 6
2.4.2 关键材料排放因子数据缺失且不统一 6
2.4.3 分配原则与方法缺乏具体操作指南 6
2.4.4 专门针对水力发电机的产品标准尚属空白 6
3 编制原则和技术路线 7
3.1 编制原则 7
3.2 编制方法 7
3.3 编制依据 7
3.4 技术路线 8
4 行业基本情况 8
4.1 行业概况 8
4.2 行业发展 9
4.2.1 产业规模与市场格局 9
4.2.2 技术进步与节能降碳成效 9
4.2.3 碳减排面临的挑战 11
4.3 生产过程 11
4.3.1 原材料获取阶段 11
4.3.2 生产制造阶段 12
5 国外变压器相关环境管理标准 13
5.1 国际标准化组织（ISO）相关标准 13

5.1.1 ISO 14067:2018《温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南》 13
5.1.2 ISO 14040 和 ISO 14044 生命周期评价系列标准 14
5.2 欧盟相关标准 14
5.2.1 PEF 体系概述 14
5.2.2 欧盟生态设计指令的参考价值 14
5.3 美国相关标准 14
5.3.1 ANSI/IEEE 电机能效测试标准 14
5.3.2 NEMA 电机能效标准 15
5.3.3 EPA ENERGY STAR 计划 15
5.3.4 美国标准的总体特点与局限性 15
5.4 对制定本标准的启示和参考 16
6 主要技术内容及说明 16
6.1 标准名称与适用范围 16
6.2 产品种类与描述 16
6.3 声明单位 16
6.3 系统边界 16
6.3.1 系统边界 16
6.4 清单分析 17
6.4.1 初级数据 17
6.4.2 次级数据 17
6.4.3 各阶段数据收集 17
6.4.4 数据分配 18
6.4.5 取舍准则 19
6.4.6 数据审定 19
6.4.7 将数据关联到单元过程和声明单位 19
6.4.8 分配原则 19
6.5 影响评价 19
6.5.1 碳足迹计算方法 19
6.5.2 特征化因子和 GWP 等参数的选取 20
6.6 结果解释 20
6.7 产品碳足迹报告 20
6.8 产品碳足迹声明 20
7 对实施本标准的建议 20
（资料性）产品碳足迹量化数据收集表 23
初级数据收集表 23
次级数据收集表 24
（资料性）全球变暖潜势值参考值 25

1 标准编制背景

为贯彻落实《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中关于“构建绿色低碳循环发展体系”和“推动重点行业碳达峰”的要求，落实《2030年前碳达峰行动方案》中关于“建立健全产品碳足迹评价标准体系”的部署，支撑国家碳达峰碳中和目标实现，按照国家标准化管理委员会和行业主管部门的总体工作安排，由国家电网公司科技部牵头，组织开展《产品碳足迹量化方法与要求 水力发电机》标准的编制任务。

水力发电机作为水力发电系统中实现能量转换的核心设备，是将水轮机的机械能转换为电能的关键部件。虽然水力发电过程本身不产生温室气体排放，但水力发电机的生产制造涉及大量原材料（硅钢片、铜导线、结构钢等）的加工和能源消耗，其全生命周期的碳排放主要集中在原材料获取和生产制造阶段。开展水力发电机产品碳足迹量化工作，对于引导水电装备制造企业实施绿色低碳转型、推动水电产业链供应链协同降碳、促进水电行业全生命周期碳管理具有重要意义。

1.1 标准起草单位

本标准由国网浙江省电力有限公司嘉兴供电公司、浙江清华长三角研究院共同起草。

1.2 参编单位工作分工

国网浙江省电力有限公司嘉兴供电公司负责产品碳足迹相关国际标准、国家标准和行业文献的调研与对比分析，承担系统边界界定、清单分析、数据分配、取舍准则和碳足迹计算模型等方法学研究，负责标准文本及编制说明的起草、修改和统稿，参与数据质量评价和不确定性分析。

浙江清华长三角研究院负责标准编制的总体组织与统筹协调，研究提出水力发电机产品碳足迹量化的总体技术框架和适用范围，组织企业现场调研以及原材料、能源消耗和运输等初级数据的采集与核实，协调解决编制过程中的关键技术问题，并开展标准条款的工程应用验证和意见征集。

1.3 标准主要起草人及分工

姓名	单位	主要工作
钟伟东	国网浙江省电力有限公司嘉兴供电公司	国内外标准文献调研及对比分析
孙一凡	国网浙江省电力有限公司嘉兴供电公司	系统边界界定及碳足迹计算模型构建
徐杰	国网浙江省电力有限公司嘉兴供电公司	标准文本撰写、数据质量评价及统稿
刘广鑫	浙江清华长三角研究院	总体技术框架设计、组织协调与技术内容审核
侯林	浙江清华长三角研究院	企业现场调研及原材料、能源初级数据采集
陈一帆	浙江清华长三角研究院	水力发电机制造工艺调研及清单数据核实
刘芳涛	浙江清华长三角研究院	标准条款工程应用验证及意见征集

2 规范性引用文件标准编制的必要性分析

2.1 国家碳达峰碳中和战略对产品碳足迹标准要求

2.1.1 国家顶层政策明确要求建立碳足迹标准体系

2020年9月，习近平总书记在第七十五届联合国大会上郑重宣布，中国力争于2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和。这一重大战略决策对我国经济社会发展产生了深远影响，也对各行业、各产品的碳排放管理提出了前所未有的要求。碳达峰碳中和目标不仅是对国际社会的庄严承诺，更是推动国内经济结构、能源结构、产业结构深度转型的根本遵循。

2021年10月，国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》（国发〔2021〕23号），明确提出“建立重点产品全生命周期碳足迹核算标准，推动重点行业企业开展产品碳足迹核算，引导绿色低碳生产和消费”。该方案将“绿色低碳科技创新行动”列为十大重点行动之一，要求“完善绿色低碳技术和产品检测、评估、认证体系”。2022年8月，国家发展改革委、国家统计局、生态环境部联合印发《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》（发改环资〔2022〕622号），进一步强调要“建立健全产品碳足迹核算方法和标准体系”，并要求“逐步扩大产品碳足迹核算范围，推动重点行业和重点产品先行先试”。

2023年11月，国家发展改革委、工业和信息化部、市场监管总局等部门联合印发《关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见》（发改环资〔2023〕1529号），明确提出到2025年，国家层面出台50个左右重点产品碳足迹核算规则和标准，初步建成产品碳足迹核算标准体系；到2030年，出台200个左右重点产品碳足迹核算规则和标准，产品碳足迹管理体系更加完善。该意见将电工装备（包括变压器、电机、水力发电机等）列为重点产品领域之一。

水力发电机作为水电装备的核心产品，其全生命周期碳排放总量不容忽视。虽然水力发电过程本身是清洁的，但水力发电机的制造过程涉及大量高碳排放原材料（硅钢片、铜导线、结构钢等）的加工和使用。据行业初步估算，我国在运的水力发电机（含抽水蓄能机组）总量超过3000台，总装机容量超过4亿千瓦。每年新投运及升级改造的水力发电机容量约2000万至3000万千瓦，对应的原材料消耗量巨大。仅以硅钢片为例，按平均每万千瓦容量消耗硅钢片约2.5吨计算，每年新投运机组消耗硅钢片约5000至7500吨，仅此一项的原材料碳排放就达到约1.9万至2.85万吨CO_2e。制定水力发电机产品碳足迹量化标准，是国家碳达峰碳中和战略在装备制造领域落地的重要举措，也是建立健全重点产品碳足迹标准体系的必要组成部分。

2.1.2《“十四五”工业绿色发展规划》对电工装备行业提出明确要求

2021年，工业和信息化部发布《“十四五”工业绿色发展规划》（工信部规〔2021〕178号），明确提出“推进电工装备、石化装备、农业机械等重点行业绿色制造体系建设，开展重点产品绿色设计，推广绿色制造技术，建立产品全生命周期碳排放核算和评价体系”。水力发电机作为电工装备领域的大型核心产品，被列为重点产品之一。

规划还要求“到2025年，规上工业企业单位工业增加值能耗较2020年下降13.5%，二氧化碳排放下降18%”。水力发电机制造企业要实现这一目标，必须精确掌握产品全生命周期的碳排放情况，识别高排放环节，制定针对性的降碳措施。这些工作的基础，是一套科学、统一、可操作的产品碳足迹量化标准。

此外，规划明确提出要“推进绿色制造标杆企业建设”，要求“在重点行业培育一批绿色工厂、绿色供应链管理企业”。水力发电机制造企业作为电工装备行业的重要力量，开展产品碳足迹核算是创建绿色工厂、绿色供应链的必要条件。只有建立统一的产品碳足迹量化标准，才能为企业提供明确的技术指引，为政府部门开展绿色制造评价提供技术支撑。

2.1.3《工业领域碳达峰实施方案》对电工装备产品碳足迹的要求

2022年8月，工业和信息化部、国家发展改革委、生态环境部联合印发《工业领域碳达峰实施方案》（工信部联节〔2022〕88号），明确提出“实施电工装备、石化装备、农业机械等重点行业绿色制造和降碳行动，推动重点产品碳足迹核算和碳标签应用”。方案特别指出，要“在高效节能产品中开展碳足迹核算和碳标签试点”，并强调“鼓励龙头企业从供应链角度开展碳足迹管理，推动上下游企业协同降碳”。

