核动力工程
Nuclear Power Engineering
EI工程索引(美国)(2021)收录
CA化学文摘(美国)(2020)收录
JST日本科学技术振兴机构数据库(日本)(2020)收录
北大中文核心期刊（2020版）收录

秦山核电厂长期运行工程实践

孔德萍

Long-term Operation Practice of Qinshan Nuclear Power Plant

Kong Deping

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.S1.0001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

安全壳过滤排放系统长期运行热工水力特性分析

Thermal–Hydraulic Characteristics of Filtered Containment Venting System for Long–Term Operation

核动力工程. 2019, 40(4): 44–49

主曲线方法在核电厂压力容器老化延寿中的应用

Application of Master Curve in Reactor Pressure Vessle Ageing

核动力工程. 2020, 41(2): 45–48

核电厂电气贯穿件设备延寿再鉴定方法研究

Study on Life Extension and Re–Qualification Method for Electrical Penetration Assembly of Nuclear Power Plants

核动力工程. 2020, 41(1): 140–144

运行核电厂安全生产标准化管理信息系统的研发

Research and Development of aManagement Information System for Standardization of Safety Production in an Operating Nuclear Power Plant in China

核动力工程. 2018, 39(4): 152–156

核电机组长期临停下受影响设备的预防性维修策略动态调整方法研究

Study on Dynamic Adjustment Method of Preventive Maintenance Strategy for Affected Equipment under Long–Term Temporary Outage of Nuclear Power Units

核动力工程. 2021, 42(1): 172–176

秦山核电厂松动部件监测系统典型误报警事件分析和处理

Typical False Alarm Analysis and Processing of Loose PartsMonitoring Systemin Qinshan Nuclear Power Plant

核动力工程. 2018, 39(6): 189–193

关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号：0258-0926(2022)S1-0001-06; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.S1.0001

秦山核电厂长期运行工程实践

孔德萍

中核核电运行管理有限公司，浙江海盐，314300

摘要：秦山核电厂是中国大陆首个面临运行许可证延续（OLE）的核电机组，是中国大陆首个获得批准延长运行 20 a 的核电机组。本文介绍了秦山核电厂运行许可证技术体系及相应的流程，秦山核电厂 OLE 的成功经验对后续核电厂开展长期运行有很好的借鉴意义及示范作用。

关键词：老化；运行许可证延续（OLE）；老化管理体系

中图分类号：TL38+2 **文献标志码：**A

Long-term Operation Practice of Qinshan Nuclear Power Plant

Kong Deping

CNNC Nuclear Power Operation Management Co. Ltd, Haiyan, Zhejiang , 314300, China

Abstract: Qinshan Nuclear Power Plant is the first nuclear power unit in Chinese Mainland facing the operation license extension (OLE), and the first nuclear power unit in Chinese Mainland approved to extend its operation for 20 years. This paper introduces the operation license technical system and corresponding process of Qinshan Nuclear Power Plant. The successful experience of OLE in Qinshan Nuclear Power Plant can be used for reference and demonstration for the long-term operation of subsequent nuclear power plants.

Key words: Aging, Operation Licence Extension (OLE), Aging management system

0 引 言

核电厂长期运行（简称“延寿”）是指将核电厂运行期限延长至超过原许可证运行寿期或设计寿期，使其能够在更长时间内以可靠、低成本且低碳排放的方式生产电力，从而实现价值最大化。大多数在运机组的设计期限为 30~40 a。根据国际原子能机构（IAEA）公布的数据，截止 2021 年底，全球 443 台在运机组中，超过 67% 的役龄已超过 30 a，有 27% 的在运核电机组的实际运行时间已超过最初的 40 a 设计运行寿期。全球超过 30% 的在运核电机组正在准备或者已经完成延寿。如今，在满足法规、安全性和经济性的要求后，核电机组延寿已成为一种常见做法[1]。

秦山核电厂是我国大陆第一个核电厂，1985 年开工建设，1991 年并网，首次运行许可证有效期限为 30 a（即 2021 年到期），是中国大陆首个面临运行许可证延续（OLE）的核电厂。如何借鉴国际先进经验，在秦山核电厂开展首个 OLE 的工程实践具有重要意义。

