

船用复合型空气灭菌净化装置 结构设计及性能

常烜宇¹, 张俊杰¹, 王清树², 王丹英³

(1. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011; 2. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏苏州 215009; 3. 苏州必世洁机电有限公司, 江苏苏州 215000)

摘要: [目的]为了将等离子消杀技术应用于船舶领域, 解决复合型空气灭菌装置对颗粒物的有效捕集和微生物的高效灭杀。[方法]当电压稳定在 6.6 kV 以上、面风速控制在 2.0 m/s 时, 对装置样机进行结构设计优化, 并开展性能测试。[结果]结果显示, 该装置对粒径大于 0.3 μm 颗粒物的一次通过净化效率为 94.3%, 微生物一次通过灭菌效率为 97.6%, 臭氧尾气体积分数满足相关健康标准要求。此外, 装置在船用环境适应性及电磁兼容性测试中均符合相关规定。[结论]试验结果为等离子空气灭菌净化装置的设计与优化提供了技术参考, 并为后续船用应用提供了数据支撑。

关键词: 复合型装置; 等离子净化; 空气灭菌

中图分类号: TU834.8 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2026.05.09

Structural Design and Performance Study of Naval Compound Air Sterilization and Purification Device

CHANG Xuanyu¹, ZHANG Junjie¹, WANG Qingshu², WANG Danying³

(1. Marine Design&Research Institute of China, Shanghai 200011, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China; 3. Suzhou Beclean Electrical Co., Ltd., Suzhou 215000, Jiangsu, China)

Abstract: [Purpose] In order to apply the plasma purification and sterilization technology to the field of ships and solve the problem of effective capture of particles and efficient killing of microorganisms by the composite air sterilization device. [Purpose] The structural design is optimized and performance tests are conducted under a voltage above 6.6 kV and a face velocity of 2.0 m/s. [Result] The results show that the purification efficiency of particles above 0.3 μm is 94.3%, the sterilization efficiency of microorganisms is 97.6%, and the concentration of ozone meets the requirements of health standards. At the same time, the marine environment and electromagnetic compatibility are tested, and all complies with health standards. [Conclusion] The conclusion obtained from the tests can provide technical reference and data support for the design, optimization and naval application of the compound devices.

Key words: compound device; plasma purification; air sterilization

0 引言

随着工业与科技的发展, 人们在生产和生活中面临的健康风险正在逐渐增加, 甲流、新冠肺炎和支原体等多种致病病原体频繁流行。同时, 船舶舱室内环境的绿色环保性能受到广泛关注^[1]。在此背景

下, 公众对空气污染的关注和认知显著增强: 1) 低碳减排、绿色生活理念得以大力推广; 2) 空气污染治理是一项长期而艰巨的任务。室内空气质量与人们的身体健康息息相关, 空气灭菌净化技术越来越受到公众的关注。室内空气污染物主要包括固态颗

收稿日期: 2025-07-28; 修回日期: 2025-11-18

作者简介: 常烜宇 (1991—), 女, 硕士、高级工程师。研究方向: 船舶舱室大气环境控制系统设计。

颗粒物、以甲醛和总挥发性有机物 (Total Volatile Organic Compounds, TVOC) 为主的气态污染物及病毒微生物。去除不同类型的空气污染物, 需要发展复合型净化技术。其中, 静电净化、等离子及冷触媒的复合型净化装置能有效解决低体积分数的室内污染问题。尤其是在大型船舶等密闭空间中, 舱内空气质量问题更为突出, 亟须开发适合船用的复合型净化装置进行灭菌消毒与空气净化^[2-4]。近年来, 随着大型船舶交叉疾病感染风险增加, 防疫需求日益迫切^[5]。

