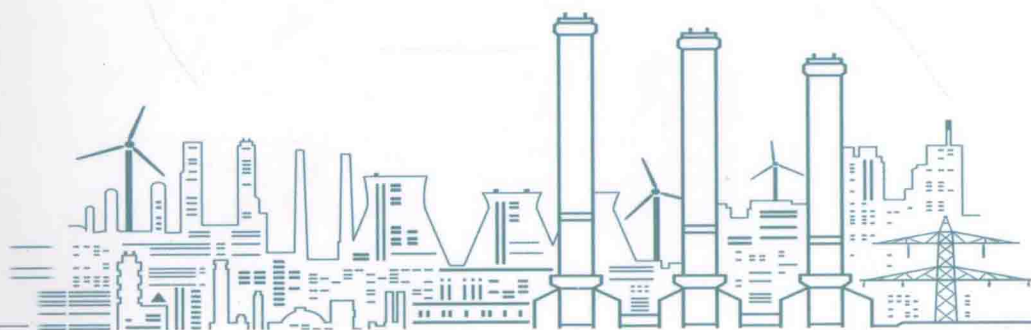
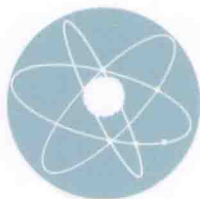


先进核电技术 经济性分析

黄光晓 郭奇勋 | 编著



THE ECONOMIC ANALYSIS OF
ADVANCED NUCLEAR
POWER TECHNOLOGY



清华大学出版社

先进核电技术经济性分析

黄光晓 郭奇勋 编著

清华大学出版社

北 京

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

先进核电技术经济性分析 / 黄光晓, 郭奇勋 编著. —北京: 清华大学出版社, 2014

ISBN 978-7-302-38221-8

I. ①先… II. ①黄… ②郭… III. ①核电站—工程技术—经济分析 IV. ①TM623

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第230629号

责任编辑: 陈 莉 蔡 琦

封面设计: 周晓亮

版式设计: 思创景点

责任校对: 邱晓玉

责任印制: 王静怡

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者: 北京富博印刷有限公司

装 订 者: 北京市密云县京文制本装订厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm

印 张: 24

字 数: 659 千字

版 次: 2014 年 11 月第 1 版

印 次: 2014 年 11 月第 1 次印刷

印 数: 1~1500

定 价: 45.00 元

产品编号: 057558-01

前 言

核电技术的公众可接受性主要取决于它的安全性及对环境的影响,但是,核电技术的市场竞争力则在很大程度上取决于它的经济性。要推动新一代的核电技术大规模商业化运营就必须在保障更高的安全性的前提下进一步提高其经济性,使之能够与传统化石能源和新兴的可再生能源竞争。

近年来,我国通过自主创新与引进消化吸收国外先进核电技术相结合,核电技术已经具备了接近世界先进水平的研发能力,核电站的建设、运行、管理水平也已经达到世界先进水平;核电设备制造能力也不断提高,设备自主化水平不断增强。但是,目前国内对于不同核电技术路径的比较,特别是经济性的研究仍偏少,尤其是对第四代核电技术及新概念核电技术的经济性分析仍较为薄弱。

有鉴于此,厦门大学能源学院开展了对现有的三代核电技术和目前国际上公认的四代核电技术,以及包括小型堆和行波堆等的创新概念核电技术的经济性研究,通过大量的文献梳理,对不同核电技术路径的技术特性进行归纳和总结,提出了不同代际和不同路线的先进核电技术的技术经济性分析框架,希望能够为今后中国先进核电技术研发、技术路径选择和经济性分析提供参考与借鉴。

本书由厦门大学能源学院黄光晓副教授和郭奇勋副教授合作编著,依托中央高校基本科研业务费专项项目“先进核电技术经济性分析”和“核电反应堆安全高效型核燃料的研究与设计”的资金资助,在国际著名核电专家、国家千人计划特聘教授、厦门大学能源学院院长李宁教授的指导下组建了包括周芳、谢秋荣、肖飞龙、尹昊和尹东明等博士研究生在内的研究团队,开展了大量的研究工作。

我们希望能够通过本书为我国核电技术发展提供一些有益的参考和借鉴,更希望能够在此基础上与国内核电企业就未来核电技术路径的选择进行广泛的探讨,为我国核电事业贡献我们微薄的力量。

黄光晓 郭奇勋
2014年9月

目 录

第1章 核电技术的经济性分析	1
1.1 核电技术的发展演化	1
1.1.1 技术类型	1
1.1.2 技术路径	2
1.1.3 技术特性	4
1.2 核电技术经济性分析的基本 框架	5
1.2.1 基本概念	5
1.2.2 基本框架	6
1.3 核电技术经济性分析的影响 因素	11
1.3.1 基本特点	11
1.3.2 影响因素	11
1.3.3 基本流程	13
参考文献	14
第2章 第三代核电技术的经济性 分析	15
2.1 AP1000 技术经济性分析	15
2.1.1 AP1000 技术发展 路径	16
2.1.2 AP1000 的技术特点	16
2.1.3 平准发电成本与首次 建造成本	18
2.1.4 规模效应与学习效应	19
2.1.5 AP1000 依托三门核电 项目造价分析	22
2.2 EPR 技术经济性分析	26
2.2.1 EPR 核电技术的概况	26
2.2.2 EPR 的工程特性	27
2.2.3 EPR 常规岛建造技术 经济性特点	29
2.2.4 EPR 的技术经济性 特点	32
2.2.5 台山 EPR 核电站	34
2.2.6 奥尔基洛托 3 号 核电站	35
2.2.7 弗拉芒维勒核电站	36
2.3 ABWR 技术经济性分析	36
2.3.1 ABWR 的技术性概况	36
2.3.2 TVA 贝尔丰特 ABWR 基本情况、工程计划和 成本分析	43
2.4 国内外第三代核电的经济性 分析	62
2.4.1 国外在役核电的 经济性	62
2.4.2 中国在役核电的 经济性	65
2.4.3 世界近期核电站的 造价	69
参考文献	72
第3章 第四代核电技术的经济性 分析	74
3.1 第四代核电技术的经济性 分析框架	74
3.1.1 成本估算的目标	75
3.1.2 成本估算方法改进	76
3.1.3 EMWG 模型	78
3.1.4 GIF 会计代码(COA)	78
3.2 EMWG 模型结构	84
3.2.1 完整核能经济模型的 流程图	84

