

## • 自动化码头 •



## 洋山四期全自动集装箱码头设计创新

刘广红, 韩时捷, 何继红, 徐兆祥, 姚宇, 蔡波妮

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 自动化码头在装卸作业的稳定高效、安全节能、绿色环保等方面具有显著优势,已成为我国实现港口转型升级发展的必由之路。但我国自动化港口建设起步晚,技术经验积累少,缺少相应的技术标准和规范指导。而洋山四期工程是我国首座拥有安全自主技术打造的当前全球单项规模最大、技术最先进的全自动化集装箱码头工程,其设计经验对于推动我国港口的技术进步具有重要的借鉴意义。对洋山四期工程自动化集装箱码头设计所涉及的平面、工艺、结构、控制、供电、给排水等多方面设计成果进行总结和梳理,为同类工程设计提供参考。

**关键词:** 集装箱码头; 自动化; 总平面布置; 轨道基础结构; 数据接口; 仪表远程监测; 电能质量治理; 节能减排; 节水

**中图分类号:** U 656.1<sup>+</sup>34

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2018)06-0189-06

**Design innovation of Yangshan 4th phase fully automatic container terminal**

LIU Guang-hong, HAN Shi-jie, HE Ji-hong, XU Zhao-xiang, YAO Yu, CAI Bo-ni

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** The automated terminal has significant advantages in the stability and high efficiency of loading and unloading operations, safety and energy saving, and green environmental protection. Thus it has become the only way for the realization of the port's transformation and upgrading in our country. However, the construction of automated ports in our country started late, with little accumulated technical experience and lack of corresponding technical standards and design codes. The 4th phase of Yangshan project is the first fully automatic container terminal project in our country with independent technology and self-made capability. The design experience of this project is of great significance to promote the technological progress of China's ports. This paper summarizes and sorts out the design results of plane, technology, structure, control, power supply, water supply and drainage, etc. of the 4th phase of Yangshan Project, so as to provide reference for similar projects.

**Keywords:** container terminal; automation; general layout; ASC crane rail concrete beam; data interface; remote monitoring of instruments; power quality control; energy conservation; water conservation

2014年,交通运输部发布了《关于推进港口转型升级的指导意见》,提出到2020年“港口发展基本实现由主要依靠增加资源投入向主要依靠科技进步、劳动者素质提高和管理创新转变”的发展目标,要求提高码头前沿装卸、水平运输、堆场装卸等关键设备的自动化、智能化水平,提升货物在港口的换装作业效率,促进智慧港口、平安港口和绿色港口的建设。为此,上海、厦门、

青岛等港口陆续开始了自动化集装箱码头的建设。然而,由于我国自动化港口建设起步晚,技术经验积累少,至今尚缺少相应的技术标准和规范指导。而洋山四期全自动集装箱码头工程是我国首座拥有全自主技术、当前单项规模最大、具有先进技术的码头工程,其设计经验对于推动我国港口的技术进步具有重要的借鉴意义。本文对洋山四期工程设计所涉及的平面、工艺、结构、控制、

**收稿日期:** 2017-11-08

**作者简介:** 刘广红(1976—),男,教授级高级工程师,从事港口及航道工程规划及设计工作。

供电、给排水等多方面设计成果进行总结和梳理。

## 1 总平面布置关键技术

洋山四期工程是超大型集装箱港区，码头长 2 350 m，布置 7 个大型深水泊位，年设计通过能力高达 630 万 TEU。然而，狭窄的陆域纵深成为制约港区综合效能发挥的瓶颈。如何以服务生产为导向，合理地开展总体功能布局，最大程度地提高土地资源的利用率，是设计需要解决的关键技术问题。

### 1.1 因地制宜，合理布局

洋山四期工程地域狭长，横向宽度近 3 000 m，纵深平均仅约 500 m，且大小不均，对码头的总体布置形成了较大的制约。设计以服务生产为导向，在优先保障生产功能区土地供应的基础上，因地制宜地进行各辅助功能区的布置，尽可能地做到和谐统一<sup>[1]</sup>。

