

Physical Design and Qualitative Analysis of Exhaust Treatment System for AIP Submarine

Runkai Zhu, Qianchao Liang, Haiyang Zhan

College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei
Email: potato_zrk@163.com, lqc163cc@163.com, zhy1992@163.com

Received: Dec. 22nd, 2017; accepted: Jan. 22nd, 2018; published: Jan. 29th, 2018

Abstract

For AIP submarine, exhaust treatment system is particularly important. This article discussed an exhaust treatment system consisting of water management system, water cooling tower and rotating bed absorber, then analyzed qualitatively the influence of independent variables on the performance of the model. The study found that making rotating bed absorber near a certain working condition and increasing the initial pressure of exhaust could effectively reduce the amount of sea water and reduce system power consumption.

Keywords

AIP Submarine, Exhaust Treatment System, Water Management System, Water Cooling Tower, Rotating Bed Absorber

AIP潜艇的尾气处理系统结构设计及定性分析

朱润凯, 梁前超, 詹海洋

海军工程大学动力工程学院, 湖北 武汉
Email: potato_zrk@163.com, lqc163cc@163.com, zhy1992@163.com

收稿日期: 2017年12月22日; 录用日期: 2018年1月22日; 发布日期: 2018年1月29日

摘要

对于AIP潜艇, 尾气处理系统尤为重要, 本文论述了由喷淋冷却器、旋转床吸收器和水管理系统三部分组成的尾气处理系统, 定性分析自变量对装置性能的影响。研究发现, 旋转床转速在某一工况附近, 相应提高尾气的初始压力, 可以有效减少海水的使用量, 降低系统的功耗。

关键词

AIP潜艇, 尾气处理系统, 水管理系统, 喷淋冷却器, 旋转床吸收器

Copyright © 2018 by authors 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

对于 AIP 装置潜艇, 在水下以 7.5 节的速度航行, 若把尾气直接排放舷外, 海水中会产生 340 m 左右长度的气泡带, 留下航迹和化学信号, 隐蔽性则荡然无存[1]; 另一方面, 受海水背压的制约, 尾气排放对发动机的性能效率会有影响[2]。所以, 尾气处理系统(exhaust treatment system, ETS)尤为重要。在各种设计中, 海水吸收法最有潜力, 如图 1, 由喷淋冷却器(water cooling tower, WCT)、旋转床吸收器(rotating bed absorber, RBA)和水管理系统(water management system, WMS)三部分组成。

当系统运行时, 主要是尾气和海水的交换流动。海水首先由水管理系统进入, 分两部分流入喷淋冷却器和超重力旋转床, 最后海水汇集经水处理系统排至舷外。考虑到溶解度受温度影响, 尾气首先在喷淋冷却器中降温到 $80^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$, 与间壁式冷却方式相比, 这样具有冷却效率高、体积小的优势; 然后气体进入超重力场旋转床吸收器, 溶于海水, 其效率高, 体积小, 适于在晃动的潜艇平台上使用[3]; 最后, 溶有 CO_2 的海水进入水管理系统, 在耐压泵的作用下排出潜艇。

尾气处理系统的功率占 AIP 装置有效输出功率的比例较小, 没有明显的气泡尾迹和外温度场变化, 隐蔽性能优良, 而且不受海水深度的影响。尾气中的 CO_2 被吸收后, 不溶于海水的 N_2 和 O_2 则返回系统参与再循环, 以降低潜艇负载, 增大续航力。

2. 结构分析

2.1. 水管理系统

如图 2, 英国 Carlton 公司的水处理系统主要包括由两个活塞 1、2 和两个转换阀 1、2 以及由两个水泵 A、B 组成的动力源装置[4] [5]。在左方状态中, 转换阀 1、2 的位置正好使活塞 1 的进出口与舷外新鲜海水相通, 而活塞 2 与 CO_2 吸收器相通。水泵 B 将艇外海水泵入活塞 1 的下方, 推动活塞将上方溶有 CO_2 的海水排出舷外; 同时, 活塞 2 在水泵 A 的作用下, 将吸收器中溶有 CO_2 的海水泵入活塞 2 的上方, 活塞向下移动, 将转换阀 2 中的新鲜海水送入吸收器。当活塞 1 运动到最高端, 而活塞 2 运动到最低端时, 转换阀 1、2 同时切换, 将管路切换到右方状态。转换阀 1、2 的位置正好使活塞 1 的进出口与

