

### 核电厂建造和调试管理经验总结

The Summarization of Management Experiences on  
NPP Construction and Commissioning

李洪涛, 丁莹

(苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004)

**摘要:** 从项目的合同形式、许可证申领、质量保证、先进施工技术、采购管理、进度控制等方面简要总结了我国最近建造完工的几座核电厂的实践经验, 供今后新建核电厂项目借鉴。

**关键词:** 核电厂; 建造管理

**Abstract:** From the views of contract type, license application, quality assurance, advanced construction technique, purchase control, and schedule control, this paper sums up the construction experiences of several NPPs built in China in the past few years, to present some reference lessons to the future proposed NPP projects.

**Key words:** NPP; Management experience

我国在20世纪90年代相继开工建设了秦山第二核电厂(2×600 MW, PWR)、秦山第三核电厂(2×720 MW, PHWR)、岭澳核电站(2×900 MW, PWR)及田湾核电站(2×1000 MW, PWR)。目前, 除田湾核电站外, 其他3个项目均已建成发电。

近年来, 全球核电工业出现复苏的迹象, 一些国家重新考虑建造核电厂。同时, 中国各地陆续出现电荒, 电力供应问题成为国民经济持续健康发展的瓶颈, 也成为中国新一轮核电发展的“核”心动力。在国家发展与改革委员会发布的国家电力规划中, 明确了核电“远景规划”: 到2020年, 中国核电装机容量将达到3 600万kW。这个规划意味着, 从2004年起中国每年将至少批准建设2个百万千瓦级核电机组。

目前正在进行前期工作的核电项目有: 广东的岭东、阳江核电项目, 浙江的三门、秦山第二核电厂二期项目, 以及山东的海阳核电项目等, 其中岭东和三门这2个核电项目已批准立项。另外, 还有其他几个省份也在筹划核电项目。

核电厂前期建设资金投入约占核电发电总成本的43%~70%, 明显高于煤电(26%~48%)和气电(13%~32%)。要想使核电具有竞争力, 在确保核电安全可靠运行的同时, 必须降低核电的发电成本, 尤其是要降低核电厂建造和调试期间的资金投入。核电厂的建造和调试周期历来比常规电厂长得多, 如果出现质量问题而耽误工期和增加投入, 则更是雪上加霜。因此, 必须通过采用更加先进的技术和建造方法, 缩短建设周期, 大幅降低建设成本, 才能确保核电工业的持续发展。

为此, 本文对前一时期国内相继建成投产的核电厂的建造和调试经验进行总结, 找出他们在质量、进度、费用三大控制方面的经验和教训, 为我国即将开工的核电项目提供借鉴。

## 1 合同形式决定了项目的管理模式

合同的形式是决定核电项目的管理模式、组织机构和职责分工的重要因素之一。选择一种合适的合同形式是核电工程业主在项目实施前需要做出的重大决策之一。合同形式不同, 业主和承包商的责任范围、组织机构设置和规模就不同, 业主和承包商承担的风险也就不同。但是, 不管采取哪种合同形式, 承包商的责任总限定在合同条款内, 而业主必须保留对核电厂安全性、可靠性和技术可行性的最终法律责任。在核电项目的建造和调试期间, 根据核电厂系统设备的设计和供货的不同, 通常有如下3种合同形式。

### 1.1 “交钥匙”合同

这种合同情况下, 核电项目业主将项目的全部管理职能委托给一个主承包商承担, 主承包商对项目资金的使用和相关的风险负责。业主仍保留对项目和各承包商进行监督与与国家有关管理当局进行联络协调的责任。

秦山第三核电厂是“交钥匙”合同工程, 秦山第三核电有限公司(TQNPC)作为业主选定加拿大原子能公司(AECL)为2×728MW CANDU6型重水反应堆建造的总承包商, 负责核电厂建造期间(商业运行

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

前)总的管理责任, AECL将部分系统的设计和供货合同分包给Bechtel和Hitachi公司, 将核电厂的土建和安装合同分包给国内几家核电工程公司。TQNPC负责场地准备、提供现场的永久性设施和当地合格的工作人员、管理BOP建造活动、负责与监管当局联络许可证事宜、对核电厂的设备制造和核岛建造进行独立的质量监督、参与调试活动等。TQNPC工作的重点是对AECL的监督和管理, 因此职能和接口较简单, 部门和员工数量较精炼。

