



沿海港口 LNG 码头选址要素分析

杨婷, 杨彩燕

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 沿海港口液化天然气(LNG)码头的选址受到综合因素的影响, 由于筛选要素过多, 且存在相互关联, 评价过程中难免存在主观偏差的问题。针对沿海港口的 LNG 码头选址复杂以及其独特性的问题, 进行 LNG 码头选址要素分析研究。采用模糊层次分析法, 结合提出的 5 大影响因素共计 11 项评价指标, 构建沿海港口 LNG 码头选址的综合评价指标体系。结果表明, 采用模糊层次分析法, 通过多专家对指标因子进行赋值和评分, 可以更客观且直观地评价 LNG 码头选址, 为沿海地区 LNG 码头的选址提供更科学、合理的参考。

关键词: 沿海港口; LNG 码头; 选址要素; 模糊层次分析法

中图分类号: U651+.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0071-05

Site selection factors for LNG terminal in coastal port

YANG Ting, YANG Caiyan

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: The site selection of liquefied natural gas (LNG) terminal in coastal port is influenced by comprehensive factors. Due to the excessive selection of factors and their interrelationships, there is inevitably subjective bias in the evaluation process. In response to the complexity and uniqueness of LNG terminal site selection in coastal port, we conduct an analysis on the factors of LNG terminal site selection. By the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP), we combine with the 5 major influencing factors, totaling 11 evaluation indicators proposed to construct a comprehensive evaluation index system for LNG terminal site selection in coastal port. The results show that using FAHP and assigning and scoring indicator factors by multiple experts can objectively and intuitively evaluate the site selection of LNG terminals, which can provide more scientific and reasonable references for the site selection of LNG terminals in coastal area.

Keywords: coastal port; LNG terminal; site selection factor; FAHP

沿海地区液化天然气(LNG)码头的选址, 不仅关乎能源的有效供应, 还涉及经济效益、环境保护和安全运营等多方面的考量。随着全球化进程的加速以及能源需求的持续增长, LNG 作为一种重要的能源介质, 已成为连接能源生产国与消费国之间的关键纽带。在此背景下, 对 LNG 接收

站配套的码头布局优化显得尤为重要, 它不仅能够显著提高整个能源供应链的运作效率, 还能在减少运输与运营成本的同时, 对生态环境的保护发挥积极作用。在当前的研究和实践中, 沿海 LNG 码头的建设规划受到了诸多因素的综合影响, 包括但不限于地理位置的战略选择、港口能源的

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 杨婷 (1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计。

规划要求、经济成本的合理控制等。尽管在全球范围内已建立了众多成功的 LNG 码头工程案例, 这些给类似工程的规划和建设提供了宝贵的经验和参考。然而, 考虑到每一个 LNG 码头工程都具有其独特性, 工程实际实施过程中仍然面临着如成本高、环境影响大、安全风险高等一系列挑战。国内也有相关文献就 LNG 码头选址进行探讨, 如刘堃等^[1]论述 LNG 码头选址的整个过程, 提出 LNG 码头选址的完整思路; 商丹等^[2]总结了影响液化天然气码头选址过程的 9 大因素; 周娜等^[3]制定了 18 个 LNG 接收站选址的战略筛选因素。但是目前的选址思路, 由于筛选要素过多, 且存在相互关联, 评价过程中难免存在主观偏差的问题。

本文旨在识别并构建沿海 LNG 码头选址的关键要素框架, 综合考量政策法规、自然条件、建设条件、安全因素及成本投资等 5 个方面的因素, 依据模糊层次分析法建立综合评价指标体系, 为沿海地区 LNG 码头的选址提供更科学、合理的参考。

1 全球沿海 LNG 码头现状

根据 2023 world LNG report^[4]数据, 截至 2023 年 4 月, 全球已建和在建 LNG 泊位共计 239 个, 其中 59 个为浮式码头。全球 LNG 船为 668 艘(大部分船型在 12 万~21 万 m³), 其中有 45 艘浮式储存再气化装置(FSRU)及 8 艘浮式储存装置(FSU), 目前 LNG 船订单共有 312 艘, 其中 294 艘为 17 万~18 万 m³LNG 船。2006 年, 自我国第 1 座 LNG 码头——深圳大鹏 LNG 码头运营以来, 沿海 LNG 码头发展势头迅猛。目前, 我国在营、已建(尚未投入使用)和在建的 LNG 泊位共计 59 个(含香港 1 个 FSRU 泊位、台湾 3 个 LNG 泊位、芜湖 1 个内河 LNG 泊位)。由于渤海、东海和南海区域资源较为匮乏, 对于 LNG 的需求较为旺盛, 且以上区域拥有良好的海岸线资源, 建设港口条件优越, 因此我国 LNG 码头主要集中在渤海、东海和南海这 3 个区域, 见表 1。

