

小型模块化压水堆静态投资成本估算方法研究

邢浩天¹, 邱 硕², 杨宇鹏^{1*}, 周 源¹, 袁 园¹, 刘文兴², 彭星杰²

¹四川大学物理学院, 四川 成都

²中国核动力研究设计院, 四川 成都

收稿日期: 2026年7月30日; 录用日期: 2026年9月8日; 发布日期: 2026年9月15日

摘 要

小型模块化压水堆在退役煤电厂址替代、海岛及偏远地区供电、工业供热等领域具有独特优势, 但其成本估算存在参数不透明、对国外数据较为依赖等问题。本文建立了面向国内核电项目划分体系的自下而上成本估算方法, 该方法以国内核电项目划分导则为总体框架, 结合国内典型压水堆的调研数据建立关键设计参数与主要设备之间的成本关联模型, 实现设计参数与成本之间的映射。以VOYGR-12小型模块化压水堆为例进行验证, 并分析了多模块公用设施分摊、一回路简化及批量建造的学习效应对成本的影响。估算结果表明, 采用传统一回路设计的VOYGR单模块核电站单位投资成本高达7.06万元/kW, 规模扩大至12模块后单位投资成本降至2.34万元/kW, 降幅接近70%。对于VOYGR-12核电站, 采用一回路简化设计使单位投资成本下降约4%, 高学习率情景较低学习率情景的单位投资成本下降7.1%~7.7%, 最终单位投资成本可降至2.08万元/kW。本文估算得到VOYGR-12单位投资成本的合理区间为2.08~2.34万元/kW, 该结果略高于国内三代大型压水堆(1.4~1.6万元/kW), 但显著低于传统缩放方法的估算结果, 表明多模块公用设施分摊、一回路简化与批量建造的学习效应可有效降低小型模块化反应堆的静态投资成本。本文方法可为同类核电项目的投资估算与方案对比提供技术参考。

关键词

小型模块化压水堆, 成本估算, 自下而上方法, 参数 - 成本关联模型

Research on Overnight Capital Cost Estimation Methods of Small Modular Pressurized Water Reactors

Haotian Xing¹, Shuo Qiu², Yupeng Yang^{1*}, Yuan Zhou¹, Yuan Yuan¹, Wenxing Liu², Xingjie Peng²

¹College of Physics, Sichuan University, Chengdu Sichuan

²Nuclear Power Institute of China, Chengdu Sichuan

*通讯作者。

文章引用: 邢浩天, 邱硕, 杨宇鹏, 周源, 袁园, 刘文兴, 彭星杰. 小型模块化压水堆静态投资成本估算方法研究[J]. 应用物理, 2026, 16(9): 802-814. DOI: 10.12677/app.2026.169074

Received: July 30, 2026; accepted: September 8, 2026; published: September 15, 2026

Abstract

Small modular pressurized water reactors present unique advantages in repurposing decommissioned coal-fired power plant sites, supplying power to islands and remote areas, and providing industrial heat. However, their cost estimation is currently hampered by opaque parameter data and heavy reliance on foreign datasets. This paper develops a bottom-up cost estimation method aligned with China's nuclear power project classification system. Taking domestic guidelines for nuclear power project classification as the framework, a cost correlation model between key design parameters and major equipment is established based on survey data of typical domestic pressurized water reactors, realizing the mapping from design parameters to construction costs. Taking VOYGR-12 as the research object, this paper analyzes the influences of multi-module cost sharing of shared facilities, primary loop simplification and the learning effect from batch construction. The overnight capital cost (OCC) of a single module with conventional primary loop is 7.06 ten thousand CNY/kW, which drops to 2.34 ten thousand CNY/kW for a 12-module configuration, a reduction of nearly 70%. For VOYGR-12, simplified primary loop cuts the OCC by about 4%, and the OCC under a high learning rate is 7.1%~7.7% lower than that under a low learning rate, with the minimum value reaching 2.08 ten thousand CNY/kW. The reasonable OCC range of VOYGR-12 is 2.08~2.34 ten thousand CNY/kW. This value is slightly higher than that of domestic third-generation large pressurized water reactors (1.4~1.6 ten thousand CNY/kW), but far more accurate than results from traditional scaling methods. Multi-module cost sharing, primary loop simplification and batch construction learning effect can effectively reduce the OCC of small modular reactors. The proposed method can provide technical references for investment estimation and scheme comparison of similar nuclear power projects.

Keywords

Small Modular Pressurized Water Reactor, Cost Estimation, Bottom-up Method, Parameter-Cost Correlation Model

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

相较于传统能源,核电具有低碳、稳定、高效等优势,但其前期投资大、建设周期长、资金成本高,经济性分析始终是项目决策的核心环节[1],是核电实现大规模商业化的关键。国际原子能机构(IAEA)将电功率小于 300 MWe 的反应堆定义为小型堆[2]。近年来,小型反应堆成为核能技术发展的重要方向[3]。小型堆采用一体化设计和模块化建造模式,可缩短建设周期、降低融资成本。同时,其厂址适用性更强,可用于退役煤电厂址替代、海岛及偏远地区供电、工业供热及海水淡化等场景,这些是传统大型核电站难以实现的。但这类堆型单位投资成本往往较高并存在较大不确定性,不同设计的成本差异显著[4]。因此,开展小型模块化反应堆精细化成本估算方法研究,开发科学可靠的成本分析工具,对于推动小型堆技术发展和工程应用具有重要意义[5]。

