

Technical Analysis and Practical Exploration of Ship Shore Electricity in Petrochemical Wharf

Chengzhi Yang, Rui Yang, Wei Zhang

China Waterborne Transport Research Institute, Beijing
Email: yangchengzhi@wti.ac.cn

Received: Jul. 9th, 2019; accepted: Jul. 22nd, 2019; published: Jul. 29th, 2019

Abstract

In recent years, with the requirement of green development of ports and the need of atmospheric environmental protection, ship shore power technology is more and more applied in various major ports and docks to reduce the atmospheric pollution in the port area. As one of the important types of port terminals, petrochemical wharf also has the need and necessity to develop shore power. Therefore, in this paper, the application of Marine shore power system in petrochemical wharf is studied in combination with the characteristics of high demand for electricity security and small space on the wharf surface. From the aspects of electrostatic protection of shore power system, grid-connected switching control of shore power supply, layout and selection of shore power equipment, this paper studies and analyzes the technical difficulties in shore power construction of petrochemical wharf, and introduces the application of shore power in domestic petrochemical wharf.

Keywords

Petrochemical Wharf, Shore Power, Static Electricity, Explosion-Proof, Uninterrupted Switching

石化码头船舶岸电技术分析与实践探索

杨承志, 杨 瑞, 张 伟

交通运输部水运科学研究院, 北京
Email: yangchengzhi@wti.ac.cn

收稿日期: 2019年7月9日; 录用日期: 2019年7月22日; 发布日期: 2019年7月29日

摘要

近年来,随着港口绿色发展的要求和大气环境保护的需要,船舶岸电技术正在越来越多的应用于各省市集装箱、干散货、邮轮等码头。石化码头是我国重要码头类型之一,石化码头岸电对响应打赢蓝天保卫战具有一定的积极意义。针对石化码头用电安全要求高、码头空间有限等特点,本文开展了石化码头船舶岸电系统应用技术研究,重点从岸电系统静电防护、岸电电源并网切换控制、岸电设备布置与选择等方面,提出了石化码头岸电建设中技术关键点,最后介绍了当前国内石化码头岸电建设及应用情况。

关键词

石化码头, 岸电, 静电, 防爆, 安全

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,船舶岸电技术作为一项有效的节能减排技术,已在国内各港口得到了广泛应用,为港口发展低碳经济,建设绿色港口做出了巨大贡献。目前,集装箱、客滚和邮船等类型的码头均已开展了大量的岸电建设和应用,有效减少了港口大气污染物的排放,保护了港区环境。

石化码头作为港口码头的重要类型之一,由于其运输装卸货物的特殊性和危险性,国内外针对其是否建设岸电,以及如何安全使用岸电等方面的技术研究与实践应用并不多,因此,有必要对此进行技术研究。本文结合石化码头生产作业特点,针对石化码头的特点与形式,通过对岸电系统静电防护、岸电电源并网控制、岸电设备布置与选择等方面技术分析与探索研究,提出了石化码头岸电建设中技术关键点,为后续石化码头岸电发展提供一定的参考。

2. 石化码头的特点与形式

石化码头是指装卸和输送原油、成品油、化工品、LPG、LNG等石油与化工产品的专业性码头。与普通货(客)码头和其他码头建(构)筑物相比,石化码头在安全性上要求较高,均有明确的安全防护区域和安全距离要求。

我国沿海石化码头大多分布于水域开阔、水深条件好、地质条件适宜的沿海岸线。近年来随着海上油轮的巨型化发展,石化码头的规模也不断扩大。目前我国沿海原油码头建设规模以30万吨级VLCC油轮为主力船型,兼顾40万~50万吨级油轮靠泊作业。我国内河石化码头的特点则是货物载荷小,装卸设备比较简单,因此一般轻便型式的码头即可适用[1]。

石化码头的生产作业具有连续、密闭、运量大、效率高等特点,其生产作业设备一般为固定式,布置位置较为集中,码头面上无大型的移动式装卸设备和大量车辆行驶。因此,石化码头相对于其它类型码头,作业范围小,码头大部分建筑物只需满足船舶靠泊、带缆的作业要求即可。

