



国防特色学术专著·船舶与海洋工程

斯特林发动机技术

金东寒 著

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

前 言

斯特林发动机(Stirling Engine)是一种外部供热(或燃烧)的活塞式发动机,它以气体作工质,按闭式回热循环的方式进行工作。斯特林发动机最早发明于1816年,比内燃机发明早几十年,但由于受当时材料及制造水平的限制,没有得到进一步发展。20世纪70年代爆发中东石油危机后,人们预感到了能源危机,同时,环境污染的严重危害也日益显现。基于斯特林发动机对能源的广泛适应性和优异的环境特性,人们恢复了对斯特林发动机的兴趣。经过荷兰、美国、瑞典、德国、日本等国家投入巨资进行研究,斯特林发动机的各项关键技术获得了突破。从20世纪90年代开始,斯特林发动机陆续在军事和民用领域得到应用,如水下动力、垃圾填埋气发电、热电联供系统、太阳能热发电等。

本书在简要介绍斯特林发动机基本原理和基础性知识的基础上,阐述了现代斯特林发动机的发展,重点叙述了发动机的性能仿真技术、燃烧技术、热交换器设计与制造技术、密封技术、控制技术等,介绍了区别于内燃机传动机构的设计特点,并详细介绍了发动机关键零部件材料的特殊要求及选材经验。本书引用了作者大量的科研成果,并提供了许多有用的、经实践验证的参考资料,可供读者在设计 and 科研工作中参考。

本书主要面向有一定基础的斯特林发动机科研人员,因此发动机原理性介绍比较简要,如需了解斯特林发动机的基本知识,可参阅相关文献资料。

本书承蒙哈尔滨工程大学王芝秋教授、中船重工第七一一研究所张南林研究员的审阅,他们对书稿的大纲和内容提出了许多宝贵的修改意见,特此致谢。

斯特林发动机技术是一门正在发展中的新技术,由于作者水平有限,时间也比较仓促,书中难免有不足和错误之处,敬请读者批评指正。

编者

2009年1月

目 录

第 1 章 斯特林发动机的发展概述	1
1.1 斯特林发动机的概念	1
1.2 斯特林发动机的类型	2
1.3 斯特林发动机的发展概况	6
第 2 章 斯特林发动机的工作循环	17
2.1 斯特林发动机的理想循环	17
2.2 斯特林发动机的实际循环	22
第 3 章 斯特林发动机的性能	26
3.1 斯特林发动机的功率	26
3.2 斯特林发动机的效率	30
3.3 斯特林发动机功率和效率的影响因素	35
第 4 章 斯特林发动机性能仿真技术	39
4.1 斯特林发动机性能分析的基本方法	39
4.2 斯特林发动机工作过程的仿真计算	42
4.3 斯特林发动机的稳态性能仿真	54
4.4 斯特林发动机的动态性能仿真	61
第 5 章 斯特林发动机燃烧技术	69
5.1 外燃系统的功能与结构	69
5.2 燃烧器工作原理	76
5.3 喷雾数值模拟	85
5.4 燃烧数值模拟	98
第 6 章 斯特林发动机的热交换器	112
6.1 热交换器的设计技术	112
6.2 热交换器的特种制造技术	125
第 7 章 斯特林发动机密封技术	142
7.1 发动机的静密封	142
7.2 发动机的动密封	162
第 8 章 斯特林发动机的传动机构	181
8.1 曲柄连杆传动机构	181
8.2 菱形传动机构	189
8.3 斜盘传动机构	197
8.4 摇摆铰传动机构	200
第 9 章 斯特林发动机控制技术	203
9.1 斯特林发动机的功率控制	203

9.2	斯特林发动机的转速控制	210
9.3	工质的补充和增压	211
9.4	斯特林发动机的热力参数检测	213
9.5	斯特林发动机的监控系统	218
第 10 章	斯特林发动机的特殊材料	228
10.1	不锈钢	228
10.2	耐热钢	237
10.3	高温合金	243
10.4	非金属材料	257
参考文献		263

第1章 斯特林发动机的发展概述

1.1 斯特林发动机的概念

斯特林发动机(Stirling Engine)是一种外部供热(或燃烧)的活塞式发动机,它以气体作工质,按闭式回热循环的方式进行工作。斯特林发动机主要由外部供热(燃烧)系统、工作循环系统(热能-机械能转换系统)、传动系统(机械能输出系统)、辅助系统以及监控系统等组成。

图1.1所示为斯特林发动机的典型结构。图中详细示明了发动机的三大系统——外部燃烧系统、工作循环系统和传动系统。斯特林发动机的工作过程如下。

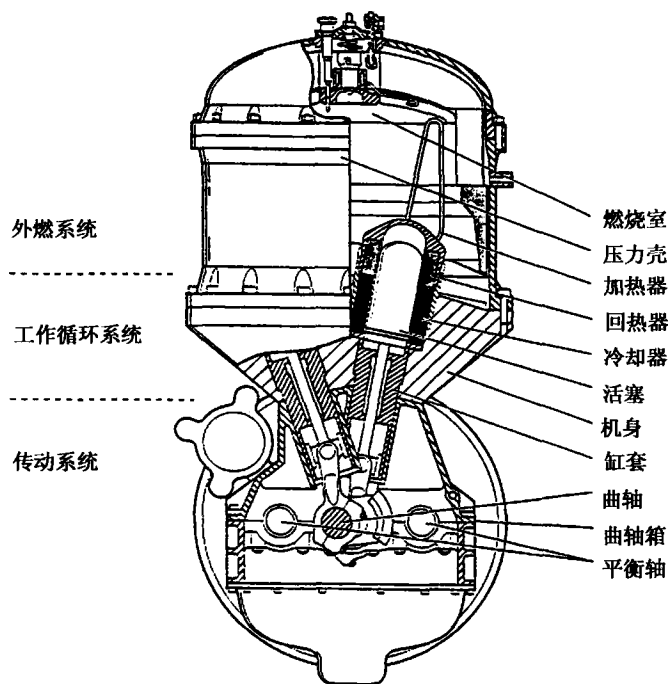


图 1.1 斯特林发动机

空气(氧气)进入发动机的燃烧室,与喷入的燃料混合后进行燃烧,并形成高温燃烧气体。高温燃烧气体对加热器进行辐射加热,或流经加热管时对加热器进行对流换热,并由加热器对管内的工质进行加热。加热后的工质具有很大的做功能力,在发动机热腔中膨胀做功。在压缩过程中,工质的压缩热由冷却器传给外界。工作循环系统的循环功由传动系统输出。

