

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-715-07

# 舰船加湿技术研究

段文利 龚磊 谢志豪 崔永龙 黄晴

(中国舰船及海洋工程设计研究院 上海 200011)

**【摘要】** 相对湿度是空气调节、环境控制的重要参数。随着我国海军战略转型, 舰船执行护航、撤侨、巡视、救助等非战争性多样化任务越发频繁, 舰员在相对封闭的舱室环境中需要长时间工作生活, 适宜湿度的空气直接关系到舰员的身体健康和生活质量, 甚至关系到设备的稳定运行。舰船具有船型种类多、任务需求多样化等特点, 选用合适的加湿技术至关重要。通过对近年来大量关于湿度研究文献的分析, 阐述了湿度的重要性, 并对5种加湿技术在舰船上应用的适用性和发展方向进行了分析和总结, 为后续舰船加湿设计提供参考。

**【关键词】** 相对湿度; 舰船; 加湿技术; 适用性; 发展

中图分类号 U662.2 文献标志码 A

## The Research of Ship Humidification Technology

Duan Wenli Gong Lei Xie Zhihao Cui Yonglong Huang Qing

(Marine Design & Research Institute of China, Shanghai, 200011)

**【Abstract】** Relative humidity is an important parameter for air conditioning and environmental control. With the strategic transformation of China's navy, ships are increasingly carrying out non war diversified tasks such as escort, evacuation, patrol, and rescue. Crew members need to work and live for a long time in relatively closed cabin environments. Adequate humidity in air directly affects the health and quality of life of crew members, and even the stable operation of equipment. Ships have the characteristics of a wide variety of ship types and diverse task requirements, and it is crucial to choose appropriate humidification technology. The article analyzes a large number of recent literature, elaborates on the importance of humidity, and analyzes and summarizes the applicability and development direction of five humidification technologies applied on ships, providing reference for subsequent ship humidification design.

**【Keywords】** Relative humidity; Ship; Humidification technology; Applicability; Development

## 0 前言

随着舱室大气环境控制技术的发展, 人们越来越关注舱室的舒适性, 针对舱室的舒适性, 我国海军近年来发布了关于舱室舒适性设计的试行版, 但更多地关注舱室噪声、温度、污染物等指标, 而舱室空气湿度和温度一样, 都是影响舱室舒适性的重要因素。舰船舱室湿环境较为复杂, 主要原因为: 第一, 一般舰船可跨时区航行且海上气象条件变化无常, 舱外环境的变化, 对于舱内的湿环境影响较

大, 在不进行空气处理的情况下舱室湿度波动较大。第二, 舰船上舱室相对封闭且不同类型舱室湿环境的控制具有多样化的特点, 例如某些舱室加装大功率电子设备, 设备运行与否对于舱室湿度有较大影响, 为保证设备正常运行, 船员正常工作, 一个舱室可能需要同时配备有加湿和除湿设备; 其次, 某些舰船在不同任务工况下, 同一舱室人员数量会发生很大变化, 对于舱室湿环境有较大影响; 另外, 舰船上某些物品的储存需要相对恒定的湿环

境, 例如食品、药品、特殊物品的储存等。第三、舰船需要在有限的空间放置尽量多的设备以提高空间利用率, 通常不会设置独立的加湿装置。基于上述原因, 舰船舱室湿环境具有波动大、封闭空间下需求多样化的特点, 选择合适的加湿技术以保证舱室的湿环境成为舰船设计的重要工作之一。

舰船用加湿技术是以现有陆用加湿技术为理论基础而发展的, 但由于舰船环境较为特殊, 具体选择及应用还需考虑舰船自身条件与舱室的实际需求, 例如电力负荷大小、有无配备锅炉、湿度控制范围等, 选定某种加湿方式后具体实施过程还需考虑安装空间、可靠性等方面因素。为满足规范、客户个性化要求以及某些设备上舰湿度保障要求等(关于舰船居住性、某些设备工作、某些物品储存等在湿度控制上具有明确要求), 需要对不同加湿方式下的机理、能力、控制精度、优点、缺点等方面进行研究。本文通过分析总结现阶段舰船常用加湿技术的适用性和发展方向, 为后续舰船加湿技术的研究提供参考, 由此确保舰员的身体健康和生生活质量, 保证设备可靠、稳定运行, 提高舰船“战斗力”, 提升客户满意度。

