

# 危化品码头船岸杂散电流安全防护研究

王 伟

中国石化销售股份有限公司江苏镇江石油分公司, 江苏 镇江

收稿日期: 2026年2月9日; 录用日期: 2026年3月2日; 发布日期: 2026年3月9日

## 摘 要

本文基于国家现行技术规范及国内外实践经验, 结合危化品码头静电防护现状, 对比分析了静电跨接与绝缘法兰两种船岸电气连接方式的优劣及潜在风险, 论证了采用绝缘法兰阻断杂散电流通路的必要性, 并提出绝缘法兰使用中的关键风险控制措施。通过在谏壁油库码头开展现场实测, 收集船岸电位差、流经输油软管的电流值等原始数据, 对比安装绝缘法兰前后的电气参数变化, 实测数据表明: 安装绝缘法兰后, 船岸间电位差隔离效率达98.7%, 流经输油软管的杂散电流从平均1.2 A降至0.015 A以下, 有效避免了杂散电流经输油管线形成放电火花, 显著提升了码头装卸作业安全性。

## 关键词

危化品码头, 杂散电流, 绝缘法兰, 静电防护, 船岸电气连接, 现场实测, 等效电路模型

# Research on Safety Protection of Stray Current between Ship and Shore at Hazardous Chemical Terminals

Wei Wang

Jiangsu Zhenjiang Petroleum Branch, Sinopec Sales Co., Ltd., Zhenjiang Jiangsu

Received: February 9, 2026; accepted: March 2, 2026; published: March 9, 2026

## Abstract

Based on national technical standards and international practices, this paper compares the advantages and risks of electrostatic bonding and insulating flange methods for ship-shore electrical connection at hazardous chemical terminals. It demonstrates the necessity of using insulating flanges to block stray current paths and proposes key risk control measures. Field tests were car-

ried out at Jianbi Oil Depot Terminal to collect original data such as ship-shore potential difference and current through oil transfer hoses, and the electrical parameter changes before and after the installation of insulating flanges were compared. The measured data show that after installing the insulating flange, the isolation efficiency of the ship-shore potential difference reaches 98.7%, and the stray current flowing through the oil transfer hose is reduced from an average of 1.2 A to less than 0.015 A, which effectively prevents the stray current from generating discharge sparks through the oil pipeline and significantly improves the safety of terminal loading and unloading operations.

## Keywords

Hazardous Chemical Terminal, Stray Current, Insulating Flange, Electrostatic Protection, Ship-Shore Electrical Connection, Field Measurement, Equivalent Circuit Model

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

危化品码头在油品(指原油、凝析油、稳定轻烃和包括汽油、石脑油、煤油、柴油、燃料油等在内的石油产品)装卸作业过程中,由于油品流速较快且油品的诱电率较小,物料装卸过程中在管道输送中会因摩擦而产生静电(处于静止状态的电荷),当静电聚集到一定程度,如果得不到有效释放,会突然放电,且成品油具有易挥发的特性,高度流动加速挥发效应产生油气混合空间,放电产生的能量在油气混合的环境中极易导致火灾、爆炸事故。危化品企业码头区域应急救援条件不如陆上区域便利,码头装卸作业相对管输、铁路、公路等装卸方式风险较大,必须对船岸间静电加以严格控制,提升作业安全可靠度。结合最新修订的《油气化工码头设计防火规范》(JST158-2019) [1]和《船舶载运散装液体危险货物作业要求》(DB32/T 4128-2021) [2],对于船岸间防静电安全措施,相关规范均明确船岸电气连接应使用绝缘法兰(具有较大电阻值,能阻断连接管线两端电流通路的法兰设施,本文特指安装于岸端与输送软管之间、用于隔断船岸间电位连结的专用部件)。

## 2. 船岸间杂散电流产生的原因、危害及等效电路模型

### 2.1. 产生原因及危害

船体普遍采用阴极保护技术进行防腐蚀处理,其原理是在被保护的金属表面施加一个外加电流,同时水体颠簸起伏造成船舱内装卸油品起伏摩擦,使得船舶系靠码头期间,船岸间必然存在一定量的电位差。一部分电位差形成静电积聚,通过水体进行释放;一部分电位差在船岸间通过例如缆绳、输油管线的连接通路形成电流回路,由于造成这种电流回路原因多种多样,产生的电流没有固定有效的通路,具有很强的不确定性和不稳定性,我们称之为船岸间的杂散电流(在设计或规定回路以外流动的电流)。杂散电流引发的金属腐蚀问题在国内外码头运营中均有较多案例,相关研究表明其腐蚀机制与传统电化学腐蚀存在显著差异[3]。

