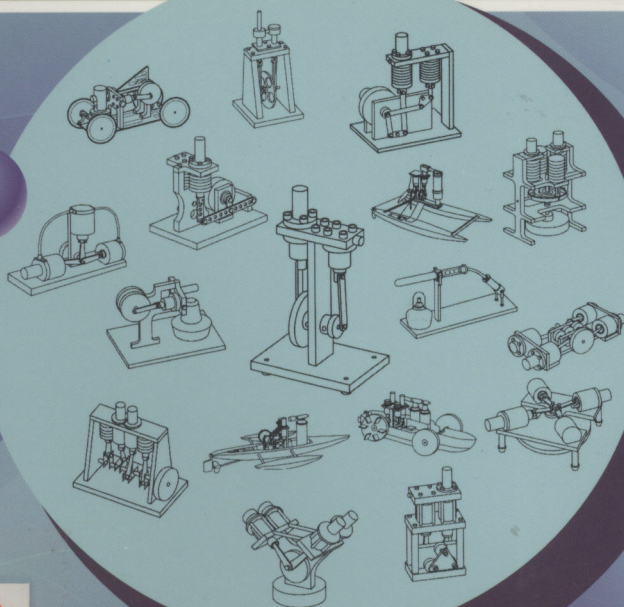


斯特林引擎模型制作

【日】滨口和洋 户田富士夫 平田宏一 著

曹其新 凌芳 等译

STIRLING ENGINE



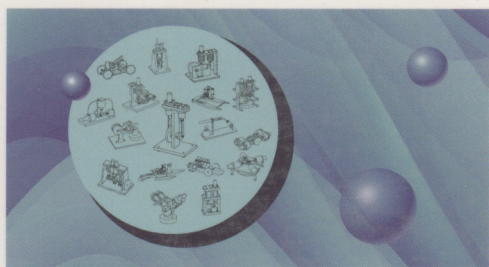
上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

巍巍交大 百年书香
www.jiaodapress.com.cn
bookinfo@sjtu.edu.cn



策划编辑 / 潘 新
责任编辑 / 徐文洁
潘 新
封面设计 / 朱 懿

斯特林引擎模型制作



STIRLING ENGINE

上架建议：机械、能源

ISBN 978-7-313-06434-9



9 787313 064349 >

定价：30.00元

斯特林引擎模型制作

[日] 滨口和洋 户田富士夫 平田宏一 著

曹其新 凌 芳 等译

Tk05

B821

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本教材分6章。介绍斯特林引擎的历史、发展现状、工作原理和特征,讲解斯特林引擎的基础理论及各类教学用引擎模型制作,介绍斯特林引擎模型的设计制作方法以及性能评价,最后介绍斯特林引擎的实际应用情况。本书具有很强的实践性,可作为斯特林引擎模型的设计、制造手册。读者可以参照书中图纸尺寸动手制作,也可以根据书中的理论知识自己设计制作。不论是对实践创造,还是研究学习,都具有一定的指导意义。

本书作为一本实践教材,不仅适合中学生、大学生、研究生,也同样适合于专业技术人员阅读、参考。

Original Japanese edition

Mohei Zukuri de Manabu Sterling Engine

Supervised by Shouichi Iwamoto

Written by Kazuhiro Hamaguchi, Fujio Toda and Kouichi Hirata

Copyright © 2009 by Shouichi Iwamoto, Kazuhiro Hamaguchi, Fujio Toda and Kouichi Hirata

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese Language edition published by Shanghai Jiao Tong University Press

Copyright © 2010

All rights reserved.

上海市版权局著作权合同登记号:图字 09-2010-88

图书在版编目(CIP)数据

斯特林引擎模型制作/(日)滨口和洋,户田富士夫,平田宏一著;曹其新,凌芳等译. —上海:上海交通大学出版社,2010

ISBN 978-7-313-06434-9

I. ①斯… II. ①滨… ②户… ③平… ④曹… ⑤凌… III. ①绝热发动机—建立模型 IV. ①TK05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 075354 号

斯特林引擎模型制作

(日)滨口和洋 户田富士夫 平田宏一 著

曹其新 凌 芳 等译

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海交大印务有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:11.5 字数:211 千字