1 面临的问题

与发达国家核电厂 OLE 的实践活动相比，我国核电厂在 OLE 相关领域和技术上存在较大差距，主要表现在以下几方面：

（1）OLE 相关法规及行业标准体系发达国家已建立了较为完备的核电厂 OLE 的法规规范和标准体系，美国是国际上开展核电厂执照更新（LR）实践最多国家，其法规标准体系不仅包括联邦法规、美国核管理委员会（NRC）技术导

收稿日期：2022-01-18；**修回日期：**2022-03-18

作者简介：孔德萍（1963—），女，研究员级高级工程师，现从事核电运行技术支持工作，E-mail: kongdp@cnnp.com.cn

则，还包括工业界和核电厂开发的支撑联邦法规的行业规范和技术导则，如图 1 所示。2015 年底，国家核安全局颁布了“《核电厂运行许可证》有效期限延续的技术政策”（简称“技术政策”），在役核电厂开展 OLE 有了法规依据，但是支撑核电厂开展 OLE 活动的行业标准和技术导则依然是空白，急需通过秦山核电厂 OLE 工程实践，建立一整套支撑 OLE 的标准规范和行业技术导则，保证核电厂 OLE 的安全审评和分析评价工作的顺利开展。

（2）老化管理大纲（AMP）体系及监检测技术。美国核电厂 LR 大规模实践的基础是核电厂建立了较为系统完善的 AMP 体系，这些大纲对核电厂的所有安全及非安全但其失效会影响安全功能的系统设备和构筑物的老化效应提出了有针对性的老化管理措施。美国核电厂完善的 AMP 体系的开发是建立在美国核工业界多年的材料老化研究基础上，开发了一批监督检查和维修缓解手段来支撑这些大纲的实施。我国核电厂老化管理从 2000 年初刚刚起步，核电厂老化管理的完整体系尚未建立起来，一些关键的老化状态监督检查和维修缓解技术与国外相比尚有较大差距，急需研发支撑核电厂 OLE 的关键技术。

（3）时限老化分析（TLAA）。OLE 工作的一个重要内容是以核电厂现有运行条件为基础，开展关键设备的 TLAA。对比美国核电厂 LR 关于 TLAA 的要求和实践，在一些 TLAA 的关键技术上，例如一回路压力边界的环境促进疲劳（EAF）、安全壳预应力系统的寿命评估、电仪设备的环境鉴定等方面，无论是评估模型、评估方法、验收准则，还是支撑这些评估的材料降质研究方面与发达国家均有不小的差距。

（4）环境影响评估方法。我国对于新/扩建核电厂环境影响评价已有了成熟的体系，核电厂延续运行对环境影响的评估不论是美国还是 IAEA 的方式都不适合我国。“技术政策”中给出了原则性要求，如何结合工程实践，从适当性、可接受性和符合性 3 个方面进行评估，建立相应的方法和流程，是 OLE 需要解决的关键技术之一。

（5）提升机组经济性。借鉴国外发达国家核电厂 LR 的良好实践，在 OLE 时，往往会综合考虑并策划机组功率提升，以提升核电厂长寿期（LTO）运行的经济性。以秦山核电厂为对象，开展长期运行经济性评估，建立适合电厂的寿命评价体系（LCM）也是核电厂长期运行应关注的关键技术之一。

2 OLE 技术路线及老化管理体系研究及建立

2.1 OLE 技术路线

我国核电厂的运行采用许可证管理模式，核电厂 OLE 在技术路线上主要借鉴和参考美国核电厂 LR 技术体系开展，同时按照“技术政策”的要求，结合历次定期安全审查（PSR）的审查结果，实施一些必要的安全标准提升活动，保证核电厂长期运行的安全水平，以此形成适用于我国的 OLE 技术路线。

