

河港大水位差直立式集装箱码头设计创新技术

俞武华

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 在长江上游重庆港寸滩港区工程项目设计中, 通过理念创新和技术创新, 在33 m大水位差、典型山区地形的建设条件下, 首次成功地采用了集装箱岸桥装卸船工艺、空间框架式桩基码头结构、阶梯式集装箱堆场布置和较大的港内道路纵坡等设计创新技术, 开创了大水差地区建设直立式集装箱码头的先例, 促进了河港建港技术的发展。

关键词: 河港; 大水位差; 集装箱码头; 设计创新技术

中图分类号: U 656.1⁺35

文献标志码: B

文章编号: 1002-4972(2013)S1-0020-08

Design innovation on river port vertical container terminal with large amplitude

YU Wu-hua

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: Concept innovation and technology innovation are performed in the design works of Cuntan terminal of Chongqing port on the upper reaches of the Yangtze River. Under the construction conditions of typical mountainous terrain and a high water amplitude up to 33 m, design innovation technologies, such as handling process by quayside container crane, pile-supported space frame wharf structure, step-yard layout and steep longitudinal road slope, have been successfully used for the first time in the river port. This provides a precedent example for the vertical container terminal with large water amplitude and will promote technology development in river port construction.

Key words: river port; large water amplitude; container terminal; design innovation technology

1 工程概况

重庆港寸滩港区位于重庆市主城区朝天门下游6 km的长江北岸, 是重庆市及西部地区的一个综合性集装箱枢纽港区, 是重庆建设长江上游航运中心的重要工程。寸滩港区一期工程于2005年建成, 建设3 000 DWT集装箱泊位2个, 二期工程2009年建成投产, 建设5 000 DWT集装箱泊位3个, 三期工程正在建设中, 建设5 000 DWT集装箱泊位4个, 整个港区的集装箱通过能力达到150万TEU/a。在寸滩港区集装箱码头设计中, 通过理念创新及技术创新, 较好地解决了大水位差、山区地形条件下建设专业化直立式集装箱码

头的关键技术问题, 首次在33 m水位差条件下采用集装箱岸桥装卸船作业工艺和直立式空间框架桩基梁板码头结构, 单个集装箱泊位的通过能力达到约18万TEU/a, 高出长江上游常规的斜坡式集装箱码头100%以上。寸滩港区工程的成功实践为大水差地区建设直立式集装箱码头做出了开创性的贡献, 促进了河港建港技术的发展。

2 主要设计创新技术

2.1 首次采用集装箱岸桥装卸船作业工艺

寸滩港区所在河段设计高水位为190.92 m (重现期20 a), 设计低水位为157.62 m (最低通

收稿日期: 2011-09-09

作者简介: 俞武华(1965—), 男, 高级工程师, 从事水运工程设计咨询工作。

航水位)，水位差达到33.3 m，根据GB 50192—1993《河港工程设计规范》中装卸工艺一般规定，设计水位差17 m以上宜采用斜坡式码头，以往长江上游地区集装箱泊位均建设斜坡式码头（例如重庆九龙坡集装箱专用码头）。但斜坡码头装卸工艺环节多，效率低，码头通过能力低，通常单个泊位年设计通过能力为6万TEU左右，且占用岸线长度大。随着长江集装箱运输迅猛发展，建设高效率的集装箱泊位成为内河集装箱码头建设的迫切需要。为此，以本工程为依托，开展将海港集装箱码头岸边集装箱起重机（简称岸桥）装卸船工艺引入到大水位差的条件下河港集装箱码头的专项研究，发挥岸桥自动化程度高、效率高、船型适应性好、操作视线好、安全可靠等优点。