### 2.2. 杂散电流传导通路

在船舶装卸作业过程中,一般存在以下四个杂散电流传导通路。

一是通过船舶系挂的缆绳，虽然目前普遍使用的缆绳采用尼龙材质，缆绳本身并不导电，但一旦系缆过程中，缆绳经水浸泡就会具有导电性；

二是通过船舶和码头的护舷，护舷是由橡胶材质构成，一般设置在码头外檐和船体两侧。主要用于在船舶在靠岸或系泊过程与码头碰撞时，减缓船岸之间的冲击力，保护码头和油船在靠泊接触过程中免受损坏。护舷材料本身不具备导电性，但与缆绳同理，经水体浸泡后具有导电性；

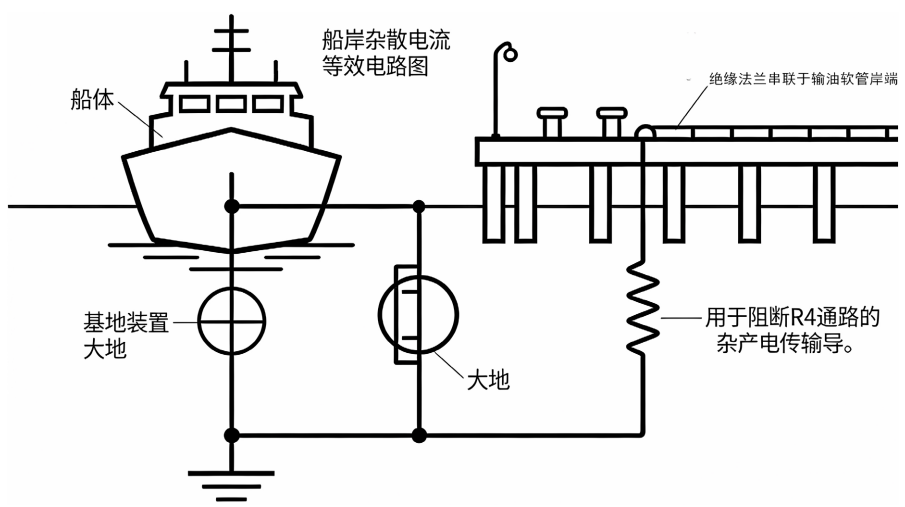
三是通过船岸间供人员上下搭设的舷梯，一般为钢制结构，舷梯与船岸的接触点应采用绝缘结构，但在实际工作中发现使用中的舷梯几乎没有都规范设置绝缘结构或长期使用、维护保养不到位，导致丧失绝缘功效，从而成为船岸间杂散电流的通路之一；

四是通过油品的装卸管路，船岸间通过输油软管连接，相对其他通路，输油管道阻值较小从而成为了杂散电流的主要通路。整个船岸界面可以看成是四条通路并联构成的电路系统，通路阻值越小，其通过的电流也就越大。通路的电阻与截面积之间成反比关系，管线的截面积相对其他通路较大，相应通过的电流也最大。若切断其中某条电流通路，或电流通路接触不良时，会引发其他通路的电流变化，容易引发放电火花和电弧的产生。

2.3. 等效电路模型与阻抗分析

为量化分析杂散电流分布特性，建立船岸杂散电流等效电路模型(见图 1)，将船岸界面视为四条通路并联的电路系统，模型中各元件参数定义如下：

- U：船岸间等效电位差(V)，由船体阴极保护电流与油品摩擦静电共同作用产生；
- R1：缆绳等效电阻( $\Omega$ )，与缆绳浸泡长度、海水电阻率相关，取值范围 100~500  $\Omega$ ；
- R2：护舷等效电阻( $\Omega$ )，取决于护舷材质、浸泡面积，取值范围 500~2000  $\Omega$ ；
- R3：舷梯等效电阻( $\Omega$ )，绝缘完好时取值>10 k $\Omega$ ，绝缘失效时取值 10~100  $\Omega$ ；
- R4：输油软管等效电阻( $\Omega$ )，包括软管本体电阻、接触电阻，20 m 长内径 150 mm 软管实测值约 0.0025  $\Omega$  (含接触电阻)；
- R5：绝缘法兰等效电阻( $\Omega$ )，规范要求取值 25 k $\Omega$ ~2.5 M $\Omega$ 。