2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-06434-9/TK 定价:30.00 元

前 言

本书既可作为斯特林引擎模型的设计、制造手册,也可作为今后以斯特林引擎为研究方向的专业人员的入门书。由于斯特林引擎是外燃机,它能利用各种各样的热源,特别是化石燃料被无节制使用,在给地球带来的环境污染问题日益严峻的今天,作为其对策的斯特林引擎再次受到各方面瞩目。

埼玉大学工学部机械专业的旧岩本研究室、明星大学理工学部机械系统工学科的滨口研究室及宇都宫大学教育学部的户田研究室,长年把斯特林引擎作为毕业论文的研究题目,或者作为设计和加工等教科书中的题材。斯特林引擎模型的特点是结构简单,利用身边常见的材料谁都能很容易地进行设计和制作,让学生动手自制这种引擎,在整个过程中能使师生共同从中得到乐趣。通过引擎的制作过程,使学生加深理解热能与机械能的转换原理,同时也能体验到作品制作(制作、创造)的快乐。通过过去的实践,斯特林引擎模型被认为是培养研究人员和工程技术人员具有丰富想象力的出色教材。

作者们在实际教学中把斯特林引擎作为教材,经过了多年实践,在“教育与研究”的专家们协同下,该书是以这样的实践与经验为基础写成的:书中介绍的各种各样形式的引擎模型都是实际做成的样机,而且能运行动作。因此,本书中所述的自认为满意的内容是斯特林引擎的基础理论与设计制作的方法,本书是以“理论与实践”为基础、非常实用的入门书。

这里,想扎实地学习斯特林引擎基础的读者必须遵守以下事项:

- (1) 按照本书的顺序认真阅读,扎实地学好斯特林引擎的理论及结构。
- (2) 根据例题的设计、制作说明,读者必须亲自动手制作一台以上的引擎模型。
- (3) 运行自制的引擎模型,必须完成输出功率测试和性能评价。

如果做到以上三点就能理解斯特林引擎是怎样的引擎,能基本保证掌握基础的理论与实践。

另外,技术发展的历史(最初首先是实物)是实物(引擎)先制作出来,然后说明其机能和性能,之后,进一步改进和研发的理论才紧随其后不断发展出来。如果急切想知道斯特林引擎是怎样的引擎请直接阅读第5章。同时按照该章节的例题手册自制一台模型引擎并试着运行一下,如果可以的话进一步做一下输出功率测试和性能评价,通过这个过程可以体会到斯特林引擎是根据怎样的结构来运行的。

之后再阅读一下第2章及第3章就很容易理解其工作原理和基础理论。

无论根据以上哪种方法学习都可以,但从文字得到知识,即以图像描述引擎,归根结底是“纸上画饼”。如果不具体实践做,则意义就不大,也不能体会斯特林引擎是怎么样引擎,更无法真正掌握它。因此,建议使用本书的读者一定要自制一台引擎模型。

如上所述,本书是通过模型制作来学习斯特林引擎的入门书,同时它也是出门书。学完本书之后,可进一步学习更专业的书,关于斯特林引擎相关的专业书籍虽然不少,然而像书籍那样的资料还没有系统地整理出来。但是,相关研究论文及技术解说等形式的文章已发表很多,其中有代表性的在本书各章结尾参考文献中被列出。读完本书的读者可根据这些参考文献做进一步钻研,以提高对斯特林引擎的造诣。

作者代表 岩本 昭一

2009年3月吉日

译者序

在实践教学过程中如何强化实践动手能力,注重知识、理论与实际的结合;注重跨学科综合素质的培养,一直是教与学中探索的课题。决定翻译《斯特林引擎的模型制作》,不仅因为该书是一本难得的将理论与实践溶为一体的好教材,而且更是将斯特林引擎作为实践教学的一个载体,集机械、热力学和动力学等技术为一体,制作可易可难,学习可深可浅,设计可简单也可复杂,更可以自主创新、拓展无限的想象和创作空间,可根据工作条件,在设计尺寸、构造、性能、材料选用等方面有很大的弹性,是创新和实践组合的有效载体。

斯特林引擎发明虽然时代已久,但是由于它的特性与潜力,使得它至今仍在不断研究和改进。特别是随着材料科学和加工工艺的日新月异,国际石油价格节节攀高,减碳环保逐渐形成国际社会的共识,斯特林引擎作为环保型引擎,除了太阳能和地热能发电的前景可期之外,在其他能源领域也深具潜力,在新的能源时代,它势必扮演更全面的角色。

