

核动力技术经济计算方法

[苏]A.И. 贝科夫 等

.537

内 容 简 介

本书系统地叙述了核电站技术经济指标计算方法、核动力中不同方案的绝对和相对的经济效益计算方法、核燃料经济估价方法,并对发展中的热中子和快中子反应堆的核动力系统作了经济分析。

本书为大专院校有关专业师生的教学参考书,并可供设计和科研单位中从事核动力经济专业的工作人员阅读。

本书中有表35个,图22张,参考文献160条。

МЕТОДЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

А.И.БЫКОВ И.Э.НЕСТЕРЕНКО
МИНСК «НАУКА И ТЕХНИКА»

高等学校教学参考书

核动力技术经济计算方法

[苏]А.И.Быков И.Э.Нестеренко 著

徐秀华 蒋钟民 译

阮可强 校对 罗安仁 审校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

重庆印制一厂印刷

新华书店总店科技发行所发行,新华书店经售

☆

开本781×1032 1/32 ·印张6.25 ·字数 135 千字

1988年11月北京第一版·1988年11月北京第一次印刷

印数 1—1000

ISBN 7-5022-0094-0

TEL 59233, 定价: 1.25元

作者的话

向读者推荐的这本书，是对国内外已经发表的有关核动力经济问题方面的各种研究方法所作的系统综述。本书并不研究发展核电站和供热企业的技术和生态问题，这些问题另有专著论述^[1-6]。书的主要注意力放在研究核电站设计初期进行技术经济概算（估算）的方法方面。在叙述相应方法时，计算中使用的某些指标的具体数值具有示范性质，不能作为实际计算时的标准依据使用。

第一章，3.1、4.1、4.4、7.2、7.3节为 А.И.Быков 和 И.Э.Нестеренко 合写。第二、五、六章，3.2、4.2、4.3、7.1节为 А.И.Быков 所写。

作者衷心感谢 Н.М.Синев 教授和 Г.Б.Левенталь 教授对本书初稿提出的宝贵意见。

目 录

作者的话

第一章 核电站基建投资的计算方法	1
1.1 核电站设计初期阶段预测投资的目的和手段	1
1.2 按综合定额计算核电站投资的方法	8
1.3 工程项目实际条件下对基建投资的估算	18
第二章 核电站燃料循环费用的计算方法	24
2.1 核燃料制备费用的计算	24
2.2 热堆辐照燃料价格的计算	32
2.3 核电站额定周转资金的计算	36
2.4 辐照燃料后处理的费用分配	39
第三章 核电站的发电成本和铀价格的计算方法	48
3.1 用注销法计算发电成本	48
3.2 用费用分配法计算发电成本和铀的价格	53
第四章 核动力绝对效益和相对效益的计算方法	62
4.1 换算费用法	62
4.2 快中子反应堆核电站经济效益的计算方法	69
4.3 在苏联北部和东北部边远地区和难以到达的地区利用 小型核能源的绝对效益和相对效益的计算方法	75
4.4 核动力技术经济研究成果的可靠性	80
第五章 发展核动力的经济效益的分析方法	85
5.1 核动力的国民经济效益	85
5.2 发展常规动力和核动力总费用的分析和比较	93
5.3 国家燃料动力综合体中核能的效益	105
5.4 对发展核动力的生态后果进行经济评价的方法	115

第六章	核燃料的经济评价方法	123
6.1	物理等价法	123
6.2	以浓缩铀和钚为基础的核燃料经济等价方法	132
6.3	核燃料和有机燃料互换性的动力经济问题	140
6.4	发展中的核动力系统中钚价格的形成	148
第七章	发展中的核动力系统的经济分析	157
7.1	选择核动力长期发展最优战略的标准	157
7.2	核动力系统进入核燃料自给状况的条件分析	165
7.3	快中子堆核电站最优化时对核燃料估价的利用	177

第一章 核电站基建投资的计算方法

1.1 核电站设计初期阶段预测比投资的目的和手段

预测研制中装置的性能是在新技术的建立方面进行科研管理工作的组成部分。正确地作出预测，有助于确定最有效的科研方向并保证以最快的速度应用先进工艺。

有一种意见认为，在科研工作的初期阶段，就去确定科研的功效是不适宜的，因为“……初期阶段作详细的研讨会抑制新思想的产生”^{(7)①}。而当积累了足够的实验资料时，分析研制工作的功效就成为最优化管理科研的最重要条件之一。工作到这一阶段，还不能最终确定研制中装置的技术性能，因此只有在对这些指标作出预测的基础上才有可能显示出装置的功效。预测时期的长短，从提出预测之时起，到预期以工业规模掌握该研制装置的那年为止。这样，考虑了装置功效的最大可能指标，才能同已经用于批量生产的现有技术作出对比。

