

The Development and Applications of Organic Rankine Cycle Electrical Generating Systems in Taiwan

Kouth Chen¹, Yangyuan Chen¹, Chiron Kuo², Yuhren Lee², Shingcheng Lee³, Paohsin Hsu³,
Charlton Kao³, Chichun Chia³

¹Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei

²Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute, Hsinchu

³China Petrochemical Development Cooperation, Kaohsiung
Email: kouthche@phys.sinica.edu.tw

Received: Mar. 6th, 2013; revised: Mar. 9th, 2013; accepted: Apr. 1st, 2013

Copyright © 2013 Kouth Chen et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: In order to ease the global warming effect created by the mass production of carbon oxide, reducing energy consumption via energy recovery becomes an inevitable measure. At present, Organic Rankine Cycle (ORC) electrical generating system is recognized to be one of the most economic and efficient approaches to convert low grade thermal energy to electricity. Several research institutes including Institute of Physics, Academia Sinica, Industrial Technology Research Institute, and some industrial companies are engaged in the development of practical application of ORC. The ORC electrical generating systems have been developed and fabricated for the applications of geothermal energy at Yilan and industrial waste heat recovery at a petrochemical company. In this report, the details of development and application of ORC in Taiwan will be illustrated thoroughly.

Keywords: Global Warming; Organic Rankine Cycle; Geothermal Energy; Waste Heat Recovery

台湾有机朗肯循环发电系统的发展与应用

陈国鋹¹, 陈洋元¹, 郭启荣², 李毓仁², 李新庆³, 许保新³, 高启综³, 贾志中³

¹中央研究院物理研究所, 台北

²工业技术研究院绿能与环境研究所, 新竹

³中国石油化学工业开发股份有限公司, 高雄
Email: kouthche@phys.sinica.edu.tw

收稿日期: 2013年3月6日; 修回日期: 2013年3月9日; 录用日期: 2013年4月1日

摘要: 为求节能减碳、应全球暖化、及促进能源再利用, 台湾正积极发展绿色能源产业。有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, ORC)发电技术、为目前用于低温热能转换为电力之最经济有效之方式, 开发单位有中央研究院物理研究所、工业技术研究院及相关配合厂商等, 目前 ORC 发电系统已能完全自制。已应用于宜兰的地热能发电、壹石油化学公司的冷凝水废热回收发电等。

关键词: 全球暖化; 有机朗肯循环; 地热能; 废热回收

1. 前言

目前全球能源使用以热能形式占能源消耗量 90%以上, 其中仅有 40%热能转换为制程热能、机械

功、电力或化学能; 其余 50%热能则以废热形式排放于环境, 含工业废热、汽车废热等, 不但污染环境也造成能源浪费。现今人类大量使用石化能源, 已面临

石化能源短缺、亦造成严重的全球暖化现象；解决之道有：1) 积极开发新能源技术；2) 提高能源使用效率。

台湾自有能源匮乏，使用的石化能源超过 99%需进口。图 1 显示台湾历年来各部门的能源使用分布，其中工业部门占比率达 45%~55%^[1]。在工业部门排放废热中，低温废热排放(温度 < 230℃)占 70%以上、中温废热(温度 230℃~650℃)占 20%~30%、高温废热(温度 > 650℃)则几乎没有。

2. 废热回收与应用原理

2.1. 中低温废热回收方式

中低温废热属于低能量密度的热源，可用能量低，在 20 世纪 90 年代能源危机前没有经济利用价值。近一、二十年来由于油价高涨、全球暖化日趋严重，低温废热回收遂显示出经济和环保效益。有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, ORC)发电系统可依据热源和冷源温度范围，选用拥有低温沸点特性的有机工作流体(例如：冷媒、氨等)，将中低温热能转换为机械能以轴功率输出发电^[2]。ORC 发电系统为目前中低温热能发电效率最高且最有经济效益的设备。

工业部门的中低温余热/废热主要以烟道废气、热制程蒸汽冷凝水、制程排放蒸汽等形式排放^[3,4]。取热模块型态有：

- 1) 热媒油/热水取热模块：烟道废气排放温度和

废气质量与使用燃料相关。使用燃煤或燃料油时，废气含有悬浮粒和硫化物，一般需经过静电和脱硫处理等过程，造成温降；若未设置余热/废热回收装置，废气排放温度约 150℃~250℃。使用天然气为燃料时，废气质量佳，无须中间处理过程；若未设置余热/废热回收装置，废气排放温度约 300℃~350℃。以废气作为 ORC 热源时，顾及废气可能损伤 ORC 蒸发器热管，建议取热模块采用纯净的热媒油或热水汲取废气热能后，再将热能传递至 ORC 蒸发器。

