

斯特林循环分析与发动机设计

Analysis of Stirling Cycles and
Design of Stirling Engines

倪明江 肖 刚 岑可法 著



科学出版社

斯特林循环分析与发动机设计

Analysis of Stirling Cycles and Design of Stirling Engines

倪明江 肖 刚 岑可法 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

斯特林发动机是典型的外热式原动机,利用密封工质的周期性膨胀和压缩驱动活塞往复运动,实现热能向机械能的转换。振荡流贯穿斯特林循环的吸热膨胀、回热冷却、放热压缩和回热升温全过程,是循环分析和发动机设计的关键。

本书较为系统地介绍了斯特林热力循环的基本理论、振荡流的传热传质规律和发动机优化设计方法,可以作为能源动力类专业的相关教材,也可以为太阳能热发电、分布式能源和水下动力等系统开发提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

斯特林循环分析与发动机设计 = Analysis of Stirling Cycles and Design of Stirling Engines / 倪明江, 肖刚, 岑可法著. —北京: 科学出版社, 2019.3
ISBN 978-7-03-060730-0

I. ①斯… II. ①倪… ②肖… ③岑… III. ①绝热发动机-研究
IV. ①TK05

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第041426号

责任编辑: 范运年 / 责任校对: 王萌萌
责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

天津文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年3月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019年3月第一次印刷 印张: 14 1/4

字数: 272 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

1816年,英国工程师罗伯特·斯特林发明了斯特林发动机,有效推动了当时生产力的发展。随着汽油机、蒸汽轮机、柴油机、燃气轮机等原动机出现和逐渐成熟,斯特林发动机的发展也几经起伏。1930~1990年间,荷兰飞利浦公司及其合作伙伴在斯特林发动机的设计和制造方面开展了大量的研究工作,并在水下动力系统中成功应用,极大地推动了现代斯特林发动机设计理论的发展。2000年前后,斯特林发动机开始在可再生能源和分布式能源系统中示范和应用,人们对斯特林发动机的类型、功率和用途等有了更加多样化的需求。

斯特林循环的理论效率接近于卡诺循环。在小型原动机中,斯特林发动机效率高、噪声低、热源适应性强,在太阳能、生物质能、余热利用、水下动力等领域具有广阔的应用前景,产品设计呈现多样化需求。现代斯特林发动机起源于军工需求,研究工作长期封闭,设计理论不够完善,特别是对斯特林循环中振荡流的传热传质和热功转换过程缺乏系统的认识,无法形成自由设计的理论和方法,制约了斯特林发动机进一步研发和应用。

目前,国内专门介绍斯特林循环和斯特林发动机的书籍很少,主要有邹隆清、刘洪硕和邓十洲编《斯特林发动机》(1985年湖南大学出版社)、钱国柱、周增新金和严善庆编著《热气机原理与设计》(1987年国防工业出版社)以及金冬寒著《斯特林发动机技术》(2009年哈尔滨工程大学出版社)。国外的主要著作有Graham Walker的*Stirling Engines*(1980年)、William R. Martini的*Stirling Engine Design Manual*(1983年)、Israel Urieli的*Stirling Cycle Engine Analysis*(1984年)、Mounir B. Ibrahim, Roy C. Tew, Jr.的*Stirling Convertor Regenerators*(2011年)、Allan J. Organ的*Stirling Cycle Engines: Inner Workings and Design*(2014年)等。近年来,借助于先进的计算工具和实验仪器,在斯特林循环的内部流动(振荡流)及换热特性、整机建模与设计优化等方面的取得了进展较大,为发展适用性更强的斯特林循环分析模型奠定了较好的基础。

作者在学习和参考前人研究工作的基础上,结合多年来的研究成果完成本书。本书围绕斯特林循环分析与发动机设计中的相关问题进行了较为深入的探讨,介绍了斯特林发动机研究概况、基本类型、结构组成和关键部件等,分析了振荡流的传热传质特性对循环效率、功率的重要影响,讨论了加热器、冷却器和回热器中振荡流的传热传质特性,提出了斯特林循环分析模型改进的方法,并针对具体案例,介绍了单目标和多目标优化方法,期望读者能在开展相关技术研究和产品