目前,国内的石化码头大多通过引桥与码头相连,码头一般设置2个靠船墩,停靠30万吨级以上油轮会设置2个以上靠船墩,在靠船墩两侧分别设置一定数量的系缆墩,以便对油轮进行系缆固定。其平面形式上又分为蝶型布置或码头两侧靠船的一字型布置(图1和图2)。



Figure 1. Bridge approach wharf (butterfly arrangement)
图 1. 引桥式码头(蝶形布置)



Figure 2. Bridge approach wharf (Bilateral berthing)
图 2. 引桥式码头(双侧靠泊)

3. 船舶岸电系统的基本结构和供电方式

码头船舶岸电是指船舶在码头停靠期间，通过码头陆域电源向船载系统及设备提供电能，从而停止使用船舶上的自备发电机，减少燃油发电的使用，降低污染物排放。

码头船舶岸电系统一般由岸基供电、岸船接口和船舶受电三部分组成，主要包括：

- 1) 岸基供电系统：码头变压器、变频电源、高低压开关柜、电力电缆等；
- 2) 岸船接口系统：岸电接电箱、岸电接插件、电缆和电缆管理系统等；
- 3) 船舶受电系统：船舶受电高低压开关柜、岸电接插件、电缆和电缆管理系统等。

岸基供电系统通过变压、变频等设备，将港口变电所电源转换为与靠港船舶用电相适应的电制，然后通过岸船接口系统实现岸船连接，最终将岸上电源输送到船舶受电系统，实现向靠港船舶供电的功能。其系统组成示意如图 3 所示。

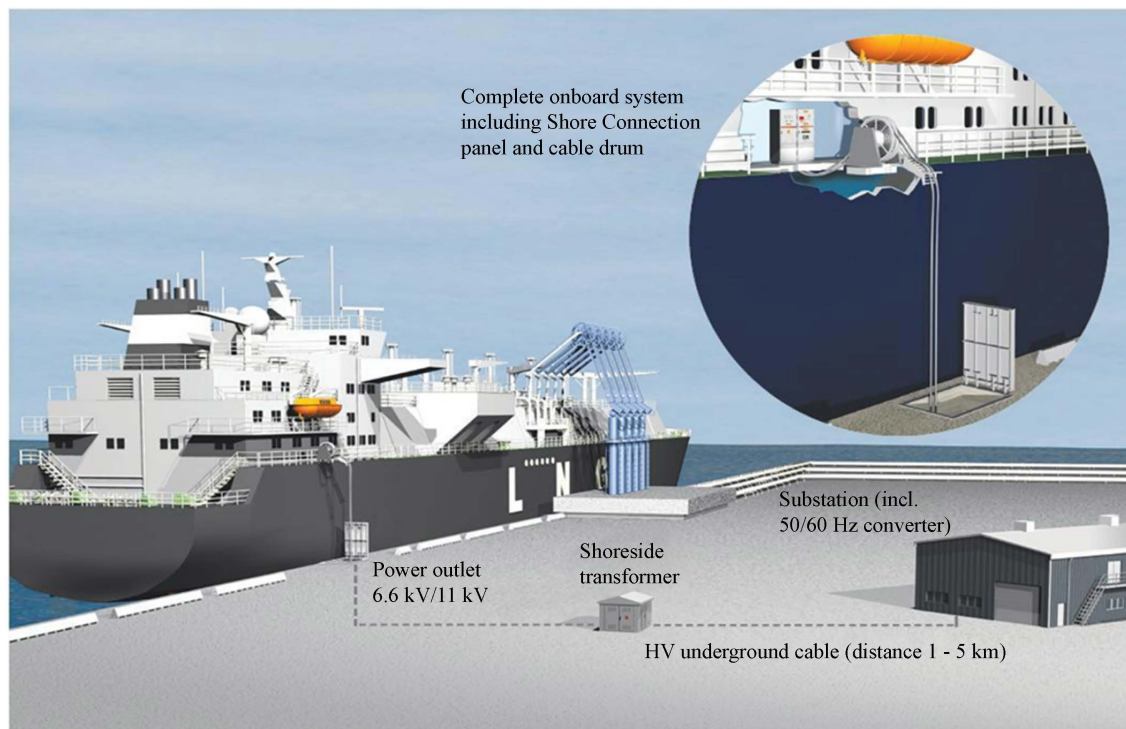


Figure 3. Schematic diagram of ship shore power system in petrochemical terminal [2]