- 2) 直接取热模块：一般的热制程蒸汽冷凝水(温度 80℃~99℃)和制程排放蒸汽(温度 100℃~180℃)质量佳，可直接导引进入 ORC 蒸发器，以减少取热模块复杂度、降低取热成本，且可提升热回收效益，提高 ORC 蒸发温度，ORC 循环热效率自然提升。

2.2. 有机朗肯循环发电原理

有机朗肯循环发电在欧美等工业先进国家已经是一成熟且实用的技术。其主要优点为可从事低温废热的回收，举凡工厂的废热或地热皆可加以利用来进行发电。图 2 为有机朗肯循环发电系统的基本工作示意图，其中标示为 ORC 系统主要部分的组成组件及架构。右上角(红线)表示热源(热蒸汽/热水)进入蒸发器后流出。工作流体(冷媒 - 绿色)从下方的压力泵浦打上来进入汽化机后被热源流加热、汽化成高温高压蒸汽，此高温高压蒸汽进入膨胀机(涡轮机/螺杆膨胀

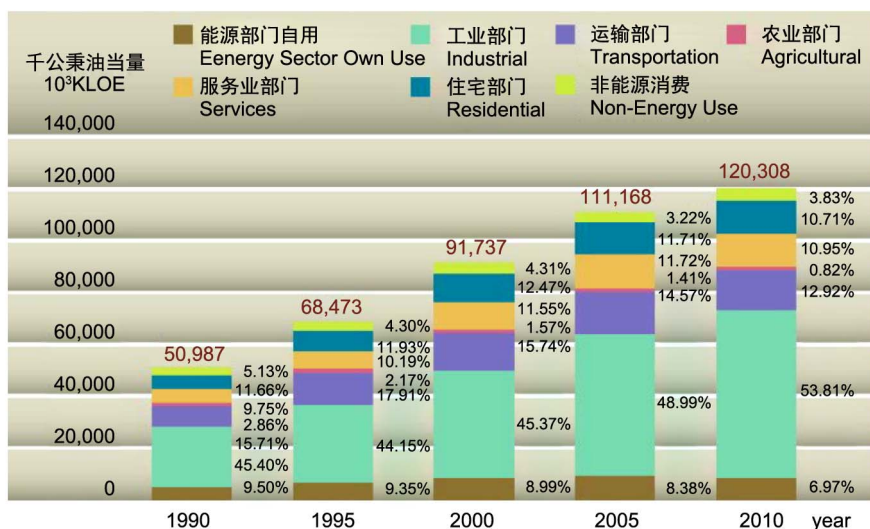


Figure 1. Energy consumption by each sector in Taiwan, industrial sector consumed 45% - 55%
图 1. 台湾历年来各部门的能源使用分布，其中工业部门占比率达 45%~55%

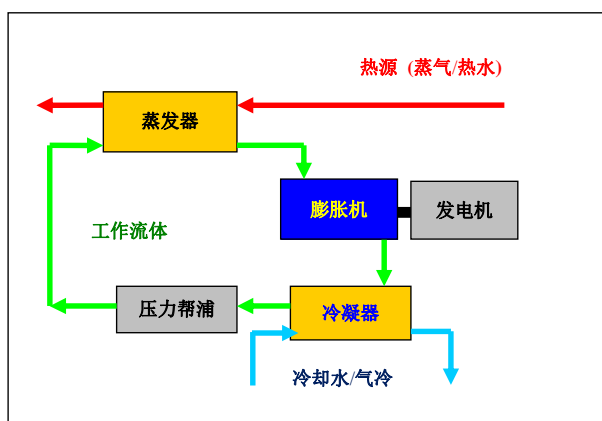


Figure 2. Principle of the organic Rankine cycle generating system
图 2. 为有机朗肯循环发电系统的基本工作示意图

机)将热和压力能转换为机械能、推动涡轮或螺杆旋转做功，带动发电机产生电力输出。高压冷媒蒸汽做功后温度和压力降低、大部份成为液体，再经过冷凝器转变成低温冷媒液体。冷凝器则使用冷却水或气冷(蓝色)来降低冷媒的温度。