## 1 湿度的重要性

船员在舰船与海洋平台相对封闭的舱室内工作、生活, 通过舱室大气环境控制系统实现舱室湿度的调节。大型舰船通常配备有中央空调, 通过空调器送风进行制冷、制热, 无论在制冷工况还是供暖工况, 舱室的相对湿度都会降低。在冬季, 若舱室只进行加热而不进行湿度控制, 空调采暖舱室的相对湿度降低, 较低湿度对人体舒适度、卫生健康、静电消除等都有着直接或间接的影响, 另外, 舰船货物也需要适宜的湿度环境才可长时间储存。

### 1.1 人体舒适度和湿度

环境舒适度的评价与人体表面是否维持在正常体温密切相关。人体需要维持正常的体温, 从而达到身体的热平衡, 人体通过摄取食物等方式获取热量, 然后散热维持正常的体温, 人体的散热主要有显热和潜热两部分, 其中显热由温差决定的辐射和对流的形式来散热, 潜热由相对湿度决定的汗液蒸发的方式来散热。所以, 人体热平衡表达式<sup>[1]</sup>:

人体散热=对流散热+辐射散热+蒸发散热

$$H = \alpha_c(t_p - t_a) + \alpha_r(t_p - t_s) + \alpha_e(d_p - d_a) \quad (1)$$

式中:  $\alpha_c$  为对流换热系数;  $\alpha_r$  为辐射换热系数;  $\alpha_e$  为蒸发传热系数;  $t_p$  为人体表面皮肤的平均温度;  $t_a$  为空气干球温度;  $t_s$  为环境中物体表面温度;  $d_p$  为人体皮肤表面饱和绝对湿度;  $d_a$  为空气绝对湿度。

环境温度越低, 通过蒸发散热量越少; 相反, 蒸发散热量越多。空气温度低于 22℃ 时, 通过蒸发方式的散热量低于总散热量的 10%; 空气温度在 22℃~26℃, 通过蒸发方式的散热量占总散热量的 10%~30%; 空气温度高于 26℃, 通过蒸发方式的散热量占总散热量的 30%以上<sup>[1]</sup>。

有关舱室空气湿度对人体舒适度影响的研究较多, 其中国外比国内研究的更早, 美国供暖制冷空调工程师学会 ASHREA 就在关于人类居住的热环境标准中, 将空气湿度列为影响人体热舒适度的重要因素之一<sup>[2]</sup>。1967 年, McNall 通过实验发现, 运动强度和人体热感觉密切相关, 当运动强度较低时, 湿度对人体热感觉的作用可以忽略, 随着运动强度的加大, 湿度能够显著地影响人的热舒适<sup>[3]</sup>。近年来, 国内重庆大学等关于湿度对于人体热舒适性的研究较多, 其中徐昆仑采用回归分析法分别对夏季和冬季整体舒适感与热舒适、湿舒适的关系进行研究, 发现夏季温度对整体舒适感影响较大, 而在冬季, 温度和湿度对人体舒适度影响权重基本相同<sup>[4]</sup>。袁萌通过对室内湿度对人体热舒适性的实验研究, 发现相对湿度主要影响人体皮肤表面的蒸发散热, 80%满意率的室内相对湿度范围在 45%~55%。另外, 通过对大量受试者在不同的温度和湿度下进行调查, 得到相对湿度较低时对房间舒适性的满意率较低的结论<sup>[5]</sup>。吴金洪在空调车厢做了关于相对湿度对热舒适的影响的实验, 结果表明, 湿度降低, 热舒适性变差, 并使人产生较冷的感觉<sup>[6]</sup>。

### 1.2 卫生健康和湿度

空气主要由氮气和氧气组成, 但其中也存在着大量游离的微生物和化学物质, 它们对于人体健康有较大影响。湿度不足可危害身体健康。空气相对湿度较低时, 损伤咽喉和鼻腔粘膜, 感冒及流感病毒活跃度增加, 使人易患病。在冬季, 当室内相对湿度太低时, 会使人体的皮肤因缺少水分而变得粗糙甚至开裂, 降低人体对疾病的免疫力<sup>[4]</sup>。在湿度较低的环境中, 人体极易产生静电, 进而可能引起