图 3. 石化码头船舶岸电系统组成示意图[2]

为保障岸电使用过程中的安全，岸到船的岸电系统必须设有过压、过流、接地故障保护等电气保护功能，以确保出现问题时，保护器件能可靠动作，切断电源，并发出警报通知相关人员。

根据受电船舶用电情况，石化码头岸电系统电源输出分为变频和不变频供电方式。变频是指由将电源频率由工频 50 Hz 转换至 60 Hz 后向船舶供电，工频是指不通过变频直接采用 50 Hz 电源向船舶供电。

根据船岸供电电压等级，石化码头岸电系统又可分为高压供电和低压供电两种方式。其输出电制详见下表 1 所示。

Table 1. Power supply system of shore power system

表 1. 岸电系统供电电制

供电方式	供电电压	电压(V)	频率(Hz)
变频	高压供电	11000	60
		6600	60
	低压供电	450	60
工频	高压供电	6000	50
		400	50
	低压供电	230	50

4. 石化码头船舶岸电技术分析

4.1. 石化码头岸电的静电防护

石化码头在进行岸电接用时，不同种类材料的设备在相互接触、摩擦的过程中，有可能产生静电。

当静电累计到一定程度时会引发放电, 强度到达一定程度就会产生火花, 由此点燃挥发、泄漏的可燃气体混合物, 造成火灾、爆炸事故的发生。因此, 石化码头的岸电设施必须进行静电防护, 以保证安全。

在码头岸电设施中存在大量尖锐的导体, 如岸电配电箱金属箱体的四个角, 设备上的铁钉, 电缆卷车上的金属突出物等等, 因此岸电设施会产生电晕放电这种类型的静电放电。一般情况下, 由于电晕放电的放电能量小, 从而危险性不是很大, 但也不能忽视电晕放电的危害。因为放电形式与能量的分类和界限并不绝对, 在一定条件下, 电晕放电有可能转变为另一种类型的静电放电, 从而出现较高的危险性。

码头岸电设施有可能发生刷形放电。例如, 岸电电缆橡胶外套、插座绝缘外壳等属于非导体, 电缆搬运及升降装置或工具等材质多为钢材, 属于导体, 因此当电缆管理装置搬运电缆或电缆管理装置上带有足量电荷时就有可能发生刷形放电。

岸电设施使用过程中也存在发生火花放电的可能性。例如, 由于岸电电缆的绝缘外套是高分子材料, 因此当穿着绝缘鞋的工人搬动电缆的时候, 该情况就是一个孤立导体, 当人体和电缆因为接触和感应而带上静电但又未及时泄漏掉时, 就有可能对接地导体产生火花放电。

由以上分析可知, 岸电设施存在电晕放电、刷形放电、火花放电等多种形式的静电放电, 因此, 为防止静电引起的各种危险灾害, 石化码头在使用岸电时, 应该从控制静电电荷的产生、积累, 以及使产生的静电荷迅速消除或泄漏这两方面着手, 实现静电防护。一方面可以通过减少摩擦和接触次数、降低摩擦压力和速度、选用一些能减少静电产生的材料等方式, 使其在使用过程中尽可能少的产生静电荷; 另一方面可以采用消除岸电设施上所带的静电, 或将产生的静电及时地向大地泄漏等方法来迅速泄漏掉产生的静电荷, 使带电量减少, 从而实现静电防护。

静电接地是增加静电泄漏的主要方式之一, 也是各种防静电规范标准中最常用、最基本的防止静电危害的措施。静电接地是指物体通过导电材料、防静电材料等与大地在电气上进行可靠连接, 确保静电导体与大地的静电电位接近或相同[3]。

因此, 对于岸电配电箱、电缆卷车等容易产生静电荷的岸电设备, 可通过对其进行静电接地进行静电防护, 即在岸电设施设备上设立静电接地连接点, 将该点通过接地线与地底深埋的接地体可靠连接, 从而使岸电设备上的静电电荷通过接地极、接地线以及接地体向大地泄漏。其系统组成图如下图 4 所示。