等离子净化技术通过采用电晕线放电电离空气形成等离子体, 使空气中的固态颗粒物荷电后进入电场发生偏转而被捕集, 这种净化方式对粒径大于 0.3 μm 的颗粒物效果明显。等离子催化灭菌通过高压放电产生加速的电子, 与空气分子碰撞形成离子、自由基等多种活性物质, 对病毒等微生物具有灭活作用, 且可使粒径小于 0.3 μm 的细小颗粒凝聚沉降。目前, 等离子空气灭菌净化装置的研究主要围绕效率和荷电方式展开。紊流效率模型以多伊奇理论为代表, 还包括 COOPERMAN^[6]、LEONARD 等^[7] 和紊流掺混等理论^[8-10] 及数值仿真计算^[11]; 荷电模型研究集中在驱进速度, 包括影响因素分析^[12], 电极、板长、间距等结构参数优化试验^[13-14], 以及电压、风速等运行参数调试^[15-16]。灭菌方面的研究主要集中在灭菌效果的提高及影响因素分析^[17-19]。针对船舶空间密闭、人员密集且长期处于高湿度、高盐雾腐蚀环境及频繁振动的工况, 对空气净化装置的材料稳定性和长期可靠性提出了比陆地环境更严苛的要求。本文旨在通过优化结构设计并进行相应的性能测试, 探索船用等离子净化技术, 以期为后续应用提供数据支撑和技术参考。

1 空气灭菌净化技术

1.1 等离子净化技术机理

等离子净化技术机理包括电晕线高压放电电离空气形成等离子体, 固态颗粒物荷电后进入电场实现偏转净化, 以去除空气中的颗粒物和微生物, 同时兼具保护后端等离子催化段的作用。

1.1.1 电晕放电

固态颗粒物荷电需要高浓度离子, 而离子在空气中的寿命很短, 因此必须维持连续的电离过程。当施加高压直流电流时, 电晕线可产生大量同种电性的离子。在非匀强电场中, 空气中的辐射电子被加速, 通过撞击空气分子产生正离子和自由电子, 区域电离瞬间完成; 随后自由电子向外扩散, 形成等离子层。当电晕线处于正极时, 会中和大量自由电子, 使电离区剩余大量正离子。

1.1.2 荷电过程

通过电晕放电, 电晕线附近会积聚大量正离子。当空气中的颗粒物通过该区域时, 将获得电荷, 主要机理为扩散荷电和场强荷电。正离子的布朗运动会撞击粒径小于 0.15 μm 的颗粒物使其带电, 此为扩散荷电, 该机理与电场和颗粒物种类均无关。场强荷电则是相同电性的离子在电场力作用下, 对粒径大于 1.00 μm 的颗粒物荷电; 随着荷电增加, 颗粒物会排斥后续离子, 荷电量逐渐趋于饱和。扩散荷电和场强荷电通常联合作用, 颗粒物存在最大荷电量, 该荷电量与颗粒物表面积及场强成正比, 而荷电效率与粒径、场强大小无关, 仅取决于离子浓度。

1.1.3 集尘板工作原理

集尘板在施加高压电后形成匀强电场。荷电颗粒物在电场力作用下发生偏转, 脱离气流而被集尘板捕获。采用以库泊尔曼理论为基础的紊流掺混模型描述该过程: 带电颗粒物横向受扩散影响, 纵向受气流分布不均制约, 需综合考虑静电力、重力等因素的作用, 其模型表达式为

$$v \frac{\partial C}{\partial x} - E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \omega \frac{\partial C}{\partial y} - E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

求解式 (1) 并简化, 可得效率公式为

$$\eta = 1 - e^{-A\omega/Q} \quad (2)$$

式 (1) 和式 (2) 中: v 为气流速度, m/s ; C 为含尘体积分数, g/m^3 ; E_x 为纵向紊流掺混系数, m^2/s ; E_y 为横向紊流掺混系数, m^2/s ; η 为过滤效率; A 为集尘板面积, m^2 ; ω 为粉尘驱进速度, m/s ; Q 为气体流量, m^3/s 。

由 (2) 式可知, 增加集尘板厚度、减少风量能延长颗粒在电场中的驻留时间, 从而提高过滤效率; 增大颗粒荷电量和场强能提高粉尘驱进速度和过滤效率。

1.2 等离子灭菌机理

等离子灭菌具有两大优势: 1) 可在有人环境下实现连续消毒灭菌; 2) 其灭菌具有广谱性, 对多种微生物均有效。

等离子灭菌主要依靠等离子管, 空气在高压电场的作用下可电离为自由电子、离子、激发态分子、基态分子和电磁辐射等, 这些成分构成了等离子体, 其中部分成分具有较强的灭菌作用。然而, 在船舶高湿环境下, 等离子体的产生效率会受到抑制, 且易生成臭氧等副产物。