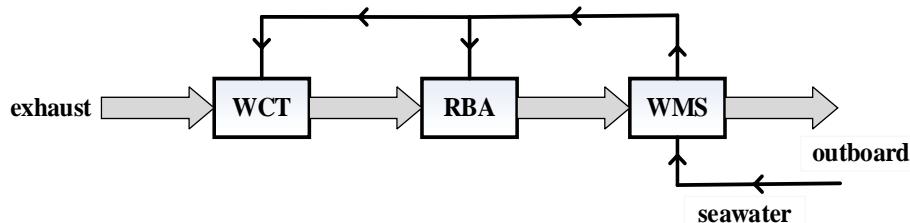


Figure 1. Structure schematic of the exhaust treatment system

图 1. 尾气处理系统结构示意图

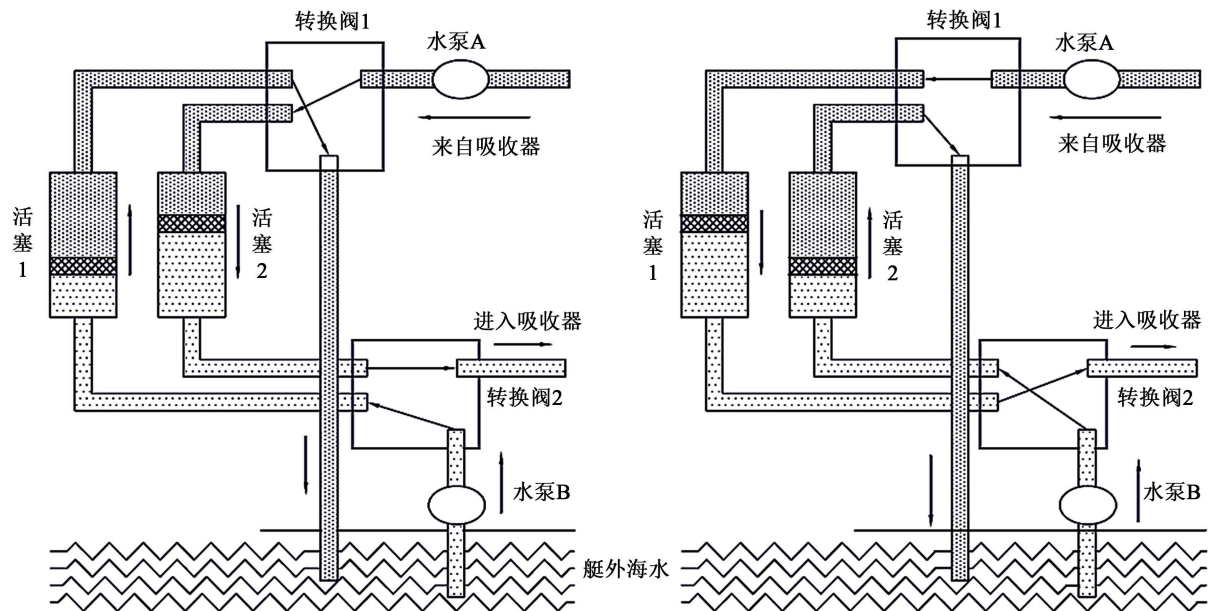


Figure 2. Fundamental diagram of the water management system
图 2. 水处理系统工作原理图

吸收器相通，而活塞 2 与舷外海水相通。水泵 B 将舷外海水泵入活塞 2 的下方，推动活塞将上方溶有 CO_2 的海水排出舷外；同时，活塞 1 在水泵 A 的作用下，将吸收器中溶有 CO_2 的海水泵入活塞 1 的上方，活塞向下运动，将新鲜海水送入吸收器。当活塞 2 运动到最高端，且活塞 1 同时运动到最低端时，转换阀 1、2 同时切换，将管路又切换回左方状态。如此循环，实现了艇外新鲜海水不断被送入吸收器，而吸收器中溶有 CO_2 的海水不断被排出舷外。