1) 自动化堆场是洋山四期工程的核心堆场，占港区堆存总容量的 96.5%。因此，要突破陆域的制约，首先应尽可能地提升自动化堆场的规模。设计将集装箱码头对应后方的核心地块最大程度地用于布置自动化堆场，堆场的纵深依据地形采用了最大化设计，使得箱区堆箱数量达到 33~53 贝位，同时兼顾了自动化堆场的作业效率，避免因箱区过长而导致龙门起重机(ARMG)作业能力的不足。

2) 契合陆域地形特点，因地制宜地开展辅助堆场及配套生产、生活设施的布置。利用自动化堆场北侧不规则地块自西向东分别布置生产管理区、口岸查验区及超限箱堆场。生产及管理区的选址还综合了地质的因素，建筑物均坐落在开山区，有效降低了工程造价。利用自动化堆场西侧地块布置危险品堆场，其选址同时考虑远离人员集中区域和风向的影响。洋山四期工程总体功能布局见图 1。

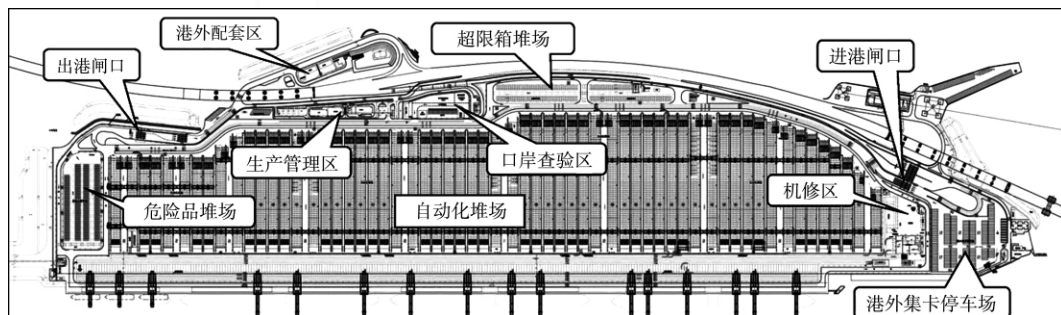


图 1 港区总体功能布局

### 1.2 科学开展交通工程设计

港口作为大物流的重要节点，高效的港内、外交通是提升其综合作业效率的重要因素，充分的道路资源利用也是节约用地的重要举措。在四期工程的交通设计上，设计采用了多方面的优化方案：

1) 进、出港闸口采用“东进西出”的分离布置方式，进港→港内→出港过程均为单向交通，交通组织高效、顺畅，冲突点少，道路资源利用率高，同时与自动化集装箱码头提、送箱流程完美结合。

2) 进港闸口采用预检、分流、放行三级智能化闸口布置，港外集卡停车场与进港闸口采用集

约化布置。一级道路口采集进港车辆信息，二级卡口对车辆进行分流处理，部分不具备放行条件的车辆进入与闸口集约化布置的港外集卡停车场做进一步处理，完成后再经三级卡口进港。该布置方式对于自动化集装箱码头的运作模式具有良好的适应性，同时对于应对交通高峰期的冲击具有良好的缓冲作用。

3) 根据港区的设计能力及闸口、堆场、辅助设施等功能布局，开展港内、外道路的 OD 分析，通过交通仿真模拟的技术手段，科学确定港内、外路网的建设规模，达到资源利用高效和交通顺畅的目的。洋山四期工程港内、外主干道路布置见图 2。