1.3 催化机理

研究表明, 设置等离子催化段能显著提高挥发性有机化合物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 和微生物的去除效率。如, 等离子协同 Ag/TiO_2 催化剂对苯的净化效率比普通情况提高约 4 倍, 在相同能量密度下对细菌的灭活选择性至少提高 20%。

等离子体对催化剂的影响机制较为复杂, 主要可归纳为热效应、紫外光效应、活性物质在催化剂表面的反应和催化剂变性等。热效应主要由催化剂表面富集亚稳态物质导致; 等离子体中存在紫外光降解效应; 等离子体中电子的平均能量远高于光催化剂的能带间隙, 因此会出现催化剂反应和变性的情况。臭氧分解后产生的具有强氧化能力的表面活性氧是催化作用的本质。不同贵金属在提高VOCs去除效率的同时还对细菌和病毒具有一定的灭活选择性, 如掺入微量Au的催化效果较优。

在复合型空气灭菌净化过程中, 高压放电产生的高能电子与空气中的分子发生碰撞, 形成不同类型的反应物质, 如离子和自由电子等, 等离子催化段可有效去除VOCs、颗粒物和微生物。小粒径离子和离子团在与空气中的杂质或气体碰撞的过程中发生反应, 使较小的细微颗粒凝聚成较大的气溶胶微粒, 从而更易被静电场捕获, 最终达到去除VOCs和病毒微生物、消除固态颗粒物和净化空气等目的。

2 复合型空气灭菌净化装置结构设计

2.1 结构设计原理图

复合型空气灭菌净化装置原理见图1, 其安装于通风系统排风末端, 对空气进行集中净化灭菌。

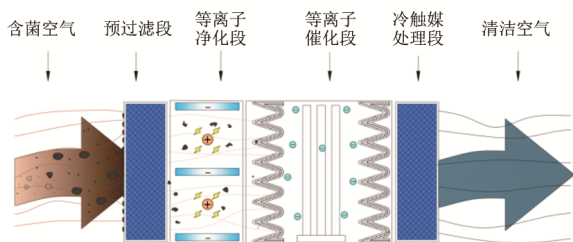


图1 复合型空气灭菌净化装置原理

Fig. 1 Schematic Diagram of Compound Air Sterilization and Purification Device

灭菌净化装置通常由预过滤段、等离子净化段、等离子催化段和冷触媒处理段等组成。其中, 核心功能单元包括等离子净化段和催化段; 预过滤段起保护作用; 冷触媒处理段用于将臭氧浓度控制在规范要求的安全范围内。

2.2 主要结构设计图

2.2.1 预过滤段

预过滤段主要用于滤除装置入口空气中的大粒径颗粒物, 减轻后段负荷, 保证装置绝缘性能和灭菌净化效率, 同时起到匀流作用。

2.2.2 等离子净化段

等离子净化段结构见图2。

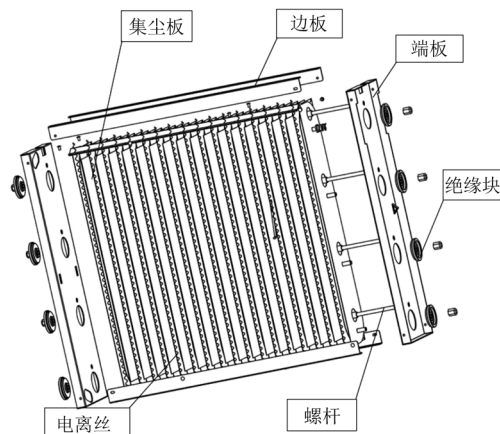


图2 等离子净化段结构图

Fig. 2 Structure Diagram of Plasma Purification Section

该段设有电离丝和集尘板, 其中电离丝采用星型多层次螺旋立体分布结构。通过施加7 kV高压形成非匀强电场, 可在较大空间范围内产生稳定等离子体, 同时有效抑制臭氧生成。绝缘部分采用阻燃聚四氟乙烯材料, 以提升装置的安全性。

