

文章编号: 1006-2343(2015)01-142-04

斯特林热机在可再生能源开发中的应用

吕瑞杰, 王永征, 丁生平, 武岳, 姜磊

(山东大学能源与动力工程学院, 济南 250061, E-mail: lvrujie19881201@163.com)

摘要: 在阐述斯特林热机工作原理和研究发展现状基础上, 对斯特林热机在可再生能源开发中的应用进行了综合分析。通过对基于斯特林热机的碟式太阳能热发电系统和生物质燃烧发电系统的研究与应用发展现状进行分析, 阐明了基于斯特林热机的太阳能和生物质能联合发电系统的技术优势和发展潜力, 论述了太阳能和生物质能联合发电系统的构成方式、技术特点及主要性能参数, 并进一步分析了联合发电系统的关键部件——混合式热管接收器的设计要点和发展现状。

关键词: 斯特林热机; 太阳能; 生物质能; 联合系统

中图分类号: TK01 文献标识码: A

DOI:10.13952/j.cnki.jofmdr.2015.0037

The Analysis on Stirling Engines Applied to Renewable Energy Exploitation

Lü Ruijie, Wang Yongzheng, Ding Shengping, Wu Yue, Jiang Lei

(School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Based on the working principles, research and development status of the stirling engines, the paper reviewed its application to renewable energy exploitation. Research and application on the dish-type solar generating system and biomass-driven generating system of stirling engines were analyzed, which indicates the technical advantages and development potential of the combining system of both solar energy and biomass. The technical features and the main performance parameters of the combining system were discussed. The design points and the development of the hybrid heat pipe receiver as the key part of the combined generating system were also analyzed.

Key words: stirling engine; solar energy; biomass; combining system

经济和社会的持续发展使人类对能源的需求日益增长而常规能源短缺、价格不断上涨以及因其使用而引发的环境问题也变得日益严重。在能源和环境的双重压力下, 世界各国将目光投向了具有可再生、储量丰富、使用过程清洁无污染等优点的可再生能源。太阳能发电、沼气发电、生物质混煤燃烧等先进技术已经成为现在及未来研究、开发和利用可再生能源的主要方向。

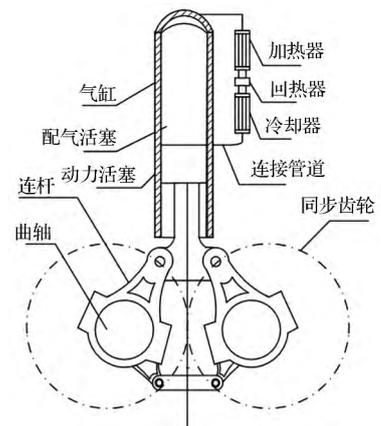
斯特林热机是一种外燃热机, 对燃烧方式无特殊要求, 既可以使用传统的化石燃料, 又可以使用太阳能和生物质能。斯特林热机具有模块化特点, 灵活调节系统规模, 弥补了太阳能和生物质能因分散广泛、热密度值低而难以利用的特性, 因而成为利用太阳能和生物质能的理想热机, 得到了广泛应用。

1 斯特林热机概述

1.1 斯特林热机工作原理

斯特林热机主要由加热器、冷却器、回热器、动力活塞、配气活塞、气缸以及传动机构和外部燃烧系统等组成^[1], 如图1所示。工作气体一般为氢气、氦气、氮气, 也可以是空气。

斯特林热机的工作循环由两个等温和两个等容过程组成, 如图2所示^[2]: ①等温压缩: 工质在低温下压缩, 向外界放热; ②定容吸热: 压缩后的工质经回热器、加热器至膨胀腔, 温度和压力都迅速升高; ③等温膨胀: 压力降低, 体积增大, 工质从加热器中获得大量热量; ④定容放热: 高温工质由膨胀腔经回热器、冷却器, 返回压缩腔, 温度降低。斯特林循环的热效率与卡诺循环热效率相同^[3],



