

数字核电厂全寿期工程信息管理系统示范工程

——核电厂配置管理系统的初步建立和尝试

The Demonstration Project of Digital Nuclear Power Plant Life-time Engineering Information Management System

—Preliminary Establishment and Experimental Development

王百众

(中国广东核电集团技术中心, 广东深圳, 518124)

摘要: 本文是对中国广东核电集团重点支持的科研项目--数字核电厂全寿期工程信息管理系统示范工程的研究进展和工程应用情况的介绍和展望。介绍了新一代核电厂技术和管理中所要求遵循的管理规范和配置管理, 探讨了配置管理与数字核电厂全寿期工程信息管理系统的关系, 着重介绍了本研究的系统构成、研究进展以及该项目在大亚湾核电站2号机反应堆压力容器顶盖更换中2RX厂房20 m平台设备空间布置与动态管理中的应用。重点讨论了三维数字电厂模型在未来核电厂设计、制造、施工以及运行和维护中的应用前景。实践证明, 在核电厂运行管理体系中, 数字电厂是实现核电厂全寿期配置管理的基础, 技术上是成熟的, 以数字核电厂技术为核心, 利用2-3年的时间建立中国自己的百万千瓦级核电厂全信息化的参考电厂模型是完全可能的。它将对中国核电产业的核心竞争力起到重大的推动作用。同时建议国家有关部门, 应在此以信息化带动产业化的项目中起更大的推动和协调作用。

关键词: 数字电厂 核电厂 知识积累 配置管理 核心竞争力

Abstract: This article presents an introduction and overview on the progress and application of demonstration project of digital NPP life-time engineering information management system, which is a key research project supported by CGNPC. It introduces management standard and configuration management that new generation of NPP should adhere to, discusses the relations between configuration management and digital information management system, with emphasis being put on system components research progress and application in equipment layout and dynamic management during the reactor head replacement outage of Unit 2 of GNPS. The paper also emphatically discusses the application prospects of 3-D digital NPP model in the design, manufacturing, construction, operation and maintenance of future NPP. The practices have shown that in NPP operation management system digital plant is the basis for realizing NPP life-time configuration management and the technology is proven; it is also possible within 2 or 3 years to establish China's own 1000 MW class information-oriented reference plant model that takes digital technology as its core. This would greatly enhance the core competitiveness of China's nuclear power industry. The paper also suggests that relevant government departments should play a bigger role in promoting and coordinating the information oriented industrial projects.

Key words: Digital power plant Nuclear power plant Knowledge build-up Configuration management Core competitiveness

1989年的美国工程经理论坛上, 核电运行研究所(INPO)有关专家对核电厂的配置管理(CM)定义如下: 第一, 确定电厂的结构系统部件和软硬件的设计要求, 并以文件的形式加以体现; 第二, 对设计要求的变更加以控制、评估、批准, 并有记录; 第三, 在电厂整个运行寿期内批准了的设计变更和实施状态要有记录, 并保证修改以文件的形式反映在电厂运行、维修、试验、安装、采购及培训要求中。根

综 述
核 电 设 计
工 程 管 理
工 程 建 造
运 行 维 护
核 安 全
核 电 前 期
核 电 论 坛
核 电 经 济
核 电 国 产 化
质 量 保 证
核 电 信 息

据欧洲用户要求（EUR）文件C版第2卷第12章第9节有关质量保证和配置管理大纲的要求，“根据ISO10007，配置管理是一项适用于项目/产品研发、生产、寿命管理的技术和和管理方面的管理准则”。其主要目的是，电厂的设计成果以及在此基础上的持续的设计文件的修正和升级都应和电厂的真实改造和改进相互印证，并与真实的电厂实体保持一致。根据美国NUREG/CR-5147报告，核电厂的配置管理可以定义为以下几个方面，它应该是一个应用于核电厂设计、建造、调试、改造以及运行的整体的计划，包括：核电厂设计成果的验证，核电厂设计成果文件，核电厂改造和改进的相关设计文件，核电厂改造和改进的准则与现实核电厂所应遵循准则的一致性的验证。EUR还要求，配置管理大纲应该与核电厂设计单位的QA大纲结合为一体。可以说，配置管理是新一代核电厂设计、建造、调试以及运行和维护的基本工作和管理准则。