2.2.3 等离子催化段

等离子催化段结构见图3。

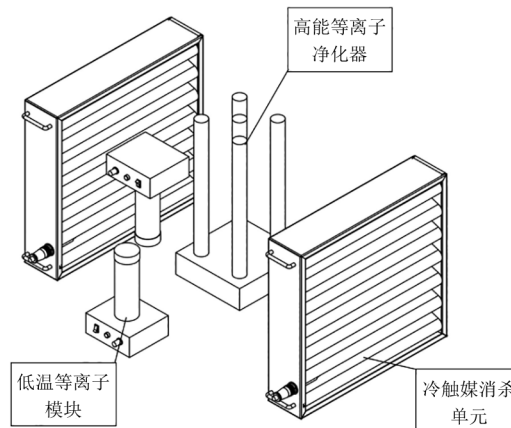


图3 等离子催化段结构图

Fig. 3 Structure Diagram of Plasma Catalytic Section

该段通过等离子管在高压电流作用下激发产生高能电子与离子, 并在催化材料协同作用下形成等离子, 从而破坏病毒及微生物的细胞结构, 实现高效灭菌。

2.2.4 冷触媒处理段

冷触媒处理段采用贵金属与金属氧化物复合催化剂, 在常温条件下催化分解装置运行时产生的臭氧。该段基材采用低阻力铝蜂窝结构, 可高效控制臭氧体积分数。

2.3 船用适应性参数设计

为满足船舱使用需求, 复合型空气灭菌净化装置在设计时充分考虑船用环境特点, 在结构参数设

计及优化中满足摇摆倾斜、高低温、高湿度、盐雾及振动等工况条件。

本文通过优化放电单元结构与电源参数，在保证杀菌效率的同时有效控制副产物的产生。针对冷触媒在盐雾环境中可能存在的失效风险，选用了具有抗毒化能力的催化剂配方，并设计防盐雾涂层保护。基于船舶环境特点，装置设计不仅从理论层面分析了高湿环境对等离子体体积分数的衰减规律，还探讨了紧凑空间内不同风道布置对净化效率的影响。

同时，综合考虑装置的可靠性、维修性、安全性与电磁兼容性等要求，通过选用符合标准的材料、

采用模块化设计、增强电路抗干扰能力等多种措施，确保复合装置可在复杂条件下可靠稳定运行。经测试，装置臭氧排放体积分数1 h均值小于 0.05 mg/m^3 。

3 装置性能测试

3.1 效率测试

为分析装置的净化和灭菌效率随电压及面风速的变化规律，搭建了试验台进行相关测试。试验测试原理见图4。装置的灭菌效率测试方法主要参考国家标准GB/T 18801—2022《空气净化器》。

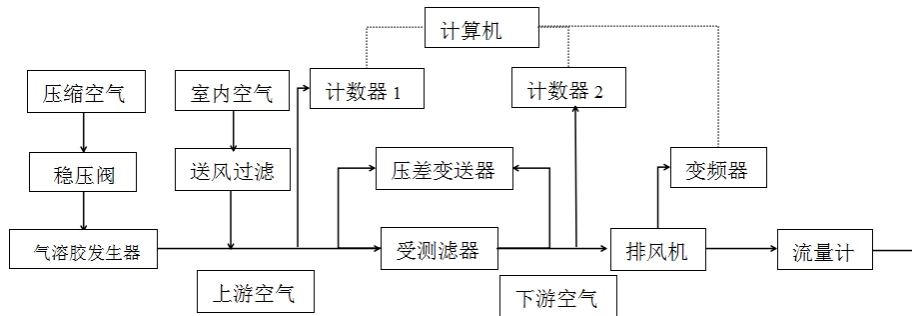


图4 试验测试原理

Fig. 4 Schematic Diagram of Experimental Test Principle

压缩空气经一级稳压阀调节后压力略高于气溶胶颗粒发生器所需的工作压力，再通过二级稳压阀使进入发生器的气压维持稳定。当压缩空气进入发生器后，流经喷嘴将发生器内的液体雾化，然后喷入试验管路内，与试验空气混合，形成均匀的气溶胶颗粒。

装置样机安装于测试段内。在测试净化效率的过程中，分别由激光粒子计数器测试上下游的粒子数，通过比较测得值得出被测过滤器的计数效率；在测试灭菌效率的过程中，将制备好的菌悬液以气溶胶的形式喷入试验舱，采用6级撞击式微生物采样器在管道上下游采样后，进行平板培养获得菌落总数，同时设置对照组进行自然消亡率检测。试验台实物见图5。

