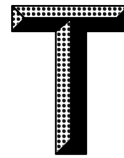


ICS 29.020
CCS K 04



团 体 标 准

T/CI 1034—2025

铁塔类架空输电线路杆塔生命周期 评价方法

Life cycle assessment specification for weathering steel pole towers for
overhead transmission lines

2025-06-09 发布

2025-06-09 实施

中国国际科技促进会 发布
中国标准出版社 出版

目 次

前言	Ⅲ
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 基本要求	2
5 评价指标	3
6 全生命周期评价方法	6
7 评价结果	11
8 报告编制	12
附录 A(资料性) 杆塔生命周期各阶段数据采集表	13
附录 B(规范性) 铁塔碳足迹计算方法	15
附录 C(规范性) 杆塔全生命周期评价报告模板	16
参考文献	18

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。

本文件由中国国际科技促进会提出并归口。

本文件起草单位：青岛汇金通电力设备股份有限公司、重庆广仁能源装备股份有限公司、中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科研院、成都市东方电力线路构件厂、四川广安鑫光电力铁塔有限公司、江苏江电电力设备有限公司、广西华电智能装备有限公司、青岛正为能源科技有限公司、山东建兴铁塔制造有限公司、山东鼎昌铁塔制造有限公司、山东百顺铁塔制造有限公司、温州泰昌铁塔制造有限公司、青岛鼎兴钢结构工程有限公司、重庆江电电力设备有限公司、青岛科华钢结构有限公司、青岛繁昌电力设备厂有限公司、哈尔滨市中北铁塔制造有限公司、沧能电力装备股份有限公司、青岛鲁泰电力科技有限公司、青岛信和钢结构有限公司、潍坊世纪晨光电力科技有限公司、河北拓发通信电力器材制造有限公司、江苏生源电力器材制造有限公司、青岛德春钢结构有限公司、营口庆源铁塔有限公司、河北扩疆铁塔制造有限公司、广东禅涛钢结构有限公司、唐山宝芬铁塔制造有限公司、四川翔越电力线路构件有限公司、江苏鸿光杆塔有限公司、山东华安铁塔有限公司、山东共达电力设备有限公司、中国能源建设集团鞍山铁塔有限公司、建平胜达实业有限公司、浙江德宝通讯科技股份有限公司、江苏中大杆塔科技发展有限公司、吴江市金康电力器材有限公司、中国能源建设集团宝鸡铁塔制造有限公司、赤峰广圆电力铁塔制造有限公司、广东新会罗坑电力线路器材有限公司、青岛星跃铁塔有限公司、山东华辉通信科技有限公司、河北畅盛科技工程有限公司、广东禅运钢构有限公司、青岛鼎盛源钢结构有限公司、河北辰泰钢结构有限公司、青岛强力钢结构有限公司、青岛中万方能源科技有限公司、广东顺峰电力科技有限公司、山西华泰升电力杆塔股份有限公司、河北省景县宏远通讯有限公司、青岛载利电力设备有限公司、衡水永恒通讯设备有限公司、河北冀鑫通讯设备有限公司、青岛鹏程高科重工有限公司、青岛宏诚钢结构工程股份有限公司、江苏大盛铁塔制造有限公司、山东鲁能泰山铁塔有限公司、广东省电力线路器材厂有限公司、青岛海汇铁塔机械有限公司、青岛帅一钢结构有限公司、成都凌风铁塔制造有限公司、德州广鑫铁塔制造有限公司、衡水鑫胜铁塔有限公司、吉林省弘宇电力设备有限公司、巢湖市鼎力铁塔有限公司、衡水广厦铁塔制造有限公司、山东广利铁塔有限公司、山东坤德钢结构有限公司、衡水捷联钢结构有限公司、天津津通铁塔股份有限公司、河南奥诚电力设备有限公司、天津市芳华通讯工程有限公司、镇江鸿泽杆塔有限公司、青岛华玺能源科技有限公司、山东宏昌铁塔有限公司、青岛德振重工集团有限公司、洛阳龙羽杆塔制造有限公司、内蒙古恒鑫铁塔有限责任公司、内蒙古卓群钢业有限公司、青岛海能电力设备有限公司、山西鼎正电力科技股份有限公司、青岛双源钢结构有限公司、漯河市永安线路器材有限公司。

本文件主要起草人：董萍、洪敏、秦浩东、陈杰、龙辉、金志健、张巨锋、李志强、陈呈龙、靳佰然、张同、张鹏飞、徐山云、刘杰、尹宝平、孙长升、许成鹏、李景春、万宗平、苏立成、李夕军、纪学飞、姜志超、孙健、肖波、黄蕾、陈桂周、朱宝芬、舒越、唐建康、丁亮、丛炳森、于雷、沈浩谦、张平、李军、钱斌、李利中、兰智琨、秦世坤、马凡波、李宇、杨万胜、陈振东、孙长建、王玉峰、刘毅、王仲梅、郑汉生、柳廷龙、范洪章、陈思鑫、冯连臣、孙庆铎、郑小娟、刘满才、马卫东、李金杰、赵宏锴、潘伟东、刘帅、邹元林、丁冬、陈文利、肖娟、姚勋孙、梁立友、张广利、于世宝、刁艳琛、李力、姜耀华、刘风云、刘宗坤、李淑堂、李禹宗、张德振、刘江涛、李冰、武斌、陈聚河、傅子俊、赵明胜、张煜阳、史晓丽、洪伟、缪飞、杨海涛、陈钦烨、常思维、徐德录、邹成尧、朱方、李伟、尹卫志、苗新勇、新巴亚尔、林特恩、冷建鹏、孙东兴、杨宇健、高元。