按照这个要求，国内现有的以纸质文件和平面设计手段为主的设计和工程管理手段要完成上述任务是十分困难的。而在用户要求文件（URD）和EUR文件中，都不约而同地提到信息管理系统（IMS）的建设，指出IMS的主要任务之一就是实现配置管理。即某种意义上说，核电厂的全寿期配置管理也必须也只能建立在基于计算机的信息系统之上，这也是信息化手段在核电产业领域应用和发展的一个必然的结果。

然而，在美国和欧洲出版的URD和EUR文件中，并没有阐述如何实现电厂的全寿期配置管理，以何种信息手段来实现配置管理，只对该功能的要求进行广泛而细致的描述。其IMS的一个重要功能描述是，“IMS应该有效地与计算机辅助设计和计算机辅助工程管理紧密地结合在一起，应该有效地集成设计、建造和运行的信息，并在电厂运行的时候移交给运行单位”。

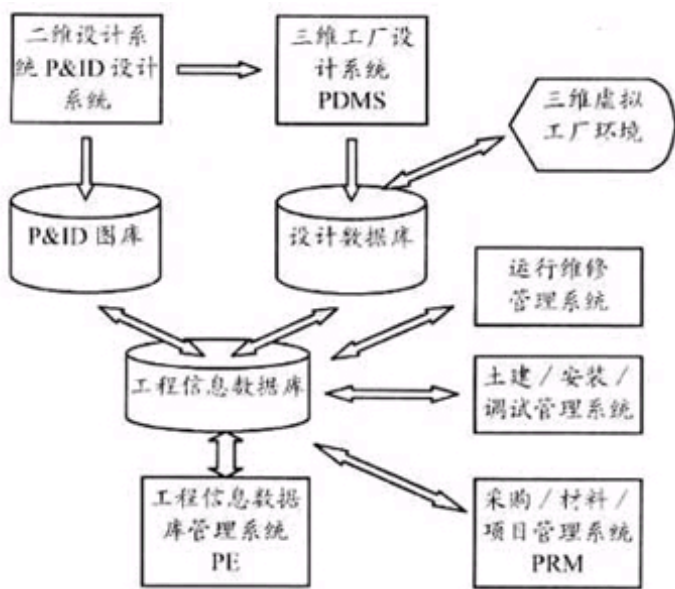
通过认真地调研和考察国际上核电发达国家的核电发展历程以及各个核电供货厂商后发现，他们无一例外地选择了三维设计平台为系统的核心，并以此作为他们逐步实现核电厂全寿期配置管理发展的基础。从法国电力公司、法马通公司、阿尔斯通公司、美国的西屋公司、德国西门子到日本的三菱、日立、东芝公司等众多核电制造厂家，都在70年代末至80年代中期，选择了具有三维虚拟现实特性的三维数字化工厂设计系统作为其核电设计的技术手段和设计管理手段进行核电项目的设计和项目开发。此项技术手段大大提高了设计及设计管理的效率，缩短了设计综合时间，减少了现场设计变更，使核电的设计技术和工程设计管理水平跨上了一个新的台阶。计算机信息技术，特别是三维工厂设计技术，在这样一个发展过程中起到非常重要的作用。在此基础上，各核电发达国家又将三维设计的知识成果延伸到核电厂工程建设管理和生产运行管理的各个阶段，特别是将三维工厂设计成果应用于业主工程管理阶段，如物料和设备采购管理、工程接口控制、工程形象进度控制、工程质量控制点管理以及现场施工组织设计、模块化设计、模块化施工等，这些技术的广泛应用大大地改善了业主和现场施工的工程管理水平，缩短了核电的建设周期，减少了现场工作的准备时间，协调现场各方的工作，获得了显著的经济效益和市场效益。而在工程运行管理领域，上述知识的成果则被广泛地应用于现场维修、现场隔离、维修空间的布置和规划、维修过程动作规划和路径规划、设备历史记录和管理、工程人员培训等多方面。

1 数字电厂全寿期工程信息管理系统的主要特点和基本构成

正是在这样一种背景条件下，广东核电集团技术中心数字电厂项目组于2001年6月份开始核电厂设计基准数据库信息管理系统的研究，通过反复的调查、研究和分析，在认真考察了三维数字化工厂设计开发经验以后，结合业主在核电工程建设中的设计管理、制造监督、施工/安装现场管理以及调试运行等各方面的经验和教训，于2001年10月提出了自己的信息管理系统（IMS）模式，即数字核电厂全寿期工程（DNPED）信息管理系统。该项目于2002年5月正式接受并通过了广东核电集团科技委组织的专家评审，同年7月被批准成为广东核电集团的重点扶持科技开发项目，并依据文件下拨科研预算经费。