方案还要求“建立健全工业产品碳足迹核算方法体系”，明确提出“制定一批重点产品的碳足迹核算规则标准”。水力发电机作为水电装备领域的核心产品，是方案中明确的重点产品之一。这一要求直接推动了水力发电机产品碳足迹量化标准的需求。只有有了统一的量化标准，碳标签制度才能规范实施，不同企业生产的水力发电机产品才能在碳排放层面进行公平比较，从而引导市场向低碳产品倾斜，形成有效的市场驱动机制。

2.1.4《质量强国建设纲要》对产品碳足迹的要求

2023年2月，中共中央、国务院印发《质量强国建设纲要》，明确提出“建立健全碳达峰碳中和标准计量体系，推动建立产品碳足迹标识制度”。这是党中央、国务院首次在最高层级文件中提出建立产品碳足迹标识制度，标志着产品碳足迹工作已上升为国家战略。水力发电机作为电工装备领域的重要出口产品，建立碳足迹标识制度，对于提升我国水电装备的国际形象和市场竞争力具有重要意义。

2.2 水力发电行业绿色低碳转型和高质量发展的需要

2.2.1 水力发电机制造具有高耗材、高碳排的行业特征

水力发电机制造行业属于典型的高耗材、高间接碳排放行业。主要原材料本身碳排放强度高，且单台产品用量巨大。以一台典型的大型立式水轮发电机为例，对其主要材料的碳排放进行分析：

（1）硅钢片（定子、转子铁芯材料）。取向硅钢片是水力发电机铁芯的核心材料，其碳排放强度很高。根据相关研究成果，取向硅钢片的生产碳排放因子约为3.8 kg CO_2e/kg。一台10MW立式水轮发电机，硅钢片用量约为20至30吨，仅硅钢片一项的原材料碳排放就达到76至114吨CO_2e。对于大型水电机组，如700MW级水轮发电机，硅钢片用量可达200吨以上，仅硅钢片的原材料碳排放就超过760吨CO_2e。

（2）铜导线（定子线圈、转子线圈材料）。铜导线的碳排放因子约为0.70至0.80 kg CO_2e/kg。一台10MW水轮发电机，铜导线用量约为10至15吨，碳排放约为7至12吨CO_2e。大型机组铜导线用量可达100吨以上，碳排放约80吨CO_2e。硅钢片和铜导线两项合计，原材料碳排放约占制造阶段碳排放的60%以上。

（3）结构钢材（机座、轴、磁轭、磁极等）。结构钢材的碳排放因子约为2.0至2.2 kg CO_2e/kg。一台10MW水轮发电机，结构钢材用量可达100吨以上，碳排放约200至220吨CO_2e。大型机组结构钢材用量可达1000吨以上，碳排放约2000至2200吨CO_2e。

综合以上三项主要材料，一台10MW水轮发电机的原材料碳排放总量约为283至346吨CO_2e；一台700MW级大型机组，仅上述三项材料的碳排放就超过3000吨CO_2e。这还仅是原材料获取阶段的碳排放，尚未计入生产制造阶段的能源消耗排放。

由此可见，水力发电机产品的碳减排潜力巨大，尤其是通过优化产品设计（减少材料冗余）、采用低碳材料（如高牌号硅钢片、绿色钢材）、推广清洁生产工艺等措施，可以有效降低原材料获取和生产制造阶段的碳排放。而要准确量化这种减排效果，就必须有一套科学的碳足迹核算方法。

2.2.2 绿色制造与绿色采购对碳足迹管理提出迫切需求

近年来，水力发电行业绿色制造工作不断深入。中国电器工业协会发布的《电工装备行业绿色制造体系建设工作方案》明确提出，要“开展水力发电机、水轮机等水电装备产品的绿色设计、绿色工艺、绿色供应链建设，建立水电装备产品碳排放核算体系”。

在绿色采购方面，国家电网有限公司、中国南方电网有限责任公司、三峡集团等大型水电投资和运营企业，已在部分水电项目招标中，开始关注供应商的碳排放管理能力。例如，国家电网在2023年部分抽水蓄能电站的设备招标中，要求投标企业提供主要原材料的碳排放数据，并将企业的碳管理体系建设情况作为技术评价的参考指标。三峡集团在白鹤滩、乌东德等大型水电站的设备采购中，也逐步加强了产品环境绩效的要求。这一趋势正在快速扩展，预计未来2至3年内，碳足迹将逐步成为水电装备集中采购的常规要求。

然而，由于缺乏统一的水力发电机碳足迹量化标准，各企业采用的核算边界、计算方法、排放因子各不相同，导致核算结果缺乏可比性，也给招标评审带来困难。有的企业仅核算生产制造阶段的直接排放，有的核算到“从摇篮到大门”（原材料+制造），有的则扩展到安装和运输环节，结果差异可达数倍。这种混乱局面严重影响了碳足迹核算的实际应用效果，亟需制定统一标准。

此外，水力发电机制造企业之间的绿色供应链竞争也日益激烈。大型发电集团正在推动供应商碳信息披露和碳绩效评价，只有能够提供规范、可比碳足迹数据的企业，才能在未来的市场竞争中占据有利地位。

2.2.3 节能降碳技术改进需要碳足迹核算提供量化支撑

水力发电机制造行业近年来在节能降碳方面取得了显著的技术进步，主要包括以下几个方面：

（1）高磁感取向硅钢（Hi-B钢）的推广应用。高磁感取向硅钢相较于普通取向硅钢，具有磁导率高、铁损低的显著优势。采用Hi-B钢制造的水力发电机铁芯，铁损可降低15%至20%。虽然Hi-B钢的生产过程本身碳排放略高，但其在使用阶段的节能效果显著（虽然水力发电机运行损耗远小于变压器，但对于大型抽水蓄能机组，铁损降低带来的节能效果依然可观）。更重要的是，Hi-B钢的高磁导率允许在满足磁通要求的前提下适当减少硅钢片用量，从而降低材料碳排放。宝武钢铁、首钢等国内企业已实现Hi-B钢的规模化生产，打破了长期以来对进口产品的依赖。采用Hi-B钢替代普通硅钢片的碳减排效果，需要通过全生命周期碳足迹核算进行科学评估。

（2）数字化设计与仿真优化。随着计算机技术的快速发展，数字化设计与仿真优化已成为水力发电机制造行业的重要技术手段。通过电磁场、温度场、流体场、机械力场的多物理场耦合仿真，可以在产品设计阶段对定子、转子结构进行优化，在满足电气性能的前提下，降低材料消耗。例如，通过电磁场优化设计，可以在保持输出功率不变的情况下，优化铁芯尺寸和线圈匝数，减少硅钢片和铜导线的用量。通过结构力学分析，可以在保证机械强度的前提下，优化机座、磁轭等结构件的壁厚和筋板布置，减少钢材用量。数字化设计平台已在哈电集团、东方电气、国电投等大型企业中普遍应用，中小企业的数字化水平也在快速提升。

（3）绿色铸造与锻造工艺。水力发电机的大型铸锻件（如主轴、磁轭、机座等）是制造过程中的高能耗环节。传统的铸造、锻造工艺采用燃煤或重油加热，碳排放强度高。近年来，电感应加热、天然气加热等清洁能源替代技术逐步推广应用。同时，精密铸造、近净成形锻造等先进工艺的采用，减少了后续加工余量，降低了材料浪费和加工能耗。这些技术的碳减排效果，需要通过统一的碳足迹核算方法进行定量分析。

（4）环保型绝缘材料和涂装材料的应用。传统的水力发电机绝缘处理使用溶剂型绝缘漆，挥发性有机物（VOCs）排放量大，且溶剂型绝缘漆的生产过程碳排放较高。近年来，无

溶剂绝缘漆、水性绝缘漆等环保型材料逐步推广应用。这些材料不仅减少了VOCs排放，其生产过程的碳排放也显著低于传统溶剂型产品。在涂装方面，水性涂料、高固体分涂料的应用同样带来了碳减排效益。但这些材料的全生命周期碳排放是否确实低于传统材料，需要通过碳足迹核算进行验证。

（5）高效电机制造工艺。随着电机能效标准的不断提高，水力发电机的效率也在持续提升。高效率意味着更低的运行损耗，虽然水力发电机的运行损耗远小于火电设备，但对于抽水蓄能机组等需要频繁启停和工况转换的设备，效率提升带来的节能效果依然显著。例如，通过采用低损耗硅钢片、优化通风冷却结构、提高加工精度等措施，可以将发电机效率从97%提升至98%以上。效率提升1个百分点，对于大型机组意味着每年可减少数千千瓦时的电能损耗。这些节能效果带来的碳减排，需要通过全生命周期碳足迹核算进行综合评估。

2.2.4 行业高质量发展对碳足迹管理提出新期待

党的二十大报告明确提出“推动经济社会发展绿色化、低碳化”“加快发展方式绿色转型”。水力发电作为清洁能源的重要组成部分，其自身发展的“绿色化”是高质量发展的应有之义。水力发电机作为水电装备的核心，其碳足迹管理是体现水电“全生命周期绿色”的重要方面。

从行业发展阶段看，我国水电建设已从高速增长期进入稳定发展期，新建大型水电站项目逐步减少，存量机组的升级改造和维护需求日益增加。这一转变意味着，水力发电机制造企业需要从追求“规模扩张”转向追求“质量效益”，而绿色低碳竞争力是质量效益的重要组成部分。开展产品碳足迹核算、建立碳足迹管理体系、披露产品碳信息，是企业在新的发展阶段塑造差异化竞争优势的重要手段。