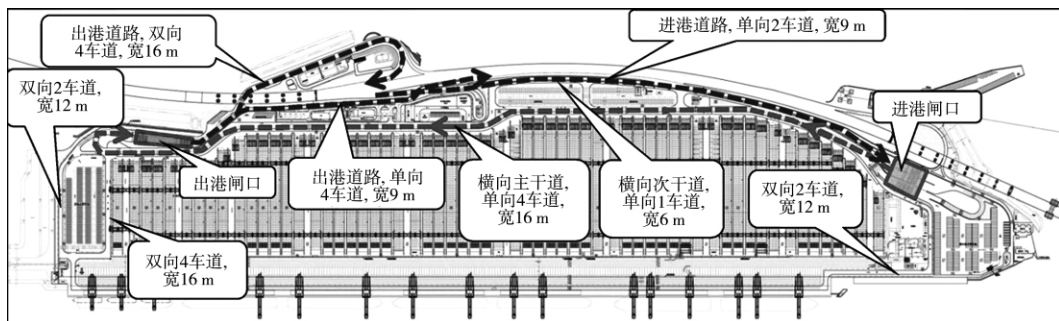


图2 港内、外主干道道路布置

## 2 创新工艺布置

历经20余年的发展，自动化集装箱码头先后出现了10余种装卸工艺解决方案，其中以“双小车岸桥+AGV+ARMG”“单小车岸桥+跨运车+ARMG”和“单小车岸桥+集卡+ARMG”3种方案应用最为普遍。因后两种方案在自动化程度和尾气排放上略有不足，结合项目的建设目标、营运成本和工程条件等，经综合对比分析，四期工程采用了“双小车岸桥+AGV+ARMG”方案，在设备选型和工艺布置方面始终贯彻高效、可靠、绿色、安全的设计理念。

### 2.1 无悬臂、单侧悬臂和双侧悬臂3种自动化轨道吊混合布局模式

洋山港区集装箱水-水中转比例高达50%，且存在港区不同营运公司间互拖箱的作业。针对该特点，自动化堆场首次提出以无悬臂自动化轨道吊为主，无悬臂、单侧悬臂和双侧悬臂3种形式自动化轨道吊的混合布置方案<sup>[2]</sup>。其中，双侧悬臂轨道吊主要用于互拖箱的作业，布置在自动化堆场端部；无悬臂箱区以堆放进口箱和出口箱为主，也可在海侧堆放部分水-水中转箱；单侧悬臂箱

区以堆放水-水中转箱为主，也可堆放部分进、出口箱。无悬臂、单侧悬臂箱区采用间隔布置，可每隔2~6个无悬臂箱区布置1对悬臂箱区。无悬臂箱区的交接区设置在箱区两端；单侧悬臂箱区AGV交接区位于悬臂下且位置不固定，由AGV将集装箱运输至箱区指定排位，使同一个箱区的两台轨道吊可同时对AGV作业、为海侧装卸系统服务，箱区陆侧端设集卡交接区，提高箱区使用的灵活性。

与目前典型的单一无悬臂轨道吊的自动化堆场相比，该模式较好地解决了堆场容量最大化及堆场与码头之间设备能力匹配的问题，其主要优点为：1) 能按不同的集疏运方式进行功能分区，解决水-水中转比例高所致的海陆侧轨道吊作业量不均衡的问题；2) 通过部分箱区采用带悬臂轨道吊作业，可在不增加堆场作业线数量和工程投资的前提下，增加直接为岸桥服务的轨道吊数量，在船舶大型化对装卸效率和作业持续强度提出更高要求的情况下，提升了自动化装卸系统的适应性；3) 箱区功能明确，便于管理，同时具有较大的灵活性，能够应对箱量结构的变化；4) 使港区间互拖箱的运输效率大幅提升。自动化堆场布置见图3。

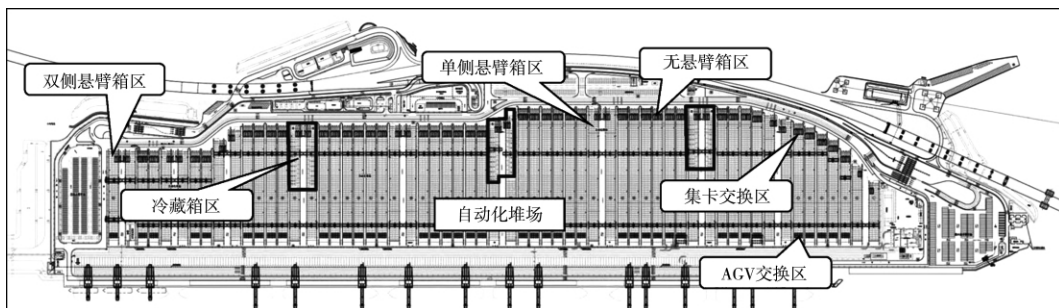


图3 自动化堆场布置

## 2.2 轨道吊跨内列位方向冷藏箱与普通箱混合布置形式

冷藏箱在箱区内靠陆侧布置,以兼顾海、陆侧作业效率和电源插拔人员进出箱区的便利。垂直轨道方向采用冷藏箱和普通箱混合布置方式,即轨道吊轨内 10 列箱中的 7 列堆放冷藏箱,其中靠轨道侧 1 列的底层为电源插拔人员的通道,另外 3 列堆放普通箱,当电源插拔人员进入箱区作业时,轨道吊的吊具能绕过电源插座支架和作业人员,减少人、机共同作业时对人员位置或轨道吊作业范围的限制。该冷藏箱布置形式既保证了辅助作业人员的安全,又最大限度减少了人员进入自动化箱区后对堆场作业安全及效率的影响,在自动化程度、作业安全和营运管理等方面具有一定的优势。

