



LNG 码头引桥补偿平台间距与跨度分析

杨 凯, 芦志强, 刘 杰, 杨学斌, 陈文明

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 以华北某 LNG 码头引桥设计为例, 分析 LNG 码头引桥在不同跨度、补偿平台间距的条件下, 引桥荷载、工艺要求、钢材用量、施工难度、工程造价等因素, 归纳不同桥型设计特点和类似项目经验, 供类似工程参考。

关键词: 液化天然气码头; 引桥; 补偿平台; 间距; 造价

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0077-06

Comparative study on span of trestles and compensating platform for large LNG jetty

YANG Kai, LU Zhi-qiang, LIU Jie, YANG Xue-bin, CHEN Wen-ming
(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Based on the analysis to the design of trestle for the LNG jetty in north China and similar practices, we research the forces on the load, steel consumption, constructability and cost of LNG jetty under different spans of trestle and compensating platform, and summarize design characteristics of various trestle types, which may serve as a reference for similar engineering design.

Key words: LNG jetty; trestle; compensating platform; span; cost

近年来, 中国对 LNG 清洁能源需求呈现爆炸式增长。截至 2013 年底, 中国大陆先后有深圳大鹏、福建莆田、上海洋山、江苏如东、大连、上海五号沟、宁波、东莞九丰、珠海、唐山曹妃甸、天津南疆等 11 个 LNG 码头投产, 另有 32 个 LNG 码头在建或者前期工作中。受可利用的优质岸线越来越稀缺等因素的影响, LNG 码头多布置在外海深水岸线, 其引桥多具有桥长、造价高、工艺要求特殊等特点。本文以某 LNG 码头引桥设计为例, 结合类似项目经验, 重点分析 LNG 码头引桥在不同的跨度、补偿平台间距的条件下, 不同桥型设计特点, 供类似工程参考。

1 引桥尺度

引桥长 1 899 m, 桥面高程为 10.5 m, 引桥宽度为 14.0 m。引桥平面、断面如图 1 和 2 所示。

LNG 引桥宽度由管线布置、车辆通行宽度确定。仅考虑卸船时一般布置 1 根 36~46 in LNG 卸料管道, 加上其它管线和桥架净宽 7~8 m。行车宽度考虑 25 t 汽车式起重机打支腿作业, 最大宽度为 5.4 m。唐山 LNG 引桥行车道净宽取 5 m, 管线带一侧设有 0.5 m 底宽的活动隔离墩, 加上两侧护栏槛, 总宽 14.0 m。国内 LNG 引桥面总宽度多在 13~16 m, 对于还有装船、预留泊位、重件运输等其它要求, 要适当预留宽度。

与原油码头引桥不同的是, LNG 管线采用水平 π 弯进行温度补偿, 因此每隔 50~386 m 间距需在引桥管线带一侧设置一座补偿平台。韩国仁川、印度 Dahej 的补偿平台间距分别为 200 m、210 m, 目前世界上最大间距是波多黎各的 386 m (表 1)。

