

# 行波堆平准化发电成本分析

张尧立, 郭奇勋, 李 宁

(厦门大学 能源学院, 福建 厦门 361102)

**摘要:** 本文通过平准化发电成本的方法, 以燃料循环作为研究对象, 对行波堆一次通过式燃料循环和二次通过式燃料循环的经济性进行了研究, 并选取 10 个重要的经济和技术参数进行成本敏感性分析。研究表明, 行波堆的平准化发电成本低于现有压水堆和快堆, 其中, 行波堆一次通过式燃料循环方式的平准化发电成本最低。敏感性分析表明, 贴现率、燃耗深度、隔夜价和反应堆热效率是影响行波堆经济性最重要的参数, 而燃料价格和废物处置的价格由于占成本的比例较小, 对行波堆经济性的影响不大。

**关键词:** 行波堆; 经济性; 平准化发电成本; 燃料循环

中图分类号: TL327

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2016)02-0306-06

doi: 10.7538/yzk.2016.50.02.0306

## Analysis of Levelized Cost of Electricity for Travelling Wave Reactor

ZHANG Yao-li, GUO Qi-xun, LI Ning

(College of Energy, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

**Abstract:** Based on levelized cost of electricity (LCOE) method, the fuel cycle was selected as the object of the study, the economics of once-through fuel cycle and twice-through fuel cycle for travelling wave reactor (TWR) was studied. Ten important economic and technical parameters were proposed for the sensitivity analysis. The results show that the LCOE of TWR is lower than that of conditional light water reactor and fast reactor. Furthermore, the LCOE of once-through fuel cycle of TWR is lower than that of twice-through cycle. The sensitivity analysis indicates that the discount rate, burn-up, overnight cost and thermal efficiency impact the LCOE severely, while the price of uranium and the cost of waste disposal barely impact the LCOE.

**Key words:** travelling wave reactor; economy; levelized cost of electricity; fuel cycle

行波堆(TWR)是一种以天然核素(铀或钍)或乏燃料为燃料,可转换核素的增殖和易裂变核素的焚烧以行波方式移动的新型深燃

耗裂变反应堆,又称蜡烛堆。不同于现有的商用热堆(轻水堆)和各国正在开发中的快堆, TWR 通过对堆芯燃料的巧妙分布和运行

收稿日期: 2015-05-27; 修回日期: 2015-11-11

基金项目: 厦门大学校长基金资助项目(20720150095)

作者简介: 张尧立(1985—), 男, 上海人, 助理教授, 博士, 核科学与技术专业

控制,核燃料可从一端启动区点燃,富裕裂变中子将周边可转换核素( $^{238}\text{U}$ 或 $^{232}\text{Th}$ )转换成易裂变核素( $^{239}\text{Pu}$ 或 $^{233}\text{U}$ ),当易裂变核素达到一定浓度时形成自持裂变反应,焚烧已在原位生成的燃料,形成行波。行波以“增殖波前行,焚烧波后续”的方式在燃料中以每年数厘米的速度自持传播,TWR一次装料可连续运行数十年<sup>[1-3]</sup>。

核电厂的初始投资大、建设周期长,其经济性已逐渐成为核电发展的重要制约因素之一。对于TWR这样的新型核反应堆,是否具备潜在的经济性,将影响其未来的部署和发展。在对TWR经济性进行研究时,由于核电厂的收益是未知的,因此,采用平准化发电成本作为经济性评价的指标是比较科学的方法<sup>[4]</sup>。

本文采用平准化发电成本的方法,以燃料循环作为研究对象,对行波堆一次通过式燃料循环和二次通过式燃料循环的经济性进行研究。

### 1 行波堆平准化发电成本计算模型

核电厂经济性分析的常规做法是分析电厂的建成价、燃料费用和运行维护费用。不过,Roo等<sup>[5]</sup>于2011年提出了一种分析核电厂经济性的新方法。与传统分析方法不同的是,该方法从核燃料循环的角度分析核电厂的经济性,全面反映燃料初次使用及回收利用整个过程的费用。该方法在计算采用一次通过式燃料循环的核电厂经济性时,与传统方法很类似。但在处理二次通过式燃料循环以及快堆闭式燃料循环过程中,具备其独特的优势。

