

液舱透气管路防冻伴热系统方案研究

尹海波¹, 邵朱芸², 吴子丞², 柏逸超²

¹招商局重工有限公司, 江苏 南通

²上海海事大学, 上海

收稿日期: 2022年10月27日; 录用日期: 2022年12月7日; 发布日期: 2022年12月14日

摘要

压载水舱的透气管一般设计在舱外, 而在极地邮轮航行的过程中, 海水不免会飞溅到甲板上, 又因为温度低, 易在舱外透气管的管口处结冰, 导致气体无法排放, 从而使压载水舱的气压过大, 产生爆炸的风险。所以针对液舱透气管路防冻制定合理的系统方案就显得尤为重要。本文针对极地邮轮液舱透气管路的防冻伴热系统展开研究。结合极地环境对海浪飞沫积冰生成的条件进行计算分析, 帮助透气管路系统在布置设计避开容易积冰的部位。根据行业规范对液舱透气管路电伴热系统设计展开研究, 针对电伴热系统分类和选型以及后期的安装和日常维护进行分析, 确定适合极地邮轮上透气管路的防冻伴热系统的方案。

关键词

极地邮轮, 透气管路防冻设计, 电伴热系统

Study of Anti-Freeze Tracing System for Liquid Tank Ventilation Lines

Haibo Yin¹, Zhu Yun Shao², Zicheng Wu², Yichao Bai²

¹China Merchants Industry Holdings Co., Ltd., Nantong Jiangsu

²Shanghai Maritime University, Shanghai

Received: Oct. 27th, 2022; accepted: Dec. 7th, 2022; published: Dec. 14th, 2022

Abstract

Ballast water tanks are generally designed outside the tank, and in the process of polar cruise, seawater will inevitably splash onto the deck, and because of the low temperature, it is easy to freeze at the mouth of the tank vent pipe outside the tank, resulting in gas cannot be discharged, thus making the ballast water tank air pressure is too large, resulting in the risk of explosion.

文章引用: 尹海波, 邵朱芸, 吴子丞, 柏逸超. 液舱透气管路防冻伴热系统方案研究[J]. 机械工程技术, 2022, 11(6): 613-620. DOI: 10.12677/met.2022.116071

Therefore, it is especially important to develop a reasonable system plan for the anti-freezing of the liquid tank vent line. In this paper, we study the anti-freezing tracing system of liquid tank vent pipe for polar cruise ships. The calculation and analysis of the conditions of wave foam ice generation are combined with the polar environment to help the design of the vent pipe system to avoid the parts prone to ice accumulation. According to the industry standard, the design of electric heat tracing system for liquid tank air vent pipe is studied, and the classification and selection of electric heat tracing system as well as the later installation and daily maintenance are analyzed, and the plan of anti-freezing heat tracing system for air vent pipe on polar cruise ships is determined.

Keywords

Polar Cruise, Anti-Freeze Design for Breathable Pipes, Electric Tracing System

Copyright © 2022 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

管路系统在寒冷环境下由于内部气体和大气的传热会导致热量丧失,为防止管路系统冻结造成隐患,必须对其进行防冻设计[1],从而使邮轮在恶劣的天气条件下也能够正常地航行,为航运的稳定性提供了保证[2]。由于极地邮轮航行环境的特殊性,对其上的防冻系统提出了更高的要求,因此要结合其航行的实际环境详细分析管路的防冻需求,选择合理的设计方案。

本文针对极地邮轮液舱透气管的防冻伴热系统展开研究。首先根据极地环境情况,结合邮轮航行时浪花的飞溅状况,研究海浪飞沫积冰生成的条件并对其进行计算分析,得出其生成的条件,从而对其进行有效的预测,有利于在透气管路的布置设计阶段避开容易积冰的部位。选择电伴热的方式进行透气管的保护,然后根据冰级定义以及船级社相关的规范作为标准对液舱透气管路电伴热系统设计展开研究,针对电伴热系统分类和选型以及后期的安装和日常维护进行分析,最后确定适合极地邮轮上透气管路的防冻伴热系统的方案。