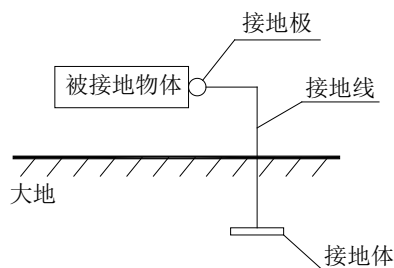


Figure 4. Composition of electrostatic system

图 4. 静电系统组成

岸电设备上的测量点与大地之间的总电阻即为静电泄漏电阻 R_m 。 R_m 是评价静电接地良好程度的标准, 也是判断岸电设备表面的静电电荷能否顺畅泄漏的主要依据。当已知需要接地岸电设备的自身电阻 R_n 时, 就可求出静电接地电阻 R_s , 即:

$$R_s = R_m - R_n \quad (1)$$

其中, 静电接地电阻 R_s 主要由四部分组成: 被接地设备与静电接地极之间的接触电阻 R_a , 接地线的电阻

R_b ，大地接地体自身电阻 R_c ，以及接地体与大地之间的流散电阻 R_d ，具体表示如下：

$$R_s = R_a + R_b + R_c + R_d \quad (2)$$

为了满足石化码头所允许存在的最高静电电位 U 和最大静电起电电流 I 要求，静电接地电阻 R_s 应满足： $R_s = R_a + R_b + R_c + R_d + R_n \leq \frac{U}{I}$ 。设计时，应合理的选择接地极、接地线和接地体，以确保静电接地电阻 R_s 的大小满足要求。

接地体与大地之间的流散电阻 R_d 主要取决于当地土壤电阻率，我国各地土壤电阻率随温度、湿度的变化范围大约为一到三个数量级，因此土壤电阻率的影响也是静电接地设计中需要考虑的重要因素之一。

4.2. 石化码头岸电电源的并网切换控制

油船在靠泊码头进行装卸作业时，可能会遇到火灾、爆炸或有毒气体泄漏等紧急情况，此时需要船舶迅速做出响应，驶离泊位。我国《油船油码头安全作业规程》(GB 18434)中的 8.4.2.1 条明确规定，“油船停靠油码头期间，油船锅炉、主机、舵机和其他操纵所需设备都应保持可使油船迅速离泊状态”。

在紧急情况下，为保证油船主机能够在最短时间内启动，负责油船主机运行的支持系统必须处于不间断运行状态，因此如果使用岸电向油船供电时，在非岸电原因造成的紧急情况下，岸电设施与油船之间需采用不断电切换的方式，在岸电电源与船舶发电机组并网后，将岸电撤出船舶供电系统，改由船舶发电机组向全船供电，以保证主机的支持系统能够连续运转，达到主机备车的目的。

由于岸电电源与柴油发电机两者之间的特性并不一样，为了使由电力电子器件变换而得到的岸电电源最终能够无扰动地和船舶发电机组进行并网，需要对岸电电源的逆变器进行控制，最终实现电源的不断电无缝切换。根据控制机理和控制目的的不同，并网逆变器的控制方式可分为恒压恒频控制、恒功率控制、下垂控制以及虚拟同步发电机控制等控制方法。其中，虚拟同步发电机控制技术是一种新型的逆变器控制算法。它是基于同步发电机在电力系统中对系统电压、频率及有功无功的调节作用，通过分析同步发电机的基本原理，用数学建模的方式从外特性上模拟或者部分模拟同步发电机的频率和电压特性 [4]。

为了使得岸电电源能够模拟出传统柴油发电机的相关特性，这里选择同步发电机的二阶机电暂态模型进行数学建模，并引入发电机机械运动方程中的转动惯量。

$$\begin{cases} J \frac{d\Omega}{dt} = M_T - M_e \\ \dot{E}_0 = \dot{U} + iR_a + j\dot{X}_s \end{cases} \quad (3)$$

式中， J 为转动惯量； Ω 为机械转速； M_T 为机械转矩； M_e 为电磁转矩； \dot{E}_0 为励磁电动势； \dot{U} 为电枢端电压； i 为电枢电流； R_a 为电枢电阻； X_s 为同步电抗。

将发电机电对数取为 1，此时有 $\omega = \Omega$ ，则上式可变换为：

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = J \frac{d(\omega - \omega_N)}{dt} = M_T - M_e = \frac{P_T - P_e}{\omega} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