研发时提供启发和参考。

感谢浙江大学的俞自涛教授、邱利民教授和甘智华教授以及中国科学院理化研究所的罗二仓研究员在斯特林发动机研究和本书编写过程中提供的指导和帮助！感谢陈聪慧、彭浩、周天学、时冰伟、Umair Sultan、史和春、于双源、王树林、黄怡青、范皓霆、瞿凡、赖华盛、陈欣、虞培峰、刘伯岙、邱浩和孙安苇等同学卓有成效的研究工作！特别感谢虞培峰、彭浩、王树林、赖华盛和陈欣等同学在本书整理和撰写过程的辛勤付出！

本书的工作感谢国家自然科学基金项目(51476140)和国家重点研发计划项目(2017YFA0205700)的支持。

鉴于作者水平所限，书中难免存在疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正！

作者于求是园

2018年12月

主要符号表

A_d	置换活塞底面积, m^2	h	对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
A_m^*	修正后的无量纲幅度	I	电流, A
A_o	振荡流幅度, m	I'	动态电流, A
A_o^*	振荡流无量纲幅度	J_0	第一类贝塞尔函数
A_p	动力活塞底面积, m^2	J_1	第二类贝塞尔函数
A_{pis}	活塞运动幅度, m	K_C	实际与理想效率比
A_r	回热器的截面积, m^2	K_{mult}	导热经验乘数
a	热扩散系数, m^2/s	k	导热系数, $W/(m \cdot K)$
B_p	动力活塞杆长度, m	L	活塞连杆长度, m
B_d	配气活塞杆长度, m	L_{rel}	相对连杆长度
Δb	活塞杆相对长度	L_d	配气活塞杆长度, m
CAVE	“速度环”定量评价指标	M_{cr}	理论循环质量, kg
c_v	比定容热容, $J/(kg \cdot K)$	M	扭矩, $N \cdot m$
c_p	比定压热容, $J/(kg \cdot K)$	M_{ct}	理论循环质量, kg
D_c	气缸内直径, m	M_{rs}	丝网总质量, kg
D_i	管内径, m	$\dot{m}_r$	回热器的质量流量, kg/s
D_{ro}	活塞杠直径, m	Nu	努塞尔数
D_r	回热器直径, m	n	转速, r/min
De	迪恩数	n_r	丝网片数
d_w	丝网直径, m	P^*	无量纲循环压力
d_h	回热器水力直径, m	ΔP^*	无量纲压降
E	能量, J	ΔP_{mean}^*	平均无量纲压降
e	偏心距, m	Pe	贝克利数
e_{rel}	相对偏心距	Pr	普朗特数
F_{mult}	阻力经验乘数	p	气体压力, Pa
F	摩擦系数	$\hat{p}$	时均压力, Pa
$\bar{f}$	摩擦力, N	$\tilde{p}$	脉动压力, Pa
$\bar{f}$	平均流阻系数	p_m	气体平均压力, Pa
H_{mult}	对流换热经验乘数	p_0	初始压力, Pa
		Q_b	导热损失, W