#### 1.1 核燃料循环模型

不同的堆型燃料循环方式不同,即使是同一堆型也可采用不同的燃料循环方式,而不同燃料循环方式将对核电厂经济性产生影响。目前核燃料循环主要可分为开式(一次通过)和闭式两种<sup>[6]</sup>。

行波堆采用了原位增殖和焚烧的方式,理论燃耗可达到很深(400 GW·d/tHM),核废物量少,核燃料利用率高,可减少甚至消除后处理的需求,简化了核燃料循环的方式。因此,行波堆虽然是一种快堆,但仍可采用一次通过的

燃料循环方式。若采用富集铀作为初始堆芯材料,则其燃料循环类似于压水堆一次通过式燃料循环;若采用压水堆乏燃料经过后处理的钚作为初始堆芯材料,则TWR可作为二次通过式燃料循环的一个环节。

本文考虑行波堆在一次通过和二次通过式燃料循环这两种情况下的经济性<sup>[7]</sup>,其示意图如图1、2所示。针对这两种燃料循环方式,对行波堆的平准化发电成本进行计算和分析。

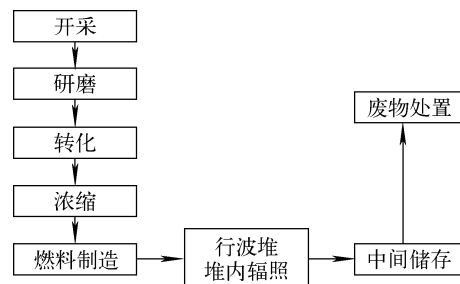


图1 一次通过式燃料循环  
Fig. 1 Once-through fuel cycle

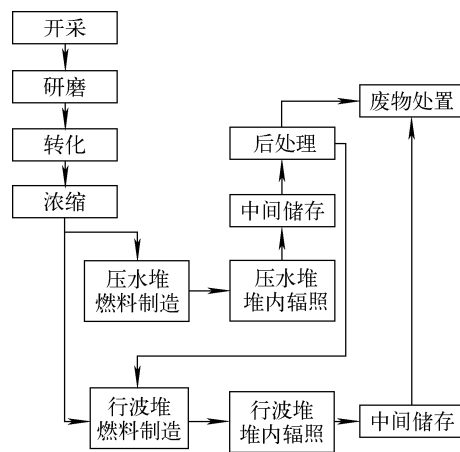


图2 二次通过式燃料循环  
Fig. 2 Twice-through fuel cycle

一次通过式方案是目前美国实际采用的核燃料循环方案。在这一方案中,富集铀和贫铀燃料装在行波堆中工作若干年后,卸出并冷却储存若干年。最终,乏燃料被运往临时储存场或处置场。

行波堆也可采用钚和贫铀作为燃料,其中轻水堆乏燃料后处理后的回收钚作为点火燃料,这就形成了行波堆二次通过式燃料循环<sup>[8]</sup>。

对于一次通过式燃料循环,其平准化发电

成本  $l_1$  可用式(1)表示:

$$l_1 = \frac{\int_A^B C_t e^{-Rt} dt}{\int_A^B Q_t e^{-Rt} dt} \quad (1)$$

其中:  $C_t$  为在各时间点  $t(t \in [A, B])$  时的全部成本, 包括所有购买原料、制造燃料元件、建造和运行反应堆、乏燃料过渡储存和最终处理的成本;  $Q_t$  为各时间点  $t$  的发电量;  $R$  为贴现率。

对于二次通过式燃料循环, 其平准化发电成本  $l_2$  需综合考虑轻水堆和行波堆各自的成本和生产的电力, 采用式(2)表示:

$$l_2 = \frac{\int_{A_1}^{B_1} C_{1t} e^{-Rt} dt + \int_{A_2}^{B_2} C_{2t} e^{-Rt} dt}{\int_{A_1}^{B_1} Q_{1t} e^{-Rt} dt + \int_{A_2}^{B_2} Q_{2t} e^{-Rt} dt} \quad (2)$$