2. 海浪飞沫积冰对露天管路的影响

2.1. 海浪飞沫积冰的条件

船舶上层建筑积冰主要由低温海浪飞沫、雾与冻雨、下雪等三种因素引起,其中海浪飞沫造成积冰的概率最大,其概率为 96.2% [3]。船舶上层建筑积冰的外界因素有:气温、风速及表面海水温度。在强冷空气的作用下,气温低于零下 10℃,表面海水温度在 0℃左右,在这样的环境下,海上航行的船舶有严重积冰的危险。

2.2. 海浪飞沫量的计算

在风浪和船舶自身航行作用下,海浪抨击船舶产生的波浪飞沫,最终会落在船舶上层建筑上。在气温较低且伴随着较大风速的情况下,海浪飞沫更加容易在短时间内失去大量热量而结冰[3],积冰且随着船舶与海浪之间的抨击运动的不断积累。飞沫的垂直质量分布可通过经验公式计算得到,飞沫运动轨迹及其冷却过程的计算,需要考虑风和船舶自身航行的影响,因此才可进一步确定积冰质量分布,海浪飞

沫生成时的垂直质量分布[4]:

$$M = \omega \cdot U_r \cdot P_s \cdot N \quad (1)$$

式中:

M ——海浪飞沫生成时的垂直质量分布($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$);

ω ——海上飞沫垂直质量密度分布(kg/m^3);

U_r ——船舶的相对风速(m/s);

P_s ——上浪持续时间(s);

N ——每分钟上浪次数(min^{-1})。

1) 海浪飞沫质量密度分布

飞沫垂直质量密度分布是表示距船舶箱部甲板平面不同高度的飞沫垂直质量密度分布,与波浪高度、船舶——波浪相对速度、船体某处距船舶甲板平面高度有关,其取值为:

$$\omega = 6.1457 \times 10^{-5} H_s V_{sw}^2 \exp(-0.55z) \quad (2)$$

式中:

H_s ——有效波高 $H_{1/3}$ (m);

Z ——飞沫距离船舶甲板平面的高度(m);

V_{sw} ——波浪与船舶的相对速度(m/s),其取值如式(3)所示。

$$V_{sw} = 1.56T_s + 0.514V_s \cos(\pi - \alpha) \quad (3)$$

式中:

T_s ——有效波周期(s);

V_s ——船速(m/s);

α ——船首向与波浪向的夹角(迎浪是 180° , 顺浪是 0°)。

产生飞沫的阈值 x , 如果 $x < 0$, 则不会产生飞沫上浪。 x 的取值为:

$$x = 2.0H_s + 0.04V_{sw}^2 - 10.0 > 0 \quad (4)$$

飞沫所到达的最大高度:

$$H_m = H_s + \frac{V_{sw}^2}{2g} \quad (5)$$

2) 船舶相对风速

船舶的相对风速 U_s (m/s)与真风速度、船速、风向航向之间的夹角有关,其表达式为式(6),

$$U_r = V_s + U \cos(\pi - \alpha) \quad (6)$$

式中:

V_s ——船速(Kn);

U ——风速(s);

α ——船首向与风向的夹角($^\circ$)。

3) 海浪飞沫持续时间

海浪飞沫持续时间表示每次海浪飞沫作用在某处的持续时间,与船舶——波浪相对速度、波浪高度、风速有关,其取值为

$$P_s = \frac{10V_{sw}H_s}{U_2} \quad (7)$$

式中:

V_{sw} 、 H_s 分别见式(3)以及式(11);

U ——10 米高空风速(m/s)。

4) 海浪飞沫上浪频率

并不是每次船舶一波浪之间的遭遇都会产生飞沫, 因此须观察每分钟的平均飞沫上浪的次数如式(8)所示:

$$N = 15.78 - 18.04 \exp(-4.26/P_w) \quad (8)$$

式中:

P_w ——船舶波浪之间的遭遇周期, 其取值如下式:

T_s 、 V_{sw} 如式(10)及式(3)。

$$P_s = \frac{1.56T_s^2}{V_{sw}} \quad (9)$$

5) 有效波周期、有效波高

在式(2)、(3)、(4)、(5)、(7)及式(9)中, 相关计算与船舶所在海域的有效波周期 T_s 、有效波高 H_s 有关, 而在风速较大时, 渤海、黄海北部海域的风浪由于风区和水深的限制得不到充分发展。因此, 在计算有效波周期 T_s 、有效波高 H_s 时, 采用海港水文规范公式到[5]:

$$\frac{gT_s}{U} = 0.55 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.233} \tanh^{2/3} \left\{ 30.0 \frac{\left(\frac{gd}{U^2} \right)^{0.8}}{\left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.35}} \right\} \quad (10)$$

$$\frac{gH_s}{U^2} = 5.5 \times 10^{-3} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.35} \tanh^{2/3} \left\{ 30.0 \frac{\left(\frac{gd}{U^2} \right)^{0.8}}{\left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.35}} \right\} \quad (11)$$

式中:

F ——船舶所在海区的风区长度(m);

U ——10 m 高空中的风速(m/s);

d ——平均水深(m);

g ——重力加速度(m/s²)。

3. 液舱透气管路电伴热系统设计

3.1. 电伴热系统选型

电伴热带选型主要考虑以下因素: 环境温度, 包括最高环境温度和最低环境温度; 被伴热物体所需要的维持温度; 保温材料和保温层厚度; 热传导系数; 管路材质、长度以及管路阀门附件数量。另外还要考虑电伴热管路的实际铺设环境, 包括是在室内还是室外, 室外的多大风速, 是否安装在防爆区域, 安装场所是否有腐蚀性气(液)体。极地邮轮的管线特点是: 走向复杂, 管线上阀门、附件数量多, 弯路较

多。如果选择使用恒功率型伴热带,可能会造成伴热带交叉处局部温度过热,而且会有大量材料浪费。而采用自动调温型电热带,在现场电伴热线可以任意切割,不影响电伴热线每米的发热功率。因此,选用的电伴热带类型是自动调温型电热带。电伴热系统选型的原则是,所选择的电伴热带产生的热量能够补偿被伴热物体维持特定温度的热损失。

一套完整的电伴热系统通常包括以下组件:1) 伴热电缆(自调节,限功率,并口恒功率或串联恒功率);2) 电源连接套件;3) RTD 传感器或控制恒温器;4) 井下/T 型接头套件(允许将两根或三根电缆拼接在一起);5) 电缆端接;6) 胶带(间隔为 12 英寸,或按规范或规范要求使用);7) “电伴热”标签(剥皮和粘贴的标签以 10 个间隔或按规范或规范的要求粘贴到隔热蒸汽屏障上);8) 隔热和防潮层(由其他的厂商提供)。极地邮轮液舱管路电伴热系统结构布置如图 1 所示。



① 伴热电缆; ② 电源连接套件; ③ RTD 传感器或控制恒温器; ④ 井下/T 型接头套件; ⑤ 电缆端接; ⑥ 胶带; ⑦ “电伴热”标签; ⑧ 隔热和防潮层

Figure 1. Structure of the electric heating system for the liquid tank of a polar cruise ship

图 1. 极地邮轮液舱管路电伴热系统结构图

3.2. 电热带功率及长度计算

1) 管路电热带功率计算

电热带产生的热量要大于被伴热管路的热量损失,要计算电热带的功率,就要首先计算管路散热量(W/m)。管路的散热量包括管线的散热量和阀门、法兰等的散热量之和。

管线散热计算公式如下:

$$Q_B = \frac{2\pi \times \lambda (t_w - t_A)}{\ln \frac{d+2\delta}{d}} \times E \quad (12)$$

式中:

Q_B ——管路热量损失(W/m);

λ ——管路隔热材料导热系数(W/m·°C);

t_w ——持续温度(°C);

t_A ——最低环境温度(°C);

d ——管路外径(mm);

δ ——保温层厚度(mm);

E ——热损计算系数(自动调温型电热带取 1.28, 恒功率型电热带取 1.36)。

2) 阀门散热量计算

阀门的散热量计算因阀门的结构形式不同而不同, 闸阀散热量为相关联的直线管线的单位长度散热量的 1.22 倍, 散热量计算公式如下:

$$Q_V = fQ_B \quad (13)$$

则管路总散热量: $Q_T = Q_B + Q_V$ 。

3) 应急通道、直升机甲板区域电伴热功率计算

与管路电伴热功率计算相同, 应急通道、电伴热带产生的功率要大于这部分的热损失。单位平面热损失 Q_p 计算方法如下:

$$Q_p = \frac{t_w - t_A}{\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\partial}} \times 1.3 \quad (14)$$