人体的心率异常,诱发早搏<sup>[7]</sup>,也可能使血液中的碱性升高,影响人的机体生理平衡<sup>[8]</sup>;另外,还可能引起脑部神经细胞的电流传导异常,影响人体中枢神经,进而使人感到疲劳、烦躁等现象。严汉彬通过研究相对湿度和空气中微生物的关系,发现适宜的空气湿度对微生物的生长具有重要的作用,较低的湿度有利于病毒及SARS的传播<sup>[9]</sup>。实践证明,湿度在50%左右时,浮游菌可在10min内死亡。空气的湿度对手术创面的影响较大,湿度太低创面水分干燥过快,创口皮肤边缘发干不易缝合<sup>[10]</sup>。Wyon开展了5%~35%相对湿度的实验,受试者为丹麦人,研究发现相对湿度在15%以下时,对泪液膜和眨眼影响较大<sup>[11]</sup>。日本人发现当室内的相对湿度为50%左右,流行性感病毒就难以生存<sup>[12]</sup>。相对湿度在30%~60%,细菌不易繁殖,呼吸道和各种过敏性疾病不易发生<sup>[1]</sup>。Anice研究了相对湿度对流感病毒传播的影响,研究表明,在相对湿度为20%~35%时流感病毒传播最快,相对湿度较低是造成流感病毒传播的主要原因<sup>[13]</sup>。从卫生健康的角度上来讲,由于舰船舱室是相对封闭的环境,为防止细菌繁殖,阻断病毒传播,保证舱室空气的相对湿度适宜非常重要。

### 1.3 食品储藏和湿度

食品中的水分可分为自由水和结合水,自由水在动物细胞中含量较少,而在植物细胞中含量较高。结合水由于包围在蛋白质和糖分子周围,可形成稳定的水化层,可保护蛋白质等物质在储存中不被破坏,对食品的色、香、味及口感影响很大<sup>[14]</sup>,相对于冷冻库内的肉类食品而言,冷藏库内的湿度保持对于果蔬储存更加重要。

根据食品保鲜储藏技术原理,尤其蔬果类食品,控制储藏环境内的氧气、乙烯、水蒸气、二氧化碳等成分,降低食品呼吸和蒸腾作用至关重要。其中蒸腾是食品表面的失水过程,例如,柑桔果实储存过程的失重有3/4是由于蒸腾失水所致,苹果在2.7℃贮藏时,由于蒸腾失水引发的失重约为0.5%<sup>[15]</sup>,大部分蔬果水分散失超过果重的5%时,果品蔬菜就会出现萎蔫,所以库内相对湿度通常要

求在85%~95%。我国海军舰船远洋航行不断增加,执行各类任务的舰船,其食品保鲜的好坏不仅直接关系到船员的身体和生活质量,甚至还关系到任务能否圆满完成<sup>[16]</sup>。

### 1.4 静电消除与湿度

静电与湿度有绝对关系,空气湿度较低时极易产生静电,静电会吸附灰尘,降低元器件绝缘电阻,缩短元器件寿命。静电在放电时,会造成电子元器件损坏,严重时完全不能工作。另外,静电放电时会产生较大的电磁场,频谱极宽,对电子器件造成干扰甚至损坏,即电磁干扰,对于战斗型舰船的武器、雷达的使用影响较大。所以,增大空气湿度可使得静电逸散到空气中,消除静电对于电子元器件工作的干扰和损坏。

李金梅通过对消防人员在不同空气相对湿度下人体静电位的研究,发现环境湿度对人体静电电位的影响显著,随着相对湿度的增大,最大人体静电电位显著降低<sup>[7]</sup>。一般认为当环境湿度保持在60%~70%时能有效防止静电蓄积,而当相对湿度30%以下时就会呈现显著的带电现象。

## 2 舰船用加湿技术

通常所说的空气是湿空气,湿空气是由干空气和一定量的水蒸气混合而成,湿空气的焓值是干空气的焓值加上同时存在水蒸气的焓值,可表示为:

$$h = (1.01 + 1.84d)t + 2500d \quad (2)$$

式中:1.01为干空气的定压比热, kJ/(kg·℃); 1.84为水蒸气的定压比热, kJ/(kg·℃); 2500为 $t=0^{\circ}\text{C}$ 时水蒸气的汽化潜热;  $d$ 为含湿量, g/kg<sub>干</sub>; 湿空气的显热部分是 $(1.01 + 1.84d)t$ ; 潜热部分是 $2500d$ 。