寸滩港区集装箱泊位采用集装箱岸桥装卸工艺，存在的主要问题有：低水位时岸桥吊具下降深度过大，吊具较难稳定，视线不清，吊具就位时间长，吊具摆动可能给船舶及码头带来碰撞危险等。针对上述问题，设计经过反复研讨得出，寸滩港区码头轨下起升高度大，但轨上起升高度小，总的起升高度没有超过海港集装箱码头岸桥装卸集装箱牵引车的吊具起升高度，大型海港集装箱码头岸桥装卸集装箱牵引车的吊具起升高度已达40 m。另外经过调查，上海港集装箱码头装卸小船，在有一定风浪，船舶有摇摆时，岸桥也能正常的作业。因此，寸滩港区码头枯水位时岸桥的总起升高度40 m下进行集装箱装卸船技术上是完全可行的，需要研究的问题为码头装卸船效率。

重庆港寸滩港区直立式码头设计面高程为191.5 m，采用直立式码头方案时，不同的长江水位将对岸桥的轨下起升高度和集装箱吊具对位时间产生影响。考虑枯水位时增加对位时间20 s，中高水位时增加对位时间10 s。据统计资料，每年的11月—次年4月为枯水期，平均水位为158.5 m，岸桥的起升高度为33.5~39 m，经计算，岸桥平均台时效率为19自然箱/h；每年的5—10月为中高水期，

平均水位为166 m，岸桥的起升高度为25.5~31 m，经计算岸桥平均台时效率为22自然箱/h。三峡水库形成后（水库按175 m—145 m—155 m方案运行），每年的11月—次年4月的平均水位为170.8 m，岸桥的起升高度为20.5~26.5 m，此时，岸桥平均台时效率为23自然箱/h；每年的5—10月的平均水位为167 m，此时，岸桥的起升高度24.5~30 m，计算岸桥平均台时效率为22自然箱/h。因此在计算通过能力时可将单机台时效率取为20~22自然箱/h。

单个泊位配2台吊双20 ft箱岸桥时，泊位通过能力^[1]为

$$P_s = \frac{T_y A_p}{\frac{Q}{p t_g} + \frac{t_f}{t_d}} Q, \quad p = n p_1 k_1 k_2 \quad (1)$$

式中： T_y 为泊位作业天数， $T_y=330$ d； Q 为船舶实际载箱量， $Q=150$ TEU（考虑到各种船型情况）； A_p 为泊位有效利用率， $A_p=0.6$ ； t_f 为辅助作业和技术作业时间， $t_f=2.5$ h； t_g 为昼夜装卸作业时间， $t_g=23$ h； t_d 为昼夜小时数， $t_d=24$ h； p_1 为装卸船设备的台时效率， $p_1=19$ 自然箱/台·h； p 为船时效率， $p=61$ TEU/h； n 为前方装卸船设备台数， $n=2.0$ ； k_1 为集装箱标准箱折算系数， $k_1=1.8$ ； k_2 为装卸船设备同时作业率（%）， $k_2=0.90$ ；

单个泊位计算通过能力为：

$$P_s = 140704 \text{ TEU/a}$$

上述分析计算显示，寸滩港区集装箱泊位采用集装箱岸桥装卸船作业工艺不但技术可行，而且其装卸效率大大高于常规的斜坡码头，由此首次在寸滩港区大水位差集装箱泊位的设计中采用了集装箱岸桥装卸船作业工艺。寸滩港区一期工程2005年底建成投产，通过2006年初枯水位时岸桥吊装箱效率实测，在枯水位时岸桥的台时效率为2.0~2.5 min/循环，即台时效率 $p=24\sim30$ 自然箱/（台·h）。如按 $p=27$ 自然箱/（台·h）计算，寸滩港区单个泊位的通过能力可达16.5万TEU/a。三峡工程建成运行后，随着长江上游集装箱船舶大型化发展，寸滩港区单个泊位集装箱通过能力将进一步增大，计算结果如表1所示。

