

核电工程绿色建造中的全生命周期管理研究

魏慧荣 廖佳 雷晓莹 李然 马源利

成都理工大学工程技术学院 四川 乐山 614000

【摘要】：核电工程在绿色建造背景下开展全生命周期管理具有重要意义，但在具体实施管理中核电工程绿色建造难度大、管理机制不完善、全生命周期数据管理面临挑战以及缺乏创新性等问题，导致核电工程绿色建造中全生命周期管理效果不佳。文章结合核电工程绿色建造内涵，针对核电工程绿色建造中全生命周期管理挑战分别从前期准备、设计建造、运营维护、退役管理阶段提出完善和创新核电工程全生命周期管理措施，旨在为相关工程以及技术人员在核电工程绿色建造中全生命周期管理中提供参考方向，为核电行业实现“双碳”目标提供实践策略。

【关键词】：核电工程；绿色建造；全生命周期管理；可持续发展

Research on Full Lifecycle Management in Green Construction of Nuclear Power Projects

WEI Huirong, LIAO Jia, LEI Xiaoying, LI Ran, MA Yuanli

The Engineering & technical College of Chengdu University of Technology, Leshan Sichuan 614000, China

Abstract :It is of great significance to carry out full life cycle management of nuclear power projects in the context of green construction. However, in the specific implementation and management of green construction of nuclear power projects, the difficulty of green construction, incomplete management mechanisms, challenges in full life cycle data management, and lack of innovation have led to poor results in full life cycle management of green construction of nuclear power projects. The article combines the connotation of green construction in nuclear power engineering and proposes comprehensive and innovative measures for the full life cycle management of nuclear power engineering from the stages of early preparation, design and construction, operation and maintenance, and retirement management. The aim is to provide reference direction for relevant engineering and technical personnel in the full life cycle management of green construction in nuclear power engineering, and to provide practical strategies for the nuclear power industry to achieve the "dual carbon" goal.

Keywords: Nuclear power engineering; Green construction; Full lifecycle management; sustainable development

DOI:10.12417/2705-1358.26.03.093

引言

核电站作为现代清洁能源发展体系中的重要环节之一，在全球能源结构转型背景下，核电工程向绿色建造方向发展属于必经之路。2025 国家能源局下发关于《2025 年能源工作指导意见》中关于“十四五”核电发展规划明确提出“到 2025 年核电装机容量达 7000 万千瓦，强化能源安全保障与绿色低碳转型的协同推进，通过系统性改革与技术创新推动能源体系向高质量、高韧性方向升级。”全生命周期管理是推动核电工程绿色建造、实现可持续性发展的关键环节，其应用效果对核电工程项目发展起重要作用，加强核电工程绿色建造中的全生命

周期管理属于当前核电企业重点管理目标，具有重要管理意义。

1 核电工程绿色建造全生命周期管理概述

核电工程绿色建造主要是指在开展核电项目设计、施工、运营、管理等过程中，通过对当前管理模式和现有技术进行优化，尽可能实现节约资源，降低碳排放，改善环境，实现项目工程与自然环境和谐共处局面，进一步加重生态环境保护工作。在开展核电工程绿色建造中，通过采用高效施工工艺、引进绿色低碳建材实现节能环保目标，遵循资源利用最大化、生态保护以及智能发展等原则，推动核电工程绿色建造发展。

作者简介：魏慧荣，1981.11，女，汉族，内蒙赤峰，硕士研究生，讲师，主要研究方向：建筑设备与工程，流体机械，工程造价。

论文来源：成都理工大学工程技术学院 2025-2027 年度教学改革研究项目。

项目名称：教学·就业·考研“三融合”的《安装工程计量与计价》课程改革与探索。

项目编号：2025-JYJG-0138。

核电工程全生命周期管理 (Life Cycle Management, LCM) 主要是指对核电工程项目从项目规划到工程退役全过程进行系统性管理, 主要包括前期准备、设计建造、运营维护、退役管理等阶段。通过核电工程全生命周期管理旨在提高核电工程项目的经济性、安全性、环保性等目标^[1]。