铁塔类架空输电线路杆塔生命周期 评价方法

1 范围

本文件规定了铁塔类架空输电线路杆塔全生命周期评价的基本要求、评价方法、评价结果和报告编制要求。

本文件适用于不同电压等级的角钢塔与钢管塔的全生命周期评价,复合横担等其他型式杆塔参照执行。

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 2694 输电线路铁塔制造技术条件
- GB/T 3098.1 紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱
- GB 17167 用能单位能源计量器配备和管理通则
- GB/T 19001 质量管理体系 要求
- GB/T 23331 能源管理体系 要求及使用指南
- GB/T 23384 产品及零部件可回收利用标识
- GB/T 24001 环境管理体系 要求及使用指南
- GB/T 24044 环境管理 生命周期评价 要求与指南
- GB/T 24256 产品生态设计通则
- GB/T 36130 铁塔结构用热轧钢板和钢带
- GB/T 45001 职业健康安全管理体系 要求及使用指南
- GB/T 50011 建筑抗震设计标准
- GB/T 50297 电力工程基本术语标准
- GB/T 50545 100 kV~750 kV 架空输电线路设计规范
- DL/T 741 架空输电线路运行规程
- DL/T 1632 输电线路钢管塔用法兰技术要求
- DL/T 5154 架空送电线路杆塔结构设计技术规定
- DL/T 5219 架空输电线路基础设计规程
- DL/T 5430 架空输电线路大跨越工程设计技术规程
- DL/T 5458 架空输电线路大跨越工程抗震设计规程
- DL/T 5486 架空输电线路杆塔结构设计技术规程
- DL/T 5549 输电工程(架空线路)技术经济指标编制导则

3 术语和定义

GB/T 50297界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

架空输电线路 **overhead transmission line**

架设于地面上,利用绝缘子和空气绝缘的电力线路。

3.2

杆塔全生命周期 **entire life cycle of tower**

杆塔从原材料获取、设计、生产、运输、安装、运行使用、维护、直至废弃或回收再循环的整个过程。

3.3

角钢塔 **angle steel tower**

利用角钢钢材为原材料建成的用来架设高压输电线路的塔状钢构架。

3.4

钢管塔 **steel pipe tower**

利用钢管、型钢为原材料建成的用来架设高压输电线路的塔状钢构架。

3.5

环境影响 **environmental effect**

产品在其生命周期的各个阶段对环境造成的负面效应。

注:通常包括资源消耗、污染排放、生态破坏等。

3.6

碳足迹 **carbon footprint**

架空输电线路铁塔在全生命周期过程中引起的温室气体排放的集合。

3.7

水足迹 **water footprint**

架空输电线路铁塔在全生命周期过程中引起的水资源消耗。

3.8

极端工况 **extreme operating conditions**

架空输电线路铁塔在超出正常运行范围的极限条件下工作的情况,例如极高或极低的温度、压力、湿度、负荷,以及强振动、高海拔、腐蚀性环境等。

4 基本要求

4.1 生产企业

生产企业应满足以下要求。

- a) 生产企业的污染物排放应持续符合国家或地方污染物排放标准的最新要求,污染物总量控制应紧密契合国家和地方污染物排放总量控制指标的动态调整。严格遵循节能环保相关国家标准,并定期开展内部审核与外部评估,确保近三年无重大质量、安全和环境事故发生,同时建立完善的事后应急响应与回溯机制。
- b) 生产企业应按照GB/T 19001、GB/T 45001、GB/T 23331、GB/T 24001的要求建立、实施、保持并持续改进质量管理、职业健康安全、能源管理、环境管理等体系,并将绿色设计过程引入管理体系。

- c) 生产企业应采用清洁生产的技术、工艺和装备,不得使用国家或有关部门发布的淘汰或禁止的技术、工艺和装备。
- d) 生产企业应开展绿色供应链管理,将绿色环保相关的法律法规要求和客户要求引入供应商管理的过程中,并向产品主要原材料供应方、生产协作方、相关服务方等提出有关质量、环境、能源和安全等方面的管理要求。
- e) 生产企业应按照 GB 17167 的要求配备能源计量器具,根据环保法律法规和标准要求配备污染物检测和在线监控设备。
- f) 固体废弃物应有专门的贮存场所,避免扬散、流失和渗漏,减少固体废弃物的产生量和危害性,充分合理利用和无害化处置固体废弃物。

4.2 产品要求

产品应满足以下要求:

- a) 产品的绿色设计应符合 GB/T 24256 和 DL/T 5486、DL/T 5154、DL/T 5219、DL/T 5549 的有关要求,可从产品原料选择、产品节能设计、有害物质减量或替代、清洁生产工艺和技术、包装及运输、资源化循环利用、无害化处置等方面,综合考虑资源节约与综合利用、能源节约 and 环境保护等方面的要求,开展产品绿色设计,形成产品绿色设计方案;
- b) 产品的生产应符合 GB/T 2694、GB/T 23384、GB/T 36130、DL/T 1632、GB/T 3098.1 有关要求;
- c) 产品应符合 DL/T 5486、DL/T 5154、DL/T 5219 的有关要求,具备足够的强度、刚度和稳定性,满足电气绝缘和耐腐蚀性能要求。

5 评价指标

5.1 环境指标

5.1.1 能源消耗方面要求包括:

- a) 原材料获取阶段:记录生产杆塔所需的材料在生产和加工过程中的能源消耗,包括电力、燃油和煤气等;
- b) 生产与制造阶段:统计杆塔生产与制造过程中的设备能耗、加工能耗等,如铁塔加工时切割、焊接设备的耗电量;
- c) 运输阶段:计算运输杆塔及其原材料所使用的交通工具的能源消耗,如卡车运输的燃油消耗、火车运输的电力消耗,以吨公里能耗衡量;
- d) 施工阶段:考虑现场基础施工所需的原材料与施工等能源消耗;
- e) 安装阶段:考虑现场安装杆塔时使用的起重设备、运输车辆等能源消耗,如吊车的燃油或电力消耗;
- f) 运行维护阶段:包括对杆塔进行巡检、维修、更换部件等工作过程中的能源消耗,如巡检车辆的燃油消耗、维修设备的电力消耗;
- g) 退役阶段:核算杆塔退役拆除和运输过程中的能源消耗,如拆除设备的动力消耗、运输车辆的燃油消耗。