表1 寸滩港区单个泊位集装箱通过能力计算

台时效率/(自然箱·台 ⁻¹ ·h ⁻¹)	船舶载箱量/TEU	单个泊位通过能力/(TEU·a ⁻¹)
30	150	17.3
30	200	20.4

图1为寸滩港区低水位时，集装箱泊位岸桥装卸船作业情况。从图1可知，与海港集装箱码头岸桥相比，寸滩港区采用的集装箱岸桥轨上起升高度小，轨下下降深度大，整体设备的高度较低，岸桥性能参数如表2所示。



图1 寸滩港区集装箱码头装卸船作业

2.2 采用空间框架式桩基梁板码头结构

2.2.1 合理确定码头设计施工水位

河港工程码头设计施工水位与码头结构的施

表2 寸滩港区50 t-22 m集装箱装卸桥性能参数

额定荷载/ kN	运行距离/m			起升速度/ (m·min ⁻¹)	下降速度/ (m·min ⁻¹)	大车驱动速 度/(m·min ⁻¹)	小车驱动速度/ (m·min ⁻¹)	吊具角度/(°)			轨道	8轮台车 最大轮压/kN	
	吊具下 外伸距	后伸距	轨距					前后倾	水平回转	左右倾		工作时	非工作
500	22	9	16	50	120	30	120	±5	±8	±3	QU100	<260	<240

工方案、施工工期和工程费用密切相关，需要结合工程所在河段水位历时变化特点综合确定。

寸滩港区一期、二期工程在三峡工程175 m（吴淞高程）正常蓄水运行前建成，寸滩港区三期工程在三峡工程175 m（吴淞高程）正常蓄水运行后建设。寸滩港区位于三峡水库的回水变动区，寸滩河段的水位在三峡水库蓄水前后发生了显著的变化，因此寸滩港区一期、二期工程与寸滩港区三期工程的码头设计施工水位

是不同的。

1) 寸滩一期工程码头施工水位。

研究寸滩港区一期工程施工水位时，寸滩河段处于天然河流情况下，依据当时的水位资料，每年1—3月处于枯水平稳时间，从4月下旬起出现小峰并逐渐进入中高水期，7—9月多为洪水期，11月以后，呈缓慢降落状态。年最低水位常出现在2月中旬—3月下旬。经过统计，每年各月份的平均水位如表2所示。

表2 天然情况下每年各月份的平均水位（黄海高程）

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均水位/m	157.8	157.4	157.6	158.8	161.0	164.5	168.9	168.5	168.2	165.1	161.2	158.9

依据表2的水位资料，采用以往工程经验，取设计低水位加2.0 m作为施工水位，确定寸滩港区一期工程码头结构的施工水位为159.60 m，施工水位以下可施工低水位时间不小于4个月。

2) 寸滩港区三期工程施工水位。

三峡水库正常蓄水后，其正常蓄水位为175 m（吴淞高程），枯季消落水位为155 m（吴淞高

程），汛限制水位为145 m（吴淞高程）。每年5月末—6月初，水库水位降至汛限制水位145 m（吴淞高程）。整个汛期是6—9月，除入库流量大于下游河道安全泄量时拦蓄超额洪水、水库水位抬高外，一般维持145 m运行。汛末10月水库蓄水，逐渐升高至175 m（吴淞高程）运行。12月—翌年4月底库水位按保证出力要求运行，并逐渐降

落，以增加下游流量和电站电力，但枯季水位消落最低高程不低于155 m（吴淞高程），以保证水库变动回水区航道水深。

三峡工程建成正常运行后，寸滩河段处于水库回水变动区，寸滩河段水位受水库蓄水影响，每年各月份的平均水位如表3所示。

表3 三峡水库蓄水运行后每年各月份的平均水位（黄海高程）

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均水位/m	171.4	168.4	168.5	170.0	162.0	165.0	169.5	169.0	168.8	168.5	173.4	173.4

为研究寸滩港区三期工程码头结构的施工水位，对寸滩水文站1991—2007年4—10月逐日平均水位进行统计分析，各月≤165 m（黄海高程）水位的连续天数如表4所示。