3.2.2	自上而下成本估算法与 自下而上成本估算法	85	3.6.3	建造成本	108
3.2.3	将成本估算整合在设计 过程中	86	3.6.4	其他项目成本	109
3.2.4	成本估算指南中一些需要 关注的品质因数	86	3.6.5	电厂成本的自下而上 详细估算	109
3.3	研究、开发和验证成本的估算 科目	87	3.6.6	范围/数量开发的约束 注意事项	109
3.3.1	选择估算科目的理由	87	3.6.7	其他工厂	112
3.3.2	RD&D 活动的综合会计 代码	88	3.7	风险总资本	113
3.4	通用框架和假设	91	3.7.1	现金流	113
3.4.1	项目执行	91	3.7.2	建造利息	113
3.4.2	商业化电厂	92	3.7.3	应急	113
3.4.3	估算	92	3.7.4	总资本投资成本	114
3.4.4	项目会计代码	92	3.7.5	LUEC 的资本成本 部分	115
3.4.5	项目范围定义	93	3.8	燃料循环成本	116
3.4.6	包含/不包含/限定 条件	94	3.8.1	平准化成本的标准计算 方法	116
3.4.7	项目估算	94	3.8.2	G4-ECONS 采用的“单位 成本 x 年现金流”法	116
3.4.8	项目计划	95	3.8.3	商用材料和燃料循环 服务的成本估算	117
3.4.9	区域和场址定义	97	3.8.4	非商用燃料循环服务的 成本估算	119
3.4.10	FOAK 电厂	97	3.8.5	G4-ECONS 建立的燃料 循环模型	120
3.4.11	NOAK 电厂	98	3.9	平准化发电成本的计算	120
3.4.12	估算报告格式	98	3.9.1	运行和维护成本	121
3.5	自上而下成本估算	99	3.9.2	退役和拆除成本	124
3.5.1	创新系统设计者们的成本 模型需求	100	参考文献		125
3.5.2	自上而下建模原理	100	第 4 章	钠冷快堆的技术经济性分析	128
3.5.3	第四代核能系统的自上 而下法建模	103	4.1	钠冷快堆概况	128
3.5.4	自上而下法估算间接 资本和非资本寿期 成本	104	4.1.1	钠冷快堆定义及 特点	128
3.5.5	其他寿期成本元素	105	4.1.2	钠冷快堆运行现状	130
3.6	自下而上成本估算	105	4.1.3	钠冷快堆的安全性	134
3.6.1	成本分类	106	4.2	钠冷快堆经济性分析方法	140
3.6.2	具体的成本估算 指南	107	4.3	钠冷快堆的实际算例	144
			4.3.1	框架开发以及 方法论	145

4.3.2 概率风险分析模型	146	5.4.3 结论	269
4.3.3 在 TNF 内使用重要措施 分析安全性	147	参考文献	269
4.3.4 确定潜在的替代 设计	148	第 6 章 小型堆的技术经济性分析	272
4.3.5 经济模型的发展	150	6.1 小型堆的优缺点	272
4.3.6 方法示例	150	6.1.1 小型堆的优点	272
4.3.7 经济模型的开发	150	6.1.2 不利因素	275
4.3.8 收集的数据	151	6.2 各国小型堆概览	275
4.3.9 参考模型的开发	173	6.2.1 轻水堆	275
4.3.10 ALMR 的说明	175	6.2.2 高温气冷堆 (HTGR)	278
4.3.11 参考模型的缺陷	181	6.2.3 液态金属冷却快中子堆 (FNR)	279
4.3.12 通过使用参考模型使 成本更经济	182	6.2.4 熔盐反应堆(MSR)	280
参考文献	192	6.2.5 小型堆能源产品和 特性	281
第 5 章 第四代核电技术的其他五种堆型 技术经济性分析	198	6.3 无现场换料的小型堆	282
5.1 第四代核电技术其他五种堆型 技术概况	198	6.3.1 非现场换料小型堆的 特点	283
5.1.1 气冷快堆(GFR)	198	6.3.2 非现场换料小型堆的 附属功能	283
5.1.2 铅冷快堆(LFR)	202	6.3.3 近期研发设计的堆型 概述	283
5.1.3 熔盐堆(MSR)	207	6.4 小型模块堆	284
5.1.4 超临界水冷堆 (SCWR)	212	6.4.1 小型模块堆模块化的 定义	284
5.1.5 超高温气冷堆 (VHTR)	215	6.4.2 小型模块堆的特性	284
5.2 LFR 与 ETDR 的成本估算	217	6.5 小型堆经济性分析	286
5.2.1 Top-down 方法	218	6.5.1 小型堆 LUEC 估算 方法	286
5.2.2 Bottom-up 成本估算	225	6.5.2 影响因素	288
5.3 高温气冷堆资本成本与运营 成本估算	230	6.5.3 小型堆 LUEC 估算	289
5.3.1 资本成本建模概述	232	6.5.4 小型堆 LUEC 估算 结果	299
5.3.2 运营成本估算	253	6.5.5 SMR 和 LR 成本 比较	307
5.3.3 退役成本	263	6.5.6 SMR 与非核发电技术 成本比较	313
5.4 第四代核电技术的成本估算 比较	264	6.5.7 各国小型堆竞争力	315
5.4.1 所选的第四代核反应堆 设计与燃料循环	264	6.6 小型堆实例分析	322
5.4.2 成本估算结果	265		