收稿日期: 2014-02-24

作者简介: 杨凯 (1981—), 男, 注册土木工程师, 从事港口与航道工程设计、咨询工作。

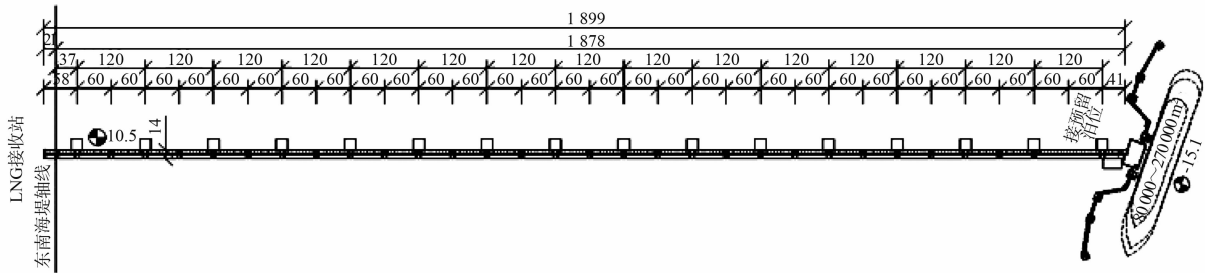


图1 引桥平面

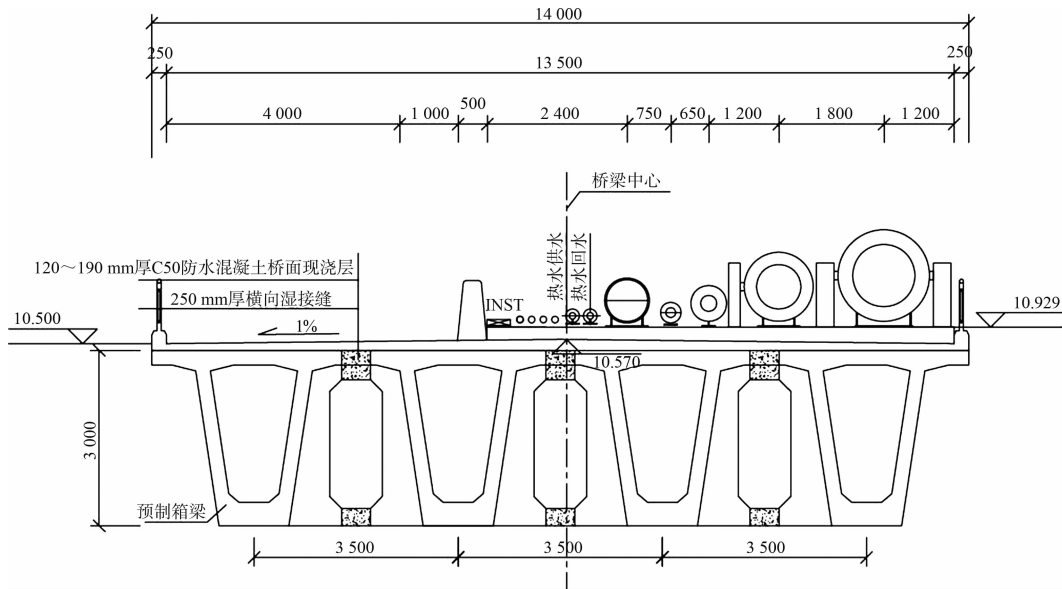


图2 引桥断面布置

表1 部分 LNG 引桥尺度

项目名称	引桥(堤)长/m	桥宽/m	补偿平台平面尺寸(长×宽)/m	补偿平台间距/m	备注
深圳大鹏 LNG	296.2	14.8	23×9	100	已运营
福建莆田 LNG	345.5	12.5	19.4×20.54	约90	已运营
大连 LNG	150.0	13.0	12×6	50	已运营
江苏如东 LNG	1 970.0	13.5/16	26×34.4	196	已运营
山东董家口 LNG	906.6	15	15×25	200	在建
粤东 LNG	1 100.0	15/18	14×14	100	前期
南通吕四 LNG	3 890.0	12	10×14	200	前期

2 自然条件

2.1 设计水位

设计高水位: 2.91 m; 设计低水位: 0.53 m;
极端高水位: 4.46 m (50 a 一遇), 4.58 m (100 a 一遇); 极端低水位: -1.27 m (50 a 一遇)。

2.2 设计波浪

引桥区域: 100 a 一遇 $H_{1\%}$ 设计波高为 5.98 m, 周期 T 为 9.2 s。

2.3 潮流

设计流速取: 1.8 m/s。

2.4 海冰

50 a 重现期的平整冰设计厚度: 39 cm; 等效冰温: -6.9 °C; 海冰单轴抗压强度: 2 453 kPa。

2.5 设计风速

海面 10 m 处 10 min 平均风速 (100 a 一遇) 为 36.8 m/s。

2.6 地质

引桥区地质情况见图10,地基土层自上而下统一划分为9个土层单元:①₁ 粉细砂(松散-稍密)、①₂ 粉细砂(中密)、①₃ 粉细砂(密实)、①₄ 黏土夹砂(软塑)、② 黏土夹砂(软塑)、③ 粉土夹粉质黏土(中密为主)、④ 粉质黏土(软-可塑)、⑤ 粉土/粉细砂(密实)、⑤₄ 粉质黏土(可-硬塑)、⑥ 粉质黏土(可-硬塑)、⑥₁ 粉土(密实)。持力层⑤顶高程为-49.6~-62.5m,较深。

2.7 地震

文献[1]分别取50 a超越概率10%和2%的地表水平向设计地震动峰值加速度:操作基准地震(OBE) 0.16g和安全停运地震(SSE) 0.26g的作为设计地震参数。