总之,本书不仅是一本设计和制作斯特林引擎模型、了解斯特林引擎的工作原理和基础知识的工具书,更是培养创新思维和动手能力、提高综合素质的指导书。读者范围不仅适用于中学生、大学生、研究生,也同样适合于专业技术人员。

在翻译完稿之际,感谢方波老师和张玫宝、曹旻和张文书等同学在翻译本书时付出的努力,感谢审稿人吴静宜教授指出并纠正本书译稿中存在的问题。翻译本书的过程中,译者尽最大努力确保术语统一、准确,也尽最大努力以简洁、地道的中文为读者重现原书的意境和风貌。但是,由于个人的水平有限,书中的问题和疏漏之处敬请读者朋友给予批评指正。译者邮箱是:

qxcao@sytu.edu.cn,个人网站是 <http://robofab.sytu.edu.cn>。

译者

2010年1月

目 录

第 1 章 历史悠久的新型斯特林引擎	1
1.1 斯特林引擎研发的历史	2
1.2 斯特林引擎的开发现状	5
1.2.1 蒸气压缩式热泵驱动用引擎	8
1.2.2 发电机驱动用引擎(小型动力)	9
1.2.3 地面太阳能发电用引擎	10
1.2.4 空间太阳能发电及移动用引擎	13
1.2.5 汽车用引擎	14
1.2.6 船用引擎	16
1.2.7 其他的引擎	17
1.3 斯特林制冷机	19
1.4 Virumie 制冷机	22
参考文献	24
第 2 章 斯特林引擎的工作原理与特征	26
2.1 斯特林引擎的基本结构和工作原理	26
2.2 斯特林引擎的类型	28
2.2.1 α 型的斯特林引擎	29
2.2.2 β 型斯特林引擎	29
2.2.3 γ 型斯特林引擎	30
2.2.4 复动型斯特林引擎	31
2.3 斯特林引擎的动力输出机构	32
2.3.1 自由活塞型引擎	32
2.3.2 各种驱动结构的特性	32
2.4 高性能引擎和模型引擎	39
2.5 模型斯特林引擎的构造	40

2.6 斯特林引擎的特点与课题	41
参考文献	42
第3章 斯特林引擎的基础理论	43
3.1 斯特林循环的热力学	43
3.1.1 SI 单位系	43
3.1.2 热与功	45
3.1.3 p - V 线图与图示功	46
3.1.4 理想气体的可逆变化	47
3.1.5 气体循环	49
3.1.6 斯特林循环	51
3.1.7 正循环与逆循环	53
3.2 曲柄结构的力学	54
3.2.1 曲柄结构的重要性	54
3.2.2 单曲柄结构的力学	54
3.2.3 转矩变动与飞轮	58
3.2.4 设计时的注意事项	59
3.3 等温模型概要	59
3.3.1 引擎的模型化及各空间的容积	59
3.3.2 理想气体的状态式和引擎内压力	60
3.3.3 p - V 线图及图示功、图示输出功率	61
3.4 史密特理论的计算式	62
3.4.1 史密特理论的假设	62
3.4.2 α 型斯特林引擎的计算式	64
3.4.3 β 型斯特林引擎的计算式	66
3.4.4 γ 型斯特林引擎的计算式	67
3.4.5 图示功、图示输出功率及图示热效率	69
3.4.6 史密特理论的算例	70
3.4.7 计算结果	72
3.5 通过简单计算式预测轴输出功率	73
3.6 提高斯特林引擎性能的策略	74
参考文献	75

第4章 教学用引擎	76
4.1 玻璃球引擎	76
4.2 玻璃球引擎小车	80
4.3 空罐引擎	82
4.4 试管引擎	84
4.5 实验用试管引擎	86
4.6 试管引擎汽车	87
4.7 烧杯引擎	88
4.8 比赛用引擎	90
4.9 低温差引擎	91
4.10 娱乐引擎	94
4.11 大功率型引擎	95
4.12 特殊引擎	96
4.13 教学用斯特林引擎最大轴输出功率测算法	98
参考文献	99
第5章 斯特林引擎模型的设计制作及性能评价	100
5.1 设计方针	101
5.2 设计计算方法	101
5.2.1 压力变动计算	102
5.2.2 转矩变化的计算	104
5.2.3 零件尺寸	104
5.3 设计计算范例	104
5.4 设计图纸	113
5.5 制作与组装	123
5.5.1 制作工序	123
5.5.2 组装的注意点	125
5.5.3 组装次序	126
5.5.4 试运行	127
5.6 动力测定方法	128
5.7 测试用引擎	129
5.8 引擎性能的测量方法	130