▲图1 斯特林热机基本结构图

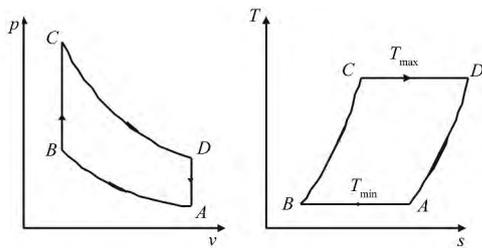
$$\eta = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}}$$

1.2 斯特林热机的发展

1816年罗伯特·斯特林(Robert Stirling)发明了外部燃烧闭式循环热机, 用于矿井取水, 这是第一台斯特林热机。早期的斯特林热机尺寸小, 产电量低(100 W ~ 4 kW)^[4]。

收稿日期: 2014-07-09

基金项目: 山东大学自主创新基金资助项目(2012ZD019)



▲图 2 斯特林热机循环原理图

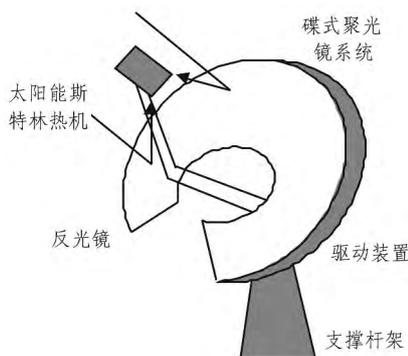
1853 年 John Ericsson 制造了一个大型的水下动力斯特林热机, 活塞直径达 4.2 m, 当转速为 9 r/min 时, 有效功率为 220 kW^[4]。1872 年 爱利克斯制造第一台太阳能斯特林热机^[5]。在 19 世纪至 20 世纪初的约一百年内, 斯特林热机采用的工质是空气, 导热系数低, 又限于当时的材料制造水平, 加热器、回热器等换热器的换热效果较差, 其实际功率和效率低于蒸汽机, 老式的斯特林热机发展缓慢, 以至逐渐被其他热机所湮没而没得到进一步发展。

从 20 世纪的 30 年代起, 飞利浦公司开始致力于斯特林热机的研制, 发展了现代斯特林热机, 飞利浦公司的斯特林热机主要有 3 方面的创新性: 采用菱形传动机构、采用氢气或氦气作为工质、发明了“袜套式”密封装置, 提高了斯特林热机的密封性和热机效率^[6]。飞利浦公司首期的研制工作集中在小型的热力发电设备上, 主要用于边远地区的收音机以及类似的设备^[7]。1958 年, 美国通用汽车公司造出一台试验斯特林热机, 为在汽车上使用积累了宝贵的经验^[8]。从上世纪 80 年代起, 斯特林热机研究的重点不再集中在车用热机的研制上, 而是将人力和物力投入到直接利用热能(燃料、太阳能)的热泵和分散能源发电上。

2 斯特林热机在太阳能开发中的应用

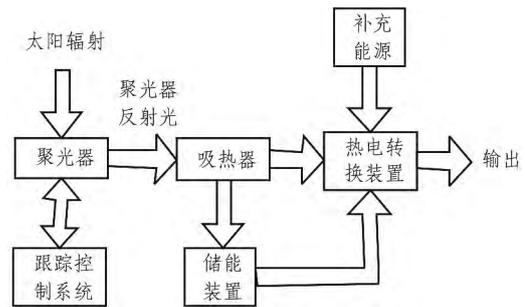
太阳能是一种清洁无污染的能源, 取之不尽, 用之不竭, 它的开发、利用和转换已成为人类寻求新能源的热点, 发展前景非常广阔。太阳能发电分为光伏发电和太阳能热发电, 其中热发电又分为聚光类太阳能热发电和非聚光类太阳能热发电。聚光类太阳能热发电通过聚光产生高温热能进而发电, 可以分为塔式、碟式、槽式和线性菲涅尔式^[9], 其中碟式太阳能热发电系统效率最高, 安装和设置相对容易, 不需要专门的场地, 不仅适合单独的小型发电设备, 同时具有规模化发电的潜力。