3 桥型选择

国内早期建设的广东、福建、上海、宁波等LNG项目选址条件相对优良,引桥长度较短,持力层较浅,多采用小跨度混凝土箱梁结构。莆田、大连LNG采用30和50 m跨度混凝土箱梁结构,江苏LNG采用约95 m跨度拱桁式钢引桥结构。国内类似的原油码头引桥结构,多采用钢引桥结构方案(图3~6)。



图3 小跨度引桥



图4 变截面混凝土箱梁桥



图5 系杆拱桥(下承式)



图6 拱桁式钢引桥

小跨度(30 m以下)混凝土箱梁引桥具有单跨吊装质量小、吊装设备能力小、桥面开敞等优点,但其上部构件安装和桥墩数量较多,工期较长,对周边海域水动力影响较大,适合大鹏、莆田、洋山等桥短、持力层浅的条件。本项目持力层埋深较深的工程区,不作考虑。

大跨度预应力简支混凝土箱梁引桥常用跨径为 30 ~ 60 m，具有管线吊装和布置灵活、耐腐蚀、工期短、不存在冷脆等优点，但有自重较大、起重能力要求高的缺点。为尽可能控制造价，设计采用 55 m 的预制长度、60 m 的标准桥跨（接近简支箱梁极限跨度）方案参与比选。

大跨度系杆钢拱桥（或拱桁式钢引桥）常用跨径为 60 ~ 120 m，具有跨度大、桥墩数量少、自质小、造型美观等优点，且在厂内预制后现场吊装，工期较少，但有使用期防腐蚀费用较高的缺点。据文献[2]，60 ~ 115 m 跨度的拱桁式钢引桥用钢量范围在 370 ~ 571 kg/m²。据文献[3]，曹妃甸原油码头单跨长 122 m 的系杆钢拱桥用钢量为 356 kg/m²。拱桁式钢引桥钢材量大，焊接多，受风面积大，经济性和外观均无明显的优势，因此选用系杆钢拱桥参与比选。

预应力混凝土变截面连续箱梁引桥常用跨径为 40 ~ 100 m，由于支点箱梁截面高达 5.0 m，导致桥墩处箱梁底面低于设计高水位，承受过大冰荷载，无造价优势，不作考虑。

4 引桥跨度设计

引桥跨度和结构形式是设计的首要考虑因素，合理的跨度和选型能实现引桥全寿命期造价和维护成本的最小化。引桥跨度的经济性主要考虑 4 个方面：1) 下部基础水工结构费用；2) 引桥上部结构费用（含运输、安装）；3) 工艺管线费用；4) 运营期维护费用。

4.1 引桥跨度与墩台基础关系

LNG 码头从外海到近岸部分土层变化较小，引桥墩基础选用对地质起伏变化适应好、穿透硬土层能力强、承受水平荷载良好的钢管桩基方案。

引桥墩主要外力包括上部结构自重、波浪力、冰荷载、工艺管线和流动机械荷载、地震荷载，本区域主要是冰荷载、地震荷载控制。从计算结果分析，引桥跨度的增大，在桩数不变的前提下，主要是压桩力、弯矩，微调桩长、壁厚即可（图 7，8）。

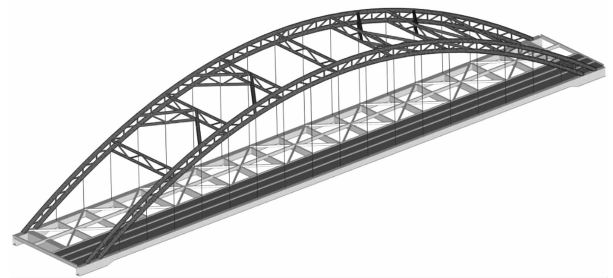


图 7 系杆拱桥三维图

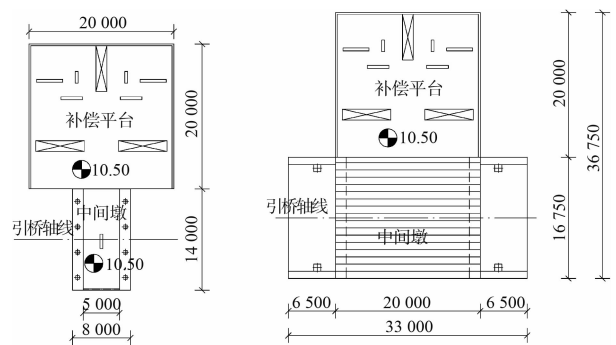


图 8 箱梁桥和系杆拱桥中间墩平面

4.2 钢引桥跨度与用钢量关系

引桥上部结构起跨越承重功能，其要求是尽量高的竖向承载能力，又有较小的自重，其较优的选择是钢结构。钢引桥跨度的加大的同时会减少引桥墩的数量，增大钢引桥内力和用钢量（表 2）。