5.8.1 动力的测量	130
5.8.2 转速的测量	130
5.8.3 工作空间温度的测量	132
5.8.4 工作空间压力的测量与输出的换算	132
5.9 引擎性能测量结果	132
5.10 实验结果与理论计算结果的性能比较	133
参考文献	135
第6章 斯特林引擎的应用	136
6.1 实用型斯特林引擎	136
6.2 家用热电联合系统(CHP)装置	139
6.3 太阳能发电系统	141
6.4 生物质燃料发电系统	142
6.5 展望	145
参考文献	146
附录1 各种引擎模型图纸	147
附录 1.1 空瓶引擎	147
附录 1.2 α 型斯特林引擎	152
附录 1.3 实验用试管引擎	155
附录2 注射器的规格	166
附录3 小型轴承规格	167
附录4 程序设计一览表	171

第 1 章 历史悠久的新型斯特林引擎

引擎(热力机)是一种将热能转换成机械能的装置,它需要通过热交换引起内部压力和容积的变化。这种引擎可分为内燃机和外燃机。

内燃机是摩托车、汽车、船舶和飞机的动力源,包括熟知的汽油机、柴油机、燃气轮机、喷气式引擎等。这些引擎通过在燃烧室中燃烧燃料使工作流体(燃气)的压力上升产生动能。相对内燃机的外燃机是蒸汽机车、船舶和火车的动力源,常见的有往复式、涡轮式蒸汽机。蒸汽机利用工作流体——水的相变,通过从外部加热、冷却工作流体使其压力变化而产生动能。

斯特林引擎是利用气缸内被密封的工作流体(氦,氢等)从外部加热和冷却使其产生压力变化输出得到动能输出的外燃机。这种引擎与蒸汽机类似,不过工作流体不是两相流体而是单相气体。图 1.1 列举了各种引擎热效率和输出功率的关系。

从图 1.1 可以了解到至今为止已开发的斯特林引擎输出功率范围在几 kW 至 100kW 左右。在这个范围的输出功率比较其他各种引擎的热效率,斯特林引擎具

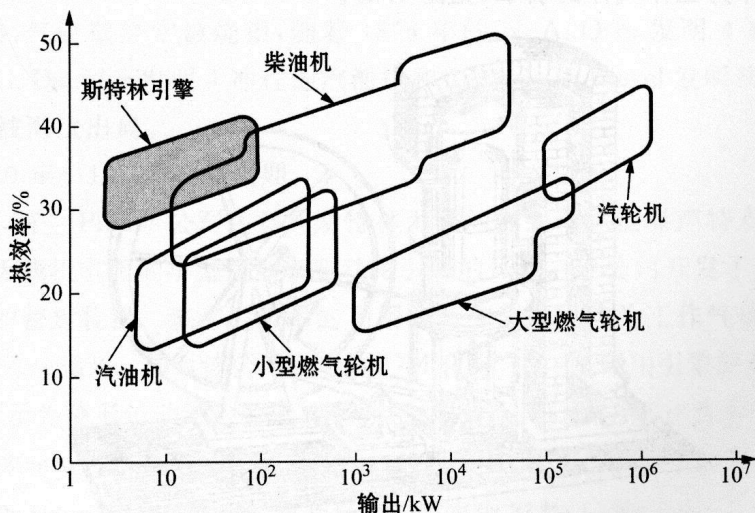


图 1.1 各种引擎热效率和输出功率的关系^[1]

有明显的优势。

此外,斯特林引擎由斯特林循环构成,相对正循环的引擎,有逆循环的制冷机(热泵)和复合循环的维约米耶(Virumie)制冷机(热泵)。其作为引擎至今未被推广,不过低温制冷机已经被商品化。本章将介绍斯特林引擎研发的历史,以及相关辅助设备的开发现状。