显然,斯特林发动机与内燃机、燃气轮机存在很大的区别。三者能量转变过程、工作循

环方式、工作介质、燃烧方式等方面均有所不同。

首先,在斯特林发动机中,化学能转变为热能、热能转变为机械能两个过程分别在燃烧室和气缸内进行,其工作循环称为外燃循环;内燃机的两种能量转变过程都在气缸内进行,其工作循环称为内燃循环;燃气轮机的工作循环也是外燃循环,两个过程分别在燃烧室和燃气轮机内进行。

其次,斯特林发动机的工作循环方式遵循斯特林循环,在循环的过程中工质封闭在一个独立的区域内,与外部没有质量交换;内燃机的工作循环方式遵循狄塞尔循环或奥托循环,在循环的过程中存在吸气和排气过程;燃气轮机的工作循环方式则遵循布雷敦循环,在循环的过程中与内燃机一样存在吸气和排气过程。

再次,斯特林发动机的工作介质通常采用氦气、氢气、氮气或空气等气体;内燃机和燃气轮机的工作介质则为空气和燃烧气体。

此外,斯特林发动机和燃气轮机的燃烧方式为连续、定常燃烧;内燃机则为间断、非定常燃烧。

由此可见,斯特林发动机在一定程度上兼备了内燃机和燃气轮机的优点。由于斯特林发动机采用外燃循环,化学能转变为热能的过程在产生动力的气缸之外进行,因此,斯特林发动机对能源的广泛适应性是其独特的优点之一。

表 1.1 为斯特林发动机与内燃机、燃气轮机的主要区别。

表 1.1 斯特林发动机与内燃机、燃气轮机的主要区别

	斯特林发动机	内燃机	燃气轮机
能量转变过程	外燃循环:化学能转变为热能的过程在产生动力的气缸之外进行	内燃循环:化学能转变为热能、热能转变为机械能两个过程均在气缸内进行	外燃循环
工作循环方式	闭式循环:工质封闭在一个区域内,与外部没有质量交换	开式循环:存在吸气和排气	开式循环
工作介质	氦气、氢气、氮气或空气等气体	空气及燃气	空气及燃气
燃烧方式	连续、定常	间断、非定常	连续、定常

1.2 斯特林发动机的类型

1.2.1 斯特林发动机的结构类型

斯特林发动机的基本结构类型分为 α 型、 β 型和 γ 型三种类型,如图 1.2 所示。图中 α 型发动机又称为双活塞式发动机, β 型和 γ 型称为配气活塞式发动机。

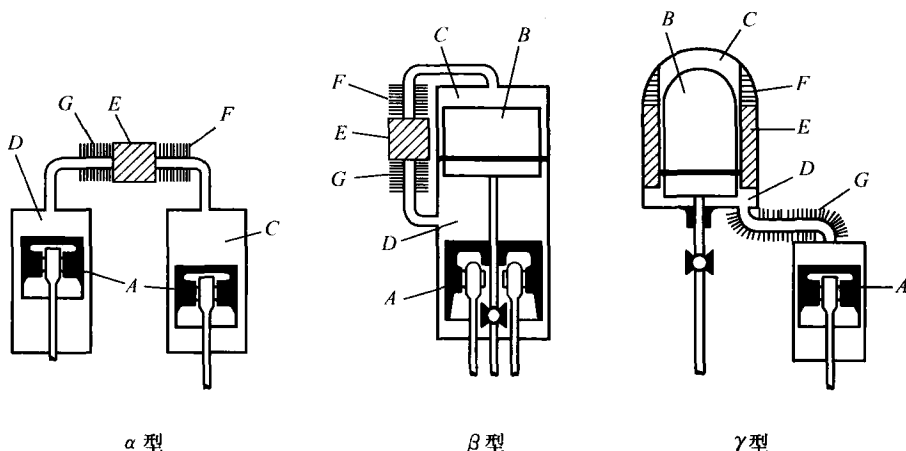


图 1.2 斯特林发动机的结构类型

A—活塞; B—配气活塞; C—热腔; D—冷腔; E—回热器; F—加热器; G—冷却器

1. 双活塞式(α 型)斯特林发动机

α 型斯特林发动机有两个气缸,两个活塞分别置于这两个气缸中。靠近冷却器一侧的气缸和活塞组成冷腔,靠近加热器一侧的气缸和活塞组成热腔。热腔、加热器、回热器、冷却器和冷腔依次串联在一起,组成一个完整的循环回路。热腔和加热器在循环过程中处于循环的高温部分,称为热端;冷腔和冷却器在循环过程中处于循环的低温部分,称为冷端;回热器处于两者之间,一端具有热端温度,另一端具有冷端温度。在循环过程中,工质的压缩过程主要发生在冷腔,所以冷腔有时也叫压缩腔,对应的活塞主要传递压缩功;工质的膨胀过程主要发生在热腔,因此热腔也可称为膨胀腔,对应的活塞主要传递膨胀功。 α 型斯特林发动机的两个活塞在循环过程中都承担着传递功率的功能,活塞的上、下腔的气体压差都很大,必须采用专用密封结构进行密封以防止工质泄漏。

2. 配气活塞式(β 型和 γ 型)斯特林发动机

配气活塞式斯特林发动机分为 β 型和 γ 型两类结构。 β 型发动机只有一个气缸,其内置有两个活塞。 γ 型发动机有两个气缸,两个活塞分别置于这两个气缸中。但 γ 型与 α 型不同,两个活塞有动力活塞和配气活塞之分。