技术路线的研究制定解决了核电厂延续运行需要评估的内容及开展的活动。核电厂 OLE 技

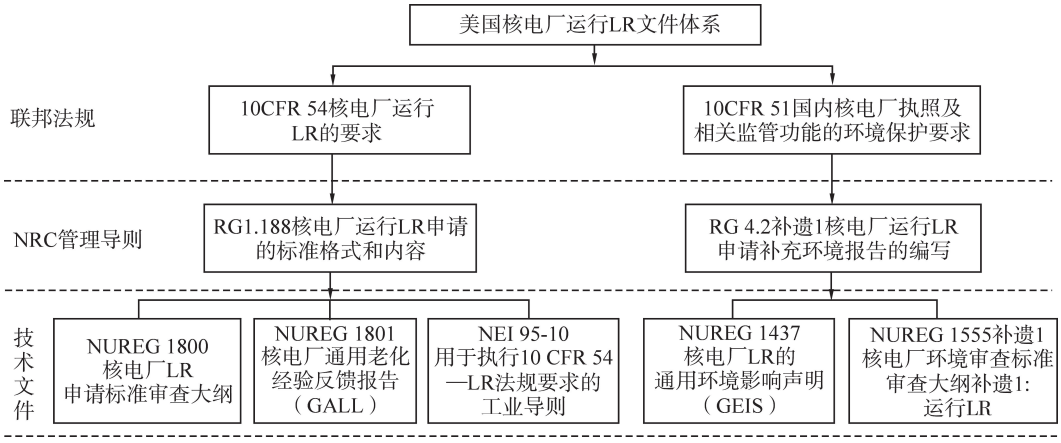

图 1 美国核电厂 LR 文件体系

Fig. 1 Document System of American Nuclear Power Plant LR

术路线，主要包括以下几部分内容：

（1）核电厂整体评估（IPA）。包括范围界定、对象筛选、AMP 开发和老化效应审查。

（2）TLAA。包括对象识别、时限老化分析与评估。

（3）执照文件的更新。包括环境影响评估、核电厂最终安全分析报告（FSAR）增补分析、AMP 等。

（4）工程技术改造。主要包括 OLE 安全论证中需更换设备、功率提升涉及的设备部件的更换、历次 PSR 中安全改进措施的落实和完善，以及国家核安全局提出的相关改进要求等。

2.2 AMP 体系

不同于新建电厂，秦山核电厂是一个已经服役近 30 a 的核电厂，已经形成了一套较为完善的生产文件体系，老化管理活动也融合在核电厂的在役检查大纲、水化学管理、核电厂预防性维修、设备管理等一些现有大纲和程序文件中。在研究美国核电厂 AMP 体系的前提下，结合秦山核电厂的应用实践，研发制定了 37 份适用于我国 OLE 的 AMP。这些大纲对核电厂的所有安全及非安全但失效会影响安全功能的系统设备和构筑物的老化效应提出了有针对性的老化管理措施，为核电厂开展延续运行奠定了坚实基础。

