

回收船舶废气热的斯特林热电转换装置



高宇阳, 李晓彤, 阚安康*

上海海事大学商船学院, 上海 201306

摘要: 随着国家碳中和及碳达峰, 双碳战略目标的推进实施, 疫情开放的形势条件下, 航运产业开始复苏, 绿色航运、节能减排技术也收到了大众的广泛关注。由于船舶机舱内部有大功率的发动机和发电机组, 柴油燃烧后, 仅有一部分能量转化为船舶动力, 大部分通过废气, 增压空气等形式带走, 排放的废气余热占总热能近 30%, 设备工时作产生的废气余热温度极高, 可高达上千摄氏度。本装置首先利用高温废气余热通过斯特林机, 使热能转化为机械能, 再通过外接发电机利用转子切割磁感线转化为电能, 实现热能向电能的转化。整个工作过程中, 斯特林机所具有较高的能量转化效率, 提升了余热利用率, 同时在降低环境温度的同时产生了电能, 实现了废气热能的利用。据初步实验, 在温度为 433 ℃ 时即可产生约 3.3V 的电能。该装置提供了一种全新的船舶废气余热处理方式, 并且该装置结构简单, 没有复杂的机械结构, 利用了机舱内所具有的高温环境, 安全性较高、可靠性强, 成本低。若能在船舶机舱中多设备同时使用, 对于实现碳中和及碳达峰目标拥有积极的助力。

关键词: 机舱余热; 斯特林机; 节能减排

DOI: [10.57237/j.jest.2022.01.005](https://doi.org/10.57237/j.jest.2022.01.005)

Innovation of Thermoelectric Conversion Stirling Device for Recovering Heat from Ship Exhaust Gas

Yuyang Gao, Xiaotong Li, Ankang Kan*

Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, P.R.China

Abstract: With the implementation of the national carbon neutralization and carbon peak strategy, the technology of shipping energy conservation and emission reduction has also been concerned by the public. As there are high-power engines and generator sets in the engine room of the ship, the waste heat temperature of waste gas generated during equipment operation is extremely high, which can be as high as thousands of degrees Celsius. The device first converts waste gas waste heat into mechanical energy through Stirling machine, and then converts it into electrical energy through external generator. The whole working process produces electric energy while reducing the ambient temperature, and improves the utilization efficiency of waste heat. According to the preliminary experiment, about 3.3v electric energy can be generated when the temperature is 433 ℃. The device has simple structure, no complex mechanical structure, high safety and strong reliability. If multiple equipment can be used in the marine engine room at the same time, it will have a positive help to achieve the goals of carbon neutralization and carbon peak.

Keywords: Engine Room Waste Heat; Stirling Engine; Energy Saving and Emission Reduction

*通信作者: 阚安康, ankang0537@126.com

1 研制背景及意义

中国交通运输业是仅次于制造业的第二大油品消费行业，油品消耗量约占全社会油品消耗总量的 33%。此外，航运产业每年消费的能源总量大约占交通运输业的 1/4 左右[1-3]。

随着近几年运输需求的快速增长，航运产业能源消耗和碳排放也在逐步增多[4]。目前绝大多数船舶使用的推进系统是柴油机推进系统，存在余热等能量利用不充分问题[5]。船舶是水上航行的主要工具，船舶的柴油机是船舶在海上航行的动力源。柴油机在运行过程中，柴油在气缸内燃烧后，只有一部分的柴油能量转化为船舶的动力输出得以利用，而另外大部分则通过废气、增压空气和冷却水以废热的方式带走，他排放的废气余热将近占总热能的 40%，其排出的废气余热温度在 350—410 ℃ 之间，有的甚至可高达上千摄氏度[6]。实现碳中和目标，我国航运业必须要走绿色低碳的高质量发展道路，急需对船舶在绿色航运、节能减排等方向研发核心技术。一般的余热回收系统是把这些热能转化为热水或水蒸汽，供机器运转或生活所需。但是这种热能利用方式，往往受制于船舶的工作条件，很多情况下并不能将这些热能充分利用。相关的研究者设计了船舶柴油机废气余热发电系统，该系统在一定程度上实现了余热发电的目的，但是受到系统运行功率的限制，余热发电效率并没有达到预期目标，离最优转换效率还存在一段距离[7]。因此如何更加高效的利用船舶废气余热，成为近年来关注的焦点。

而斯特林机作为一种清洁高效的动力机，对燃料的适应性很强，可用能源除了煤、石油、天然气外还可以利用太阳能、原子能、化学能以及木材、秸秆等农林废弃物燃烧所放出来的热能[8]。斯特林发动机运行的污染物排放少，作为外燃机燃料可以在足够的空气中连续燃烧，燃烧比较充分，与内燃机相比，排放的一氧化碳和碳氢化合物等有害气体大大减少。斯特林发动机没有气阀机构，工质在汽缸内的压力变化接近正弦波形，而且燃烧不会产生的爆震和排气波，因而运转比较平稳，噪音比较小，相较于传统的内燃机来讲，有着得天独厚的优势[9-10]。

