

船舶空调系统能效评估分析

叶珍霞^{1*}, 黄峙², 余阳², 黄紫莺³, 徐新华^{3#}

¹海装驻武汉地区第二军事代表室, 湖北 武汉

²中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉

³华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年8月19日; 录用日期: 2022年9月7日; 发布日期: 2022年9月14日

摘要

船舶空调系统运行存在大量的能源浪费, 需要研究系统节能运行方案并进行能效评估。本文提出一种船舶空调系统的能效分析方法, 即通过评估船舶空调系统的基础项、规定项、选择项来比较不同节能方案的节能效果。以某有限航区船舶为例, 对该船舶空调系统采取三种不同的节能控制方案, 采用TRNSYS软件模拟三种方案下船舶空调系统全年能耗并计算相对节能率。在相对节能率的基础上, 结合评估结果对不同的节能控制方案进行能效计算, 并进行能效等级标识。该能效评估方法也适用于其他船舶空调系统节能方案。

关键词

船舶空调, 能效评估方法, 基础项, 规定项, 选择项, 能效等级

Analysis of the Energy Efficiency Assessment of Ship Air-Conditioning System

Zhenxia Ye^{1*}, Zhi Huang², Yang Yu², Ziyi Huang³, Xinhua Xu^{3#}

¹2nd Military Representative Office of Department of Naval Equipment in Wuhan, Wuhan Hubei

²China Ship Development and Design Center, Wuhan Hubei

³Department of Building Environment and Energy Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Aug. 19th, 2022; accepted: Sep. 7th, 2022; published: Sep. 14th, 2022

Abstract

It is necessary to study energy-saving operation schemes and evaluate the energy efficiency due to

*第一作者。

#通讯作者。

the large amount of energy consumption in the operation of ship air conditioning system. This study presents an energy efficiency evaluation method for the ship air conditioning system, which compares the energy efficiency of different energy-saving operation schemes by evaluating the basic items, prescribed items and optional items of the ship air conditioning system. Taking a ship in a limited navigation region as an example, three different energy-saving operation schemes are adopted for the ship air conditioning system. TRNSYS software was used to simulate the annual energy consumption of the ship air conditioning system under these three schemes, and the relative energy saving rate was calculated. Based on the relative energy saving rate, the energy efficiency of these three different energy-saving operation schemes was calculated according to the evaluation results, and the energy efficiency grade was ranked. This energy efficiency evaluation method can also be applied to other energy-saving schemes of ship air conditioning systems.

Keywords

Ship Air Conditioning, Energy Efficiency Evaluation Method, Basic Item, Prescribed Item, Optional Item, Energy Efficiency Grade

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

航运界和造船界的目标是打造绿色船舶和实现绿色航运，然而船舶装置的能耗一直处于较高水平，是一个亟待解决的问题[1] [2]。船舶空调系统属于船舶的子系统之一，是保障船舶稳定运行，船员正常活动的系统[3]。船舶空调系统属于船舶装置中能耗比重较大的装置，其能耗占船电设备总能耗的 20% 以上[4]。而航行过程中，船舶空调系统大约 85% 以上时间处于部分负荷工况下[5]。空调系统设备通常采用恒转速、恒功率运行的方式，造成了大量能耗浪费。针对这种情况，国内外学者提出了不同的船舶空调系统节能运行方案[6] [7]，为比较这些节能方案的差异并更直观地量化其节能效果，需制定相关的船舶空调系统的能效评估方法与体系。

目前，国内已有很多关于船舶能耗评估的研究方法[8] [9] [10]，文献[8]通过建立船舶能耗评估的标准云物元模型得到船舶能耗综合评估结果，文献[9]结合数据挖掘技术建立了船舶能耗数据库，为船舶能耗评估提供了新方法。文献[10]通过内河船的实测数据对船舶的运行功率进行了艾尔法修正。此外，国外船舶能耗评估也存在许多研究方法[11] [12]。文献[11]通过船舶软硬件结合，验证以 IT 为基础的船舶节能技术。文献[12]利用韩国的某船舶实际运营案例展开研究，分析了能效评级指数的开发及应用。上述的研究对船舶空调系统能效评估的研究很少，提出的理论算法也不太适用于评估船舶空调系统在不同控制方案下运行时的节能效果。