基于秦山核电厂 AMP 开发的实践以及对世界主流的老化管理体系的探索，归纳总结出在役核电厂建立 AMP、指导核电厂的老化管理活动的一般流程，如图 2 所示。

AMP 开发过程主要分成 3 个阶段：①AMP 开发前准备工作，明确需要开发 AMP 清单；②根据 9 要素开发 AMP 阶段；③AMP 的实施与完善

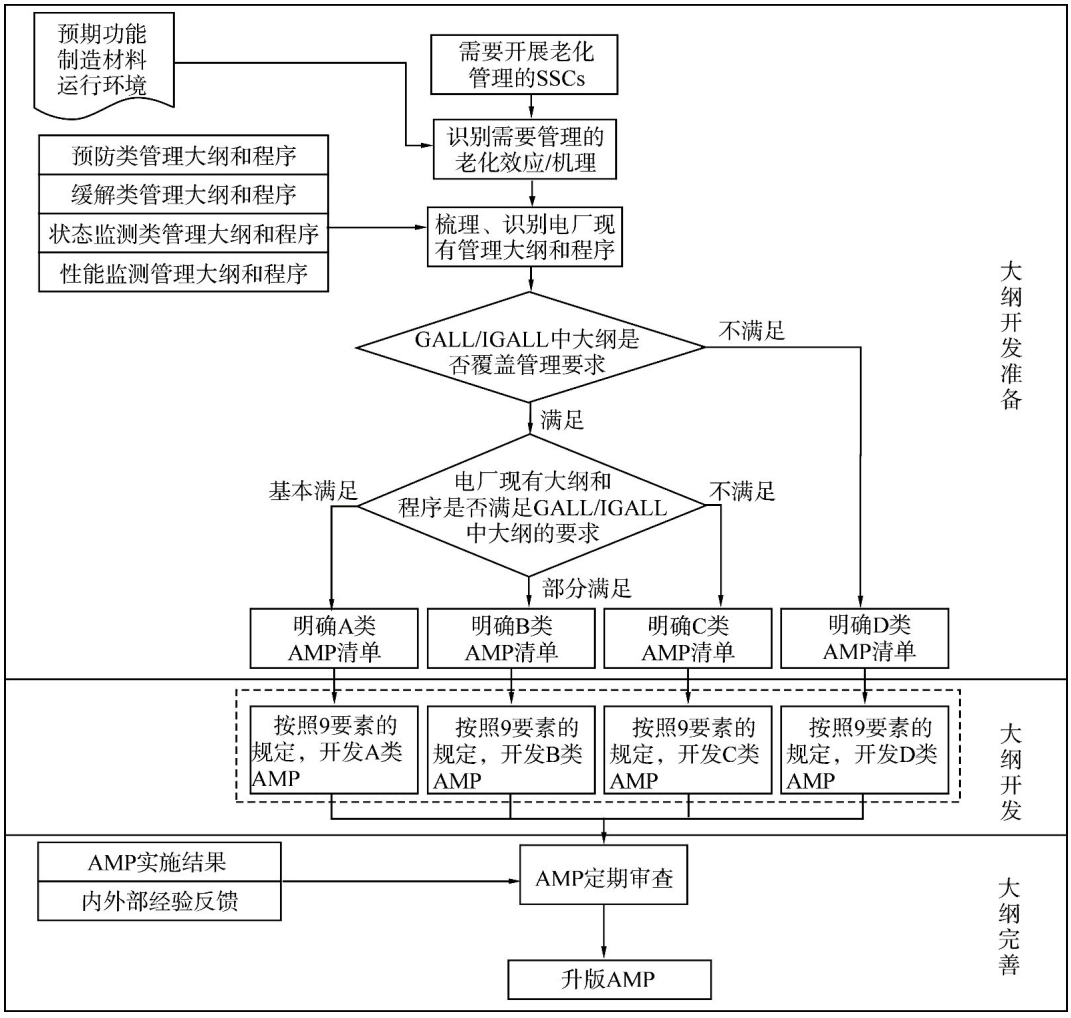

图 2 APM 开发流程

Fig. 2 APM Development Process

阶段。

2.3 环境影响评估方法

与美国不同，秦山核电厂 OLE 环境影响评估围绕“技术政策”所要求 3 个方面开展。用秦山核电厂 27 a 的实际运行数据（运行期间所致最大公众受照剂量及集体剂量、三废数据、取排水设施的生物影响、温排水温升影响、化学物质排放影响等）对首次装料阶段环境影响报告书中的评价模型及评价结论的适当性进行了验证；根据厂址环境现状特征以及该机组延续运行期间的流出物排放、温排水排放等参数构建预测模型，评价延续运行期间的放射性环境影响符合国家标准规定的放射性物质排放总量控制、排放浓度控制、公众剂量约束值和事故辐射后果要求；非放射性环境影响符合国家标准规定的污染物排放及环境质量要求。基于工程实践形成 OLE 环境影响评估流程，见图 3。

