

基于改进废热利用和轴带发电的船舶轮机节能减排技术研究

王从章

(中远海运船员管理有限公司广州分公司, 广东 广州 510000)

摘要: 针对现有船舶航行时废热利用效率较低的问题。对传统的轮机废热发电系统进行改进, 将废气锅炉、废气透平以及蒸汽透平结构相结合, 并在轮机主轴上安装轴带发电机, 改进轴带发电并网控制系统。实验表明, 双压蒸汽发电, 比单压蒸汽发电电量高 954kW, 双压蒸汽发电加废气发电的组合发电量比优化前高 1731kW, 能效设计指数比未优化时低 6.9。由此可得, 研究能够有效提升船舶的燃料利用率, 提升节能减排效果。

关键词: 废热利用; 轴带发电; 轮机; 节能减排; 热力循环

中图分类号: U676.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2025) 05—0071—04

1 引言

中国的海洋贸易最早出现在秦汉时期, 主要是通过近海帆船往来于邻近的朝鲜、日本和越南等地。随着科技水平和造船技术的不断发展, 海洋贸易已经在当今世界的经济中占据了极其重要的地位, 通过促进全球资源的优化配置, 逐步推动全球经济发展^[1]。海洋运输在大宗货物的运输上, 具有成本低、效率高以及覆盖面广等优势, 还能够带动航运服务、港口以及船舶制造等产业的发展, 形成完整的产业链。全球海运贸易量在持续增长, 在 2024 年底贸易量同比增长 2.2%, 达到了 126 亿吨, 其中中国的海洋货运量为 45.77 亿吨, 占货运总量的 36.33%^[2]。虽然海洋运输具有众多优点, 但同时也存在速度慢, 受自然条件影响大以及污染较为严重等问题。远洋货轮的燃料一般为重油, 虽然价格较低, 但具有较高的硫含量, 对环境和人体健康危害严重, 以 40 万吨的货轮为例, 全速行驶一天的油耗达到 79.2 吨, 能够产生 3.115 吨二氧化碳和二氧化硫、粉尘以及气溶胶等其它污染物^[3]。中国已经推出了《水运“十四五”发展规划》, 支持航运行业的转型升级和污染治理, 同时, 随着造船行业的竞争日益激烈, 船舶的节能减排技术就成为企业的核心竞争力之一。因此, 研究提出了基于改进废热利用和轴带发电的船舶主机节能减排技术, 创新地对传统的主机废热发电系统进行改进, 将废气锅炉、

废气透平以及蒸汽透平结构相结合, 采用双压蒸汽发电代替单压蒸汽发电, 进一步提升能量利用率, 在主机主轴上安装轴带发电机, 并改进轴带发电并网控制系统。研究旨在提升成本的燃料利用率, 加强节能减排效果, 减少环境污染。

2 大型船舶的轮机节能减排技术研究

2.1 基于改进废热利用的轮机节能减排研究

针对大型船舶的主机废热利用技术, 早在 20 世纪 90 年代就有公司开始研发, 到 2005 年, 研发出的动力涡轮机最大能源回收率能够达到 10%, 每年能够节约数千吨燃油。船舶主机的废热利用通常采用透平机械进行, 透平机械是一种具有叶片的动力式流体机械, 通过流体经过叶片产生的相互作用来实现能量的转换。船舶的废热利用可以通过废气和蒸汽两种方式来驱动透平机械, 将主机的热能转换为机械能, 再转换为电能供船舶日常使用。在进行蒸汽透平时, 利用主机余热对循环水进行加温加压, 再经过加热器使其成为过热蒸汽, 增大蒸汽的流量。过热蒸汽进入透平机械内部驱动叶片旋转, 完成能量转移。废气透平是采用废气对工质进行压缩, 利用主机燃烧室的余热对工质进行加热, 使得气体膨胀储存能量, 再将储存的能量转换为机械能。透平机械的做功计算如式 (1) 所示。

$$N = Q \cdot h \cdot \eta \quad (1)$$

式(1)中, N 表示透平机械的做功, Q 表示蒸汽流量, h 表示等熵焓降, η 表示机械的等熵效率。研究根据船舶的大小对废热再利用系统进行改进, 当船舶较小, 消耗的燃料较少时采用废气锅炉结合废气透平机械的组合。此时, 大部分的主机高热废气会传输至废气锅炉中, 通过加热循环水来提高重油舱的温度或者加热生活用水。剩余的废气传输到废气透平机械中, 转换为机械能利用发动机输出为电力, 满足船舶航行时的电力需求。当船舶比较大, 主机产生的废气量和余热较多时, 研究在系统中加入了蒸汽透平机械进一步提升主机余热利用率。该系统的主机高热废气首先进入到废气锅炉中, 产生满足日常需求的蒸汽后, 剩余蒸汽进入蒸汽透平机械内, 与废气透平机械共同驱动叶片转动, 将其转换为电能。废气锅炉、蒸汽透平机械以及废气透平机械的联合系统具体结构如图1所示。