## 2.3 机修区联合布局形式

洋山四期工程采用了将 AGV 维修棚、AGV 测试区、机修车间及备品备件库联合布局的集约化布置形式。该形式实现了自动化水平运输设备维修保障各功能区与常规维修功能区的有效整合,功能全面;需维修的 AGV 由自动化水平运输区依次经维修区、测试区再回到自动化运行区域,流程顺畅便捷,提高了 AGV 的维护保障能力;且通过在各区域之间设立交互区,解决了自动化与非自动化运行模式转换的安全问题,提高了自动化设备维修的安全管控能力。机修区布置见图 4。

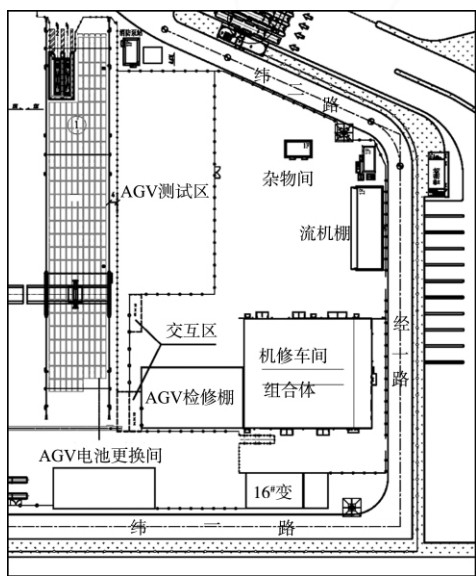


图 4 机修区布置

## 3 着力新材料、新结构的应用与创新

### 3.1 双重可调式轨道基础的应用

洋山四期工程陆域主要由围填海形成,原始软土层厚 30~40 m。虽经地基处理,但工后残余沉降仍不可避免,不能完全满足自动化轨道吊设备高速运行的要求。在桩基方案因投资大、周期长等因素难以实施的情况下,通过跟踪研究及理论分析沉降趋势,设计提出一种新型非桩基轨道基础结构形式——双重可调式轨道基础<sup>[3]</sup>。该结构一方面通过刚度较大的混凝土轨道基槽来协调地基的不均匀沉降;另一方面又通过在槽内铺设一定厚度道砟,使其后续可进行一定调整。同时,为减小后期轨道调整难度,将常规的轨枕结构优化为带可调支座的新型轨枕结构。轨道基础技术的创新一方面大大增加轨道基础对不均匀沉降的协调能力,另一方面将初期的调整由较为复杂的土建调整为操作更简单快捷、调整精度更高的机械式调整。不仅减少了调整工作量及运营的影响,还减少了土建调整时产生的扬尘、噪声等环境影响,取得良好的应用效果。

### 3.2 新型材料大规模应用

AGV 在行驶过程中需通过磁钉进行自动定位,而磁钉对道路及构筑物结构有明确的防磁需求。同时,由于地处海洋性气候环境,受高盐高湿空气影响,港内金属构件及混凝土结构易受到腐蚀。传统材料在防磁和防腐蚀上难以满足使用要求,因此需寻求一种新型高性能的结构替代材料十分必要。

FRP 复合材料是一种新兴高性能结构材料,具有轻质、高强、防腐、防磁等优点。结合四期工程防磁、防腐的特殊建设需求,不仅大胆将 GFRP 筋作为钢筋的替代材料,应用于道路面层、综合管廊、AGV 支架基础等结构的设计中,还根据各种构件构造需求,将常规的钢冷藏箱支架、槽钢拖线槽等构件用 FRP 复合材料进行替代,取得了良好的应用效果<sup>[4]</sup>。