自下而上的核电站成本估算方法能够精准反映设计参数与成本的内在联系,适用于小型堆成本估算

[3]。Ganda 等[6]开发了 ACCERT (Algorithm for the Capital Cost Estimation of Reactor Technologies)成本估算工具,建立了包含 79 个成本账户的自下而上估算框架。Stewart 和 Shirvan [7]针对多模块轻水堆开展资本成本估算,分析了模块化建造对成本的影响。Mancini 等[8]提出一种兼顾小型模块化压水堆设计和建造特征的自下而上成本估算方法,并将其应用于 IRIS 和 NuScale 两种堆型,研究显示,采用自下而上方法估算的 12 模块 NuScale 核电站(VOYGR-12)隔夜资本成本(OCC)约为大型压水堆的 105%,而传统自上而下缩放方法会将该数值估至 294%。国内 ACP100 是全球首个开工建设的陆上商用小型压水堆,但针对其设备级成本估算的研究尚不充分。

综上,现有小型压水堆成本估算研究仍存在以下不足:① 数据依赖,多数模型的成本参数来源于国外堆型或专有数据,难以直接用于国内小型压水堆的成本估算;② 框架缺失,缺乏基于国内核电项目划分体系的参数化估算框架。针对上述问题,本文依托国内核电项目划分导则搭建总体框架,结合国内大型压水堆的数据构建参数化成本模型,建立适配国内体系的小型压水堆自下而上成本估算方法,实现设计参数与成本的关联映射。本文选取 VOYGR-12 核电站为例进行方法验证。研究成果可为小型压水堆的建设投资成本估算提供方法支撑。

2. 研究方法

现阶段核电站成本估算主要分为自上而下和自下而上两类方法。自上而下法基于历史项目总投资数据,通过比例缩放实现新项目成本估算,方法简便但难以反映设计细节和技术差异对成本的影响。相比之下,自下而上法从设备级成本估算出发,能够更细致地反映设计参数与成本的关联关系。因此本研究基于自下而上法开展。

本文成本计算模型建模流程分为两步:第一步界定成本构成范围,第二步建立各设备及系统的成本估算公式。本章首先参照国内核电项目划分标准,明确研究边界与核算范围;其次,针对各系统及核心设备逐项建立参数化成本计算模型,后续逐级汇总形成工程基础价。

2.1. 项目划分

根据我国《核电厂建设项目费用性质及项目划分导则》[9],核电站建设项目的总资金由工程费用、工程其他费用、基本预备费、建设期利息和铺底流动资金等构成。本文以工程基础价(静态投资)为研究对象,涵盖工程费用、工程其他费用、特殊项目、n/m 首炉核燃料费、基本预备费及扣建设期可抵扣增值税。本文采用单位静态投资成本作为经济性评价指标,后文简称为单位投资成本,计算公式如下:

$$\text{单位静态投资成本} = \frac{\text{核电厂工程基础价(万元)}}{\text{核电厂总额定电功率(kW)}} \quad (1)$$

工程费用按性质分为前期准备工程、建筑工程和安装工程三大类,如图 1 所示。建筑工程按场所分为核岛、常规岛、电厂配套设施(Balance of Plant, BOP)三类,安装工程按系统功能分为反应堆系统、动力转换系统、仪控系统、通风系统、综合电力系统、辐射防护与监测系统、厂区配套系统、数字孪生系统等。工程其他费用不属于实体工程建设费用,主要按照行业统一取费标准计取,主要包括建设场地征用及清理费、项目建设管理费、勘察设计费、生产准备费、联合试运转费等。

本文采用多级账目模式搭建成本层次体系,以反应堆系统为例,一级账目为反应堆系统;二级账目划分为核岛主系统及附属设备、燃料装卸与贮存系统、核岛专设安全系统、核岛辅助工艺系统等;三级账目继续拆解为反应堆本体、反应堆冷却剂系统等单元;四级账目则细化至可独立估算的设备单元,如压力容器、堆内构件、主泵、蒸汽发生器、稳压器等。在此基础上,本文结合设备物理参数开展成本估算,建立设计参数与价格的关联模型,实现自下而上的精细化成本计算。

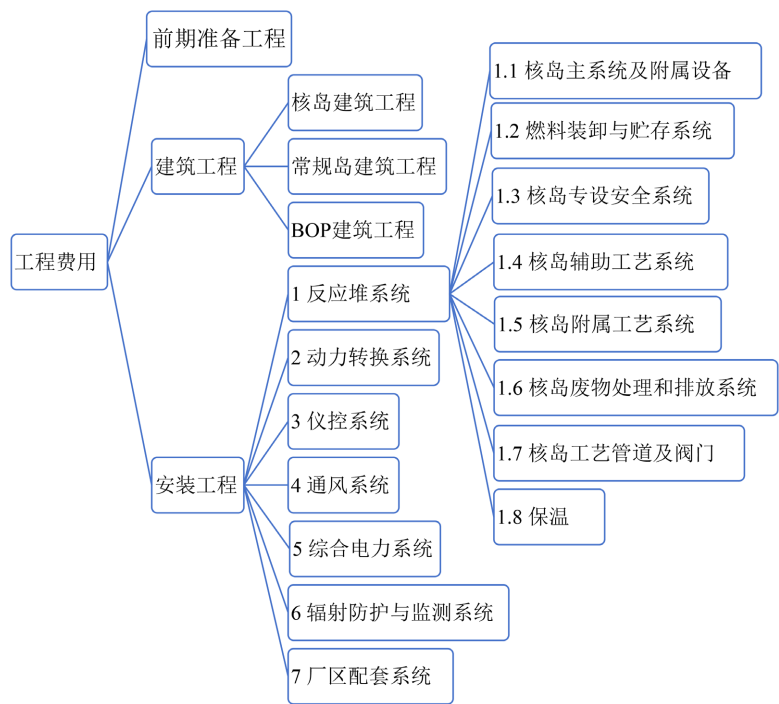


Figure 1. Composition of project cost
图 1. 工程费用构成

2.2. 成本计算模型

在明确成本构成与多级账目划分规则的基础上，本节进一步介绍各类费用的成本计算模型。模型基于 2.1 节搭建的四级账目体系，以设备物理参数为核心，针对前期准备工程费、建筑工程费、安装工程费及工程其他费用分别构建。