表 1 含在建和已建的全国沿海 LNG 泊位布置

地区	数量/个
辽宁省	2
河北省	2
山东省	5
江苏省	9
浙江省	7
福建省	3
广东省	12
广西壮族自治区	2
海南省	1
上海市	3
天津市	8
香港	1(FSRU)
台湾	3
合计	58

2 LNG 码头选址关键要素

2.1 总体原则

LNG 码头作为一个综合性工程, 建设过程中需要考虑的因素非常多, 本文研究并参考了多个国内外沿海 LNG 码头选址相关研究成果, 主要考虑从政策法规、自然条件、建设条件、安全因素、成本投资等 5 个方面建立综合评价指标体系。

2.2 政策法规

国家的法律法规、政策支持等是影响 LNG 码头布局的关键因素。为了确保工程的可行性, 必须综合充分考虑政策法规因素, 比如沿海 LNG 码头布局方案、国家能源规划、当地港口规划、国土空间规划、三区三线, 防洪治导线等均是影响 LNG 码头选址中的决定性因素。码头选址时, 一定要与地方主管部门进行充分沟通, 了解清楚选址区域是否符合相关规划。需要特别指出的是, 港口、能源等领域的规划修编通常需要较长时间, 并涉及众多因素的综合评估, 因此, 需要合理评估相关规划修编时间。以汕头 LNG 码头为例, 该码头在全国沿海 LNG 码头布局方案中属于储备型港址, 由于未被列入国家能源规划, 因此暂时无法将其调整为一般型港址, 无法启动相关建设工作。这一案例凸显了规划在 LNG 码头选址与发展过程中的重要性, 同时也表明了在项目规划阶段对于政策环境的深入理解和预判的必要性。

2.3 自然条件

在LNG码头的规划与设计过程中,自然条件扮演着至关重要的角色,包括但不限于气象、水文及地质等因素。美标NFPA59A-2019^[5]考虑LNG配套码头的水文因素,明确列出了浪、风、潮流方向以及海潮变化等关键要素。我国的JTS 165-5—2021《液化天然气码头设计规范》^[6]则进一步细化,考量风速、波高、波周期、能见度、水流流速等在内的多项指标。其中年可作业时间和一次连续不可作业时间是评估LNG装卸港性能的重要参数,作业时间主要受风、浪(尤其是涌浪周期)、雾、流、雷暴等自然因素影响。为了保证作业时间,可能需要建设防波堤。此外,环渤海地区在冬季常受强冷空气和寒潮天气的影响,须考虑冰冻情况(应考虑海水温度对排水口的影响),而华东、华南区域则应考虑到台风的影响。在国际范围内,特定区域还需要评估飓风、海啸等自然灾害的潜在影响。

在地质条件评估时,地震因素尤其关键。在地表地震动峰值较高的地区建设LNG接收站及码头时,其抗震设防代价较高。

另外,对于浮式码头的选址而言,需要选取自然条件非常好的港湾。FSRU通常为永久性系泊,除非进行维修(每3~5年1次)或遭遇不可抗力气候条件(台风、地震等)才允许离开。因此,必要的情况下需要建设防波堤提供良好的掩护条件。

2.4 建设条件

根据LNG码头接收品种单一、量大(1个泊位最大年接卸可达650万t/a)的特点及LNG运输船的条件,大多数LNG接收站配备1个LNG卸船泊位。然而,鉴于对未来发展的考虑,LNG码头的选址宜适当考虑到水陆域扩建的可能性和可行性。本文主要将建设条件分为水域条件、陆域条件及其他施工条件考虑。

2.4.1 水域条件

1) 水深条件。水深条件不仅影响码头的安全性与操作效率,还直接影响到工程的总体投资及后续与维护成本。全球各LNG出口港的水深通常

能够满足14.5万~26.6万 m^3 船的装货需求,其中绝大多数LNG船的满载吃水都在12.3m以内,因此码头港池及航道通常要选址在天然水深达到或方便开挖到-15m以下区域。一般来说,LNG码头宜选在满足液化天然气船舶不乘潮通航要求的水域,不满足时应做专门论证。以江苏如东LNG码头为例,由于所选的港址进港航道较长,经综合考虑后选择乘潮进港。

2) 应急锚地。根据JTS 165-5—2021《液化天然气码头设计规范》,海港LNG码头应配置应急锚地,应急锚地可与油气化学品运输船舶共用。应急锚地选址过程中,须考虑与码头的距离。随着我国海港泊位数量的增加,与港口配套的锚地所需水域资源变得日益稀缺,应急锚地的设置显得格外重要。