热湿比表示由一个状态点变化到另一个状态点,其热量和湿量的变化情况,在空气调节中,空气的压力变化一般很小,可近似于等压过程,因此可直接用空气的焓变化来度量空气的热量变化。假设空气调节从1状态点加湿处理后变为2状态点,根据公式(2):

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{h_2 - h_1}{d_2 - d_1} = \frac{[(1.01 + 1.84d_2)t_2 + 2500d_2] - [(1.01 + 1.84d_1)t_1 + 2500d_1]}{d_2 - d_1}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{[1.01t_2 + 1.84d_2t_2 + 2500d_2] - [1.01t_1 + 1.84d_1t_1 + 2500d_1]}{d_2 - d_1} \\
 &= \frac{1.01(t_2 - t_1) + 1.84(t_2d_2 - d_1t_1) + 2500(d_2 - d_1)}{d_2 - d_1} \\
 &= \frac{1.01(t_2 - t_1) + 1.84(t_2d_2 - d_1t_1)}{d_2 - d_1} + 2500
 \end{aligned}$$

所以对湿空气进行等温加湿处理,热湿比可表示为:  $\epsilon=1.84t+2500$ 。

通过描绘空气加湿过程在焓湿图上的变化,可将空气加湿分为等温和等焓两种方式。其中等温加湿是利用蒸汽进行加湿,如干蒸汽加湿法、电极加湿法、电热加湿法等方式。100℃或更高温度的蒸汽与温度较低的空气混合,蒸汽遇冷向空气释放汽化潜热发生冷凝,凝结成可见的白雾状的微小水滴,空气温度先会明显升高,随着与空气的进一步混合,这些微小水滴会从周围空气中吸热而气化,重新变成不可见的气体,已释放出的汽化潜热重新被吸收回来,被加湿空气的干球温度基本恢复到加湿前的温度,所以蒸汽加湿过程接近等温过程。

等焓加湿是利用水进行加湿,如湿膜加湿法、高压喷雾加湿法、超声波加湿法等,水通过吸收空气中的显热而蒸发进入空气,空气失去显热却获得汽化潜热,空气的焓值基本不变,所以通过水加湿的过程为等焓过程。

舰船上空调器中加湿装置的设计及选择应确定的参数有:

- (a) 空调器的总风量和新风比;
- (b) 进、出口相对湿度。

加湿量计算公式为:

$$W = \frac{1.2 \cdot V_w (d_n - d_w)}{1000} - W_n \quad (3)$$

式中:  $W$  为加湿量, kg/h;  $V_w$  为舱外空气量, m<sup>3</sup>/h;  $d_n$  为舱内空气含湿量, g/kg<sub>干</sub>;  $d_w$  为舱外空气含湿量, g/kg<sub>干</sub>;  $W_n$  为舱内产湿量, kg/h。

## 2.1 干蒸汽加湿

干蒸汽加湿为等温加湿,大部分舰船都配有蒸汽锅炉,可以为加湿器提供 0.3MPa 的干蒸汽,所以该加湿方式在舰船上较为常见。采用蒸汽进行加湿,最重要的是防止加湿器喷水 and 喷出后凝水,加湿器喷出的蒸汽如果带有冷凝水,将会使风机带水,电机受潮损坏,风道滴水等。引起凝水的最主

要原因是在吸收距离内加湿蒸汽遇到冷的物体后产生冷凝水,为了避免这种现象的出现,设计时应确定干蒸汽加湿器的吸收距离<sup>[17]</sup>。为保证蒸汽管喷口出口是干蒸汽,通常在喷管外加保温套管,在刚启动加湿时,喷管温度较低,防止水蒸气冷凝。影响蒸汽尾迹长度(吸收距离)因素主要有:需要加湿空气的流速、温度、相对湿度、加湿量等。空气的流速越低,温度越高,相对湿度越低,蒸汽和空气越易充分混合,吸收距离越短。如果空调器体积有限而加湿段太短,或者要求低温送风,这些情况都容易造成蒸汽吸收距离过长,出现蒸汽遇冷凝结成水的现象。刘哲通过对电陶瓷加湿器喷杆安装位置和喷嘴朝向对加湿效果的影响进行模拟分析,结果表明,喷杆置于回风管中,喷嘴顺流布置和喷嘴逆流布置均可实现加湿目的,两种布置方式随着温度的升高相对湿度均升高;喷杆置于送风管路中,几乎达不到加湿目的<sup>[18]</sup>。综上分析,干蒸汽加湿广泛用于舰船空调器加湿,但需注意蒸汽吸收距离,舰船上空间较为紧张,通过减少吸收距离可减少空调器尺寸,进而提高舰船空间利用率,对于总体性能是一大提升。