2.2.1. 前期准备工程

前期准备工程涵盖厂区及施工区土石方工程、施工电源、施工供排水、施工道路、施工通信及用地围栏等内容，成本驱动因素主要为工程量。各项费用采用工程量乘以综合单价的方式计算，如式(2)所示。单价依据行业调研数据选取。

$$C_{\text{building}} = S \cdot p_s \tag{2}$$

式中， S 为厂房占地面积， p_s 为对应面积单价。

2.2.2. 建筑工程

建筑工程费分核岛、常规岛、BOP 三部分分别估算，各部分包含若干厂房及构筑物。本项费用依据厂房体积或占地面积结合对应单价指标计算，单价参考国内小型压水堆工程调研数据确定。

2.2.3. 安装工程

安装工程费按功能系统划分为反应堆系统、动力转换系统、仪控系统、通风系统、综合电力系统、辐射防护与监测系统、厂区配套系统、数字孪生系统等。各系统的安装工程费均由设备购置费和安装费两部分组成。

1) 反应堆本体系统

压力容器成本传统估算方式为根据各结构材料质量与对应材料的综合单价分项求和得到总价。国内

缺乏公开的小型堆压力容器成本数据,难以推算实际单价,本文以国内大型压水堆工程相关数据为基准,通过总质量比例缩放法估算其成本,计算方法如式(3)所示。

$$C = C_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{M}{M_{\text{ref}}} \right)^n \quad (3)$$

其中, C 、 M 分别为目标设备的成本与质量, C_{ref} 、 M_{ref} 分别为参考设备的成本与质量, n 为缩放指数,表示压力容器规模经济效应,该取值参考 Mancini 等人[8]的相关研究选取。该计算方法同样适用于汽水管道系统。

堆内构件与压力容器均由低合金钢锻件经大型锻造成型加工而成,材料等级和制造工艺相近,且堆内构件的结构尺寸需与压力容器内部空间相匹配,二者成本具有强相关性。根据现有研究与工程经验,堆内构件成本通常为压力容器成本的 0.8~0.9 倍。对于控制棒驱动机构,本文参考国内先进反应堆项目的设备采购数据,结合行业调研确定其成本。随着压水堆规模变化,安全壳的结构形式也会相应调整,一体化小型堆的安全壳多采用钢制容器形式。参考现有研究中安全壳与压力容器成本的比例关系,本文安全壳成本按压力容器成本的 0.7~0.8 选取。

2) 反应堆冷却剂系统

对于采用强制循环设计的反应堆,主泵是反应堆冷却剂系统的核心设备,其作用是驱动冷却剂在一回路中循环,将堆芯热量传递至蒸汽发生器。主泵的功率、流量和扬程等关键参数,对其制造成本和运行能耗有直接影响。主泵的成本计算方法如式(4)所示。对于采用自然循环设计的反应堆,一回路无主泵配置,不计入该部分成本。

$$C = C_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{Q \cdot H}{Q_{\text{ref}} \cdot H_{\text{ref}}} \right)^n \quad (4)$$

其中, C 为目标设备成本, Q 、 H 分别为目标设备的流量、扬程, C_{ref} 、 Q_{ref} 、 H_{ref} 分别为参考设备的成本、流量和扬程, n 为缩放指数。本公式直接参考了 Ganda [6] 基于 PWR-12BE 压水堆数据所给出的泵成本缩放关系,基准成本及性能参数取自国内大型压水堆工程资料。该公式反映了主泵成本随水力功率非线性增长的规律,随着泵规模增大,材料用量和制造难度并非等比例上升,因此成本增速低于水力功率增速。该缩放关系同样适用于给水泵和凝水泵的成本估算。

流量和扬程是主泵成本的关键驱动因素,流量决定泵的通流能力和叶轮尺寸,扬程决定泵的压力等级和壁厚要求,两者共同影响泵的水力功率和结构强度。因此,以流量与扬程的乘积作为成本驱动变量,能够更准确地反映主泵的物理规模与成本之间的关系。

蒸汽发生器的功能是将一回路冷却剂从堆芯带出的热量传递给二回路给水,使其蒸发产生蒸汽,推动汽轮发电机组发电。蒸汽发生器的换热能力主要取决于换热面积,换热面积越大,设备的材料用量和制造难度也随之增加。蒸汽发生器成本计算公式形式与压力容器相同,缩放变量为换热面积,缩放指数 n 参考 Mancini 等[8]的反应堆设备估算逻辑,基准成本数据来源于相关供应商调研结果。

缩放指数反映的是设备成本随关键参数变化的比例关系,由同类设备的材料用量和制造难度决定,而非特定堆型的绝对成本水平。压水堆技术路线其压力容器、主泵、蒸汽发生器等主要设备在结构和制造工艺上具有相似性,因此该缩放指数可直接复用。

3) 动力转换系统

汽轮发电机是动力转换系统的核心设备,其作用是将蒸汽的热能转换为机械能,再进一步转换为电能。机组的输出功率直接决定了设备尺寸、材料用量和制造难度,是影响成本的主导因素。汽轮发电机

成本与热工参数的关系如式(5)所示。

$$C=a\cdot X^b$$

(5)

