

# 基于半导体制冷技术的船舶控制空气干燥系统

徐 戈

重庆交通大学 重庆 400074

**摘要:** 船舶空气系统是船舶重要的辅助控制系统之一,通常用于大型设备如主机、发电机等的启动,各种辅机和气动仪表的自动控制、换向、离合器操纵等。控制空气湿度较大,会影响主辅机工作性能,增加装置的维护成本。如今传统船舶主辅机干燥装置存在设备功能单一、对环境不友好、占地面积大、稳定性不好的问题。通过对基于半导体制冷技术的船舶控制空气干燥装置的研究,可以替代传统的压缩制冷技术,提高能源利用率,实现节能减排,与当前我国所倡议的“节能环保,共创美好家园”以及“可持续发展战略”方针一致。

**关键词:** 船舶控制空气干燥装置;绿色环保;节能减排

## 1. 背景

### 1.1 项目背景

船舶控制空气干燥系统是船舶必不可少的辅助设备,而目前船舶制冷干燥技术有着能耗大,干燥速度和效率低,含有制冷剂、设备成本和维修成本高等缺点。因此,船舶制冷干燥技术的升级对我国工业转型升级,建设海洋强国,建设平安绿色畅通高效的水运环境都有着重大意义。半导体制冷片作为特种冷源,可实现控制温室气体和有毒有害气体的排放,具有“节能减排,绿色能源”的优势。

近年来,随着半导体热电制冷材料性能的大幅度提升,半导体制冷剂技术的应用领

域进一步扩大,适用于工作环境温度高、处理负荷大的场合。

基于此我们设计利用半导体的热电制冷来代替以制冷剂为制冷源的机械制冷(如图1)。通过制冷干燥进入主辅机的控制空气,以提高主辅机的工作稳定性和降低故障率。



图1 “半导制冷”船舶控制空气干燥系统示意图

## 2. 系统设计

### 2.1 运行原理

在半导体制冷器的P-N结两端施加直流电压。一端温度下降,形成制冷端,另一端温度升高,形成制热端。如图2系统功能分析图所示,半导体制冷器工作时,湿空气进入半导体制冷器的制冷端,当温度降至露点时结露并排出箱外。同时为增加干燥效果,在制冷端和制热端上均固定连接若有若干个铜质散热翅片。



图2 系统功能分析图

### 2.2 理论计算

系统的制冷量与初始温湿度状态、流量、压力等因素有关。设系统内空气初始状态:进口温度  $t_1=55^{\circ}\text{C}$ ,控制空气压力  $P=0.69\text{Mpa}$ ,容量  $V_c=100\text{m}^3/\text{h}$ 。湿空气的冷却工况分为三个工况:干式冷却工况、析水工况和除湿工况。

#### (1) 饱和水蒸气压力

查焓湿图可得,当温度为  $55^{\circ}\text{C}$ 时,相对湿度为  $55\%$ 。当  $0^{\circ}\text{C} < t < 200^{\circ}\text{C}$ 时,饱和水蒸气压力  $P_s$  与温度  $t$  的函数关系为:

$$\ln P_s = \frac{a_1}{t} + a_2 + a_3 t + a_4 t^2 + a_5 t^3 + a_6 \ln t$$

式中 a 为常数, Ps 为饱和压力 (Pa); T 为温度 (K)。

将 t=55℃ 代入可得  $P_{sa}=1.58 \times 10^4 \text{Pa}$

(2) 含湿量

含湿量 d 是指在含有 1 kg 干空气的湿空气中, 所含有的水蒸气的质量 (通常以克计), 定义式为为

$$d = \frac{m_{vap}}{m_{dry}} \times 10^3$$

根据理想状态方程可得

$$d = \frac{P_{vap}}{R_{vap}T} \div \frac{P_{dry}}{R_{dry}T} = 622 \frac{P_{vap}}{P_{dry}}$$