其核心理念在于：第一，核电厂的设计应该以三维工厂设计系统为核心设计手段，应用网络技术（局域网和互联网）对核电厂进行数字化异地协同设计；第二，设计的知识和成果应该完整地保留在一个统一的数据库中，并集中控制管理所有技术文件和图纸的出版和升级，提取与设计相关的各种信息，并将设计的数据用于设备和材料的采购和现场管理，实现设计采购一体化管理；第三，业主以及所有核电承包商的工程管理和运行管理都应该集成在这一个中心数据库中，将现场的进度以及现场的建造和安装、调试以及质量控制统一信息集中管理，形成最终的数字电厂，实现核电厂全寿期的数字化管理和知识积累；第四，在此基础上建立核电厂配置管理系统。

经过一年半的努力工作，技术中心完成了数字核电厂基本框架的组成和基本结构的搭建，其基本构成如图所示，由以下几个部分构成：



(1) 设计系统及设计数据库

它包括工程系统设计系统 (ASPECT) 和三维工程设计管理系统 (PDMS)。这部分的主要功能是提供一套设计系统, 进行初步设计和详细布置设计, 并将信息保留在设计数据库中。最大的特点是, 以数据为核心 (data centric), 图数一体化, 在三维实体空间中进行设计, 在绘制流程图和工艺 P&ID 图的同时完成设计关键参数的输入, 实现流程图以及 P&ID 绘制的标准化、信息化, 并能实现二维 P&ID 图设计同三维设计模型的动态可视化相互校验和信息提取。依靠上述设计系统, 可以提供电厂的主要设计参数、系统之间的逻辑关系、所有设备材料清单、接口关系和空间布置关系、出版信息化流程图、工艺原理图以及信息化 P&ID 图、土建接口图、钢结构接口图、管道施工图、通风施工图、管道支吊架施工图、设备布置图等主要设计文件。另外, 还可依靠上述软件系统和数据库实现图纸的发布和版本控制, 并可以同文档设计库连接实现上述设计文件的文档管理。

(2) 工程数据库管理系统及工程信息数据库

主要数据库管理系统是 PE (Project Engineering), 这部分的主要功能是将 P&ID 图中的工艺、仪表、电气、设备参数及数据结构和信息继承并转到一个统一的工程数据库中统一进行管理, 并对设计数据进行版本控制, 同时是其它工程信息 (非设计阶段数据) 补充的界面和接口。该数据库的另外一个作用, 是对设计流程进行管理, 并对设计数据库的数据结构进行拓展, 特别是设备的运行参数、工艺参数、逻辑关系、制造、安装和调试数据。由于设备多种多样, 在工程系统设计以及工厂设计系统中比较难以全面记录, 因此需要利用大型工程数据库进行工程数据管理; 同时可以出版系统设计手册和设备运行维修手册以及应用于设备和系统采购的设计规范书。与文档系统相互连接, 可以实现上述设计文件的控制和管理。

(3) 采购以及设备材料项目管理部分

这部分的功能是上述设计系统功能的延续, 也可以独立于上述设计系统以外, 由其它设计系统提供设计采购数据。这部分的主要功能是将设计的成果数据整合, 应用于工程的采购管理和项目管理之中, 包括设备和材料的统计、聚类分析和价格分析统计, 依据工程进度形成和编制设备/材料采购包, 订单的发布和变更管理, 招投标的管理, 设备/材料在制造厂和现场的验收, 设备材料的发货、催货、到货管理, 设备材料各种相关标准的管理以及其它项目的功能。与文档系统连接可实现对上述文件的控制和管理。

(4) 施工管理以及运行和维修管理部分

这部分的软件系统, 主要是在原有工程信息数据库基础上的开发和应用。由于设计数据库包含最权威的历史数据, 因此在工程量计算、设备材料清单统计以及设备制造、安装和调试维修的历史数据记录上, 工程数据库都可以提供一个完整的数据接口, 使得工程管理的各个阶段的信息都可以在这样一个数据框架下不断地进行补充和丰富。

在以上的四个部分中, 前三个部分已经有了成熟可靠的系统方案, 并在多个工程实践中广泛加以应用, 有成熟的运行和使用经验, 第四部分还没有形成完整的系统, 但各种分散应用的系统较多, 如将三维模型用于核电厂动态安装仿真以及进度仿真和路径规划等。