靠近加热器一侧的活塞叫配气活塞,靠近冷却器一侧的活塞叫动力活塞。配气活塞的上方叫热腔(膨胀腔),配气活塞下方与动力活塞上方所组成的腔室叫冷腔(压缩腔)。热腔、加热器、回热器、冷却器和冷腔串联在一起,形成一个完整的循环回路。同样,热腔和加热器处于循环的高温部分,称为热端;冷腔和冷却器处于循环的低温部分,称为冷端。因为配气活塞上下端的压力是一致的,所以它既不向外界输出功,也不从外界接受功,其功能是使工质在循环回路中来回流动,故有配气活塞之称。因为工质的来回流动是由配气活塞来完成的,所以这类发动机称为配气活塞式发动机。动力活塞与 α 型发动机的活塞一样,其上、下腔的气体压差很大,也必须采用专用密封结构进行密封以防止工质泄漏。

配气活塞式发动机的一个特点是,热腔是由配气活塞单独控制的,而冷腔则是由配气活塞和动力活塞联合控制的。

三类斯特林发动机的共同特点是,循环回路由冷腔、冷却器、回热器、加热器和热腔组成。另一个共同特点是,热端的活塞运动必须领先于冷端活塞一定的曲轴转角,只有在这种情况下,才能使工质在闭式循环回路中按循环过程的要求来回流动。此领先的曲轴转角叫活塞领先角(相位角)。

1.2.2 斯特林发动机的功能类型

斯特林发动机按活塞的功能可分为单作用发动机和双作用发动机两种类型。

1. 单作用斯特林发动机

发动机的循环回路和两个往复运动件(活塞)形成一个组合,发动机的每个组合都形成一个完整的能独立工作的系统,这种发动机称为单作用发动机。斯特林发动机的 α 型、 β 型和 γ 型都可设计成单作用发动机。显然,单作用发动机可以为单缸的,也可以设计成多缸的。

2. 双作用斯特林发动机

如果将 α 型双活塞式发动机按图 1.3 那样布置,即成为双作用发动机。双作用是指气缸中的活塞,既起热端活塞的作用,也起冷端活塞的作用,活塞的一端为热腔,另一端为冷腔。如图 1.3 所示,气缸的冷腔与其他气缸的热腔连通,其间有冷却器、回热器和加热器,组成一个完整的循环系统。图中四个气缸和四个活塞以及四套热交换器组成了四个完整的闭式循环系统,相当于四台双活塞式发动机,但气缸和活塞组的数目却减少了一半,使得发动机的结构大为紧凑,体积和质量大大下降。

显然,双作用原理只有在多缸机上才能实现。能独立工作的双作用斯特林发动机的气缸数受到严格限制,一般四缸机比较常见。这一点与内燃机是截然不同的,内燃机选择气缸数的自由度比斯特林发动机大得多。限制斯特林发动机气缸数的主要因素是活塞领先角。

以四缸机作为一个独立的单元机,如果需要,可以将数个单元机进行“拼机”。即,将各单元机的功率输出轴通过齿轮箱,由共同的输出轴输出功率,也可以在同一根曲轴上,以适当的曲柄角度布置数个四缸单元机。因此,多缸双作用发动机的气缸数,一般都取 4 的倍数,例如四缸机、八缸机、十二缸机等。

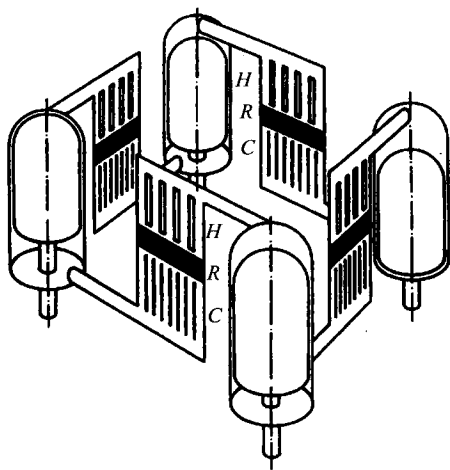


图 1.3 双作用斯特林发动机

H—加热器; R—回热器; C—冷却器

1.2.3 自由活塞斯特林发动机

一般情况下,斯特林发动机的热端活塞领先于冷端活塞的曲轴转角(即相位角)是由发动机传动系统的机械装置来实现的,例如配气活塞式发动机一般采用菱形传动机构,双活塞式发动机常用曲柄连杆机构,双作用发动机还可以采用斜盘或摇摆铰传动机构等。可以说斯特林发动机的传动机构比内燃机选择的方案多得多。

自由活塞发动机则是一种特殊的结构,它的两个活塞没有机械上的联系。理论上,各种类型的斯特林发动机都可以采用自由活塞式结构,例如双作用自由活塞斯特林发动机可以采用图 1.4 所示的方案,图 1.5 则是 Sunpower 公司设计的配气活塞式自由活塞发动机。