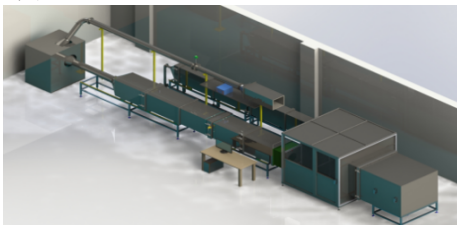


图5 试验台实物

Fig. 5 Physical Diagram of Experimental Bench

试验主要测试在风速不变的条件下，装置样机电压与净化效率和灭菌效率的变化关系，以及当装置电压保持不变时，面风速变化对净化效率和灭菌

效率的影响。

3.2 船用环境测试

船用环境测试包括低温、高温、倾斜、摇摆、湿热和IP44防护等级及淋水等项目。

温湿度试验箱型号为THC-1100-602A，用于低温、高温和湿热试验。先将样品保温4 h，试验持续2 h后通电检测，控制温度变化率 $\leq 3 \text{ }^\circ\text{C/min}$ 。湿热试验温度为 $(40 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ ，相对湿度为 $(93 \pm 3)\%$ ，每周期24 h，共进行10个周期的试验。

倾斜摇摆试验台型号为YB-5000，用于倾斜、摇摆试验。试验参数为：横摇 $\pm 45^\circ$ ，纵摇 $\pm 10^\circ$ ，纵倾 $\pm 5^\circ$ ，横倾 $\pm 15^\circ$ ，摇摆周期为8 s~13 s，试验时间为30 min。试验结束后在室温条件下对装置样机进行外观检查并通电检测。

IP4X试验探针型号为BND-D，用于测试装置样机外壳防护等级，防止接近危险部件及固体异物进入，控制直径均为1.0 mm；淋水试验装置型号为GK-IPX5/6，试验为垂直方向淋水5 min，试验后对装置样机内部进行检查并通电检测。

3.3 电磁兼容测试

在电磁兼容测试台进行CE101、CE102、RE101及RE102等项目电源线传导及电磁场辐射发射测试，CS101、CS106、CS114、CS116、RS101和RS103等项目电源线传导及电磁场辐射敏感度检测。

电磁兼容性主要测试装置样机的电磁发射是否符合技术规范要求的限值，并检验其工作时是否存

在敏感现象。测试结束后, 装置样机通电, 按下开关, 指示灯亮, 产品正常工作。

4 结果分析与优化设计

灭菌净化装置的净化效率一般用去除率 η 表示, 在相同通风量条件下, 可通过体积分数计算得出, 其表达式为

$$\eta_{jh} = \frac{C_{jt} - C_{j0}}{C_{j0}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: η_{jh} 为净化效率; c_{jt} 为时间 t 时被净化物的体积分数, cfu/m^3 ; c_{j0} 为被净化物的初始体积分数, cfu/m^3 。

灭菌净化装置的灭菌效率通过试验菌体积分数计算得出, 考虑自然消亡率, 其表达式为

$$\eta_{mj} = \frac{C_{mt}(1-a) - C_{m0}}{C_{m0}(1-a)} \times 100\% \quad (4)$$

式中: η_{mj} 为灭菌效率; c_{m0} 为初始体积分数, cfu/m^3 ; c_{mt} 为时间 t 时的体积分数, cfu/m^3 ; a 为自然消亡率, cfu/m^3 。

在试验过程中, 当电压从6.2 kV增加到7 kV, 面风速分别为2.0 m/s和2.5 m/s时, 净化效率和灭菌效率的变化曲线见图6。图6展示了装置净化效率与灭菌效率随电压及面风速的变化关系。

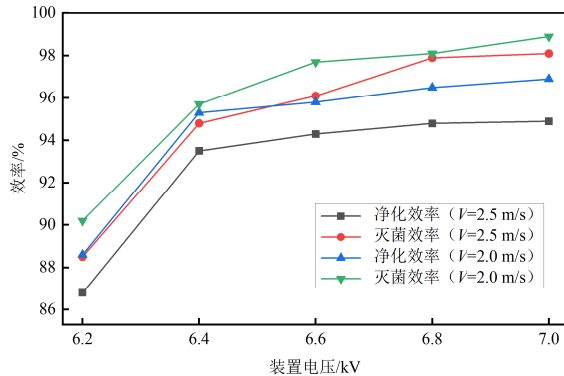


图6 净化灭菌效率随装置电压与面风速变化曲线

Fig. 6 Curve of Purification and Sterilization Efficiency with Device Voltage and Air Velocity