其中, X 为电功率, a 表示与价格相关的常量, b 为体现规模经济效益的常量。本式参考了 Zhang 等[10] 的汽轮发电机成本模型, 并以国内大型压水堆工程数据为基准确定参数取值。该公式采用电功率作为成本驱动变量, 原因在于汽轮发电机的转子、叶片、汽缸、发电机定子等主要部件的尺寸和质量均随机组功率增大而相应增加。缩放指数反映了设备的规模经济效应, 随着功率提升, 单位功率成本呈下降趋势, 其原因在于大型汽轮发电机在热力设计上可采用更高效的级数配置, 材料利用率和制造效率更高。

4) 其他系统

对于仪控系统、电气系统、通风系统及稳压器、余排泵等非主导型设备和缺少详细参数的小型系统, 本文采用基于电功率的整体缩放方法估算成本, 如式(6)所示。

$$C=C_{\text{ref}}\cdot\left(\frac{P}{P_{\text{ref}}}\right)^n$$

(6)

其中, C 为目标设备或系统的成本, P 为目标反应堆电功率, C_{ref} 、 P_{ref} 分别为参考设备或系统的成本、参考堆的电功率, n 为缩放指数, 参考 Stewart 和 Shirvan [7] 的研究选取。

2.2.4. 工程其他费用

工程其他费用是指在工程费用之外, 为完成项目建设所需发生的各类辅助性、管理性费用。根据我国《核电厂建设项目工程其他费用编制规定》[11], 工程其他费用主要包括建设场地征用及清理费、项目建设管理费、勘察设计费、生产准备费、联合试运转费等。该类费用不直接对应具体的厂房或设备, 但与项目的顺利实施密切相关, 在总成本中占有一定比重。本文涉及的主要费用计取方法如表 1 所示。表 1 中各项费用的计取方法和比例系数主要依据《核电厂建设项目工程其他费用编制规定》[11] 确定。上述费用与工程费用相加, 构成工程基础价。

Table 1. Calculation methods for other engineering costs

表 1. 工程其他费用计取方法

费用名称	计取方法	说明
建设场地征用及清理费	$C=S\cdot p_s$	S 为占地面积, p_s 为单位面积费用
建设单位管理费	$C=C_{\text{工程}}\cdot 0.0709$	按工程费用比例计取[11]
招标费	$C=C_{\text{工程}}\cdot 0.0206$	按工程费用比例计取[11]
设备监造费	$C=C_{\text{设备}}\cdot 0.013$	按设备购置费比例计取[11]
工程质保费	$C=C_{\text{工程}}\cdot 0.004$	按工程费用比例计取[11]
工程保险费	$C=C_{\text{工程}}\cdot 0.004$	按工程费用比例计取[11]
勘察费	$C=C_{\text{ref}}\cdot\left(\frac{S}{S_{\text{ref}}}\right)^n$	按占地面积比例缩放
设计费	以工程费用为计费额, 按直线内插法计算	参照《工程勘察设计收费标准》[11]
生产人员培训费	$C=kN_{\text{人年}}$	$N_{\text{人年}}$ 为培训人年数, k 取 2.5 万元/人年[11]

续表

提前进厂费	$C = kN_{\text{人年}}$	$N_{\text{人年}}$ 为提前进厂人年数, k 取 35 万元/人年[11]
办公家具购置费	$C = C_{\text{工程}} \cdot 0.0037$	按工程费用比例计取[11]
管理车辆购置费	$C = C_{\text{设备}} \cdot 0.0017$	按设备购置费比例计取[11]
役前检查费	$C = C_{\text{核岛设备及安装}} \cdot 0.0017$	按核岛设备购置费与安装费之和的比例计取[11]
场外核事故应急准备金	$C = kP$	P 为电功率(kW), k 取 5 元/kW [11]
特种设备安全检测费	$C = kP$	P 为电功率(kW), k 取 1.7 元/kW [11]
核电标准编制费	$C = C_{\text{工程}} \cdot 0.005$	按工程费用比例计取[11]

3. 基于 VOYGR-12 的方法验证与结果分析

3.1. VOYGR-12 简介

本文选取美国 NuScale 公司的 VOYGR-12 (12 × 77 MWe)小型模块化压水堆以验证成本估算方法的可靠性。该堆型是全球首个完成美国核管理委员会设计认证的小型压水堆, 由 12 套独立功率模块组成。单个模块采用一体化核岛设计, 依靠自然循环运行并取消主冷却剂泵及相关管道和阀门, 大幅简化系统结构。各模块均配置独立的汽轮发电机组及二回路系统, 可单独运行与检修。从成本构成来看, 反应堆、汽轮机组等为单模块专属设备成本随模块数量线性增加; 安全水池、主控室、燃料库房及厂区土建等为全厂公用设施, 固定成本可通过多模块布置实现分摊。该模块标准化程度高, 采用工厂预制模式, 适合批量建造。模块主要设计参数如表 2 所示。

Table 2. Main design parameters of the NuScale module
表 2. NuScale 模块主要设计参数

参数	值	单位
单模块热功率	250	MWth
单模块电功率	77	MWe
设计寿命	60	年
容量因子	>95%	
压力容器质量	95	t
蒸汽发生器总换热面积	1665	m ²
汽轮发电机输出功率	77	MWe

3.2. 估算方法验证

核电站建设成本与建设序列密切相关。首堆(First-of-a-Kind, FOAK)因设计未固化、供应链尚未成熟、工期不确定性较高等因素, 其单位投资通常显著高于批量化建设的后续机组。第 N 堆(Nth-of-a-kind, NOAK)对应设计已固化、供应链趋于完善、施工组织成熟后的批量化建设阶段。根据 Abou-Jaoude 等研究[12], FOAK 成本约为介于首堆与第 N 堆之间的过渡机组(Between-of-a-Kind, BOAK)的 1.3 至 2.1 倍,