碟式太阳能热发电系统由碟式聚光镜、吸热器、斯特林热机、驱动装置、基座等组成^[10], 如图 3 所示。投射到聚光镜表面的太阳光通过反射汇聚到旋转抛物面的焦点位置, 吸热器将聚焦得到的太阳能转换为热能传



▲图 3 碟式太阳能热发电系统构成示意图

递给斯特林热机的加热器, 为斯特林热机的运行提供热源。在斯特林热机的末端接上一个发电机, 将热机输出的轴功转化为电能^[11], 如图 4 所示。



▲图 4 碟式太阳能热发电系统原理图

自 20 世纪 80 年代以来, 美国、德国、日本和俄罗斯等国家的企业和研究机构先后研制了 8 种不同的碟式斯特林系统, 发电功率从 2 kW - 50 kW 不等^[12]。2009 年, 美国 SES 公司创造了 31.25% 的最高热电转换效率。2010 年, SES 公司在美国亚利桑那州建成了 1.5 MW 的示范电站并投入运行, 这是世界上该项技术的第一个商业应用例子。Infinia 公司研发出两款 3kW 太阳能自由活塞式斯特林热机, 用于 PowerDish 中^[13]。目前, Infinia 公司正在发展基于 3 kW 及 30 kW 的自由活塞式斯特林热机产品, 在北美犹他州陆军基地进行一个 1.5 MW 项目的安装, 在地中海地区开发近 200 MW 的项目^[14]。

国内对斯特林热机的研发起步较晚, 但经过多年的努力, 也取得了一定的成果。西安航空发动机集团投入 3 000 万元, 做出了 3 台 20 kW 级斯特林热机, 并用电加热器进行了实验研究^[13]。2011 年 4 月, 浙江华仪康迪斯太阳能科技有限公司自主研发的中国首台 10 kW 碟式斯特林聚光发电系统样机在宁夏石嘴山投入运行, 该系统的成功研发填补了中国在太阳能聚光发电方面的空白^[14]。2012 年我国第一套 100 kW 斯特林热发电系统在内蒙古鄂尔多斯市建成并投入运行。2012 年 12 月, 首批 50 台斯特林热机完成总装下线。2013 年 1 月航空动力斯特林太阳能热发电机组在云南成功发电^[14]。

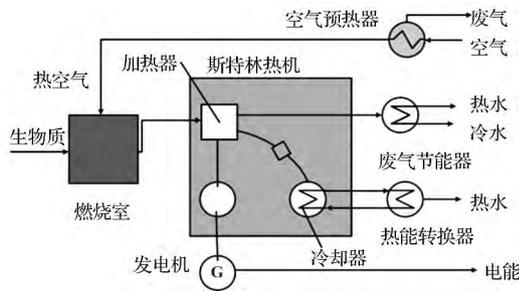
3 斯特林热机在生物质能开发中的应用

目前生物质发电形式有两大类, 一种是把生物质能发电厂做成兆瓦级的直燃式小火电厂, 用锅炉 - 汽轮机发电机组来发电, 一般装机容量在 20 MW ~ 40 MW; 另一种是微型分布式热电联供系统, 即在燃烧室内直接燃烧生物质或生物质气, 供给斯特林热机热量, 进而带动热机工作。虽然生物质资源的总储量巨大, 但分布较为分散, 本身热密度低, 因此小型生物质发电系统比大型生物质发电厂更有优势。

直接燃烧生物燃料斯特林热机能量转换系统如图 5 所示。直接燃烧生物质产生的高温烟气为斯特林热机加热器提供热能, 从而带动热机发电, 冷却过程中排出的热量通过热量转换器回收。高温烟气余热通过废气节能器加热水, 实现能源的回收利用, 废气节能器排出的具有一定热能的废气通入空气预热器, 为燃烧室所需空气进行预热, 从而实现烟