3. 有机朗肯循环发电系统的开发与应用

3.1. 实验型系统研发

2009 年开始、台湾工业及学术研究机构陆续投入有机朗肯循环发电系统的研究工作；其中有工业技术研究院绿能研究所、中央研究院物理研究所等，开始时皆以 10 kW 机组为主。图 3 为中央研究院物理研究所实验用的 10 kW 有机朗肯循环发电系统，除涡轮机为国外引进外、其他所有元部件皆为自行开发。此系统的长 × 宽 × 高为 210 × 80 × 200 立方公分，重量为 860 公斤。为试验工作流体的热传效果，我们使用 R134a 和 R245fa 二种不同的冷媒作实验；系统注入 98℃ 的热水，流速为 6.9 吨/小时；实验结果显示：R245fa 的热传效率比 R134a 高 24%。

3.2. 地热发电

全球地热资源主要分布于环太平洋两岸的火环带，台湾坐落在西太平洋火环带中间位置，所以地热资源极为丰富。根据 1980 年以前的探勘及普查数据估算，全岛浅层地热预计有近 1000 百万瓦之发电潜能；相对于传统浅层地热的利用，蕴藏于更深部地层(3000~5000 公尺)之热能更是庞大；在 2008 年的研究报告中，估计台湾地热的发电量可达 7100 百万

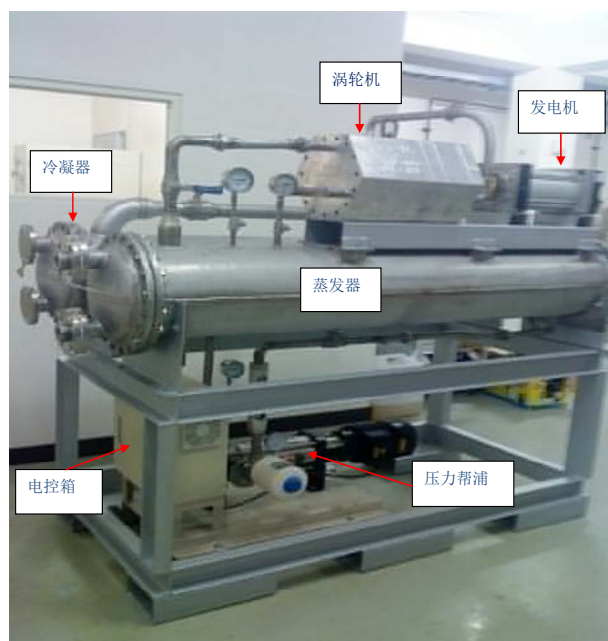


Figure 3. 10 kW organic Rankine cycle generating system developed by the Institute of Physics, Academia Sinica
图 3. 中央研究院物理研究所实验用的 10 kW 有机朗肯循环发电系统

瓦。目前开发中的有宜兰县清水地区。清水地区蕴藏丰富地热资源，已有多口地热井，井深为 1500~2500 公尺，井底温度为 200℃~220℃、出口温度为 140℃~190℃；目前有 13 公顷面积规划为地热发电计划区，发电潜能为 3~5 百万瓦。

工业技术研究院绿能研究所自行开发有机朗肯循环发电系统，使用螺杆膨胀机，已能制造 200 kW 以内的 ORC 发电系统；目前正开发大于 200 kW 的系统，将使用涡轮机为膨胀机。工业技术研究院与宜兰县合作在清水地区做地热发电试验，使用 60 kW 的 ORC 发电系统，于 2012 年 12 月完成地热发电示范。图 4 为工业技术研究院装在清水地热的 60 kW 发电系统，其长 × 宽 × 高为：340 × 200 × 240 公分立方，重量约 3 吨。此次试验使用之热井的井深为 1500 公尺，井底温度为 205℃，出口温度为 140℃、干度约 8%，热蒸汽流量为 20~35 吨/时。

依据地热井的条件，工业技术研究院使用自行开发的仿真软件做温度 - 熵(T-s)模拟^[5]，使用冷媒 R245fa 为工作流体；设定值为地热水进口温度 120℃、出口温度 85℃、流量 17 吨/时，冷却水进口温度 28℃、出口温度 37℃流量 59 吨/时，工作流体蒸发温度 95℃，冷凝温度 38℃；仿真结果显示系统的发电量为



Figure 4. The 60 kW ORC generating system developed by ITRI installed at Chinsuei Yilan for geothermal power application
图 4. 工业技术研究院安装在宜兰县清水地热区的 60 kW 有机朗肯循环发电系统

60 kW。图 5 显示 ORC 系统温度(temperature)-熵(entropy)的仿真曲线。实际测量结果如下二表: 表 1 为 ORC 发电系统蒸发器内部之各个操作点的条件和数据, 表 2 为冷凝器内部之各个操作点的条件和数据。此 ORC 发电系统的总发电量约为 60 kW。