其中: 下标 1 表示新燃料一次通过轻水堆, 下标 2 表示用再回收燃料二次通过行波堆; 时间区间  $[A_1, B_1]$  表示轻水堆在该段时间内生产电力,  $[A_2, B_2]$  表示行波堆在该段时间内生产电力;  $C_{1t}$ 、 $C_{2t}$  分别为轻水堆和行波堆的成本;  $Q_{1t}$ 、 $Q_{2t}$  分别为轻水堆和行波堆的发电量。

对于式(2)需注意两个重要问题。首先, 平准化发电成本将循环看做一个整体, 并没有两个分别的平准化发电成本。循环中任一点产生的成本, 必须平均到整个燃料循环中生产的电力。其次, 式(2)不包含任何明确评估从轻水堆到行波堆的乏燃料的价格或价值。因为在式(2)中 1 个反应堆的燃料成本将被另一个完全抵消。确定二次通过式燃料循环的平准化发电成本完全独立于乏燃料的价格。

## 1.2 燃料循环费用的计算模型

针对图 1、2 所示的行波堆燃料循环过程, 花费大致可分为黄饼购买、转换成  $UF_6$ 、 $UF_6$  浓缩、燃料元件制作加工、反应堆费用、燃料在反应堆内停留时的运行维护费用、乏燃料的中间储存、后处理及废物最终处置等环节。这些费用可归纳为燃料循环前端费用、堆内费用、运行维护费用和燃料循环后端费用等 4 个环节<sup>[9-10]</sup>。

### 1) 前端费用

对于一次循环来说, 燃料循环前端费用包括黄饼购买费用  $V_1$ 、转换成  $UF_6$  费用  $V_2$ 、 $UF_6$  浓缩费用  $V_3$ 、燃料元件制作加工费用  $V_4$ 。前

端费用的计算模型如下。

$$V_1 = C_1 \cdot M_1 \cdot M_F / [(1 - f_F)(1 - f_S)(1 - f_C)] \quad (3)$$

$$V_2 = C_2 \cdot M_1 \cdot M_F / [(1 - f_F)(1 - f_S)] \quad (4)$$

$$V_3 = C_3 \cdot M_1 \cdot [(M_F - 1)V(x_w) + V(x_1) - M_F \cdot V(x_2)] M_F / (1 - f_F) \quad (5)$$

$$V_4 = C_4 \cdot M_1 / (1 - f_F) \quad (6)$$

其中:  $C_1$  为黄饼单价,  $\$/\text{kgHM}$ ;  $C_2$  为  $UF_6$  转换单价,  $\$/\text{kgHM}$ ;  $C_3$  为分离功单价,  $\$/\text{kgSWU}$ ;  $C_4$  为重金属加工费单价,  $\$/\text{kgHM}$ ;  $M_1$  为燃料的重量,  $\text{kg}$ ;  $M_F$  为质量因子,  $M_F = (x_1 - x_w)/(x_2 - x_w)$ ,  $x_1$  为浓缩装置进料的浓度,  $x_2$  为待生产燃料元件的浓度,  $x_w$  为尾料浓度;  $f_F$  为燃料元件制造过程损失率;  $f_S$  为富集过程损失率;  $f_C$  为转换过程损失率;  $V(x)$  为铀浓度  $x$  的价值函数, 通常取  $V(x) = (2x - 1) \cdot \ln[x/(1 - x)]$ 。

对于二次循环来说, 燃料循环前端费用分为两部分: 一部分为压水堆的前端费用, 一部分为行波堆的前端费用。行波堆的前端费用包括铀的购买费用、贫铀的购买费用以及燃料元件的制造费用。其计算模型与一次循环采用的模型相同。