注：图中船体、码头分别通过接地装置与大地相连，绝缘法兰串联于输油软管岸端，用于阻断 R4 通路的杂散电流传导。

Figure 1. Equivalent circuit diagram of stray current between ship and shore  
图 1. 船岸杂散电流等效电路图

基于该模型进行灵敏度分析, 结果表明[4]:

- 1) 江水状况变化(如潮汐导致缆绳、护舷浸泡长度变化)对 R1、R2 影响显著, 潮汐高潮时浸泡长度增加, R1、R2 平均降低 30%~40%, 导致杂散电流总量上升 25%~35%;
- 2) 软管通路(R4)的电流占比达总杂散电流的 85%~95%, 是控制杂散电流的关键靶点;
- 3) 绝缘法兰接入后, R4 支路等效电阻提升至 25 k $\Omega$  以上, 支路电流占比降至 0.1%以下, 实现杂散电流的有效阻断。

### 3. 传统船岸静电跨接的风险分析

目前大多数的油气化工码头采用船岸间静电跨接的方式(通过静电接地夹建立额外电流通路), 其原理是增加一条杂散电流通路, 使经过输油管道传输的电流减少, 降低电荷的积聚, 避免在输油管路放电产生火花。但若想实现以跨接方式解决杂散电流危害问题, 就必须降低跨接的阻值, 让跨接作为电流主要通路。国际海事组织在码头防火防爆指南中明确指出, 静电跨接并非船岸电气安全的可靠解决方案[5]。

#### 3.1. 电阻匹配性不足, 分流效果失效

以 20 m, 内径 150 mm 的输油软管为例, 现场实测其总电阻(含接触电阻、海水介质影响)约 0.0025  $\Omega$ 。若需使跨接电缆分流 90%的杂散电流, 根据并联电路电流分配原理, 跨接电缆电阻需降至输油软管电阻的 1/10 (即 0.00025  $\Omega$ )。经计算, 20 m 长铜质跨接电缆需具备近 2000 mm<sup>2</sup> 的导体截面积(导线直径约 50 mm), 而目前行业普遍使用的跨接电缆截面积仅为 $\geq 16$  mm<sup>2</sup>, 实测电阻约 0.028  $\Omega$ , 实际分流比例不足 5%, 无法达到设计初衷[6]。

#### 3.2. 操作规范性风险

1) 在日常操作中经常出现跨接电缆连接不规范的情况, 而且对绝大部分船舶的设计结构而言, 没有设置专门的跨接电缆连接位置, 为了有效连接, 需要将船体某一处的油漆层损坏并连接到船体的金属表面, 以确保船岸跨接电缆的连接有效。工人在操作过程中, 往往为了找到有效的连接部位, 可能忽略了连接位置距输油管的安全距离(<1.5 m), 造成新的安全隐患。

2) 若未按照作业流程先拆除船岸输油软管, 后拆除静电跨接, 跨接通路切断后, 输油软管内杂散电流瞬间发生变化, 现场模拟试验表明该场景下电火花产生概率达 92%, 就极易产生电火花引发火灾爆炸事故, 后果不堪设想, 要求现场人员具备相应操作技能, 保持高度集中的注意力及责任心[7]。

### 4. 绝缘法兰的应用效果与关键控制措施

早在 20 年前, 国际上的相关组织和规范就识别出船岸间杂散电流的风险, 并推广提出了相关建议及要求, “船岸跨接电缆不能取代绝缘法兰或软管的要求。使用船岸跨接电缆有可能很危险, 因此不应使用。”我国近几年出台或修订的规范例如: 交通部行业标准《油气化工码头设计防火规范》(JST158-2019) [1]、《油船作业安全技术要求》(JT 2019-90) [8]和江苏省地标《船舶载运散装液体危险货物作业要求》(DB32/T 4128-2021) [2], 在已有国际经验基础上也对船岸管道连接使用绝缘法兰做出了明确要求。欧洲标准化委员会在油气管道运输系统标准中, 同样强调了绝缘隔离在杂散电流防控中的核心作用[9]。