2.3 应对国际贸易绿色壁垒和提升国际竞争力需要

2.3.1 欧盟碳边境调节机制带来的间接挑战

2023年5月，欧盟碳边境调节机制（CBAM）正式生效，要求进口到欧盟的产品根据其生产过程中的碳排放强度购买相应数量的CBAM证书。虽然CBAM首批覆盖的是钢铁、水泥、铝、化肥、电力、氢等六个行业，但欧盟已明确表示将逐步扩大覆盖范围。水力发电机虽然在CBAM中尚未直接列入，但水力发电机的主要原材料（钢材、铜材）本身属于高碳排放材料或CBAM覆盖范围，其碳排放将间接影响水力发电机产品的竞争力。

更重要的是，欧盟在绿色协议框架下，正在推动更广泛的进口产品环境足迹信息披露要求。产品环境足迹（PEF）体系虽然目前主要针对用能产品，但其方法论正在向更多产品类别扩展。虽然水力发电机不是用能产品（运行阶段不消耗燃料），但未来可能会被纳入更广泛的环境足迹报告要求。我国是水力发电设备出口大国，据中国电器工业协会统计，2023年我国水力发电机组及零部件出口额约20亿美元，主要出口市场包括东南亚（越南、老挝、缅甸、柬埔寨等）、南亚（尼泊尔、巴基斯坦、印度）、非洲（埃塞俄比亚、刚果、赞比亚等）、南美（巴西、秘鲁、厄瓜多尔等）。虽然目前对欧盟出口占比较小，但随着欧盟绿色贸易壁垒的不断升级，未来可能面临新的挑战。

2.3.2 国际供应链碳管理对碳足迹数据提出明确要求

全球越来越多的跨国企业正在推行供应链碳管理。国际电力设备采购巨头（如GE可再生能源、西门子能源、福伊特、安德里茨等）已开始要求其供应商提供产品碳足迹数据。这些跨国企业通常依据ISO 14067或欧盟PEF方法学，要求供应商提供符合特定数据质量要求的碳足迹报告。我国水力发电机制造企业作为这些跨国公司的供应商或潜在供应商，必须能够提供规范的碳足迹报告。制定统一的水力发电机碳足迹量化标准，有助于国内企业统一核算口径，提高碳数据质量，增强在国际市场上的可信度和竞争力。

此外，世界银行、亚洲开发银行、亚洲基础设施投资银行等多边开发机构在资助水电项目时，越来越关注项目的环境绩效，要求项目参与方提供设备的环境足迹信息。统一的碳足迹量化标准，有助于我国企业在国际招标项目中规范地响应这些要求。

2.3.3 “一带一路”绿色发展对碳足迹标准提出新需求

我国在“一带一路”倡议中积极推动绿色基础设施建设和绿色装备“走出去”。变压器作为电力基础设施的核心设备，在“一带一路”沿线国家大量应用。如何科学评价这些设备的环境绩效，是“一带一路”绿色发展的内在要求。

建立具有中国特色的、兼顾国情和国际先进经验的变压器碳足迹标准，可以为“一带一路”沿线国家提供可借鉴的技术规范，也有助于提升我国在电工装备碳核算领域的话语权和影响力。

2.4 当前存在的主要问题

2.4.1 碳足迹核算边界缺乏统一规定

目前水力发电机制造企业在开展碳足迹核算时，采用的系统边界差异很大：有的企业仅核算生产制造阶段的直接排放（“大门到大门”），未能覆盖碳排放强度最高的原材料获取阶段；有的企业核算到“从摇篮到大门”（原材料获取+生产制造），这是目前较为通行的做法；有的企业核算到“从摇篮到坟墓”，涵盖全生命周期。各企业间差异主要体现在是否纳入原材料运输、安装调试、回收处置等环节，缺乏统一规定导致结果缺乏可比性。

2.4.2 关键材料排放因子数据缺失且不统一

水力发电机特有的材料和工艺过程缺乏本土化的碳排放因子数据。目前国内企业多直接引用国外数据库（如ecoinvent、GaBi等）中的数据，反映的是国外生产工艺和能源结构，与国内实际情况存在明显偏差。不同数据库对同一材料的排放因子取值差异较大，例如铜导线在不同数据库中排放因子可在0.5至1.5 kg CO_2e/kg之间波动。硅钢片、磁轭钢、大型铸锻件等关键材料的排放因子也缺乏统一、权威的本土化数据。

特别是水力发电机大型铸锻件的碳排放因子，国内目前尚无公开发布的权威数据。大型铸锻件的生产流程包括冶炼、铸造、锻造、热处理等多个高能耗环节，碳排放强度远高于普通钢材。在缺乏本土化数据的情况下，企业往往采用普通钢材的排放因子替代，导致核算结果严重偏低。

2.4.3 分配原则与方法缺乏具体操作指南

在水力发电机的碳足迹核算中，存在多种需要分配的情况。例如，大型铸造车间可能同时生产多种产品，电力消耗如何在产品间分配？铸锻件生产过程中的废钢回炉，其碳减排效益如何计算？回收处置阶段的分配方法（截断法、替代法、分配法）如何选择？这些问题在国际标准中虽有原则性规定，但缺乏针对水力发电机产品的具体操作指南，导致各企业处理方式不一，结果差异较大。

2.4.4 专门针对水力发电机的产品标准尚属空白

我国虽然已有GB/T 24067-2024《温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南》等通用标准，以及GB/T 24040、GB/T 24044等生命周期评价基础标准，但这些标准均为通则性或基础性标准，没有针对水力发电机产品的具体核算方法规定。水力发电机产品具有单台价值高、定制化程度高、原材料用量大、技术参数复杂、运行寿命长（通常为40至50年）、大宗材料回收率高等特点，需要制定专门的、细化的量化方法与要求标准。

3 编制原则和技术路线

3.1 编制原则

本标准编制遵循以下原则：一是与国际标准协调一致，保持技术先进性。本标准充分参照GB/T 24067-2024《温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南》、ISO 14067:2018等国际通用标准，在术语定义、系统边界划分、分配原则、取舍准则等方面保持协调一致，确保核算结果的国际可比性，为我国水力发电机产品应对潜在的绿色贸易壁垒提供技术支持。二是立足我国水力发电机制造行业实际，确保可操作性。我国水力发电机制造企业以大型企业为主，技术水平和数据基础较好，但产品定制化程度高、单台产品差异大，本标准在保证核算科学性的前提下，合理设置了数据质量要求，鼓励企业优先使用初级数据（现场数据），在数据缺失时可使用次级数据（如附录中的常用参数参考值），并设置了明确的取舍准则（各阶段中单项排放小于该阶段总排放1%且合计不超过5%的要素可忽略），既保证了核算的科学性，又降低了企业的核算成本和实施难度。三是突出全生命周期理念，体现水力发电机产品特点。水力发电机运行阶段不消耗化石燃料，其全生命周期碳排放主要集中于原材料获取和生产制造阶段，因此本标准将系统边界设定为“从摇篮到大门”（可根据需要扩展），并重点规范了硅钢片、铜导线、结构钢材等大宗材料排放因子的选取方法以及大型铸锻件等关键工艺过程的碳排放核算方法。四是兼顾完整性与经济性，合理设置取舍准则，与ISO 14067、PAS 2050等国际通行标准保持一致。

3.2 编制方法

本标准采用“文献调研+企业实测+专家论证”相结合的方法开展编制工作。文献调研方面，系统收集了ISO 14067、PAS 2050、欧盟PEF体系相关技术文件以及GB/T 24040、GB/T 24044、GB/T 24067、GB/T 15468等国内外标准和技术文献，掌握了产品碳足迹核算的技术框架和关键方法，重点研究了水力发电机产品特有的生命周期评价方法。企业实测方面，选取了6家典型水力发电机制造企业，覆盖不同单机容量等级（10MW级、100MW级、300MW级以上）、不同类型（立式、卧式、抽水蓄能机组）和生产规模，采集了原材料消耗、能源消耗、大型铸锻件加工、运输等初级数据，为标准参数确定和排放因子本土化提供了数据支撑。专家论证方面，组织召开了开题论证、技术研讨和送审稿审查三次专家论证会，邀请行业专家、高校学者和第三方核查机构代表，就系统边界划分、分配原则、排放因子选取、大型铸锻件碳排放核算方法等关键技术问题进行了深入研讨。通过上述方法的有机结合，确保了本标准技术内容的科学性、合理性和可操作性。

3.3 编制依据

本标准的编制以下列法律法规、国家标准和政策文件为依据：

a) 法律法规

《中华人民共和国环境保护法》

《中华人民共和国节约能源法》

《中华人民共和国清洁生产促进法》

《中华人民共和国循环经济促进法》

b) 国家标准

GB 17167 用能单位能源计量器具配备和管理通则

GB/T 32150—2015 工业企业温室气体排放核算和报告通则

GB/T 24040-2008 环境管理 生命周期评价 原则与框架

GB/T 24044-2008 环境管理 生命周期评价 要求与指南

GB/T 24067-2024 温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南
GB/T 32150-2015 工业企业温室气体排放核算和报告通则
GB/T 2900.25-2008 电工术语 旋转电机
GB/T 15468-2020 水轮发动机组基本技术条件

c) 相关政策文件

《2030年前碳达峰行动方案》（国发〔2021〕23号）
《“十四五”工业绿色发展规划》（工信部规〔2021〕178号）
《工业领域碳达峰实施方案》（工信部联节〔2022〕88号）
《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》（发改环资〔2022〕622号）