## 4 自动化设备控制及信息系统

### 4.1 自动化集装箱堆场冷藏集装箱监控新模式

目前冷藏箱监控常采用电力载波法、四芯监控插头及手持式或人工抄表方式。由于电力载波法和四芯监控插头监测覆盖不到20%,所以一般选择手持式或人工抄表方式。为了满足自动化堆场全封闭、无人化管理,四期工程冷藏箱监控设计选用了冷藏箱智能控制系统数据接口方式,介入端口是冷藏箱的数据接口,从数据接口采集信号并通过局域网上传,可达到95%以上的监控率<sup>[5]</sup>。同时,监控系统具有识别冷藏箱品牌和型号等功能,可满足自动化码头对冷藏箱智能控制系统的需求。

### 4.2 自动化集装箱码头给水仪表远程监测

码头给水系统监测涉及的主要仪表为流量计和水表,传统监测通常采用人工现场抄表,效率低,误差率较高,且无法及时发现管网漏损、仪表设备故障等,不能做到及时维护处理。为了满足自动化码头全封闭、无人化管理要求和减少工作人员频繁进出自动化区域对生产带来的负面影响,四期工程设计了一套仪表远程监测系统,实现码头给水系统的远程集中监测<sup>[6]</sup>。给水仪表远程监测系统主要由监控中心、通信网络、终端设备、现场计量仪表这4部分组成。现场计量仪表均带MODBUS远程数据通讯接口的流量计,以及带MODBUS远程数据通讯接口的水表等。主要功能是监测系统信息管理、系统用户基本信息、管网流量监测管理、系统数据查询管理、维护管理及巡检系统管理、给排水系统用水统计分析报表及给排水系统管网管损分析等。

### 4.3 变电所机械通风及空调远程控制系统

为了满足自动化堆场内变电所机械通风及空调设备的远程控制要求,四期工程设计了一套变电所机械通风及空调的远程控制系统<sup>[7]</sup>。系统采用PLC控制方式,其网络架构主要由现场设备层和过程监控层组成。系统的PLC主站设置在10 kV中心配电所控制室内,PLC从站设置在变电所内,且设有现场电控箱,负责轴流风机、电动蝶阀、电动百叶窗和空调的配电及控制。箱内设有各类

型机械通风设备对应的模式选择开关及启、停按钮和指示灯等,用于实现现场对机械通风设备的监控操作。变电所PLC从站通过输I/O模块以及辅助的中间继电器回路,监视各类型机械通风设备(轴流风机、电动蝶阀及电动百叶窗等)的运行状态,及控制各类型机械通风设备的启停,并通过PLC控制单元内的远程通讯模块实现中心变电所监控计算机远程集中监控机械通风设备的运行状态等。PLC从站的通讯总线模块负责控制单元与各类型空调之间的通讯和数据交换,进而实现监控计算机远程监视空调的运行状态和控制空调的启停、模式及温度选择等。

## 5 强化电能的质量治理和节能减排

### 5.1 供电新设备、新技术应用

四期工程自动化堆场采用封闭、无人化管理,港区正常生产时,其内的变电所处于无人值守状态。传统变电所供配电装置的数据采集、监视、开关远方操作功能在可靠性、安全性方面已无法完全满足这一新的工况要求,需进一步提升设备的智能化水平。在四期工程中,设计采用了新型智能型开关设备,即选用KYN28智能型高压中置式开关设备和MNS-ST新一代智能型低压抽出式开关设备,并辅以视频监控系统,实现在控制室内对变电所实施更加可靠、安全的监控<sup>[8]</sup>。

在供电系统的设备选型上开展了一系列应用创新,如10 kV开关柜内选用六柱全相双安全保护装置,解决了现今常用的过电压保护装置所存在的技术缺陷;使用DEHN系列接地夹具,解决了接地装置不同材料之间连接的防腐问题;采用烙克赛克穿隔密封系统解决了变电所进、出线墙孔处的防水问题。

### 5.2 电能质量治理和节能减排

四期工程最终将配置28台岸桥、122台ARMG,尽管每台大机上都设置了无功补偿和谐波滤波装置,但因设备数量多,单机容量大,且为反复短时工作制,工况非常复杂,瞬间产生大的冲击负荷以及谐波叠加超标的几率很大,进而造