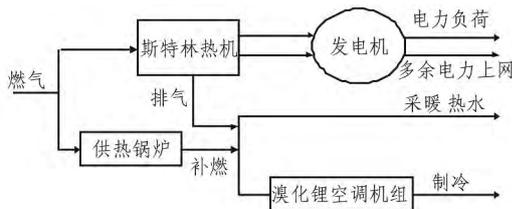
气热能的二次利用^[15]。丹麦技术大学设计并投入试运行的斯特林热机样机显示,当热机效率为 35% 时,斯特林热机可以产生电力 36 kW;当燃烧含水量为 40% 的生物质时,发电效率为 19%^[16]。

生物质气化技术是一种将生物质原料进行热化学处理,把低品位的固体生物质原料转化为含 CO、H₂、CH₄ 等可燃气体的高品位气体燃料的一种新型技术,是目前清洁有效且发展潜力巨大的生物质能利用方式。斯特林热机采用气缸外燃烧,具有对可燃气体前处理要求低、耐腐蚀性强、维护成本较低等优点,适合生物质气的利用^[17]。



▲图 5 燃用生物燃料斯特林热机能量转换系统图

生物质气成分与天然气类似,但各成分含量不稳定,需要在以天然气为燃料的基础上进行优化研究。以天然气为燃料的冷热电三联供循环工艺如图 6 所示,天然气燃烧产生的热量加热斯特林热机热头,带动热机工作,余热转换为热水采暖或通过溴化锂空调机组制冷^[18]。



▲图 6 斯特林机组冷热电联供循环工艺

2005 年,采用清洁气体燃料的斯特林热机开始用于商业化,发电功率为 55 kW^[19]。一家德国公司自 2004 年开始销售采用 α 型斯特林热机的微型热电联供系统,该系统使用的斯特林热机设置两个气缸,工质压力为 3.5 MPa - 150 MPa,输出电功率 2 kW - 9 kW,热能 8 kW - 26 kW,改良部分系统被使其可以利用生物质气^[20]。丹麦技术大学研发的微型热电联供系统,采用 β 型斯特林热机,氮气作为工质,生物质气作为热源。在设计工况下,输出电功率 8.1 kW,热能 24.9 kW,目前还未投入市场^[21]。

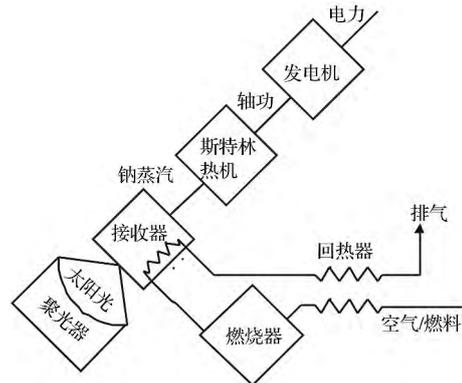
牧区、偏僻山区等地电力供应不便,而这些地区却有着丰富的生物质原料,因地制宜地发展小型生物质能斯特林热机发电单元,实现就地分散式供电是解决当地电力供应的有效途径之一。

4 基于斯特林热机的太阳能和生物质能联合发电系统

由于受天气条件、昼夜变化等因素的影响,太阳能供应

存在不稳定、不连续的问题,而热发电系统需要持续稳定运行,这成为制约碟式太阳能热发电系统发展的最大障碍。目前,针对太阳能发电系统中存在的以上问题,主要有两种解决方案:一是系统中配置蓄能子系统,将收集到的太阳能存储起来,以保证在夜间或太阳辐射不足时发电;二是建立化石燃料补燃系统,在太阳能供应不足的情况下,由其他形式的能源供应。在第一种方式中,目前还没有成熟的低成本蓄热技术,增加了投资及技术风险;第二种方式可以降低太阳能发电成本,但使用较多的化石燃料,又与发展太阳能热发电的初衷有悖。

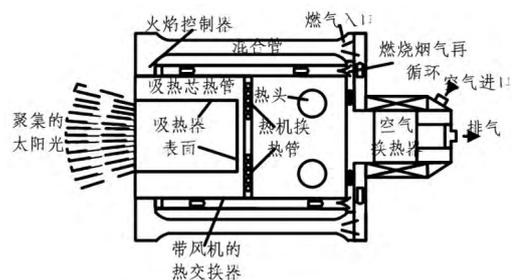
James Moreno 等人^[22]设计、加工并测试了一个用于碟式太阳能系统的混合式接收器。系统包括集成太阳能吸热器、气体燃烧表面、热管、燃烧室和回热器,如图 7 所示。接收器设计功率 75 kW,设计温度 750℃,效率 75%,可同时接收太阳和气体燃烧产生的热量。