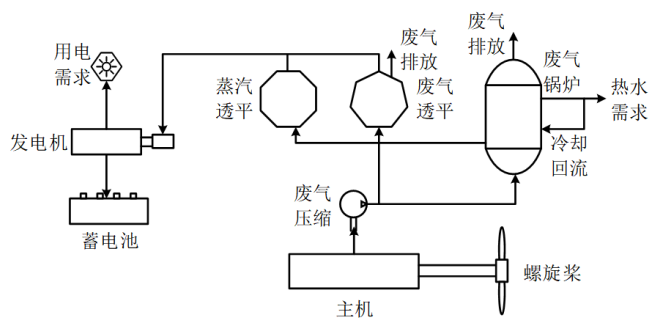


图1 废气锅炉、蒸汽透平机械以及废气透平机械的联合系统具体结构

在图1中, 船舶主轮机运行过程中产生的废气经过压缩后, 大部分进入废气锅炉加热循环水产生蒸汽, 少部分进入废气透平机械驱动涡轮机叶片发电。在废气锅炉中, 产生的蒸汽满足船上日常热水需求后, 剩余的蒸汽进入蒸汽透平机械中, 驱动涡轮机发电。机器发出的电力大部分满足日常用电需求, 少部分则存储在蓄电池中, 在紧急情况下应急使用。针对大型船舶中, 传统的单压蒸汽透平机械存在的效率较低的问题。研究采用双压蒸汽透平进行改进, 允许蒸汽在两种不同的压力下做功, 高压蒸汽先进入高压部分的叶轮做功, 然后排出的蒸汽在经过减压后, 进入低压部分的叶轮继续做功。这种设计可以更有效地利用蒸汽的热能, 提高整个系统的热效率, 且具有更高的灵活性可以适应不同的热源条件。

2.2 基于轴带发电的轮机节能减排及其运行控制研究

船舶航行时除了利用废热进行发电外, 还能够根据船舶运行状态和主机设计功率储备进行轴带发电, 进一

步提高能源利用率。船舶主机在设计建造时通常需要根据船舶情况、海洋环境以及主机安全储备等因素, 来考虑一些多余的功率储备, 功率储备一般在主机额定功率的10%左右。船舶运行状况良好时, 这10%的功率储备处于闲置状态, 若不加以利用就会造成能源浪费。而轴带发电技术就是为了充分利用这部分功率储备而设计的, 轴带发电机直接或通过变速箱间接安装到主推进轴上, 利用船舶主推进发动机的旋转能进行发电的技术就是轴带发电。

轴带发电可以作为传统发电方式的补充, 进一步提升燃料利用率, 同时轴带发电系统因其工作模式, 还能够有效减少主机机舱内的噪声污染和热辐射, 改善机舱工作环境。在日常运行过程中, 配备了轴带发电机的船舶还能够减少辅助柴油机的使用频率, 进一步降低航行时的燃料消耗。研究选取的轴带发电机型号为动力输出/恒频电能 (Power Take Off / Constant Frequency Electrical, PTO/CFE), 具有系统结构简单、稳定性高以及效率较高等优点。该款轴带发电机的螺旋桨形式包括可调桨和定距桨两种, 最低转速为40%, 最高转速能够达到105%, 在此转速区间内均能够提供稳定的电力, 发电效率在84%~88%之间。轴带发电机节省的燃料计算如式(2)所示。

$$F = \frac{F_z - F_1}{S} \quad (2)$$

式(2)中, F 表示每台轴带发电机节省的燃料, F_z 表示主机运行时消耗的燃料, F_1 表示辅助发电机运行时消耗燃料, S 表示燃料价格。但PTO/CFE型号的轴带发电机的成本较高, 且对船体尾部的空间需求较大, 因此, 小型船舶通常无法负担。对小型船舶, 通常推荐其使用动力输出/燃气压缩比 (Power Take Off / Gas Compression Ratio, PTO/GCR) 轴带发电机。该款发电机主要由弹性联轴器、电动机以及增速齿轮等结构构成, 可以根据实际情况按照在主机前方或者后方, 在使用时需要主机保持稳定的转速。该款发电机的适用转速范围在80%~96%之间, 发电效率能够达到92%以上, 具有良好的操控性以及较低的造价。但PTO/GCR轴带发电机适合的功率和转速范围较小, 需要在船舶达到稳定转速时才能使用。