故而本文采用斯特林发动机作为装置能量转换的核心，利用斯特林机的优点，将废气余热能量进行二次利用，大幅度减少了能量的损耗，并转化为船舶上设备运行的电能，并且随着技术进步和新材料的开发斯特林

发动机的性能还会有很大的提高，应用领域还会进一步扩展。而通过回收废热来减少能源消耗，对我国实现节能减排的发展战略和环境保护具有重要的现实意义。同时，余热的回收利用对改善工作环境、节约能源、降低生产成本等方面拥有着无可比拟的作用。

2 装置结构简图及设计方法

此回收船舶废气热的斯特林热电转换装置主要包括用于接收船舶废气热进而转化为机械能的斯特林机，和将机械能转化为电能的小型发电机装置。

斯特林机的简单结构包括依次连接的热气缸、热气缸活塞、热气缸连杆、曲轴大飞轮、小飞轮以及冷气缸结构件；小型发电机装置包括与小飞轮相连的发电机皮带、固定支架以及永磁发电机。

在本装置设计中，为了模拟船舶废气所能达到的 400 ℃ 的高温，我们通过一个一定尺寸的酒精灯，利用碳钢管道将酒精灯加热得到的高温空气输送至热缸，加热热缸内的气体，使气体膨胀，推动热气缸活塞做功，带动飞轮旋转，加热的气体流动至冷缸与外界进行热交换散热，飞轮旋转带动永磁发电机进行发电，反复循环，达到热能向机械能再向电能的转化，从而完成整个运动过程。

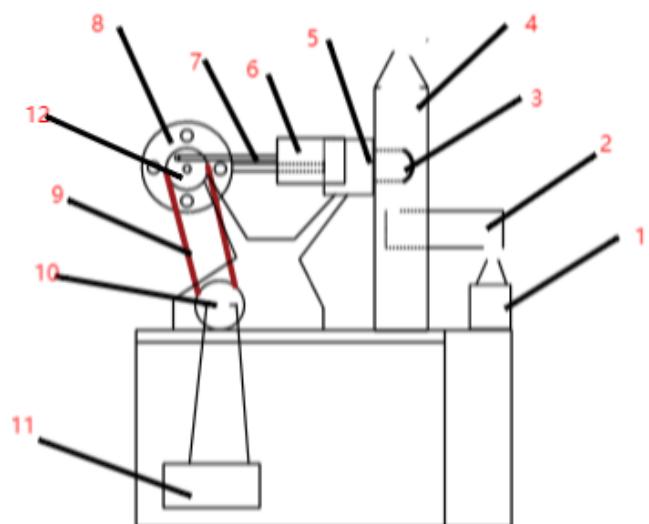


图 1 装置设计图

装置机械制图请参考下图一：

装置包括：热源 1，传热管道 2，石英玻璃热气缸 3，热量储存管 4，热气缸体 5，冷气缸体 6，热气缸连

杆 7, 曲轴大飞轮 8, 发电机皮带 9, 永磁发电机 10, 负载 11, 曲轴小飞轮 12。

其中热气缸体 5 与冷气缸体 6 之间相连接, 热缸内气体可通过连接件进行气体的转移。

曲轴大飞轮 8 与热气缸体 5 之间连接有热气缸连杆 7, 当气体在热缸内加热膨胀后可带动飞轮进行运转。

曲轴大飞轮 8 与曲轴小飞轮 12 之间连接有铝合金支架, 进行机械能的传递。

曲轴小飞轮 12 与永磁发动机 10 之间连接有发电机皮带, 小飞轮进行旋转时通过皮带来带动发电机产生电量。

永磁发电机 10 与负载 11 之间连接有电线, 电量通过电线进行传输。

永磁发电机 10 通过发电机的固定支架固定在底座上。

3 工作原理及性能分析

根据热力学第一定律, 我们可知能量之间可以相互转化, 且总量保持不变[11-12]。但在实际应用中, 能量本身存在着有品位之分[13]。电能与机械能相较于热能而言是更高品位的能量, 可以自如地转化成机械能热能等等。但是热能却不能通过正常的手段转化为机械能, 因为这中间存在着一个能量贬值的过程[14]。而斯特林发动机能够安静运转, 几乎可以使用任何热源[15]。热能源在斯特林发动机外部产生, 而不是像奥托循环或柴油循环那样通过内燃产生引擎[16]。由于斯特林发动机与替代能源和可再生能源兼容, 因此随着常规燃料价格的上涨以及考虑到诸如石油供应枯竭和气候变化等问题, 斯特林发动机可能变得越来越重要, 因此联想到在船舶机舱中, 利用斯特林机实现能量的转化。