桥跨从 80 m 到 132 m，桥墩从 24 个减少到 15 个，总用钢量从 6 518 t 增加至 9 740 t，单位桥面用钢量增加 57.4 t/m²。

表 2 系杆拱桥不同跨度用钢量比较

钢桥方案	桥跨/m	梁长/m	宽度/m	钢材用量/(t·跨 ⁻¹)	跨数	总用钢量/t	单位面积用钢量/(t·m ⁻²)
系杆拱桥 1	132	114.5	16.3	695.7	14	9 740	351.2
系杆拱桥 2	104	86.0	15.6	390.3	18	7 025	308.9
系杆拱桥 3	80	62.0	15.4	283.4	23	6 518	296.8

4.3 引桥跨度与工艺的要求

4.3.1 与补偿平台间距关系

引桥补偿平台间距直接影响补偿平台的尺度和数量。箱梁桥的补偿平台间距按照标准跨度60 m的1倍、2倍、3倍考虑,钢引桥的补偿平台间距按照标准跨度80, 104, 132 m分别比选。

系杆拱桥在补偿平台一端有管线侧向转弯进出补偿平台,考虑管线安装的需要,不可以穿越主拱、系杆和桥面空隙,必须从主拱外进出,导致补偿平台旁的桥墩长度接近补偿平台的20 m。而箱梁不受此约束,桥墩长度5 m即可,能大幅减小单个桥墩尺寸和造价。

补偿平台间距为桥梁标准跨度奇数倍时,引桥须在相邻补偿平台间距中点位置设置卸料总管固定墩,此处有顺桥向水平力荷载标准值为400~500 kN,不宜布置在桥跨中位置,不利于箱梁或钢桥结构受力,应与工艺专业协调避免。

4.3.2 与管线长度的关系

引桥跨度的变化间接影响补偿平台的间距,对管线长度有一影响。引桥各方案须对上部工艺管线造价的影响,进行综合测算分析。桥上各类管线带每延米造价约为12.3万元人民币。

根据工艺要求,补偿平台长度(图9中b)主要和管线带布置、管径有关系,一般为定值,18~20 m;补偿平台的宽度(图9中a)与间距近似成正比。因此桥跨对管线长度有一定影响。本例中,间距60 m增至240 m,造价减少787万元,说明 π 弯间距增大,对减少流阻、造价都有利(表3)。

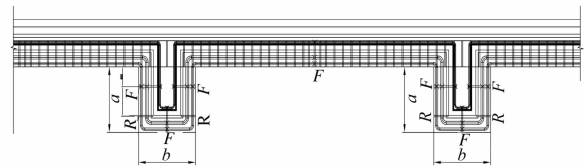


图9 引桥补偿平台布置

表3 引桥补偿平台尺寸与间距关系

补偿平台的间距/m	补偿平台的长度 b/m	补偿平台宽度 a/m	主管线长度/m	工艺管线总造价/万元
60	18	10	2 219	27 294
120	20	20	2 219	27 294
180	20	25	2 174	26 740
240	20	32	2 155	26 507

4.4 引桥跨度与施工关系

钢引桥或箱梁先在塘沽预制,待桥墩施工后,出运到现场,用吊船整体吊装施工。

系杆拱桥单跨质量范围在300~700 t。引桥跨度越大,钢引桥的制作、运输和安装施工难度越高。后张法预应力箱梁长55 m,净重426 t,原设计采用90 t重的吊架兜底吊装,可重复利用。受塘沽预制厂固定吊500 t起吊能力限制,采用箱梁增加吊耳板的方式吊装,累计增加122 t的钢板用量。

根据渤海湾地区施工力量情况调查,目前500 t以下的船吊较多,选择范围较广,船舶调遣费用及

吊装综合费用相对较低,此因素计入桥梁造价。

4.5 运营期维护费用

钢桥的维护内容包含定期检测、构件养护、钢件防腐修复、焊缝裂纹修理、构件和支座修换等。混凝土桥梁的维护内容包含定期检测、构件养护、裂缝和涂层修复、支座修换等。上述两项加桥墩基础维护内容,按照50 a设计使用年限内的静态投资。