式中， ω 为电角速度； ω_N 为同步电角速度； P_T 为机械功率； P_e 为电磁功率； θ 为发电机的电角度。

结合上述式 3 和式 4，对船上的柴油发电机组进行建模，采集柴油发电机组的电压、电流与频率。

即可建立出对应虚拟同步发电机的等效数学模型，在该模型中，机械功率 P_T 、电磁功率 P_e 、电枢电

流 i 以及励磁电动势 E_0 分别作为模型的输入量, 电枢端电压 \dot{U} 作为模型的输出量。系统的电路原理图如下图 5 所示。

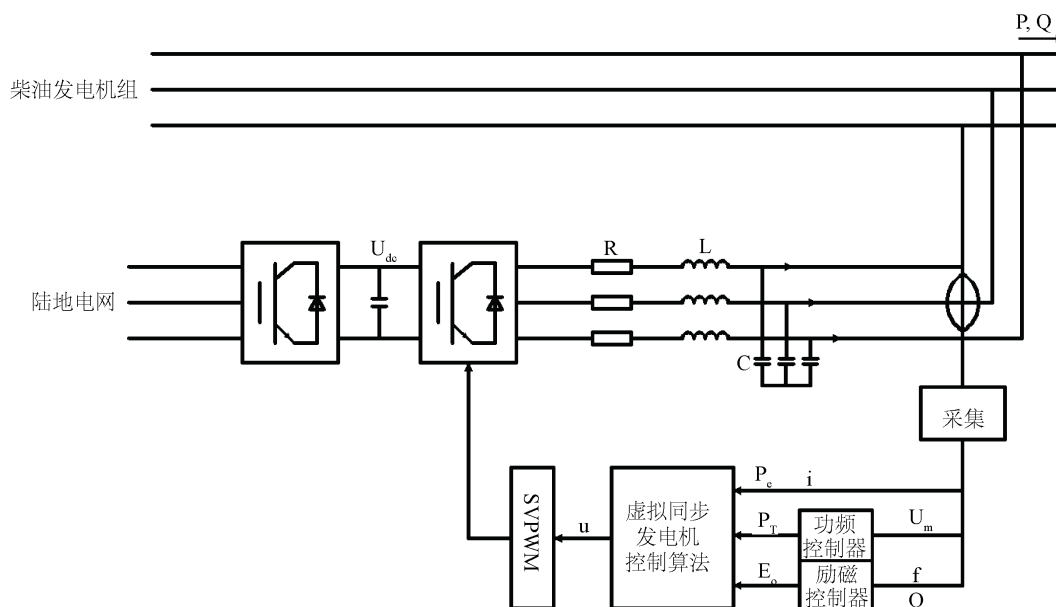


Figure 5. Grid-connected control schematic diagram of shore power system
图 5. 岸电系统并网控制原理图

如图 5 所示, 整个岸电并网控制系统以最终并网点实际电压为控制对象, 其控制过程为: 首先, 对并网点输出侧进行电压与电流采样, 从而得到并网输出侧的实际电压幅值 U_m 、实际系统输出频率 f 以及系统无功功率 Q 。将 f 送入功频控制器模块, 经计算最终得到船上柴油发电机所需机械功率 P_T ; 将 Q 和 U_m 送入励磁控制器, 经过计算得到励磁电动势的幅值 E_0 ; 同时, 对逆变器的输出电流 i 进行测量, 从而得到岸电输出侧的实际有功功率 P_c 。然后将测量计算得到的 P_T 、 E_0 以及 P_c 送入建立的同步发电机模型, 得到指令电压 u , 即发电机的电枢端电压。最后将指令电压 u 送入 SVPWM 控制算法模块, 最终得到六路脉冲信号驱动逆变器桥路。

根据建立的虚拟同步发电机数学模型, 通过以上一系列的闭环系统控制, 并在控制环路中引入功率控制器和励磁控制器, 从而稳定输出并网电压, 使岸电电源的输出电压和频率满足并网要求, 最终实现岸电电源与船上柴油发电机的无间断切换。