首先我们简要介绍一下本装置中斯特林机的工作流程。一个理想的斯特林机热力学循环分为四个部分 (如下图所示): 第一步, 大多数的气体位于热缸, 被加热后膨胀, 由于热缸已经达到最大体积, 而冷缸处于最小体积, 气体冲入到冷缸, 带动飞轮旋转。近似于等温膨胀过程; 第二步, 加热后的气体冲入冷缸后, 与低温缸体大面积接触, 降低温度。由于飞轮的转动惯量, 热缸准备开始收缩。近似于等容放热过程; 第三步, 大部分气体进入冷缸, 充分冷却后, 压强开始减小, 结合飞轮的转动惯量因素, 气体在冷缸被压缩。近似于等温压缩过程; 第四步, 气体的体积此时最小, 热缸的气体被加热后

膨胀, 由于曲柄摇杆的位置, 冷缸容量几乎不变, 热缸容量变大, 回到第一步的状态。近似于等容吸热过程。以上四步为一个循环, 组成了斯特林发动机的一个完整工作流程[17]。

船舶废气余热通过设备的气体吸收装置, 利用其较高的温度加热斯特林机的气缸, 缸内气体由于受热而发生膨胀, 推动热气缸活塞进行运动, 其次, 斯特林发动机的飞轮连接有一个小型永磁发电机, 通过飞轮的旋转来带动发电机进行发电, 实现热能向机械能再向电能的转化, 从而完成整个装置的工作。

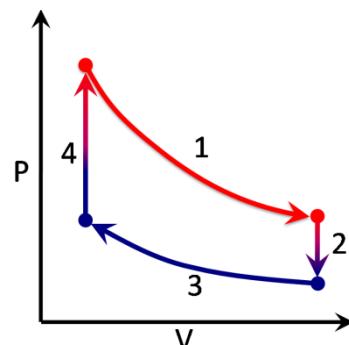


图 2 热力学循环

4 实验工况及实验数据的采集

基于以上原理, 我们制作了一个简易的回收船舶废气热的斯特林热电转换装置, 并通过简单的实验进行了以下分析。如图 3 为装置的实物图, 主要由酒精灯, 金属管道, 斯特林热机, 发电机, 用电器, 蓄电池所构成。在前期实验过程中, 我们使用红外测温仪测得热缸处从开始到设备稳定运转期间的温度, 在稳定运行时, 热缸处温度大约为 402 °C。并通过外接电压表到用电器两端的方式测得各个阶段用电器所获得的电压, 产生的电压可到达 1.3-3.3V。

由于实验过程中, 我们使用酒精灯模拟船舶机舱热源, 其温度变化较为迅速, 且温度相较于机舱内部环境偏低, 导致得到的数据拥有一定的误差。且由于疫情影响, 无法进行更加准确的数据测量, 因此我们采用了初步的实验分析。初步的实验数据如表 1 所示。上述数据通过小型的斯特林机所获得, 若扩大其冷热缸体积, 将会有较大的发电量提升效果, 但同时也需考虑成本以及效率问题。由数据可看出, 在进口温度达到 433 °C 左右时, 热缸处温度达到 402 °C, 该装置的发电量达到 3.3V。

表1 进口温度、热缸温度与发电量的关系

进口温度/℃	354	377	386	404	433
热缸处温度/℃	321	343	359	371	402
电压表示数/V	1.3	1.8	2.3	2.8	3.3

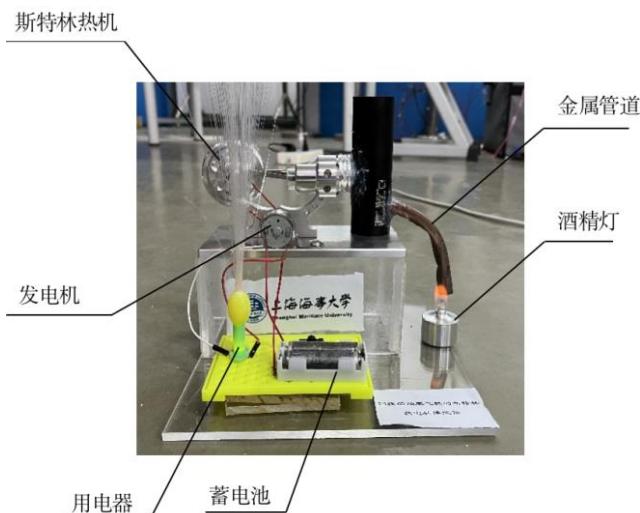


图3 装置主视图

5 结论

本项目的特色是提出了一种回收船舶废气热的斯特林热电转换装置，该装置主要通过船舱机舱内部的高温环境进行热能向机械能的转换，再通过发电机进而进行机械能向电能的转换。该装置不仅可以起到降低机舱温度的功效，还利用了这部分废气余热以及船舱环境温度的能量，提高了船舶能源的利用效率。此外该装置结构简单，没有机械结构，具有安全性可靠性高、寿命长、成本低等优点，十分适合大规模应用。本项目的主要创新点包括：