3.4 技术路线

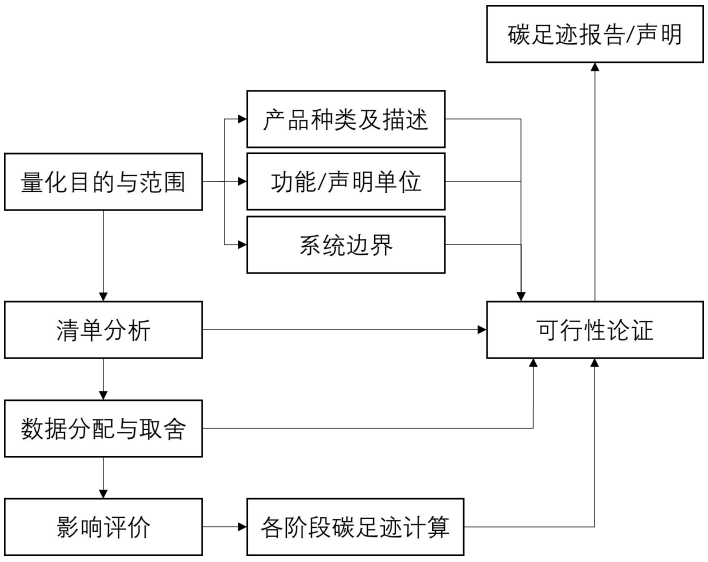


图 3.4-1 本标准制订的技术路线

4 行业基本情况

4.1 行业概况

水力发电机是利用电磁感应原理将水轮机的机械能转换为电能的设备，是水力发电站中最核心的电气设备。当水轮机在水流作用下旋转时，带动发电机的转子旋转，转子磁场切割定子绕组，在定子绕组中产生感应电动势，从而实现机械能到电能的转换。水力发电机的性能直接关系到整个水电站的运行效率、稳定性和电能质量。

水力发电机按轴线位置可分为立式水轮发电机和卧式水轮发电机。立式水轮发电机主轴垂直布置，适用于中低转速、大容量机组，是目前大中型水电站的主流机型，其结构紧凑、运行稳定、维护方便。卧式水轮发电机主轴水平布置，适用于高转速、小容量机组，多用于小型水电站或灯泡贯流式机组。按转速可分为低速发电机（转速低于 150 r/min）、中速发电机（150~500 r/min）和高速发电机（500 r/min 以上）。按冷却方式可分为空冷式、水冷式和蒸发冷却式。空冷式利用空气作为冷却介质，结构简单、维护方便，是目前应用最广泛的冷却方式，适用于中小容量机组；水冷式利用纯水或冷却水作为冷却介质，散热效率高，适用于大容量机组；蒸发冷却式利用氟利昂等介质的相变吸热原理进行冷却，冷却效率最高，但系统复杂、成本高，仅适用于特大型机组。按绝缘系统可分为 B 级、F 级、H 级等耐热等级，

不同耐热等级对应不同的绝缘材料体系和温升限值。

水力发电机行业是我国装备制造业的重要组成部分，也是水电产业的基础支撑行业。据中国电器工业协会统计，2023 年我国水力发电机组产量约 2500 万千瓦，规模以上企业约 50 家，行业总产值约 300 亿元。全行业从业人员约 5 万人，年用电量超过 6 亿千瓦时。我国水力发电机制造企业主要集中在黑龙江（哈电集团）、四川（东方电气）、天津（国电投）、浙江、江苏等省份，其中哈电集团、东方电气两家龙头企业占据了大型、超大型机组市场的主要份额，合计市场份额超过 70%，而大量的中小型企业则在中小型机组和改造维修市场领域竞争。

水力发电机制造属于典型的技术密集型、资本密集型产业，产品技术参数复杂，质量要求高，单台产品价值高（大型机组单台价值可达数千万元甚至上亿元）。同时，水力发电机制造行业也是高耗材、高间接碳排放行业，主要原材料（硅钢片、铜导线、结构钢材等）本身具有较高的碳排放强度。据估算，我国每年新投运及升级改造的水力发电机容量约 2000 万至 3000 万千瓦，对应的原材料消耗量巨大：硅钢片约 0.5 万至 0.75 万吨，铜导线约 0.25 万至 0.375 万吨，结构钢材约 20 万至 30 万吨。仅原材料获取阶段的碳排放就达到约 40 万至 60 万吨 CO_2e。开展水力发电机产品碳足迹量化工作，对于推动行业绿色低碳转型具有重要意义。

4.2 行业发展

4.2.1 产业规模与市场格局

近年来，随着我国能源结构调整和绿色低碳转型的深入推进，水力发电作为清洁、可再生的主力电源，其产业规模持续增长，装机容量保持稳定增长态势。据国家能源局统计，截至 2023 年底，全国水电装机容量约 4.2 亿千瓦（含抽水蓄能），约占全国电力总装机的 14%。2023 年，全国水电发电量约 1.3 万亿千瓦时，约占全国总发电量的 13%。水力发电在我国电力系统中承担着调峰、调频、备用等重要功能，对保障电网安全稳定运行具有不可替代的作用。

据中国电器工业协会统计，2023 年我国水力发电机组产量约 2500 万千瓦，同比增长约 3.5%。其中，立式机组产量占比约为 70%，卧式机组产量占比约为 20%，灯泡贯流式机组产量占比约为 10%。从单机容量看，100MW 及以上大型机组产量占比约为 40%，10MW 至 100MW 中型机组产量占比约为 35%，10MW 以下小型机组产量占比约为 25%。2023 年，全行业实现主营业务收入约 300 亿元，同比增长约 4.2%；实现利润总额约 25 亿元，同比增长约 3.8%。行业出口交货值约 140 亿元人民币（约 20 亿美元），产品出口至东南亚、南亚、非洲、南美等 60 多个国家和地区。我国水力发电机组出口量约占全球水力发电设备贸易量的 30%，已成为全球最主要的水力发电设备供应国之一。

我国水力发电机市场格局高度集中，制造行业呈现“大型企业主导高端市场、中小企业竞争中低端市场”的格局。哈电集团（哈尔滨电机厂有限责任公司）和东方电气（东方电机有限公司）是我国水力发电机制造行业的两大龙头企业，在大型、超大型机组（单机容量 300MW 及以上）市场中占据绝对主导地位，合计市场份额超过 80%。两家企业均具备单机容量 1000MW 级巨型水轮发电机的自主设计制造能力，产品技术水平和质量已达到国际先进水平。白鹤滩水电站（单机容量 1000MW）、乌东德水电站（单机容量 850MW）、溪洛渡水电站（单机容量 770MW）等国家重大工程的水力发电机组均由这两家企业提供。

4.2.2 技术进步与节能降碳成效

近年来，我国水力发电机制造行业在技术进步和节能降碳方面取得了显著成效，主要体现在以下几个方面：

（1）巨型机组设计制造能力达到世界领先水平。我国已完全掌握了单机容量 1000MW 级巨型水轮发电机的自主设计制造技术，白鹤滩水电站 1000MW 机组是世界上单机容量最大的水轮发电机组，代表了当今世界水电装备技术的最高水平。巨型机组的高效设计和精密制造，降低了单位容量的材料消耗和运行损耗，提高了全生命周期的环境绩效。据测算，白鹤滩 1000MW 机组的单位容量硅钢片消耗量较常规大型机组降低约 10%至 15%，运行效率达到 98%以上。

（2）高牌号硅钢片和高效电磁设计技术推广应用。高牌号（高磁感）取向硅钢片具有铁损低、磁导率高的特点，是提高发电机效率、降低材料消耗的关键材料。我国宝武钢铁、首钢等企业已实现高牌号硅钢片的规模化生产，产品性能达到国际先进水平，打破了长期以来对进口产品的依赖。目前，高牌号硅钢片在大型水力发电机中的应用率已超过 90%。同时，通过电磁场有限元仿真优化设计，可以在满足输出功率和电压波形质量的前提下，优化定子、转子结构，减少硅钢片和铜导线的用量。数字化电磁设计技术已在大型企业中全面应用，较传统经验设计可减少材料用量约 5%至 10%。

（3）全空冷技术的成熟应用。全空冷技术是指发电机定子、转子均采用空气作为冷却介质，无需水冷系统或蒸发冷却系统。与传统的水冷或蒸发冷却方式相比，全空冷技术省去了冷却水系统、纯水处理系统、冷却水泵等辅助设备，简化了电站辅助系统，降低了制造和运行能耗。全空冷技术的关键在于通风冷却系统的优化设计，通过计算流体力学（CFD）仿真，优化风路结构和风扇设计，在保证散热效果的前提下降低通风损耗。目前，全空冷技术已在 300MW 级及以下机组中广泛应用，哈电集团、东方电气等企业已将该技术成功应用于 700MW 级大型机组。

（4）环保型绝缘材料和涂装材料的应用。传统的水力发电机绝缘处理使用溶剂型绝缘漆，挥发性有机物（VOCs）排放量大，且溶剂型绝缘漆的生产过程碳排放较高。近年来，无溶剂绝缘漆、水性绝缘漆等环保型材料逐步推广应用。无溶剂绝缘漆的 VOCs 排放量较溶剂型降低 90%以上，其生产过程的碳排放也显著降低。在涂装方面，水性涂料、高固体分涂料的应用同样带来了碳减排效益。据企业实测数据，采用环保型绝缘材料和涂装材料后，单台大型机组的绝缘处理环节碳排放可降低约 30%至 40%。