式中:

t_w ——持续温度(°C);

t_A ——最低环境温度(°C);

δ ——保温层厚度(mm);

∂ ——保温层外表向大气散热系数(W/m²·°C),

$\partial = 1.163 \times \left(6 + \frac{\omega}{2} \right)$, ω 为风速, 单位(m/s)。

λ ——管路隔热材料导热系数(W/m·°C)。

以上为理论计算结果, 按照规范 DNV Winterization Basic [6]要求, 露天甲板、通道、楼梯不小于 300 W/m²。根据以上计算得出的是管路单位长度散热量(W/m)及露天区域单位面积热损失(W/m²), 还需要根据环境, 电源及功率等, 计算伴热带总长度。

对于管线部分, 如果管路电伴热带的输出功率 Q_E 大于管路热量损失 Q_r , 则伴热带的长度等于管路长度; 如果 Q_n 小于 Q_r , 那么就需要增加伴热带的数量至两条或两条以上, 或沿管线缠绕敷设。通过上述的步骤, 可以计算出所需电伴热带的总长度, 以及电伴热系统所消耗的总功率。

3.3. 极地邮轮设计实例

基于上述研究, 将防冻伴热系统应用于实际极地邮轮设计中, 所设计的燃油预热转运系统的工作原理如图 2 所示。

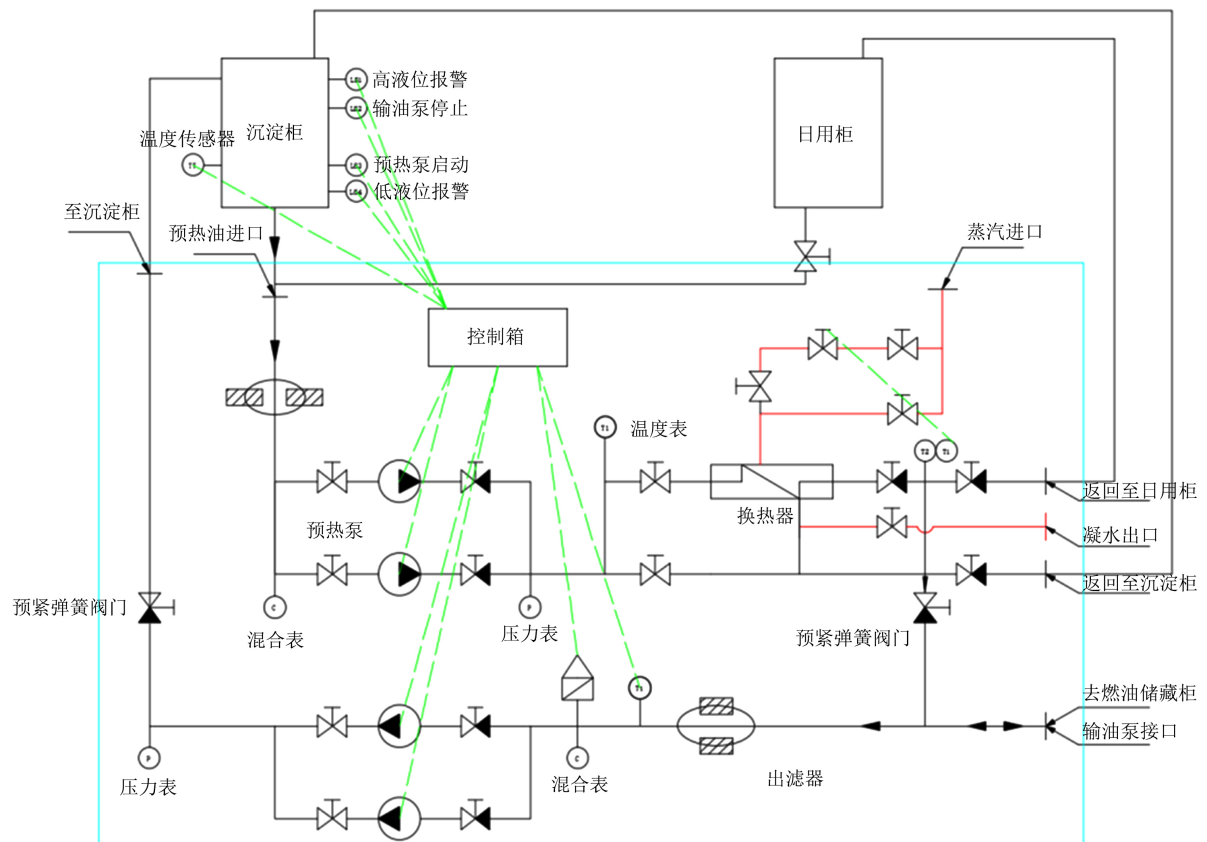


Figure 2. Diagram of fuel preheating transfer system

图 2. 燃油预热转运系统图

通过仿真模拟, 得到管径和管盘间距与最低温度的响应面相关数据, 分析得到, 三种因素对燃油区域的最低温度影响变化规律, 即间距越长, 总长度越大, 管径越小, 最低温度越小的变化规律, 如图 3 所示。

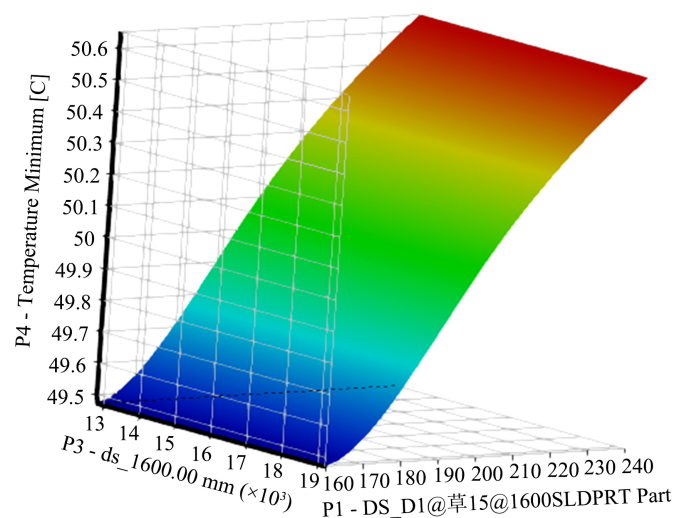


Figure 3. Response surface of pipe diameter and coil spacing to minimum temperature

图 3. 管径和盘管间距与最低温度的响应面