表4 ≤165 m（黄海高程）水位的连续天数

月份	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
天数/d	25	30	31	25	4	7	9	23

根据表4，三峡正常蓄水运行后，正常情况下寸滩港区165 m（黄海高程）水位以下可施工得低水位时间不低于3个月，由此确定寸滩港区三期工程施工水位为165 m（黄海高程），高出寸滩港区一期工程码头施工水位5 m。

三峡水库蓄水运行后，寸滩河段实测的水位资料显示，2009年，2010年，2011年寸滩港区165 m水位以下的连续天数分别为126 d，138 d，

107 d。寸滩三期工程码头结构自2010年3月开始建设，现已建成2个泊位，说明码头结构设计施工水位采用165 m是合适的。

2.2.2 空间框架式桩基梁板码头结构

1) 寸滩一期工程码头结构。

为满足集装箱装卸桥装卸船工艺的需要，寸滩一期工程集装箱泊位采用引桥顺岸连片透空直立式结构，本工程设计水位差达33.3 m，码头结构在地面以上高度达到41 m，成为我国长江上游最高的直立式码头。由于码头结构高度大，为保证码头结构整体性，经过多方案研究比较，码头结构采用空间框架式梁板结构。码头结构受力分析采用以码头结构段为对象的空间分析方法，合理确定了各构件受力。码头结构断面如图2所示。

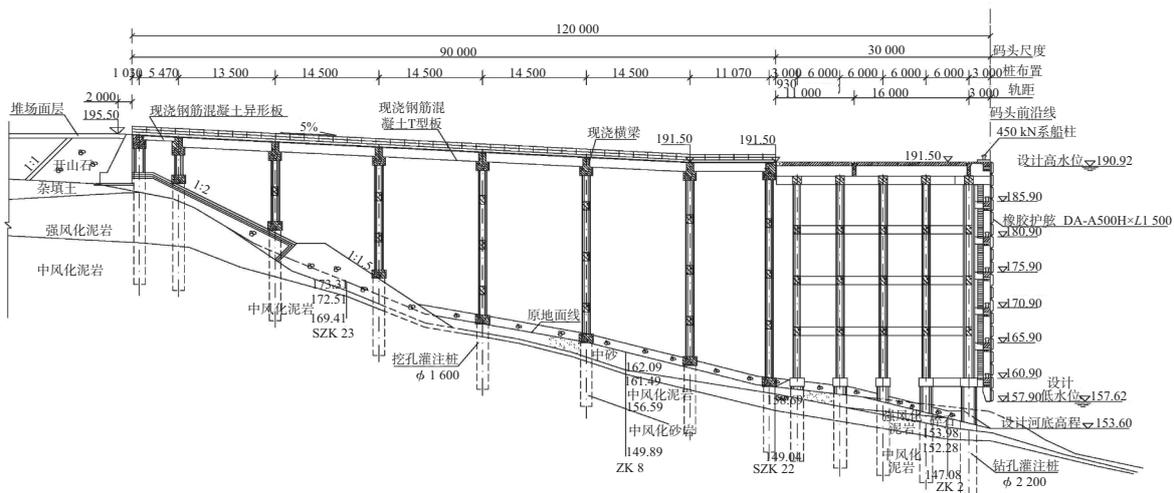


图2 寸滩港区一期工程码头结构断面

寸滩港区一期工程码头平台长221 m，宽30 m，平台排架间距为6.5 m，共34跨，35榀排架。码头每榀排架5根桩，前排桩基采用φ2 200嵌岩灌注桩，其余为φ1 800嵌岩灌注桩。桩基

和横梁连接采用φ1 300钢筋混凝土立柱，平台立柱相隔一定高度设纵横撑连接。上部结构由横梁、靠船构件、前边梁、轨道梁、联系梁、面板组成。码头平台前沿竖向设6层系靠船平