2 核电工程绿色建造中全生命周期管理挑战

2.1 前期规划阶段项目实施难度大

核电工程绿色建造全生命周期管理中, 在前期规划环节主要面临项目实施难度大等问题, 主要与核电工程选址复杂、对全周期成本预算难度大等因素有关。第一, 在环境选址方面, 核电工程前期规划中对选址要求较高, 需要综合考虑核电工程项目所处地理位置、水源环境、人口密度以及生态环境保护等多方面, 但前期对选址地区了解不全面, 导致环评周期延长、难度增大。第二, 在绿色建造方面, 在前期规划阶段, 需要重点评估核电工程项目对当地环境影响, 但目前缺乏有效评价工具。第三, 全周期成本预测难度大, 在前期规划过程中需要对整体工程项目进行成本预测, 但是早期规划难以对核电工程绿色建造中全生命周期进行预算管理。

2.2 设计与建造阶段机制不完善

在设计与建造阶段, 影响核电工程绿色建造与发展的主要原因与该阶段机制不完善有关。第一, 设计标准不统一。在设计核电工程绿色建造项目时采用的设计标准不统一, 比如不同堆型所采用的绿色建造指标有所差异, 无法形成对比, 导致在优化设计方案时难以进行对比优化, 导致设计难度增加。第二, 在建造过程中对 BIM 等技术应用不足, 部分设计仍采用二维图纸, 导致施工过程中返工率高。第三, 整体施工协同效率低下。核电工程开展绿色建造过程中, 由于施工方、设计院等多方缺乏有效协同机制, 导致数据共享不及时, 在建造过程中建造与设计出现偏差, 存在返工情况^[2]。

2.3 运营与维护阶段面临挑战

核电工程绿色建造运营与维护阶段面临诸多挑战。第一, 各核电业务系统数据独立协同性差。在运营过程中, 对核电工程进行安全监测、设备管理等操作时, 各项数据管理属于独立平台, 相互之间信息不共享, 导致在出现故障时需要人工交叉比对数据, 延误维修进度。第二, 核电数据繁杂信息整合分析难度大。核电工程数据繁杂, 每天产生大量数据, 比如传感器数据、运营数据等, 但是缺乏有效数据管理和整合工具, 导致核电数据分析难度加大。第三, 缺乏有效的核电数据管理机制。在运营过程中, 核电工程数据归档不完善, 纸质记录不利于数据管理和退役后溯源。第四, 数据存在安全性和暴露风险。采用工业控制系统容易受到网络攻击, 造成核电站数据安全、隐

私风险。第五, 绿色建造全生命周期管理缺乏创新性。采用的管理模式以及技术等较为传统, 缺乏创新性, 未将绿色发展与考核挂钩。

2.4 退役阶段缺乏可持续发展性

核电工程退役阶段是整个绿色建造生命周期管理的最后环节, 但在管理期间对其重视度较低, 忽略核电工程可持续发展重要性。第一, 退役方案缺乏可持续发展性, 对老旧核电站进行拆除时主要依赖国外技术, 成本较高, 设计时忽略退役需求, 导致拆除工艺复杂。第二, 废弃物处理难度大, 环境压力增加。第三, 退役成本较高, 忽略场地生态修复成本, 后期追加难度大。第四, 环境面临挑战, 生态修复工作难度大, 土地再利用率不足。

3 核电工程绿色建造中的全生命周期管理策略

核电工程绿色建造中开展全周期生命管理时, 需贯穿前期准备、设计建造、运营维护以及退役管理四个阶段, 通过制定全生命周期管理策略实现核电站绿色建造工程高效、环保、低碳、可持续发展目标。具体流程如图 1 所示:

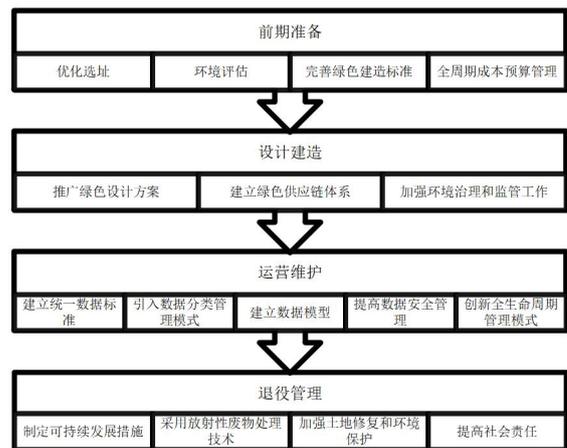


图 1 核电工程绿色建造中的全生命周期管理流程图

Fig.1 Whole life cycle management flowchart in green construction of nuclear power projects

3.1 前期准备阶段: 加强绿色建造改革

核电工程绿色建造中开展全周期生命管理时, 前期准备阶段主要包括优化选址、加强环境评估、完善绿色建造标准以及开展全周期成本预算管理等。第一, 优化选址。采用地理信息系统, 综合评估选址位置的地理环境、地质稳定性、水源条件、生态环境等。第二, 环境评估。进行全生命周期碳排放评估工作, 对前期准备、设计建造、运营维护以及退役管理四个阶段的碳排放量进行分析和预测, 为绿色建造奠定基础。第三, 完善绿色建造标准。制定核电工程绿色建造标准, 对节能减排等指标进行明确规定。第四, 开展全周期成本预算管理。构建成

本评估体系,引入生命周期评价(LCA)工具,对核电工程绿色建造全周期进行预算管理^[3]。

3.2 设计建造阶段:完善管理机制

在设计与建造过程中,重点优化核电工程绿色建造中的全生命周期管理机制。第一,积极推广绿色设计方案,采用模块化建造方案。利用 BIM(建筑信息模型)以及数字孪生技术对核电工程设计方案进行优化,降低在施工过程中出现的各种浪费情况,积极推广模块化施工方案,例如中广核“华龙一号”示范项目采用大型结构模块、大范围管道自动焊接、一体化施工平台调试技术等一系列新建造技术,有利于缩短建造工期,降低建造过程中碳排放量。第二,建立绿色供应链体系,在建造过程中采用低碳材料,实现可持续发展目标。第三,加强环境治理和监管工作。核电工程在绿色建造过程中,可引入无人机巡检技术,加强扬尘监测等,重视环境监管工作,减少生态破坏情况发生。

3.3 运营维护阶段:优化生命周期管理模式

(1) 建立统一数据标准

在运营维护阶段,采用统一的数据管理标准,主要包括国内核电相关标准体系(GB、NB/T、EJ/T及其他行业)以及国际(ISO)标准,例如我国“华龙一号”项目中采用《“华龙一号”国家重大工程标准化示范标准需求项目表(2020版)》、《压水堆核电站标准体系项目表(2020版)》等标准^[4]，“华龙一号”采用标准与国家同类标准持平,满足国际市场开发和核电“走出去”战略实施需求。通过建立统一数据标准,有利于对核电站各系统,例如安全监测、数据管理、设备监控以及辐射防护等进行数据共享,加强运营维护管理效率。

(2) 引入数据分类管理模式

引入数据分类管理模式,加强结构化数据管理和非结构化数据管理工作。第一,结构化数据管理:在运营维护阶段,对核电站各传感器数据、设备运行参数等采用 InfluxDB 系统,用于储存、查询时间序列数据,实现结构化数据管理目的,有利于高效分析核电站运行情况。第二,非结构化数据管理。在运营、维护报告、巡检数据以及摄像资料等进行非结构数据管理,采用自然语言处理系统以及图像识别技术等提取运营维护阶段管理数据,并进行统一管理。

(3) 建立数据模型

在运营维护阶段,建立数据模型,对可能出现的各种情况进行预警。第一,建立设备健康管理模型。通过结合核电站各设备运行各项数据,搭建设备健康管理模型,比如设备老化模型,利用数学建模等方式预测和评估设备老化程度、磨损情况等,对可能发生故障等情况进行提前预警。第二,优化设备能