NOAK 成本通常低于 BOAK。考虑到 NuScale 基于模块化、标准化的设计，具备批量化生产的潜力，因此本文基于该堆型 NOAK 情景开展成本估算，未计入首堆特有的设计变更、首台套设备额外费用及工期延误等附加成本。计算得到 VOYGR-12 工程基础价如表 3 所示，工程基础价为项目 1 至 7 各项之和。然后将计算结果与 Black 等[13]和 Asuega 等[14]的研究进行对比。

Table 3. Overnight capital cost of the VOYGR-12 plant
表 3. VOYGR-12 工程基础价

序号	项目	设备购置费	安装费	合计 (单位: 万元)
1	前期准备工程费用	-	-	2725
2	建筑工程费用	-	-	128,119
3	安装工程费用	1024988	231102	1,256,090
3.1	反应堆系统	374355	65794	440,149
3.2	动力转换系统	178201	38734	216,935
3.3	仪控系统	-	-	213,116
3.4	通风系统	22,363	3355	25,718
3.5	综合电力系统	106,951	65,831	172,782
3.6	辐射防护与监测系统	59,907	10,199	70,106
3.7	厂区配套系统	107,868	7641	115,509
3.8	数字孪生系统	4849	697	5546
4	工程其他费用	-	-	380,344
5	n/m 首炉核燃料费	-	-	365,767
6	基本预备费	-	-	106,840
7	建设期可抵扣增值税	-	-	-172793
	工程基础价	-	-	2,067,092
	单位投资成本	-	-	22,371 元/kW

针对 VOYGR-12 小型压水堆，Black 等在 2019 年基于厂商内部数据(12 × 60MWe)整理得到单位静态投资成本为 3456.72 \$/kW [13]，Asuega 等采用 ACCERT 框架估算结果为 3985~4844 \$/kW [14]，本文基于国内核电造价体系的估算结果为 2.24 万元/kW，折合美元约 3200\$/kW，在估算对象为同类型同功率规模反应堆且估算范围均为隔夜资本成本的情况下，低于上述美国研究和估算结果。其原因在于中美核电工程造价存在显著差异，如 Liu 等[15]研究显示，美国近年来新建核电机组单位静态投资成本普遍高于 6000 \$/kW，中国核电建设单位投资成本长期稳定在 4000 \$/kW 以内，表明本文对 VOYGR-12 的估算结果具备合理性，验证了本文方法的可靠性。

3.3. 成本构成分析

在成本估算与方法验证的基础上，本节进一步按费用类别分析了 VOYGR-12 的工程基础价中各项费

用占比情况。VOYGR-12 的成本构成如图 2、图 3 所示。

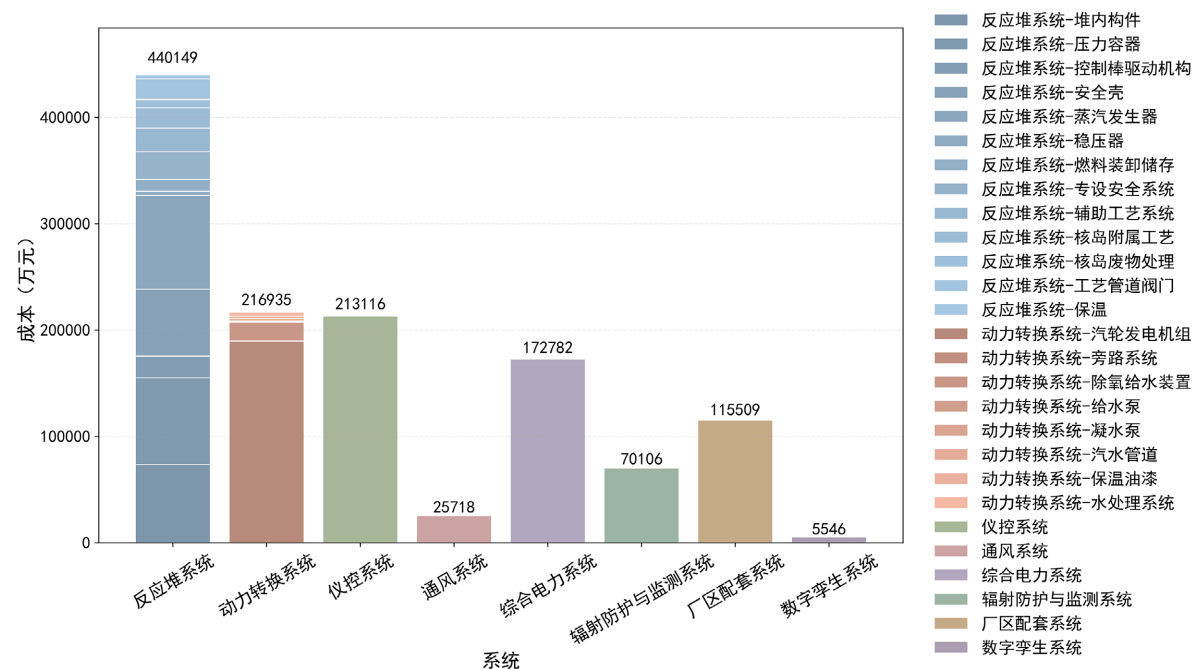


Figure 2. Cost breakdown of installation engineering systems for the VOYGR-12 plant
图 2. VOYGR-12 安装工程各系统成本构成

