

天然气发电项目施工管理过程中的技术经济优化研究

陈锐丽

华电四川发电有限公司内江发电厂，四川 内江 641000

摘要：天然气发电凭借其清洁、高效、运行灵活等突出优势，成为支撑可再生能源大规模消纳、保障电网安全稳定运行不可或缺的重要能源。本文聚焦于天然气发电项目施工管理全过程，旨在开展技术经济一体化优化研究。该研究将现代施工管理理论与技术经济学原理深度融合，分析施工阶段中技术与经济的互动关系，综合应用价值工程、全生命周期成本分析等理论，构建一个实现项目全生命周期成本最小化的经济优化方法。

关键词：天然气发电项目；施工管理；技术经济优化；应用对策

全球范围内，应对气候变化已经成为共识，以《巴黎协定》为代表的国际公约推动着一场深刻的能源革命。在低碳化、清洁化和智能化的能源体系发展中，风能、太阳能等可再生能源迅猛发展，但具有间歇性、波动性的特点，对电力系统的稳定运行提出了严峻的挑战。我国提出的“力争2030年前实现碳达峰，2060年前实现碳中和”的双碳目标，是国家重大战略决策，因此我国近年来正积极构建以新能源为主体的新型电力系统，这一转型是一个循序渐进的过程，需要多种能源协同互补。在保障能源安全、电力供应的基础上，如何平衡“清洁替代”与“能源稳定”的关系，成为我国能源转型的重要议题。虽然市场前景广阔，天然气发现项目本身的建设过程充满挑战，面临着技术密集、投资额高、工期紧张等问题，最关键的就是技术与经济脱节，通过构建技术经济优化模型，能够对不同技术方案、施工组织方案进行经济性必选，作出正确决策以实现降本增效提质的目标。

1 天然气发电项目施工阶段技术经济性分析

1.1 天然气发电项目施工流程及关键技术环节

天然气发电项目的施工是一项系统性工程，遵循严格的基建程序，各环节环环相扣，总体流程划分为四个阶段：

(1) 前期准备与场地平整阶段。作为建设的开端，包括征地、场地通水、通电、通路、平整场地、临时设施建设等。该阶段的施工质量与效率直接关系到后续工程主体是否能够顺利进行，其成本控制对项目总投资有初步锁定效果。(2) 基础与主体结构施工阶段。该阶段为项目“骨架”，主要包括基础开挖、混凝土浇筑、主厂房及附属建筑物结构施工、循环水管网和沟道建设，作为土建工程的核心^[1]。(3) 设

备安装与管道铺设阶段。该阶段为技术集成与工艺实现的核心，土建工作完成后进入到全面的设备安装期，包括燃机岛、余热锅炉岛等核心设备的吊装、就位、找正以及连接各系统的庞大管道网络的铺装与焊接。该阶段接口管理复杂，是多专业、多工种交叉作业的高峰期。(4) 系统调试与试运行阶段。秉承着“分部试运 - 分系统试运 - 整套启动试运”的流程，对电气、热控、机务等各个系统进行逐一和联合测试，最终实现机组并网和性能考核试验。

1.2 施工阶段的经济构成与影响因素

1.2.1 成本构成分析

项目施工阶段的总投资有以下几个关键部分构成：(1) 设备购置费。占比通常可达总投资的50 ~ 60%，包括燃机、余热锅炉、汽轮机、主变压器等主机及主要辅机采购费用。这是技术方案选择直接影响的成本核心。(2) 建筑工程费。包括土建工程、结构工程及房屋建筑费用，大约占总投资的15 ~ 20%。(3) 安装工程费。包括所有设备安装、管道铺设、电缆敷设以及保温油漆等费用，大约占比为10 ~ 15%。(4) 其他费用。比如土地使用费、项目建设管理费、监理费、勘察设计费、融资利息等，占比约10 ~ 15%。

1.2.2 影响经济效益的关键因素

工期。作为影响项目经济效益最敏感的因素之一，工期延长不仅会增加项目管理费、人工费等直接间接成本，更会推迟发电收益的实现，增加融资利息，严重影响项目的内部收益率(IRR)和投资回收期。(2) 质量。“质量成本”包括预防成本、鉴定成本、内部故障成本和外部故障成本。施工阶段高质量投入虽然会增加前期预防和鉴定成本，但能

够大幅降低投运后高昂的内外部故障成本，实现全生命周期成本最优^[2]。（3）技术方案选择。比如选择高效率的 H 级燃机相比 F 级燃机，初步设备投资更高，但其卓越的效率和灵活性为项目带来更高的上网电价和辅助服务收益，需要在全生命周期内进行经济性权衡。（4）采购策略。通过国际招标、框架协议等不同对策，直接影响设备价格、供货周期和技术服务成本。