PTO/CFE轴带发电机共有两种运行模式, 在独立运行时, 独自负担系统载荷。并网运行时, 与船舶的其

它发电方式进行并联,共同负担船舶日常用电。在实际运行中,轴带发电机会根据实际运行情况,进行模式切换。若不对其进行控制,容易出现电压波动,导致船舶的电力设备出现损坏。研究采用改进下垂控制结构策略,对轴带发电系统的脉冲宽频逆变器进行平滑切换控制,当轴带发电系统并入船舶配电网时,脉冲宽频逆变器的输出功率与设定功率相同,此时比例积分控制器处于不饱和状态,该控制策略等同于恒功率控制。当轴带发电系统独立运行时,比例积分控制器转变为饱和状态,系统中的角频率和电压幅值取值为零,此时控制策略为传统下垂控制,即在电力系统模拟同步发动机的下垂特性,来实现功率的合理分配和稳定运行。

3 船舶轮机节能减排实验分析

研究选取的船舶型号为大型双燃料集装箱船,载箱量为18000TEU,主机型号为MAN B&W 11S90ME-C9.2,是一种大型的二冲程、低速船用柴油发动机。主机在满负荷功率为65200kW,燃油消耗为165克/千瓦时,缸套水散热量为8200kW,扫气散热量为24000kW,排气稳定为480℃,排气量为486000千克/小时。不同情况下的系统发电输出功率对比如图2所示。

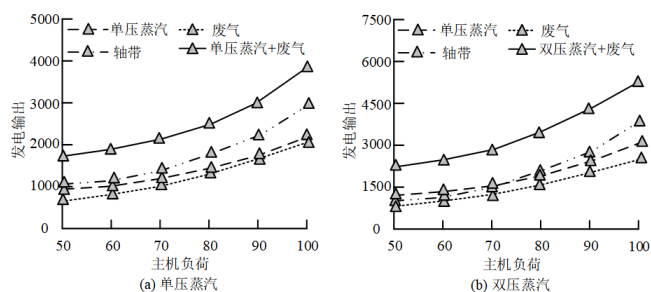


图2 不同情况下的系统发电输出功率对比

在图2(a)中,满负荷时,单压蒸汽和废气发电系统的发电量分别为1824kW和1782kW,轴带发电量为2954kW,单压蒸汽加废气发电组合时的系统发电量为4018kW。在图2(b)中,采用双压蒸汽发电时,发电量有所提升,比单压蒸汽发电高出954kW,双压蒸汽发电加废气发电的组合发电量5749kW,比优化前高出1731kW。研究表明,采用双压蒸汽发电能够有效利用不同热源温度的蒸汽,优化能量利用率,提高换热效率,进一步降低能耗。采用废热利用和轴带发电前后的船舶能效设计指数和废气排放量对比如图3所示。

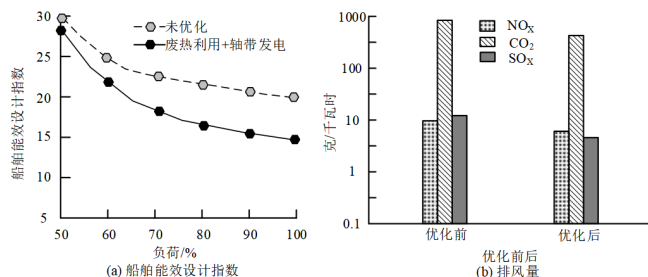


图3 废热利用和轴带发电前后的船舶能效设计指数和废气排放量对比

在图3(a)中,船舶的能效设计指数等于船舶每运输单位货物或乘客所排放的二氧化碳量除以船舶的设计装载量乘以设计航速。在50%负荷时,采用废热利用和轴带发电的船舶的能效设计指数为26.3,比未优化时低了3.5,在满负荷时优化后的能效设计指数为15.8,比未优化时低了6.9,减少了3.04%,作用较为显著。在图3(b)中,优化前的氮氧化物和硫化物的排放量分别为9.9克/千瓦时和10.2克/千瓦时,分别比优化后高出0.4克/千瓦时和1.1克/千瓦时,优化后的船舶CO₂排放量为892克/千瓦时,比优化前降低了96克/千瓦时。在船舶航行中,因为船舶的大幅推进功率只能增加少许的航行速度,因此,可以通过航速来减弱主机功率,从而减少船舶的能效设计指数。除此之外,还能够增加清洁燃料的使用量来减少污染物排放,如天然气等,每一个单位的天然气燃料能够减少20%~25%的污染物排放。