6.6.1 韩国 SMART	322	7.1.1 反应堆物理	339
6.6.2 俄罗斯 SVBR-100	323	7.1.2 参数的研究和冷却剂的选择	343
6.6.3 BILIBINO 市的 SMR 应用	324	7.1.3 行波堆的安全性分析	346
6.6.4 中国的 ACP100	324	7.2 行波堆的工程实践	353
6.7 小型堆潜在市场	325	7.2.1 泰拉一号(TP-1)	354
6.7.1 小型堆应用和应用方向	325	7.2.2 泰拉能源核电站(TPRP)	361
6.7.2 小型堆应用地区	326	7.2.3 面临的挑战	363
6.7.3 小型堆潜在市场	328	7.3 行波堆的经济性分析	364
6.8 我国小型堆可行性分析	330	7.3.1 资本成本	365
6.8.1 小型堆发展背景	330	7.3.2 燃料成本	365
6.8.2 小型堆区域供热的市场潜力分析	331	7.3.3 中子的经济性——利用额外的中子	366
6.8.3 技术可行性分析	332	7.3.4 资源利用的经济性	367
6.8.4 经济可行性分析	333	7.3.5 废物处理的经济性——深埋储存	370
6.8.5 面临的挑战	333	7.3.6 铀浓缩产能减少和无需后处理	372
6.8.6 应对的路径	335	参考文献	374
6.9 总结	336		
参考文献	336		
第 7 章 行波堆的技术经济性分析	338		
7.1 行波堆的技术特点	339		

核电技术的经济性分析

核电技术的公众可接受性主要取决于它的安全性及对环境的影响,但是,核电技术的市场竞争力则在很大程度上取决于它的经济性。要推动新一代的核电技术大规模商业化运营,就必须在保障更高的安全性的前提下进一步提高其经济性,使之能够与传统化石能源和新兴的可再生能源竞争。

以西屋公司的 AP600 为例,虽然 1999 年美国核管会(NRC)就给 AP600 颁发了设计许可证,允许其正式进入商业发电领域,而且 AP600 也达到了其预期的成本目标。但是其规模经济效应未显现,单位功率的建设投资成本较高,仍不具备与当时燃煤电厂和燃气电厂相匹敌的市场竞争力,直接导致 AP600 技术无法进行大规模商业化运营。按照 2003 年价格水平计算,在当时美国的环境政策下,也就是不考虑温室气体减排成本时,AP600 的平准化单位发电成本(LUEC)为 $4.1\sim 4.6\text{ ¢}/\text{kW}\cdot\text{h}$,远高于燃煤电厂 $3.3\sim 4.1\text{ ¢}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 和燃气电厂 $3.5\sim 4.5\text{ ¢}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 的发电成本。因此,西屋公司在继承和发展 AP600 的设计先进性和成熟性的基础上开发了 AP1000 堆型,在进一步提高安全性的同时,弥补 AP600 在经济性方面的不足,增强其市场竞争力。按西屋公司的估算,相对于 AP600 的造价,AP1000 的造价增加得不多,而单机功率提高了很多,一座双机组电厂的发电成本估计可降至 $3.0\sim 3.5\text{ ¢}/\text{kW}\cdot\text{h}$ (2003 年价格水平),如果考虑未来温室气体减排成本,那么 AP1000 就具有足够的市场竞争力。

核电厂发电成本主要由建设投资、运行与维护(O&M)成本以及燃料循环成本构成。建设投资中通常包括隔夜成本、因物价变化而导致的逐年递增的边际成本、因支付利息而带来的财务成本。总的运行与维护成本中又分为固定部分和可变部分,以及核电厂退役费用和废物处置费用。燃料循环成本中除了新燃料费用外,还需要考虑乏燃料后处理费用以及可能发生的燃料再循环费用。

上述成本构成及费用高低除了与核电项目的技术经济特性密切相关外,还涉及非常复杂的外部因素。因此,本章将对现有的核电技术经济性分析框架进行梳理,对核电技术经济性的基本概念和基础分析框架进行归纳和总结,并对核电厂从研发、建造、运营到退役等一系列环节对核电技术经济性的主要影响因素进行剖析,为建立先进核电技术经济性的分析框架提供参考。

1.1 核电技术的发展演化

1.1.1 技术类型

核反应堆是一类提供动力的“动力堆”,按其使用的核燃料、冷却剂、慢化剂类型以及中子能量的大小,可分为 4 种类型。

1. 轻水堆(LWR)

轻水堆采用普通水(轻水)为冷却剂兼慢化剂。轻水堆分为沸水堆(BWR)和压水堆(PWR)两个类型。轻水堆在当前世界的核电站中使用最多,占 85% 左右。压水堆核电站是