3.3. 石化厂低温废热回收发电

台湾壹石油化学公司与中央研究院物理研究所合作进行冷凝水废热回收发电系统开发, 已于 2012 年 12 月完成系统开发、并网发电。此系统使用的热源是石化厂制程后的冷凝废热水、温度为 95°C~99°C、流量为 160~220 吨/时, 有机朗肯循环为一进口的佰 kW 级 ORC 机台, 冷源为工厂原有的冷却水、温度为 22°C~30°C、流量为 400~450 吨/时, 管线及并网为工厂自行配置。图 6 为热水进口管配置时的情形。图 7 为石化厂的有机朗肯循环发电系统全图; 图中 ORC 机台置于水泥基座上, 机台的长 × 宽 × 高为 5.8 × 2.3 × 3.4 公尺立方, 重量为 12.5 公吨。此机台使用涡轮机为膨胀机(中央), 壳管式热交换器为蒸发器(下方)和冷凝器(上方)。热水从蒸发器右边流入, 左边流出; 冷却水从冷凝器右下方流入, 右上方流出。此 ORC 机台内装工作流体 R245fa 冷媒 1400 公斤。图 8 显示(a)红色开关为热水旁通阀, (b)黄色开关为热水出口控制阀, (c)电控箱内外部电网输入机台的平均电压(V)、电流(mA)、总功率(kW)等, (d)电控箱内 ORC 机台输出的平均电压(V)、电流(A)、总功率(kW)等。

此 250 kW 级 ORC 系统在石化厂的运行参数示于

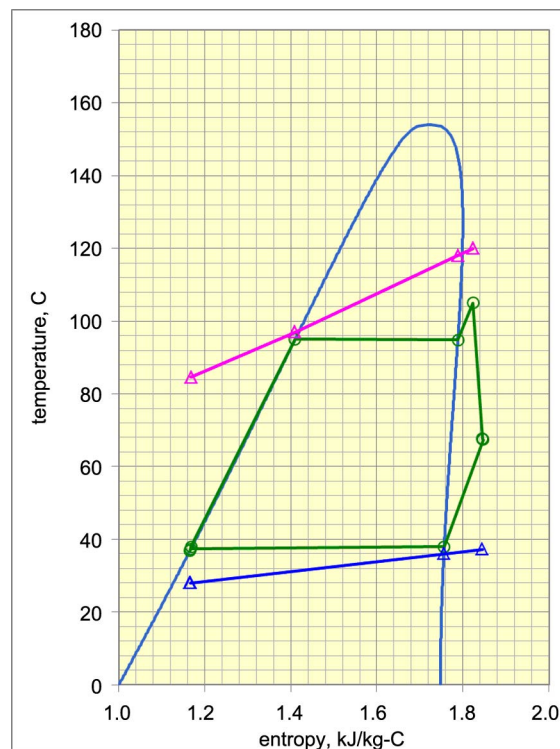


Figure 5. Simulated result of T-s diagram of an ORC system in the geothermal power application
图 5. 用于地热发电之 ORC 系统的温度(temperature)-熵(entropy)仿真曲线

Table 1. Operation conditions inside the evaporator of the ORC generating system
表 1. ORC 发电系统蒸发器内部的各个操作点条件

蒸发器			
操作点条件			
		管侧	壳侧
流体类型		水	R245fa
	温度, °C	120	38.3
入口	压力, Mpa	-	1.1298
	状态	subcooled	subcooled
两相电	温度, °C	-	95
	压力, Mpa	-	1.1298
	温度, °C	84.62	105
出口	压力, Mpa	-	1.1248
	状态	subcooled	superheated
	质量流率, kg/s	4.65	2.98
	最大压降, kPa	<50	<5
	最大承受压力, Mpa	-	3
	最大操作温度, °C	150	130
	出入口口径, inch	2	2
	热传率, kW	695.25	

Table 2. Operation conditions inside the condenser of the ORC generating system

表 2. ORC 发电系统冷凝器内部的各个操作点条件

		冷凝器	
		操作点条件	
		管侧	壳侧
流体类型		水	R245fa
入口	温度, °C	28	68.08
	压力, Mpa	-	-
两相电	状态	subcooled	superheated
	温度, °C	-	-
出口	压力, Mpa	-	-
	状态	subcooled	subcooled
	质量流量, kg/s	16.31	2.98
	最大压降, kPa	<50	<5
	最大承受压力, Mpa	-	3
	最大操作温度, °C	50	100
	出入口口径, inch	3.5	2
	热传率, kW	634.5	