Q'_b	动态导热损失, W	$\vec{V}$	气体速度, m/s
Q_c	压缩腔吸收热量, J	$\hat{V}$	时均速度, m/s
Q_e	膨胀腔吸收热量, J	$\tilde{V}$	脉动速度, m/s
Q_h	加热器吸热量, J	V_a	瓦伦西数
Q_i	对流损失, W	V_c	压缩腔容积, m ³
Q'_i	动态对流损失, W	V_{clc}	压缩腔余隙容积, m ³
Q_k	冷却器放热量, J	V_{cle}	膨胀腔余隙容积, m ³
Q_s	辐射热损, W	V_D	死容积, m ³
R	等容热容, J/(kg·K)	V_e	膨胀腔容积, m ³
Re_{d_h}	回热器部分的动力雷诺数	V_h	加热器的容积, m ³
$Re_{\omega(d_h)\text{mean}}$	平均动力雷诺数	V_k	冷却器的容积, m ³
$Re_{\max}$	最大雷诺数	V_{pis}	活塞扫气容积, m ³
Re_{ω}	动力雷诺数	V_r	回热器的容积, m ³
r	曲柄半径, m	V_{swc}	压缩腔扫气容积, m ³
S_d	配气活塞行程, m	V_{swe}	膨胀腔扫气容积, m ³
S_p	动力活塞行程, m	W_c	压缩腔循环功, W
St	斯坦顿数	W_{cy}	循环的指示功, J
$S_{V,\max-}$	速度分布曲线斜率的反向最大值	W_e	膨胀腔循环功, W
T	气体温度, K	W_{net}	循环的输出功, W
$\hat{T}$	时均温度, K	W_{sh}	轴功率, W
$\tilde{T}$	脉动温度, K	Y_0	诺伊曼函数
T_c	冷腔工质温度, K	α	活塞相位角, (°)
T_{cyc}	震荡周期时间, s	β	连杆摆角, (°)
T_h	热腔工质温度, K	γ	绝热系数
T_w	管壁温度, K	θ	曲柄转角, (°)
T_o	流体温度, K	ω	角速度, rad/s
U	电压, V	σ	比表面积, m ⁻¹
U'	动态电压, V	ε	应变率, s ⁻¹
U^*	气体无量纲速度	μ	气体动力黏度, Pa·s
$U_{\max}^*$	最大气体无量纲速度	μ_{mean}	平均动力黏度, Pa·s
$u_{\max}$	气体的最大速度, m/s	μ_r	回热器处的动力黏度, Pa·s
u_{pis}	活塞运动速度, m/s	ρ	气体密度, kg/m ³
u_r	回热器的气体流速, m/s	ρ_{cycle}	一个循环的平均密度, kg/m ³
		ρ_E	膨胀腔气体密度, kg/m ³
		ρ_{mean}	平均密度, kg/m ³

ρ_{metal}	丝网密度, kg/m^3	τ	压缩腔和膨胀腔温度之比
ρ_r	回热器气体密度, kg/m^3	κ	压缩腔和膨胀腔容积之比
η_C	冷却器换热效率	χ	附加容积之比
η_{ex}	焓效率	Φ	耗散力, N
η_H	加热器换热效率	$\phi_{V,0}$	流道中心点流体速度为 0 的 相位, ($^\circ$)
η_{sh}	机械效率	φ	孔隙率
λ	斯托克斯数		
δ	斯托克斯边界层厚度, m		
δ_c	循环率		

目 录

前言

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 斯特林发动机简介	1
1.1.1 斯特林发动机结构类型	1
1.1.2 斯特林发动机功能类型	2
1.1.3 自由活塞式斯特林发动机	3
1.2 斯特林发动机的发展历程	4
1.2.1 早期斯特林发动机的发展	4
1.2.2 现代斯特林发动机在国外的研发情况	5
1.2.3 现代斯特林发动机在国内的研发情况	6
1.3 斯特林发动机的应用	8
1.3.1 斯特林发动机在太阳能热发电领域的应用	8
1.3.2 斯特林发动机在生物质燃料发电领域的应用	9
1.3.3 斯特林发动机在分布式能源领域的应用	10
1.3.4 斯特林发动机在水下动力领域的应用	11
1.3.5 斯特林发动机在航空领域的应用	12
1.4 本章小结	13
参考文献	13
第 2 章 斯特林发动机的设计原则	15
2.1 斯特林发动机热交换器设计	15
2.1.1 加热器的设计特点	18
2.1.2 回热器的设计特点	19
2.1.3 冷却器的设计特点	20
2.2 活塞气缸结构及工作原理	20
2.3 斯特林发动机传动机构设计	21
2.3.1 菱形传动	22
2.3.2 曲柄连杆传动	24
2.3.3 斜盘传动	27
2.3.4 摇摆铰传动	28
2.4 浙江大学 100W 级 β 型斯特林发动机设计	29