由于  $P_{dry} = P_b - P_{vap}$  ( $P_b$  为大气压力),  $P_{vap} = \phi P_s$ , 则

$$d = 622 \frac{\phi P_s}{P - \phi P_s}$$

将  $P_{sa}=1.58 \times 10^4 \text{Pa}$  代入上述公式可得湿空气含湿量

$$d_1 = 8$$

(3) 干式冷却工况

湿空气的焓 h 是指 1Kg 干空气和 10-3Kg 水蒸气的质量焓的总和, 取 0℃ 时的干空气和水的焓值为零, 则

$$h_1 = 1.004t_1 + d_1(2501.6 + 1.86t_1)$$

将  $d_1=8$ ,  $t_1=55^\circ\text{C}$  代入湿空气焓值公式, 得  $h_1=75.91 \text{KJ}$ 。

空气体积流量可采用如下计算公式

$$q_v = \frac{v_c (273+t_1) \times 0.1}{(273+20) \times (P+0.1)}$$

将  $V_c=100 \text{m}^3/\text{h}$ ,  $t_1=55^\circ\text{C}$ ,  $P=0.69 \text{Pa}$  代入公式, 可得  $q_v=0.0039 \text{m}^3/\text{s}$ 。

(4) 析水工况

在设计条件中, 我们假设最大工作压力为  $P_{sc}$  压力降为 0.02Mpa

$$P_{sb}=8.71 \times 10^2 \text{Pa}$$

$$P_{sc}=1.02 \times 10^3 \text{Pa}$$

由  $P_{sc}$  可推出露点温度  $t_3=7.3^\circ\text{C}$ , 查焓湿图可得, 当露点温度为  $7.3^\circ\text{C}$  时, 相对湿度  $\phi_2=100\%$ , 所以

$$d_2 = 0.622 \frac{\phi_2 P_{s3}}{P - \phi_2 P_{s3}} = 0.92$$

$$h_2 = 1.004t_2 + 4.19 \times d_2(2501.6 + 1.86t_2) = 9.87 \text{KJ}$$

干式冷却到析水工况过程需要的制冷量

$$Q_c = (h_1 - h_2) \times q \times 1.29 = 335.5 \text{W}$$

(5) 除湿工况

$$P_{sat} = \frac{d_2 \times P}{622(\phi_2 + d_2 \phi_2)}$$

由 psd 可推出露点温度  $t_4$  为  $45^\circ\text{C}$ , 查焓湿图可得, 当露点温度为  $45^\circ\text{C}$  时, 相对湿度  $\phi_3=11\%$ 。

因此可得除湿过程需要的制冷量

$$h_4=47.58 \text{KJ}。$$

$$Q_h=191.4 \text{W}。$$

综上所述, 总制冷量  $Q = Q_c - Q_h = 144.0 \text{W}$ 。

2.3 实验分析

本设计利用实验和其他辅助器件设备, 对实际运行的半导体制冷系统以及半导体制冷片进行了相应的工况研究。本实验目的是为了研究在不同电流值大小下的恒温泡沫箱内的制冷片工作的冷端温度值与热端温度值随时间的变化情况, 同时得出泡沫箱在各工况下的制冷量大小。

本实验平台主要有两台稳压直流电源、恒温泡沫箱、湿温度计以及两台电子温度计、TEC1-12708 型半导体制冷片、散热器、风冷风扇等部分组成。通过改变直流电流的大小设计了 9 种工况如表 3, 并检测制冷片相应的电压值、冷端温度值和热端温度值随电流值的变化情况。

工况序号	环境湿度	环境温度	工作电压	工作电流
工况一	88%RH	240.2℃	1.7V	0.5A
工况二			3.1V	1A
工况三			4V	1.5A
工况四			5.4V	2A
工况五			2.5V	7A
工况六			3V	8.4A
工况七			3.5V	10A
工况八			4V	11.2A
工况九			4.5V	12.5A