2.4.2 陆域条件

LNG厂址宜优先考虑后方有充足陆域的情况。根据文献[7],估算大型LNG接收站(年接收能力在300万~600万t)的选址和发展需要30万~60万 m^2 的土地资源。当后方有足够陆域时,LNG码头与岸接的方式主要有近岸式、短栈桥、长栈桥等,其中栈桥的长度应适度,过长的栈桥会增加建设及运营成本。目前,国内大部分LNG泊位栈桥长度在1000m以内,最长的为江苏启东LNG码头,长3887m。

若所选的陆域为孤岛,首先要考虑陆岛交通,并解决包括淡水在内的补给以及电、通信等设施问题。

若后方无足够陆域,或出于成本及建设周期考虑,可采用FSRU、FRU、浮式液化天然气装置(FLNG)等浮式LNG码头作为解决方案。

2.4.3 其他配套条件

LNG码头建设离不开良好的施工条件,一般而言陆域配套条件主要包括水、电、通信、建筑材料、交通条件、生活配套等,每个项目都应单独进行分析。另外,水域的配套条件方面还需要考虑港区拖轮的配置条件,是否可以租用。

2.5 安全因素

2.5.1 周边设施安全

LNG 码头选址时应充分考虑与周边设施的安全距离,并核实周边是否存在核电、军事、高压电线及海底管线等,同时注意 LNG 船舶需要穿越的桥梁净空要求,确保符合相关规范。

2.5.2 水域通航安全

LNG 船舶的通航特性要求码头选址时应考虑其对周边航道的影响,尤其是当码头位于繁忙港口内时,对港区内其他船舶通航的影响应进行专项评估与论证。根据文献[8],在拥有专用航道条件的 LNG 港址情况下,基于现行通航规则,当单个港址的 LNG 泊位数量达到 4 个时,LNG 船舶进出港的过程中可能会相互干扰,从而增加运营风险。此外,LNG 码头进港建议采用船舶操纵模拟及系船靠泊模拟试验,以提高系靠泊的安全性。

对于浮式 LNG 码头的选址,则应尽量避免选择周边船舶频繁通行的区域,如主航道附近,以减少 FSRU 码头与其他船舶或码头的相互影响,确保码头运营的安全性。

2.6 成本投资

LNG 码头建设成本相对于接收站较小,码头投资与项目建设规模相关联,按照目前世界上主流 LNG 船型,建议以 17 万~18 万 m³LNG 船作为设计船型或结构设计船型,以优化经济效益。码头投资除了考虑码头结构外,还应考虑水域疏浚、抛泥区位置的确定、防波堤或护岸情况、后续的水域维护成本。

3 港址比选评价体系

在进行港址对比分析过程中,需要考虑多种因素,为了确保选址决策的科学性和合理性,常采用综合评价法。模糊层次分析法(FAHP)是美国 Saaty 教授提出的一种定性与定量相结合的系统分析方法,该方法对于量化评价指标、选择最优方案提供了依据,并得到了广泛的应用^[9]。本文基于政策法规、自然条件、建设条件、安全

因素以及成本投资等 5 大要素,依据构建模糊一致性矩阵的模糊层次分析法,建立港址适宜性的综合评价体系,从而提升港址比选的精确度和效率。

本文以 1 个 LNG 码头为例(参数均为假设),应用模糊层次分析法构建 1 个包含目标层、准则层和指标层 3 个层次的 LNG 码头建设适宜性评价指标体系。其中,目标层由若干个港址方案组成(如港址 A、B、C 等),并进一步划分为 5 个准则层,准则层分别代表 LNG 码头选址过程中应考虑 的 5 大要素:政策法规、自然条件、建设条件、安全因素以及成本投资。每个准则层下又细分为多个具体的指标项,构成了指标层,见表 2。

表 2 沿海港口 LNG 码头选址评价指标体系

目标层	准则层	指标层
港址 A	政策法规(P)	是否与国家、能源、港口等规划相符(P ₁)
	自然条件(N)	风、浪、流(N ₁)
		不可作业时间(N ₂)
		地质条件(N ₃)
		其他特殊条件(N ₄)
	建设条件(C)	水域条件(C ₁)
		陆域条件(C ₂)
		其他配套条件(C ₃)
	安全因素(S)	周边安全(S ₁)
		通航安全(S ₂)
	成本投资(O)	成本投资(O ₁)

为了确定准则层和指标层各项评价指标的权重,建议采用专家打分法来确定各项指标的最终权重,模糊层次分析法的详细计算见文献[9]。

以港址 A 为例,首先采用 0.1~0.9 九标度法确定准则层的各项权重,结果见表 3。其中 0.5 表示同等重要,0.6 表示 *i* 比 *j* 稍微重要,0.7 表示 *i* 比 *j* 比较重要,0.8 表示 *i* 比 *j* 非常重要,0.9 表示 *i* 比 *j* 绝对重要;0.1~0.4 为 0.9~0.6 的反比较。