中国广东核电集团技术中心于2001年8月至10月引入了与理论研究模型最为符合的、在国际市场上发展最快的AVEVA公司VANTAGE系列解决方案，并在此系统的支持下，开展了核电站三维数字电厂的设计/建模工程试验。该项技术被成功地应用于大亚湾核电站的反应堆压力容器顶盖更换中，取得了良好效果，获得来自生产一线和法国专家的一致好评。截至2002年12月底，成功地完成了以下两个阶段的试验性研究工作和一个阶段工程应用工作，主要工作包括：岭澳核电站初步模型的建立和实验，大亚湾核电站三维数字电厂模型及全寿期管理数据库的建立和实验，以及三维数字电厂在大亚湾核电站2号机组反应堆压力容器顶盖更换（简称209大修）2RX厂房20 m平台设备空间布置和动态管理的应用。

在209大修工程应用中，数字电厂不仅仅是提供一种工具，对使用者的意图进行表达，更多是提供了一个实验的场所，将各种专业和各个部门的计划构想集成地反映在统一的真实的三维空间环境之中，极大地提高了专业和专业、部门与部门之间的工作协同效率，有力地推动大修准备的进度，缩短工作准备时间，特别是提供了设备/工具的通道的准确空间布置定位，大大提高现场工作准备工作的准确性和工作效率。该项目的总工期约为50天，如果准备时间和实际工期因此而缩短1天，可增加1天的发电产值100万美元。数字电厂在209大修准备工作中的成功应用，更证明了配置管理在电厂生产运行管理中的重要作用，验证了三维工程设计对核电厂全寿期管理的重要意义。对下一步数字电厂全寿期工程信息管理系统的研究和发展将起到重要推动作用。

3 未来的应用前景和效益分析

通过前一年半时间的艰苦工作和反复试验和测试，我们对数字电厂全寿期工程信息管理系统有了一个更清晰、更具体的认识和感受，以上述成熟的系统加以业主自身的定制和部分二次开发，在现有成熟技术的基础上建立核电厂全寿期配置管理系统是完全可行的。就目前的数字电厂全寿期工程信息管理系统示范项目而言，至少在以下几个方面可以立即投入工程应用，并产生实实在在的效益。

(1) 用于新一轮核电项目的自主化设计与管理。根据技术中心一年半的实践经验，如果新一轮核电项目采用新的设计技术及设计管理系统，在有参考电厂的情况下，如岭澳核电站为参考，在保证人力，没有大的方案改变和额外的工程应力和分析计算的条件下，可以保证用6~10个月的时间，在浇灌第一罐混凝土以前完成核岛土建图纸的90%（模板/接口），钢结构图纸70%（布置/接口），设备管道/通风施工/布置图90%（2吋以上直径管道），主要管道支架60%以上，并完成相应的设计综合。对于非翻版电厂的设计，可以保证进行设计跟随，进行多专业/多设计院的设计综合。可将主要设计冲突和设计变更消灭在设计阶段，实现零误差设计和信息化的设计管理，异地协同的设计环境将大大减少设计审查的强度和频率，同时降低了设计强度和劳动力成本。如果将我们现有的工作成果经过有关专家的认真检查和审核，并重复利用于广三核的工程设计和详细设计，工期将进一步缩短，粗略估计应该可以缩短6个月的翻版设计时间，同时可以将现场变更降低90%。这样，就可以为新项目的建设节省大量的投入和时间。

(2) 用于核电项目的工程管理。推行数字电厂的三维设计技术以及工程项目管理技术，将大大缩短现场变更的处理时间和周期，也可以大大减少施工单位的工作准备时间，加快核电厂的施工进度；可以为业主和施工单位提供准确的设备材料管理手段，缩短采购准备和招投标的周期；与进度控制相结合，可以准确及时地反映施工安装进度，并可为投资控制提供准确的工程量计算；在质量控制上，可以提供准确的质量控制点清单和质量计划，保证质保工作准确及时到位；在设计审查和设计管理领域，可以提供准确的接口管理和房间/系统移交管理；为施工单位提供施工组织设计的虚拟现实空间，从而大大提高工程管理效率和工作准确性，降低整个现场工程管理和施工单位的劳动成本。