国内外当前已有诸多建筑能效评估体系[13] [14] [15] [16]，比如 BREEAM 评价体系，LEED 评价体系等。国内也制定了建筑能效标识技术标准，用以对建筑的能效等级进行技术划分。基于上述能效评估体系，陆上建筑在运行阶段的空调系统能效评估方法已得到广泛应用[17] [18]。文献[17]通过对集成式制冷机房设计进行分析，提出了制冷机房的能效评价方法。文献[18]利用有限时间的热力学评价方法对空调系统进行能效评估。基于上述研究现状，本文关于船舶空调系统能效评估方法的研究可以借鉴现有陆上建筑在运行阶段的能效评估方法。

陆上建筑能效标识技术标准[16]根据不同的评估项目(基础项、规定项以及选择项等)确定建筑系统节能效果并划分了不同的能效等级。该标准可用于已投入运行的建筑。基于上述技术标准,本文建立了一套用于船舶空调系统的能效评估方法,用以明确船舶能效评估内容、流程以及能效标识方法。进一步以某有限航区船舶为对象,采用 TRNSYS 软件模拟该船舶空调系统采取不同控制方案时(即测评船舶)的能耗,与常规控制时(即参考船舶)的能耗,进一步应用上述船舶空调系统的能效评估方法,对不同控制方案的系统能效进行测评。

2. 船舶空调系统能效评估内容

本文主要研究的船舶空调系统在运行期间的能效评估(能效测评),主要内容是计算与检测系统能耗及效率等指标,并确定其能效等级水平。船舶空调系统测评内容包括基础项、规定项、选择项。

按照国家现行有关船舶节能设计标准或设计手册的要求,分别计算参考船舶和需要测评船舶在全年范围内在同一航线上的空调能耗水平(以单位面积空调能耗为参考指标)。其中,测评船舶为采用空调系统节能控制方案的船舶,参考船舶为采用常规空调系统控制方案(设备工频运行)的船舶;测评船舶与参考船舶在船体形状、大小以及空间划分等参数上应该是相同的,且围壁等热工性指标均满足国家现行有关船舶节能设计标准或设计手册的要求。

基础项规定进行船舶空调系统能效测评基础项计算时,需考虑船舶围壁和船舶内扰等因素、相对节能率方法、计算测评船舶沿航线全年空调能耗时考虑的相关条件、负荷计算方法、机电系统能耗计算要求等共 7 项。评价的依据以船舶竣工验收资料及现场检测报告为主[19],并且通过能耗软件对船舶全年沿航线空调能耗进行模拟,相对节能率 η 计算公式如式(1)所示,其中 B_0 、 B_1 分别为参考船舶以及测评船舶、全年在同一航线下的单位面积空调能耗(kWh/m²)。

$$\eta = \frac{B_0 - B_1}{B_0} \times 100\% \quad (1)$$

规定项是指除基础项外,按照国家现行有关船舶节能设计标准或设计手册的要求,船舶围壁及空调系统必须满足的项目。包括船舶舱室外窗气密性、外围壁热桥部位保温措施、窗框与围壁之间的密封方法、冷热源形式、冷水(热泵)机组制冷性能系数、单元式机组能效比、风机单位风量耗功率、循环水泵耗电输热比、室温调节功能、水力平衡措施等。规定项共设 12 项,其中船舶围壁 3 项,冷热源及空调系统 9 项。

选择项为以上基础项及规定项规定以外的,有关船舶节能标准的用能系统和工艺技术给予的额外加分项目。根据建筑能效标识技术标准[16]的选择项的赋分原则并结合船舶空调系统特性与实际的控制现状等,确定船舶空调系统能效评估选择项赋分标准,具体如下:可再生能源的利用(加 15 分)、自然通风优化技术(加 5 分)、冷热电联供技术(加 5 分)、新风预热/预冷技术(加 10 分)、变风量节能控制调节(加 10 分)、变水量节能控制调节(加 10 分)、全新风或可变新风比调节技术(加 10 分)、供回水温差大于 5℃ (加 5 分)、监控技术(加 10 分)、分项和分区域计量与统计(加 10 分)以及其他新型环保节能措施的应用(加 10 分)等。