田湾核电站不是完全的“交钥匙”合同, 采取的是“中俄合作, 以我为主”的建设方式。根据中俄两国政府协议和总合同, 俄罗斯原子能国外建设公司(ASE)作为2×1 060 MW的AES-91型PWR的俄方总承包商, 负责核电厂设计和建造总的技术责任, 负责核岛、常规岛设计及成套设备供应与核电厂调试, 中方江苏核电有限公司作为业主负责工程建设管理、土建施工、围墙内部分设备的第三国采购、电厂辅助工程和外围配套工程的设计、设备采购及核电厂大部分安装工程。

### 1.2 按“核岛”和“常规岛”分两包的合同

这种合同形式是将核电厂建设合同分为核岛和常规岛2个合同包, 当然还会为BOP、燃料供应设立单独的合同。这种合同形式对业主的管理经验和能力有一定的要求, 因此业主可以将工程项目的部分管理活动委托给工程管理公司承担。

岭澳核电工程属于这一类型的合同形式, 岭澳核电有限公司(LANPC)是项目的业主, 对2×900 MW的PWR建造负全面的管理责任。法马通公司负责核岛的设计和供货, 阿尔斯通公司负责常规岛的设计和供货, 北京核工程研究设计院和广东省电力设计研究院分别作为土建和BOP的设计者参与合同的实施。除法马通公司负责主回路的安装外, 核岛、常规岛和BOP的安装分别由国内的几家核电工程公司完成。依托中广核集团的整体实力和在大亚湾核电站建设中积累的经验, LANPC成功地对这种合同形式进行了管理。

### 1.3 按系统分多包的合同

在这种合同形式下, 业主对工程项目的实施承担主要的责任和风险, 同时可能需要签订几十个、甚至上百个合同包。业主可以对每一合同包进行权衡、优化、选择, 并可以最大限度地实现国产化。但是, 由于业主涉及的接口繁多、内容复杂, 必须明确规定每一合同下各方的职责、权限, 控制起来难度相当大。管理不善, 则可能造成成本增加、工期拖延、电厂的安全和质量难以保证。

秦山第二核电厂, 是我国自主设计、自主建造、自主管理、自主运营的首座2×60万kW商用压水堆核电厂。核电秦山联营有限公司作为业主承担核电厂的建造、运营和管理。建造过程中采用“以我为主、中外合作”方式, 吸收、借鉴了国内外核电设计、建造的先进经验, 推动了我国核电建设国产化、标准化、系列化的进程。核电厂的设计分别由北京核工程研究设计院、中国核动力研究设计院、华东电力设计院完成。设备采取多国采购, 在55项定点设备中, 有47项基本实现了国产化, 设备国产化率达到了55%, 大幅提升了我国核电设备制造的能力。

核电项目合同的形式由多种因素决定, 各有利弊。业主单位在确定合同形式时一定要结合本单位的情况、工程管理经验、各类资源状况, 合理确定合同形式, 明确规定业主自身与不同承包商的责任和权限, 充分考虑潜在的各种风险。

## 2 许可证申领是项目顺利实施的保障

虽然目前世界上的核安全技术已经达到了一定的成熟度和高安全标准, 但是各国仍不惜投巨资来满足和提高核安全要求。同时, 各国的核安全监管当局也加强了对核电厂许可证的审查和监督力度。根据我国核安全法规HAF001《中华人民共和国民用核设施安全监督管理条例》的规定, 核电厂的选址、设计、建造、调试、运行和退役必须贯彻“安全第一”的方针。我国实行核设施安全许可制度, 从核电厂的筹备、选址、设计、建造、调试到运行, 许可证申领贯穿整个过程, 每一个新的阶段活动开始前都须取得相应的许可证件。核电厂工程建设阶段, 业主/营运单位需要向国家核安全监管部门申领的许可证件包括《核电厂厂址选择审查意见书》、《核电厂建造许可证》、《核电厂首次装料批准书》以及《核电厂操纵员执照》和《环境影响批准书》等。在这些许可证的申领过程中, 国家核安全监管部门要求申请者提交有关的资料, 对照相关的法律、法规和标准进行仔细认真的技术审查, 要求申请者对有关问题进行解释、纠正和改进。这个过程需要一定的时间和人力物力资源, 所以业主必须与监管部门充分沟通、合作和协调, 避免由此引发的增加成本和拖延工期。核电厂业主和监管当局都是为了确保核电安全这一共同目的在工作, 所以双方相互配合, 共同促进。

为了进行许可证申领, 业主应该:

- (1) 成立一个许可证申领部门, 配备具有相应专业和法律知识的专家; 尽早与监管当局接触, 充分了解监管和许可证要求, 避免误解;
- (2) 根据监管当局的要求和工程进度安排制定许可证申领计划, 取得监管当局的认可;
- (3) 要求承包商予以配合, 提供需要的资料和信息;
- (4) 根据监管当局的要求准备和提交相应的资料;
- (5) 业主与监管当局召开定期会议, 确保充分的沟通和相互了解。

总结岭澳核电站、秦山第二核电厂、秦山第三核电厂、田湾核电站在许可证申领方面的经验, 有以下几点值得新建核电厂借鉴:

- (1) 就监管当局关注的问题, 如拟建核电厂相对参考电厂而言的设计改进, 向监管当局提供充足的论证资料和信息;
- (2) 必须满足中国核安全法规、标准的要求, 必要时对原设计进行改进;
- (3) 要求核电厂设计承包商等提供支持, 完成许可证申请文件, 如安全分析报告;
- (4) 向监管当局提供核电厂引进国的许可证审查和监督的做法和信息, 有关的法规和标准信息;
- (5) 在申领许可证前完成相关的设计活动, 避免因设计问题未定而影响取证。取证后再进行相关的采购活动, 避免采购要求与许可证要求冲突;
- (6) 对于核安全法规中未明确规定的事项, 进行主动澄清、推荐解决方案并获得批准。

### 3 建立和发挥质量保证的职能

质量保证大纲/体系是确保所有工作得以充分地计划、正确地实施和评价的一个重要管理工具，它提供了一种系统地完成工作的方法，最终目的是把工作一次做好。建立和实施质量保证体系是成功建造核电厂的基础。我国的核安全法规HAF003《核电厂质量保证安全规定》要求，为了保证核电厂的安全，必须制定和有效地实施核电厂质量保证总大纲和每一种工作（例如厂址选择、设计、制造、建造、调试、运行和退役）的质量保证分大纲。对核电厂负有全面责任的营运单位必须负责制定和实施整个核电厂的质量保证总大纲，营运单位可以委托其他单位制定和实施大纲的全部或其中的一部分，但必须对总大纲的有效性负责，同时又不减轻承包者的义务和法律责任。

正如第一节中讲到的，合同的形式决定了项目的管理模式，同时也决定了业主和承包商的质量保证组织机构和职能分工。3种合同形式下，业主都不同程度地将部分工作委托给承包商完成，但业主仍须保留的质保职能有：

- (1) 负责建立核电厂项目的质量保证总大纲，提交监管当局审查；
- (2) 负责按法规中的采购要求对承包商进行选择和评价，签订合同；
- (3) 对主要承包商的质量保证体系文件进行审查认可，对其质量保证体系运转的有效性实施质量监督和监查。

总结岭澳核电站、秦山第二核电厂、秦山第三核电厂、田湾核电站在建造期间质量保证方面的经验，有以下几点值得新建核电站借鉴：

- (1) 建立质量保证体系必须满足中国核安全法规的要求，对引进国的质量保证标准与中国的质量保证法规进行对比论证，要求不能低于中国法规；
- (2) 杜绝质量保证工作的形式主义，倡导以绩效为基础的质量保证，强调第一次就把工作做好，减少事后纠错；
- (3) 确保质量保证部门和验证人员的独立性，在承包商内部自检的基础上建立和实施多级质量控制制度；
- (4) 制定质量计划，认真设定和执行控制点要求；
- (5) 业主保留对现场土建和安装活动的质量监督职能，目前常采用的方式是委托独立的工程监理公司进行；
- (6) 认真做好新技术的设计审查和设计改进的变更控制工作，确保技术先进成熟，满足法规标准的要求；
- (7) 建立和实施质量趋势分析制度，做好经验反馈，及时总结发现问题，避免重复发生；
- (8) 有效地开展内部和外部的质量保证监督和监查活动，积极促进各级管理者进行自我评价。

#### 4 采用先进的建造技术及管理方法

现场的建造活动是核电工程中资金投入最大的部分，采用先进的技术和建造方法可有效地压缩工期、降低成本、提高质量。由于核电厂建造期间大量的工作同时交错进行，有土建、机械设备安装、电气设备安装、检查和试验、转运、贮存、焊接、清洗、修理和维护等。同时现场还积存大量的施工材料和工具，如混凝土、钢材、预埋件、模板、脚手架、施工工具等。如果事先对有些工作不能合理地计划和安排，施工技术和方案落后或不尽合理，就可能影响工期和费用。相反，如果采用先进的施工技术和方案，则可以明显地压缩工期和成本。以下举例说明：