（5）数字化设计与仿真优化平台建设。随着计算机技术的快速发展，数字化设计与仿真优化已成为水力发电机制造行业的重要技术手段。哈电集团、东方电气等大型企业已建成涵盖电磁场、温度场、流体场、机械力场、声场的多物理场耦合仿真平台，可以在产品设计阶段对定子、转子结构、通风冷却系统等进行全参数优化，在满足电气性能的前提下，降低材料消耗和运行损耗。通过数字化设计平台的应用，大型机组的设计周期缩短约 30%，材料利用率提高约 5%至 10%，设计验证所需的物理样机数量减少约 50%，显著降低了研发过程的资源消耗和碳排放。

（6）绿色铸造与锻造工艺的推广应用。水力发电机的大型铸锻件（如主轴、磁轭、机座等）是制造过程中的高能耗环节。传统的铸造、锻造工艺采用燃煤或重油加热，碳排放强度高、污染物排放量大。近年来，电感应加热、天然气加热等清洁能源替代技术逐步推广应用。同时，精密铸造、近净成形锻造等先进工艺的采用，减少了后续加工余量，降低了材料浪费和加工能耗。部分企业还引入了数字化热处理控制系统，通过对加热温度、保温时间、冷却速度的精确控制，在保证热处理质量的前提下降低能耗。

（7）高效加工工艺与智能制造技术应用。水力发电机的大型零部件（如磁轭、机座、转子支架等）加工精度要求高，传统加工方式能耗高、效率低。近年来，高速切削、干式切削、低温切削等高效加工工艺逐步推广应用，在提高加工效率的同时降低了能耗和切削液消耗。同时，智能制造技术（如机器人焊接、自动化装配线、智能物流系统等）在大型企业中的应用，提高了生产效率和产品质量一致性，降低了单位产品的能源消耗。

4.2.3 碳减排面临的挑战

水力发电机制造行业在技术进步和节能降碳方面取得了显著成效，但全生命周期碳减排仍面临诸多挑战：

一是原材料碳排放强度高。硅钢片、铜导线、结构钢材等主要材料的生产过程本身是高耗能、高排放过程，仅靠发电机制造环节的节能降碳难以从根本上解决原材料碳排放问题。以上游原材料为例，取向硅钢片的生产涉及炼铁、炼钢、热轧、冷轧、退火等多个高能耗工序，碳排放因子高达 3.8 kg CO_2e/kg；铜导线的生产涉及铜矿开采、冶炼、电解、拉丝等环节，碳排放因子约为 0.7 至 0.8 kg CO_2e/kg；结构钢材的碳排放因子约为 2.0 至 2.2 kg CO_2e/kg。这些原材料的生产碳排放占水力发电机产品碳足迹的 70%以上。因此，降低水力发电机产品碳足迹，需要向上游原材料供应链延伸，推动全供应链协同降碳。

二是大型铸锻件碳排放核算方法缺失。 水力发电机的大型铸锻件（主轴、磁轭、机座等）生产流程长、工艺复杂、能耗集中，但其碳排放核算方法尚不完善。目前国内缺乏针对大型铸锻件的碳排放因子数据和核算方法指南，企业在核算时往往采用普通钢材的排放因子替代，导致核算结果严重偏低。建立大型铸锻件的碳排放核算方法，是本标准需要重点解决的技术难题之一。

三是中小企业碳管理能力不足。 我国约 40 家中小型水力发电机制造企业，这些企业承接了大量中小型机组和海外订单，但普遍缺乏专业的碳管理人才和核算工具，开展产品碳足迹核算面临较大困难。这些企业往往不具备初级数据采集能力，对碳足迹核算的方法学要求理解不深，甚至尚未启动碳足迹管理工作。如何帮助中小企业提升碳管理能力、降低碳足迹核算门槛，是标准实施过程中需要重点关注的问题。

四是产品定制化程度高，标准化数据获取难度大。 水力发电机产品具有较强的定制化特点，不同水电站的水头、流量、转速等技术参数差异较大，导致机组设计方案各不相同。即使是同一容量等级的机组，其材料消耗量、制造工艺也可能存在较大差异。这种高度定制化的特点，使得企业难以建立标准化的产品碳足迹核算模型，数据收集和处理的工作量较大。

五是回收处置体系尚不完善。 虽然水力发电机的高价值材料（硅钢片、铜导线、钢材等）回收率较高，但回收过程中的碳排放核算方法尚不统一。同时，退役机组的回收拆解目前缺乏专业化、规模化的回收体系，部分退役机组未能得到高效回收利用。绝缘材料、涂装材料等非金属材料的回收处置技术也不成熟。如何科学核算回收阶段的碳减排效益，引导建立专业化的回收体系，是行业面临的重要课题。

4.3 生产过程

水力发电机产品的全生命周期包括从原材料的开采提取，到零部件加工和整机装配，再到安装调试、运行使用，直至寿命结束后的回收处置，以及贯穿各阶段的运输活动。与变压器不同，水力发电机在运行阶段不消耗化石燃料，其全生命周期碳排放主要集中于原材料获取和生产制造阶段。因此，本标准将系统边界设定为“从摇篮到大门”（原材料获取+生产制造），企业可根据需要扩展至全生命周期。以下对各阶段的生产过程及碳排放特征进行详细分析。

4.3.1 原材料获取阶段

原材料获取阶段是指水力发电机生产所需的各种原材料从自然界开采、提取、加工直至成为可供制造使用的材料或零部件的全过程。该阶段的碳排放主要来源于采矿、冶炼、加工等过程的能源消耗和工艺过程排放，以及原材料从产地到制造工厂的运输排放（运输阶段单独核算）。

水力发电机的主要原材料包括铁芯材料、线圈材料、结构材料和绝缘材料四大类。

（1）铁芯材料——硅钢片。水力发电机定子和转子铁芯采用冷轧取向硅钢片冲制叠压而成。取向硅钢片是含硅量约为3%的硅铁合金薄带，其生产工艺流程包括炼铁、炼钢、热轧、冷轧、脱碳退火、高温退火、绝缘涂层涂覆等环节。其中高温退火工序需要在1200℃左右的温度下长时间保温，使硅钢片形成高斯织构（晶体沿轧向高度取向），从而获得优异的磁性能。这一工序能耗极高，是硅钢片碳排放强度高的主要原因。根据RB/T 017-2019《低碳产品评价方法与要求 三相配电变压器》，取向硅钢片的碳排放因子约为3.8 kg CO_2e/kg。我国是全球最大的取向硅钢生产国，宝武钢铁、首钢等企业已实现高牌号取向硅钢的规模化生产。

（2）线圈材料——铜导线。水力发电机的定子线圈和转子线圈采用电磁线（漆包线或纸包线）绕制而成。铜导线的生产包括铜矿开采、冶炼、电解、拉丝、退火、涂漆（或包纸）等环节。我国是全球最大的精炼铜生产国，但铜矿资源相对匮乏，大量铜精矿依赖进口，进口铜精矿的海运排放应纳入原材料获取阶段的碳排放核算。根据RB/T 017-2019，漆包铜线的碳排放因子约为0.79 kg CO_2e/kg，纸包铜线约为0.71 kg CO_2e/kg。

（3）结构材料——钢材。水力发电机的主要结构件包括机座、主轴、磁轭、磁极、转子支架、上下机架、制动环板等，主要采用碳钢（Q235、Q345等）和锻钢（34CrNi3Mo、25Cr2Ni4MoV等）。碳钢的生产包括铁矿石开采、烧结、炼铁、炼钢、轧制等环节，碳排放强度较高。根据RB/T 017-2019，冷轧钢板碳排放因子约为2.2 kg CO_2e/kg，热轧钢板约为2.02 kg CO_2e/kg。大型锻件（如主轴、磁轭）的生产需要经过冶炼、铸造（或锻造）、热处理等环节，碳排放强度远高于普通钢材，但目前国内尚无公开发布的专用排放因子数据，本标准鼓励企业开展实测。

（4）绝缘材料。水力发电机的绝缘材料主要包括绝缘纸、绝缘纸板、云母带、环氧玻璃布板、聚酯薄膜等。其中，定子线圈的主绝缘采用云母带（云母纸+环氧树脂）绕包后真空压力浸渍（VPI）固化成型。云母带中的环氧树脂含量约为30%至40%，环氧树脂的碳排放因子较高（约8.25 kg CO_2e/kg），是绝缘材料碳排放的主要来源。转子磁极线圈的绝缘采用聚酯薄膜或玻璃丝带包扎。绝缘纸和绝缘纸板以木浆为原料，其生产过程碳排放相对较低。

4.3.2 生产制造阶段

生产制造阶段是指将各种原材料和零部件加工、装配成成品水力发电机的全过程。该阶段的碳排放主要来源于各工序消耗的电力和燃料，以及部分工艺过程的温室气体直接排放（如焊接过程产生的CO_2、热处理炉燃烧排放等）。

典型立式水轮发电机的主要生产工艺流程包括定子制造、转子制造、机座及其他结构件加工、总装配和试验等环节。

（1）定子制造。定子是发电机中静止的部分，由定子铁芯、定子线圈、机座等组成。定子铁芯由扇形硅钢片叠压而成，硅钢片先经冲床冲制成扇形片，然后叠装在定子机座内的鸽尾筋上，最后通过穿心螺杆或液压压紧装置将铁芯压紧。定子线圈采用云母带绕包的成型线圈，绕制后经热压成型、绝缘包扎、VPI浸渍、固化等工序。定子制造的主要碳排放来源：冲片设备的电力消耗（冲床、剪床等）、铁芯叠压和压紧设备的电力消耗（液压站、压紧装置等）、VPI浸渍设备的电力消耗（真空泵、浸渍罐、固化炉等）。VPI固化炉通常采用电加热或天然气加热，能耗较高，是定子制造阶段的碳排放重点环节。