耗模型。在设备运行期间,搭建设备能效优化模型,对设备发电能力、能耗等进行优化。第三,模拟核电站辐射扩散模型。结合核电站辐射监测数据,建立三维核电站辐射扩散模型,对核辐射泄漏等紧急事故进行监测和预警。

(4) 提高数据安全治理

为避免在运维阶段出现数据泄露等风险,需提高数据安全治理效率。第一,实施动态管理和身份认证等管理体系,对访问者进行授权管理,防止各种非法访问发生。第二,优化国产加密技术。采用自主研发的形式,研发加密技术,对核电站核心数据进行保护。第三,数据追踪。对运维阶段各项敏感数据进行追踪、溯源,并根据操作日志进行数据审计,提高数据安全性。

(5) 创新全生命周期管理形式

在运维阶段,在传统管理模式,创新全生命周期管理形式,实现可持续性发展。第一,建设核电全生命周期管理智能化平台。例如搭建数字孪生集成平台,通过虚拟电站方式对核电工程绿色建造全过程进行模拟。第二,完善核电站绿色管理体系。加强碳排放强度预测、三废回收指标管理,将相关指标作为绿色绩效考核指标,提高绿色建造重视度。第三,融入多种技术,加强全生命周期管理。例如采用 AI 技术、引入机器人、无人机等对高风险区域进行巡检,采用区块链溯源技术,对核电工作运行管理数据进行监测,确保数据不被篡改^[5-6]。

3.4 退役阶段:制定退役策略修复生态环境

核电工程绿色建造过程中,对其进行全周期管理时,退役阶段时核电工程最后阶段,为实现绿色建造目标,需制定退役策略有效修复生态环境。第一,制定可持续发展措施,针对不同核电站的特点、地理环境等进行成本预算、安全评估等工作,实施立即拆除或者延迟拆除策略。第二,采用放射性废物处理技术,比如应用加速器驱动次临界洁净核能系统,使长寿命高放核废料嬗变为短寿命低放核废料,第三,加强土地修复和环境保护,对污染的土地进行修复,利用植物修复技术等实现生态可持续发展目的。第四,提高社会责任。在退役管理过程中,需公开核电站退役进度,加强核电站退役后管理、宣传和环境修复工作。

4 结语

综上所述,目前核电工程绿色建造中全生命周期管理面临诸多挑战,主要包括核电工程绿色建造实施难度大,核电企业全生命周期管理机制不完善,全生命周期数据管理面临挑战以及绿色建造全生命周期管理缺乏创新性等。在绿色建造背景下,前期准备阶段加强绿色建造改革,设计建造阶段完善管理机制,运营维护阶段优化生命周期管理模式,通过优化核电企

业生命周期数据管理模式, 创新全生命周期管理形式等措施, 阶段制定退役策略修复生态环境, 促进国内核电企业新能源关
能有效提高电工程绿色建造中全生命周期管理效率以及退役 键技术发展, 推动能源高质量安全发展, 实现绿色低碳转型。

参考文献:

- [1] 李颖,姜明月,刘颖,等.核电厂仪控系统全生命周期需求分析的研究[J].自动化仪表,2023,44(S1):55-58.
- [2] 崔明路,杨萌.基于系统工程的核电厂仪控系统设计流程研究[J].自动化仪表,2023,44(S1):59-63+68.
- [3] 徐建军,王浩,张翼.核电厂全生命周期数字化转型研究与设计[J].仪器仪表用户,2022,29(08):63-68.
- [4] 张通.绿色高效成本低:揭开“核电”的神秘面纱[J].中国工业和信息化,2022,(07):80-83.
- [5] 任景莉,杨盼.核电站全生命周期数据管理框架体系构建与发展建议[J].中国工程科学,2022,24(02):152-159.
- [6] 沈念俊,周静娜,李浩瀚,等.安徽省典型超低能耗居住建筑外墙材料全生命周期碳排放测算[J].绿色建筑, 2024, 16(5):129-134.