3. 系统能效评估流程与能效标识等级

船舶空调系统能效评估流程如图 1 所示。船舶空调系统的能效评估流程在船舶资料以及有关信息完备的基础上展开,首先需要满足船舶设计相关标准等规定项要求,其次计算参考船舶及测评船舶的系统全年能耗并计算基础项的相对节能率,再检查选择项的加分项目,最终确定能效等级并进行标识。测评内容中各个分项的要求及其标识等级划分依据图表 1 所示。

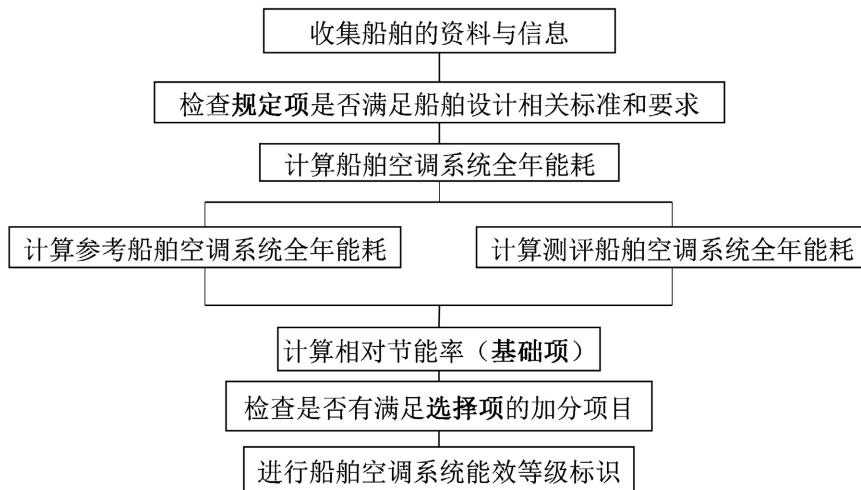


Figure 1. Flowchart of energy efficiency assessment of ship air-conditioning system
图 1. 船舶空调系统能效评估流程图

Table 1. Energy efficiency label grade of ship air-conditioning system
表 1. 船舶空调系统能效标识等级

| 标识等级 | 基础项(η) | 规定项 | 选择项 |
|------|-------------------|------------------------|------------------------|
| ☆ | $0 \leq \eta < a$ | 国家现行有关船舶节能设计标准或设计手册的要求 | 满分 100 分, 得分超过 50 分加一星 |
| ☆☆ | $a \leq \eta < b$ | | |
| ☆☆☆ | $\eta \geq b$ | | |

注: 基础项 η , 即相对节能率。a, b 分别为节能率参数, 本文参数取值参考民用建筑 $a = 15\%$, $b = 25\%$ 。

4. 案例分析

本文以某有限航区船舶空调系统为能效评估对象, 应用本文提出的船舶空调系统的能效评估方法, 通过评估船舶空调系统的基础项、规定项、选择项来比较分别为定水量变风量控制、变水量定风量控制与风水联动控制运行方案等三种不同控制方案的节能效果, 进一步确定测评船舶在不同控制方案下的系统能效等级并进行能效星级标识。

4.1. 案例船舶概况

本文研究船舶的长、宽、高分别为 88.0 m、12.2 m、12.5 m, 全船共计 36 个舱室。从上到下分别由驾驶甲板、起居甲板、首楼甲板、主甲板、平台甲板、内底、舱底构成。驾驶甲板层高 2.40 m, 仅有驾驶室; 起居甲板层高 2.40 m, 含二副室、指挥长室、船长室及机要员室; 首楼甲板层高 2.55 m, 含大副室、三副室、会议室及医务室等; 主甲板层高 2.6 m, 为船舱卧室以及空调设备间; 平台甲板层高 2.55 m, 此层甲板除机舱和设备间外, 其他舱室主要用来存放食物及生活用品。