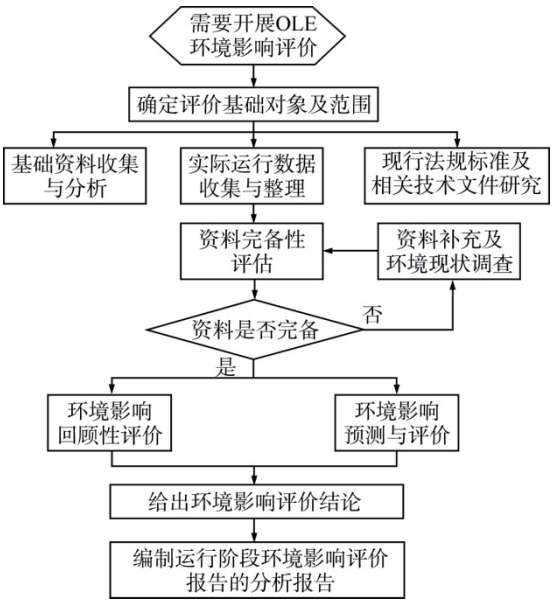

图 3 秦山核电厂 OLE 环境影响评价流程图

Fig. 3 OLE EIA Flow Chart of Qinshan NPP

3 OLE 关键技术研发

3.1 老化管理监检测与维修技术

针对 AMP 各部位的老化机理，如何运用新技术、新工艺、新装备对老化部位进行检查，得出部件实际老化状态，评估老化现象等是开展 OLE 的一个关键课题。

秦山核电厂 OLE 专项开发了多项检测技术，如围板幅板螺栓的超声涡流检查与评估技术、设备及管道疲劳监测系统、埋地管老化检测及分析评价技术、构筑物碳化和氯盐侵蚀耐久性试验和检测技术等。根据国外同行经验反馈，针对铸造不锈钢可能会发生热老化引起的脆性降质，开展了相应的热老化试验研究，并开发了热老化检测装置及分析评价技术；针对 600 合金异种金属焊缝可能产生应力腐蚀开裂的风险，开发了缓解与修复技术；同时开发的还有稳压器电加热元件更换维修技术、高辐照水环境下特种加工与维修技术等，掌握了水下加工、测量（含三维激光和水下测量）、水下激光焊接、水下喷丸等核心技术，这些技术的开发与储备为将来核电厂长期安全稳定运行提供了有力的保障。

3.2 寿命评估技术

OLE 阶段的 TLAA，增加了环境促进影响这一要素。机械部件的环境促进影响主要体现在部件的疲劳分析中，分析评价技术比较成熟。电仪设备需按照 IEEE323-1974 的要求进行环境鉴定（EQ），以确认严苛环境中服役的安全重要设备在延续运行期内满足其性能要求。针对电仪部件，核电厂采取的措施大多为直接更换，秦山核电厂针对部分特殊位置的电仪部件则开发了环境再鉴定技术，此类环境包括由冷却剂丧失事故（LOCA ）、高能管线破裂事故（HELB ）以及 LOCA 辐照导致的各种环境。秦山核电厂先后对安全壳通风风机、电气贯穿件、部分核级电缆等部件开展了再鉴定试验，掌握了再鉴定的方法及流程。为进一步掌握电仪设备的老化分析及寿命评估技术，同步开展了潮湿环境下的电缆老化降质行为和状态监测技术研究、继电器降质规律和状态监测研究、变压器的老化行为和状态诊断技术等，为电仪设备的老化管理奠定了技术基础。

3.3 出力提升

借鉴同行经验，秦山核电厂在 OLE 阶段，同步策划了出力提升。在分析评估核电厂核蒸气供应系统、汽轮发电机组及一、二回路功率参数匹配等技术研究的基础上，根据核电厂实际运行状况，充分挖掘机组潜能，确定了符合最佳投资效益、最合理的改造方案，将二回路出力从 320 MWe 提升至 350 MWe，核电厂经济性得以大幅提升。

3.4 LCM 及过时管理

随着核电厂运行逐步进入长期运行期，核电厂的寿期管理及过时管理将愈加重要，尤其是对核电厂经济性有重大影响的设备寿期管理。秦山核电厂在 OLE 期间，借鉴美国核电厂寿期管理的流程，以主汽轮机、主发电机和主变压器为主要对象开展研究，如失效率计算、经济性分析方法研究等，初步构建了 LCM 框架及流程，并开发了 LCM 数据库，为核电厂全面开展 LCM 提供了 基础。

核电厂过时管理研究主要集中于备品备件淘汰品分级准则和管理策略，并通过备品备件淘汰品过时管理大纲的开发，提出相应的管理策略，包括过剩市场采购、特别制造、设备翻新等。但是该项工作涉及供应商信息收集，难度极大，需用户（核电厂设备管理部门）、供应商及采购方通力协作才能做好。

4 秦山核电厂 OLE 工程实践

秦山核电厂 OLE 项目历经多年建立了一套科学合理的 OLE 安全评估方法和流程，在此基础上形成了首套适用于我国的核电厂 OLE 行业标准（NB/T 20476.01—12）（图 4），解决了我国无 OLE 标准体系的难题，为后续在役核电厂 OLE 申请提供了技术指导，是承接国家核安全局出台的技术政策相关要求的良好执行文件。