（2）转子制造。转子是发电机中旋转的部分，由转子铁芯（磁轭）、磁极、转子支架、主轴等组成。对于立式水轮发电机，转子磁轭由扇形磁轭钢板叠装而成（或整体锻造），磁轭叠装后在磁轭上安装磁极。磁极由磁极铁芯和磁极线圈组成，磁极铁芯采用钢板叠装或整体铸造，磁极线圈采用铜排（或铜管）绕制而成。转子制造的主要碳排放来源：磁轭叠装的电力消耗、磁极线圈绕制设备的电力消耗、磁极装配设备的电力消耗。磁轭叠装需要大量使用液压千斤顶和压紧装置，能耗较高。

（3）机座及其他结构件加工。 机座是支撑定子铁芯和承受电磁力、机械力的结构件，通常采用钢板焊接结构或铸钢件。加工工艺流程包括下料（切割钢板）、焊接（将各钢板部件焊接成机座）、热处理（消除焊接应力）、喷砂（去除氧化皮）、机械加工（车削端面、钻孔等）。主轴通常采用锻钢件，加工工艺流程包括锻造、粗车、热处理（调质）、精车、磨削等。磁轭采用扇形磁轭钢板叠装或整体锻造。机座及其他结构件加工的主要碳排放来源：切割设备的电力消耗（等离子切割机、火焰切割机等）、焊接设备的电力消耗（焊机、焊接机器人等）、热处理炉的燃料消耗（天然气或电力）、机械加工设备的电力消耗（大型立车、镗床、钻床等）。焊接过程使用 CO_2气体保护焊时，保护气体中的 CO_2直接排放到大气中，应计入直接碳排放。

（4）总装配。 总装配是将定子、转子、机座、上下机架、制动器、冷却器、轴承等部件组装成完整发电机的过程。对于大型立式水轮发电机，通常在安装现场进行总装配，制造厂内仅进行试装配。总装配的主要碳排放来自行车、装配工装设备的电力消耗。

（5）试验。 试验包括绝缘电阻测量、直流电阻测量、耐压试验、空载试验、短路试验、温升试验等。试验过程消耗大量电力，特别是大容量机组的温升试验需要长时间通电，能耗较高。试验阶段的碳排放应计入生产制造阶段。

5 国外变压器相关环境管理标准

发达国家在工业产品环境足迹核算方面具有丰富的经验和技术积累。美国、欧盟等国家和地区通过建立完善的技术标准体系，有效推动了产品碳足迹量化工作的规范化和制度化。由于国际上尚无专门针对水力发电机的产品碳足迹标准，本章重点介绍国际标准化组织（ISO）的产品碳足迹通用标准、欧盟产品环境足迹（PEF）体系的方法学框架，以及相关行业协会在大型旋转电机环境管理领域的技术文件，并分析对制定本标准的启示和参考价值。

5.1 国际标准化组织（ISO）相关标准

5.1.1 ISO 14067:2018《温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南》

ISO 14067 是国际标准化组织发布的最权威的产品碳足迹量化标准，为各类产品的碳足迹核算提供了统一的原则、要求和指南。该标准以 ISO 14040 和 ISO 14044 确立的生命周期评价（LCA）方法为基础，专门针对温室气体排放这一单一环境影响类型，规定了产品碳足迹量化的具体方法和程序。

ISO 14067 的核心内容包括：产品碳足迹的系统边界应涵盖原材料获取、生产制造、运输、使用、回收处置等生命周期阶段，并明确区分“从摇篮到坟墓”和“从摇篮到大门”两种边界类型；功能单位的选择应能够反映产品的主要功能，且不同产品之间应具有可比性；在产品碳足迹研究中应优先使用初级数据（现场数据），当无法获取初级数据时可使用次级数据；分配原则应优先基于物理关系（如质量、能量等），无法建立物理关系时可采用经济价值分配；取舍准则规定各阶段中单项排放贡献小于 1%的单元过程可忽略，但忽略的合计贡献不应超过 5%。

对于水力发电机产品，由于运行阶段不消耗化石燃料，其全生命周期碳排放主要集中在原材料获取和生产制造阶段。因此，本标准在制定过程中，充分参照了 ISO 14067 的技术框架，但将系统边界设定为“从摇篮到大门”（可根据需要扩展至全生命周期），并在术语定义、数据质量要求、分配原则、取舍准则等方面与 ISO 14067 保持协调一致，确保水力发电机产品碳足迹核算结果具有国际可比性。

5.1.2 ISO 14040 和 ISO 14044 生命周期评价系列标准

ISO 14040:2006《环境管理 生命周期评价 原则与框架》和 ISO 14044:2006《环境管理 生命周期评价 要求与指南》是生命周期评价领域的基础性标准，为所有类型的产品和服务的环境足迹评价提供了通用的方法论框架。

这两项标准规定了生命周期评价的四个基本步骤：目的与范围确定、清单分析、影响评价和结果解释。在产品碳足迹核算中，清单分析阶段需要收集产品系统各单元过程的输入（原材料、能源）和输出（产品、排放、废弃物）数据；影响评价阶段仅针对气候变化影响类型进行特征化计算，即采用全球变暖潜势（GWP）将各类温室气体统一换算为二氧化碳当量。

本标准在生命周期阶段的划分、数据收集和确认方法、分配原则的适用条件等方面，均遵循了 ISO 14040 和 ISO 14044 的基本原则。

5.2 欧盟相关标准

5.2.1 PEF 体系概述

欧盟产品环境足迹（Product Environmental Footprint，PEF）体系是欧盟委员会建立的一套统一的产品环境绩效评价方法体系，旨在替代欧盟各成员国各自为政的产品环境标签和声明制度，促进绿色产品在欧盟单一市场的自由流通。

PEF 体系的核心文件是《产品环境足迹类别规则》（Product Environmental Footprint Category Rules，PEFCR），针对每一类产品制定专门的量化方法和评价规则。PEFCR 的制定需要经过科学方法评估、利益相关方磋商、试点测试和公开征求意见等严格程序，确保其技术内容的科学性和广泛认可度。

PEF 体系的特点包括：采用多环境影响类型的评价方法（包括气候变化、资源消耗、酸化、富营养化、生态毒性等），但允许在产品特定类别规则中仅报告部分影响类型；规定了统一的生命周期评价方法，包括系统边界、数据质量要求、分配原则和取舍准则等；建立了欧盟层面认可的默认数据集和排放因子库；要求进行不确定性分析和敏感性分析。

虽然 PEF 体系主要针对用能产品制定了产品类别规则（如变压器、电机、风机等），尚未发布专门针对水力发电机的 PEFCR，但其方法学框架（特别是关于数据质量要求、分配原则、取舍准则等方面的规定）对制定本标准具有重要参考价值。

5.2.2 欧盟生态设计指令的参考价值

欧盟生态设计指令（2009/125/EC）是欧盟推动用能产品能效提升的核心法规，对电机、变压器等用能产品规定了最低能效要求和信息要求。虽然水力发电机不属于用能产品（不直接消耗电能或燃料），但生态设计指令中关于材料效率、可回收性设计、有害物质限制等方面的要求，对水力发电机的绿色设计具有参考意义。本标准在回收处置阶段的设计中，借鉴了生态设计指令中关于可回收性设计的理念。

5.3 美国相关标准

美国在大型旋转电机碳排放核算方面尚无联邦层面的强制标准，但部分国家标准、行业标准和能源管理计划为水力发电机碳足迹核算提供了可参考的技术框架。

5.3.1 ANSI/IEEE 电机能效测试标准

美国国家标准协会（ANSI）与电气与电子工程师协会（IEEE）联合制定的电机测试标准，是国际公认的电机性能评价基准。其中，IEEE Std 112《电机试验方法》（IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators）详细规定了电机各项性能参数

的测试方法，包括空载损耗、负载损耗、效率等。虽然该标准主要针对感应电动机，但其损耗测试和计算方法同样适用于同步发电机（包括水力发电机）。

IEEE Std 112 规定了采用“输入-输出法”和“损耗分项法”两种效率测定方法。损耗分项法将电机损耗分解为铁耗、铜耗、机械损耗、杂散损耗等类别，通过分项测试和计算得出总损耗和效率。这一方法为水力发电机使用阶段的损耗分析提供了技术基础。虽然本标准不强制要求将运行损耗转化为碳排放进行核算，但损耗分项法为评估不同设计方案的效率差异和碳减排潜力提供了科学手段。

此外，IEEE Std 115《同步电机试验指南》（IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines）专门针对同步电机（包括水力发电机），规定了空载特性、短路特性、温升试验、效率测定等试验方法。该标准中关于温升试验和损耗测定的方法，可用于验证水力发电机设计方案的效率水平，间接支持碳减排效果的评估。

5.3.2 NEMA 电机能效标准

美国国家电气制造商协会（NEMA）制定的电机能效标准是北美地区电机产品的强制性准入要求。NEMA MG-1《电机与发电机》（Motors and Generators）规定了电机的性能要求、测试方法和能效等级。虽然 NEMA MG-1 主要针对工业电动机，但其中关于绝缘系统、材料要求、能效标识等方面的规定，对水力发电机的绿色设计具有参考价值。