当紧急情况下, 岸电也发生故障或紧急情况是由岸电引发时, 全船将会处于断电状态, 尽管船舶的发电机组会在短时间内重新启动, 并由船舶的功率管理系统分级向船舶进行恢复供电, 但在岸电发生故障断电到船舶发电机组恢复供电期间仍会存在一个空白期, 并由此造成主机支持系统的断电与停运。在这种情况下, 船舶主机和其它相关设备能否在发电机组紧急启动恢复供电后快速正常运转, 达到主机备车条件, 仍存在一定的疑问与风险。

另外, 发生紧急情况时, 油船会被要求立即停止装卸作业, 排空管道, 准备离泊。因此, 船舶会采取相应的快速脱离措施, 例如缆绳会采用快速脱缆钩, 或通过人工砍断缆绳, 输油臂会采用快速脱开技术等。当前船舶靠港接用岸电时, 岸电电缆和接插件从船舶侧或码头侧安全、快速脱离的技术方案尚不明确。是否能够采用先断电, 再砍断电缆或船舶离泊时直接拉断电缆的方式, 以及采用这些办法是否会对船舶和码头已经处于的应急状态造成进一步影响, 甚至由此引发破坏性事件发生, 还有待于进一步论证。

4.3. 石化码头岸电设施的布置与选择

停靠在石化码头的船舶靠泊作业时，随着潮位、水位以及船舶装卸货物情况的变化，船舶干舷与码头面之间的高度会发生很大变化。因此石化码头应用岸电时，应根据码头实际情况，考虑船岸电缆的上船方式，以保证岸电应用过程中的安全。目前船岸电缆上船方式主要有以下 2 种方案：

一种方案是由船方配置电缆管理系统，如电缆卷盘、电缆卷车等，将岸电电缆由船舶放置到码头平台上，再由码头人员将电缆拖拽到码头岸电接电装置进行连接。采用该方案时，需要在船舶上加装电缆管理装置，会增加船东成本，并占用船上一定空间。

另一种方案是由码头方配置电缆管理系统，如建设具备升降、俯仰、伸缩等功能的电缆管理装置，将岸电电缆和接插件由岸上送至船舶上，再由船舶人员将电缆和接插件拖拽到船舶的岸电接电装置进行连接。采用该方案时，需要在码头装卸平台、靠船墩或系缆墩等位置寻找安装位置，由于石化码头大多通过引桥与码头相连，码头前沿装卸平台上布置完输油臂或输油软管系统、登船梯等设备后，所余空间有限，岸电设施布置困难。尤其采用采用低压上船时，对于用电量较大的油轮，岸电电缆根数多，截面积大，电缆管理装置所需空间更为巨大。

由于油品、液体化工等危险品货物在储运、装卸过程中可能出现泄漏，并与空气混合，当达到一定浓度范围时会成为爆炸性气体混合物，成为安全隐患，布置在石化码头的电气设备应满足国家标准《爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范》中规定的相关防爆要求，以确保不会引起爆炸环境被点燃引爆。

国家标准《石油库设计规范》中明确规定，油船和油驳卸载油品时，油船和油驳内液体表面以上的空间划为 0 区；以卸油口为中心，半径 1.5 米的球形空间划为 1 区；以卸油口为中心，半径并延至水面的球形空间划为 2 区[5]。由此可见，石化码头由于其装卸货物的特殊性和危险性，一般属于易燃、易爆的危险场所，使用于该区域的岸电设施和电气设备，应根据安装区域的火灾、爆炸危险区域等级以及使用条件，满足相应的防护、防爆要求。尤其码头前沿，岸电设施的电缆连接系统和岸电接插件，正处于石化码头的装卸作业区内，其防爆要求和性能，是岸电安全使用的关键点和难点。

岸电接插件一般分为高压和低压两种，目前岸电接插件所依据的国际标准，主要是 IEC 62613-1、IEC 62613-2 (针对高压岸电接插件)，IEC 60309-5 (针对低压岸电接插件)，以及 60309-1、60309-2 中对相关通用接插件的技术要求；我国在岸电接插件标准方面主要是采纳国际标准 IEC 62613 和 IEC 60309-1、IEC 60309-2，对应等效标准分别为 GB/T 11918、GB/T 11919 和 GB/T 30845.1、GB/T 30845.2。到目前为止，国内并未专门针对岸电接插件的防爆技术要求出台相关标准。