## 2.2 电极和电热加湿

电极和电热加湿为等温加湿,当舰船上无蒸汽锅炉时可采用,但耗电量较高,舰船电力负荷要有一定余量。电热加湿的加湿量的大小取决于水温和水表面积。电极加湿的加湿量的大小取决于电极罐内水温和水位高低,由于舰船在遇到风浪后摇晃较大,电极罐内的水位难以控制,对加湿有较大影响。另外,加湿需要注意采用加热的水的水质,防止电极和电热元件上产生水垢和腐蚀。电极加湿器加湿量的大小为:

$$W = \frac{P}{h_q - ct_w} \quad (4)$$

式中:  $W$  为加湿量, kg/s;  $P$  为电极加湿器的功率, kW;  $h_q$  为蒸汽的焓, kJ/kg;  $t_w$  为进水温度, °C。

电极或电热加湿在生物医药、电子工业等领域应用较多, 提供恒温恒湿的箱体环境以供样品试验、保存, 恒温恒湿箱的温湿度调节是通过制冷机组对箱内空气进行降温除湿后, 再利用电加热或电极、电加热加湿器分别进行再热升温和湿度补偿, 以达到设定温度和湿度。盛健通过对电热蒸汽加湿的恒温恒湿箱的12个设定温湿度工况进行试验, 发现内置式电热蒸汽加湿器在加湿时, 加湿量难以精确调节, 易导致加湿滞后性过大<sup>[19]</sup>。通过上述分析, 电极或电热加湿方式简单, 舰船上采用电极或电热加湿, 需要考虑电力负荷余量、水质、水位控制等因素, 以增大加湿效率, 减少对船员身体健康的影响。

### 2.3 超声波加湿

超声波加湿属于等焓加湿, 在舰船上常用于舰船冷库中的蔬果库加湿。蔬菜水果由于蒸腾作用, 表面的水分会流失, 蔬果水分散失超过果重的5%时, 果品蔬菜就会出现萎蔫。蔬果库库温一般需要保持在0~12℃左右的较低温度, 不同种类水果所需温度不同, 番茄、黄瓜、红薯、香蕉等蔬果需8~12℃, 绿叶菜、萝卜、葡萄、苹果、梨等蔬果需0~5℃, 降低蔬果水分的蒸腾, 减少蔬果表面的凝露, 可以延长蔬果的保存时间。采用超声波加湿可以将水块雾化成1~5 $\mu\text{m}$ 的微粒, 易于蒸发后加湿空气, 所以非常适合用在舰船上蔬果库的加湿。孙静通过研究农产品批发市场工程技术集成评价指标体系, 超声波加湿器为高等级技术集成方案中重要技术组成之一<sup>[20]</sup>。船用设备运行环境相对陆用更加恶劣, 时常出现涡轮增压器与柴油机匹配失调等问题, 所以通过对增压柴油机进气口进行加湿, 减少或消除缸内积碳, 有效降低氮氧化物等污染物的排放<sup>[21]</sup>, 马昭胜通过对比高压喷射雾化、旋涡闪蒸、超声波加湿三种方式, 选择超声波加湿方式可产生3~10 $\mu\text{m}$ 水滴, 优化了进气流场, 满足船用柴油机高效运行<sup>[22]</sup>。

在陆用空调加湿研究中, 超声波加湿器也用于空调房间的加湿。金听祥将超声波加湿器置于空调器中, 通过搭建空调器加湿系统试验平台, 研究了水雾输送管开孔尺寸、水箱内液面高度等因素对加湿速率的影响, 为超声波加湿器应用于空调器中提供了设计参考<sup>[23]</sup>。霍军亚根据空调器的结构特点和家庭用户使用的需求, 设计了一款超声波加湿空调器系统, 经过试验测试该加湿空调器的加湿能力为350ml/h, 能够为用户提供舒适的湿度环境<sup>[24]</sup>。张博博等把超声