NEMA 还发布了 NEMA Premium™高效电机能效认证计划，对达到特定能效等级的电机产品进行认证。该计划推动了高效电机在美国市场的普及，间接促进了电机制造企业采用低损耗材料（如高牌号硅钢片）和优化设计技术。这些技术和经验同样适用于水力发电机行业。

5.3.3 EPA ENERGY STAR 计划

美国环保署（EPA）的 ENERGY STAR 计划是全球最具影响力的能效标识制度之一。该计划主要针对家用电器、办公设备、照明产品等终端用能产品，通过能效认证和标识引导消费者选择高效产品。虽然 ENERGY STAR 计划的覆盖范围不包括大型水力发电机，但其在数据质量评价、产品能效分级、碳减排量计算等方面的技术方法，对制定产品碳足迹标准具有参考意义。

ENERGY STAR 计划要求申请企业提供经第三方验证的能效测试数据，并建立了一套完整的数据质量评价体系。该计划还开发了产品碳减排计算器，用于估算高效产品相对于基准产品的碳减排量。这些方法学工具为水力发电机碳足迹核算中的数据质量管理和减排效果评估提供了参考。

5.3.4 美国标准的总体特点与局限性

美国在大型旋转电机碳排放核算方面具有以下特点：一是缺乏联邦层面的统一立法，各州和行业组织各自为政，标准体系较为分散；二是现有标准主要聚焦于电机能效测试和方法学框架，尚未系统规定产品碳足迹核算方法；三是尚未发布专门针对水力发电机碳足迹的技术标准或行业指南。

这一局面的形成有多方面原因：首先，美国电机行业以中小型工业电动机为主，大型水力发电机制造企业数量有限，制定专门标准的紧迫性不足；其次，美国在联邦层面尚未建立统一的产品碳足迹标识制度，缺乏自上而下的政策驱动；再次，水力发电在美国能源结构中的占比相对较小（约 6%至 7%），政策关注度不及风电、光伏等快速发展的可再生能源。

因此，美国在变压器碳足迹标准制定方面的进展相对滞后于欧盟，可供直接借鉴的专门性技术文件较为有限。但在电机能效测试方法、数据质量管理、第三方验证等方面的技术积累，仍对制定本标准具有一定的参考价值。我国在制定水力发电机碳足迹标准的过程中，应

充分吸收美国在能效测试方法学方面的成熟经验，同时结合欧盟 PEF 体系的系统化框架，形成具有中国特色的技术方案。

5.4 对制定本标准的启示和参考

通过深入学习 ISO、欧盟等发达国家和地区的产品碳足迹相关标准和规范，对制定本标准具有如下启示和参考：

a）核算方法应在科学性和可操作性之间取得平衡。欧盟 PEF 体系在确保核算科学性的前提下，针对不同产品特点设置了灵活的边界处理方式（如允许运行损耗极小的产品选择“从摇篮到大门”边界）。水力发电机同样具有运行阶段碳排放极小的特点，本标准借鉴了这一思路，将系统边界设定为“从摇篮到大门”，避免了不必要的核算负担。

b）数据质量评价体系应系统化、可操作。 ISO 14067 和欧盟 PEF 体系均建立了系统化的数据质量评价体系（DQR），从时间代表性、地理代表性、技术代表性、数据来源可靠性等多个维度对数据进行评价。本标准在附录中设置了数据质量评价表，要求企业对使用的数据进行质量评分，提高了数据质量管理的规范性和透明度。

c）分配原则应统一规范，避免随意性。 国际标准对分配原则的规定较为原则性，缺乏针对具体产品类型的操作指南。本标准在参考国际标准原则的基础上，结合水力发电机生产实际，明确了电力消耗在多种产品间的分配方法、废钢回炉的减排效益计算方法、回收材料的分配系数取值方法等，提高了标准的可操作性。

d）本土化排放因子数据至关重要。国外数据库中反映的是国外的生产工艺和能源结构，直接引用会导致核算结果失真。本标准以附录形式提供了硅钢片、铜导线、结构钢材等关键材料的本土化排放因子参考值，鼓励企业优先使用实测数据，在无法获取实测数据时使用本标准推荐的参考值。同时，建议依托行业协会持续开展本土化排放因子的实测和更新工作。

6 主要技术内容及说明

6.1 标准名称与适用范围

标准名称为《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 水力发电机》，与 GB/T 24067-2024 的命名规则保持一致。本标准适用于水力发电机产品的碳足迹量化。

6.2 产品种类与描述

产品种类包括立式水轮发电机、卧式水轮发电机等。产品描述包括名称、型号、额定容量、额定电压、额定转速、冷却方式、绝缘等级、总重量等。

6.3 声明单位

产品碳足迹研究应明确规定功能单位或声明单位。功能单位或声明单位应与产品碳足迹研究的目的和范同保持一致。根据产品名称、产品种类的类型、产品状态、输出功率以及产品型号等进行描述，并明确系统边界。

6.3 系统边界

6.3.1 系统边界

本文件中界定的产品碳足迹核算的系统边界包括：原材料获取阶段和生产阶段。

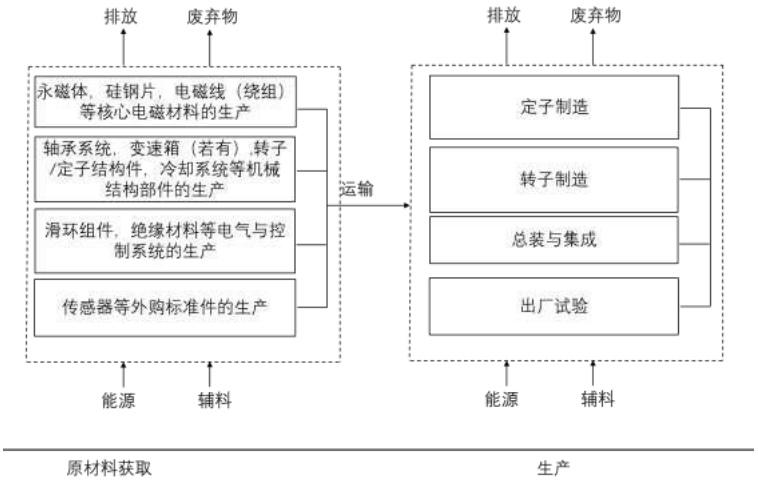


图 6.3.1 水力发电机生命周期系统边界示意图

1. 原材料获取阶段

产品原材料获取阶段的碳排放应包括以下内容：

a. 矿产的采集与提取；
b. 原料及其上游材料的生产
c. 能源生产；
d. 原料与能源运输。

2. 生产制造阶段

产品生产制造阶段的碳排放应包括以下内容：

a. 水力发电机生产
b. 检测和包装；
c. 燃料等能源燃烧消耗相关过程；
d. 产品及中间产品在生产过程中的运输；
e. 产品生产过程中产生的废弃物的运输和处理；
f. 道路与厂房的基础设施、各工序的设备、厂区内人员及生活设施的消耗和排放，均忽略。

6.4 清单分析

6.4.1 初级数据

初级数据包括每声明单位风力发电机所消耗的原料和能源等，应对数据的获得方式及来源予以说明，参照附录 A 中表 A.1 采集。

6.4.2 次级数据

在初级数据无法获取的情况下，可按照优先级顺序依次使用统计数据、文献数据、估算数据等次级数据，并注明数据来源，参照附录 A 中表 A.2 采集。

6.4.3 各阶段数据收集

在系统边界内开展各单元过程的数据收集，数据种类和数据类型应符合表 1 的要求，所有收集的数据的获得方式和来源均应予以说明并记录。

阶段	数据种类	数据类型
原材料获取阶段	1. 原料的消耗量；	应使用初级数据
	2. 实际供应链生产的原料碳足迹结果或	宜使用初级数据

	基础原材料及原料的温室气体排放因子	
	3. 原料到风力发电机产品生产工厂的运输量、运输距离、运输方式	应使用初级数据
	4. 不同运输方式的温室气体排放因子	可使用次级数据
生产制造阶段	1. 电力、柴油、天然气等能源的消耗量	应使用初级数据
	2. 将绿色电力证书或电力交易合同中的非化石能源使用量	应使用初级数据
	3. 非燃料燃烧的温室气体直接排放（如保护气体逸散等）	应使用初级数据
	4. 电力、柴油、天然气等能源的温室气体排放因子	可使用次级数据
	5. 污染物、固体废物的产生量、处置方式、运输距离、运输方式	应使用初级数据
	6. 污染物、固体废物处置的温室气体排放因子	可使用次级数据

6.4.4 数据分配

水力发电机生产阶段的数据应为现场数据，所收集的数据应具有代表性，宜采用近期一个自然年内的生产统计数据，不应不低于12个月。无法收集现场数据时，宜使用经第三方评审或认证的初级数据。无法获取现场数据和初级数据时，可以使用次级数据。

应优先采用经测量性核验的实测数据开展碳足迹因子测算，如无实测数据，可按照优先级顺序依次采用政府官方数据、行业经验值、文献值等开展碳足迹因子的测算，同时应注明所采用数据的来源。

产品碳足迹研究宜通过使用现有最高质量数据，尽可能地减少偏差和不确定性。数据质量的特征应包括定量和定性两个方面，相关特性描述宜涉及以下方面：

a. 时间覆盖范围：数据的年份和所收集数据的最小时间长度； 地理覆盖范围：
b. 为实现产品碳足迹研究目的，所收集的单元过程数据的地理位置；
c. 技术覆盖范围：具体的技术或技术组合；
d. 精度：对每个数据值的可变性的度量（例如方差）；
e. 完整性：测量或测算的流所占的比例；
f. 代表性：反映实际关注人群对数据集（即时间覆盖范围、地理覆盖范围和技术覆盖范围等）关注程度的真实情况进行稳定性评价；
g. 一致性：对研究方法学是否能在敏感性分析的不同组成部分中统一应用而进行的定性评价；
h. 可重现性：对其他独立从业人员采用同一方法学和数值信息重现相同研究结果的定性评价；
i. 数据来源；
j. 信息的不确定性。