因此，为保证石化码头岸电设施的安全使用，尽可能降低岸电使用过程中的危险性，在严格依据标准，对石化码头进行爆炸危险区域划分的基础上，建议以灌装口轴线为中心线，将半径十五米以内的圆柱形空间划定为 2 区；对可能大量释放并扩散的高挥发性液体，可考虑以灌装口轴线为中心线，将半径 15 到 30 米以内的圆柱形空间划定为附加 2 区。布置于不同爆炸危险区域内的岸电设施和电气设备，其防爆级别和组别，必须不低于该爆炸危险环境内爆炸混合物的级别和组别，当有 2 种以上的级别和组别可供选择时，应按照危险程度较高的级别和组别选用相应的防爆电气设备，以确保石化码头岸电设施的安全使用。

5. 国内石化码头岸电应用探索

我国的石化码头，沿海地区主要分布于大连、天津、青岛、日照、上海、宁波-舟山、湛江等地，内河主要集中在重庆、湖北和浙江等地区。由于石化码头装卸运输的多为易燃易爆的油品或化工原料，因此对安全性与可靠性的要求较高，目前国内石化码头船舶岸电的应用尚处于探索阶段，仅有少部分地区

的石化码头进行了岸电的试点建设与应用探索。

5.1. 嘉兴市嘉港石化码头岸电系统

2016年12月,嘉港石化码头建设完成了一套2MVA的岸电系统,可将10 kV/50 Hz的电源转变为0.44 kV/60 Hz和0.4 kV/50 Hz的可变双频双压电源,以满足靠泊船舶对电压频率的不同需求。该系统在嘉港石化外海码头前沿设置了2个岸电接电箱,船舶接用岸电时,码头岸电接电箱通过移动式防爆电缆卷车,与船舶上改造后的船用接电箱进行连接,从而向停泊码头的船舶输送电能。据了解,该套岸电系统目前已通过连船测试(图6)。



Figure 6. Shore power facilities of Jiagang Petrochemical Wharf
图6. 嘉港石化码头岸电设施

5.2. 重庆化工码头岸电系统

重庆化工码头位于长江上游长寿段左岸,岸线长1150米,属于典型的斜坡式大水位差码头(图7)。码头通过斜坡栈道与坡底趸船连接,岸电设备设施布置于趸船之上。该码头岸电系统供电容量100 kW,供电电制0.4 kV/50 Hz。岸电系统配备接线端子,接用岸电时,将船舶提供的岸电电缆连接到趸船上的岸电接电端子上,即可实现向靠泊船舶提供岸电电源。据了解,该套岸电系统已投入使用,仅2018年4月到5月,就对停靠船舶供电8次,累计供电5100多度。



Figure 7. Chongqing Chemical Terminal Facilities
图 7. 重庆化工码头设施

6. 结束语

推动码头船舶岸电发展应用是发展绿色水运, 增强可持续发展能力的重要内容之一, 是建设资源节约型、环境友好型社会的有效补充。在分析国内外液货船舶岸电需求的基础上, 结合石化码头的技术特点, 开展石化码头船舶岸电技术研究, 针对静电防护、防爆等级、不断电切换等技术难点开展深入研究, 建立切实可行的技术方案, 强化设备技术研发, 完善相关技术标准制订, 为码头安全、可靠、快速、经济的使用船舶岸电技术提供技术保障, 对进一步推进码头的岸电发展进程具有重要的意义。

参考文献

- [1] 肖光. 天津港石化码头升级改造研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2009.
- [2] IEC/ISO/IEEE (2012) IEC/ISO/IEEE.80005-1-2012. Utility Connections in Port Part 1: High Voltage Shore Connection (HVSC) Systems—General Requirements.
- [3] 常天海. 铁路危险品货场中静电危害模型及其防护的研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2006.
- [4] 刘志昌. 基于虚拟同步发电机的光伏并网无缝切换技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [5] 中国石油化工股份有限公司. GB50074-2014 石油库设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网首页：<http://cnki.net/>，点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”，跳转至：<http://scholar.cnki.net/new>，搜索框内直接输入文章标题，即可查询；
或点击“高级检索”，下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3431，即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版：<http://www.cnki.net/old/>，左侧选择“国际文献总库”进入，搜索框直接输入文章标题，即可查询。

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ojtt@hanspub.org