2.5 本章小结	34
参考文献	34
第3章 小流阻振荡流及加热器和冷却器特性	36
3.1 不可压缩圆管振荡流特性	36
3.2 不可压缩异形管振荡流特性	54
3.2.1 弯管	54
3.2.2 变截面管	60
3.3 可压缩圆管振荡流特性	66
3.4 圆管振荡流换热特性	76
3.4.1 换热关联式	76
3.4.2 加热器内的传热传质特性与优化	85
3.5 本章小结	89
参考文献	90
第4章 大流阻振荡流及回热器特性	92
4.1 回热器流动特性	92
4.1.1 回热器流阻系数	92
4.1.2 可压缩振荡流定量分析方法	102
4.2 回热器换热特性	113
4.2.1 回热器单向流换热特性	117
4.2.2 回热器振荡流换热特性	123
4.3 回热器类型	129
4.4 本章小结	131
参考文献	132
第5章 斯特林循环及分析方法	135
5.1 斯特林理想循环	135
5.2 斯特林循环分析方法的传统分类	138
5.2.1 零阶分析法	138
5.2.2 一阶分析法	140
5.2.3 二阶分析法	141
5.2.4 三阶分析法	145
5.2.5 四阶分析法	146
5.3 斯特林循环分析方法重新分类	147
5.4 改进 Simple 循环分析模型	149
5.4.1 模型简介	149
5.4.2 热损和功损计算模块	150

5.4.3 案例: GPU-3 斯特林发动机改进 Simple 模型分析	152
5.5 Sage 分析模型	155
5.5.1 Sage 软件介绍	155
5.5.2 β 型斯特林发动机的 Sage 模型	156
5.5.3 案例: 浙江大学 100W 级 β 型斯特林发动机 Sage 模型分析	162
5.6 改进的 Sage 分析模型	164
5.6.1 能量损失分析	165
5.6.2 模型参数改进	166
5.6.3 模型耦合	169
5.6.4 模型结果分析	170
5.7 本章小结	175
参考文献	176
第 6 章 斯特林发动机整机优化	179
6.1 单目标优化方法	179
6.1.1 100W 级 β 型斯特林发动机内部循环特性	179
6.1.2 斯特林发动机可用能分析	182
6.1.3 斯特林发动机单目标优化分析	186
6.2 多目标优化方法	192
6.2.1 多目标优化理论	192
6.2.2 遗传算法	193
6.2.3 粒子群算法	194
6.2.4 模拟退火算法	197
6.2.5 多目标决策方法	198
6.3 多目标优化案例分析	201
6.3.1 案例 1: GPU-3 斯特林发动机多目标优化分析	201
6.3.2 案例 2: 100W 级 β 型斯特林发动机多目标优化分析	209
6.4 本章小结	212
参考文献	212
附录	215

第1章 绪 论

斯特林发动机是一种外部燃烧(加热)的闭式循环发动机,其热源来源广泛、运行时噪声较低,同时斯特林发动机的循环效率比一般的发动机要高,其理想循环效率可以达到卡诺循环的效率。因此斯特林发动机在太阳能热利用、余热利用以及热电联产等诸多领域有相当广阔的发展和应用前景。本章绪论部分将对不同类型和不同功能的斯特林发动机、斯特林发动机的国内外发展历程以及目前的应用情况进行相应的介绍。

1.1 斯特林发动机简介

1.1.1 斯特林发动机结构类型

斯特林发动机主要由膨胀腔、加热器、回热器、冷却器和压缩腔组成,根据工作空间和回热器的配置方式,可以分为 α 、 β 和 γ 三种基本类型,如图 1-1 所示^[1]。 α 型斯特林发动机又称为双活塞式发动机,其结构最简单,即膨胀腔、加热器、回热器、冷却器、压缩腔顺次布置,膨胀腔工质做正功,而压缩腔工质做负功。 β 型和 γ 型斯特林发动机又被称为配气活塞式发动机,它们和 α 型斯特林发动机最大的区别在于引入了配气活塞,配气活塞本身不做功,只负责驱动工质在膨胀腔、加热器、回热器、冷却器、压缩腔之间来回运动;而动力活塞负责对外做功。 β 型斯特林发动机配气活塞和动力活塞在同一个缸体中运动,而 γ 型斯特林发动机的配气活塞和动力活塞分别处于两个缸体中。