新的科研成果用于工业的实践表明，从新思想的产生到它在工业上实现的时间，平均要15—20年⁽⁸⁾。因此，在做中期(5—10年)预测时，只需考虑到做预测时已经做完试验的

① 方括号中的第一个数字表示文献资料的顺序号，其后是出版物的页码。如果引文引自数份资料，则相应的数字用分号分开，下同。

技术就已足够。这时，预测的内容就是确定对现有的技术加以完善化有哪些可能。

当做为期25—30年的长期预测时，必须考虑到会出现新的技术手段，其中包括做预测时没有做完试验的新的技术手段。这使预测工作变得极为复杂，因为有关被分析对象的情况更加不明确了。

计算新技术的经济指标属于调查预测之列。现在来探讨国外工业公司在工艺调查预测的实践中所采用的标准方法。

不论采用何种方法，工艺调查预测过程大概可以分为两个阶段：分析、整理和初步处理现有的工艺资料；获取新的工艺资料。

根据某一阶段要解决的课题的目的和内容采用不同的预测方法^[7,9-11]。在制订方案的初期阶段，为了分析方案的经济合理性，广泛采用直觉思维法。该方法的基础是就要研究的问题向专家咨询，接着对由此得到的资料作统计处理。在使用这种方法时，预测的第一阶段（分析）以不明显的方式出现，它表现为专家们在过去实践活动中所积累的全部经验，专家们借助这些经验来直觉地预告研究对象的性能。

时间数列外推法属最常用的工艺调查预测法之列。在分析被研究现象特性变化的基础上，建立一种描述某一特性或者其总体随时间变化轨迹的数学函数（趋势）。趋势是预示行将到来的一段时间内函数行为的依据。用趋势函数作预测的正确性取决于：第一，用趋势函数描述被研究的现象准确到什么程度；第二，被研究对象（现象）的发展条件在今后时期内是否保持不变。如在预测期前的很长一段时期内已掌握了可靠资料，则通常使用统计预测法（外推法）。

如果应用趋势外推法还无法考虑到能影响被研究指标各

种因素的实际变化的话，那么趋势相关法能提供考虑这些变化的预测。该方法的基础是建立一个因素与其它因素的相关联系。这种方法的复杂性是：第一，这些联系并不是经常能够被发现的；第二，相关系数很难从其它起作用的诸因素中区分出来，并从数量上加以测定。

最后，类推法，特别是历史类推法，是人们常用的预测方法之一。该方法的实质在于：选择一个能模拟被研究系统行为的系统，并根据按类推法研究得到的数据对所模拟的系统进行研究。

文献[7]指出，工艺预测的质量与所采用的方法无关。预测的精确性首先取决于“洞察力的水平”，即取决于作预测的公司总的业务状况。组织得好的机构通常能避免使用复杂的定量预测法，因为这种“预测会使人忽视计划”。国外不同的公司在解决同一预测课题时，采用不同的预测方法同样能获得成功。

在苏联动力技术经济指标预测的实践中，主要是借助回归分析法求得趋势，然后采用趋势相关法。

文献[22, 23]中，借助下述近似函数，预测康斯克-阿钦斯克凝汽式烧煤发电厂的比投资(K):

$$K = Ax_1^{-B}x_2^{-C} \text{ (卢布/千瓦)}$$

式中

x_1 ——机组的单机功率，兆瓦，

x_2 ——电站的机组数，

A、B、C——系数。

在文献[24]中，计算 K 值时，考虑了一系列其它因素，其中就有一些互不联系的因素（如供水方式、燃料种类等）。计算热中子和快中子反应堆核电站比投资时也以类似的原则

作为基础^[25,26]。在动力部门预测投资的实践中,相关法应用得相当广泛。这大概是因为在作这一类预测计算中,对平均预期值的允许误差为 $\pm 15\%$ ^[24],并且计算关系式简单之故。而专家评定法应用的广泛程度就要差得多了,但用它做短期预测却最为有效^[27]。不论在设计热电站还是设计核电站的实践中,历史类推法都获得了广泛的应用。

在选择预测方法时,必须考虑到预测的正确性取决于用作预测的模型在多大程度上符合被预测指标的实际变化趋势。可以用专家评定法来分析这种趋势。这类研究在文献中被称为包络线分析^[7]。