数据质量评估应采用两步法：

——应根据上述 a）至 d）项的要求，对产品碳足迹研究的数据质量进行分析；

——应根据上述 e）至 j）项的要求，对数据进行评价。

开展产品碳足迹研究的组织宜建立数据管理系统，保留相关文件和记录，进行数据质量评价，

并持续提高数据质量。

6.4.5 取舍准则

产品碳足迹的舍弃准则一致。量化碳足迹时，应明确描述输入输出数据的取舍准则和假设，以及其对产品碳足迹量化结果的影响。选择取舍准则时可考虑物质量、能量和环境影响重要性等因素。在产品碳足迹量化过程中，可舍弃产品碳足迹影响小于 1%的生命周期阶段、过程、输入或输出等环节，但舍弃环节总的影响不应超过产品碳足迹总量的 5%。涉及保密需求的材料或环节，可以不披露具体信息。

6.4.6 数据审定

在数据收集过程中应对数据的有效性进行检查，以确认并提供证据证明数据质量要求符合规定。

数据审定可通过建立质量平衡、能量平衡和（或）排放因子的比较分析或其他适当的方法。由于每个单元过程都遵守物质和能量守恒定律，因此物质和能量的平衡能为单元过程描述的准确性提供有效的检查。

6.4.7 将数据关联到单元过程和声明单位

核算单一水力发电机产品的部分生命周期碳足迹，覆盖系统边界内各单元过程基准流的排放与清除。

6.4.8 分配原则

水力发电机进行碳足迹评价涉及分配时，应符合 GB/T 24044—2008 中 4.3.4 的要求。对包含多个产品的系统时，宜避免分配。若分配无法避免，应考虑以下方面：

a. 优先使用物理关系进行分配；
b. 若无法建立物理关系，应根据经济价值或其它关系进行分配，所有分配方式需提供所使用分配关系的依据及计算说明。

注：物理关系包括数量、质量、工时等。

针对不同情况下的具体分配方法如下：

c. 对产出多种产品（包括副产品）的同一单元过程（如同一生产线），应采用该单元过程或生产线的产品产量进行分配；
d. 对公共设施能源消耗产生的温室气体排放，在划分单元过程的时候应确保各单元过程输入能源和资源可以计量。如不可单独计量，则应根据该单元过程生产产品产量占全厂产品总产量的比例进行分配；
e. 对废水和废弃物处理过程（包括厂外处理）的温室气体排放，应根据该单元过程生产产品产量占全厂产品总产量的比例进行分配。

6.5 影响评价

6.5.1 碳足迹计算方法

变压器产品碳足迹（生命周期碳排放总量）按式（1）计算：

$$CFP_{GHG} = \sum_{j}\left[\sum_{i}\left(AD_i \times EF_{LCA,i,j}\right) \times GWP_j\right] \quad (1)$$

式中，CFP_{GHG}——系统边界内,各功能单位(声明单位)中第 i 种活动的 GHG 排放和清除相关数据(包括初级数据和次级数据),单位根居具体排放源确定;

AD_i——产品第 i 种材料的用量，单位为千克（kg）；

$EF_{LCA,i,j}$——第 i 种活动对应的温室气体 j 的排放系数,单位与 GHG 活动数据相匹配；；

GWP_j——温室气体 j 的 GWP 值,按照 6.5.1 中的规定进行取值。

6.5.2 特征化因子和 GWP 等参数的选取

特征化因子与 IPCC 保持一致。产品碳足迹研究默认选择 IPCC 给出的 GWP 100，选择 IPCC 提供的其他时间范围的 GWP 和 GTP 时应单独报告。GWP 参考值见附录B，若 IPCC 修订了 GWP，应使用最新数值，否则应在报告中说明。

6.6 结果解释

结果解释可包括以下内容：

a) 根据产品碳足迹的量化目的、范围和结果，确定重大问题；

b) 完整性、一致性、不确定性和敏感性分析，例如重要输入、输出和方法选择（取舍准则和

分配程序）进行敏感性分析；

c) 结论、局限性和建议的编制；

6.7 产品碳足迹报告

产品碳足迹报告应至少包含以下内容：

—— 产品制造单位与评价方信息；
—— 产品技术参数和功能描述；
—— 功能单位；
—— 系统边界；
—— 核算范围；
—— 生命周期清单分析；
—— 数据收集信息及说明；
—— 温室气体清单分析；
—— 数据取舍准则描述、数据分配等；
—— 产品碳足迹计算及结果分析；
—— 结论和不确定性说明；
—— 其他需要说明的情况。

6.8 产品碳足迹声明

如需声明时，应按照 GB/T 24067-2024 的规定开展产品碳足迹声明或信息交流，具有同样功能的产品之间可进行比较。

7 对实施本标准的建议

针对本标准的实施，提出如下建议：

a. 加强标准宣贯培训与本土化数据库建设。 本标准是国内首个专门针对水力发电机产品碳足迹量化的技术标准，建议标准发布后由归口单位组织面向水力发电机制造企业、电力用户、第三方核查机构等的宣贯培训活动，重点讲解系统边界设定、原材料碳排放因子选取、大型铸锻件碳排放核算等关键技术内容。同时，建议依托行业协会和科研机构，

持续开展硅钢片、铜导线、大型铸锻件等关键材料的本土化碳排放因子实测工作，建立完善的本土化排放因子数据库，并适时对本标准附录中的参考值进行修订更新。

b. 鼓励企业开展碳足迹试算与信息披露。 鼓励水力发电机制造企业按照本标准开展产品碳足迹试算，逐步积累不同单机容量、不同类型（立式、卧式、抽水蓄能）水力发电机产品的碳足迹数据，建立行业碳足迹基准线。鼓励企业在产品说明书、企业社会责任报告或绿色采购平台中披露产品碳足迹信息，引导水电开发企业优先采购低碳产品，形成市场驱动的降碳机制。

c. 适时开展标准实施效果评估与国际推广。 建议标准发布实施2至3年后，组织开展标准实施效果评估，收集企业在标准使用过程中遇到的问题和意见建议，评估标准的科学性、可操作性和适用性，为标准的修订完善提供依据。同时，建议在“一带一路”水电项目合作中推广应用本标准，提升我国在电工装备碳核算领域的国际话语权和影响力。

附 录 A
（资料性）
产品碳足迹量化数据收集表

A.1 初级数据收集表

初级数据收集表见表 A.1

表A.1 初级数据收集表

企业信息	企业名称							
	所在省份							
	企业地址							
	联系人				电话			
					邮箱			
	数据统计周期	年 月 日 至 年 月 日						
	生产线及规模说明							
产品信息（填写统计期内所有组件生产情况）	产品名称							
	规格型号	产品型号		重量		尺寸		
	产品示意图							
	产品工艺流程图							
类型	项目	消耗量	单位	总重量 kg	材料成分及比例	运输方式	运输距离 km	供应商所在地
资源消耗			个					
			个					
			个					

			kg					
	…		kg					
	水		t					
能源消耗	电		kWh	—				
	…							
温室气体排放	二氧化碳		t		—	—	—	—
	…				—	—	—	—
废弃物排放及处置	项目	数量	单位	总重量 kg	运输方式	运输距离 km		处置方式
	废弃包装		kg					
	…							
注：消耗的资源、能源以及温室气体排放等项目以厂家实际生产情况为准。								

A.2　次级数据收集表

次级数据收集表见表 A.2。

A.2　次级数据收集表

类型	项目	碳排放因子	数据来源	数据获取方式	时间代表性	地域代表性	技术代表性
	…						
	水						
能源	电						
	…						
运输	公路运输						
	铁路运输						
	…						

附 录 B
（资料性）
全球变暖潜势值参考值

部分 GHG 的 GWP 值见表 B.1。

表B. 1 初级数据收集表

气体名称	化学分子式	100 年的 GWP（截至出版时）
二氧化碳	CO_2	1
甲烷	CH_4	27.9
氧化亚氮	N_20	273
三氟化氮	NF_3	17400
六氟化硫	SF_6	25200
氢氟碳化(HFCs)		
HFC-23	CHF_3	14600
HFC-32	CH_2F_2	771
HFC-41	CH_3F	135
HFC-125	C_2HF_5	3740
HFC-134	CHF_2CHF_2	1260
HFC-134a	$C2H2F_4$	1530
HFC-143	CH_2FCHF_2	364
HFC-143a	CH_3CF_3	5810
HFC-152a	C_2H4F_2	164
HFC-227ea	C_3HF_7	3600
HFC-236fa	$C_3H_2F_6$	8690
全氟碳化物（PFC_s）		
全氟甲烷（四氟甲烷）	CF_4	7380
全氟乙烷（六氟乙烷）	C_2F_6	12400
全氟丙烷	C_3F_8	9290
全氟丁烷	C_4F_{10}	10000
全氟环丁烷	C_4F_8	10200
全氟戊烷	C_5F_{12}	9220
全氟己烷	C_6F_{14}	8620
注：部分 GHG 的 GWP 来源于 IPCC《气候变化报告 2021：自然科学基础 第一工作组对 IPCC 第六次评估报告的贡献》		