波加湿器运用到空调器中, 并与常规超声波加湿器进行对比, 分析了两种加湿方式对房间温度、湿度和风速均匀性分布的影响, 结果表明, 通过配有超声波加湿器的空调加湿房间, 房间温度和湿度的分布更加均匀<sup>[25]</sup>。袁琪等在空调器中采用超声波加湿和湿膜加湿并对两种加湿方式的加湿效率进行试验对比研究, 结果表明, 两种工况下湿膜加湿的效率分别为25.13%和39.66%, 超声波加湿的效率分别为35.77%和48.56%, 湿膜加湿的加湿效率低于超声波加湿<sup>[26]</sup>。烟厂具有余热量大、湿度控制要求严格的特点, 厂房全年需要处于恒温恒湿环境中, 胡松涛通过对比研究蒸汽加湿和超声波加湿在烟厂中应用的经济性, 结果表面, 超声波加湿运行费用较低<sup>[27]</sup>。

超声波加湿需要配备水槽, 水槽中容易滋生微生物<sup>[28]</sup>, 研究发现, 使用超声波加湿器会增大室内细菌、真菌暴漏风险并诱发“加湿器肺炎”等呼吸道疾病<sup>[29]</sup>。东华大学的杨自力通过对超声波加湿后室内沉降微生物浓度的试验研究, 结果发现, 便携式超声波加湿器加湿房间空气后, 室内沉降的微生物浓度大幅度增加, 其浓度增加量与加湿水平密切相关, 沉降细菌和真菌主要积聚在地面, 其次在加湿器背风面、迎风面。

通过上述分析, 超声波加湿应用广泛, 可应用于食物储存、室内加湿、柴油机进气口加湿等。众多研究者研究了超声波加湿器应用于空调的可能, 后续舰船空调器加湿可以进行参考, 但是由于在加湿中易于滋生微生物, 需要考虑解决此问题, 舰船就可在不开启蒸汽锅炉的情况下仍然进行加湿, 为提高设计可靠性提供参考。

### 2.4 湿膜加湿

湿膜加湿属于等焓加湿, 由于早期湿膜易于滋生细菌, 而舰船属于相对封闭环境, 近年来在舰船上应用较少, 但在陆用加湿中由于成本低优势应用广泛。叶校圳为解决卷烟厂空调系统能源消耗高等问题, 根据卷烟厂热湿负荷特点, 采用热水湿膜加湿方式对原蒸汽加湿方式进行空调系统改造, 改造后空调系统蒸汽节能率50.56%, 制冷节能率19.41%<sup>[30]</sup>。随着湿膜材料的研究发展, 在加湿模块添加抗菌剂, 只要保证给水水质清洁无菌, 可以解决在湿膜上聚集细菌的问题。叶校圳在烟厂空调器中应用新型湿膜材料, 该湿膜采用高分子涂层覆盖湿膜基体, 在加湿系统运行时, 水在水泵作用下持

续通过膜的内侧，以气态分子的形式透过湿膜进入到空气中，接触空气的膜的外表面处于干燥状态，克服了传统湿膜表面容易沾染灰尘、滋生细菌等问题<sup>[30]</sup>。新型湿膜加湿能力与进水温度和湿膜厚度成正比，提高进水温度可以提高湿膜的加湿能力。但热水湿膜加湿技术仅适用于小风量的空调新风加湿，在大风量空调混风段的应用效果还有待进一步研究。刘乃玲等在风机盘管处安装湿膜加湿设备，并对加湿前后不同高度的湿度分布对比分析，得出加湿后房间内的湿度由 30% 提高到 55%，加湿前后室内温湿度在垂直方向的梯度分布规律相同，但加湿后室内温度略有下降<sup>[31]</sup>。通过上述分析，传统的湿膜加湿因加湿能力不足且易于滋生细菌，在封闭的舰船上大型空调器应用较少，但湿膜加湿相对蒸汽加湿成本低，不需要考虑吸收距离，无需在空调

器留有 0.5~0.8m 空间，提高舰船空间利用率，同时也不需要担心空调器内的冷凝水和结露问题，随着湿膜材料的研究发展，舰船空调器加湿可考虑应用。另外，舰船用风机盘管由于易于控制，调节灵活，占用舱室空间小，常用于负荷较大的舱室，作为空调器送风的制冷、供暖的补充。但传统的风机盘管对室内相对湿度难以有效控制，尤其是冬季供暖时，室内常出现湿度过低的问题，可以考虑应用配有湿膜加湿的风机盘管。