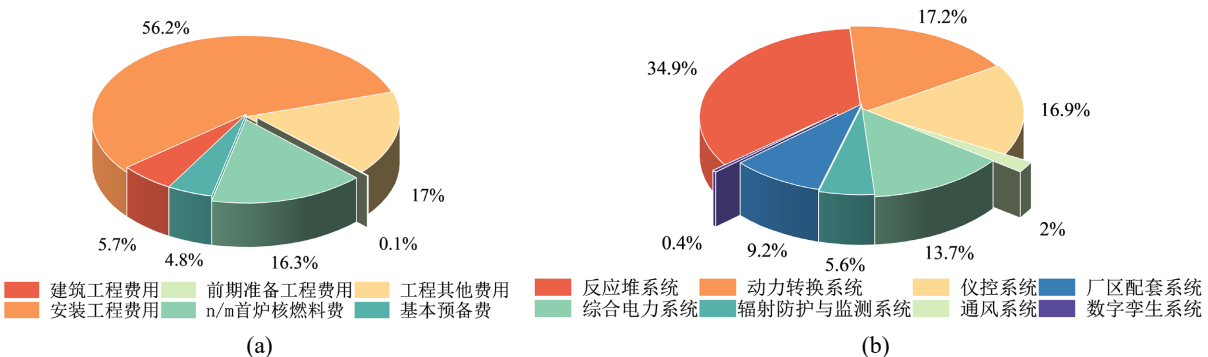


Figure 3. Cost composition of the VOYGR-12 plant. (a) Overnight capital cost of the nuclear power plant; (b) Installation cost breakdown
图 3. VOYGR-12 成本构成。(a) 核电站静态投资构成; (b) 安装工程成本构成

整体来看，安装工程费为工程基础价主体，占总成本 56.2%，建筑工程费、n/m 首炉核燃料费、工程其他费用占比分别为 5.7%、16.3%和 17%。

安装工程费中，反应堆系统占比最高，约占 34.9%。该系统由反应堆本体(压力容器、堆内构件等)和反应堆冷却剂系统(蒸汽发生器、稳压器等)组成。NuScale 采用自然循环设计，由于省去了主泵成本，冷却剂系统的成本主要来自蒸汽发生器。12 模块共配置 12 台压力容器与 24 台蒸汽发生器，使得反应堆系统成为安装工程费最主要的组成部分。动力转换系统占比 17.2%，主要包括汽轮发电机组及配套设备。全核电站共配备 12 套汽轮发电机组。仪控、通风、综合电力、辐射防护、厂区配套及数字孪生系统等合计占比 47.9%。此类系统单项占比偏低，但覆盖范围广、设备构成复杂，是成本构成中不可忽视的部分。

工程其他费用中，项目建设管理费占比最高，约占 46%，项目勘察设计与技术服务费约占 29%，其

余为建设场地征用及清理费、前期工作费、联合试运转费以及其他费用。上述费用主要按《核电厂建设项目工程其他费用编制规定》取费，以工程费用为基数按比例计取，费率和定额标准不随堆型规模显著变化。

3.4. 成本差异成因分析

本文估算得出 VOYGR-12 核电厂单位投资成本为 2.24 万元/kW,略高于国内三代大型压水堆(1.4~1.6 万元/kW)。依据传统的规模经济理论，小功率机组的单位投资成本应显著高于大功率机组，采用自上而下比例缩放方法的估算结果往往将小型堆的单位成本估算至大型堆的 2~3 倍[8]。本文估算结果与传统的规模经济理论存在差异，这是由于设计优化、多模块公用设施分摊效应、批量建造学习效应的综合作用有效抵消了单机组规模缩减带来的成本增量。

一方面，核电厂关键设备的设计制造与安全认证、基础安全配套设施以及 BOP 系统均存在大量固定成本，该部分成本不会随机组功率减小而同步降低。大型反应堆可凭借较大装机容量充分分摊固定投入，形成良好的规模经济效益，而小型堆功率较低，固定成本占比显著提升，造成单位投资成本显著升高。另一方面，取消主泵并简化一回路管道、阀门及附属设备，有效减少了核心系统的设备采购与安装费用；多模块共用安全水池、燃料库房、全厂仪控系统及电厂配套设施，将大额固定成本分摊至多个发电单元；同厂址标准化模块连续建造，依托施工经验积累降低建造成本。上述影响因素及具体工程表现如表 4 所示。

Table 4. Key factors and engineering manifestations of cost differences
表 4. 成本差异关键因素及工程表现

因素	类型	具体表现
固定成本占比提升	规模经济	单个机组的刚性固定成本无法随功率同步降低
一回路结构简化	设计优化	采用自然循环，省去主泵及相关管道、阀门成本
多模块共用系统	多模块公用设施分摊效应	仪控、换料、BOP 系统等共用，摊薄固定投资成本
后续模块成本降低	批量建造学习效应	站内连续建造模块，施工熟练度提升，降低建造费用

综上，设计优化、多模块公用设施分摊效应与批量建造学习效应共同作用，大幅缩小了小型堆与大型压水堆的单位投资成本差距。下文将基于成本计算模型，分析上述三种因素对单位投资成本的影响。

3.5. 不同情景下的经济性分析

为提升结果可靠性，量化一回路简化设计、多模块公用设施分摊效应和批量建造学习效应对降低成本的贡献，本节引入学习效应模型，结合不同模块数量、不同设计方案开展多情景对比估算。