1.3 施工阶段技术与经济的关联性分析

1.3.1 技术方案选择对项目总投资和运行成本的影响

技术决策具有显著的经济后果，比如为了提高调峰能力而选择启停速度更快的技术方案，可能需要投资更先进的锅炉保温材料或更复杂的控制系统，会增加初始投资（CAPEX），但能降低每次启停的能耗与设备损耗，从而降低运营成本（OPEX）。这种 CAPEX 与 OPEX 的权衡，是技术经济优化的核心内容。

1.3.2 施工组织设计对工期和间接成本的影响

施工组织设计是技术方案在时间、空间上的具体规划，采用先进的施工技术或优化施工逻辑，比如采取模块化吊装或采用关键路径法 CPM 压缩工期等手段，虽然可能增加部分直接费用，但可显著缩短工期，工期缩短带来的间接成本节约以及提高发电产生的收益，往往大于增加的直接成本，从而实现整体效益的提升。

2 天然气发电项目施工管理技术经济优化模型构建

2.1 优化目标

经济优化模型的构建目标并非单一和静态的，是一个双重视角的动态平衡。核心目标为：（1）全生命周期成本最低化，将评价的时间维度从建设期延伸到项目的整个运营期和报废期。表达式为： $LCC=CI+CO+CM+CF+CD$ ，其中，CI 表示初始投资成本，CO 表示运营成本，CM 为维护成本，CF 为燃料成本，CD 为报废处置成本。该目标引导决策者在施工阶段选择初始投入稍高，但长期运营维护成本更优的方案。（2）综合效益最大化。是指在控制成本的同时，追求项目综合价值的最大化。通常表现为追求净现值最大化，该指标综合考虑了项目全生命周期的现金流入和流出，引入资金的时间价值，是一个能全面反映项目经济性的动态指标。在某些情况下，还需要兼顾内部收益率、投资回收期等辅助财务指标，还包括工程质量、安全绩效等非货币化效益，构建一个多目标的优化体系。

2.2 关键领域优化与路径分析

2.2.1 设计 - 采购 - 施工一体化优化

打破传统的串行工作模式，在项目早期即引入采购和施工方的专业经验。通过构建协同工作平台与机制，使采购的长周期设备信息能反馈到设计，使施工的可建造性需求能前置到设计阶段。从而从源头上减少施工阶段的设计变更与现场返工，实现“为采购而设计”、“为施工而设计”。

2.2.2 施工组织方案优化

采用网络计划技术，精准识别项目的关键路径。在此基础上，对关键路径上的活动进行工期 - 成本权衡分析，即通过增加资源投入来压缩关键活动工期，同时评估因总工期缩短引发的间接成本节约和早期发电效益。通过迭代计算，寻找项目总成本最低的最佳工期。

2.2.3 设备与材料采购策略优化

采用价值工程法，以 $V=F/C$ 为核心思想，系统分析设备功能与其全生命周期成本的关系。通过对设备的技术性能、可靠性、维护便利性、备件价格等进行综合评价，选择价值系数最高的方案，而非价格最低的方案。同时，采用组合采购策略，对关键核心设备实行全球化采购以保障性能，对通用辅机和材料推行本土化采购以降低成本、缩短供货周期^[3]。

2.2.4 技术创新与应用优化

构建对新技术投入产出评价框架：（1）评价 BIM 技术的应用成本以及其在碰撞检测、减少返工、优化管线综合等方面带来的成本节约与工期效益。（2）评价模块化建造的工厂预制成本、运输吊装成本、提高施工质量、缩短工期、降低安全风险的综合效益。（3）评价智慧工地在人员、机械、材料管理上的投入与在提高效率、保障安全等方面的价值，通过定量 + 定性相结合的评价体系，为技术决策提供经济依据。

2.3 综合优化模型的构建

2.3.1 模型变量设定

模型的核心决策变量包括： X_t 为项目总工期； X_{tech} 表示技术方案选择向量（燃机型号、锅炉类型）； X_{org} 表示施工组织方案向量（关键路径活动压缩程度、施工机械配置等）； X_{res} 表示资源投入向量（人力、材料、资金流）； X_{qual} 表示质量控制水平向量（无损检测比例、验收标准等）。

2.3.2 目标函数构建

根据优化目标构建目标函数：

$$\begin{cases} \text{目标函数I (最小化LCC): } \text{Min}Z_1 = LCC(X_{tech}, X_{qual}) \\ \text{目标函数II (最大化NPV): } \text{Max}Z_2 = NPV(X_t, X_{tech}, X_{org}) \end{cases} \quad (1)$$