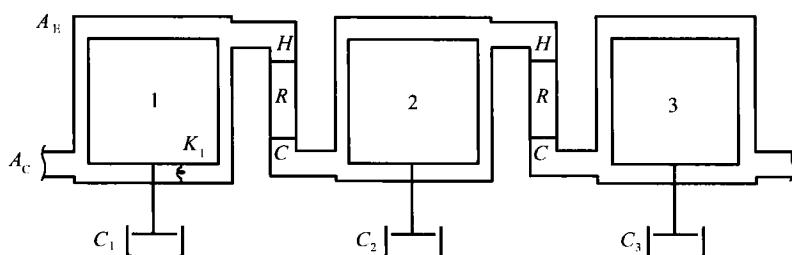


图 1.4 双作用自由活塞斯特林发动机示意图

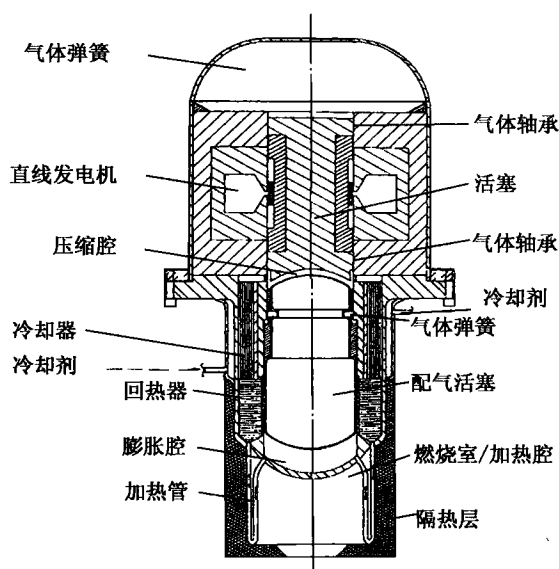


图 1.5 Sunpower 单缸配气式自由活塞斯特林发动机

与一般的斯特林发动机相比,自由活塞发动机的设计难度比较大,设计难点集中在动力学分析、活塞定位和控制、直线交流发电机等方面,但由于自由活塞斯特林发动机具有结构简单、因完全气密而无泄漏、可以自启动、寿命长等优点,在斯特林发动机研究领域得到迅速发展。

1.3 斯特林发动机的发展概况

1.3.1 热动力机的早期发展

自然界中可被人们利用的能源主要有煤、石油等燃料的化学能,以及风能、水力、太阳能、地热、原子核能等。在这些能源中,除风能和水力是以机械能的形式可直接被利用以外,其他各种能源或是直接以热能的形式存在,或是经过燃烧反应、原子核反应等,使能量先转化成为热能的形式,然后再予以利用,所以人们从自然界获得的能源,其主要形式是热能。

在 18 世纪以前,人类所利用的动力主要是人力、畜力以及风车、水轮等。18 世纪以后,蒸汽机的发明首先实现了热能转化为机械能,使工业生产和科学文化得到高速发展。热能的动力利用是现代工业和科学文化的基础。

在 18 世纪初期,由于煤矿开采工业对动力抽水机的需要,最初在英国出现了带动往复水泵的原始蒸汽机。1763~1784 年间,英国的詹姆斯·瓦特(James Watt)对当时的原始蒸汽机作了巨大改进,而且成功地应用高于大气压力的蒸汽和有独立凝汽器的单缸蒸汽机。此后蒸汽机为纺织、冶金等工业普遍所采用,使生产力得到了很大的提高。以后,蒸汽机又被不断加以改进。到了 19 世纪初,发明了以蒸汽机作为动力的铁路机车和船舶。

19 世纪初期的蒸汽机,功率和效率都很低,其中重要原因之一是以水蒸气作工质,在气缸中膨胀后要冷凝,热损失很大。为了避免这一现象,人们在当时条件下就自然地想到,是否可以用热的空气或别的气体来代替水蒸气充当热机的工质。斯特林发动机就是在这样的历史背景下产生的。

1816 年英国的罗伯特·斯特林(Robert Stirling)首先发明了外部燃烧闭式循环发动机。图 1.6 是罗伯特·斯特林发明的第一台发动机,1818 年用于矿井带动水泵工作。

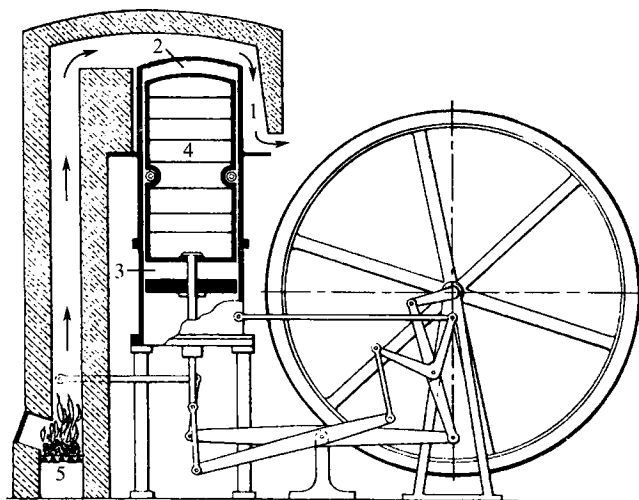


图 1.6 罗伯特·斯特林发明的第一台斯特林发动机

1—燃气出口;2—热腔;3—冷腔;4—配气活塞;5—燃烧室

斯特林发动机出现后几十年,曾经风行一时。但当时斯特林发动机采用的工质是空气,其导热系数低,又限于当时的材料及制造水平,加热器、回热器等换热器的换热效果很差,因而斯特林发动机的热效率低、功率小、质量大,以至逐渐被其他热机所湮没而没有得到进一步发展。

19世纪末发明了汽轮机,它具有适于应用高参数蒸汽、高效率、大功率等主要优点,成为现代热力发电厂最主要的动力设备。随着生产不断地发展,19世纪末期还发明了内燃机。因为内燃机具有质量轻、热效率较高等优点,所以,逐渐成为汽车、船舶、机车等交通工具的主要动力机。20世纪中叶,燃气轮机已经发展并改进成为适合实际应用的一种重要的热动力设备,特别是普遍应用于燃气涡轮喷气推进式的飞机。

1.3.2 现代斯特林发动机的发展

荷兰的飞利浦(Philips)公司开创了现代斯特林发动机的发展工作。1938年,在荷兰的边远地区由于缺乏电力,迫切需要一种运转安静、能使用多种燃料且寿命较长的发电装置,供无线电收发报机使用。当时,可供选择的装置有:热电系统、蒸汽机和斯特林发动机。飞利浦公司选中了斯特林发动机,并研制出功率为0.2 kW的发电机组,与无线电装置配套使用。1947年,飞利浦公司宣布研制出功率为1.5 kW的斯特林发动机。