以压水堆为热源的核电站,主要由核岛和常规岛组成。压水堆核电站核岛中的四大部件是蒸汽发生器、稳压器、主泵和堆芯。核岛中的系统设备主要包括压水堆本体、一回路系统以及为支持一回路系统正常运行和保证反应堆安全而设置的辅助系统。常规岛主要包括汽轮机组及二回路等系统,其形式与常规火电厂类似。沸水堆核电站是以沸水堆为热源的核电站,以沸腾轻水为慢化剂和冷却剂,并在反应堆压力容器内直接产生饱和蒸汽的动力堆。沸水堆与压水堆同属轻水堆,具有结构紧凑、安全可靠、建造费用低和负荷跟随能力强等优点。它们都需使用低富集铀做燃料。沸水堆核电站系统有主系统(包括反应堆)、“蒸汽—给水”系统、反应堆辅助系统等。

2. 重水堆(HWR)

重水堆采用“重水”(D₂O)作为冷却剂兼慢化剂。由于重水对中子的慢化性能好,吸收中子的概率小,因而重水堆可以采用天然铀作为燃料,无须浓缩。重水堆在核电站中占10%左右,是发展较早的堆型,有各种类别,主要可以分为压力容器式和压力管式两类。目前已实现工业规模推广的只有加拿大的坎杜型压力管式重水堆核电站。

3. 气冷堆(GCR)

气冷堆采用气体如二氧化碳(CO₂)、氦(He)作为冷却剂,石墨作为慢化剂。当前多以氦为冷却剂,可获得800℃的高温热源。气冷堆在核电站中占2%~3%。气冷堆经历了天然铀石墨气冷堆、改进型气冷堆和高温气冷堆三个发展阶段。天然铀石墨气冷堆是以天然铀作为燃料,石墨作为慢化剂,二氧化碳作为冷却剂的反应堆;改进型气冷堆(AGR)设计的目的是改进蒸汽条件,提高气体冷却剂的最大允许温度,石墨仍作为慢化剂,二氧化碳作为冷却剂;高温气冷堆(HTR)则是以石墨作为慢化剂,以氦气作为冷却剂。

4. 快中子增殖堆(FR)

快中子增殖堆即快堆,这种反应堆无须慢化剂,直接应用能量较大的快中子,采用天然铀为燃料。天然铀中绝大部分是铀-238,它在反应堆的反应中吸收快中子成为钚-239,钚-239也是核燃料,能在快中子作用下产生链式反应。快堆的传热问题特别突出,通常采用液态金属钠(Na)作为冷却剂。目前快堆核电站在各种堆型中比例很小,不到1%。

1.1.2 技术路径

1. 第二代核电技术

第一代核电(Gen I)为原型堆,其目的在于验证核电设计技术和商业开发前景。第二代核电(Gen II)在其基础上,实现商业化、标准化、系列化、批量化,为具有较高经济性的商用核反应堆。自20世纪60年代末至70年代广泛建造的大批单机容量在600MW~1400MW的核电站,以美国西屋公司Model212、Model312、Model314、Model412、Model414、System80等为代表。目前,世界正在运行的439座核电站(2013年1月16日,IAEA)的主力机组都属于第二代核电,主要堆型是压水堆、沸水堆、重水堆和石墨气冷堆等。

2. 第三代核电技术

从20世纪80年代开始,国际核能界就对第三代核电(Gen III)技术开展了广泛的研究。从20世纪90年代开始,国际核能界在积极推动对第二代核电的延寿挖潜以应对二代核电机组老化问题的同时,将关注的重点逐渐转向第三代的工程建设和三代加(Gen III+)的研发,并取得了大量有价值的工程经验和研究成果。

第三代核电具有的技术经济特性包括:标准化设计,以利于许可审批、降低造价和缩短建造周期;简单化设计,但更加耐用,使其更易于运行并更不易受到运行干扰的影响;更高的可利用率和更长的运行寿期,通常为60年;大幅堆芯熔融事故概率降低;环境影响降到最低;更高的燃耗深度,以减少燃料的用量和由此产生的废物数量;可燃毒物,以延长燃料寿

命。第三代核电与第二代核电在设计方面最大的不同是拥有很多“非能动/无源”或“被动”安全特性,所谓的非能动特征就是“被动”安全系统,这意味着即使所有的电力都中断,冷水也会继续流入冷却反应堆燃料。对于 AP1000 核反应堆,其在堆芯上方有一个蓄水池,依赖重力实现水循环,具有非能动特征。这些特性不要求“主动/有源”控制或介入操作来避免非正常工况下的事故,其可以依赖重力、自然对流或对高温的阻隔来实现。

第三代核电能够满足美国先进轻水堆用户要求文件(URD)或欧洲用户要求文件(EUR)的基本要求,与第二代核电相比,其在加大堆芯安全裕量、增强严重事故预防和缓解能力、提高电厂数字化与信息化水平等方面有了明显进步。而三代加核电的堆型则大都采用了独特的技术,简化了系统,进一步提高系统的安全性和经济性。

3. 第四代核电技术

第四代核电(Gen IV)技术有别于原有的对核电技术或先进反应堆的概念,而是以核能系统概念出现的。第四代核电最先由美国能源部的核能、科学与技术办公室提出,始见于1999年6月美国核学会夏季年会,在同年11月的该学会冬季年会上,发展第四代核电核能系统的设想得到进一步明确;2000年1月,美国能源部发起并约请阿根廷、巴西、加拿大、法国、日本、韩国、南非和英国等9个国家的政府代表开会,讨论开发新一代核能技术的国际合作问题,取得了广泛共识,并发表了“九国联合声明”。随后,由美国、法国、日本、英国等核电发达国家组建了“第四代核能系统国际论坛”(GIF),其目标是在2030年左右,向市场推出能够解决核能经济性、安全性、废物处理和防核扩散问题的第四代核电核能系统。