在实际求解中,根据项目优先级对两个目标进行加权,或将其中一个作为目标,另一个作为约束条件,转化为单目标问题进行求解。

2.3.3 约束条件确定

模型求解必须在以下条件下进行:(1)技术规范约束。技术方案必须满足设计规范和标准。(2)资源约束。资金、劳动力、设备、材料等资源投入不得超过上限。(3)工期要求约束。总工期必须满足合同或投资方要求的最后期限。(4)逻辑关系约束。施工活动必须遵循固有的工艺和组织逻辑。

2.3.4 模型求解方法

鉴于本模型是一个多变量、多目标、带约束的复杂非线性系统,传统数学规划方法求解困难。因此必须采取以下先进优化算法:(1)系统仿真。利用离散事件仿真构建项目施工过程的数字孪生模型,模拟不同方案下资源流动和工期成本的变化,为优化提供大量数据支持[14]。(2)多目标优化算法。采用遗传算法、粒子群算法等智能优化算法。这些算法能够在复杂的解空间中并行搜索,通过选择、交叉、变异等操作,迭代进化出一组帕累托最优解集,也就是一系列多个目标之间无法进一步优化的非裂解。最终决策者可根据项目实际情况选择最满意的方案。

3 案例分析—以某大型天然气发电项目为例

3.1 工程概况

本项目规划建设两台 700MW 级燃气-蒸汽联合循环发电机组,总装机容量约 1400MW,具备为周围工业园区供热的能力。位于沿海省份的经济开发区中,地理环境优越,但场地软土层较厚,对地基建设要求较高。燃气机轮选择两台国际品牌的 F 级燃机,单机功率 290MW,效率约 40%;余热锅炉配套两台三压、再热、无补燃、自然循环余热锅炉;汽轮机为两台三压、再热、凝汽式汽轮机。

3.2 技术经济优化方案设计

3.2.1 设计与采购阶段优化措施

首先,升级燃机型号。虽然会增加投资,但经过全生命周期成本分析,决定将燃机型号从 F 级提升到 H 级,H 型号燃机简单循环效率超过 41%,联合循环效率可突破 62%。虽然设备购置费增加了约 1.5 亿元,但估算表明效率提升可使机组在相同气耗下多发电,年均增加售电收入约 4000 万元,投资回收期在 4 年内,全生命周期内 NPV 显著提升。

其次,推行本土化与框架协议采购。对部分辅机例如

循环水泵、化水设备以及大批量建筑材料,在保证质量的基础上优选国内一流品牌并签订框架协议,有效降低采购成本 8%,缩短了供货周期。

3.2.2 施工组织中的优化对策

首先,采用关键路径法分析,发现余热锅炉钢结构与模块安装是制约工期的关键,将现场散装改为大型模块化吊装,锅炉受热面在工厂组装成大型模块,运输到现场后采用大型履带吊进行整体吊装,虽然增加了 800 万元的吊装措施费,但锅炉安装工期缩短了 45 天,实现间接成本节约,提前发电收益远超投入。

其次,在保障安全的基础上优化施工逻辑,在主厂房区域实施“分区、分层”交付安装,燃机、汽机等设备基础施工完成后立刻移交安装,实现了土建与安装的深度交叉,有效压缩总工期。

3.3 优化效果对比

将优化后的实施方案与原方案的最终成果进行对比,可知效果显著。见表 1。

表 1 经济效益对比

指标	原方案	优化后	效果
总投资	45 亿元	43.5 亿元	节约 1.5 亿元
建设总工期	28 个月	25 个月	缩短 3 个月
提前发电收益	—	约 1.05 亿元	新增收益
全厂净效率	大约 58%	> 61%	提高超过 3%
预期 NPV	基准	提高约 15%	经济效益显著改善

4 结束语

本研究将技术经济学、全生命周期成本理论深度融合,系统性提出了以技术可行性、经济合理性为原则,以实现全生命周期最低化、综合效益最大化为核心目标的优化思想,为天然气发电项目复杂技术决策中实现经济最优提供了方法论,对提高整个行业的核心竞争力具有深刻启示意义。

参考文献:

- [1] 刘帅.“双碳”目标下天然气发电与新能源融合产业碳减排技术路径[J]. 油气与新能源,2025,37(4):83-88.
- [2] 尹涛,徐晓炜,何益萍,何春蕾,罗旻海,焦小朋,王俊.四川盆地天然气开发技术经济一体化管理模式探索[J]. 天然气技术与经济,2024,18(6):37-42.
- [3] 李佳,丁遥,谢春晖,余晓钟,何晋越,李果.非常规天然气勘探开发技术经济特征[J]. 天然气技术与经济,2024,18(5):79-84.
- [4] 刘佳佳,巨星.弃电热储能光伏-光热复合发电系统技术经济性分析[J]. 发电技术,2025,46(4):807-817.