▲图 7 联合系统示意图

德国 SOLO 公司对 V-160/161 斯特林热机用的太阳能生物质气混合式热头进行了研究^[23],该热头主要结构为高温钠热管集热器,既可以使用太阳能又可以使用生物质气作为热源。它的使用使得 V-160/161 斯特林热机的吸热器温度能够均匀的维持在 800℃ 左右,有效的减小了热头处的热应力,延长使用寿命^[24]。

Doerte Laing 等开发的混合式热管接收器,如图 8 所示^[24],该接收器设计功率为 45 kW,设计工作温度为 700 ~ 850℃。试验表明,使用该接收器的碟式系统单独利用太阳能热电效率为 16%,单独利用燃气热电效率为 17%,联合运行热电效率为 15%。混合式热管接收器的开发有利于提高碟式太阳能热发电系统的适应性,实现连续供电,但是由于加入了燃烧系统,使得结构变得非常复杂,加工制造难度增加,成本大幅提高。



▲图 8 混合式热管接收器示意图

5 结 论

当今世界化石资源短缺,价格逐渐上涨,研究以太阳能和生物质能为热源的斯特林热机技术,对于促进能源的综合利用、改善当前使用单一化石资源的状况并减少环境污染有积极作用。目前斯特林热机在可再生能源开发利用中的研究多集中在太阳能和生物质能单独应用上,对斯特林热机太阳能和生物质能联合系统中的应用研发工作较少,联合系统不仅可以解决太阳能单独供电不稳定的问题,而且综合利用了生物质能,保证了系统电力供应的稳定性,绿色环保。

中国是一个可再生能源储量丰富的国家,对可再生能源的利用可以很大程度上优化现有的能源结构。斯特林热机作为一种机械产品,可以利用现有的加工设备进行制造,一旦进入规模化生产容易被社会消化吸收。在降低运营和维修成本以提高稳定性方面,斯特林热机已取得重大进步,投资和运营成本的降低预示着斯特林热机在绿色能源和分布式发电市场上光明的前途。

参考文献

- [1] 钱程,钟云香,杜发荣. 热机发展中的若干问题[J]. 洛阳工学院学报,1988,9(4):70~76.
- [2] 沈维道,童钧耕. 工程热力学[M]. 北京:高等教育出版社,2007.
- [3] 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(6):18~23.
- [4] Kongtragool B, Wongwiset S. A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines[J]. Renewable & sustainable energy reviews,2003,7(2):131~154.
- [5] 德松. 太阳能斯特林发动机[J]. 太阳能,1989(2):7~9.
- [6] 杨泰蓉. 1kW 斯特林发动机的实验研究及热力学分析[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
- [7] Petrescu S, Costea M, Harman C, et al. Application of the direct method to irreversible Stirling cycles with finite speed[J]. International journal of energy research,2002,26(7):589~609.
- [8] 吴锋. 斯特林机的有限时间热力学优化[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [9] 杜春旭,王普,马重芳,等. 线性菲涅耳聚光系统无遮挡镜场布置的光学几何方法[J]. 光学学报,2010,30(11):3276~3282.

(上接第 141 页)

参考文献

- [1] 庄表中,罗银森. 滑板车悬挂系统的减振抗冲击性能测试[J]. 振动与冲击,2001,20(4):95.
- [2] 陈家新. 电动滑板车控制原理及设计中若干问题的研究[J]. 电机电器技术,2001(5):38~42.
- [3] 周达左. 电动滑板车遥控器及控制器的开发与研究[D]. 江苏无锡:江南大学,2008.
- [4] 廖任秀,陈桂兰. 基于 PROTEUS 电动滑板车控制器的设计[J]. 金华职业技术学院学报,2008,8(6):8~11.
- [5] 周润文. 面向 9~12 岁儿童运动类玩具的设计研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2012.
- [6] 周达左,杨慧中,陈立周. 电动滑板车智能红外遥控器的设计与实现[J]. 测控技术,2008,27(4):81~84.
- [7] YI X F, HE L J. The Brake Device Design for Children two-wheel Dynamic Scooter[J]. Advanced Materials Research,2012,421:

- [10] Mancini T, Heller P, Butler B, et al. Dish-Stirling systems: An overview of development and status[J]. Journal of solar energy engineering,2003,125(2):135~151.
- [11] 何坚. 碟式斯特林太阳能热发电系统的模型构建和优化研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2011.
- [12] Stine W B. International survey of parabolic dish/Stirling engine electrical power generation technology[C]// Proceedings of ASME/ASES Joint Solar Energy Conference,1993.
- [13] 唐大伟,李铁,桂小红. 斯特林发动机与碟式太阳能热发电技术的研究进展[J]. 新材料产业,2012(7):40~46.
- [14] 黄健毅,牛芳,王瑞. 我国碟式斯特林太阳能发电系统发展前景[J]. 电气应用,2013,32(14):66~69.
- [15] 张旭. 生物质直燃斯特林发动机设计与仿真分析[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2011.
- [16] Carlsen H, Ammundsen N, Traerup J. 40 kW Stirling engine for solid fuel[C]. IEEE,1996.
- [17] Carlsen H, Bovin J K, Werling J, et al. Results from tests of a Stirling engine and wood chips gasifier plant[C]. Proceedings of European Stirling Forum,2002.
- [18] 梁洁. 基于天然气为燃料的冷热电联供技术的应用[J]. 山西师范大学学报,2011,25(2):27~29.
- [19] Sato K, Oiwa N. Research and development of Stirling engine power generating system using biomass[C]//Symposium on Stirling Cycle,2006.
- [20] Nepveu F, Ferriere A, Bataille F. Thermal model of a dish/Stirling systems[J]. Solar Energy,2009,83(1):81~89.
- [21] Angrisani G, Roselli C, Sasso M. Distributed microtrigeneration systems[J]. Progress in energy and combustion science,2012,38(4):502~521.
- [22] Moreno J, Rawlinson S, Andraka C, et al. Dish/stirling hybrid-heat-pipe-receiver design and test results[C]// IEEE,2004.
- [23] Laing D, Traebing C. Second generation sodium heat pipe receiver for a USAB V-160 Stirling engine: evaluation of on Sun test results using the proposed IEA guidelines and analysis of heat pipe damage[J]. Journal of solar energy engineering,1997,119(4):279~285.
- [24] Laing D, Palsson M. Hybrid Dish/Stirling systems: Combustor and heat pipe receiver development[J]. Journal of solar energy engineering,2002,124(2):176~181.

作者简介:吕瑞杰(1988-),女,硕士生;主要研究方向:洁净燃烧与新能源利用,已发表论文2篇。

724~727.

- [8] 刘延柱. 动力滑板车漫话[J]. 力学与实践,2009,31(6):95~96.
- [9] 张凡,杨秀芝,李涛. 一种清洁滑板车的设计[J]. 湖北理工学院学报,2013,29(1):13~16.
- [10] 田晓提,扈延光,沈海军. 滑板车疲劳寿命可视化分析与优化设计[J]. 机械工程师,2005(9):55~56.
- [11] 刘萍萍,张道德. 基于 Pro/E 的双脚互踩式滑板车的设计研究[J]. 机电产品开发与创新,2009,22(5):67~68.
- [12] 孙学雁,王赫莹,曹辉. 基于人机工程学的健身踏步滑板车的设计与应用[J]. 沈阳工业大学学报,2009,31(5):544~547.

作者简介:黄志东(1979-),男,讲师;主要研究方向:机械设计制造及其自动化,已发表论文28篇,获本溪市自然科学学术成果二等奖。注:本文设计的便携式多功能滑板车荣获2013年辽宁省本科大学生机械创新设计大赛三等奖。