提出了一种新型的船舶废气余热处理方式。本装置采用斯特林机作为能量转换的核心，利用其本身的低噪音，效率高以及外燃机等优势，减少了船舶废气中能量的浪费，做到了能源二次利用，提高了能量转化的效率。

有效利用了机舱内部的热量。由于机舱是船舶的主要动力装置所在地，主机和辅机等设备在工作时产生了大量的热量，使得机舱长期处于一种高温状态，而本装置利用此环境进行能量的转化，为船舶机组人员构成一个良好的工作环境。

本装置的发电量主要与装置的大小、船舶机舱的温度高低有关。通过这一装置，充分结合船舶余热的特点，实现了对能量的充分利用，达到了节能减排，绿色航运的目的。且装置结构简单，具有普遍的适用

性，契合国家提出的节能减排战略，成本较低，可以实现大规模的使用。

参考文献

- [1] 黄波. 碳达峰、碳中和对港口行业的影响及广州港相关发展建议和措施 [J]. 中国港口, 2021 (12): 9-13.
- [2] 李国强. 十八大以来生态文明建设的宝贵经验 [N]. 中国社会科学报, 2022-03-15 (005). DOI: 10.28131/n.cnki.ncshk.2022.000904.
- [3] 杨帆. 中国绿色货运行动助推“绿色交通” [J]. 交通世界 (运输·车辆), 2014, (07): 106-107.
- [4] 鲍金见. 低碳视角下我国海洋交通运输业绿色发展评价研究 [D]. 天津理工大学, 2021. DOI: 10.27360/d.cnki.gtlgy.2021.000719.
- [5] 普聪远. 船舶柴油机废气余热发电效率优化系统 [J]. 舰船科学技术, 2020, 42 (02): 82-84.
- [6] 张峰, 谢桂芬. 浅析船舶柴油机余热利用技术 [J]. 科技信息, 2014 (13): 290.
- [7] 罗力, 范宇航, 邹栋林, 王丽娟, 陈旭, 喜冠南. 中小型船舶柴油机尾气余热回收试验 [J]. 船舶工程, 2021, 43 (12): 99-105. DOI: 10.13788/j.cnki.cbgc.2021.12.15.
- [8] Walker Getal. Stirling engine heatpumps [J]. International Journal of Refrigeration, 1982, 5 (2): 91-97.
- [9] Duygu Ipci and Halit Karabulut. Thermodynamic and dynamic analysis of an alpha type Stirling engine and numerical treatment [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 169: 34-44.
- [10] Shoaib Ahmed. Risk Assessment of Failure Modes Related to Marine Boiler Using Fuzzy Expert System [D]. 上海交通大学, 2020. DOI: 10.27307/d.cnki.gsjtu.2020.003515.
- [11] 王鹏. 热力学第一定律在估算柴油机冷却水量中的应用 [J]. 船舶, 2005 (05): 49-50.
- [12] 刘国珍, 仇杰, 臧涛成. 关于热力学第一定律的剖析与讲解 [J]. 课程教育研究, 2017 (09): 135-136.
- [13] 王双, 高文志, 谢必鲜, 韦慧勇. 柴油机与斯特林机联合动力循环仿真 [J]. 内燃机工程, 2013, 34 (05): 18-23. DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2013.05.007.
- [14] 倪筱淞. 小型斯特林发动机设计与性能研究 [D]. 浙江工业大学, 2020. DOI: 10.27463/d.cnki.gzgyu.2020.001172.
- [15] 余也艺. 斯特林机——一种较为理想的外燃机 [J]. 铁道科技动态, 1983 (06): 18-23. DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.1983.06.004.

[16] 黄宇. 基于斯特林机的汽油机余热回收仿真及实验研究 [D]. 天津大学, 2014.

[17] 韦慧勇. 基于斯特林循环的热回收利用装置研究 [D]. 天津大学, 2012.

作者简介

高宇阳

2002 年生, 研究方向: 船舶节能技术.

E-mail: 2977545850@qq.com

阚安康

1981 年生, 博士后, 副教授, 研究方向: 船舶冷藏运输与节能技术等.

E-mail: ankang0537@126.com