该船舶为有限航区的船舶, 船舶于 7 月 7 日 13:00 时从三亚出发, 以 16 海里/时的航速驶往青岛, 于 7 月 11 日 13:00 时抵达青岛。将连续的航线分解为 9 个典型航区, 每个航区选择一个典型城市的对应时间段内的气象参数作为该航区时间点气象参数参考点, 这 9 个典型城市如图 2 所示, 从北至南。其中青岛海区需要巡航一周, 时间从 7 月 11 日至 7 月 18 日。随后该船舶从青岛驶回三亚, 于 7 月 22 日 15:00 时抵达三亚, 并在三亚巡航并休整至 9 月 7 日 16:00 时。

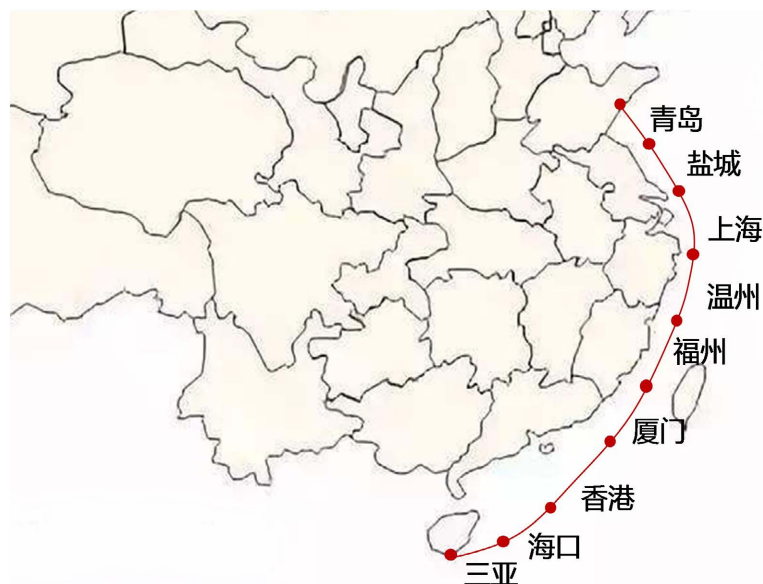


Figure 2. Partition map of typical sailing area with single route
图 2. 单次航线典型航区划分图

该船舶空调系统共包含七个空调区。其中，空调区一~二的舱室均采用风机盘管末端；空调区三、五~七的舱室采用全空气末端；空调区四的部分舱室为全空气的末端，部分舱室则采用风机盘管末端。全船采用 1 台冷水机组、1 台热水锅炉、1 台冷冻水泵、1 台冷却水泵(采用海水冷却)、13 台风机盘管与 5 台组合式空调器。

4.2. 空调系统能耗模拟

本文采用 TRNSYS 软件搭建该有限航区船舶空调系统能耗模拟平台，模拟参考船舶与测评船舶全年沿航线的空调系统能耗。该平台主要包括船舶舱室模型、舱外天气参数、空调系统模型及控制模型。船舶舱室模型中各舱室的形状大小、围护结构(围壁、甲板、窗)、朝向、人员密度、照明功率及电气设备功率等参数均按照实际情况设置。舱外天气参数是通过提取与船舶航线在时间及空间上相对应的各城市气象参数而形成的。空调系统模型包括冷源系统模型及末端系统模型，其中冷源系统模型包括冷水机组、水泵及分集水器等相关设备模型、末端系统包括风机、盘管、水阀、混风箱等设备模型，详细模型详见文献[20]。所有的系统设备参数设置根据设备实际参数确定。控制模型采用 PID 控制算法，负责进行空调系统控制调节，从而实现测评船舶空调系统在不同控制方案下的空调系统能耗模拟。

参考船舶空调系统采用常用的定风量定水量控制方案。测评船舶空调系统采用三种控制方案，分别为定水量变风量控制、变水量定风量控制与风水联动控制运行方案(图 3)。

4.2.1. 船舶典型航线负荷分析

参考船舶全船舱室的冷负荷变化如图 4 所示。船舶的显热负荷主要包括新风显热负荷、船壁导热负荷及辐射负荷，航行过程的显热负荷变化趋势明显，并主要随着室外气象参数变化，其中在白天由于温度上升以及太阳辐射增强，因此产生了数个负荷峰值，而晚上由于室外温度下降，负荷处于较低水平且变化相对平缓。潜热负荷主要为人员负荷和新风潜热负荷，因此波动相对较缓和。整个航行过程中总负荷最大差值高达 127.81 kW，这说明传统的稳态负荷计算方法不适用于船舶，船舶空调若按稳态方法计算会导致设计与实际需要脱节。