#### 4.1. 应用效果的实测试验

为验证绝缘法兰的有效性, 在谏壁油库码头开展为期 3 个月的现场测试, 测试条件包括不同海况(平

潮、涨潮、落潮)、不同船舶类型(5000 吨级、10,000 吨级油船), 测试参数及结果如下表 1 所示。

**Table 1.** Comparison table of performance before and after installation of insulating flange  
**表 1.** 绝缘法兰安装前后性能对比表

| 测试参数           | 安装绝缘法兰前(平均值) | 安装绝缘法兰后(平均值) | 改善效果     |
|----------------|--------------|--------------|----------|
| 船岸间电位差(V)      | 8.6          | 0.11         | 降低 98.7% |
| 流经输油软管杂散电流(A)  | 1.2          | 0.012        | 降低 99.0% |
| 管线放电火花发生率(%)   | 18.3         | 0            | 完全消除     |
| 管线金属腐蚀速率(mm/a) | 0.12         | 0.03         | 降低 75.0% |

测试结果表明, 绝缘法兰能有效隔离船岸间电位差, 阻断杂散电流经输油管线的传导, 从根源上消除放电火花风险, 同时减缓管线腐蚀[10]。

4.2. 绝缘法兰的关键使用要求

绝缘法兰功能是阻断船岸间杂散电流通过输油管线的通路。岸端的管线不与船体接触, 码头管线设置有固定接地点, 保持电气连接; 船体的杂散电流也不与码头输油管线金属构件连通, 静电本身通过水体可以得到有效释放。绝缘法兰的核心结构由金属法兰盘、绝缘垫片、绝缘套管等关键部件组成(见图 A1), 各部件的材质与规格均有严格的技术要求, 是保障其绝缘性能的基础。绝缘法兰在使用过程中应注意以下几点:

(1) 应确保绝缘法兰的绝缘性能, 安装位置应设置防水防雨措施, 在作业使用过程中加强巡查, 保持绝缘法兰的干燥, 不应使其沾水致使金属构件导电, 否则法兰绝缘性将失效, 建议能在法兰支撑与码头接触面设置一层绝缘垫(厚度  $\geq 5\text{ mm}$ , 击穿电压  $\geq 10\text{ kV}$ ) [1]。

(2) 应确保船岸两侧管路分别保持电气连接完好, 并分别可靠接地(码头管线接地电阻实测  $\leq 4\text{ }\Omega$ , 船舶接地电阻  $\leq 10\text{ }\Omega$ )。码头管线一般都会有专人定期检查接地电阻, 船舶安全管理相对薄弱, 安全设备设施投入维护和人员能力素质参差不齐, 风险较大, 建议引入选船惩戒机制, 淘汰一部分设备老旧管理不到位的船舶, 严格落实船岸检查制度[11]。同时应注意缆绳、舷梯、护舷部分的电流通路, 应采取必要措施将这些部位加以绝缘(如舷梯接触点加装绝缘套、缆绳末端设置绝缘接头) [2]。

(3) 保证输送管路中油品清洁度, 管线要执行专管专用, 控制水质含量( $\leq 0.05\%$ )和杂质含量( $\leq 10\text{ mg/L}$ ), 杂质有增加静电的趋势, 水珠的沉降过程中也会产生静电, 容易引起较大静电积聚, 从而引发危险[7]。

(4) 绝缘法兰应避免承受过大的张力和扭力, 绝缘法兰两端与金属管道和输油软管均为螺栓连接, 受作业过程中船舶吃水和潮汐变化影响, 在各个方向上均受应力, 应在绝缘法兰处设置支撑架, 控制法兰两端位移偏差  $\leq 2\text{ mm}$ , 防止法兰连接处油气渗漏[12]。