结果表明, 当电压升至6.8 kV时, 净化效率达到95%, 灭菌效率达到90%, 均达到测试范围内的峰

表1 装置样机净化效率和灭菌效率测试数据

Tab. 1 Test Data on Purification and Sterilization Efficiency of Prototype Device

采用点位	上游体积分数		下游体积分数	
	颗粒物/ $(\mu\text{m}/\text{m}^3)$	试验菌/ (cfu/m^3)	颗粒物/ $(\mu\text{m}/\text{m}^3)$	试验菌/ (cfu/m^3)
1号	452	1.15×10^4	36	2.57×10^2
2号	586	1.36×10^4	33	3.62×10^2
3号	642	1.62×10^4	27	2.80×10^2
平均值	560	1.38×10^4	32	3.00×10^2

试验菌自然消亡率 $8.33 \text{ cfu}/\text{m}^3$

值, 表明此时等离子体生成最为充分, 与微生物灭活效率呈正相关。但随着面风速增加, 净化效率与灭菌效率均呈下降趋势, 这主要是由于气流停留时间缩短, 减少了等离子体与微生物的接触机会。基于二次回归模型优化, 确定最佳操作参数为电压为6.6 kV、面风速为2.0 m/s, 在该工况下效率达到平衡且能耗最低。该优化结果验证了装置在船舶紧凑空间内具有良好的适用性。

为进一步验证装置在严苛船用环境下的可靠性, 开展了系列环境模拟测试。高温测试结果显示, 装置内部温度随外部环境同步上升并最终趋于稳定, 表明其具有良好的热平衡能力。在相对湿度阶跃式提升的中后期, 装置工作电流保持稳定, 说明关键部件如等离子体发生器及电源模块的材料能在船舶高温机舱环境中保持性能稳定, 并在高湿条件下具备良好的绝缘与防凝露能力, 有效避免了高湿环境下可能出现的电弧、漏电等隐患, 保障了装置的运行稳定性。

对比实测干扰信号与标准限值曲线, 在2 MHz~400 MHz的宽频范围内, 实测信号曲线始终位于限值曲线下方, 且在10 MHz~100 MHz等敏感频段内仍保持3 dB μ A~5 dB μ A的裕量。这表明本装置的电源与信号线缆采用的屏蔽和滤波设计有效抑制了外界传导干扰, 电路板布局和接地设计合理, 抗干扰能力强。

试验验证结果表明, 该装置各功能段设计合理、选材合适, 能满足船用环境条件, 并在各工况下可靠运行, 具备装船适用性。

5 结论

船用复合型空气灭菌净化装置设计要求, 在一次通过条件下, 净化效率 $\geq 90\%$, 灭菌效率 $\geq 90\%$ 。通过结构设计和装置性能试验, 净化效率在空气动力试验台测试, 当额定风量为700 m^3/h 时, 对粒径大于0.3 μm 颗粒物的一次通过净化效率进行检测; 灭菌效率检测以白色葡萄球菌8032为试验菌种, 通过上游采样体积分数, 考虑自然消亡率后与下游10 min后采样体积分数进行判定。检测数据见表1。

由表1可知, 粒径大于0.3 μm 颗粒物的一次通过净化效率为94.3%, 微生物(白色葡萄球菌)一次通过灭菌效率为97.6%, 均达到设计要求, 装置样机测试结果满足船用条件。