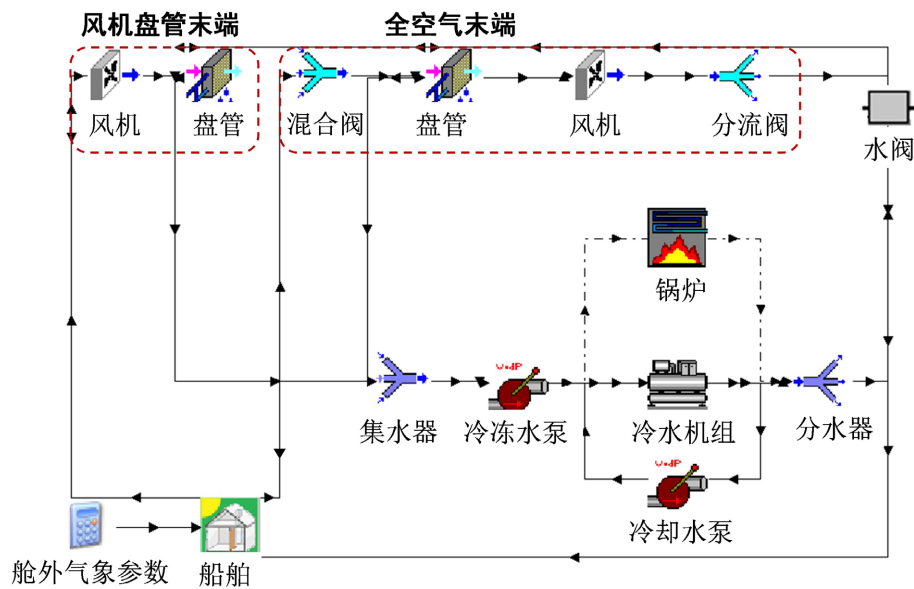


Figure 3. Schematics of the simulation platform of the ship air-conditioning system
图 3. 船舶空调系统模拟平台示意图

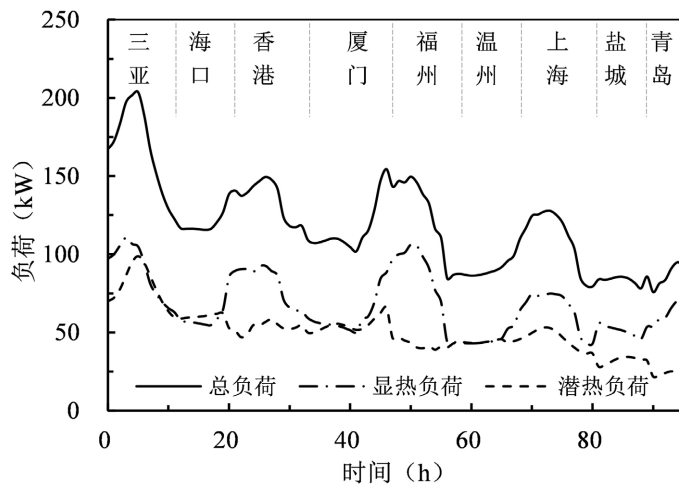


Figure 4. Cooling load profiles of the ship
图 4. 全船舱室冷负荷变化图

进一步以该船舶的会议室作为典型舱室进行分析，计算该典型舱室的各项负荷并分析各项负荷变化情况，负荷变化趋势如图 5 所示。该会议室位于船舶首楼甲板层，总面积为 84.6 m²。会议室采用全空气空调系统，最低新风量应按照不小于空调总风量的 40% 计算。会议室总负荷变化情况如图 5 所示。图 5 表明会议室冷负荷的变化情况与全船负荷变化情况较类似。会议室总负荷随着不同航区的气候变化而变化非常明显，在三亚航区(7 月 7 日 18:00)时冷负荷达到最大，最大值为 26.37 kW，此时舱外天气温度、相对湿度为 35.0℃、77.5%，青岛航区(7 月 11 日 7:00)时冷负荷最小，最小值为 6.64 kW，此时舱外天气温度、相对湿度为 20.4℃，85.0%。整个航行过程中总负荷最大差值达到 19.73 kW。