##### (1) 秦山第三核电厂大型设备从反应堆安全壳开放顶盖吊装

以往，核电厂设备安装过程中会受到反应堆安全壳的限制，通常是在安全壳筒体上预留一个设备闸门以备大型设备进入。而秦山第三核电厂则首次采用反应堆安全壳顶盖开放式施工的方法，在大型设备如稳压器（103 t）、蒸汽发生器（220 t×4台）、反应性机构平台（43 t）、给水管框架（40 t×2台）、装卸料机桥架（16 t×2台）等的安装过程中，使用大型起重机将其从开放的安全壳顶部吊入。在主要的设备安装完成后再将安全壳的穹顶装上。这一施工方法带来的好处显而易见：以每台蒸汽发生器的吊装时间为例，由原来的2星期缩短为2天。

##### (2) 秦山第三核电厂反应堆安全壳筒体混凝土滑模施工

反应堆安全壳筒体的土建施工，历来采用传统的支模板浇注法。在秦山第三核电厂建造中，我国首次采用大面积滑模施工技术，模板连续液压顶升，快速优质完成了核岛安全壳筒体混凝土浇注施工，并创造了14天4小时同类核岛安全壳筒体施工最短工期记录。这项新技术的成功应用，不仅为秦山三期核电厂创造同类核电厂建造工期最短的记录起到了重要作用，同时也为我国核电厂反应堆安全壳的土建施工开创了新的工艺。

##### (3) 岭澳核电站和秦山第二核电厂安全壳穹顶整体吊装

岭澳核电站安全壳穹顶整体重143 t，直径37 m，高11 m。秦山第二核电厂安全壳穹顶整体重173 t。这两座核电厂均采用了“地面拼接，整体吊装”的施工方案，此前的秦山一期、大亚湾核电站的安全壳穹顶都是分两片吊装，就位后拼接而成的，这一工作通常需要2个月的时间。

##### (4) 大量采用模块化、工厂化、预制化施工

核电厂预埋件和管道、支架、通风、钢结构的预制与安装，占了建筑安装施工的大部分工时。尤其是系统繁多、数量庞大的各类管道的预制与安装进度，从根本上决定着核岛的安装进度。因此，在岭澳、秦山二期、秦山三期和田湾核电站的建造中均采用模块化施工方法，加大工厂化、预制化程度，在工程现场建造了具有相当规模的预制加工基地，实现预埋件、钢结构、管道、支架、通风以及部分电气管、仪表管的工厂化预制。这样，可以提高施工效率，保证产品质量，从而有效地提高现场安装进度。

##### (5) 广泛应用新的焊接技术

核电厂设备安装过程中，焊接的质量和进度至关重要。在岭澳、秦山二期、秦山三期和田湾核电站的建

造中均采用先进的焊接设备和焊接工艺，如钢结构预制采用埋弧自动焊工艺，管道、支架预制采用CO<sub>2</sub>半自动焊工艺，某些特殊管道焊接采用全位置自动焊机等。此外，在加工厂和施工现场采用了大量的先进逆变式焊机，在无损伤检测中采用了先进的 $\gamma$ 射线机和自动洗片机，极大地提高了焊接的速度和质量。焊接新技术的广泛应用，在保证焊接质量的同时，焊接工作效率提高了20%，有效地保证了工程的进度。

## 5 加强对采购活动的管理

核电站建造期间需采购的物项和服务主要有两大类，一类是关键系统和设备的设计和制造，另一类是现场的土建施工和设备安装。为了使采购的物项和服务满足核电站的设计要求，确保核电站建成后能够安全可靠地运行，必须切实做好采购过程的质量控制，如对供应商的评价和选择、对合同执行过程的控制、外部监查、出厂验收和收货检查等。

### 5.1 选择一个好的承包商

目前在核电工程中已普遍采用招标投标制度，在签订合同前业主对潜在的承包商按照合同要求提供物项或服务的能力和以往的业绩进行认真评价，择优选用。土建和安装承包商基本在国内几家知名的核工程公司选定，他们大多已参加过核电站工程的建造，积累了一定的技术能力和经验。而设备设计和制造合同由于数量大，评价和选择供应商的工作量和难度相对较大，我国从1992年开始实施民用核承压设备设计、制造、安装活动资格许可证制度，目前已有上百家单位取得国家核安全局颁发的资格许可证，这为业主选择合格的承包商提供了便利条件。但是，更多的核承压设备以外的物项需要业主严格按标准要求去进行评价和选择。