学习率是指产量翻倍时，单位成本下降的固定比例。在核电机组标准化、批量化建造过程中，作业熟练度提升、施工经验积累及管理优化等因素导致的生产率提高，会推动核电机组的比投资逐步下降，这种现象称之为学习效应，如式(7)所示。

$$C_N = C_1 \cdot (1 - LR)^{\log_2 N} \tag{7}$$

其中， C_N 为第 N 个模块的成本， C_1 为首个模块的成本， LR 为学习率。在核电领域，传统意义上的学习率是指随着某一型号反应堆装机容量翻倍，其单位成本可下降的固定比例。本研究关注同一厂址内连续建造多个模块时产生的学习效应。IRIS 反应堆的经济性评估明确指出：在建造多模块电站时，通过保留

核心施工团队、反复执行相同作业流程，可以显著降低后续模块的边际成本，这是模块化电站的独特优势之一[16]。核电建设的学习率因技术路线和项目条件而异，通常在 5%至 15%之间[12]。

本文分别选取 5% (低学习率)和 15% (高学习率)两个典型值，同时区分传统一回路与一回路简化两种设计形式，组合形成四类估算情景，情景一：一回路简化、低学习率；情景二：传统一回路，低学习率；情景三：传统一回路、高学习率；情景四：一回路简化、高学习率。四种情景具体如表 5 所示。传统一回路和一回路简化两种设计形式的设备差异如表 6 所示。不同模块数量下各情景的单位投资成本估算结果如表 7 所示，成本变化趋势如图 4 所示。

如表 7 和图 4 所示，仅对比不同模块数量所对应的成本时，单模块的单位投资成本将高达约 7 万元/kW，随着模块数量增加，四种情景下的单位投资成本均呈下降趋势，当模块数增加至 12 个时，单位投资成本可降至约 2 万元/kW，整体平均降幅接近 70%。该变化规律表明，同一厂址多模块布局能够有效将大额固定成本分摊至更多发电单元，提升小型模块化压水堆的经济性。

Table 5. Combination schemes of the four estimation scenarios

表 5. 四类估算情景组合方式

情景	具体组合
情景一	一回路简化、低学习率(5%)
情景二	传统一回路、低学习率(5%)
情景三	传统一回路、高学习率(15%)
情景四	一回路简化、高学习率(15%)

Table 6. Comparison of major equipment costs between simplified primary loop design and conventional primary loop design (per module)

表 6. 一回路简化设计与传统一回路设计主要设备成本对比(单模块)

设备/系统	传统一回路设计	一回路简化设计	简化设计后成本变化
主泵	参考基准堆按比例缩放成本	无主泵成本	-100%
一回路管道	参考基准堆按比例缩放成本	大幅减少管道成本	-60%

Table 7. Unit investment cost under different module quantities and design scenarios

表 7. 不同模块数量及设计情景下的单位投资成本(单位：万元/kW)

模块数量	情景一	情景二	情景三	情景四	单位投资成本平均降幅
1	6.80	7.06	7.06	6.80	0%
2	4.52	4.71	4.67	4.48	33.7%
4	3.26	3.40	3.31	3.17	52.6%
6	2.78	2.91	2.79	2.67	59.8%
8	2.53	2.64	2.50	2.39	63.7%
12	2.24	2.34	2.16	2.08	68.2%

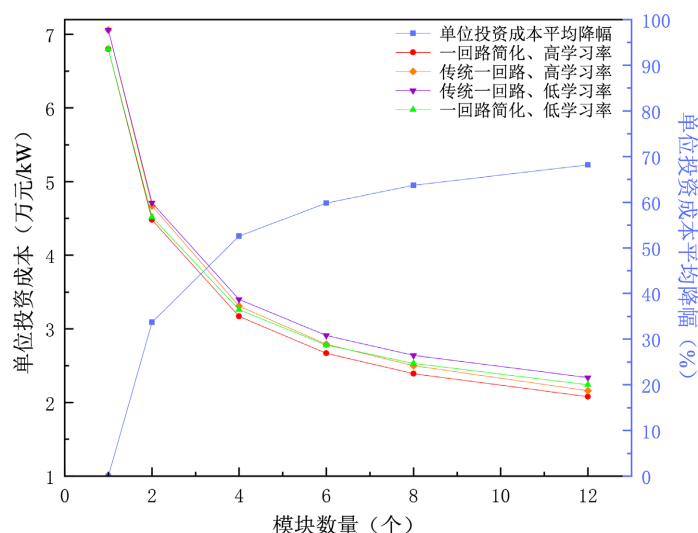


Figure 4. Unit investment cost trends under different design scenarios

图 4. 不同设计情景下单位投资成本随模块数量变化趋势

分别对比情景一和情景二、情景三和情景四,在相同学习率条件下,采用简化一回路设计的机组单位投资成本始终低于传统一回路方案,降幅约 4%,验证了设计优化带来的直接降本作用。

学习效应的影响随模块数量增多逐步凸显,单模块不存在连续建造的过程,不同学习率下成本基本一致。分别对比情景一和情景四、情景二和情景三,模块数量为 12 个时,高学习率相对低学习率的单位投资成本可降低 7.1%~7.7%。

随着模块数量持续增加,单位投资成本的下降速率减缓,降幅逐渐趋于平稳,呈现出明显的规模边界效应。这一现象表明,依靠单纯增加模块数量来分摊固定成本的降本潜力存在上限,在达到一定规模后,继续扩容难以实现单位投资成本的大幅下降。由此可知,小型模块化压水堆规划厂址容量时应结合负荷需求与经济平衡点合理确定模块数量,实现资源合理配置。想要进一步提升项目经济性,重心需要从依靠固定成本摊薄,转向依靠设计优化、批量建造学习效应等方向,通过技术迭代与管理优化持续挖掘降本潜力。