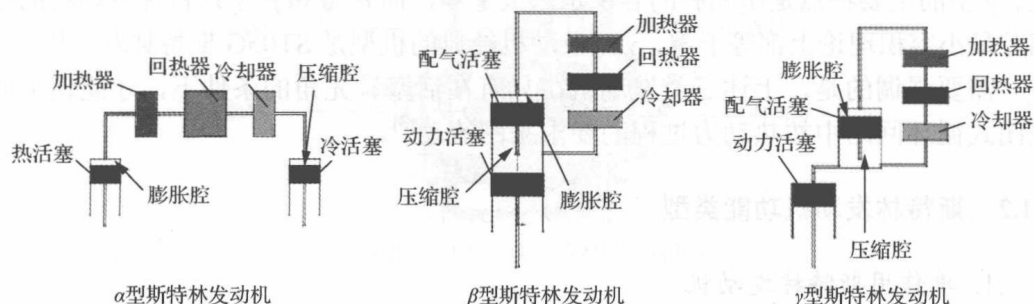


图 1-1 斯特林发动机分类

1. 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之中。靠近冷

却器一侧的气缸和活塞组成压缩腔，靠近加热器一侧的气缸和活塞组成膨胀腔。在斯特林发动机膨胀过程，工质依次流经膨胀腔、加热器、回热器、冷却器和压缩腔；而在压缩过程，工质反向流经上述腔室。回热器处于膨胀腔和压缩腔之间，一端具有较高温度，另一端具有较低温度。两个活塞在循环过程中承担做功的功能，活塞的上、下腔的气体压差都很大^[2]。为了减小活塞上下压差所带来的额外损失，一般会设计相应的缓冲腔。 α 型斯特林发动机最典型的机型是 V-160 型斯特林发动机。

2. β 型斯特林发动机

β 型斯特林发动机只有一个气缸，两个活塞中心在同一直线上。靠近冷却器一侧的活塞称为动力活塞，靠近加热器一侧的活塞称为配气活塞。配气活塞不做功，其作用是使工质在冷腔和热腔中来回穿梭，因此配气活塞又被称之为工质置换器。膨胀腔由配气活塞和相应的气缸组成，与加热管相连，膨胀腔容积的变化由配气活塞的运动所控制。压缩腔则由动力活塞的上部和配气活塞的下部以及相应的气缸所组成，上端与冷却器相连。压缩腔容积的变化取决于配气活塞和动力活塞的联合运动。这种斯特林发动机的特点是配气活塞和动力活塞的行程有一段是重叠的，活塞相位领先角(膨胀活塞领先于压缩活塞的曲轴转角)小于容积相位领先角(膨胀容积领先于压缩容积变化的角度)。这类结构的斯特林发动机也被称作配气活塞式斯特林发动机，其经典的机型是 GPU-3 斯特林发动机。

3. γ 型斯特林发动机

γ 型斯特林发动机是 β 型斯特林发动机的一个变型，两者基本上相似。在 γ 型结构中，气缸分为两部分，两个活塞分别置于被分割的同一气缸的两部分中。与 β 型结构一样， γ 型的配气活塞控制膨胀腔，而配气活塞又和动力活塞联合控制压缩腔。 γ 型的主要特点是压缩腔的容积永远大于零，而 α 型和 β 型斯特林发动机的压缩腔最小容积理论上都等于零。 γ 型发动机经典的机型是 ST05G 斯特林发动机。

需要强调的是，上述三类发动机，只有在活塞领先角的条件下，才能使工质在闭式循环回路中按热动力过程的要求来回流动^[3]。

1.1.2 斯特林发动机功能类型

1. 单作用斯特林发动机

如果发动机动力活塞只有一侧存在完整的斯特林循环，即只有一侧存在加热器、回热器和冷却器，那么该发动机为单作用发动机。上述各种结构类型(α 、 β 、 γ)都可以设计成单作用的斯特林发动机，这类发动机的输出功率通常比双作用的斯特林发动机功率小得多，以上三种经典机型的参数如表 1-1 所示。