### 5.2 签订一个好的合同

合同是对业主和承包商工作任务、责任、权利的约束，内容包括工作范围、技术要求、检查和试验要求、进入供方设施的规定、遵守的质量保证标准、文件和记录要求、缺陷和不符合项的控制、对分包活动的控制等。合同的内容一定要明确严谨，避免疏漏和含糊不清，便于操作。以下是一些合同规定不清的例子，应引以为戒：

- (1) 承包商负责的工作范围不具体，双方就此难以达成共识，承包商对合同中未明确的工作内容进行索赔；
- (2) 业主到供方现场进行检查监督的权利未在合同中明确，承包商拒绝接受；
- (3) 对不符合项的定义不明确，难以操作，承包商借故不向业主报告质量问题；
- (4) 对分包活动没有控制要求，承包商向不具备资格的单位分包。

### 5.3 加强合同执行过程中对承包商的监督

对承包商的控制方式有质保监查、监督等。质保监查一般是按计划定期对承包厂质量保证体系实施的有效性进行检查，业主质保部门有能力完成。

而质保监督，由于其对人员素质能力、工作频度都有较高的要求，所以单靠业主质保部门一家难以完成。在岭澳、秦山二期、秦山三期、田湾核电项目中，对现场的土建和安装承包商，业主自己设立相应部门或委托专业的工程监理公司进行现场质量监督，对大量的国内外重要设备制造承包商，业主则派驻专业技术人员进行现场监造。监督人员事先对承包商的设备技术文件和质量计划进行认真审查，然后按照质量计划和有关文件的要求进行过程监控和控制点上的见证。控制点的出席率不得低于规定要求。对承包商对不符合项的处理方案要进行审查，发现问题及时妥善地解决。这一做法可减少因对承包商监督控制不力造成的返工、费用超支、延误工期等后果。

### 5.4 做好验收工作

除了做好对承包商执行合同过程中的监控，还应做好验收工作。重要物项要在源地进行验收，对照采购合同和技术文件检查物项的实体质量、关键尺寸、表明粗糙度和清洁度、包装条件、不符合项的解决状况、随供文件的完整性和准确性等。所有物项到达现场都应进行开箱检查，排除运输途中造成的缺陷。国内核电工程中出现过因关键设备采购控制不力造成的工期延误和经济损失，这些问题如果完全遵守法规标准中的采购要求去做，是可以避免的。今后新建核电项目一定要引以为戒。

## 6 加强对建造和调试进度的控制

核电站工程规模巨大，接口复杂。建立科学的符合工程特点的进度控制体系并严格实施是项目成功的关键。进度控制体系要求：

### (1) 制定科学合理的工程进度计划

秦山第三核电站在总合同规定的一级进度计划下，在总合同生效后6个月内制定了工程二级进度协调和控制计划，包括8500个工程节点，在工程进展过程中进行了3次修订以反映实际的状态。各承包商按照二级进度计划在工程第一年内制定了三级进度计划。这些进度计划由专门开发的计算机软件进行管理和控制。

岭澳核电站共制定了6级进度计划。一级进度计划设定了工程的约200个重大里程碑和关键活动。二级进度计划包括了核岛、常规岛和BOP的设计、土建、安装、调试等主要活动，用以确定合同间的接口和协调，是承包商制定三级进度计划的基础。三级进度计划由承包商制定，业主审查，包括构筑物、系统建造的起止日期。四级进度计划是6个月滚动计划，同样由承包商制定。五级进度计划是月度计划。六级进度计划是周计划。

### (2) 工程进度的协调控制

工程协调以预见性协调为主，就是要根据进度计划事先跟踪落实图纸、设备、材料和人力供应状况以及工程接口条件，在相关数据库的引导下，制定协调工作清单。同时，明确工程的关键路径，抓好关键路径控制工作是计划与协调之首要任务，也是确保项目总体进度之关键。在做好工程进展状况统计的基础上，进行有效的工程进度分析和趋势分析，建立施工进度预警体系，发现影响工程进度的根本原因，并

提出纠正建议。

### (3) 优化资源和接口管理

在建造期间，充分利用工程现场有限的资源。实施全天候施工和24 h作业，为防止不利天气条件的影响，在反应堆厂房搭设临时的顶盖，在关键工作区域和工序合理安排施工力量，几班连续作业。前后顺序不重要和相互影响不大的作业可以并行开展。调试期间合理安排调试试验的先后顺序，做好各阶段的移交工作。

### 7 结束语

几座核电厂工程的建造经验表明，采用科学合理的施工技术和管理方法可以有效地提高建造质量，压缩工期和成本，使建成后的核电厂能够安全、稳定、经济地运行，更加具有竞争力。