表 3 沿海港口 LNG 码头准则层计算用矩阵参数

准则层	政策法规	自然条件	建设条件	安全因素	成本投资
政策法规	0.5	0.7	0.8	0.6	0.8
自然条件	0.3	0.5	0.3	0.3	0.3
建设条件	0.2	0.7	0.5	0.4	0.6
安全因素	0.4	0.7	0.6	0.5	0.6
成本投资	0.2	0.7	0.4	0.4	0.5

准则权重的计算公式为:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中: a_{ij} 为 i 比 j 重要的隶属度。

通过计算得出准则层权重向量 $w = [w_1, w_2, w_3, w_4, w_5]^T = [0.29, 0.12, 0.19, 0.23, 0.17]^T$, 其中 $w_1 \sim w_5$ 分别为政策法规、自然条件、建设条件、安全因素、成本投资的权重。

再用同样的方式计算指标层权重, 则得到的港口 LNG 码头选址各要素的权重结果见表 4。

表 4 沿海港口 LNG 码头准则层及指标层权重结果

准则层	权重	指标层	底层权重 (权重分配)
政策法规 (P)	0.29	是否与国家、能源、港口等规划相符(P_1)	0.290(1)
		风、浪、流(N_1)	0.030(0.25)
自然条件 (N)	0.12	不可作业时间(N_2)	0.042(0.35)
		地质条件(N_3)	0.030(0.25)
		其他特殊条件(N_4)	0.018(0.15)
建设条件 (C)	0.19	水域条件(C_1)	0.089(0.467)
		陆域条件(C_2)	0.063(0.333)
		其他配套条件(C_3)	0.038(0.2)
安全因素 (S)	0.23	周边安全(S_1)	0.115(0.5)
		通航安全(S_2)	0.115(0.5)
成本投资 (O)	0.17	成本投资(O_1)	0.170(0.1)

再对港址 A、B、C 各项指标的相对优劣, 进行专家组打分, 评价指标 $E = (\text{好, 较好, 一般, 较差, 差}) = (90, 80, 70, 60, 50)$, 取专家打分的平均值, 赋值结果见表 5。

表 5 沿海港口 LNG 码头指标层赋值结果

准则层	指标层	分数
政策法规(P)	是否与国家、能源、港口等规划相符(P_1)	90
	风、浪、流(N_1)	80
自然条件(N)	不可作业时间(N_2)	80
	地质条件(N_3)	70
	其他特殊条件(N_4)	90
建设条件(C)	水域条件(C_1)	70
	陆域条件(C_2)	60
	其他配套条件(C_3)	90
安全因素(S)	周边安全(S_1)	70
	通航安全(S_2)	60
成本投资(O)	成本投资(O_1)	60

将分数与底层权重相乘, 求和后得出港址 A 得分为 74.157, 同理获得港址 B、C 的得分, 从中选出得分最高的方案作为最优解。

4 结语

1) 本文提出沿海港口 LNG 码头选址的 5 大主要影响因素, 即政策法规、自然条件、建设条件、安全因素及成本投资, 共筛选 11 项评价指标。通过模糊层次分析法, 建立码头选址的综合评价指标体系。研究成果可为沿海港口 LNG 码头选址提供一定参考。

2) 对于各指标因子的权重及评分, 可组织熟悉工程的专家们进行赋值和评分, 然后通过求矩阵的算术平均获得群矩阵, 从而获得专家组的权重, 以消除个人认知的局限, 使评价结果更具有科学性和合理性。

参考文献:

- [1] 刘堃, 覃杰, 宓宝勇. LNG 码头选址探讨[J]. 水运工程, 2012(7): 77-81.
- [2] 商丹, 张勇. 液化天然气码头选址关键因素[J]. 水运工程, 2014(2): 96-99.
- [3] 周娜, 于传见, 沈斌, 等. 液化天然气 LNG 接收站选址要点[J]. 水运工程, 2018(6): 83-86.
- [4] International Gas Union. 2023 World LNG Report [R]. Vevey: International Gas Union, 2023.
- [5] The National Fire Protection Association. Standard for the production, storage, and handling of liquefied natural gas (LNG): NFPA59A-2019[S]. Quincy: NFPA, 2019.
- [6] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 液化天然气码头设计规范: JTS 165-5—2021 [S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2021.
- [7] 房卓, 张民辉, 沈忱, 等. 环渤海地区 LNG 码头布局关键问题和选址研究[J]. 水运工程, 2022 (2): 46-50, 57.
- [8] 沈忱, 房卓, 张民辉等. 单航道多泊位的液化天然气码头建设规模仿真研究[J]. 水运工程, 2019 (11): 122-126, 132.
- [9] 张吉军. 模糊层次分析法 (FAHP) [J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2): 80-88.

(本文编辑 王璁)