1.1 斯特林引擎研发的历史

在 1816 年斯特林引擎由一位苏格兰牧师 Robert Stirling(当时 26 岁)发明,工作流体(气体)为空气。图 1.2 为最初的热气机引擎(气缸长 2m,直径 0.6m,输出功率 1.5kW)。当时蒸气机很盛行,由于锅炉事故多发,虽然效率低、但安全性高的以大气压空气作为工作流体的热空气机即斯特林引擎被大家所接受并得到应用。

在 19 世纪后半叶该引擎约制造了 3 000 台。但是,随着内燃机的出现,该机因热效率、单位质量的输出功率低,注定了热空气引擎被淘汰的命运。然而自发明至今,约 180 年过去后的今天,这种引擎再次受到关注。

斯特林引擎研发的历史如下:

(1) 1816 年:获得专利。

Robert Stirling 取得英国(苏格兰)NO. 4081 专利。获得专利的引擎是用大气压下的空气作为工作气体的引擎(见图 1.2)。

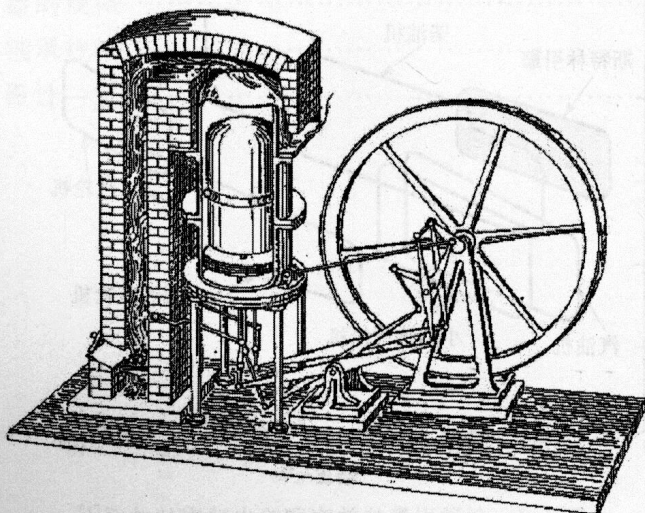


图 1.2 热空气引擎^[2]

(2) ~约 1850 年:起步阶段。

1843年 R. Stirling 与其弟弟 James Stirling 对引擎做出改进,图1.3所示的引擎其热效率从8%提高到18%。该引擎特点是利用自增压器产生的高压空气(1.2MPa)作为工作气体,并且是具有2个置换器和1个动力活塞的双作用引擎。动力活塞的孔径和行程为 $\phi 406\text{mm} \times 1\,220\text{mm}$,气体工作温度在高温侧为589K 和低温侧为311K 以及输出功率为45PS($30\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,PS 为米制马力的符号,1PS=735.5w)。

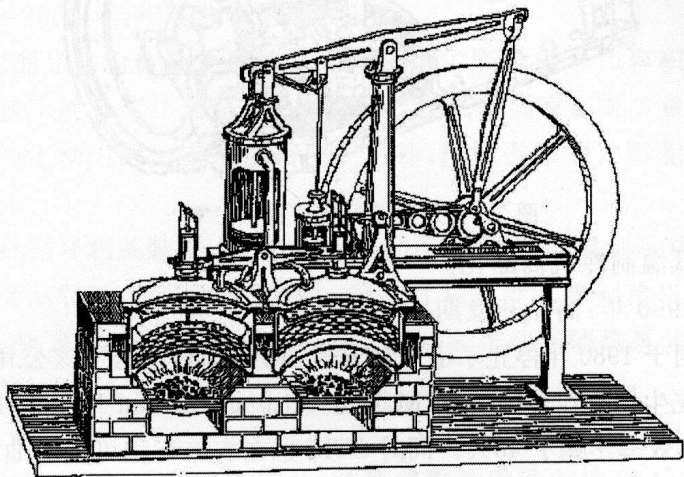


图 1.3 复动型引擎^[3]