GIF认为在可持续发展和防止温室效应方面,核能够发挥很大的作用,而相关的新一代核能系统的国际合作围绕着以下几方面进行。

- 持久性:有利于节省自然资源(铀)以及使废物量最少化。
- 经济竞争性:目标是降低投资费用与运行费用。
- 安全和可靠性:目标是(如果可能)排除疏散核电厂外部人员的必要性。
- 加强防核扩散和实体保护能力。

此外,考虑到长期需求的变化,未来的核设施不应该只局限于发电,应能满足其他需要,如产氢或海水淡化等联合生产。

2002年,GIF对国际合作项目中最有希望的未来反应堆概念进行了选择,选择了在能源可持续性、经济竞争性、安全和可靠性以及防扩散和外部侵犯能力方面最具前景的6种第四代核能系统。选定的6种系统包括三种快中子堆,即带有先进燃料循环的钠冷快堆(SFR)、铅冷快堆(LFR)和气冷快堆(GFR),以及三种热中子堆,即超临界水冷堆(SCWR)、超高温气冷堆(VHTR)和熔盐堆(MSR)。其中,5种系统采取的是闭式燃料循环,并对乏燃料中所含全部锕系元素进行整体再循环。这6种设计概念都改进了经济性,增强了安全性,使废物和防核扩散燃料循环最小化。在所有概念中,其中技术最成熟的是钠冷快堆(SFR),美、俄、英、法、日、德、印等国已经建造过功率10~1200MW,堆型包括实验堆、原型堆和经济验证性堆等的共18座钠冷快堆(SFR),积累了约300堆·年的运行经验。目前在役的钠冷快堆有俄罗斯的BN600快堆、法国的250MW超凤凰快堆和印度的40MW快中子增殖实验堆(FBTR)、中国的实验快堆(CEFR)等。

4. 行波堆(Traveling Wave Reactor,TWR)

行波堆(TWR)不同于现有商业化的堆,通过对异质堆芯燃料的巧妙分布和运行控制,核燃料可以从一端富集铀启动点燃,裂变产生的多余中子将周围不易裂变的铀-238转化成易裂变的钚-239,当达到一定浓度之后,形成自持链式裂变反应,同时开始焚烧在原地生成的燃料,形成行波。行波以增殖波先行焚烧波后续,一次性装料可以连续运行数十年甚至上百。为维持运行,堆芯燃料部分保持常规的大小质量,按正常方式通过核能将热量带出堆

芯,产生蒸汽,其余部分为烧尽或待增殖的燃料。除最初的启动源需要浓缩铀,其他所有燃烧都可以来自天然的材料。因此不需要分离浓缩。形象地说,行波堆像蜡烛,用火柴点燃后逐渐烧尽,并可以点燃其他蜡烛。

行波堆技术能够将贫瘠的核能原料,在反应堆内直接转化为可使用的燃料并充分焚烧利用。作为核反应堆的主要燃料,天然铀中只有约 0.7% 的同位素能够被直接利用,但是利用行波堆技术,铀资源的 30%~40%,甚至 60%~70% 可以物尽其用。与其他核反应堆不同的是,行波堆技术可以直接利用现在被废弃的铀同位素,甚至只经过简单转化的核电站废弃燃料,对其进行深度焚烧,从而产生巨大能量,将沉重废物负担转换为高额经济效益。从这一点来看,其与我国不久前投产的中国实验快堆(CEFR)很相似。但行波堆的另一大优势就是基本无须换料及后处理,不仅可以提高运行安全性,更能极大降低核扩散风险。

1.1.3 技术特性

总体而言,核电技术发展的趋势就是提高安全性和改善经济性。在核电市场竞争中,一个机型能保持持续稳定的发展而不被市场竞争所淘汰,关键是能够确保安全,在经济上有竞争力。近十年来,指导核电技术发展的美国用户要求文件(URD)、欧洲用户要求文件(EUR)、最新提出的第四代核能系统的性能要求以及美国最近颁布的新的能源政策都贯穿一条主线,就是要提高安全性、改善经济性,在满足确定的安全要求的条件下,争取最好的经济性。这一思路不仅对核电技术的发展产生了深刻的影响,也对核电经济尤其是新系统的经济性产生深刻的影响,具体表现在以下几个方面。

1. 单机容量继续向大型化方向发展

为提高核电站的经济性,新的核电技术将继续向大型化方向发展:俄罗斯提出建造 1500MW 的压水堆机组的概念;日本三菱公司提出了建造 1500~1700MW 的压水堆机组;日本的东芝、日立提出的 1700MW 的 ABWR II 的概念;美国西屋公司在 AP600 的基础上向 AP1000 发展,也达到了 1100MW,而法国阿海珐公司开发了 EPR 单机功率也达到了 1600MW。大型化趋势必然对核电项目的建设投资提出更高的资金要求和融资成本负担。

2. 系统采用非能动安全系统和简化系统、减少设备来提高安全性

目前国际上正在准备进入大规模建设的核电项目主要还是参照第三代核电和三代加核电的设计概念,一般都在原有设计基础上增加非能动安全系统代替原有的主动安全系统,但不追求全部采用非能动安全系统,而根据技术成熟程度和对机组的安全、经济性性能的改进程度确定采用哪几个非能动安全系统。为便于堆内安全系统的设置和安排,新的核电技术一般采用两个或四个偶数环路,过去百万千瓦级机组一般采用三个环路,每个环路为 300MW。但最近提出的一些设计概念都采用偶数环路,每个环路容量根据设计的单机总容量确定,不限制在 300MW 一个环路。如美国的 AP1000 是双环路,每个环路为 500MW;韩国的 CP1300 也是双环路,每个环路为 650MW;日本三菱的 NP21,单机容量为 1500~1700MW,4 个环路,每个环路为 375MW 或 425MW。简单化趋势必然会对整个核电项目的建设和运行带来新的变化,原有的估算建设投资和运行维护成本的计算方法也要做出相应的调整。