表5 试桩有关参数

编号	对应地质钻孔	桩径/m	桩顶高程/m	桩底高程/m	桩端持力层	荷载箱距桩端/m	荷载箱预估加载值/kN
S1 [#]	ZY2	2.0	179.7	154.0	J2s泥岩	1.0	2 × 15 000
S2 [#]	ZY1	2.0	179.7	160.0	J2s泥岩	0.5	2 × 15 000

2) 地质条件。

根据码头区的工程地质报告，码头区地表为第四系人工填土 (Q_{ml}^4) 及残坡积 (Q_{el+dl}^4)、冲洪积 (Q_{al+pl}^4) 粉质黏土层覆盖，下伏基岩为侏罗系中统沙溪庙组 (J2s) 的砂岩和泥岩互层组成，岩性特征分别如下：

1) 砂岩 (J2s)：灰白色，由石英、长石、云母及少量岩屑组成。细-中粒结构，中厚层状构造，泥质胶结。强风化岩体较破碎，呈短柱状，质软。中等风化岩体完整性好，多呈20~50 cm的柱状，质硬，该层与场地内的泥岩成互层状产出。天然、饱和单轴抗压强度标准值分别为

23.6 MPa, 16.9 MPa, 软化系数为0.80, 属次软岩。

2) 泥岩 (J2s)：紫红色，局部含砂质。泥质结构，厚层状构造。强风化岩体，网状风化裂隙发育，岩芯较破碎，多呈碎块-薄饼状，岩质软；中等风化岩体完整性好，多呈中长柱状，质硬。该层分布于整个场地范围，是本场地的主要层。天然、饱和单轴抗压强度标准值分别为7.5 MPa, 4.2 MPa, 软化系数为0.58, 属极软岩。

3) 试桩情况。

2根桩的施工情况如表6所示。

4) 试桩结果。

2根试桩的实测结果如表7所示。

表6 试桩施工的基本情况

桩号	成桩类型	钢护壁规格/mm	钻孔施工时间	钻孔深度/m	桩径/mm	实际桩长/m	嵌岩深度/m	桩底高程/m	孔垂直度/%	沉渣厚度/mm	荷载箱底高程/m	混凝土浇筑成桩日期
S1 [#]	冲击钻孔、泥浆护壁、正循环换浆法清孔	护壁长度3 000 mm 护壁直径2 300	2009-10-29开始, 2009-11-02完成	25.7	2 000	25.7	10.12	154.0	0.11	20	155.0	2009-11-04
S2 [#]	冲击钻孔、泥浆护壁、正循环换浆法清孔	护壁长度3 000 mm 护壁直径2 300	2009-11-28开始, 2009-12-02完成	19.7	2 000	19.7	7.2	160.0	0.11	20	160.5	2009-12-05

表7 试桩实测结果

桩号	预定加载值/kN	最终加载值/kN	荷载箱处最大向上位移/mm	荷载箱处最大向下位移/mm	桩顶向上位移/mm	上段桩压缩变形/mm	荷载箱处向上残余位移/mm	荷载箱处向下残余位移/mm
S1 [#]	2 × 15 000	2 × 16 000	41.15	80.58	37.60	3.55	27.64	61.47
S2 [#]	2 × 15 000	2 × 12 000	40.21	42.60	37.22	2.99	34.58	34.60