本文采用设计的复合型空气灭菌净化装置对净化效率与电压、面风速的关系开展研究, 计算了灭菌净化效率, 并通过搭建试验台测试了净化装置的性能, 同时对船用环境与电磁兼容性进行了测试验证。复合型空气灭菌净化装置的结构设计有效解决了空气灭菌净化装置净化效率的波动问题, 适用于各型船舶, 对等离子空气灭菌净化装置的推广应用、改善船体舱室空气质量具有较好的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 陈永强. 船舶室内环境的绿色环保性设计[J]. 船舶工程, 2025, 47(11): 210-211.
CHEN Y Q. Green Environmental Design of Ship Interior Environment[J]. Ship Engineering, 2025, 47(11): 210-211.
- [2] 柴镇江, 王凤良. 改善全封闭水面舰艇舱室空气品质技术初探[J]. 船舶, 2007(5): 50-51.
CHAI Z J, WANG F L. A Preliminary Study on Technology for Improving Air Quality in Cabins of Fully Surface Ships[J]. Ship, 2007(5): 50-51.
- [3] 崔建伟, 徐筱欣, 韩小波. 箱装体模块内气体净化技术研究[J]. 船舶, 2009(2): 24-26.
CUI J W, XU X X, HAN X B. Study on Gas Purification Technology in Boxed Modules[J]. Ship, 2009(2): 24-26.
- [4] 王军, 林小龙, 侯宇, 等. 辐射空调送风方式对船舶舱室舒适性的影响[J]. 船舶工程, 2022, 44(1): 69-75.
WANG J, LIN X L, HOU Y, et al. Influence of Radiant Air Conditioning Air Supply Methods on Ship Cabin Comfort[J]. Ship Engineering, 2022, 44(1): 69-75.
- [5] 常烜宇, 魏小栋. 船舶舱室大气环境感染控制设计研究[J]. 中国造船, 2021(3): 240-249.
CHANG X Y, WEI X D. Research on Infection Control Design of Ship Cabin Atmospheric Environment[J]. Shipbuilding of China, 2021(3): 240-249.
- [6] COOPERMAN P. A New Theory of Precipitator Efficiency[J]. Atmospheric Environment, 1971, 5(7): 541-551.
- [7] LEONARD G, MITCHNER M, SELF S A. Particle Transport in Electrostatic Precipitators[J]. Atmospheric Environment, 1980, 14(11): 1289-1299.
- [8] 向晓东, 张国权. 静电除尘器收尘效率理论的现状与展望[J]. 建筑热能通风空调, 1988(1): 3-8.
XIANG X D, ZHANG G Q. Current Status and Prospects of Precipitator Efficiency Theory for Electrostatic Precipitators[J]. Building Thermal Energy Ventilation and Air Conditioning, 1988(1): 3-8.
- [9] 肖福春, 张国权. 静电收集数学物理模型及效率公式的研究[J]. 江西理工大学学报, 1989(1): 9-21.
XIAO F C, ZHANG G Q. Study on Mathematical Physical Model and Efficiency Formula of Electrostatic Collection[J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 1989(1): 9-21.
- [10] 赵志斌, 张国权. 非稳态静电收集理论[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1992(4): 325-330.
ZHAO Z B, ZHANG G Q. Non-Steady State Electrostatic Collection Theory[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 1992(4): 325-330.
- [11] SOLDATI A, ANDREUSSI P, BANERJEE S. Direct Simulation of Turbulent Particle Transport in Electrostatic Precipitators[J]. Aiche Journal, 1993, 39(12): 1910-1919.
- [12] 郝吉明, 马广大. 大气污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
HAO J M, MA G D. Air Pollution Control Engineering[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [13] 程灯塔. 空气净化器内部双区静电集尘装置的性能及其整机的应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2006.
CHENG D T. Performance of Dual-Zone Electrostatic Dust Collection Device in Air Purifier and its Application Research on the Whole Machine[D]. Shanghai: Donghua University, 2006.
- [14] 陈龙文, 郑雅诗, 黄昭芹, 等. 细微颗粒物荷电收集处理的试验与模拟计算研究[J]. 广东化工, 2022, 49(24): 21-24.
CHEN L W, ZHENG Y S, HUANG Z Q, et al. Experimental and Simulation Study on Charging and Collection Treatment of Fine Particulate Matter[J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(24): 21-24.
- [15] 王清树, 夏以诚, 崔雯婧, 等. 静电式空气净化装置的结构设计及性能研究[J]. 苏州科技大学学报: 自然科学版, 2022, 39(1): 51-56.
WANG Q S, XIA Y C, CUI W J, et al. Structural Design and Performance Study of Electrostatic Air Purification Device[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2022, 39(1): 51-56.