首艘国产极地探险邮轮——“格雷格·莫蒂默”号，假设海浪飞沫的直径为 1.75 mm，设计航路上海浪飞沫生成时的垂直质量分布取为 0.002，船舶相对风速 6 节，根据式 4 得到 x 的值为 $-0.56 < 0$ ，因此不会产生飞沫上浪。用海港水文规范公式[5]得到飞沫上增量与船速成正比，因此当船舶在逆风浪下减小船速时可明显减小飞沫上浪量，也证明了该计算数据的可靠性。

4. 结论

文章对于极地邮轮的液舱透气管路防冻伴热系统方案进行研究，首先分析海浪飞沫积冰生成的原因及其对露天管路的影响。其次，从电伴热系统的分类及选型、功率和安装及日常维护三个角度进行液舱透气管路电伴热系统的设计。将所研究理论应用于实际极地邮轮中，并设计出设计原理图，通过仿真模拟得出燃油区域的最低温度影响变化规律。为研究极地邮轮航行过程中飞浪积冰的过程及条件，设计合理的方案解决飞浪的积冰的过程，在透气管处设计布置电热伴等方案，提供了一定的参考意见。

参考文献

- [1] 刘治国, 周浩, 王树海. 机车空气管路系统防冻设计[J]. 机械管理开发, 2011(2): 55-56+58.
- [2] 杨艳. 北海半潜式钻井平台防冻除冰技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [3] 邹忠胜. 海浪飞沫积冰生成及其对船舶的影响[J]. 武汉船舶职业技术学院学报, 2011, 10(2): 37-40.
- [4] Zakrzewski, W.P. (1986) Icing of Ships (NOAA Data Report ERL PMEL). Pacific Marine Environmental Laboratory, Seattle, 35-54.
- [5] 中华人民共和国交通部第一航务工程勘察设计院. 海港水文规范 JTJ213-98 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [6] DNV (2021) DNV-OS-A201. DNV, Oslo.