在供分析的、能表明发电技术在完善和发展中的经济趋势的指标当中,我们研究下列指标:建设电站用的材料消耗和资金消耗以及发电费用。

图1表示的是电力工程的材料消耗动态,按有关类型电站预计完成工业性开发的年份制成。不用数学方法处理这些数据,即可断定从热电站转到轻水反应堆(LWR)、液态金属快中子增殖反应堆(LMFBR)以及往后转向聚变反应堆核电站时电力工程建设的材料消耗会随着增加。

动力工程建设中除总的材料耗量出现增长趋势外,用于制造设备的金属消耗结构也在发生变化,其中优质钢、不锈钢和有色金属的比重不断增加(表1)。

随着新型核电站的出现,核电站建筑安装工程的劳动耗量也在增加。譬如,如果建设热电站的单位劳动消耗平均为4.72人·小时/千瓦,那么核电站为9.8人·小时/千瓦^[18]。上述因素决定了从热电站转向新型核电站时电站的资金耗量呈增长趋势(图1)。

由于动力建设资金耗量的增长,动力生产的资金耗量也

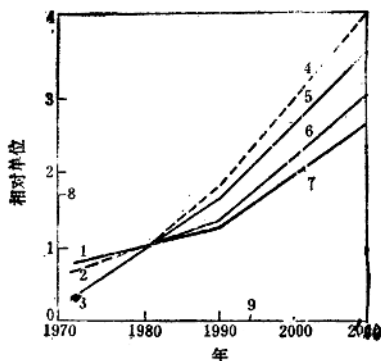


图1 从烧煤热电站转向热中子反应堆(LWR、BBЭР)、液体金属快中子增殖堆(LMFBR)和热核反应堆(ТЯР)核电站时,同热堆(ТР)核电站的指标相比所得的材料费用和投资的变化趋势⁽¹²⁻¹⁶⁾

- 1——用于建设的金属消耗量(苏联);
- 2——用于建设的混凝土消耗量(苏联);
- 3——用于制造设备的不锈钢消耗量(苏联);
- 4——用于建设的金属消耗量(美国);
- 5——用于建设的混凝土消耗量(美国);
- 6——用于制造设备的金属消耗量(美国);
- 7——建设核电站的比投资(美国);
- 8——烧煤热电站和热中子反应堆核电站资源消耗的对比关系, 相对单位;
- 9——新型核电站工业开发的年份。

会增加(有一个时间滞差, 相当于电站建设所需时间)。在核动力工业中, 资金耗量这一指标增加的这种变化趋势表现得十分明显。资金耗量的这种变化规律, 对于整个国民经济来说都具有普遍意义。

正如А. И. Ноткин所指出的, “……能节约再生产资料的技术进步还未取得足够的力量来克服整个生产资金的增长超过国民收入增长的趋势。如果说, 关于劳动生产率可能稳

表 1 美国制造核电站设备用金属消耗量的推测结构^[13,17],
吨/兆瓦

金 属	装 置 类 型		
	LWR ①	FBR ②	ТЯР ③
总 计	无 报 道	36.0	77.0
其 中:			
有色金属 (铜、铝、锂、钠)	1.8	2.8	22.3
稀有金属			
镍	0.09	0.39	5.9
铬	无 报 道	0.39	7.9
钼	无 报 道	0.04	0.4

①——热中子水水反应堆;

②——以钠为冷却剂的增殖反应堆;

③——热核反应堆。

步提高的（特别是在社会主义制度下）问题已由经济理论和实践作出了肯定的解答，那么，不断降低生产基金消耗的可能性暂且尚未解决的课题之列。”^[10]

图 2 表示发电单耗这一普遍性经济指标的动态，发电单耗是考虑到二次核燃料再生效应、在计算生产成本时加12%的资本利息而求得的。计算用的数据取自文献[15,20,21]。可以认为，随着增殖反应堆和聚变反应堆等新动力技术的应用，发电成本大致将保持现时的热电站和热堆核电站的水平上或者略高一些。这一论断的误差大致相当于原始数据的误差。

这个结论在所采用的比较条件下是正确的，即当被比较的各种动力技术都用在研究该问题的期间所能达到的最好的技术经济指标来研讨时结论正确。这样，图 2 中的数据不单是说明在我们研究的这一段时期内不同类型电站的相对效应，而更重要的是表明用于发电的社会必需的劳动费用动

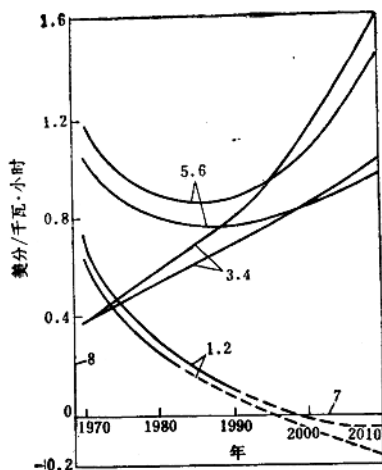


图2 各种新型电站发电价格的变化动态(1975年价格)