成系统电压和频率的波动。为此,设计在相关变电所内分别设置了 10 kV 动态有源滤波及无功补偿装置进行就地集中治理,解决诸如谐波、电压波动与闪变、三相电压不平衡等电能质量扰动问题,从而有效降低系统损耗、提高系统稳定性、提升电压质量、改善电能质量。

为节能减排,在每个泊位均配置了岸电接电装置,船舶停靠期间可关闭船上的辅机发电机,由岸电设施向其提供电力,以减少靠港船舶 CO<sub>2</sub> 的排放;选择了技术成熟、节能效果好、性价比高的第三代新型 LED 光源作为室外照明光源,替代传统的气体放电灯,是港区绿色照明的一大亮点。

## 6 加强港区节水

四期工程因地处外海、地块独立等因素,给水资源十分紧张。为此,设计主要从开源、节流两方面入手设计给水系统。

给水的开源主要体现在分质供水设计,对用水水质要求不高的降温、环保用水采用回用水作为水源,市政水补水。其中,危险品箱降温喷洒补充水具有季节性变化大、用水量大的特点,设计在危险品箱堆场设置 1 座调节沉淀池,最多可收集 1 080 m<sup>3</sup> 清洁雨水及喷洒回用水,作为危险品箱喷淋降温水源,循环使用;日处理最大污水量约 227.5 m<sup>3</sup>,经处理后出水水质均达到了《城市污水再生利用城市杂用水水质》标准,回用于绿化及道路浇洒。

给水的节流主要体现在适当降低泊位同时上水率和减少管网的漏损。在码头的总用水量估算中,船舶供水往往所占比重大,但船舶供水情况会受船舶航线、水价等众多因素影响,实际供水量可能较估算量大幅降低,进而导致管网内流速降低、水质下降。为避免该情况发生,设计根据洋山一~三期工程实际给水统计<sup>[9]</sup>适当降低了泊位同时上水率,以更加贴近实际情况,达到保障给水水质和节水的目的。在减少管网漏损方面,设计采用各单体水表远程读数措施,对给水进行实时监控,通过实际运行用水数据统计,及时发现水量异常情况,减少漏损用水。

## 7 结语

1) 以服务生产为导向,在优先保障生产功能区土地供应的基础上,因地制宜地进行各辅助功能区的布置,尽可能地做到和谐统一,可大幅提高土地资源利用率。

2) 通过高效的交通组织设计,科学地论证道路建设规模,提升港区的综合作业效率。

3) 科学选择装卸工艺技术路线,结合工程具体特点,在自动化堆场、冷藏箱区及机修区工艺布置上取得创新突破。

4) 根据自动化码头的作业要求,在轨道吊基础结构创新及新型材料广泛应用上取得成效。

5) 适应自动化码头的管控要求,在冷藏集装箱监控、给水仪表远程监测及变电所暖通设备远程控制方面做出有益探索。

6) 注重供电新设备、新技术的应用,采取有效措施治理电能质量,节约用电。

7) 基于开源和节流的理念,采取多种措施保障节约用水的效果。

## 参考文献:

- [1] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 上海国际航运中心洋山深水港区四期工程初步设计[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2014.
- [2] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 自动化集装箱码头总体布局模式研究[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2016.
- [3] 韩时捷, 王施恩, 周亚平. 双重可调式轨道基础研究与设计[J]. 水运工程, 2016(9): 126-129.
- [4] 韩时捷, 周亚平, 马哲超. FRP 筋在自动化集装箱港区 AGV 重载道路中的应用研究[J]. 水运工程, 2016(9): 155-158.
- [5] 孙凯. 集装箱码头冷藏集装箱自动监控方案[J]. 集装箱化, 2013, 24(2): 11-14.
- [6] 白桂彩, 熊正浩. 水表自动抄表系统现状与解决方案[J]. 机械制造与自动化, 2011, 40(5): 145-146.
- [7] 王卫斌, 徐胜玲, 赵轶嘉, 等. 变电站空调自动控制节能装置与远程管理系统[J]. 供用电, 2010, 27(6): 66-68.
- [8] 姚宇, 胡建勇, 陈伟治. 洋山四期工程供电系统创新应用[J]. 水运工程, 2016(9): 163-166.
- [9] 蔡波妮, 马建汶, 周亚平. 集装箱港区船舶供水水量取值研究[J]. 港口科技, 2014(1): 18-21.