(3) 为国家的核电发展积累宝贵的知识财富。数字电厂的建成，实际上是在计算机中建立了一座信息化的核电厂。从目前的技术水平来看，除了不能模拟仿真真实的工艺过程以外，其物理的和逻辑的形式与真实电厂并无本质的区别。它不光可以用于运行电厂的维护/改造和培训，也可以是下一个核电项目的参考电厂，是下一个核电新堆型的创新基础。在此基础上进行核电新项目的开发，开发周期将大大缩短，为中国核电产业产生自己的知识产权、形成核心竞争力打下坚实的基础。

(4) 为现在正在运行的核电厂提供设备管理的基础平台，提供虚拟现实空间，为核电厂的维修改造和人员培训服务，记录设备维修改造的历史，提高设备的可用率。

(5) 本项目具有普遍意义，在国内的电力行业中具有较大的领先性，实施成功将对整个电力行业都将产生重大的影响，可以在整个电力系统中进行推广。根据AVEVA公司的介绍，杜邦公司30多年来工程实施情况的统计，类似项目应用产生的各种直接经济效益如下：

- 可降低10%~30%可研时间；
- 可缩短20%~30% 设计时间；
- 保证低于1%管道设计错误；
- 现场变更工作量降低一个数量级；

- 提高30%设计效率；
- 降低10%~30%质量损失/更改时间；
- 节约10%装配成本；
- 缩短15%~20%调试工时；
- 降低60%预投产成本；
- 削减10%~20%计算机部门成本；
- 降低5%总安装成本（在设计和建设过程中有效的材料控制）。

4 结论和建议

在新一代的核电厂建造过程中引入核电厂全寿期配置管理，是新一代核电厂建造过程与核质保体系密切相关的管理要求，在我国将开始的新一轮核电建设中应该考虑将此项管理要求和管理理念引入核电的项目管理中，以提高我国核电产业整体的竞争力水平。数字电厂全寿期工程信息管理系统示范工程，为在新的核电项目中引入上述管理要求进行了大胆的尝试和初步的探索，取得了一定的成功经验。研究成果证明，将设计阶段的信息和知识加以整理并进行全盘的统一规划，建立数字的信息化的核电厂，并以此为基础建立核电厂配置管理体系，应用于核电厂的全寿期管理，是符合当今世界企业信息管理系统发展方向和潮流的。抓住了企业全寿期的起点的信息/知识积累，为企业实现全寿期内完整全面的系统和设备寿命管理提供了基本数据，也为建造期内的工程管理和项目管理提供了完整的信息工作平台，大大地提高了建造期和运行期内各专业、各工种、各部门的整体协同工作能力和工作效率，并可向ERP等信息管理系统提供基础工程数据和信息，充分保证了企业各项技术信息的一致性和完备性。实践证明，数字电厂全寿期管理系统的整体框架和基本结构是正确的，技术路线和技术方案是先进的、可行的。我们完全有能力依靠自己的力量建立一个试验性的数字核电厂的参考模型，从而实现对一核、二核的技术支持，为三核的设计自主化管理和工程管理提供一个先进的信息管理平台。

建议国家应抓住下一批核电项目上马的宝贵历史机遇，大力推动三维数字工厂设计这一先进的设计技术和工程管理技术，统一数字工厂设计的工业设计标准和编码体系以及标准接口数据集，并建立核工业工厂设计标准数据库，通过委托一家和多家核电业主牵头，负责组织相关设计院和制造商参加的核电项目三维数字工厂设计协会，专门对三维设计的各种设计标准、编码体系、数据接口、通讯方式、异地协同、授权控制进行统一的协商和管理，逐步形成一定的标准系列，并向各个核电项目提供技术咨询和服务。在核电项目充分验证的基础上，向别的工业部门推广，形成更广泛的生产力，以核电信息化带动核电产业化。

参考文献

- [1] Making the Most of IT. Nuclear Engineering International. July 2001.
- [2] Neil Mcphater. IT Helps to Integrate. Nuclear Engineering International. October 2001.
- [3] European Utility Requirements For LWR Nuclear Power Plants. Revision C. State 05, April 2001.
- [4] EPRI. Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document, Revision 6, 1993.
- [5] 王百众, 王若冰, 谢敏等. 数字核电厂全寿期工程信息管理系统. 中国电机工程学会第七届青年学术会议论文集, 2002年9月.
- [6] 王百众. 数字电厂在核电站运行管理中的应用前景. 核动力运行研究, 2002, 15 (2).