表 1-1 经典的斯特林发动机

型号	冷热端温度	工质种类以及压力	功率和效率	驱动方式以及类型
V160	热端 630℃	氦气 平均压力 15MPa	9kW, 热电效率 30% (1500rpm)	α 型单作用
GPU-3	热端壁面 703.4℃ 冷端壁面 14.9℃	氦气 平均压力 4.14MPa	循环功 3.958kW (2500rpm)	β 型传动单作用
ST05G	热端 700℃ 冷端 25℃	空气或氦气 平均压力 1MPa 左右	1kW (1000rpm)	γ 型传动单作用

2. 双作用斯特林发动机

如果发动机动力活塞上侧和下侧都存在完整的斯特林循环,那么该发动机称为双作用斯特林发动机。该类型斯特林发动机的动力活塞的两侧既是一个循环的热端,也是另一个循环的冷端,如图 1-2 所示。右侧活塞上端通过加热管与热端相连,下端通过冷却管与冷端相连,右侧活塞的冷端又通过内部管道与左侧活塞的热端相连,这样右侧活塞上端是一个斯特林循环的一部分,而右侧活塞下端是另一个斯特林循环的一部分。这种发动机的功率通常比较大,比较经典的机型是 4-95 型斯特林发动机。

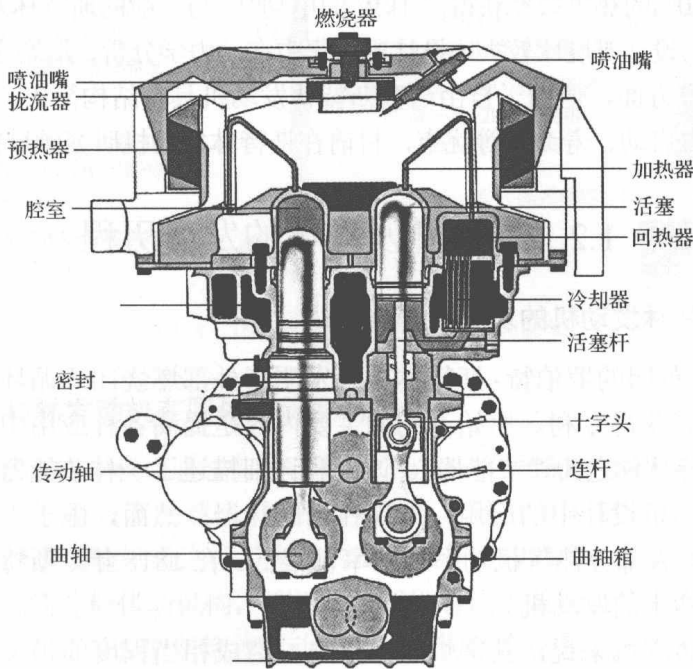


图 1-2 4-95 型斯特林发动机^[4]

1.1.3 自由活塞式斯特林发动机

从本质上说,斯特林发动机只有两种基本类型,即双活塞式和配气活塞式斯特林发动机。双作用式和自由活塞式都是从双活塞式和配气活塞式派生而成的^[5],如图 1-3 所示为单缸配气式自由活塞式斯特林发动机。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。斯特林发动机的传动机构比内燃机选择的方案多。

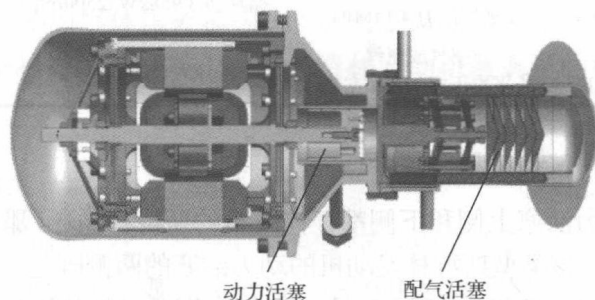


图 1-3 单缸配气式自由活塞式斯特林发动机

以美国太阳动力公司(Sunpower)成功研发出一套自由活塞式斯特林热电联产系统 EG-1000 为例。根据已经公开的数据,该系统高低热源的温度分别为 600°C 和 50°C 以下,最终以 30% 的热电效率获得了 1kW 的电功^[6]。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,目前在斯特林发动机研究领域得到迅速发展。