(3) ~约 1910 年:低生产期→倒退期。

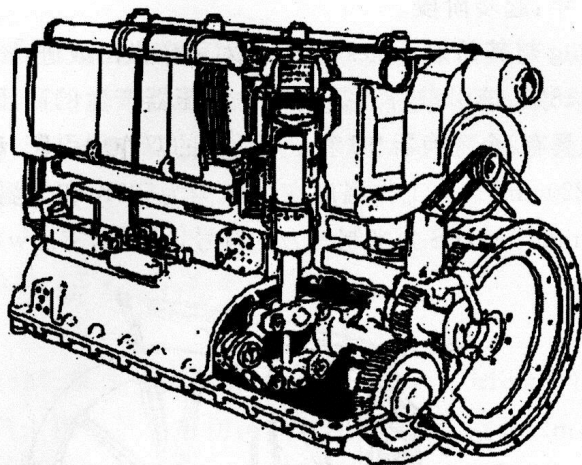
美国 J. Ericsson 生产了大约 3 000 台(0.5~5PS)用于抽水泵、压缩机等。但是,由于过热,气缸壁经常被烧损,随着 1876 年的 N. A. Otto 发明 4 冲程气体引擎,1883 年 G. Daimler 发明 4 冲程的汽油机和 1893 年 R. Diesel 发明柴油机,斯特林引擎最终被淘汰出局。

(4) 1940 年~1970 年:复兴期。

1937 年,荷兰 Philips 公司注意到斯特林引擎的低振动和低噪声特点,进行了作为军用便携无线机电源的小型发电机驱动用引擎的开发。该公司开发了菱形传动机构和袜套式的密封装置。该密封技术的利用使氦和氢可以作为工作气体,热效率一下提高到 33%~38%。同时该公司与美国 GM 合作,进行了车用引擎的开发。

图 1.4 所示为菱形传动结构的置换型 4 缸引擎(4-235)。该引擎作为公共汽车的动力源,使用 220atm(标准大气压,1atm=1.013 25×10⁵ Pa)的氢为工作气体,具有 156kW ($3\,000\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时)的输出功率和最高热效率为 33%($1\,300\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时)的性能。

另外,Philips 公司按照斯特林引擎逆循环原理开发斯特林制冷机,使得空气

图 1.4 使用菱形传动机构引擎^[4]

液化机等的极低温制冷机商品化。

(5) ~约 1990 年:商品开发期。

Philips 公司于 1980 年停止了引擎的开发,将技术转让给由该公司独立出来,并由 R. J. Meijer 先生创立在美国的 STM 公司(Stirling Thermal Motors, Inc.)。这期间开发的引擎的热效率达到了 40%。同时 STM 也在实行程程可变的油压斜板机构的太阳能发电和热电联产用引擎(25~40kW)的开发。另外 Philips 与许多公司进行了技术合作。同时也与各家公司进行商品开发合作以及更进一步的技术合作。

Philips 公司与瑞典的 USAB(United Stirling AB)公司进行技术合作,开发了供汽车、发电机、水中动力用的引擎(10~75kW)。此后,该公司的技术又转让给同一国家的 Kockums 公司。Philips 公司与美国 Ford 公司和德国 MAN-MWM 公司技术合作,开发汽车用的双作用旋转斜板引擎(135kW)以及供公共汽车和卡车使用的引擎,但这项合作在 1981 年被取消了。

美国 DOE/NASA/MTI/AM 公司与 USAB 公司技术合作后,开发了供卡车、邮政车和热电联产使用的 MOD I (78PS), MOD II (88PS), MOD III (160PS)引擎。同时也实施了供空间太阳能发电和同位素热源发电用自由活塞式引擎(25kW)的开发。美国的 W. Beale 先生以发明的自由活塞式引擎为基础,随后成立 Sunpower 公司。该公司开发了作为太阳能发电、热泵驱动和热电联产用的自由活塞式引擎(2~25kW),并为康明斯公司提供技术。与 USAB 公司有技术合作的美国 SPS 公司(Stirling Power Systems Corp.),用这项技术为太阳能发电和热电联产提供了商品化的两活塞 V 型引擎(10~15kW),不过该技术现在转让给德国 Stirling Systems 公司(SOLO 公司)。

在日本,从1976年至1981年间,运输省(现国土交通省)主导进行了船用引擎的研究开发。之后在1982年至1987年间,通产省(现经济产业省)又主导三菱电机、东芝、爱信精机和三洋电机4家公司实施了供蒸汽压缩式热泵驱动以及发电机驱动用引擎(3~30kW)的研究开发。