飞利浦公司的斯特林发动机研究工作可分为四个阶段。

第一阶段:提出以空气为工质的斯特林发动机的概念,并发展小型发动机。

从1937年到1947年,飞利浦公司研制出102C型斯特林发动机,功率为0.2 kW。飞利浦公司对该机组进行了大量的研究工作,包括2 000 h耐久试验、高海拔试验和低环境温度试验等。1952年开始批量生产,到1954年共生产了约100台发电机组。

第二阶段:发展斯特林循环制冷机。

1955年,按斯特林循环原理工作的制冷机在飞利浦公司投产;1963年,斯特林循环制冷机的制冷温度达到了12 K($-261\text{ }^{\circ}\text{C}$)。这种制冷机用来生产液氮(液化空气),其能力达到 $2.2\text{ cm}^3/\text{s}$ 。斯特林循环制冷机还被用于高空红外线照相技术。

第三阶段:发展菱形传动机构的单作用、配气活塞式发动机。

1953年,罗尔夫·梅耶(Rolf Meijer)发明了用于斯特林发动机的菱形传动机构。采用菱形传动机构,可以保证活塞作直线运动,活塞不受气缸侧推力的作用,易对活塞和活塞杆进行密封,因此可以大幅度地提高工质的循环压力。工质压力从几兆帕提高到十几兆帕,甚至达到20 MPa,使功率增大数倍,发动机的单位功率质量大幅度下降。此外,由于采用了氢气或氦气作为工质,提高了热交换效果,而且大大降低了工质的流动损失,使发动机的效率提高了50%。

图1.7为飞利浦公司的1-365型单缸菱形传动配气活塞式斯特林发动机的剖面图。该机型缸径为88 mm,活塞行程为60 mm(工作容积 365 cm^3),额定转速为1 500 r/min,用氢气作工质,加热器和冷却器的温度分别为 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均循环压力为10.3 MPa,最大循环压力为13.7 MPa。发动机的功率为22 kW/(1 500 r/min),30 kW/(2 500 r/min)。在1 200 r/min时,该发动机的有效效率最大,达到38%。为了进一步提高该发动机的输出功率,将平均循环压力提高到16.5 MPa,输出功率达到了40 kW/(2 100 r/min)。

1959年,飞利浦公司以1-365型斯特林发动机的研制经验为基础,设计了1-98型斯特

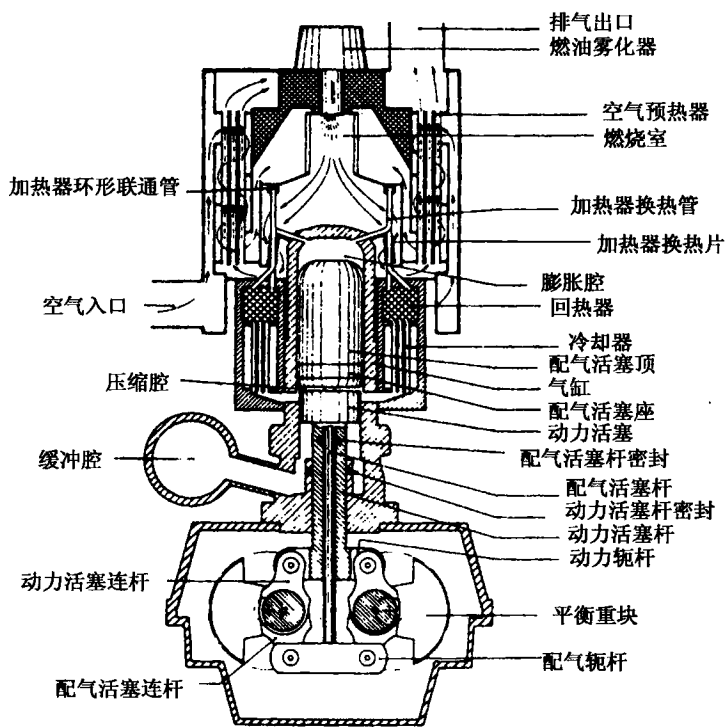


图 1.7 1-365 型单缸配气式斯特林发动机

林发动机。该机型也是单缸菱形传动配气活塞式发动机,工作容积为 98 cm^3 ,工质仍采用氢气,加热器和冷却器的设计温度仍为 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,工质平均循环压力为 10 MPa ,功率为 $7.36\text{ kW}/(3\,000\text{ r/min})$ 。该发动机在平均循环压力高达 20 MPa 时,功率达到了 $18\text{ kW}/3\,500\text{ r/min}$,并在 $1\,200\text{ r/min}$ 时,获得了33%的有效效率。该机型曾完成了 $10\,000\text{ h}$ 的耐久试验,具有完善的动平衡和多种燃料的适应能力。

在1-365和1-98型斯特林发动机的基础上,飞利浦公司在1966年设计了四缸菱形传动的配气活塞式斯特林发动机4-235。该型发动机缸径为 77.5 mm ,活塞行程为 50 mm ,工作容积为 235 cm^3 ,用氢气或氦气作工质。在平均循环压力为 22 MPa 、加热器管壁温度为 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和冷却器冷却水进口温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,功率为 $147\text{ kW}/(3\,000\text{ r/min})$,并在 $1\,300\text{ r/min}$ 时,获得33%的最大有效效率。该型发动机通过了 $10\,000\text{ h}$ 的耐久试验,并于1971年装在公共汽车上进行示范性运行,性能良好,环境特性(噪声和排气污染)尤为出色。

第四阶段:发展斜盘传动的双作用发动机。

飞利浦公司于1968年设计了4-65型双作用发动机,该型发动机是斜盘传动的四缸双作用斯特林发动机,如图1.8所示。该型发动机每缸的工作容积为 65 cm^3 ,设计功率为 44 kW 。飞利浦公司设计4-65DA型斯特林发动机的主要目的是确定斜盘传动机构的摩擦损失、验证斜盘传动机构轴承的可靠性以及发动机的功率调节功能,试验结果表明该型发动机性能良好,达到了设计目标。