1.2 斯特林发动机的发展历程

1.2.1 早期斯特林发动机的发展

1816 年,英国的罗伯特·斯特林首先发明了外部燃烧闭式循环热气机,即斯特林发动机,并获得专利。原始专利的主要内容是提高各种应用中燃油经济性的热交换器,斯特林称之为“节能器”。该专利详细描述了一种节能器在其独特的闭式循环空气发动机设计中的应用,即现在的回热器。然而,限于当时的条件和人们的认知水平,大部分热气机功率和效率都很低。在 1818 年,斯特林建造了一个能够在采石场抽水的发动机。

对当时的蒸汽机来说,其锅炉经常爆炸,造成相当程度的损失。所以尽管有争议,人们普遍认为,斯特林发动机的发明不仅是为了节省燃料,还为当时的蒸汽机创造了一种更安全的替代品。所以,大约从 1860 年开始,大量低到中功率的斯特林发动机被生产出来,进行为教堂泵送空气和水等工作。这些较小的发动机通常在较低温度下运行,但效率相对较低,它们的优点是,与蒸汽机相比更为简单,操作更安全。19 世纪末以后,虽然有几种类型的斯特林发动机仍在生产,但除了一些小的机械改进之外,斯特林发动机的设计工作停滞不前。

虽然在工业和民用领域,斯特林发动机不但没能取代蒸汽机,反而被比其晚半个世纪发明的内燃机所取代,但是其优势不可忽视,比如适用于各种能源,噪音小,不受气压影响等。所以,200 多年来,各国科学家和工程师对于斯特林发动机的研究从未停止,发展历程如图 1-4 所示。