4.2.2. 参考船舶空调系统舱内环境与能耗结果

参考船舶空调系统采用基本控制方案(即工频控制)时，舱内温度失控。以会议室舱室作为典型舱室，

舱内环境如图 6 所示。在船舶行驶过程中,会议室内空气温度(即图中回风温度)波动较大,温度平均偏差达到 1.7。最高温度为 26.9℃,最低温度为 20.2℃,平均温度为 22.8℃,说明船舶空调系统在基本控制方案下运行会导致舱内出现冷量过剩现象,不仅造成冷量浪费还会影响舱内人员舒适度。

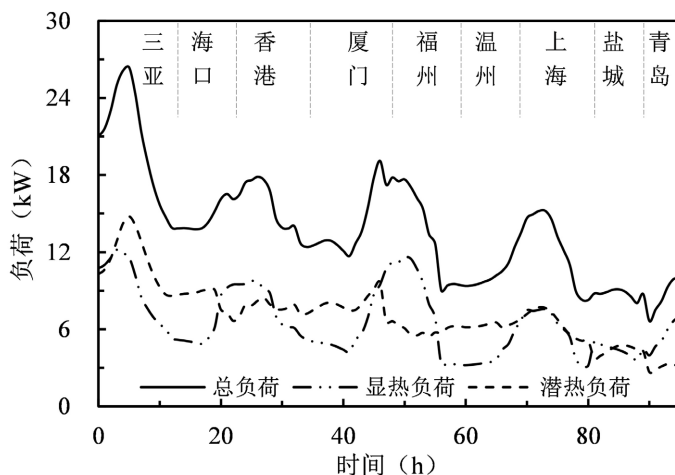


Figure 5. Cooling load profiles of the meeting cabin room
图 5. 会议室舱室总负荷变化图

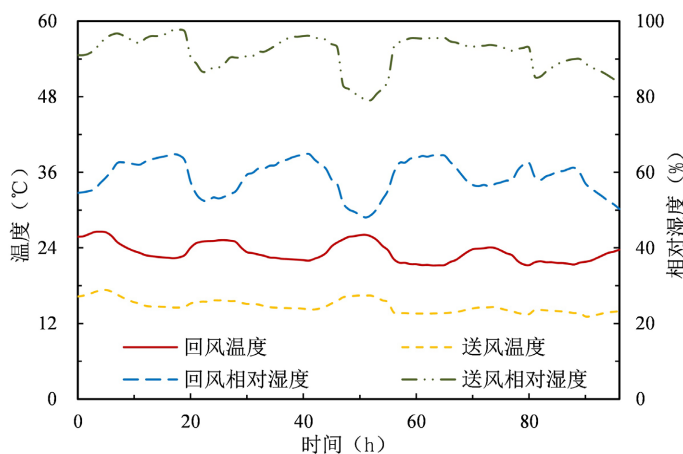


Figure 6. Environment performance of the typical cabin room with the basic control scheme
图 6. 典型舱室舱内环境热特性(基本控制方案)

参考船舶全年沿航线空调能耗如表 2 所示。参考船舶空调系统采用工频运行方式,进行能耗模拟时,主要计算参考船舶空调系统中冷水机组、冷水泵、热水泵及风机等设备全年能耗。热源采用热水锅炉,主要通过燃烧燃气产生热能,消耗的电功率较小,故忽略不计。船舶全年基本都处于温度较高的亚热带季风气候区,供热季较短,故供热季空调系统能耗远低于供冷季。

4.2.3. 测评船舶空调系统舱内环境与能耗结果

测评船舶空调系统采用了定水量变风量控制、变水量定风量控制与风水联动一体化控制运行方案等三种不同的空调控制方案。其中定水量变风量控制方案根据舱室的回风温度的高低控制调节末端送风机风量,使得舱室的回风温度与设计温度保持一致,而末端设备的水阀不进行调节。变水量定风量控制方