Figure 6. Hot water inlet being equipped
图 6. 热水进口管配置时的情形



Figure 7. ORC generating system sited at a petrochemical factory
图 7. 石油化学工厂的有机朗肯循环发电系统全图, ORC 机台置于水泥基座上

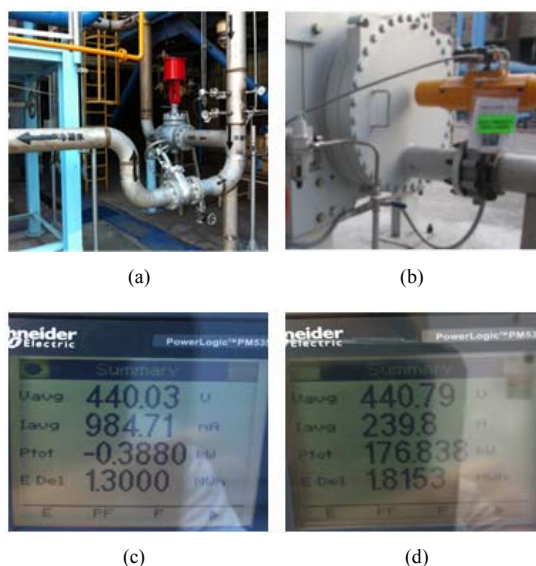


Figure 8. (a) Hot water by pass valve (red); (b) Hot water outlet control valve (yellow); (c) Input averaged voltage (V), current (mA), total power (kW) etc. shown in the electrical control box; (d) Output averaged voltage (V), current (A), total power (kW) etc. shown in the electrical control box
图 8. (a) 红色开关为热水旁通阀; (b) 黄色开关为热水出口控制阀; (c) 电控箱内外部电网输入机台的平均电压(V)、电流(mA)、总功率(kW)等; (d) 电控箱内 ORC 系统输出的平均电压(V)、电流(A)、总功率(kW)等

Table 3. Operation parameters of the ORC generating system at a petrochemical factory

表 3. ORC 系统在石化厂的运行参数

	进口温度(°C)	出口温度(°C)	流量(吨/时)
热水	98.1	86.4	166
冷却水	23.6	29.3	400
冷媒蒸汽进口压力	9.1 Bar		
冷媒蒸汽出口压力	2.2 Bar		
总发电量	191.3 kW		
净发电量	175.5 kW		
环境温度	28 °C		

表 3. 其中之净发电量 = 总发电量 - 仪表用电量(0.4 kW) - 冷媒帮浦用电量(15.4 kW)。系统在上述条件下的热转换效率可估计如下: 热水输入的功率 = 热水每秒流量 × 热水进出口温差 = 46.1 kg/s × 11.7°C = 539.5 kg·°C/s = 539.5 kcal/s = 2255.1 kW; 总发电量: 191.3 kW, 净发电量: 175.5 kW。计算出总发电效率 = 8.48%, 净发电效率 = 7.78%。

4. 结语

台湾正积极发展绿色能源产业。在低温热能转换

为电力方面，有机朗肯循环发电已被证实为最经济有效之方式；开发单位有中央研究院物理研究所、工业技术研究院及相关配合厂商，ORC 发电系统已完成自制。目前已实际应用于地热发电，及壹石化公司的冷凝水废热回收发电。

5. 致谢

研发期间获得国立清华大学动力机械研究所蒋小伟教授在涡轮机方面很多宝贵意见，在此表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] 2010 年能源统计手册[M]. 台北: 经济部能源局, 2011: 41.
- [2] S. Quoilin, V. Lemort. Technological and economical survey of organic Rankine cycle system. 5th European Conference Economics and Management of Energy in Industry, Vilamoura, 14-17 April 2009.
- [3] 郭启荣, 李毓仁, 郭吟翎, 徐松蔚, 王佰祥. 10 千瓦螺杆膨胀机动力之有机朗肯循环机组开发与测试[A]. 台湾冷冻空调学会 ERAC 2011 论文集[C], 2011, 论文编号: ERAC 103.
- [4] 郭启荣, 徐松蔚, 李毓仁. ORC 发电机组开发与应用[J]. 机械工业杂志, 2012, 355: 1-8.
- [5] C. R. Kuo, S. W. Hsu, K. H. Chang and C. C. Wang. Analysis of a 50 kW organic Rankine cycle system. Energy, 2011, 36: 5877-5885.