5.1.2 环境影响方面要求如下。

- a) 大气污染物:在生产制造阶段,酸洗产生的酸雾、镀锌产生的锌烟、焊接烟尘、金属粉尘(如钢材切割产生的粉尘等)等;记录生产过程中产生挥发性有机物(VOCs)、氮氧化物(NO_x)和二氧化硫(SO₂)等有害气体排放。在运输和安装阶段,考虑车辆和施工机械尾气排放中的污染物。
- b) 水体污染物:在生产制造过程中产生的危废,如酸洗废酸、废水处理物,金属表面处理废水(含重

金属离子)等的化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)、重金属含量和基础施工过程中产生的废水等。在运行维护阶段,考虑清洗杆塔或设备产生的废水排放。

- c) 固体废弃物:统计生产制造过程中的边角料、废焊渣、废弃包装材料等固体废弃物产生量。办公厂区产生的设备更换废弃物。在运行维护阶段,记录更换下来的零部件、锈蚀的钢构件等废弃物。在退役阶段,考虑整个杆塔拆除后的废弃物处置,包括可回收部分和不可回收部分。

5.1.3 土地资源占用和生态影响方面要求包括:

- a) 生产制造厂房土地占用:生产制造企业建设的办公及厂房对土地占用和土地利用类型(如农田、林地、草地等)的改变;
- b) 杆塔土地占用:测量杆塔基础占地、线路走廊宽度等占用的土地面积,评估对土地利用类型的改变;
- c) 水源污染:详细评估杆塔的选址及建设过程中对周边地表水、地下水水源地的水质、水量及生态功能的影响情况,包括但不限于施工期废水排放、运行期化学物质泄漏风险对水源地的潜在威胁,并提出相应的预防与缓解措施;
- d) 植被破坏和恢复:记录杆塔建设过程中对植被的砍伐、践踏等破坏情况,以及后期绿化恢复措施的实施情况和效果;
- e) 野生动物栖息地影响:考虑架空输电线路杆塔对鸟类、哺乳动物等野生动物栖息地的分割、干扰,以及对动物迁徙通道的影响。

5.2 经济指标

5.2.1 初始投资成本

应综合考虑不同杆塔类型(如角钢塔、钢管塔等)和基础形式的成本差异,根据线路的电压等级、荷载条件、地质地形等因素,选择性价比高的杆塔及基础组合,以控制初始投资成本。具体评价指标如下。

- a) 计算购买杆塔原材料的费用,包括运输到工厂的成本。
- b) 制造费用应涵盖杆塔制造过程中的加工费、设备折旧费、劳务成本和办公成本等。
- c) 运输和安装成本应包括将杆塔运输到施工现场的运输费、装卸费和人工费等。
- d) 劳务费包括:现场踏勘、地形测绘、障碍物评估等环节的人工费用。铁塔结构计算、导线选型、绝缘子配置等工作的设计人工工时费用。邀请电力设计院专家进行可研报告、设计评审、技术方案论证费用等。

5.2.2 运行维护成本

5.2.2.1 应制定科学合理的运行维护计划,明确维护的周期、内容和方法,并据此编制相应的成本预算。

5.2.2.2 维护计划应根据杆塔的材质、使用环境、运行年限等因素进行动态调整,确保维护工作的及时性和有效性,同时避免过度维护造成成本浪费。

5.2.2.3 应采用先进的巡检技术和设备,如无人机巡检、在线监测系统,提高巡检效率和准确性,降低人工巡检成本。

5.2.2.4 应建立完善的故障预警和应急处理机制,及时发现和处理杆塔故障和隐患,降低故障维修成本。

5.2.2.5 对于常见的故障类型,应储备必要的维修材料和零部件,缩短维修时间,减少停电损失。

5.2.2.6 具体评价指标如下:

- a) 统计定期巡检杆塔的车辆费用、劳务成本、检测设备折旧等;
- b) 记录维修杆塔产生的刷漆修复等维护费、损坏部件的更换和人工费用等;
- c) 考虑因杆塔故障导致的停电损失,包括电量损失的经济价值、对用户的赔偿费用等。

5.2.3 废弃成本

5.2.3.1 在杆塔退役时,应提前制定拆除方案,并对不同拆除方式(如机械拆除、爆破拆除等)的成本进行评估和比较,选择成本低、安全性高、对环境影响小的拆除方案。

5.2.3.2 对可回收材料应进行合理分类和回收处理,提高材料的回收价值,以抵消部分退役处置成本。

5.2.3.3 应建立规范的回收渠道和管理制度,确保回收工作的顺利进行。

5.2.3.4 具体评价指标如下:

- a) 计算拆除杆塔的机械费和人工费等;
- b) 计算退役杆塔固体废弃物回收处理费用;
- c) 核算拆除杆塔后对场地进行平整、绿化等恢复工作的费用。

5.2.4 全生命周期成本

5.2.4.1 应构建全生命周期成本核算模型,充分考虑初始投资成本、运行维护成本、故障损失成本、退役处置成本等各项经济指标,并结合市场价格波动、政策变化等动态因素对模型进行优化。通过模型计算,精准得出不同方案或不同阶段的成本数据,并进行不确定性分析,为决策提供科学且稳健的依据。

5.2.4.2 借助全生命周期成本分析,对不同的杆塔设计方案、材料选型、建设和运行维护策略等进行比选和优化,以确定经济合理的方案,实现全生命周期成本的最小化。

5.2.4.3 具体评价指标如下:

- a) 核算初始投资成本总和;
- b) 核算运行维护成本总和;
- c) 核算废弃成本总和。

5.3 技术性能指标

5.3.1 技术性能指标包括:结构可靠性、电气性能、基础稳定性、构件连接可靠性、防风抗震性能。

5.3.2 结构可靠性应满足:

- a) 50 m 及以下高度的角钢塔倾斜度应 $\leq 0.5\%$,50 m 以上高度的角钢塔倾斜度应 $\leq 1.0\%$;
- b) 钢管塔倾斜度应 $\leq 0.5\%$;
- c) 铁塔主材相邻结点间弯曲度不应超过 0.2% ,特高压钢管塔不应超过 0.1% ;
- d) 安全性:杆塔应能承受各种机械荷载的作用,通过力学分析和测试试验,评估杆塔在正常运行、极端工况、安装工况、断线工况等的承载能力,确保其不会发生过度变形或破坏;
- e) 使用性:考虑杆塔材料的腐蚀在长期使用过程中的耐久性,通过实验室加速腐蚀试验或现场实际监测数据,预测杆塔的使用寿命;
- f) 可靠性:分析杆塔的抗倾覆、抗滑移能力,特别是在不均匀沉降(如基础地质条件差异)、侧向力(如大风)作用下的稳定性。

5.3.3 电气性能应满足:

- a) 绝缘性能:评估杆塔绝缘子的绝缘电阻、闪络电压等性能,确保在不同环境条件(如潮湿、污染等)下能够有效防止电气击穿,保证输电线路的安全运行;
- b) 相分裂导线同相子导线相对弧垂值应符合 DL/T 741 的相关要求,不应超过以下值:垂直排列双分裂导线 100 mm,其他排列形式分裂导线 220 kV 为 80 mm,交流 330 kV 及以上、直流 ± 400 kV 及以上线路 50 mm。
- c) 接地性能:杆塔的接地装置应具有良好的导电性,接地电阻应符合设计要求,确保在雷击或其他电气故障时能够迅速将电流引入大地,保护杆塔和输电线路的安全。
- d) 盘形绝缘子绝缘电阻,330 kV 及以下线路不应小于 300 M Ω ,交流 500 kV 及以上、直流 ± 400 kV

及以上线路绝缘子不应小于500 MΩ。

5.3.4 基础稳定性应满足以下要求。

- a) 失稳:杆塔基础应具有足够的承载力(例如±800 kV 特高压线路的转角塔基础,单桩竖向承载力特征值 $R_a=5\ 000\ \text{kN}$,桩径1.2 m,桩长30 m),能够承受杆塔传递的各种荷载,防止基础发生下沉、倾斜、滑移等失稳破坏现象,确保杆塔的稳定。正常工况下杆塔基础的边坡稳定系数 K 应 ≥ 1.5 ,特殊工况下边坡稳定系数 K 应 ≥ 1.3 。
- b) 变形:基础的沉降量应满足设计要求。
- c) 防腐:对于处于腐蚀性土壤环境中的杆塔基础,应采取相应的防腐措施。

5.3.5 构件连接可靠性应满足:

- a) 杆塔构件采用螺栓连接时,螺栓的材质、规格和拧紧力矩等应符合DL/T 5486相关标准的规定,确保螺栓连接的强度和可靠性,防止螺栓松动、脱落等问题的发生;
- b) 杆塔构件采用焊接连接时,焊接质量应符合DL/T 5486相关标准的规定,焊缝应饱满、无气孔、无夹渣、无裂纹等缺陷,保证焊接接头的强度和韧性不低于母材的性能。

5.3.6 防风、抗震性应满足:

- a) 在沿海、峡谷、山口、河谷等强风区,杆塔结构设计和基础设计应符合GB 50545、DL/T 5430、DL/T 5154等标准关于防风设计的要求。
- b) 在地震动峰值加速度(PGA) $\geq 0.1\ \text{g}$ 的区域,杆塔结构设计和基础设计应符合GB 50011、DL/T 5458、DL/T 5219等标准关于抗震设计规范的要求。

6 全生命周期评价方法

6.1 评价流程

铁塔类架空输电线路杆塔生命周期评价的基本流程包括:目的和范围的定义、数据收集、生命周期清单分析、生命周期影响评价、全生命周期经济性和技术性能可靠性等,具体见图1。

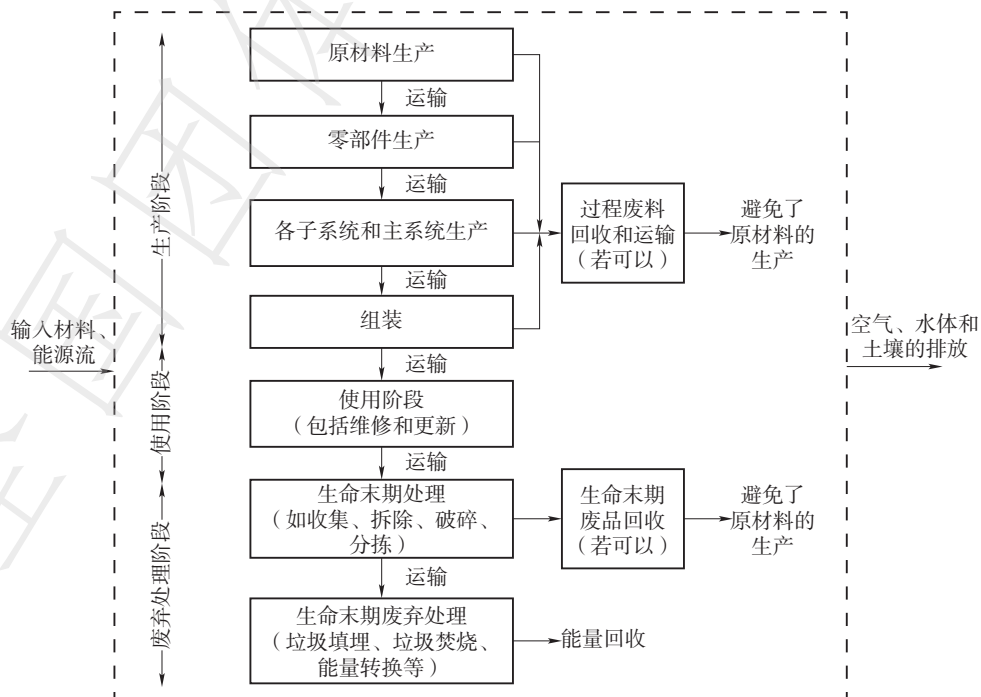


图1 架空输电线路杆塔生命周期评价流程图

6.2 评价目的

架空输电线路杆塔生命周期评价研究应明确陈述评价的意图和理由,例如比较不同杆塔设计的环境影响、经济性和技术性能,评估特定杆塔的可持续性,为采购决策、设计、运维、回收、环境影响提供依据等。