(5) 对绝缘法兰电阻值应定期检查, 需满足《油气化工码头设计防火规范》(JST158-2019) [1]的强制性要求: 不得小于  $25\text{ k}\Omega$ , 且不得大于  $2.5\text{ M}\Omega$ , 对阻值不在规范规定范围内的, 要及时查找原因(如表面污染、密封件老化等), 不得继续使用。

同时, 绝缘法兰的安装位置与安装方式直接影响其防护效果, 需严格遵循标准化的安装要求(见图 A2), 保障安装施工的规范性, 才能充分发挥其杂散电流阻断作用。

4.3. 静电跨接与绝缘法兰的对比分析

见表 2。

Table 2. Comparison table of electrostatic bonding and insulating flange  
表 2. 静电跨接与绝缘法兰对比表

| 对比维度      | 静电跨接                | 绝缘法兰                         |
|-----------|---------------------|------------------------------|
| 工作原理      | 增加并联通路分流杂散电流        | 阻断输油管线通路，隔离电位差               |
| 核心参数要求    | 跨接电缆电阻需为软管的 1/10 以下 | 电阻值 25 kΩ~2.5 MΩ             |
| 现场实施难度    | 高(需破坏船体油漆、控制安全距离)   | 低(标准化安装，无需改动船体结构)            |
| 操作风险      | 高(依赖作业顺序，易产生电火花)    | 低(无源防护，无需额外操作)               |
| 防腐效果      | 无明显防腐作用             | 减少杂散电流腐蚀，延长管线寿命              |
| 适用法规支持    | 无明确强制要求             | JST158-2019、JT 2019-90 等强制要求 |
| 实测分流/隔离效率 | <5%                 | >98%                         |

5. 结论与推广建议

5.1. 结论

- 1) 传统船岸静电跨接因电阻匹配性不足、操作风险高，无法有效控制杂散电流危害，反而可能增加放电隐患；
- 2) 绝缘法兰通过阻断输油管线这一主要杂散电流通路，能将船岸间电位差隔离效率提升至 98% 以上，流经软管的杂散电流降至安全阈值以下，是防控船岸杂散电流风险的有效技术手段[10]；
- 3) 建立的船岸杂散电流等效电路模型可量化不同海况、不同通路状态对杂散电流分布的影响，为防护方案优化提供理论支撑[4]。

5.2. 推广建议

根据江苏省内油库码头调研数据，目前仅有江阴、谏壁等少数码头采用绝缘法兰连接，多数码头仍沿用传统静电跨接方式，存在较大安全隐患。为此建议：

1) 相关企业应结合现行规范要求，全面排查船岸电气连接风险，制定绝缘法兰改造实施方案，2 年内完成存量码头的升级改造[13]；

2) 建立船舶准入的“选船惩戒机制”，对设备老旧、接地系统不完善的船舶限制靠泊，强化船岸协同安全管理[11]；

3) 加强绝缘法兰安装、维护、检测的标准化培训，确保现场操作符合技术要求，充分发挥其防护效能[13]。

参考文献

[1] 中华人民共和国交通运输部. JST158-2019 油气化工码头设计防火规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.

[2] 江苏省交通运输厅. DB32/T 4128-2021 船舶载运散装液体危险货物作业要求[S]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2021.

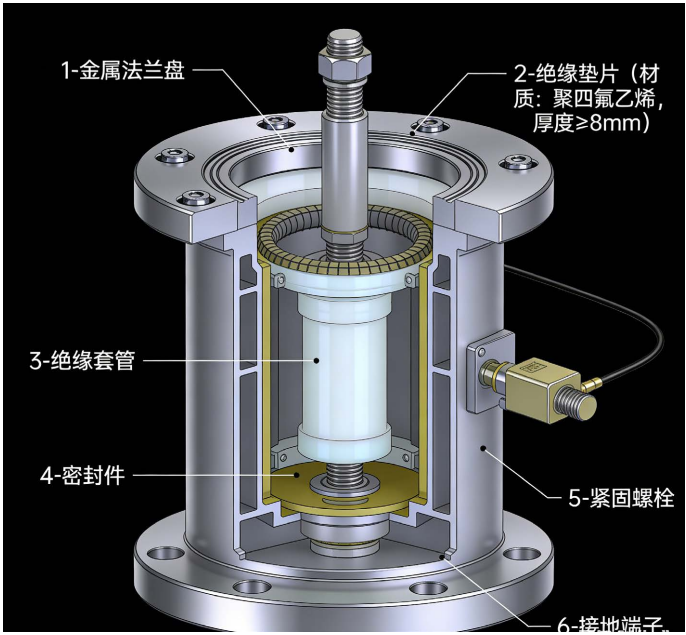
[3] Minneapolis, C., Richard, T. and David, S. (2018) Stray Current Corrosion Control in Marine Terminals. *Corrosion Science*, **135**, 210-223.