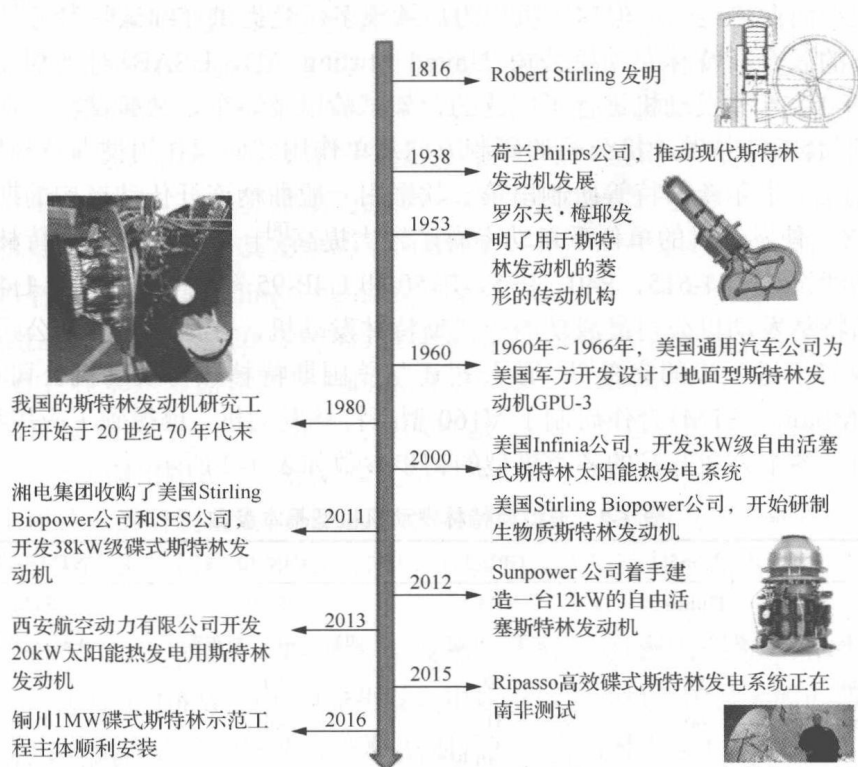


图 1-4 国内外斯特林发动机发展简史

1.2.2 现代斯特林发动机在国外的研发情况

直到 20 世纪 30 年代,通过荷兰飞利浦(Philips)公司的技术研发,现代斯特林发动机技术迎来了一个发展的黄金时期。1947 年,该公司研制了小型斯特林发动机(102C)组,并对该试验机组进行了大量的试验工作。1953 年,罗尔夫·梅耶发明了用于斯特林发动机的菱形传动机构,该机构很好地解决了发动机传动部件的平衡特性,并被成功地运用在 1-365 型斯特林发动机上,使其有效效率达到了 38%^[7]。1965 年,迪克等人发明了“袜套式密封”装置,有效地解决了斯特林发动机活塞动密封问题^[8]。菱形传动机构及袜套式密封装置的发明,为成功发展热气机提供了一种很好的组合。1-98 型斯特林发动机就是其中非常成功的代表,该机型完成了一万小时的耐久性试验,具有多种燃料的广泛适应性和稳定性,成为后续很多机型的设计依据。随后,飞利浦公司设计了四缸菱形传动配气活塞式斯特林发动机 4-235 和斜盘传动的双作用斯特林发动机 4-65 和 4-215。斯特林发动机的技术进步引起了不少国家和公司的关注。

美国通用汽车公司(General Motors Corporation, GM)在飞利浦公司的基础上进行了许多方面的研究和探索,包括发电设备、船舶推进、车用动力和军事以及空间应用等。1960~1966 年,通用汽车公司为美国军方开发了 GPU-3(Ground Power Unit #3)斯特林发动机,并对其进行了详细的测试,虽然最后由于授权许可问题未成功商业化运用,但这一机型为后续很多研究提供详细试验参考^[9]。

瑞典的联合斯特林发动机公司(United Stirling AB, USAB)对飞利浦公司的 1-98 型和 4-235 型发动机进行了广泛的台架试验以及装车、装艇试验。在后续的研究中,联合斯特林发动机公司的研制方向从单作用转向双作用型斯特林发动机。1973 年前后,卡尔奎斯特等研制出第一款采用一般曲柄连杆传动机构的斯特林发动机 V4X,使发动机的单位重量功率有了较大提高^[8]。随后,联合斯特林发动机公司又陆续设计了 4-615、P40、P75、P150 和 U4P-95 等型号的样机。U4P-95 型是联合斯特林发动机公司最成功的一代斯特林发动机,在后续与其他公司的技术合作中取得了进一步的完善^[8]。该公司还与美国斯特林热力发动机公司(Striling Thermol Motors, STM)合作研制了 V160 型斯特林发动机,也得到了应用和改进。在此期间,各个公司开发的各类机型的初步参数如表 1-2 所示。

表 1-2 典型斯特林发动机机型基本参数

型号	1-365	GPU-3	V4X-40	STM 4-120
公司	Philips	GM	USAB	STM
气缸结构	β 型, 单缸	β 型, 单缸	四缸, 30°V 型布置	4 缸, 双作用
缸径/mm	88	70	50	56
行程/mm	60	31	46	48.5
加热器	—	管束式, 40 根内径 3mm 加热管	—	金属纳热管或直接照射式加热管
回热器	—	金属丝网	—	金属丝网
冷却器	—	管束, 312 内径 1mm 冷却管	—	—
冷却系统	水	水	水	水/乙二醇
驱动机构	菱形传动机构	菱形传动机构	单曲轴传动	可调活塞行程的斜盘机构
工作气体	氢气	氢气/氢气	氢气/氢气	氢气(或氢气)
压强/Mpa	10.3	4.14	10.5	12
热端气体温度/°C	700	704	700	720
冷却温度/°C	15	15	70	45~70
输出功率	30kW (2500rpm)	2.9kW (2500rpm)	36kW (4500rpm)	26.3kW (1840rpm)
效率	38% (2500rpm)	35% (2500rpm)	30%	40%~45% (设计)

1.2.3 现代斯特林发动机在国内的研发情况

我国斯特林发动机研究工作开始于 20 世纪 70 年代末。上海齐耀动力技术有限公司(原中船重工 711 所)在斯特林发动机技术领域一直处于领先地位,其研发