案与定水量变风量方案相反,根据舱室的回风温度控制盘管的水阀开度对末端冷水水量进行调节,使得舱室的回风温度与设计温度保持一致,而末端设备的风机运行过程不做调节。风水联动一体化控制方案同时控制末端送风量及冷冻水流量。根据末端舱室的送风温度高低对冷冻水水阀开度进行调节,使得送风温度与设定温度保持一致,而根据舱室的回风温度高低对末端风机送风量进行调节,使得回风温度与设计温度保持一致。

Table 2. Yearly energy consumption of the air-conditioning system of the reference ship
表 2. 参考船舶空调系统全年能耗

| 参考船舶 | 供热季能耗(kWh) | | | 供热季能耗(kWh) | | 总能耗(kWh) |
|------|------------|----------|----------|------------|---------|----------|
| | 冷水机组 | 冷水泵 | 风机 | 热水泵 | 风机 | |
| 工频运行 | 1104763.6 | 156419.2 | 102448.0 | 1854.5 | 11012.2 | 524365.8 |

测评船舶在三种控制方案下全年沿航线空调能耗如表 3 所示。结果表明,测评船舶空调系统采用控制方案后全年能耗有所下降。相对于参考船舶,测评船舶在变风量控制方案下的风机全年能耗降低约 65%,水泵全年能耗不变,总能耗降低约 19%;测评船舶在变水量控制方案下的风机全年能耗不变,水泵全年能耗降低约 26%,总能耗降低约 17%;测评船舶在风水联动一体化控制方案下的风机全年能耗降低约 48%,水泵全年能耗降低约 25%,总能耗降低约 26%。

Table 3. Yearly energy consumption of different control schemes
表 3. 不同控制方案下的全年能耗

| 测评船舶 | 供热季能耗(kWh) | | | 供热季能耗(kWh) | | 总能耗(kWh) |
|----------|------------|----------|----------|------------|---------|----------|
| | 主机 | 冷水泵 | 风机 | 热水泵 | 风机 | |
| 定水量变风量控制 | 227195.0 | 156419.2 | 36652.1 | 1854.5 | 2646.0 | 424766.8 |
| 变水量定风量控制 | 202813.3 | 116923.3 | 102448.0 | 750.8 | 11012.2 | 433947.6 |
| 风水一体化控制 | 211641.5 | 117690.4 | 56168.4 | 1351.9 | 2717.5 | 389569.7 |

4.3. 系统能效评估结果与分析

船舶空调系统的各项指标评估可按照评估流程进行,根据设计可以确定参考船舶与测评船舶均满足规定项要求。完成参考船舶与测评船舶的全年空调系统能耗模拟后,可根据式(1)计算测评船舶空调系统在三种控制方案下的相对节能率,并按照表 1 中的能效等级标识方法评定基础项星级。测评船舶在变风量控制方案下的相对节能率为 19%,得 2 星;在变水量控制方案下的相对节能率为 17%,得 2 星;在风水联动一体化控制方案下的相对节能率为 26%,得 3 星。

最后检查是否有满足选择项的额外加分项目,测评船舶空调系统满足的选择项包括变风量节能控制调节(加 10 分)、变水量节能控制调节(加 10 分)、供回水温差大于 5℃ (加 5 分),故选择项总得分为 25 分,未超过能效等级标识所要求的 50 分,无法进行加星。因此在进行选择项测评后,最终三种控制方案的能效等级标识均与基础项星级相同,能效等级标识分别为 2 星、2 星、3 星,如表 4 所示。

5. 结论

船舶空调系统能效评估是基于目前民用建筑能效评估方法提出的一种以船舶空调系统运行能耗量或节能率为对象的评估活动。通过评估船舶空调系统在不同节能控制方案下的基础项、规定项、选择项指标,