- 1, 2——发电成本中燃料部份的最小估计值和最大估计值;
- 3, 4——发电成本中基建投资部份的最小估计值和最大估计值;
- 5, 6——电价的最小估计值和最大估计值;
- 7——新型电站工业性开发的年份;
- 8——电价, 美分/千瓦·小时。

态,也就是由在整个电力生产中占很重要比重的那部分电站发电费用的动态所间接反映的动态。

通过分析可得出如下结论。在建立新型动力技术(用这些技术可以保证满足未来绝大部分能源需求)的过程中,新型电站的建设费用与已经开发的那些类型的电站相比,将增加2—3倍。

伴随增殖反应堆和聚变反应堆的建设而带来的最重要的积极效果,扩大了核能和整个国民经济的廉价燃料基地,因而保证经济在长远的未来能稳定地增长。

直接外推法不适用于预测新的动力技术费用，因为该法不能充分估计这种技术的特点对其成本的影响。同时，由于费用的变化较为平缓，可以说，从一种技术转向下一种技术时，比投资的构成具有某种继承性。这就可以使用历史类推法进行预测。

在这种情况下，最为适用的预测方法看来应是考虑到每种新技术特点的、与历史类推法相结合的相关法。

由于经济估计在时间上很不稳定，对远期(25—30年)的动力项目的经济指标进行直接预测不可能正确，所以建议用实物指标作为对核能作长期预测的基础^[28]。

作为投资预测基础的实物指标(或一组这种指标)可称为主导技术参数。可以选择变化动态在时间上同投资动态相当一致，而它所表示的费用又是总费用中主要部分的指标作为主导技术参数。用回顾过去和类比的方法来研究这种一致性，而总的说来，历史类推法与主要技术参数法的结合，称为不变量法^[11]。

1.2 按综合定额计算核电站投资的方法

对压力壳式反应堆核电站(新沃罗涅什核电站 I—V 号机组，亚美尼亚核电站，科拉核电站，西乌克兰核电站，BH-350)的设计指标作统计处理所得的数据是我们推荐的这种方法的基础。因此本方法的实际使用范围仅限于采用压力壳式反应堆的各种核电站。

本方法反映了已经形成的设备、材料、工时等的价格水平，仅在苏联建设核电站的条件下适用。在未来价格同现有价格水平相比发生变化时，特别是当不同的材料、设备、工

时价格的变化不成比例时，必须对计算公式作相应修正。本方法叙述了在苏联欧洲部分有典型意义的“基本”核电站的指标。所谓“基本”指的是新建的装有两组各100万千瓦机组的核电站。所谓典型意义指的是下述条件：主要设备批量生产（非首批机组）、基本负荷运行工况、冷却塔循环供水。为了确定在其他条件（首批的，另一种额定功率，等等）下建设核电站的比投资，需要进行换算，其换算方法将在1.3节叙述。

表2所列动力工程建设中各种费用的结构数据表明，材料费用是主要的（约45%），从热电站转向核电站时（在时间上）也是稳定的，因此，材料费用指标可作主要技术参数使用。

表2 核电站和热电站的总投资结构

各种费用项目	投资结构，占总额的%	
	烧煤热电站	BB3P-1000型核电站
用于建设和制造设备（除电气设备外）的材料和半成品	42	44
从事建筑和设备加工工人的工资	8	7
建筑设备使用费	10	8
电气设备，检测仪器和自控设备，剂量设备	10	10
供货者和承包者的利润	9	11
杂费	9	8
其它（设计、调试、检验等）	12	12

确定核电站建筑安装工程和设备制造费用数额和结构的因素是不相同的，因此要求对以上各部分费用分别进行分析和预测。

用技术经济综合算法可以相当精确地确定新型核电站设备成本（ R_0 ）在主要工艺设备——反应堆、蒸气发生器、

泵、带冷凝器和热交换器的透平机成本中所占的比重。

表3是由各核电工程项目的资料编制的,分析表中的数据后可以确定,压力壳式反应堆核电站的 $K_o \approx 1.8K_{om}$, K_{om} ——主要工艺设备的价格(卢布)。