4.6 不同跨度和补偿平台间距方案的综合比较

通过对不同桥跨和补偿平台间距对应的水工结构费用、桥梁费用、施工和维护费用4方面分析不同跨度钢引桥的造价(表4)。

表4 引桥设计综合比较

桥型	引桥跨度/ m	补偿平台的 间距/m	水工程造价/ 万元	桥梁造价/ 万元	上部工艺造价/ 万元	总造价/ 万元	每延米结构单价/ (万元·m ⁻¹)	每延米单价/ (万元·m ⁻¹)	运营期维护 费用/万元
大跨度箱梁1	60	60	41 057	8 388	27 294	76 739	26.0	40.41	1 019
大跨度箱梁2	60	120	35 272	8 388	27 294	70 954	23.0	37.36	869
大跨度箱梁3	60	180	29 922	8 388	26 740	65 050	20.2	34.25	824
大跨度箱梁4	60	240	27 536	8 388	26 507	62 431	18.9	32.88	779
系杆拱桥1	132	132	39 766	13 636	27 232	80 634	28.1	42.46	6 498
系杆拱桥2	104	104	50 472	9 835	27 564	87 871	31.8	46.27	6 700
系杆拱桥3	80	80	55 771	9 125	26 900	91 797	34.2	48.34	7 468
系杆拱桥4	104	208	32 199	9 835	26 236	68 270	22.1	35.95	6 637

注：每延米结构单价含补偿平台造价；每延米单价含管线。

LNG 引桥能否用钢结构，存在争议。有反对者担心，低温液态天然气的泄漏，会对钢结构造成冷脆破坏；也有支持者认为 LNG 管线在引桥上不存在可能的泄漏点。文献[4]建议，LNG 码头引桥结构可用、但慎用钢结构。BP 在大鹏 LNG 设计时明确反对任何引桥上部有遮挡的方案。目前国内已投产和在建的 16 个 LNG 码头，除江苏 LNG

外，均为混凝土桥梁结构。争议结论有待时间检验。

通过表 4 分析可知，大跨度箱梁 4 总造价和维护费用最低。但工艺专业因低温管线应力分析不成熟，认为 150 m 以上补偿平台间距方案的欠妥，最后确定采用总造价和维护费用最低的箱梁 2 方案。

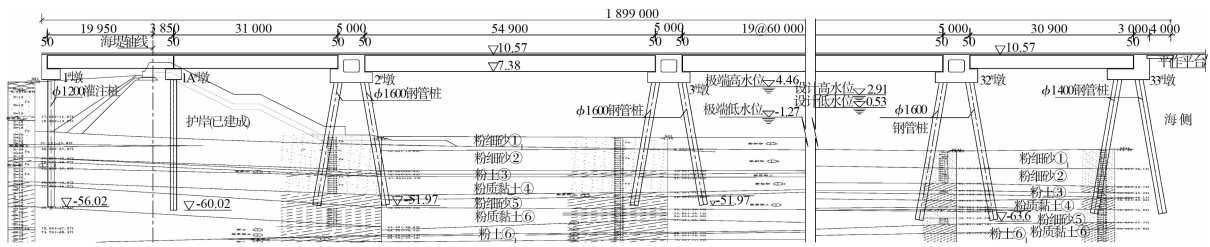


图 10 引桥立面

5 结论

1) 与钢桥相比，简支箱梁结构具有造价和维护成本较低、管线安装、检修方便等优点。

2) 考虑冷脆破坏和安装便利性，LNG 引桥应慎用钢结构。目前国内已投产和在建的 16 个 LNG 码头，除江苏 LNG 外，均为混凝土桥梁结构。

3) 本例中 120 m 和 240 m 间距的补偿平台分别占 LNG 引桥结构造价的 32% 和 21%，适当拉大桥跨和补偿平台间距有利于降低造价。目前国内外补偿平台间距主流间距在 200 m 上下，本例因工艺原因，未能拉大到 208 m 及 240 m，留有缺憾。

4) LNG 引桥工艺管线长度和造价对补偿平台间距不敏感。

参考文献：

[1] 中交水运规划设计院有限公司. 唐山液化天然气项目码头工程初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2011.

[2] 柯维林, 杨克勤, 陈金木, 等. 大型原油码头引桥选型及跨度研究[J]. 水运工程, 2012(8): 62-66.

[3] 中交水运规划设计院有限公司. 曹妃甸原油码头及配套工程初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2008.

[4] BS EN1532:1997 Installation and equipment for liquefied natural gas-ship to shore interface[S].