通过对大量文献的分析，研究对比了干蒸汽加湿、电极/电热加湿、超声波加湿、湿膜加湿在舰船上应用的适用性及未来发展和进一步研究点，表 1 对上述加湿方式从加湿能力、耗电量、所需介质、控制精度、优缺点、应用场所及适合船型等方面进行了汇总。

表 1 舰船用加湿技术

Table 1 The technology of ship's humidification

加湿方式	舰船用加湿技术				
	湿膜加湿	超声波加湿	干蒸汽加湿	电极加湿	电热加湿
加湿机理	等焓加湿			等温加湿	
加湿过程	将清洁的水均匀送到在湿膜顶部的布水器，水在重力的作用下向下流动将湿膜表面湿润，干燥空气穿过湿膜时即被加湿	利用振荡片将电能转化为机械能，高频振动将水快速雾化为 1~5 $\mu\text{m}$ 的微粒，微粒扩散到空气中对空气进行加湿	将锅炉产生的蒸汽通过蒸汽喷管喷出，直接与干燥空气混合进行加湿	将铜棒或者不锈钢棒插入水中作为电极，而水作为电阻，通电后水被加热成蒸汽，通过喷雾管连接进机组进行加湿	依据电阻加热原理，电热元件浸没在水中，元件通电后加热水，使水变成水蒸气对空气进行加湿
加湿能力	大小均可设定	1.2~18kg/h	10~160kg/h	3~65kg/h	1.2~85kg/h
耗电	15W/给水电磁阀	65W/(kg/h)	0	750W/(kg/h)	750W/(kg/h)
介质	自来水、纯水	符合饮用水水质标准	0.02~0.3MPa 饱和蒸汽	自来水，软水纯水不可用	软水或者一次纯水
控制精度	$\pm 5\sim 10\%$ ，通过控制加湿模块厚度及面积来控制加湿量	$\pm 5\%$ ，根据变压器调节电能进而调节振荡片的振动频率调节加湿量	$\pm 5\%$ ，根据蒸汽量的多少控制加湿量	$\pm 3\sim 5\%$ ，根据水量（电极罐内水位高低）和水温调节加湿量	$\pm 3\sim 5\%$ ，根据固态继电器控制电热棒功率调节加湿量
更换部件	加湿模块	超声波振子(5000h)	无	电极罐(4000h)	电加热棒(10000h)
优点	无噪声、寿命长、维护保养少、运行成本低	结构简单紧凑，运行安静可靠	等温加湿，加湿效率高达 95% 左右，可远程精确控制	噪声低，加湿量可调节，加湿洁净度高	噪声低，加湿量可调节，加湿洁净度高
缺点	控制精度低，空调器内有压损，易滋生细菌	在设备表面极易留下水垢，对水质要求高	运行成本高，需要蒸汽源，并考虑吸收距离，空调器需留 0.5m~0.8m 空间	电力负荷大，水质要求高，舰船摇晃影响大	电力负荷大，水质要求高，有干烧隐患
应用场所	洁净空调器、风机盘管	冷库、柴油机	大型空调器	小型制冷装置	小型制冷装置
适合船型	所有舰船	所有舰船	有蒸汽锅炉的舰船	电力负荷有余量的舰船	电力负荷有余量的舰船

### 3 结论

本文通过对近年来大量关于湿度研究文献的分析,阐述了加湿对于舰员生活和舰船设备运行的重要性,并对5种加湿技术在舰船上应用的适用性和发展方向进行了分析和总结,舰船加湿技术应该在加湿设备小型化、加湿效率、防止病菌滋生等方面进行研究。另外在实船设计过程中,必须做好具体的计算、分析工作,充分了解加湿需求和目的,选择合适的加湿技术。