3. 系统仪表控制系统(I&C)的数字化和施工建设的模块化

世界各核设备供应商提出的新的核电机型,无一例外地都采用了全数字的仪表控制系统,并且进一步向智能化方向发展。法国的 N4 和日本的两台 ABWR 机组,都是全数字化的仪表控制系统。新设计的机组更是采用全数字化的仪表控制系统。同时,随着计算机技术的发展,核电项目的设计施工突破了原有方式,向模块化方向发展。在设计标准化、模块化的条件下,加大工厂制造安装量,通过大模块运输、吊装、拼接,减少现场的施工量。这是新一代机型共同采取的新技术。美国 GE 公司和日本联合建设的两台 ABWR 机组都已成功

地采用了这种技术。核电的建设施工为缩短工期,但是也使得建设投资的周期更短,在提高经济性的同时,对项目的资金管理提出了更高的要求。

4. 发展快中子堆技术,建立闭式核燃料循环,使核电可持续发展

主要工业发达国家已经建立本国的核燃料循环技术和体系,基本掌握了快中子增殖堆技术,但由于多种因素,一些国家停止了快堆的工程发展。至今,曾充当开发快堆技术世界先锋的美国,虽然较早停止了快堆的工程建设,但现在正在研究是否重新启动快中子通量试验装置 FFTF,同时还从事着与快堆技术相关的其他研究。法国正在研究利用凤凰快堆电站进行焚烧锕系元素和长寿命裂变产物的工作。俄罗斯是最看好快堆技术的国家之一,他把发展快堆和实施闭式燃料循环技术和体系看做 21 世纪上半世纪核动力发展战略的基石,并正筹备重新启动自 1989 年以来一直处于冻结状态的一项 BN800 快堆电站计划,并开始设计 BN1600。

美国最近颁布的能源政策中提出了研究先进的核燃料循环,要改变过去对乏燃料不做后处理的一次通过式燃料循环(once-through fuel cycle)。美、英、法、德、日等国正在研究一种先进的燃料循环(advanced fuel cycle)体系,不做铀钚分离,直接处理出满足快堆核电站要求的铀、钚混合燃料。这样使核能发展既满足了可持续发展的要求,又满足了防核扩散的要求。

核燃料循环方式的改变,对于核电项目的燃料成本影响是非常大的,这也将直接影响核电项目整体的经济性评估,其大大简化了原有的燃料成本计算,却必须对后端的核废料处理等费用的计算方式进行改进。

1.2 核电技术经济性分析的基本框架

1.2.1 基本概念

对于目前较为成熟的核反应堆型而言,其经济性分析与评价涉及以下几个基本概念。

1. 经济寿命(economic life)

经济寿命可以定义为这样一段时间,若某一机器或某一设施的使用超过该时间,其成本增大或收益减少,则应予以报废或更换。核电厂的经济寿命通常不一定与其技术寿命一致,但是经济寿命总不会大于其技术寿命。目前核电厂的技术寿命为 40~60 年。在这段时间内,维持核电站的运行收益大于退役,这可以由目前美国电厂纷纷申请延长寿期得到证明。但是由于货币的时间价值,在考虑贴现的情况下,20~30 年后的收益对现值而言已经缩水很多。在经济寿命的计算上,不值得加以考虑。因此,目前核电厂的经济寿命通常被设定为 30 年。按现在通用的经济模型,30 年以后的收益对现值贡献很小,而实际核电运行寿期在 40~60 年,仍然有很大的收益。这一矛盾导致人们认为现在的经济评价模型难以完全反映出核能这种初投资高,且技术寿命长的技术的实际经济价值,这对技术经济学而言也是一个新的课题。

2. 平准化发电成本(LCOE)

全寿命下的平准化发电成本(Levelized Cost of Electricity, LCOE)方法是在国际上得到广泛承认与应用的电力技术经济模型,可以对不同发电技术、不同工程项目的经济性做出客观、公允的评估,而且可以充分考虑成本估算中各类费用的时间价值。

$$\sum_t [TC \cdot E(t) - I(t) - O(t) - F(t)] \cdot (1+d)^{-t} = 0 \quad (1-1)$$

其中, TC 为发电成本, $I(t)$ 、 $O(t)$ 、 $F(t)$ 和 $E(t)$ 依次为第 t 年的建设投资、运行维护费、燃料费和净发电量, d 为折现率。

式(1-1)表明,存在某一折现率,或者说存在某一发电成本,使得电厂全寿命期间的现金流入量和现金流出的现值的代数和为零。这时的发电成本 TC 可以作为评价电厂经济性的客观尺度,也就是平准化发电成本(LCOE)。

如果引入折现因子, $\Phi = \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1}$, 其中, n 为电厂的经济寿命。

那么, TC 可以简化为:

$$TC = \frac{\Phi I_0 + O + F}{E} \quad (1-2)$$

其中, I_0 是贴现至现在电厂建成时的建厂投资,与时间 t 无关, O 、 F 、 E 分别为年度运行维护费、年度燃料费、年度净发电量,与时间 t 无关。

式(1-2)给出了发电成本与各种经济、技术要素之间的关系,对于电厂而言,还可以改写成如下形式:

$$\begin{aligned} TC &= \frac{100}{8760L} (\Phi \frac{I_0}{K} + \frac{O}{K}) + \frac{100}{24} \times \frac{C_f}{\eta B} \\ &= \frac{100}{8760} (\frac{1}{L} \Phi \frac{I_0}{K} + \frac{1}{L} O_1 + O_2) + \frac{100}{24} \times \frac{C_f}{\eta B} \end{aligned} \quad (1-3)$$