表 3 工况条件表

现将半导体制冷系统的冷端温度和热端温度在九种工况下随时间的变化情况绘制在同一图中, 如图 4 所示。

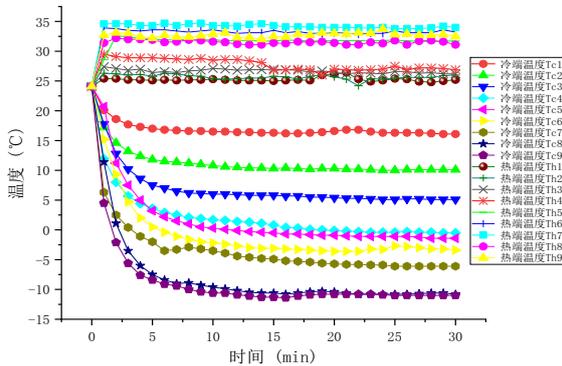


图 4 工况温度变化图

通过数据整理得到电流与制冷量的变化曲线图，如图 5 所示。从图中可以看出冷端温度曲线下落的幅度会随着电流值的增大而增加，速率也会加快，且最终稳定的冷端温度值也随着电流的增加而增加。

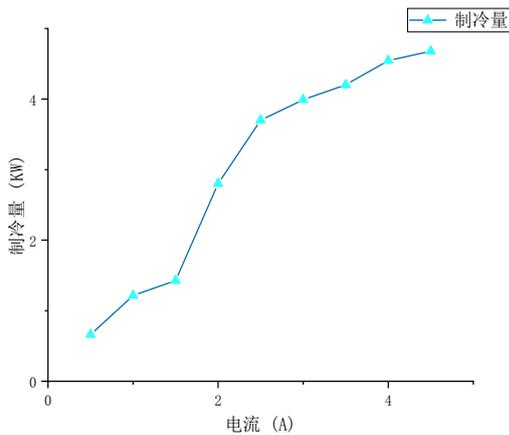


图 5 制冷量与电流关系图

#### 2.4 整体结构设计

整合设计条件与实验结果分析，最终设计了如下图 7 的设计图纸。本装置主要由装置主体、半导体片、翅型散热片、绝热固定板、强力散热风扇、密封盖板及传感器组成。其中壳体与散热翅片及绝热固定板构成系统的制冷区，下方设置冷凝管道以便冷凝水及时排除。