采用等效转换方法，根据已测得的各土层摩阻力-位移曲线，转换至桩顶，得到试桩等效转换曲线。

S1[#]试桩等效转换曲线如图4所示。试桩极限承载力取规程计算结果，对应位移从等效转换曲线中求得。极限承载力为28 099 kN，相应的位移为70.96 mm。

S2[#]试桩等效转换曲线如图5所示。试桩极限承载力取规程计算结果，对应位移从等效转换曲线中求得。极限承载力为20 522 kN，相应的位移为35.74 mm。

2根试桩的承载力构成如表8所示。2根试桩实测的岩土层桩侧极限阻力如表9所示。

5) 试桩结果分析。

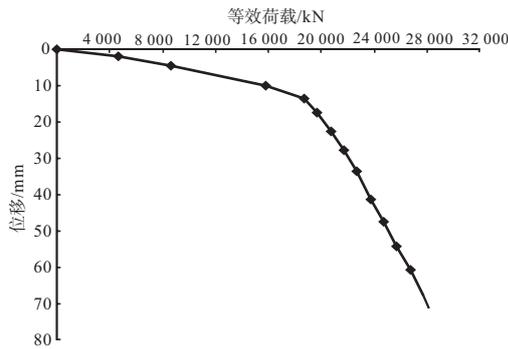


图4 S1#试桩等效转换曲线

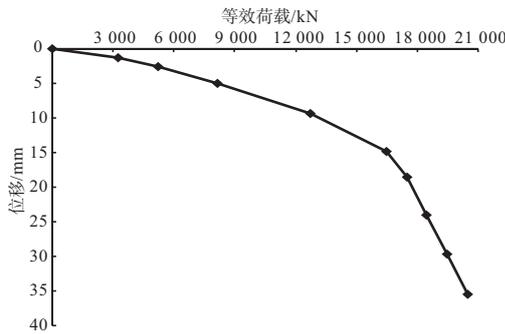


图5 S2#试桩等效转换曲线

表8 试桩承载力

桩号	桩侧阻力		桩端阻力		桩顶荷载/kN
	数值/kN	比例/%	数值/kN	比例/%	
S1#	13 099	46.62	15 000	53.38	28 099
S2#	9 522	46.40	11 000	53.60	20 522

表9 试桩岩土层极限侧阻力

桩号	土层名称	高程/m	实测最大侧阻力/kPa	相应位移/mm
S1#	强风化泥岩	165.52~164.12	102	9.36
	中风化砂岩	164.12~162.32	570	9.41
	中风化泥岩	162.32~154.00	132	9.89
S2#	强风化泥岩	168.70~167.20	124	11.76
	中风化泥岩	167.20~164.12	162	11.86
	中风化泥岩	164.12~160.00	177	12.12

① 根据JTJ 285—2000《港口工程嵌岩桩设计与施工规程》^[3]公式(4.2.2), 1#, 2#试桩的桩基极限承载力设计值分别为17 030 kN和12 438 kN。根据规程^[3]公式(4.2.3), 按照工程地质报告的提供的岩石强度数据, 对1#、2#试桩进行垂直承载力计算, 得到其设计值分别为18 698 kN和15 515 kN。比较显示, 规范公式计算结果比实际试桩结果要大, 说明极软岩嵌岩桩通过试桩确定桩的承载能

力及嵌岩深度是十分必要的。

② 从1#试桩的极限承载能力来看, 桩端极限阻力占极限承载能力比例达到50%, 说明对于极软岩地基的嵌岩桩, 桩基嵌岩深度大于5倍桩径时, 桩基的极限承载能力尚可提高。

③ 本工程根据试桩结果, 确定码头嵌岩灌注桩的嵌岩深度为5倍桩径。

2.3 陆域堆场创新采用阶梯式平面布置和较大道路纵坡^[4]

寸滩港区一期工程陆域为典型的山区地形, 陆域地形高差到达80 m, 而且码头面至港外道路的高差达43~59 m, 码头面至陆域堆场后方进港道路之间的高差也达29 m, 即使从码头前沿开始起坡至陆域堆场后方, 其平均坡度也接近6%。

为了解决该项目陆域地形起伏高差大、道路坡度大、码头前方平台与后方进港道路高差大的陆域平面布置方面的技术难题, 集装箱堆场采用三级阶梯式布置方案, 堆场平台之间高差为9.6 m、9.36 m。在每级集装箱堆场平台两侧布置道路连接堆场与码头、疏港道路。集装箱主干道坡度最大取6%, 次干道纵坡最大取7.5%。港区生产辅助区集中布置在陆域后方, 分两级阶梯式布置, 辅助区最大道路纵坡设为9%。寸滩港区一期工程集装箱堆场布置平面如图6所示。