在4-65型斯特林发动机的基础上,1971年飞利浦公司设计了功率更大的四缸双作用斯

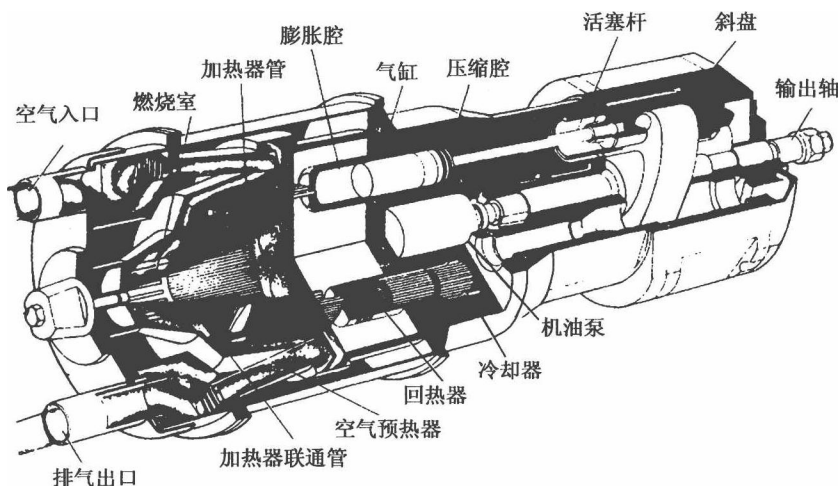


图 1.8 4-65 型四缸双作用斯特林发动机

特林发动机,型号为4-215。该发动机缸径为73 mm,活塞行程为52 mm,每缸的工作容积为215 cm³。工质采用氢气,在加热器管壁温度为750℃、冷却器冷却水进口温度为70℃和20 MPa的平均循环压力下,功率达到了125 kW/4 000 r/min。该型发动机于1975年安装在美国福特(Ford)公司的Torino轿车上进行了运行试验。

由于飞利浦公司的斯特林发动机的研究工作取得了大量成果,使得斯特林发动机获得了新生,引起了不少国家的注意和兴趣。美国、瑞典、前西德、日本等投入巨资进行研制。美国的通用汽车(General Motors)公司在1958年与飞利浦公司签订了专利合同,飞利浦公司还将专利转让给了瑞典的联合斯特林发动机公司(United Stirling)和前西德的曼恩-曼哈姆(MAN/MWM)公司。

美国通用汽车公司在1958~1970年间对斯特林发动机做了许多有价值的工作。通用汽车公司引进了飞利浦公司的专利,研制出GPU-3型菱形传动的单缸发动机,缸径70 mm,活塞行程30 mm。该发电机组除了用作地面发电装置外,还被安装在汽车上用来对汽车蓄电池充电。

通用汽车公司对斯特林发动机的研究,除了发电设备外,还包括船舶推进、车用动力和各种军事以及空间应用等方面,设计、制造了多种型号、各种用途的试验机。

前西德的曼恩-曼哈姆公司的研究侧重于军事用途的斯特林发动机。该公司设计的斯特林发动机包括单作用菱形传动的发动机和四缸双作用发动机,其中4-100型四缸单作用菱形传动发动机功率达到90 kW,具有良好的环境特性。

瑞典联合斯特林发动机公司自1958年获得飞利浦公司的专利权后,在1971~1973年对飞利浦公司的4-235型和1-98型斯特林发动机进行了广泛的试验室台架试验和装车、装艇运行试验。同时自行设计了四缸菱形传动配气活塞式发动机4-615,每缸工作容积为615 cm³,功率为145 kW,单位功率质量达15 kg,但造价也很高。此后,联合斯特林发动机公司的研制方向从单作用转向双作用。该公司研制的V4X型发动机如图1.9所示。第一台双作用热气机

为 V4X-40, 为四缸、单曲轴传动, 气缸呈 30°V 形布置, 缸径为 50 mm, 行程为 46 mm, 每缸工作容积为 90 cm^3 , 工质为氢气, 在加热器管壁温度为 700°C 、冷却水进口温度为 70°C 和平均循环压力为 10.5 MPa 时, 功率为 $36\text{ kW}/(4\,500\text{ r/min})$, 最高效率达到 30%。接着研制了更大功率的四缸双作用热气机 V4X-75, 每缸工作容积为 189 cm^3 , 工质为氢气, 结构形式与 V4X-40 类似。在加热器管壁温度为 718°C 、冷却水进口温度为 70°C 和平均循环压力为 15 MPa 时, 功率为 $73.6\text{ kW}/(2\,400\text{ r/min})$, 在 $1\,200\text{ r/min}$ 时, 获得了 35% 的最大有效效率。V4X-40 和 V4X-75 型发动机分别被安装在小轿车和载重卡车上进行了道路试验。

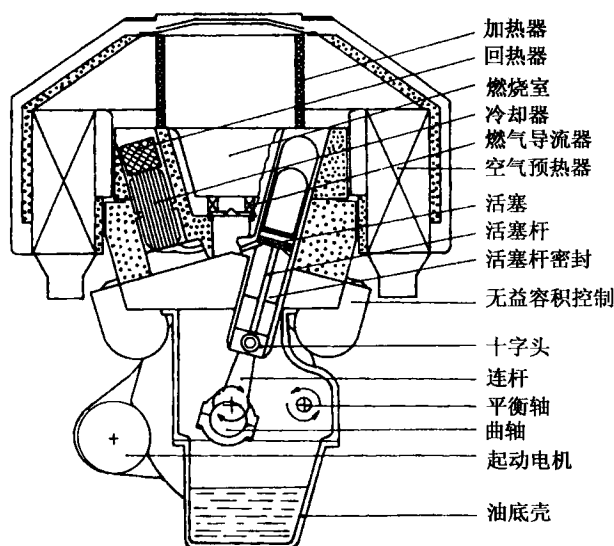


图 1.9 V4X 型双作用斯特林发动机

1977 年底, 联合斯特林发动机公司接受了美国 DOE 的 1.1 亿美元的资助, 与 MTI (Mechanical Technology Inc.) 等美国公司合作, 重点在接下来的六年间发展车用发动机。该公司研制的车用发动机四个气缸呈正方形布置, 双曲轴传动, 型号为 P40, P75, P150, 它们的功率分别为 40 kW、75 kW、150 kW。其中 P75 型发动机的缸径为 85 mm, 活塞行程为 48 mm, 每缸工作容积为 275 cm^3 , 用氢作工质。在加热器管壁温度为 720°C 、冷却水进口温度为 60°C 、平均循环压力为 14 MPa 时, 功率为 $75\text{ kW}/(2\,200\text{ r/min})$, 最大有效效率为 37%。P150 型发动机由两台 P75 型发动机装在一套公用曲轴箱上组成。