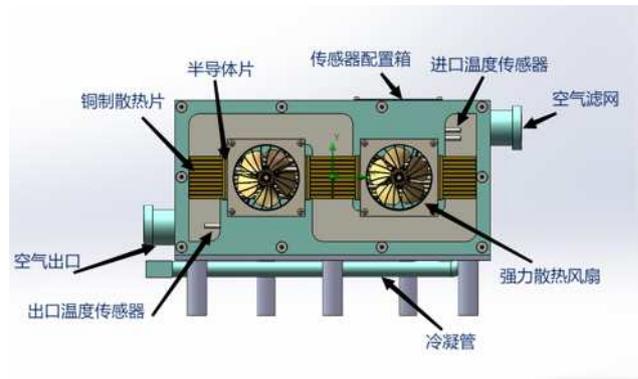


图 6 装置内部结构图

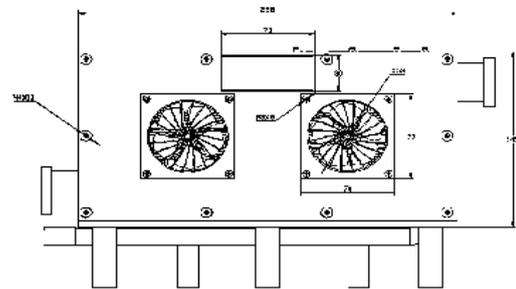


图 7 装置设计图纸

#### 2.5 控制系统设计

由于工况是变化的，当控制空气的流量、温度、湿度发生变化时，所需的制冷量也在发生变化。为了精准控制湿度降低额外能量消耗本设计采用双控制系统进行控制及修正。

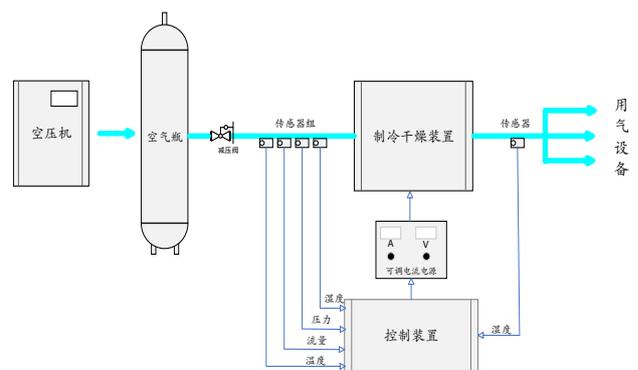


图 8 控制系统流程图

##### (1) 前反馈控制

由图 8 所示，在制冷干燥装置空气进口处安装温度、压力、湿度、流量传感器。当环境发生变化时，传感器将采集的信息传入控制装置。控制装置传出改变电流的信号，通

过改变恒流电源的电流值的大小而达到预期的制冷量。

### (2) PID 后反馈控制

不同的设备对所需控制空气的湿度需求是不同的。如图 8 在制冷干燥装置出口处安装湿度传感器。通过设定目标湿度值, 依托控制装置改变电流值达到预期效果。除此之外, 前反馈对湿度控制未达到预期目标时, 后 PID 后反馈可对其进行修正。

### 3. 性能分析

对半导体制冷干燥装置的冷热端温度、箱内流体速度以及箱内流体的流动情况进行仿真如图 9。

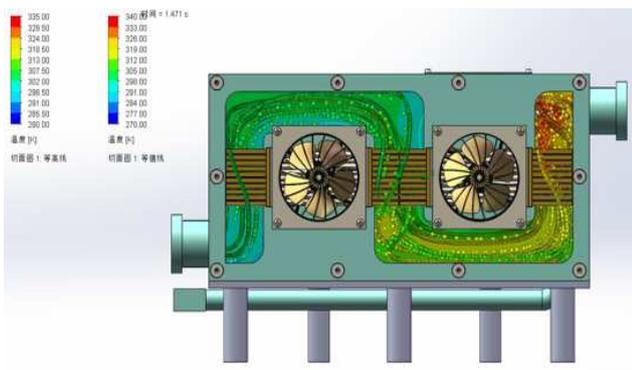


图 9 流体仿真温度切面图

由实验结果可得到当空气分子进入第一个制冷舱室时, 温度发生骤降, 到达第二个通道时, 温差基本达到了 30 度, 制冷效果明显, 到达最后一个通道时, 已达到露点温度 7.3 度。空气中的水分会析出形成冷凝水并流进制冷装置下方底板的泄水孔中进入泄水管道排出, 以达到预期干燥效果。

### 4. 创新点

**概念化创新:** 本设计采用半导体制冷干燥技术, 论证实际功耗 144W, 工作过程无排放。在高效制冷干燥的同时, 实现节能减排的目标。

**设计化创新:** 采用双反馈控制系统进行精准湿度控制。对传统干燥装置进行了优化改良, 使设备具有高可靠性且实现自动化控制。

**结构创新:** 首次提出无制冷剂, 无干燥剂, 无运动部件的船舶控制空气干燥装置。能有效避免化学物质对人体以及环境的伤害。同时半导体具有小巧轻便的特点, 极大降低了占地面积。无运动部件也减少了维护成本和噪音。

### 参考文献

- [1] 沙之杰. 低碳经济背景下的中国节能减排发展研究 [D]. 西南财经大学, 2011.
- [2] 范玉斐, 张鸣, 郑学林 (上海海事大学, 上海 201306)
- [3] 张宏祥. 半导体冷热风机的数值模拟研究 [D]. 南京: 东南大学, 2008
- [4] 宋福元, 张富珍, 孙宝芝 (哈尔滨工程大学 动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)
- [5] 向婉成. 过程控制调节装置 (第 4 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [6] 李晓波 方玲 朱志华 廖兰兰 关于半导体制冷方法的研究 (湖南师范大学物理与信息科学学院物理系 长沙 410081)