[4] 李建国, 王强. 船岸杂散电流等效电路建模与仿真分析[J]. 中国航海, 2023, 46(2): 78-83.

[5] International Maritime Organization (2019) Guidelines for the Prevention of Fire and Explosion in Oil Terminals. IMO Publishing.

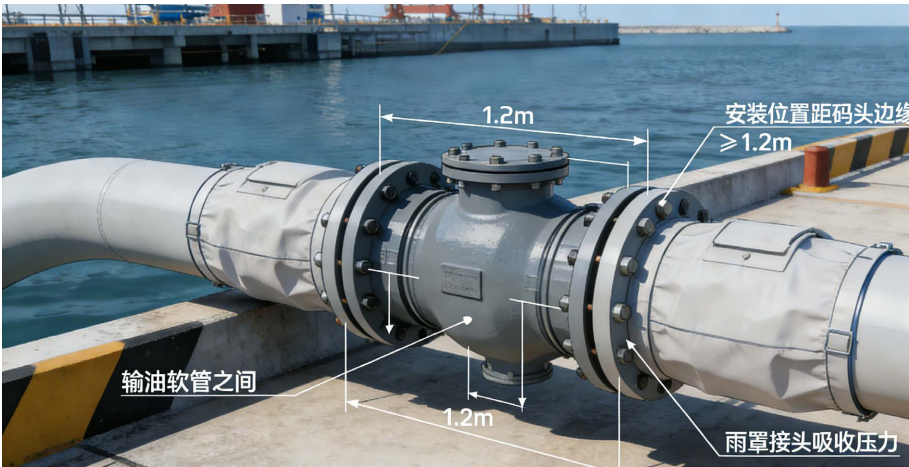
- [6] 张良. 油品码头船岸电气连接方式[J]. 水上消防, 2016(4): 28-30.
- [7] 郑家俊. 油船静电问题分析[J]. 中国修船, 2021, 34(S1): 48-50.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. JT 2019-90 油船作业安全技术要求[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [9] European Committee for Standardization (2017) EN 14746: Petroleum and Natural Gas Industries—Pipeline Transportation Systems. CEN.
- [10] Wang, Y., Li, J. and Zhang, H. (2022) Experimental Study on Insulating Flange Performance in Ship-Shore Electrical Isolation. *Journal of Hazardous Materials*, **425**, Article ID: 127986.
- [11] Zhang, L., Chen, W. and Liu, X. (2021) Field Measurement and Analysis of Stray Current in Hazardous Chemical Terminals. *Process Safety Progress*, **40**, e12389.
- [12] 顾长明, 周裕中, 杜永凤. 油气化工码头船岸电气连接防护[J]. 广东化工, 2020, 47(5): 122-123.
- [13] American Petroleum Institute (2020) API RP 2003: Protection against Ignitions Arising out of Static, Lightning, and Stray Currents. API.

附录：绝缘法兰结构与安装示意图



注：1——金属法兰盘；2——绝缘垫片(材质：聚四氟乙烯，厚度 $\geq 8\text{ mm}$ )；3——绝缘套管；4——密封件；5——紧固螺栓；6——接地端子。

Figure A1. Structural drawing of insulating flange section  
图 A1. 绝缘法兰剖面结构图



注：绝缘法兰串联于岸端管线与输油软管之间，安装位置距码头边缘 $\geq 1.2\text{ m}$ ，法兰两端设置柔性接头吸收应力，防雨罩覆盖范围需完全包裹法兰本体及连接部位。

Figure A2. Schematic diagram of correct installation of insulating flange  
图 A2. 绝缘法兰正确安装示意图