### 2) 堆内费用和运行维护费用

从核燃料循环的角度来看, 核电厂是用于消耗核燃料的设备。在计算堆内费用时, 需将核电厂的建设费用  $V_5$  和运行维护费用  $V_6$  折合为单位燃料所需的费用。

$$V_5 = \left( \sum_j ((C_{5j} + D_{5j}r + I_{5j}) \cdot (1 + i)^{-t_j}) \cdot ((1 + i)^{t_{ir}} - 1) \right) / (1 - (1 + i)^{-t_R}) \cdot \frac{M_1}{M_{\text{Core}}} \quad (7)$$

$$V_6 = \left( \frac{\sum_j (C_{6j} (1 + i)^{-t_j})}{1 - (1 + i)^{-t_R}} + \frac{C_{6v} t_{rt} f_{ef}}{\ln(1 + i)} \right) \cdot \frac{((1 + i)^{t_{ir}} - 1) M_1}{M_{\text{Core}}} \quad (8)$$

其中:  $C_{5j}$  为当年单位功率的电厂隔夜造价,  $\$/\text{kWe}$ ;  $D_{5j}$  为当年折旧,  $\$/\text{kWe}$ ;  $I_{5j}$  为当年资本性支出,  $\$/\text{kWe}$ ;  $C_{6j}$  为当年单位功率的电厂维护成本,  $\$/\text{kWe}$ ;  $C_{6v}$  为运行变动成本,  $\$/\text{kWe}$ ;  $t_j$  为年份;  $t_{ir}$  为燃料在堆芯内时间,  $\text{a}$ ;  $t_R$  为反应堆寿命,  $\text{a}$ ;  $t_{rt}$  为年运行时间,  $\text{h/a}$ ;  $M_{\text{Core}}$  为单位功率消耗的燃料重量,  $\text{kgHM/}$

$kWe$ ;  $f_{ct}$  为功率因子;  $r$  为税率;  $i$  为年贴现率;  $j$  为  $t_j$  年所对应的编号。

3) 后端费用

对于一次通过式燃料循环来说,不存在后处理费用。但是对于二次通过式燃料循环来说,需要将燃料进行后处理,并将后处理过的燃料供应行波堆。导出的乏燃料中间储存费  $V_7$ , 后处理费  $V_8$  和废物最终处置费  $V_9$  的计算模型如下:

$$V_7 = C_7 M_1 + C'_7 M_1 (1 + i)^{t_i} \quad (9)$$

$$V_8 = C_8 M_1 \quad (10)$$

$$V_9 = C_9 M_w \quad (11)$$

其中:  $C_7$  为单位重金属初始存储费,  $\$/kgHM$ ;  $C'_7$  为单位重金属年储存附加费,  $\$/kgHM$ ;  $C_8$  为单位重金属后处理费,  $\$/kgHM$ ;  $C_9$  为单位重金属废物处置费,  $\$/kgHM$ ;  $t_i$  为储存时间, a;  $M_w$  为废物中重金属重量,  $kg/kgHM$ 。

2 经济和技术参数的选取

2.1 参考币值与参考日期

根据研究需要,参考币值与参考日期原则上可以任意选取。但是,为了数据比较的需要,本文选用 2007 年美元价格作为参考基准。

2.2 输入参数

计算所采用的主要参数列于表 1,所有数据以 2007 年美元为单位。行波堆的建造和维护成本参考快堆。

3 敏感度分析

行波堆的部分经济和技术参数参考了现有快堆数据。但应注意以下问题:快堆的数据本身存在较大的不确定性;行波堆的燃料制造、废物处置等费用没有定论;对于行波堆的初始堆芯,需要大量的高富集度的铀或钚,如何产生这些铀和钚是尚待解决的问题。为了考虑这些不确定性的影响,还需对部分参数进行一定的敏感性分析。

对平准化发电成本的影响因素进行敏感度分析,从而确定对平准化发电成本影响最大的经济技术参数。一方面可通过改善这些参数降低核电站的成本,另一方面也可评估某些难以确定的参数对核电站经济性的影响。核电站的平准化发电成本可写为一般形式:

表 1 行波堆经济性计算输入参数<sup>[5]</sup>

Table 1 Input parameter of TWR for economic calculation<sup>[5]</sup>

项目	数值
前端燃料成本	
天然铀, $\$/kgHM$	80
贫铀, $\$/kgHM$	10
天然铀转化, $\$/kgHM$	10
天然铀浓缩, $\$/kgHM$	160
新 UOX 燃料制造, $\$/kgHM$	250
行波堆燃料制造, $\$/kgHM$	2 400
反应堆成本	
轻水堆资本成本(隔夜价), $\$/kWe$	4 000
轻水堆运行和维护成本, $\$/kWe$	56
轻水堆容量因子, %	85
行波堆资本成本(隔夜价), $\$/kWe$	4 800
行波堆运行和维护成本, $\$/kWe$	68
行波堆容量因子, %	85
后处理成本	
UOX, PUREX, $\$/kgHM$	1 600
UOX, UREX+TRUEX, $\$/kgHM$	1 600
行波堆燃料, $\$/kgHM$	3 200
废物处置成本	
UOX 临时存放, $\$/kgHM$	200
行波堆燃料临时存放, $\$/kgHM$	200
乏 UOX 处置, $\$/kgHM$	470
行波堆燃料处置, $\$/kgHM$	3 130
从 UOX 中分离出的高放废物处置, $\$/kgHM$	190
其他	
年贴现率, %	7.6
税率, %	37
压水堆寿命, a	40
行波堆寿命, a	50
行波堆燃料, $MW \cdot d/kgHM$	420

$$C_F = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (12)$$

其中,  $x_i$  为计算模型中设计的第  $i$  个经济或技术参数。敏感度分析  $e_i$  定义如下:

$$e_i = \frac{\Delta C_{F_i} / C_{F_0}}{\Delta x_i / x_0} \quad (13)$$

其中:

$$C_{F_0} = f(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$$

$$C_{F_i} = f(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{i0} + \Delta x_i, \dots, x_{n0})$$

$$\Delta C_{F_i} = C_{F_i} - C_{F_0}$$

#### 4 结果与讨论

本文对行波堆两种燃料循环方式的平准化发电成本进行了计算,并将计算结果与压水堆和快堆的平准化发电成本进行比较。3种堆型的平准化发电成本列于表2。

表2 3种堆型平准化发电成本的比较  
Table 2 Comparison of LCOE of three different types of reactors

堆型	燃料循环方式	平准化发电成本/ ( $\text{C} \cdot \text{kW}^{-1}$ )
压水堆 <sup>[5]</sup>	一次通过	8.48
	二次通过	8.64
快堆 <sup>[5]</sup>	闭式循环	8.73
行波堆	一次通过	7.66
	二次通过	8.17

通过对行波堆与压水堆及快堆的经济性比较发现,不同堆型采用不同燃料循环方式,其平准化发电成本差别不大。其中,行波堆一次通过式燃料循环的平准化发电成本最低,比压水堆一次通过式、压水堆二次通过式和快堆闭式循环分别降低了9.6%、11.3%和12.3%,比行波堆二次通过式成本降低了6.2%。通过分析可认为,行波堆采用一次通过式燃料循环是经济上较为可行的方案。

行波堆平准化发电成本敏感度输入参数列于表3,敏感度分析结果示于图3。由图3可知,贴现率、燃料深度、热效率、隔夜价对行波堆的经济性有较大影响。其中,由于反应堆需要建造和运行很长一段时间,因此,贴现率对经济性会产生很大的影响。燃料深度和热效率直接影响单位燃料生产的电力的量,因而对行波堆的经济性产生明显的影响。而反应堆的隔夜价是反应堆成本中的重要组成部分,该参数的变化也会对行波堆的经济性产生明显的影响。而燃料的价格、燃料元件的制造价格、分离功价格等直接关系燃料的参数的变化,对行波堆的经

济性影响并不敏感。其主要原因在于燃料的购置和处置价格在行波堆的成本组成中所占比例较小导致的。这也说明,即使行波堆初始堆芯的燃料价格和废料处置的价格比目前所假设的价格高,对行波堆经济性的影响也不大。

表3 行波堆平准化发电成本敏感度输入参数  
Table 3 Input parameter of sensitivity of LCOE for TWR

参数	基准值	变化区间
贴现率	0.076	0.05~0.1
燃料深度, MW·d/kgHM	420	370~470
热效率	0.4	0.3~0.45
隔夜价, \$/kWe	4800	4000~5500
运行维护价格, \$/kWe	67.73	60~80
退役价格, \$/kgHM	840	740~940
分离功价格, \$/kgHM	160	120~200
天然铀价格, \$/kgHM	80	40~120
TWR燃料制造价格, \$/kgHM	2400	2000~3000
贫铀价格, \$/kgHM	10	5~15