6.3 评价范围

6.3.1 功能单位

评价对象为1基铁塔。

6.3.2 评价环节

包括但不限于如下环节:

- a) 原材料的采购、加工;
- b) 产品设计、生产;
- c) 辅料生产;
- d) 能源生产(如天然气、电力);
- e) 原料、能源的运输;
- f) 产品生产运作过程中的能源和物质消耗;
- g) 产品运输、销售流通的能源和物质消耗;
- h) 包装材料的回收、拆解、循环利用和处置。

6.4 数据收集

6.4.1 基本要求

6.4.1.1 数据收集应符合以下要求:

- a) 数据应优先取自行业权威数据库、厂商实测数据、实地精准测量数据,确保原始数据真实可追溯;
- b) 缺乏直接数据时,应采用经严格筛选的专家评估意见或高影响力文献数据,并注明数据来源及筛选依据;
- c) 重要环节的影响因素应采用具体测量数据,确保高精度;
- d) 其他环节使用估算或平均数据时,应详细说明数据来源、估算方法及适用范围,避免模糊表述;
- e) 建立数据定期更新与校验机制,结合技术发展和实际工况变化,确保数据时效性与适用性。

6.4.1.2 具体数据项及采集频率参考附录A。

6.4.2 原材料获取

收集杆塔各类原材料种类、规格、用量,获取对应原材料生产过程的能耗数据(单位: MJ/kg)、水资源消耗(单位: m³/kg)、主要污染物排放因子[如颗粒物单位: kg/kg, SO₂、NO_x等单位: L/kg(单位不统一)],应采用企业实测数据。

6.4.3 加工制造

统计加工过程中的能源使用情况,记录废弃、废液、废渣的排放情况,确定设备的折旧、维护成本。在

杆塔生产车间,为关键设备(切割机、焊接机、折弯机、冲压机等)安装电表、气表,精准收集设备运行时长及能耗,结合设备功率、产气效率,计算单位重量杆塔部件加工电耗($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 部件)、气耗(m^3/t 部件)。

6.4.4 运输

6.4.4.1 明确运输方式及里程,查询对应运输工具单位里程能耗,如货车每吨公里油耗 $\text{L}/(\text{t}\cdot\text{km})$ 、单位重量货物铁路运输电耗($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}\cdot\text{km}$)、单位重量杆塔水路运输油耗($\text{L}/\text{t}\cdot\text{km}$),结合运输货物重量估算运输阶段排放,考虑装卸作业额外能耗与物料损耗。

6.4.4.2 定期采用专业设备对运输车辆尾气进行全面检测,获取 CO 、 NO_x 、颗粒物、挥发性有机物(VOCs)等污染物排放浓度(mg/m^3)及排放因子(g/L),结合油耗精确算出单位运输量排放总量($\text{kg}/\text{t}\cdot\text{km}$),并考虑不同车型、路况及运输季节对排放的影响,建立动态排放核算模型。

6.4.5 安装

6.4.5.1 详细记录基础类型(板式、灌注桩、掏挖等)及尺寸,依设计图纸与施工方案精准计算混凝土、钢筋用量($\text{kg}/\text{基}$,含合理损耗,混凝土损耗 $3\%\sim 8\%$,钢筋 $2\%\sim 5\%$),统计基础开挖土方量($\text{m}^3/\text{基}$)。

记录基础施工机械设备型号、数量及运行时间,安装设备用电、用油监测表,精确测算单位基础施工能耗。

6.4.5.2 基础施工(挖掘机、搅拌机)、吊装(起重机、塔吊)、焊接/紧固(电焊机、液压设备)等机械的燃油或电力消耗(如25t汽车吊每小时油耗约15L~25L,电焊机每小时用电约10 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ~20 $\text{kW}\cdot\text{h}$)。记录吊车、抱杆等组立设备参数及作业时长,统计组立辅助材料用量($\text{kg}/\text{基}$)及费用。

6.4.5.3 监测施工场地扬尘、噪声强度及持续时间,统计建筑垃圾种类与处置量,含土方开挖、混凝土余料等。

6.4.6 运行维护

6.4.6.1 统计定期巡检车辆里程与能耗,详细记录杆塔维修项目信息,如部件更换(钢材补焊重量,防腐漆涂刷面积等, kg 、 m^2 等单位)、结构加固(角钢、槽钢用量及规格, kg/m)、设备维护改造(智能监测装置数量及能耗参数, $\text{W}/\text{台}$)。

6.4.6.2 统计维修材料消耗(焊条、焊丝、油漆、新部件等)及采购成本,核算维修设备(电焊机、切割机、喷涂机等)运行能耗,大型维修额外记录临时设施(施工脚手架、吊装设备等)搭建与拆除材料用量及能耗。核算因停电检修造成的电量损失折合能耗,考虑维护频次年度波动因素。

6.4.7 废弃、处置

6.4.7.1 记录杆塔拆除方法,统计拆除设备能耗,结合拆除难度分析能耗合理性,优化拆除流程。若爆破拆除,应额外监测爆破震动、飞石、粉尘等环境影响参数。

6.4.7.2 精准核算杆塔材料回收量,如钢材回收重量(kg ,回收率 $80\%\sim 90\%$)及纯度,混凝土破碎后再生骨料产量(m^3),记录回收企业及运输物流信息。

6.4.7.3 统计不可回收废弃物填埋体积(m^3)及填埋场选址、容量、服务年限等信息,核算填埋作业能耗及渗滤液产生量($\text{m}^3/\text{年}$,每立方米废弃物年产生渗滤液 $0.1\text{m}^3\sim 0.3\text{m}^3$),监测渗滤液水质达标处理后排放,焚烧处置时记录废弃物热值及焚烧炉热效率,计算燃料补充量或发电潜力,监测焚烧尾气。