表3 核电站和热电站设备费用的结构

设备(安装费不计在内)	投资占主要工艺设备价格的%			
	烧煤热电站	BBЭР	РБМК	ВН
主要工艺设备	100	100	100	100
辅助工艺设备	89	51	51	58
总计: 工艺设备	189	151	151	158
检测仪器和自控设备	9	7	4	5
电气设备	49	25	14	18
剂量监测设备	—	3	1	2
全部设备	247	186	170	183

在主要工艺设备价格中,对于核电站,材料和半成品占55%,对于热电站则占50%。使用核电站的设计数据和主要设备制造厂的计价报告,可得出确定BBЭР-1000反应堆核电站 K_{om} 的下列表示式:

$$K_{om} = G_{mo} \bar{c}_{mo} / \alpha_{mo} \approx 17G_{mo}$$

式中

G_{mo} ——主要工艺设备的金属重量,吨,

$\bar{c}_{mo}$ ——主要工艺设备成品单位重量的平均加权价格,卢布/吨,

α_{mo} ——主要工艺设备价格中材料和半成品的费用所占比例。

设备金属的平均加权价格为

$$\bar{c}_{mo} = \sum_{i=1}^n G_i c_i / \sum_{i=1}^n G_i$$

i ——核电站主要工艺设备的编号；

G_i ——设备 i 的重量；

c_i ——设备 i 的金属(成品)价格($i=1, 2, \dots, n$)。

表4中列出的是不同类型电站的工艺设备的单位成本指标，可利用它来在确定某种核电站设计时作近似计算。一吨金属的成本可以有极大差别，它取决于制造工艺的复杂程度和金属耗用结构的差别以及其它因素。在转而采用新的动力技术时，可以看到制造核电站主要工艺设备时金属耗用结构中优质钢和有色金属的比例有了增加，因此在使用现有技术的单位金属成本定额来估计新技术时，必须对所用材料的质量作出修正：

表4 烧煤热电站和BB3P-1000反应堆核电站工艺设备的成本指标

设 备	设备的单位成本 (千卢布/吨)	
	热 电 站	核 电 站
装置(锅炉)部分	0.8	5.3
其中：		
反应堆和蒸气发生器(锅炉整体)	0.9	11.5
主循环泵	—	6.8
机器房	2.4	2.2
其中：		
透平机及其冷凝器	4.8	2.0
管道和配件	0.6	1.1
公用设备	0.9	1.0
共计：主厂房	1.1	3.0
外部构筑物	0.8	0.9
全部总计	1.1	2.8

$$\Delta K_{om} = \Delta G'_{mo} \Delta \bar{c}_{mo} (\text{卢布})$$

式中

ΔK_{om} ——主要工艺设备的补充投资；

$\Delta G'_{\text{mo}}$ ——与基础消耗（按BBЭP-1000核电站）相比，
优质金属的补充消耗。

$$\Delta \bar{c}_{\text{mo}} = \bar{c}'_{\text{mo}} - \bar{c}_{\text{mo}} \text{ (卢布/吨)}$$

式中

$\bar{c}'_{\text{mo}}$ ——优质金属的平均加权成本，按下式确定：

$$\bar{c}'_{\text{mo}} = \sum_{j=1}^n \Delta G'_{\text{mo}(j)} C_j / \sum_{j=1}^n \Delta G'_{\text{ms}(j)} \text{ (卢布/吨)}$$

j ——优质金属编号。

$$\text{设备总成本 } K_o = 1.8 K_{om} = 17 G_{\text{mo}} + \Delta G'_{\text{mo}} \Delta \bar{c}_{\text{mo}}.$$

该法能确定建设任何类型压力壳式反应堆电站各项费用的近似值。早期设计阶段采用该法是适宜的，因为那时还未对各个部件和设备勾画出足够详尽的轮廓。这种情况在概念设计前阶段是常有的。可是，本方法带有一系列本质性的缺点，其中最主要的：一是预测误差会超过25%，这就使得此方法的实际适用范围仅限于概念设计前的近似估计；其次，方法是以装置的某些特定参数为条件的，当这些参数发生变化时就难以适应了。考虑到在设计早期阶段初始信息资料更替迅速，显然这种方法在实际使用中颇为不便。

对研制中的动力装置作技术经济论证阶段，应确定主要部件和装置的工作参数值，进一步明确辅助系统及其设备形式的组成，制订出主要建筑物的具体配置方案。在技术经济论证阶段进行详尽的设计计算，所得数据可以作为对总投资特别是工艺设备投资作更加精确计算的基础。

在技术经济论证阶段进行设计研究工作的一个特点是要不断地修正设计方案，以便找到最佳方案，使正在设计的装置达到较好的热工物理和技术-经济指标。每一个有助于改