#### 参考文献:

- [1] 薛梅,董华.湿度调节及加湿模式的探讨[J].制冷与空调,2004,(4):39-43.
- [2] 朱颖心.建筑环境学[M].北京:中国建筑出版社,2005.
- [3] KOCH W, B H JENNINGS, HUMPHREYS C M. Environmental study. II. Sensation response to temperature and humidity under still air conditions in the comfort range[J]. ASHRAE Transactions, 1960,(66): 264-287.
- [4] 徐昆仑.低湿对人体舒适感影响的实验研究[D].重庆:重庆大学,2017.
- [5] 袁萌,王彦淞.室内空气温湿度对人体热舒适性影响的实验研究[J].建筑节能,2014,42(8):17-20.
- [6] 吴金洪,金才富.低空气湿度对空调车厢热舒适性的影响[J].城市轨道交通研究,2007,(3):66-67.
- [7] 李金梅,朱鸣,李强,等.环境温湿度对人体静电电位影响的实验研究[J].消防科学与技术,2014,33(12):1370-1373.
- [8] 任召峰.静电危害及防护[J].现代电子技术,2010,33(21): 203-206.
- [9] 严汉彬,丁力行.控制空调系统微生物污染的温湿度条件分析[J].制冷与空调,2011,11(2):14-17.
- [10] 夏中亮.洁净手术室空调系统及室内气流组织数值模拟研究[D].合肥:合肥工业大学,2007.
- [11] WYON D P, FANG L, LAGERCRANTZ L, et al. Experimental Determination of the Limiting Criteria for Human Exposure to Low Winter Humidity Indoors (RP-1160)[J]. HVAC&R Research, 2006,12(2):201-213.
- [12] 空气调和卫生工学会.空气调和卫生工学便览[M].日本:空气调和卫生工学会出版社,1981
- [13] LOWEN A C, MUBAREKA S, STEEL J, et al. Influenza Virus Transmission Is Dependent on Relative Humidity and Temperature [J]. PLOS Pathogens, 2007,3(10):e151.
- [14] 华泽钊,李云飞,刘宝林.食品冷冻冷藏原理与设备[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [15] 罗云波.园艺产品储藏加工学[M].北京:中国农业大学出版社,2001.
- [16] 龚磊,王前进.舰船蔬果保鲜设计研究[J].船舶,2019, 30(3):122-127.
- [17] 宋书立,张祖民.蒸汽加湿的蒸汽尾迹长度与控制方法刍议[J].洁净与空调技术,2008,(1):32-34.
- [18] 刘哲,刘泽勤,赵航宇.组合式空调机组加湿器喷杆安装位置和喷嘴朝向对加湿效果的影响研究[J].流体机械,2017,45(8):59-63.
- [19] 盛健,向振之,张华,等.恒温恒湿箱定频制冷压缩机吸气喷液实验研究[J].低温与超导,2019,47(2):74-78.
- [20] 孙静,冯伟,程勤阳,等.农产品产地批发市场工程技术集成方法[J].农业工程学报,2014,30(16):334-340.
- [21] 张正一,郑群,张伟.N6135柴油机进口加湿技术中压气机的性能研究[J].热能动力工程,2003,(6):605-608,651.
- [22] 马昭胜.船用柴油机增压加湿装置的设计[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2008,27(6):1151-1154.
- [23] 金昕祥,张国防,杜帅华,等.超声波加湿空调器加湿装置的设计与试验[J].低温与超导,2020,48(5):80-86.
- [24] 霍军亚.超声波加湿在空调器湿度控制中的应用[J].日用电器,2012,(8):61-64.
- [25] 张博博,席战利.加湿均匀性实验研究[C]. proceedings of the 2017年中国家用电器技术大会,2017.
- [26] 袁琪,肖德玲,岳锐,等.加湿技术在家用空调中的应用探讨[J].洁净与空调技术,2011,(3):47-50.
- [27] 胡松涛,管宏宇,刘国丹,等.某烟厂卷接包车间湿度控制方案及节能策略研究[J].暖通空调,2017, 47(9):115-119.
- [28] RYLANDER R P H. Airborne endotoxins and humidifier disease[J]. Clinical & Experimental Alerlgy, 1984,14(1): 109-112.
- [29] KIM K-H, KABIR E, JAHAN S A. Airborne bioaerosols and their impact on human health[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018,67:23-35.
- [30] 叶校圳,林孟琰,曾静,等.湿膜加湿及温湿度独立控制技术在卷烟厂空调系统中的应用[J].烟草科技,2017, 50(2):77-81.
- [31] 蔡芳芳.风机盘管加湿器对房间温湿度影响的研究[D].济南:山东建筑大学,2011.