6.4.8 数据质量要求

收集的数据应符合以下要求。

- a) 准确性:数据应真实反映杆塔各生命周期阶段实际状况,实测数据误差控制在 $\pm 10\%$ 以内,引用数据需验证来源可靠性及适用性,确保与本地工程条件相符度不低于 80% ;数据误差主要源

于数据源可靠性不足、采集过程不规范、试验方法不精确及处理方法简单。

- b) 完整性:清单涵盖所有与评价目标相关物质流、能量流输入输出数据,缺失数据比例不超过10%,对关键缺失项采用合理估算方法并标注不确定性程度。
- c) 一致性:整个评价过程数据收集、计算方法、核算口径保持统一,不同阶段同类指标(如能耗换算)遵循相同标准规范,时间跨度采用年度数据,若工艺升级则单独说明调整依据。

6.5 清单分析计算

6.5.1 基于收集的数据,运用物料衡算与能量衡算原理,构建各阶段输入输出平衡方程。例如生产阶段:产品重量=原材料投入量-废料量,能源消耗总量=设备运行电力能耗+工艺加热燃料能耗。

6.5.2 按功能单位归一集计各项数据,换算为每基杆塔指标值,统一单位后形成标准化清单数据表,见表1,清晰展示各流程资源、能源流向及环境排放详情。

表1 架空输电线路杆塔生产阶段物料与能量衡算及清单数据表

衡算类别	项目明细	单位	铁塔生产数据示例	备注
物料衡算	原材料投入量(钢材)	kg	5 000	包含各类钢材规格总和,如角钢、钢板等用量
	废料量(边角余料、不合格钢材等)	kg	300	生产过程产生的可称重废弃物
	产品重量(成型铁塔)	kg	4 700	最终合格产品重量
能量衡算	设备运行电力能耗	MJ	1 500	包含切割、焊接、冲压等设备用电
	工艺加热燃料能耗(天然气)	MJ	800	若有热镀锌等加热工艺消耗
	能源消耗总量	MJ	2 300	电力与燃料能耗之和
按功能单位归一集计 (每基铁塔)	单位铁塔原材料投入量	kg/基	5 000	基于此例单基铁塔生产数据
	单位铁塔废料产生量	kg/基	300	
	单位铁塔能源消耗	MJ/基	2 300	
环境排放相关 (生产阶段)	废气排放量(颗粒物)	kg	15	焊接、打磨等工序产生
	废气排放量(SO ₂)	kg	2	燃料燃烧排放
	废水排放量(含锌废水等)	m ³	1.2	镀锌工艺排水
	废渣产生量(锌渣等)	kg	50	
按功能单位归一集计 (每基铁塔)	单位铁塔颗粒物排放	kg/基	15	
	单位铁塔SO ₂ 排放	kg/基	2	
	单位铁塔含锌废水排放	m ³ /基	1.2	
	单位铁塔锌渣产生量	kg/基	50	

6.6 生命周期影响评价

6.6.1 根据架空输电线路杆塔系统的特点,选定涵盖资源耗竭、全球变暖、酸化、富营养化、光化学烟雾、人体健康损害等关键环境影响类别。各影响类别对应特征化指标及计算方法见表2。

表2 架空输电线路杆塔生命周期影响类别特征化指标及计算方法

环境影响类别	特征化指标	计算方式说明
资源耗竭	标准化的稀缺度指标	以铁、铝、硅等关键原材料为例,计算方式为基于地质储量与年开采量比值衡量,即:稀缺度指标=地质储量÷年开采量,旨在反映资源的可持续利用程度,比值越小,资源耗竭风险越高
全球变暖	CO ₂ 当量(kg CO ₂ eq)	采用IPCC推荐的全球变暖潜能值(GWP),针对CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O等温室气体排放,计算方式为:某温室气体CO ₂ 当量=该温室气体排放量×其对应的100年时间跨度的GWP值,将各类温室气体排放统一换算为以CO ₂ 为基准的当量值,用于综合评估全球变暖影响
酸化	SO ₂ 当量(kg SO ₂ eq)	依据酸性气体(SO ₂ 、NO _x 、HCl等)排放生成酸性沉降物潜力,利用酸沉降当量系数进行转化,计算公式为:酸化指标(SO ₂ 当量=∑(某种酸性气体排放量×其对应的酸沉降当量系数)),以此将多种酸性气体排放统一量化为SO ₂ 当量,直观表征酸化程度
富营养化	磷当量(kg P eq)	核算氮、磷等营养元素排放引发水体富营养化风险,综合考虑氮磷元素对富营养化的贡献,通过特定换算关系将氮及其他相关元素折算为磷当量,计算式大致为:磷当量=磷排放量+∑(氮或其他营养元素排放量×对应的折算系数),用于整体评价土壤及水体富营养化负荷
光化学烟雾	臭氧生成潜能(kg O ₃ eq)	针对挥发性有机物(VOCs)、氮氧化物等光化学反应前驱物排放,基于最大增量反应活性(MIR)来计算,公式为:臭氧生成潜能=∑(某种光化学反应前驱物排放量×其对应的MIR值),以此量化臭氧生成潜力,衡量光化学烟雾形成风险
人体健康损害	伤残调整生命年(DALY)	结合有毒有害物质(如重金属、多环芳烃)排放剂量、暴露途径及毒性系数,通过复杂模型计算,综合考量致癌、致畸、呼吸道疾病等发病风险增加程度,涉及多环节数据整合与分析,如先依据排放剂量估算人体摄入量,再结合暴露途径及毒性系数换算为致病概率,最终转化为DALY值,直观反映对人体健康损害程度

6.6.2 碳足迹,计算并评估从原材料获取、生产制造、运输、使用及废弃阶段的温室气体排放。以“CO₂e(等效二氧化碳)”为单位,按附录B要求量化每个阶段的碳排放。