建立了国内首套完整的用于 OLE 评估的 AMP 体系，结合秦山核电厂 OLE 工程实践，开发了适用于我国的中国通用老化管理经验（CGALL）报告，对美国 NRC 颁布的 NUREG1800 和 NUREG1801 进行适应性修改，并增加我国核电厂的特定要求，汇总、整理和分析我国核电厂机械设备、电气设备和构筑物的老化对象、材料、环境、老化机理、老化效应和老化管理手段等重要信息，涵盖通用老化管理大纲的技术要求，为核电厂的 AMP 开发工作提供技术指导。并通过开发老化管理数据库平台（AMDB），实现了标准化、科学化的老化管理，在秦山核电厂 9 台机组得到推广应用。

构建了一系列核电厂 OLE 标准化产品，如工作大纲、工作程序、技术规程、标准化工作包等，涵盖了 OLE 工程实施所需的各环节，从技术和管理方面均做到了模式化，能够有效地指导我国核电厂 OLE 工作的开展。

首个结合 OLE 工程将二回路出力提升达 9%，为后续 20 a 的延续运行提供了显著的经济效益。

5 思考与建议

秦山核电厂是中国大陆首个获得批准延长运行 20 a 的核电机组，秦山核电厂 OLE 工程实践，构建出适用于我国的 OLE 技术体系，为我国首个核电厂开展 OLE 安全评估提供技术支撑。老

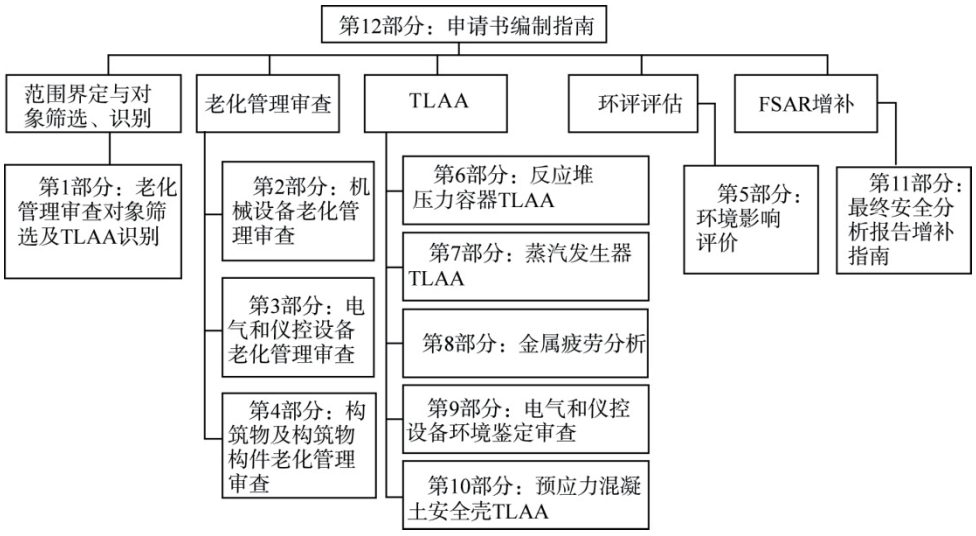

图 4 核电厂 OLE 行业标准

Fig. 4 OLE Industry Standards of NPP

化管理是贯穿核电厂整个寿期的活动，也是覆盖核电厂运行、维修、设备管理等各个生产环节的活动，大量的基础信息（包括初始设计文件、制造文件、运行维修数据、在役检查等）是老化管理及安全评估有效性的前提。数据积累是一个长期过程，配套完整的老化管理体系，建立长寿期管理方法及流程是在役核电厂需关注的。材料老化是核电厂面临的实际问题，也是一个共性问题，各核电厂应联合起来，充实完善并维护共享一个 CGALL，有利于提升所有核电厂老化管理水平，有效促进核电发展。

参考文献：

[1] OECD/NEA. Long-term operation of nuclear power plants and decarbonisation strategies[R]. Paris: OECD/NEA, 2021.

（责任编辑：张明军）