其中, TC 为发电成本(单位: $\text{¢}/\text{kW} \cdot \text{h}$), K 为额定装机容量(单位: kW)。

式(1-3)表明,影响发电成本的要素可以进一步分解为:

$\frac{I_0}{K}$ 为比投资,用 UC 代表, Φ 为折现因子;

KO_1 和 LKO_2 为年度运行维护费 O 的不变部分和可变部分;

C_f 为燃料单价,单位为 $\$/\text{kgU}$, B 为平均卸料燃耗深度,单位为 $\text{MW} \cdot \text{d}/\text{tU}$;

η 为电厂效率, L 为电厂负荷因子。

显然,式(1-3)表明,比投资最低的电厂未必最经济,只有在降低比投资的同时改善电厂技术经济性才能实现最经济。

3. 内部收益率 (internal rate of return, IRR)

如果某项投资的收益和支出费用分别为 R_t 和 C_t , 则其内部收益率 r 定义为使净现值为零的贴现率。这一贴现率可由下式得出:

$$\sum_{t=T_B}^{T_C} \frac{R_t - C_t}{(1-r)^t} = 0 \quad (1-4)$$

其中, T_B 和 T_C 分别为经济寿命的起始和终止。

式(1-4)表明只有收益大于投资费用的核电项目投资在经济上才具有吸引力。最优先选择的应是收益率最高的项目。这一方法的优点在于按照投资的收益对项目排序,从而可避免使用外部规定的回收率。

1.2.2 基本框架

1. 建设投资

核电厂的建设投资主要包括基本费用、附加费用、财务费用和业主费用四大部分(见图1-1)。基本费用构成基础成本(base costs),即工程、采购和建造费用(engineering, procumbent & construction, EPC),其包括厂区的建筑物和构筑物费用,核岛、常规岛、BOP设备采购费用,以及工程设计、服务、技术培训、现场施工等费用。

附加费用(supplementary costs)包括不可预见费(contingency)、备品备件、保险费用、运输和运输保险等。

业主费用包括业主在项目中发生的费用,这些费用根据项目建设承包合同的不同而有

所差异,并不包括在前述的三项费用中,其包括业主的基建投资和服务费用,业主费用的浮动费用以及业主费用的财务成本。

财务费用(financial costs)为建设期间发生的财务费用,包括浮动费用(escalation costs)。核电厂设备和服务在投标或询价时,一般会选择一个基准日期,它可以是投标的提交日期,或者是招标书中规定的一个日期,或者是签订合同的日期(生效日期)。这一价格在建造期间由于供应商以及业主劳动力和材料价格发生变化(通货膨胀这一变化称为浮动)。这一浮动的计算,要使用作为投标文件一部分的价格调整公式(PAF)进行计算。

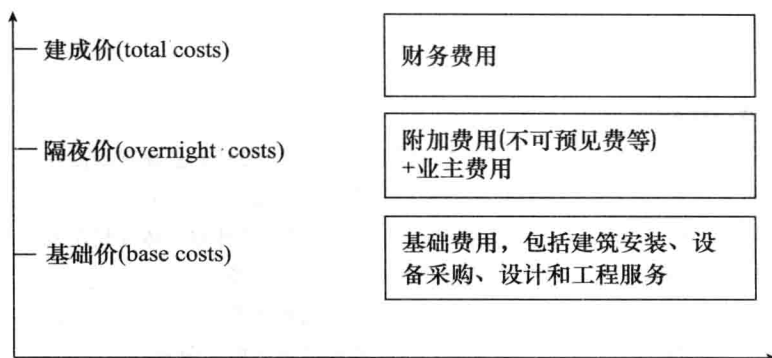


图 1-1 核电厂造价的构成示意图

国际原子能组织^①(International Atomic Energy Agency, IAEA)给出了一套账号系统,用于计算在整个经济寿命周期内的核电厂项目经济成本(如表 1-1 所示)。

2. 燃料成本

燃料成本是构成核能发电总成本的三大组成之一。它指在发电过程中与燃料相关的费用,包括核材料费用、燃料制造费用、运输费用、乏燃料中间储存费用、后处理费用(包括废物的储存和最终处置)以及通过再循环而回收的价值,因此也被称为核燃料循环成本。

核电站核反应堆燃料不是一次耗尽的,必须定期地将其从堆内卸出、处理(称为后处理)、再浓缩、再制成燃料元件、装入堆内循环使用。当核电站发电到一定时间,由于燃料的消耗,以及运行期间产生并积累起来的裂变产物的毒化效应,使后备反应性接近消失时,虽然燃料元件中尚含有相当数量的裂变燃料,也得把它从堆内卸出,换入新燃料。卸出的燃料元件称为乏燃料,其中含有大量的易裂变核素和可转换核素,如铀-235、铀-238 和钚-239,包括原先装入未燃耗的和运行周期中在堆内转换生成的,均属价值贵重的能量资源。需要经过后处理,将裂变产物分离出去,并回收这些易裂变核素和可转换核素,重新制成可用的燃料元件返回反应堆中复用,以构成燃料循环。