6.6.3 能源消耗,评估每个阶段的能源使用情况,包括电力、燃料等。可用MJ或kW·h作为单位。

6.6.4 水足迹,量化生产过程中使用的水资源,包括冷却水、清洗水等。

6.6.5 废弃物与资源利用,评估生命周期中的废弃物量及其处理方式,如填埋、回收、再利用等。采用吨(t)或千克(kg)作为单位。

6.6.6 生态影响,通过生态毒性、土地使用等指标,评估杆塔制造、运输、使用等环节对生态环境的影响。

6.7 特征化模型

6.7.1 明确清单物质排放量:通过清单分析全面梳理杆塔生命周期各环节(如原材料获取、生产、运输、使用、废弃处理等),确定每种物质的排放量 Q_i 。

6.7.2 获取特征化因子:依据所选的生命周期影响评价模型,查找第*i*种物质对应第*j*种影响类别(如全球变暖、酸化等)的特征化因子 CF_{ij} 。

6.7.3 计算影响类别指标值:对每类影响*j*,将清单中各物质的 Q_i 与对应的 CF_{ij} 相乘,再对所有物质的乘积求和。计算见公式(1):

$$I_j = \sum_i Q_i \times CF_{ij} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

I_j ——取值为实数,由 Q_i 与 CF_{ij} 的综合计算结果决定,反映杆塔在第*j*种影响类别下的总体影响

程度；

Q_i ——清单中第 i 种物质排放量取值为非负实数,即 $Q_i > 0$,具体数值由实际清单分析确定,反映物质排放的实际量；

CF_{ij} ——取值为实数,可正可负。正值表示物质对该影响类别有正向贡献,负值表示负向贡献,数值由物质种类、影响类别及评价模型决定。

6.7.4 计算结果应赋予单位并明确统计意义,例如全球变暖指标值单位为“kg CO₂eq/功能单位”,直观反映杆塔项目相对贡献程度。

6.8 归一化与加权

6.8.1 归一化处理:对第一步得到的各影响类别指标值 I_j 进行归一化,使 I_j 处于可比尺度,消除原始量纲差异。

6.8.2 确定权重 W_j :通过专家调查(如德尔菲法)、利益相关者偏好调查或政策导向分析,为各影响类别分配权重。

6.8.3 计算综合环境影响指数 CEI :将归一化后的 I_j 与对应权重 W_j 相乘,再对所有影响类别求和,得到综合量化的环境影响指数,计算公式如下:

$$CEI = \sum_j I_j^* \times W_j \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

I_j^* ——归一化后第 j 种影响类别指标值,通常取值范围为 $[0,1]$ 。通过归一化处理,将不同影响类别的原始指标值 I_j 映射到该区间,便于比较和加权计算；

W_j ——第 j 种影响类别权重,取值为正实数,以体现各影响类别在综合评价中的相对重要性比例。

6.8.4 CEI 作为综合量化结果,可为杆塔方案筛选、优化提供直观决策依据,数值越低代表全生命周期环境友好性越高。

7 评价结果

7.1 结果呈现

7.1.1 评价结果应涵盖架空输电线路从设计、施工、运行维护到退役回收的完整生命周期,重点分析各阶段的环境、经济和社会影响。

7.1.2 环境影响包括碳排放(如生产阶段的钢材冶炼碳排放、运输阶段的燃油消耗)、资源消耗(钢材、混凝土用量)、污染物排放(施工扬尘、废水)、生态影响(土地占用、植被破坏)等。

7.1.3 经济成本包括初始投资、运行维护费用、检修成本、退役处置成本等。

7.1.4 社会效益包括供电可靠性、地区经济带动效应、就业机会、社区影响等。

7.1.5 评价结果应以量化数据为主(如碳排放量、成本金额),同时结合定性分析(如生态保护措施的有效性、社会接受度)。

7.2 结果应用

7.2.1 评价结果应为项目决策提供依据。

7.2.2 设计优化:通过对比不同材料的环境影响,优先选择低碳方案。

7.2.3 运维策略:根据设备健康状态评估结果,制定预防性检修计划。

7.2.4 政策制定:为行业碳减排目标提供数据支撑,例如量化输电线路对“双碳”目标的贡献。

8 报告编制

杆塔全生命周期评价报告编制应满足GB/T 24044要求,报告内容应包含项目概况、评价目标与范围、清单分析详情、影响评价过程及结果、不确定性分析、结论建议等,具体按照附录C中模板进行编制。

附录 A

(资料性)

杆塔生命周期各阶段数据采集表

杆塔全生命周期数据项目、数据来源及采集频率见表 A.1。

表 A.1 杆塔生命周期各阶段数据采集表

阶段	数据项	描述	单位	数据来源	采集频率
原材料获取	材料种类	杆塔生产所需的原材料,如钢材(细分角钢、钢板等型号)、水泥、砂石等	—	采购合同、设计文件	项目启动时一次性采集
	材料用量	每种原材料的具体使用量,钢材按重量(kg),水泥、砂石按体积(m ³)或重量(kg),转换为统一质量单位方便后续计算	kg	生产领料记录、物料清单	项目启动时一次性采集
	材料供应商	原材料供应企业名称、地点	—	采购合同	项目启动时一次性采集
	供应商到工厂距离	原材料运输起点(供应商)到杆塔生产工厂的距离	km	物流记录、地图测距	项目启动时一次性采集
	开采能耗	原材料开采过程中的能源消耗,如煤炭(kg)、电力(kWh)等	kg/kW·h	供应商提供、行业报告	项目启动时一次性采集
	开采排放	开采产生的温室气体(CO ₂ 、CH ₄ 等,换算为CO ₂ e)、污染物(粉尘、SO ₂ 等)	kg CO ₂ e/kg, kg/kg	环境监测报告、科研资料	项目启动时一次性采集
生产制造	生产设备清单	参与杆塔生产的设备,如数控切割机、焊接机器人、热镀锌设备等	—	工厂设备台账	项目启动时一次性采集
	设备能耗	各生产设备的能源消耗类型(电力、天然气等)及单位时间或单位产量能耗	k·Wh/h, m ³ /h	设备说明书、车间能耗监测记录	每月/季度采集
	生产工艺	杆塔生产的工艺流程,如钢材下料-冲孔-焊接-热镀锌等	—	生产工艺文件	项目启动时一次性采集
	工序材料损耗	各生产工序中材料的损耗量,如切割钢材的边角料重量(kg),镀锌过程锌的损耗量(kg)	kg	车间废料统计、物料衡算	每日/每周采集
	生产人员数量	参与杆塔生产的直接人员数量,包括工人、技术人员等	人	人力资源部门记录	每月采集
	生产时间	单基杆塔生产所需的总时间	h	生产计划安排、车间工时记录	每基杆塔生产完成后采集
运输	运输方式	原材料运输到工厂、成品杆塔运输到施工现场的运输方式,如公路运输(卡车类型及载重)、铁路运输、水路运输(船舶类型)等	—	物流合同、运输单据	项目启动时一次性采集
	运输距离	原材料运输、成品杆塔运输的单程距离	km	物流记录、地图测距	项目启动时一次性采集
	运输工具能耗	运输过程中消耗的能源,如柴油(L)、电力(kWh)等,结合运输距离算出单位运输能耗	kg CO ₂ e/km, kWh/km	运输车辆油耗记录、船舶能耗监测、碳排放计算软件	每次运输完成后采集