联合斯特林发动机公司与美国 STM 公司合作, 研制了 V160 型斯特林发动机发电机组。发动机的结构呈 90°V 形布置, 是双缸双活塞发动机, 缸径为 68 mm, 活塞行程为 44 mm, 用氦气作工质, 功率为 $7.36\text{ kW}/(1\,800\text{ r/min})$ 。该机组被安装在家用旅行车上, 作为空调、照明和炊事的电力源。

在这段时间里, 除了上述国家外, 日本、英国、加拿大、法国、意大利、南非等也投入了许多资金和精力对斯特林发动机进行理论或试验研究, 研制的重点是车用发动机。

1.3.3 斯特林发动机的发展现状及其应用

1982年3月,在英国伦敦里丁大学(Reading University)召开了第一届国际斯特林发动机学术会议。会议由英国机械工程学会发起并主办,会议主要议题是探讨“斯特林发动机向实用化进展”的问题。会议认为,斯特林发动机技术的研究,不应把人力和物力集中到车用发动机的研制上,因为汽车工业是内燃机最巩固的阵地,在液体燃料尚未枯竭之际,不要与内燃机去竞争;要把斯特林发动机技术研究中已取得的成果用于发展较低功率的、大约为50kW以内的生物能(包括煤)发动机;首先进入能源市场,满足发展中地区的能源需要;研制用化学能或储热的水下动力,满足海洋开发用深潜、隧道、矿井的需要;研究廉价的耐高温材料,大幅度降低成本;继续研究密封技术,储热技术和无公害的城市交通系统等。

从上世纪80年代起,斯特林发动机研究的重点不再集中在车用发动机的研制上,而是将人力和物力投入到内燃机所不擅长的领域中。从上世纪90年代开始,斯特林发动机陆续在军事和民用领域得到应用,如水下动力、垃圾填埋气发电、热电联供系统、太阳能热发电等。

1. 水下动力

现代战争中,潜艇具有举足轻重的地位,由于其隐蔽性好、攻击力强,在海战和海防中都起着重要的、不可替代的作用。与核潜艇相比,常规潜艇已发展近百余年,近年来,随着大量高新技术的应用,常规潜艇技术战术指标得到了大幅度提高,已成为越来越多国家重点发展的目标。但是常规柴电潜艇的最大缺陷是水下续航力有限,必须经常在通气管状态下使用柴电机组为蓄电池充电,这就降低了潜艇的隐蔽性。此外,随着当今综合反潜探测手段和武器的飞速发展,使潜艇这种隐蔽性降低所带来的危险更突出,极大地威胁了常规潜艇的生存力,因此,提高潜艇的隐蔽性就成为各国海军日益关心的重要问题。近年来出现的不依赖空气的AIP推进系统,大大提高了潜艇的水下续航力,显著改善了潜艇的隐蔽性,已被公认为是21世纪常规潜艇发展的标志性技术之一。

瑞典是第一个研制成功AIP潜艇的国家,其斯特林发动机AIP技术处于世界领先水平。1988年,瑞典对HMS Näcken级潜艇进行改装,加装了AIP系统,并经过大量的试验,取得圆满成功,为后来的Gotland级潜艇建造奠定了良好的基础。Gotland级潜艇共建造三艘,分别是HMS Gotland,1995年2月下水,1996年7月服役;HMS Uppland,1997年5月下水;HMS Halland,1997年10月下水。Gotland级潜艇装备了斯特林发动机AIP系统,其水下连续航行时间达到15天。2003~2004年,瑞典对二艘Södermanland级A17潜艇进行了改装,分别为HMS Södermanland和HMS Östergötland,加装装备MKⅢ型斯特林发动机的AIP系统。2002年,瑞典对HMS Näcken级潜艇再次进行了大修和改装,出售给了丹麦,重命名为HMS Kronborg。至此,瑞典所有的在役潜艇都加装了AIP系统。图1.10为加装了斯特林发动机AIP系统的瑞典Gotland级A19潜艇。

瑞典的斯特林发动机AIP潜艇自列装以来,运行状况良好,安全可靠,引起了各国的高度重视。美国为了提高其反潜能力,于2005年租借了瑞典的Gotland潜艇,与其航母战斗群进行反潜对抗训练,为期2年。在实战演习中,Gotland潜艇表现优越,多次突破美军防线,西方海军专家给予了极高的评价。

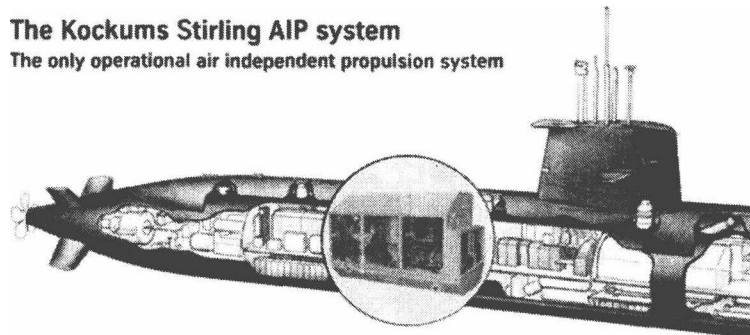


图 1.10 瑞典 A19 潜艇

目前,瑞典 Kockums 公司正在进行 V4-275R MKⅣ型斯特林发动机的研制,改进之一就是原来多缸共用的压力燃烧室改为单缸独用的压力燃烧室,以实现大幅度提高燃烧室压力,从而提高发动机系统的工作潜深的目标。