(下转第 128 页)

- <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.24-0622>.
- [9] ZHANG S, LI Y, DONG Q. Autonomous Navigation of UAV in Multi-Obstacle Environments Based on a Deep Reinforcement Learning Approach[J]. *Applied Soft Computing*, 2022, 115: 108194.
- [10] SHENG Y, LIU H, LI J, et al. UAV Autonomous Navigation Based on Deep Reinforcement Learning in Highly Dynamic and High-Density Environments[J]. *Drones*, 2024, 8(9): 516.
- [11] ZHANG C, VINYALS O, MUNOS R, et al. A Study on Overfitting in Deep Reinforcement Learning[EB/OL]. (2018-04-20) [2025-07-20]. <https://arxiv.org/abs/1804.06893>.
- [12] MNIH V, KAVUKCUOGLU K, SILVER D, et al. Human-Level Control Through Deep Reinforcement Learning[J]. *Nature*, 2015, 518(7540): 529-533.
- [13] FAREBROTHER J, MACHADO M C, BOWLING M. Generalization and Regularization in DQN[EB/OL]. (2020-01-17) [2025-07-20]. <https://arxiv.org/abs/1810.00123>.
- [14] SEEGER M. Gaussian Processes for Machine Learning[J]. *International Journal of Neural Systems*, 2004, 14(2): 69-106.
- [15] MYREN S, LAWRENCE E. A Comparison of Gaussian Processes and Neural Networks for Computer Model Emulation and Calibration[J]. *Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal*, 2021, 14(6): 606-623.
- [16] GRANDE R, WALSH T, HOW J. Sample Efficient Reinforcement Learning with Gaussian Processes[C]//International Conference on Machine Learning, 2014.
- [17] KO J, KLEIN D J, FOX D, et al. Gaussian Processes and Reinforcement Learning for Identification and Control of an Autonomous Blimp[C]//International Conference on Robotics and Automation, 2007.
- [18] CHOWDHARY G, LIU M, GRANDE R, et al. Off-Policy Reinforcement Learning with Gaussian Processes[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2014, 1(3): 227-238.
- [19] LIM J, HA S, CHOI J. Prediction of Reward Functions for Deep Reinforcement Learning via Gaussian Process Regression[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(4): 1739-1746.
- [20] LEE G, HOU B, CHOUDHURY S, et al. Bayesian Residual Policy Optimization: Scalable Bayesian Reinforcement Learning with Clairvoyant Experts[C]//2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2021.
- [21] GHAVAMZADEH M, MANNOR S, PINEAU J, et al. Bayesian Reinforcement Learning: A Survey[J]. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 2015, 8(5/6): 359-483.
- [22] JOHANSEN T A, PEREZ T, CRISTOFARO A. Ship Collision Avoidance and COLREGS Compliance Using Simulation-Based Control Behavior Selection with Predictive Hazard Assessment[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(12): 3407-3422.
- [23] FUJIMOTO S, MEGER D, PRECUP D. An Equivalence Between Loss Functions and Non-Uniform Sampling in Experience Replay[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2020, 33: 14219-14230.

=====

(上接第 94 页)

- [16] 沈欣军. 电除尘器内细颗粒物的运动规律及其除尘效率研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- SHEN X J. Study on the Movement Law of Fine Particles in Electrostatic Precipitator and its Dust Removal Efficiency[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [17] 傅碧峰. 用于地铁的光等离子空气净化装置净化效果研究[D]. 山东青岛: 青岛理工大学, 2016.
- FU B F. Study on Purification Effect of Photoplasma Air Purification Device for Subway[D]. Qingdao, Shandong: Qingdao University of Technology, 2016.
- [18] 丁年平, 陈耀刚, 杜少平, 等. 空气净化与消毒装置除菌效果影响因素研究[J]. *中国消毒学杂志*, 2017, 34(3): 232-235.
- DING N P, CHEN Y G, DU S P, et al. Study on Influencing Factors of Sterilization Effect of Air Purification and Disinfection Device[J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2017, 34(3): 232-235.
- [19] 陈玲, 周乐, 王书田, 等. 静电过滤器与其他空气消毒性能比较[J]. *中国新技术新产品*, 2021(19): 83-86.
- CHEN L, ZHOU L, WANG S T, et al. Comparison of Performance Between Electrostatic Filter and Other Air Disinfection Methods[J]. *China New Technologies and Products*, 2021(19): 83-86.