表 A.1 杆塔生命周期各阶段数据采集表（续）

阶段	数据项	描述	单位	数据来源	采集频率
	包装材料	运输过程中使用的包装材料类型(木箱、纸箱、塑料膜等)及用量	kg	包装车间记录、物流单据	每次运输完成后采集
使用	杆塔安装位置	杆塔在输电线路上的具体地理位置,包括经纬度、海拔高度等	—	杆塔安装图纸、地理信息系统	杆塔安装完成后一次性采集
	运行年限	杆塔从投入使用到当前的时间	年	运行维护记录	每年采集
	巡检频次	对杆塔进行巡检的次数,包括人工巡检、无人机巡检等不同方式的频次	次/年	运行维护计划、巡检记录	每年采集
	维护项目及成本	每次维护所进行的项目,如紧固螺栓、修复镀锌层、更换构件等,及相应的成本(人工、材料费用)	元	维护费用报销单、维护记录	每次维护完成后采集
	故障次数及类型	杆塔在运行期间出现故障的次数,以及故障的具体类型,如塔身倾斜、构件腐蚀、雷击损坏等	次,—	故障报告、抢修记录	每次故障发生后采集
退役处置	退役时间	杆塔决定退役的时间	年	退役审批文件	杆塔退役时一次性采集
	拆除方式	采用的拆除手段,如机械拆除(吊车、拆除机器人等)、爆破拆除等	—	拆除方案	杆塔退役时一次性采集
	拆除设备能耗	拆除过程中消耗的能源,如柴油(L)、电力(kW·h)等	kg CO ₂ e, kW·h	拆除设备油耗记录、能耗监测	杆塔退役时一次性采集
	拆除人员数量	参与拆除作业的人员数量	人	人力资源部门记录	杆塔退役时一次性采集
	材料回收情况	退役杆塔材料回收的种类、回收量及回收去向	kg	回收企业收据、材料流向记录	杆塔退役时一次性采集

附 录 B
(规范性)
铁塔碳足迹计算方法

温室气体排放统计可采用核算法或在线监测法,当采用核算法时,对识别的排放源及温室气体种类,根据生命周期阶段*i*单元过程*j*排放源*k*的活动数据、排放因子,结合相应温室气体的全球增温潜势,获得温室气体排放量,计算见公式(B.1)。

$$CEP = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \sum_{p=1}^7 (AD_{i,j,k,p} \times EF_{i,j,k,p} \times GWP_p) \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

CEP ——系统边界内产品碳足迹,单位为kgCO_{2e}/功能单位;

AD_{i,j,k,p} ——生命周期阶段*i*单元过程*j*排放源*k*温室气体*p*的活动数据,包括购买的原料、物料、能源和生产、运输、使用、生命末期等过程的量,单位依据活动数据的量化单位,取值≥0;

EF_{i,j,k,p} ——生命周期阶段*i*单元过程*j*排放源*k*温室气体*p*的排放因子,包括产品所有应计入的上游过程的排放和清除,单位为千克温室气体每单位数量(kg温室气体/单位数量),取值为实数;

GWP_p ——温室气体*p*的全球变暖潜势值,取值>0。

附 录 C
(规范性)
杆塔全生命周期评价报告模板

杆塔全生命周期评价报告内容及模板见表C.1

表 C.1 杆塔全生命周期评价报告模板

LCA 阶段	评价范围	数据项	影响类别
项目概况	基础信息	项目名称	
		杆塔类型	
		应用场景	
		建设地点	
	数量与寿命	杆塔数量	
		设计寿命/评价周期	
材料构成	主要材料		
评价目标与范围	评价目的	核心目标	
	系统边界	时间边界	
		空间边界	
	功能单位		
	数据规则	取舍原则	
假设条件	关键假设		
生命周期清单分析	原材料阶段	输入项目	
	生产制造阶段	输出项目	
	运输安装阶段	运输参数	
	运行维护阶段	年度消耗	
	退役处理阶段	回收处理	
环境影响评价结果	影响类别	评价指标	
	贡献阶段	主要贡献	
不确定性分析	来源与因素	数据质量	
		模型假设	
		边界条件	
		技术进步	
结论与建议	主要结论	环境热点	
		减排潜力	
		资源化需求	

表 C.1 杆塔全生命周期评价报告模板（续）

LCA 阶段	评价范围	数据项	影响类别
结论与建议	改进建议	材料优化	
		运维升级	
		回收体系	
	实施计划	责任主体	
		时间节点	

全国团体标准信息平台

参 考 文 献

- [1] GB/T 20862 产品可回收利用率计算方法导则
 - [2] GB/T 24020 环境管理 环境标志和声明 通用原则
 - [3] GB/T 24025 环境标志和声明 III型环境声明 原则和程序
 - [4] GB/T 24040 环境管理 生命周期评价 原则与框架
 - [5] GB/T 30052 钢铁产品制造生命周期评价技术规范
 - [6] DL/T 1762 钢管塔焊接技术导则
 - [7] DL/T 1889 输电杆塔用紧固件横向振动试验方法
-