4 结论

针对船舶能量利用效率较低,存在废热浪费等问题,为了降低船舶航行时的燃料消耗,进行节能减排,研究提出了基于改进废热利用和轴带发电技术的船舶主机节能减排技术。实验表明,满负荷时,单压蒸汽和废气发电系统的发电量分别为1824kW和1782kW,轴带发电量为2954kW,单压蒸汽加废气发电组合时的系统发电量为4018kW,采用双压蒸汽发电时,比单压蒸汽发电高出954kW,双压蒸汽发电加废气发电的组合发电量比优化前高出1731kW。在50%负荷时,废热利用和轴带发电的船舶的能效设计指数为26.3,比未优化时低3.5,满负荷时优化后的能效设计指数为15.8,比未优化时低了6.9,减少了3.04%,作用较为显著。优化后氮氧化物和硫化物的排放量分别比优化后降低了0.4克/千瓦时和1.1克/千瓦时,船舶CO₂排放量比优化前降低了96克/千瓦时。此次研究还存在一些问题,例如

大型 FPSO 甲板模块安装分析

周胜波

(烟台打捞局救捞工程船队, 山东 烟台 264012)

摘要: 本文以“巴西 FPSO (Floating Production Storage and Offloading, 浮式生产储油装置) 安装项目”中的 P-67 船甲板模块吊装及安装为工程背景, 针对大型 FPSO 的船体和甲板模块特点, 对大型 FPSO 甲板模块安装所涉及的吊装方式、浮吊船就位方式、组块安装操作等进行分析, 总结相应经验, 为此类项目施工提供参考。

关键词: 大型 FPSO; 甲板模块; 组块安装

中图分类号: U674.38

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2025) 05—0074—03

FPSO (浮式生产储油装置) 作为海上石油开发的核心设施, 是目前海洋工程领域的高技术产品^[1], 是重要的海洋工程装备。FPSO 主要用于在海上生产、储油和卸油, 拥有较强的机动性, 常被称作“海上石油工厂”。因其生产工艺复杂、设备集成程度高、建造难度大, 又被称为海洋工程领域“皇冠上的明珠”。^[2] 目前我国已成功建造交付了一系列的 FPSO, 积累了丰富的设计建造经验。随着我国海洋石油资源开采力度的加大, 对 FPSO 的需求也在与日俱增, 并有向深远海推进的趋势。^[3] FPSO 船体具有大船长、大型宽、高型深的特点, 其甲板功能模块和附属设施具有集成化程度高、模块数量多、形式各异、排列紧凑的特点。由于 FPSO 船体和甲板模块可以采取分开和并行建造的施工工艺, 这在很大程度上缩短了其建造周期^[4], 但也为后续甲板模块在船体上的集成工作提出了较高的施工要求^[5]。本文以“巴西 FPSO 安装项目”中的 P-67 船甲板模块吊装及安装为工程背景, 对大型 FPSO 甲板模块安装的施工要点进

行分析。

1 项目简介

“巴西 FPSO 模块安装项目”P-67 船相关, 建造及安装均于中国海洋石油工程 (青岛) 有限公司青岛海工码头。先后本工程由起重能力 3600T 的双架浮吊船“德浮 3600”船进行安装作业。

2 大型 FPSO 安装要点分析

2.1 模块安装

本工程的主要工程量包括进行 M01-M16 组块安装、M17 系列管廊安装、MOPIPE ANRE 安装、火炬塔安装等 41 吊作业。

由于整船组块安装作业方式大同小异, 安装方式相似, 以 M13 组块安装进行安装方案介绍。

M13 模块安装位置在该 FPSO 的 39~59 肋位之间, 尺寸为 L27.674m × B21.675m × H21.432m; 设计重量为

研究只对单一型号的船舶主机进行了研究, 后续针对不同信号的主机废热和轴带发电系统进行研究, 根据不同的主机参数设计更加合理的发电系统, 并根据船舱尺寸对系统进行合理布置。

参考文献:

[1] 李仁科, 许婉莹, 杨勇. 绿色船舶技术在轮机设计方面的应用

与发展 [J]. 船舶工程, 2023, 45(10): 12-18.

[2] 宋文明. CO₂ 压缩机驱动汽轮机节能改造与安装 [J]. 石油化工设备技术, 2024, 45(04): 50-54.

[3] 王渡, 王志刚, 张锦坤, 等. 燃气轮机 / 超临界二氧化碳联合循环余热利用及动态特性分析 [J]. 热力发电, 2023, 52(11): 67-75.