由 WMS 的工作原理可知，主要有以下三个优点：

- 1) 无论系统管路处于哪个状态，活塞两端的海水压力差很小，若实现水管理系统的运行，只需以较小的功耗克服活塞机构的磨擦和管路的阻力，即水泵 A、B 的做功足够使海水自由交换；
- 2) 整个水管理系统在海水中可以看作出于同一深度，无论下潜多深，水泵排水消耗的能量基本相差不大，即系统工作不受海水深度的影响；
- 3) 潜艇外部水压不会影响内部回路的低水压，因而海水由水管理系统进入后，可以转化为内部回路的低压海水，在艇内使用。

2.2. 喷淋冷却器

喷淋冷却器是尾气进入处理系统的第一站，海水与尾气直接接触，利用汽化潜热，实现对尾气的降温，同时降低排气噪声，增强潜艇隐身性能。

直接接触的喷淋冷却器有很多种，按有无填料可以分为有填料喷淋冷却器和无填料喷淋冷却器；按气液流向可以分为并流式喷淋冷却器、逆流式喷淋冷却器和错流式喷淋冷却器。

传统的冷却器大多采用填料式，填料容易老化、堵塞，从而导致降温不均匀，影响设备的性能和寿命。相对而言，无填料的冷却器有很多优势。采用低压高效的雾化装置，以先进的分散理论代替传统的成膜理论，增大接触面积，降低压损，能够迅速以汽化潜热带走热量，同时结构简单，可靠性较高，运行经济。

因此，在艇内最适合采用错流式无填料喷淋冷却器，优化喷水管设计，使水气直接接触换热[6]。在

尾气温度较高处设计多圈环状喷嘴，海水由喷嘴喷出时被雾化，比表面积较大，以便在高温尾气中迅速吸收大量热量，使尾气降温。

2.3. 旋转床吸收器

旋转床吸收器，即超重力旋转床，如图3所示，主要包括外壳、转子、转轴和电机。在这些器件中，最核心部分是转子，大多由多孔填料构成，通过转轴与电机连接，以每分钟成百上千转的速度旋转，实现气液的充分接触[7]。

超重力旋转床的样式很多，主要在于转子不同，按转子结构形式来说，可以分为填料式旋转床、碟片式旋转床、螺旋式旋转床和折流式旋转床。

其中，艇内适合采用折流式旋转床，结构简单，可靠性高，气液融合时间得到了延长，效率更高。同时，其液相进料灵活，可以多股中间进料，大大提高了理论板数，使尾气处理更加可靠，保证了潜艇的安全性。

3. 系统定性分析

对于尾气系统来说，影响其性能的参数主要有尾气性质参数和装置运行参数，主要表现参数为流经尾气处理系统的海水流量和系统功耗。

3.1. 旋转床吸收器转速变化的影响

旋转床吸收器的转速与其性能紧密相关。

当转速增加时，喷淋冷却器需要的海水流量不变，旋转床吸收器需要的海水流量逐渐减少，并且远远大于喷淋海水流量，系统总流量也就减少。这是因为，转速增大时，动圈的离心力增大，气液交换更加充分，性能显著提高，所需海水流量大大减少。

随着转速的增大，为了保持产生足够的离心力，旋转床吸收器的功耗逐渐增大，但由于海水流量逐渐减小，所以水管理系统的功耗减小。两者功耗此增彼减，总体来说，尾气处理系统的总功耗先减小后增大，在某一转速附近时，功耗最小，所以将旋转床吸收器的转速设定在这个范围区间最有利。