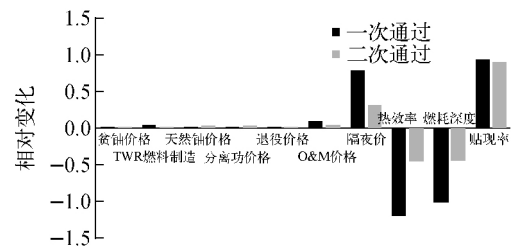


图3 行波堆平准化发电成本敏感度分析  
Fig. 3 Sensitivity analysis of LCOE of TWR

在分析选取的10个参数中,一次通过式燃料循环的经济性对各参数的敏感度高于二次通过式燃料循环。其原因在于,二次通过式燃料循环中,处于行波堆上游的压水堆在分析中是处于静态不变的。压水堆的存在减弱了各参数变化对行波堆经济性的影响。

#### 5 结论和展望

行波堆能大幅提高铀资源的利用率,并减少对铀富集产能和铀资源的需求。行波堆的部署有可能极大地降低甚至消除传统核能应用中对传统后处理的需求。由于行波堆尚未得到开

发和部署,因此,从燃料循环的角度对行波堆平准化发电成本进行初步的研究。研究表明,与传统压水堆以及快堆相比,行波堆是具备潜在经济性的,行波堆一次通过式燃料循环的经济性比二次通过式燃料循环更优。

不过,本文的分析采用了许多假设条件和数据。行波堆作为一种未来有可能部署的先进核反应堆,其准确的经济性和成本构成还需通过实践来检验。

#### 参考文献:

- [1] 刚直,赵金坤,周科源,等. 行波堆燃料利用情景初步分析[J]. 原子能科学技术,2013,47(增刊): 229-233.  
GANG Zhi, ZHAO Jinkun, ZHOU Keyuan, et al. Preliminary analysis of fuel utilization scenarios for travelling wave reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 47 (Suppl.): 229-233 (in Chinese).
- [2] ZHENG Meiyin, TIAN Wenxi, CHU Xiao, et al. Study of traveling wave reactor (TWR) and candle strategy: A review work[J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 71: 195-205.
- [3] SEKIMOTO H, YAN Mingyu. Design study on small candle reactor[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(7): 1 868-1 872.
- [4] 周法清,叶丁. 三种堆型核电厂经济性评价[J]. 核动力工程,1994,15(1):24-28.  
ZHOU Faqing, YE Ding. The economy comparison among three kind of nuclear reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 1994, 15(1): 24-28(in Chinese).
- [5] ROO G D, PARSONS J E. A methodology for calculating the levelized cost of electricity in nuclear power systems with fuel recycling[J]. Energy Economics, 2011, 33(5): 826-839.
- [6] 周法清,叶丁. 三种堆型核燃料循环经济性比较[J]. 核动力工程,1993,14(2):129-135,143.  
ZHOU Faqing, YE Ding. The economic comparison among three kinds of nuclear reactor fuel cycle[J]. Nuclear Power Engineering, 1993, 14 (2): 129-135, 143(in Chinese).
- [7] ANSOLABEHERE S, DEUTCH J M, DRISCOLL M, et al. The future of nuclear fuel cycle: An MIT interdisciplinary study[R]. USA: MIT, 2011.
- [8] TAKAKI N, SEKIMOTO H. Potential of candle reactor on sustainable development and strengthened proliferation resistance[J]. Progress in Nuclear Energy, 2008, 50(2): 114-118.
- [9] DELENE J G, HERMANN O W. Nuclear fuel cycle cost economics[R]. USA: Oak Ridge National Laboratory, 1984.
- [10] LINEBERRY M J, PHIPPS R D, BURELBACH J P. Economic and demonstration potential of the IFR fuel-cycle[J]. Transactions of the American Nuclear Society, 1985, 50 (11): 208-209.