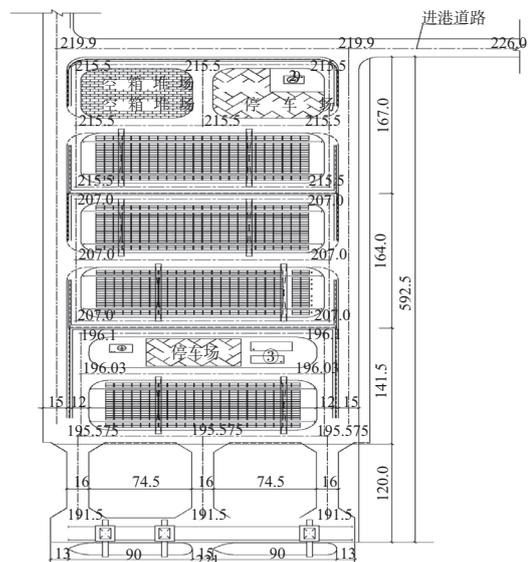


图6 寸滩港区一期工程集装箱堆场布置平面

3 结语

1) 重庆港寸滩港区工程集装箱码头建设运营表明：直立式码头比斜坡式码头，船舶系靠更加方便，作业环节减少，装卸效率高。

2) 阶梯式陆域集装箱堆场布置，有层次感，堆场景观好；较大的堆场道路纵坡使用中集装箱装卸车运输安全，集疏运便捷。

3) 码头结构采用空间框架式桩基梁板结构，对水流的影响小，满足船舶系靠泊作业、装卸船作业、洪水时水流作用荷载等正常使用要求，结构耐久稳定。

经过湖北省科技信息研究院查新检索中心查新，重庆港寸滩港区工程33 m大水位差空间框架式码头结构形式、33 m大水位差岸边集装箱装卸

桥装卸船工艺、阶梯式集装箱堆场平面布置等设计创新技术处于国内领先水平。

参考文献：

- [1] 王诚. 长江上游大水位差直立式集装箱码头装卸工艺初探[J]. 港口装卸, 2007(1): 37-38.
- [2] JTJ 285—2000 港口工程嵌岩桩设计与施工规程[S].
- [3] 南京东大自平衡桩基检测有限公司. 重庆港主港区寸滩作业区三期工程基桩承载力静载检测报告[R]. 南京: 南京东大自平衡桩基检测有限公司, 2009.
- [4] 俞武华. 长江上游集装箱码头陆域堆场平面布置及港内道路纵坡研究[J]. 水运工程, 2006(S1): 41-47.

(本文编辑 郭雪珍)

评委点评：

《水运工程》优秀论文评选

该文结合重庆港寸滩港区工程项目，系统总结并描述该项目设计技术特点：创新性地将海港集装箱码头集装箱岸桥装卸工艺引入大水位差的河港集装箱码头，所采用的集装箱岸桥轨上起升高度小，轨下下降深度大，整体设备高度较低，充分发挥了岸桥自动化程度高、效率高的优点；空间框架式桩基梁板码头结构对33 m大水位差的适应能力强、船舶系靠方便、结构紧凑、整体性好、结构耐久稳定；结合地形特点，国内首次采用阶梯式集装箱堆场布置和较大的港内道路纵坡，具有层次感强、堆场景观好的优点。

该文对创新理念和创新技术的总结，将加快推进新理念新技术在港口建设中的运用，尤其对促进河港建设技术进步，文章凸显了实用价值和指导意义。



2012年12月

评委简介：

周俊波，高工，湖北省交通规划设计院副院长。

先后主持多项长江港口及湖北省汉江崔家营航电枢纽、南水北调中线引江济汉通航工程等国家大型工程的设计工作。