^① 国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)是国际原子能领域的政府间科学技术合作组织,同时兼管地区原子安全及测量检查,并由世界各国政府在原子能领域进行科学技术合作的机构。1954 年 12 月第九届联合国大会通过决议,要求成立一个专门致力于和平利用原子能的国际机构。经过两年筹备,有 82 个国家参加的规约会议于 1956 年 10 月 26 日通过了国际原子能机构的《国际原子能机构规约》。1957 年 7 月 29 日,《国际原子能机构规约》正式生效。同年 10 月,国际原子能机构召开首次全体会议,宣布机构正式成立。其总部设在奥地利的维也纳,现任总干事为天野之弥。组织机构包括大会、理事会和秘书处。1984 年中国政府向国际原子能机构递交接受《国际原子能机构规约》的接受书,成为该机构正式成员国。

表 1-1 IAEA 核电厂建设投资费用账户科目

账户	项目名称
基本费用	
21	场区的建筑物和构筑物
22	反应堆厂房(核岛)设备
23	汽轮发电机厂房设备
24	电气和仪表控制设备
25	取水和排热
26	其他设备
27	专用材料
30	供应商和(或)A/E 公司在本部提供的工程技术、设计和总体规划服务
31	供应商和(或)A/E 公司在本部提供的项目管理服务
32	供应商和(或)A/E 公司在现场提供的工程技术、设计和总体规划服务
33	供应商和(或)A/E 公司在现场提供的项目管理服务
34	供应商和(或)A/E 公司在施工现场提供的监督服务
35	供应商和(或)A/E 公司或建筑公司在现场提供的施工劳务
36	供应商和(或)A/E 公司在现场提供的调试服务
37	供应商和(或)A/E 公司提供的试运行服务
38	现场的施工设施、工具核材料
39	现场调试用的材料、易耗器、工具和设备
40	职员培训、技术转让和其他服务
41	住房及有关的基础设施
附加费用	
50	运输和运输保险
51	备品备件
52	不可预见费用
53	保险费
财务费用(包括 账号 21~53)	
60	浮动费用
61	利息
62	服务费
业主费用(不包 括账号 21~62)	
70	业主的基建投资和服务费用
71	业主费用的浮动
72	业主费用的筹资费用

核燃料循环的全过程包括以下步骤:

(燃料循环前段)

- 铀矿地质勘探;
- 铀矿石开采;
- 铀的提取和精制;

- 铀的化学转化;
- 铀-235 的富集(铀同位素分离);
- 燃料元件制造;

(燃料循环中段)

- 堆内使用(燃料);
- 乏燃料中间贮存;

(燃料循环后段)

- 乏燃料运输;
- 乏燃料后处理;
- 放射性废物的处理和最终处置。

其中,乏燃料后处理工厂是回收铀、钚资源必不可少的环节。

核燃料循环成本可以分解为三个方面。

(1) 核燃料循环前段成本。其包括铀矿地质勘探成本、铀矿开采和选矿成本、铀矿石加工成本、铀提取和精制成本、浓缩铀生产成本、燃料元件制造成本等,这里只简单介绍一下浓缩铀生产成本。天然铀(100%纯度)中含铀-235 大约 0.71%,生产 1 吨浓缩度为 3% 的低浓缩铀,大约需要 5.5 吨天然铀原料。浓缩过程中剩下的 4.5 吨贫化铀,其铀-235 丰度下降到 0.2% 左右,一般无工业应用价值,作为尾料排出储存。把一定量的铀浓缩到一定的铀-235 丰度(也叫富集度,指铀-235 的浓度)所需要投入的工作量叫做分离功,表达为多少千克分离功单位、多少吨分离功单位或多少百万分离功单位。从天然铀原料生产 1 吨 3% 的浓缩铀,大约需要 4.3 吨分离功单位。

(2) 核燃料的堆内使用(燃料)成本。核燃料的堆内使用指核燃料装入反应堆之后,发生裂变反应放出能量发电,核燃料逐步消耗的过程。此阶段核燃料利用率越高,则核电的成本也就越低;反之,利用率越低,成本越高。从核燃料装入堆芯发电开始到下一次停堆核燃料卸出堆芯,叫一个换料循环,核燃料及其后处理的成本需要用这个循环发电的收入来补偿。

(3) 核燃料循环后段成本。包括乏燃料的运输成本和后处理成本。乏燃料运输成本主要为运输容器的成本和车船运费,因为核安全标准要求高,运输容器的价格很高,加之运输过程中的高要求,使得运输费用非常高昂。核燃料循环后段成本主要集中在乏燃料后处理成本,将燃料棒分解,分离铀、钚等有用资源,需要高端的工艺技术,投资这套设备需几百亿元(经济规模厂),运行维护成本非常高昂。核电站除支付核燃料费外,还必须支付乏燃料后处理费,是整个核燃料循环成本的实际承担者。

核燃料循环成本对核电的成本影响巨大,从某种程度上说,决定了核电的竞争力。因为整个核燃料循环的成本,最终都是由核电通过燃料费和乏燃料后处理费的形式来承担。IAEA 核电厂核燃料循环费用账户科目如表 1-2 所示。

需要指出的是,目前我国将首炉燃料的 2/3(1/3 换料)或 3/4(1/4 换料)计入建设投资中,而燃料成本中只引入与每年运行消耗掉的那一部分燃料所涉及的整个燃料循环的费用;国外则将所有燃料相关费用划入燃料成本中。这种不同的划分法对最终的经济性没有本质区别,但影响了建设和投资和燃料循环费用的差别,未来在对比数据时应加以注意。

表 1-2 IAEA 核电厂核燃料循环费用账户科目

账户	项目名称
100	首炉燃料组件的供应
101	天然铀
102	转换
103	浓缩
104	燃料组件制造