此外中国、俄罗斯、加拿大、韩国等也在进行热泵驱动、热电联产和太阳能发电用引擎的开发。

(6) 1990~2000年:相关装置的过渡时期。

在日本,以商品化为目标对斯特林引擎进行了降低成本和容积的工作。商品化的相近用途技术就有蒸汽压缩式热泵动力。在其他国家也有少量用于太阳能驱动抽水泵以及海上动力源的实用化案例。另外,用该引擎的太阳能发电系统也在实验测试中。

关于斯特林循环相关装置,有逆循环的80K、20K的低温制冷机和120K超低温冰箱都已经商品化了,解决无氟利昂问题的冰箱温度水平制冷机的开发也在进行中。另外,备受关注的、综合了正循环和逆循环的维约米耶热泵的无氟利昂空调机也进行了开发。

(7) 现在:商品化。

根据热源的多样性、低振动等特点,欧洲着重开发发电功率1kW级的家用热电联产系统,欧美也在发电功率3kW、10kW以及25kW级的太阳能发电系统和3kW及35kW级的木质物质燃烧发电系统等方面推进它们的商品化工作。

在日本,对面向家用热电联产系统的1kW和0.5kW级自由活塞引擎进行产量化同时,生物质燃烧用3kW和5kW级的引擎发电系统,以及利用余热的0.2kW、1kW和10kW级的引擎发电系统也进行了开发。

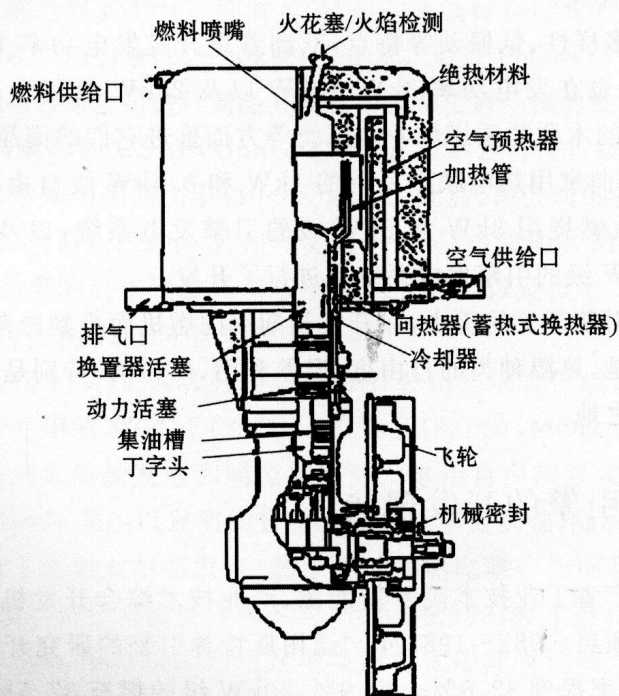
回顾斯特林引擎开发的历史,在开发初期因内燃机而受到冷落,至今仍不能打破这种状况。但是,热源种类的自由度、温差利用、低振动,特别是环保等特点必定使其能找到用武之地。

1.2 斯特林引擎的开发现状

作为日本通产省工业技术院及新能源、产业技术综合开发机构(NEDO)的月光计划中的推进项目(1982~1987年)“通用斯特林引擎的研究开发”,该项目用氢气将3kW级热效率提到32.6%~35.9%,30kW级的提至37.5%,同时也验证了静音性和废气清洁性。表1.1以及图1.5~图1.8列出了该项目的成果。另外,美

表 1.1 月光计划开发引擎的主要特性^[5]

	冷暖气设备用 3kW 级		冷暖气设备用 30kW 级	小型动力用 30kW 级
	NS-03M	NS-03T	NS-30A	NS-30S
引擎形式	冲程型	2 活塞型	双作用旋转斜板型	U4 双作用型
使用燃料	天然气(13A)			
工作气体	氦气			
本体重量/kg	60.5	73.6	243	375
NO _x 减少方法	EGR	催化剂+EGR	燃烧控制	催化剂
轴输出功率/kW	3.81	4.14	30.4	45.6
平均压力/MPa	6.2	6.4	14.7	15.5
转速/r·min ⁻¹	1400	1300	1500	1800
最高热效率/%	35.9	32.6	37.5	37.2

图 1.5 3kW 级置换器型引擎 (NS-03M)^[5]