Table 4. Energy efficiency label grade of the air-conditioning system of the ship to be assessed
表 4. 测评船舶空调系统能效标识等级

| 测评船舶 | 能效测评内容 | | | 能效等级标识 |
|----------|--------|-----------|-------|--------|
| | 基础项 | 规定项 | 选择项 | |
| 定水量变风量控制 | ☆☆ | 均满足国家现行有关 | 无额外加星 | ☆☆ |
| 变水量定风量控制 | ☆☆ | 船舶节能设计标准或 | 无额外加星 | ☆☆ |
| 风水一体化控制 | ☆☆☆ | 设计手册的要求 | 无额外加星 | ☆☆☆ |

确定其所处节能等级水平。以某有限航区船舶为例,分别对该船舶空调系统采取定水量变风量控制、变水量定风量控制及风水联动一体化控制方案。采用 TRNSYS 模拟软件进行能耗模拟,模拟参考船舶在常规控制方案下,及测评船舶在三种不同控制方案下的全年空调能耗,并对系统进行能效评估以及能效等级标识。模拟结果表明:测评船舶在定水量变风量、变水量定风量以及风水联动一体化控制方案下的相对节能率分别为 19%、17% 以及 26%,能效标识等级分别为 2 星、2 星以及 3 星。

参考文献

- [1] 朱元清. 绿色船舶及其能源动力技术发展[J]. 船舶工程, 2021, 43(3): 13-19.
- [2] 孙峰. 我国绿色船舶发展展望[J]. 船海工程, 2019, 48(3): 1-4+9.
- [3] 王帅, 方勇. 船舶空调通风系统卫生学要求[J]. 船海工程, 2018, 47(6): 102-104+107.
- [4] 黄伟稀, 陈文华, 何涛, 郝夏影. 船用变风量空调系统调控技术研究综述[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(9): 1-6.
- [5] 慕清浩. 船舶空调系统变频调节的节能性研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [6] Willison, G.F. (2014) Comparative Analysis of Variable Primary Flow Chilled-Water-Plant of Ship Air Conditioning System. *Architectural Engineering*, **6**, 10-13.
- [7] 郭俊杰. 船用变风量空调系统的运行特性及其送风控制研究[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 集美大学, 2010.
- [8] 陆虎. 基于云物元分析理论的船舶能耗评估[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(4): 61-64.
- [9] 邓小玉. 基于数据挖掘技术的船舶能耗评估系统建模[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 集美大学, 2016.
- [10] 王曦, 陈庆任, 张伟, 喻露. 珠江闽江船舶航速预报算法开发及实船验证[J]. 船海工程, 2017, 46(4): 46-49.
- [11] Ja, Y.Y. (2016) Energy Efficiency Evaluation of IT Based Ship Energy Saving System-(2): Ship Test Results. *Journal of Navigation and Port Research*, **40**, 165-171. <https://doi.org/10.5394/KINPR.2016.40.4.165>
- [12] Nam-kyun, I.M., Choe, B., Park, C.-H. 基于 SEEMP 的船舶营运能效评价指数的开发及应用: 韩国某案例研究[J]. 船舶与海洋工程学报: 英文版, 2019, 18(2): 185-194.
- [13] Liu, C.X., Wang, F. and MacKillop, F. (2020) A Critical Discussion of the BREEAM Communities Method as Applied to Chinese Eco-Village Assessment. *Sustainable Cities and Society*, **59**, Article ID: 102172. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102172>
- [14] Li, W.L., Fang, G.Y. and Yang, L. (2021) The Effect of LEED Certification on Office Rental Values in China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **45**, Article ID: 101182. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101182>
- [15] Liu, L. and Xu, L. (2014) Energy-Saving Technical Measures of German Low-Energy Buildings. *Applied Mechanics and Materials*, **507**, 511-514. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.507.511>
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 288-2012 建筑能效标识技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [17] 李向东, 于晓明, 陈朝晖. 集成式制冷机房设计与能效评价[J]. 暖通空调, 2021, 51(S2): 36-42.
- [18] 陈飞虎, 廖曙光, 王程. 空调系统能效的有限时间热力学评价方法及算例[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(6): 57-59+56.
- [19] 王沁芳, 陈立岗, 许鸣. 我国建筑能效测评标识的研究与应用[J]. 砖瓦, 2012(3): 44-46.
- [20] 黄紫莺. 船舶空调系统综合能效评估技术研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.