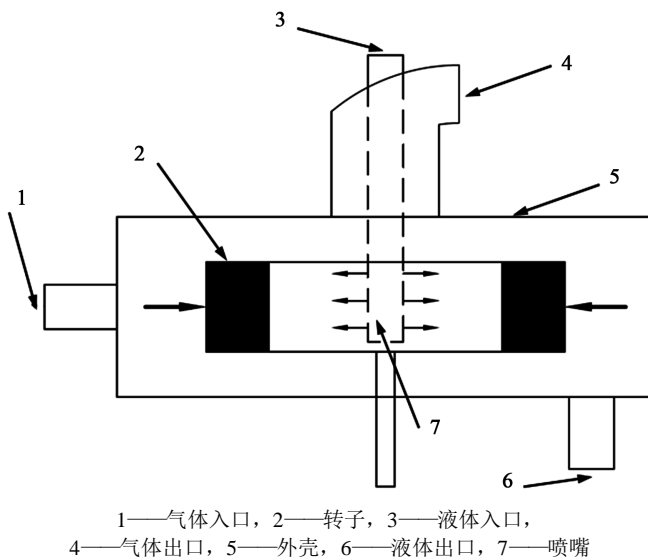


Figure 3. Structure chart of rotating bed absorber

图3. 旋转床吸收器结构图

3.2. CO₂ 流量变化的影响

尾气处理系统有两个功能,一方面是为了吸收尾气中的 CO₂,另一方面是为了使尾气降温,减小红外辐射,以增强潜艇的隐蔽性,CO₂的流量变化与系统性能的变化关系是一个重要的研究方向。

高温尾气的能量相对于水的汽化潜热而言微不足道;后者变化很大,随着尾气中 CO₂ 流量的变大,为了充分吸收,所需海水流量也快速增加。随 CO₂ 流量的增加,旋转床吸收器的功耗也升高,因为所需海水流量变大,水管理系统的工作量变大,功耗上升,尾气处理系统的总耗能也相应增加。

3.3. 尾气初始温度变化的影响

尾气在喷淋冷却器中被降温,改变初始温度只是对喷淋冷却器产生了影响。随着温度的上升,气液交换的能量增大,喷淋冷却器所需的海水增多,而旋转床吸收器所需的海水流量不变。前者的流量相对后者而言,可以忽略不计,所以总的海水流量,即通过水管理系统的海水流量几乎不变。

耗能方面的变化情况,和海水流量方面一样。旋转床吸收器的功耗不变,因为总的海水流量几乎不变,所以水管理系统的功耗也几乎不变,尾气处理系统总耗能的变化情况可以忽略不计。

3.4. 尾气初始压力变化的影响

尾气的压力变化,即 CO₂ 分压变化,会引起海水中的溶解度发生变化,从而旋转床吸收器所需的海水流量发生改变。随着尾气压力的升高,喷淋冷却器所需的海水流量不变,而流经旋转床吸收器和水管理系统的海水减少。

随着压力的上升,因流经两者的海水流量都减小,所以功耗也相应减小,尾气处理系统的总功耗也减小。

4. 结论

对于 AIP 潜艇而言,都存在着共同问题——如何排放尾气,除了对隐蔽性的考虑,另一方面,受海水背压的制约,尾气排放对发动机的性能效率会有影响,所以尾气处理系统尤为重要,须专门设计。

本文介绍了潜用尾气处理系统的结构,并简单做了定性分析,当发动机工况一定,即尾气流量一定时,使旋转床转速在某一工况范围,且相应提高尾气的初始压力,可以有效减少海水的使用量,使尾气处理系统的功耗最低。

资助信息

国防科技创新特区项目(17-163-13-ZT-008-033-01);湖北省协同创新基金项目(HX2015B1003)。

参考文献 (References)

- [1] Wang, J.W., Lao, X.S. and Wang, D. (2014) Dynamic Performance Study of Submarine Diesel Exhaust and Screw Compressor Low Pressure Deballast System. *Ship Science & Technology*, February 2014.
- [2] 朱润凯,梁前超,闫东,等. 固体氧化物燃料电池与微型燃气轮机联合发电建模仿真研究[J]. 舰船科学技术, 2017(7): 95-99.
- [3] 贺国,陈国钧. CCDAIP 循环气体处理技术研究[J]. 海军工程学院学报, 1998, 85(4): 82-86.
- [4] Fowler, A. (1990) Closed Cycle Diesel Propulsion Systems. *Institute of Marine Engineers Transactions*, **102**, 129.
- [5] 郭朝有,贺国,陈国钧,等. AIP 水管理系统实现技术研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2003, 32(4): 15-18.
- [6] 贺国,赵建华,陈国钧,等. 闭式循环柴油机排出气体喷淋冷却传热模型及实验关联研究[J]. 内燃机工程, 2003, 24(1): 75-80.
- [7] 谢冠伦. 新型结构旋转床吸收混合气中二氧化碳的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2010.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2325-677X，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，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：dsc@hanspub.org