4. 结论

针对国内小型模块化压水堆成本估算存在参数不透明、方法不统一等问题,本文建立了一套基于设备级参数的自下而上成本估算方法。该方法依托国内核电项目划分导则搭建框架,以国内大型核电相关数据为基准构建核电站关键设备成本模型,并以 VOYGR-12 核电厂(924 MWe)为例完成了成本估算与结果验证,主要结论如下:

1) 该方法可依托设计参数开展设备级成本计算。计算得到 VOYGR-12 核电厂的总静态投资约 206.7 亿元,单位投资成本约 2.24 万元/kW,该结果略低于 Asuega 等[14]基于美国数据的估算值,这与中国核电单位建设成本长期低于美国水平[15]的中美核电造价差异趋势一致,因此本文估算结果处于合理范围内。安装工程费用占总成本 56.2%,在安装工程中,反应堆系统费用占比最高,可达 34.9%。

2) 小型模块化压水堆与大型压水堆的成本差异,是多重因素共同作用的结果。小型堆受装机规模限制,固定配套成本占比偏高,导致单位投资成本偏高。但小型模块化反应堆特有的多模块公用设施分摊、一回路结构简化、批量建造积累施工经验等特性,能够有效缩小与大型堆的单位投资成本差距。

3) 采用传统一回路设计的 VOYGR 单模块核电站单位投资成本高达 7.06 万元/kW,核电站共址的模

块数量达到 12 后,单位投资成本降至 2.34 万元/kW,降幅接近 70%,依托批量建造积累的施工经验,高学习率情景较低学习率情景的单位投资成本可进一步下降 7.1%~7.7%。在同等建造熟练度下,采用一回路简化设计可使单位投资成本降低约 4%。

4) 在不同的设计与建造情景下,本文针对该功率规模(924MWe)小型模块化压水堆给出的单位投资成本参考区间为 2.08~2.34 万元/kW。本文提出的估算方法可为同类核电项目开展成本预估与方案对比提供参考。

基金项目

感谢中国核动力研究设计院先进核能技术全国重点实验室“面向新型反应堆成本计算及分析方法研究”项目(项目编号: STSW-0325-0104-02)、中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室(项目编号: HT-KFKT-02-2020002)、四川省科技计划(项目编号: 2026NSFSC0740)的支持。

参考文献

- [1] 韩绪鹏, 宋长虹, 温帅. 小型模块化反应堆全球发展态势及中国应对策略[J]. 红水河, 2025, 44(6): 135-139.
- [2] International Atomic Energy Agency (2006) Progress in Design and Technology Development for Innovative Small and Medium Sized Reactors: GC(51)/INF/3-Att.4. IAEA.
- [3] 王晨, 郑鑫, 张慧敏. 小型模块化反应堆发展研究[J]. 河南科技, 2021, 40(10): 110-113.
- [4] Kim, P. and Macfarlane, A. (2026) Challenges of Small Modular Reactors: A Comprehensive Exploration of Economic and Waste Uncertainties Associated with U.S. Small Modular Reactor Designs. *Progress in Nuclear Energy*, **190**, Article 105989. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2025.105989>
- [5] Lee, J.I. (2024) Review of Small Modular Reactors: Challenges in Safety and Economy to Success. *Korean Journal of Chemical Engineering*, **41**, 2761-2780. <https://doi.org/10.1007/s11814-024-00207-0>
- [6] Ganda, F., Hoffman, E., Taiwo, T.A., *et al.* (2019) Report on the ACCERT Cost Algorithms Tool, ANL/NSE-19/10. Argonne National Laboratory.
- [7] Stewart, W.R. and Shirvan, K. (2022) Capital Cost Estimation for Advanced Nuclear Power Plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **155**, Article 111880. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111880>
- [8] Mancini, M., Mariani, C., Mauri, M., Agostino Mignone, O. and Enrico Ricotti, M. (2025) Estimating Small Modular Reactor Costs: A Bottom-Up Cost Model Analysis. *Organization, Technology and Management in Construction: An International Journal*, **17**, 279-301. <https://doi.org/10.2478/otmcj-2025-0016>
- [9] NB/T 20639-2023 核电厂建设项目费用性质及项目划分导则[S]. 北京: 国家能源局, 2023.
- [10] Zhang, S.J., Li, L.S., Huo, E.G., *et al.* (2024) Parameters Analysis and Techno-Economic Comparison of Various Ores and sCO₂ Cycles as the Power Cycle of Lead-Bismuth Molten Nuclear Micro-Reactor. *Energy*, **295**, Article 131103. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131103>
- [11] NB/T 20025-2010 核电厂建设项目工程其他费用编制规定[S]. 北京: 国家能源局, 2010.
- [12] Abou-Jaoude, A., Lin, L.Y., Bolisetti, C., *et al.* (2023) Literature Review of Advanced Reactor Cost Estimates: INL/RPT-23-72972 Rev.3. Idaho National Laboratory.
- [13] Black, G.A., Aydogan, F. and Koerner, C.L. (2019) Economic Viability of Light Water Small Modular Nuclear Reactors: General Methodology and Vendor Data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **103**, 248-258. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.041>
- [14] Asuega, A., Limb, B.J. and Quinn, J.C. (2023) Techno-Economic Analysis of Advanced Small Modular Nuclear Reactors. *Applied Energy*, **334**, Article 120669. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120669>
- [15] Liu, S.W., He, G., Qiu, M.H., *et al.* (2025) China Reins in the Spiralling Construction Costs of Nuclear Power—What Can Other Countries Learn? *Nature*, **643**, 1186-1188. <https://doi.org/10.1038/d41586-025-02341-z>
- [16] Miller, K. (2005) IRIS-Economics Review. In: *The 13th International Conference on Nuclear Engineering Abstracts*, Chinese Nuclear Society, 207.