早在 1993 年至 1995 年,日本就购买了两台斯特林发动机,并进行了装艇试验,并于 2001 年对日本“春潮”级“朝潮”号潜艇完成改装,装备了斯特林发动机 AIP 系统。该艇标准排水量 2900t,水下排水量 3250t,配备有 2 台柴油机,功率 4100kW,4 台 V4-275R MKⅡ 发动机,功率 240kW。该艇于 2003 年 3 月完成了试航。日本经过几年对装备在该潜艇上的斯特林发动机评估后,于 2005 年 9 月签署了从瑞典 Kockums 公司引进斯特林发动机的合同,用于装备“亲潮”级潜艇,每艘艇装备 4 台斯特林发动机。Kockums 公司负责生产和交付斯特林发动机的部件,川崎重工负责部件的装配工作以及最终向船厂交付完整的 AIP 系统。2007 年 12 月首条“亲潮”级潜艇下水。

2005 年 11 月,新加坡决定从瑞典购买另两艘 Södermanland 级 A17 潜艇,并进行改造,加装斯特林发动机 AIP 系统。

瑞典 Kockums 公司将斯特林发动机应用于常规潜艇,是斯特林发动机商品化最成功的典范。

2. 热电联供

微型热电联供(MCHP),是指用于家庭住宅的,发电功率一般在 1 kW ~ 10 kW 之间,并可以满足以家庭为单位的用电、采暖和热水需求的分布式能源系统,图 1.11 为典型的示意图。斯特林发动机应用于微型热电联供(MCHP)是其工业化和商业化的重要方向。

图 1.12 是 Whisper Tech 公司研制的 MCHP 系统。Whisper Tech 公司成立于 1995 年,总部位于新西兰的 Christchurch,目前生产两个型号的 MCHP 产品:1.2 kW 的交流机(AC WhisperGen)和 0.8 kW 的直流机(DC WhisperGen)。在今天的 MCHP 市场上,Whisper Tech 是商业化相对最为成熟的公司,无论是从研发、制造还是销售上都处于市场的领先地位,其产品是唯一通过 CE 认证的。

1999 年,Whisper 公司开始在欧洲销售直流机,同时在实验室开始了交流机的实验,并于 2002 年,在英国 30 个家庭安装交流机进行现场实验。同年,正式和英国 Powergen 公司(英国第二大能源零售商)签订共同开发英国市场合同。2003 年 4 月,Powergen 将 400 台 AC WhisperGen

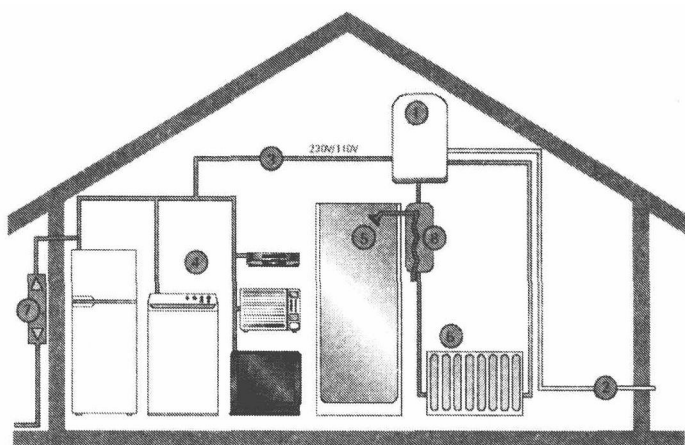


图 1.11 微型热电联供(MCHP)系统

1—发电模块;2—燃料供应;3—电力输出;4—家用电器;
5—家用热水;6—家用暖气;7—电表(正反转);8—热水箱

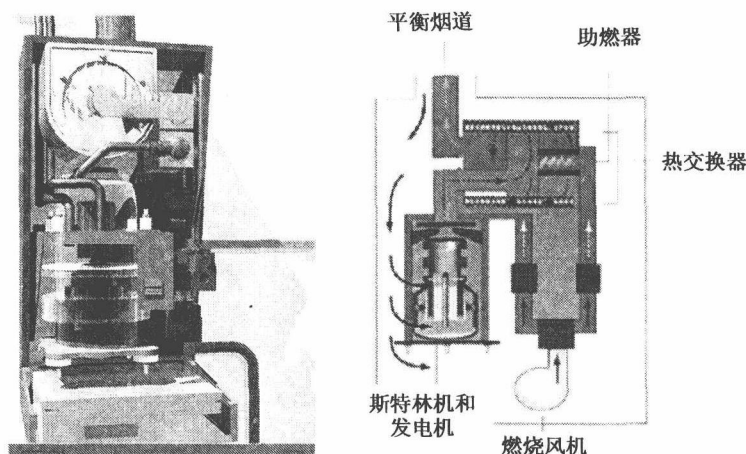


图 1.12 Whisper Tech 公司的 MCHP 系统

安装在英国家庭。2004 年, E.ON UK 公司(Powergen 的母公司,也是英国第二大电力公司)与 Whisper 签下订单,承诺在未来五年订购至少 80 000 台 WhisperGen。

美国 Sunpower 公司是专业的自由活塞式斯特林机制造商,产品包括发动机、制冷机、低温制冷机、线性电机等。2002 年,他们与英国 MicroGen 公司合作,共同开发基于斯特林发动机的家用 MCHP 产品。针对英国市场上每年销售的锅炉其中 3/4 是用来代替老式的和报废的锅炉,因此其产品完全可以作为锅炉的直接替代品而进入市场。样品已于 2006 年 3 月在 NASA 主办的 STAIF(Space Technology & Applications International Forum)产品展览会上正式面世,额定电功率 1 kW,热功率 5.5 kW 以上,总能效率超过 90%。预计在 2007 年,首先投放英国市场,进而大规模生产,占领国际市场。