

可调喷射器应用于有机朗肯循环的热力学分析

李新国¹, 林蝶蝶¹, 朱强¹, 张琪林²

(1. 天津大学机械工程学院热能工程系, 天津 300072; 2. 海工英派尔工程有限公司, 山东 青岛 266061)

摘要: 基于作者前期研究所提出的 EORC(喷射式有机朗肯循环), 为适应变工况运行, 提出采用可调节的喷射器应用于 EORC, 构成可调喷射式有机朗肯循环(简称 AEORC)。针对环境温度变化造成冷凝温度的变化, 在 MATLAB 平台上, 对循环的变工况运行进行热力学性能计算, 主要以净输出功为评价指标进行性能对比分析。由于单只可调喷射器的调节范围有限, 进而提出采用双可调喷射器的 EORC, 构成双可调喷射器的喷射式有机朗肯循环(简称 DAEORC)。结果表明, 分别以冷凝温度 20 °C 和 30 °C 设计的两支可调喷射器, 可以实现冷凝温度 20 - 40 °C 范围内的有效调节, DAEORC 的净输出功高于 ORC。

关键词: 可调喷射器; 喷射式有机朗肯循环(EORC); 可调喷射式有机朗肯循环(AEORC); 热力学分析

中图分类号: TH451 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.04.005

引言

有机朗肯循环(ORC)是利用中低温热源发电的有效途径之一。国内外很多学者从工质筛选、提高循环效率以及膨胀机结构设计等方面开展了广泛的研究^[1-8]。

喷射器是一种利用高压流体抽吸低压流体, 不直接消耗机械能而达到引射流体升压的装置。喷射技术最初的理论研究工作是鉴于索科洛夫的《喷射器》进行的^[9]。在工业生产方面, 采用喷射器比采用机械的增压设备更加简单、节省投资。Deberne 等人针对蒸汽喷射器提出了一种简单的通用模型^[10]。Hemidi 等人对超音速喷射器做了 CFD 模拟和实验对比研究^[11]。

国内也有许多学者对喷射器进行理论与实验研究^[12-14]。沈胜强等人提出在喷射器喷嘴内插入喷嘴改变喷嘴尺寸以调节喷射器工作参数的方案^[15-16], 建立可调式喷射器模型, 分析喷嘴截面积

变化对喷射系数、气体压力、气体流量等参数的影响。

前期研究中作者提出了 EORC(喷射式有机朗肯循环)^[17-19]。EORC 是在常规 ORC(有机朗肯循环)基础上, 增设喷射器和二级蒸发器。在二级工作蒸汽的引射作用下, 降低膨胀机排气压力, 增大膨胀的工作压差, 从而提高膨胀机的输出功。

由于实际喷射器是按一定运行工况设计的, 当工况变化时, 喷射器的运行及性能将会下降, 超出一定范围时, 甚至会失效。因此将喷射器应用在 ORC 中要考虑 ORC 运行工况的变化, 如随季节环境温度的变化 ORC 中的冷凝工况(温度与压力)将随环境温度变化。为模拟此情况, 考虑 EORC 的喷射器采用可调节式喷射器, 并对其循环性能进行热力学分析。

1 可调喷射式有机朗肯循环 AEORC

1.1 AEORC 构成原理

基于喷射式有机朗肯循环(EORC)^[17-19], 将喷射器改为可调节的喷射器以适应变工况的运行, 构成可调喷射式有机朗肯循环(简称 AEORC), 如图 1 所示。图 2 为 AEORC 的 $T-s$ 图, 其中 P_{e1} , P_{e2} , P_c 分别表示一级、二级蒸发压力和冷凝压力。

AEORC 与 EORC 的循环原理是一样的: 工质在冷凝器冷凝放热后, 一部分经工质泵 2 加压进入二级蒸发器吸热后作为喷射器的工作流体; 另一部分经工质泵 1 加压, 进入一级蒸发器吸热变成过热蒸汽, 然后进入膨胀机膨胀做功; 膨胀机出来的工质作为喷射器的引射流体。工作流体与引射流体在喷射器中形成混合流体, 然后进入冷凝器冷凝放热, 完成一个循环。

收稿日期: 2014-09-01; 修订日期: 2014-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51276122)

作者简介: 李新国(1965-), 男, 湖北监利人, 天津大学教授, 博导。

原 EORC 中的喷射器不涉及喷射器的具体结构尺寸的影响,是一个纯理想过程。AEORC 中的喷射器采用了可调式喷射器。当环境温度变化造成冷凝温度变化时,通过调节可调式喷射器中的喷针位置以改变喷嘴的尺寸,使喷射器适应运行工况的变化。

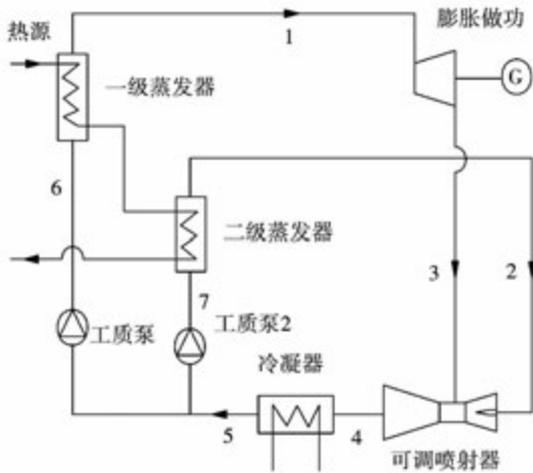


图 1 可调喷射式有机朗肯循环(AEORC)原理图
Fig. 1 Schematic diagram of the organic Rankine cycle with adjustable ejector (AEORC)

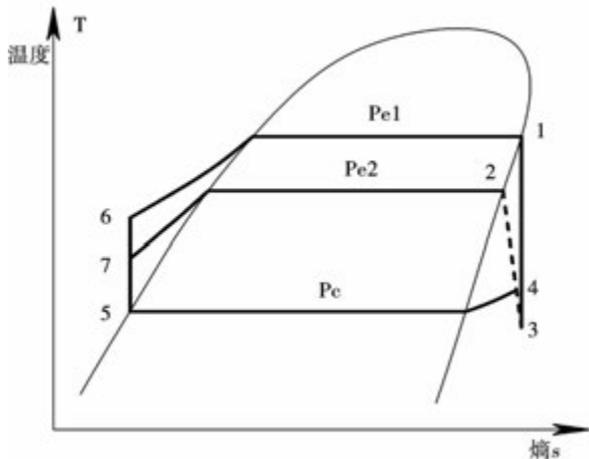


图 2 AEORC 循环的 T-s 图
Fig. 2 T-s diagram of AEORC

1.2 AEORC 的热力学分析

对 ORC、EORC 及 AEORC 3 种循环进行热力学循环性能的对比分析,计算的相关依据与参数为:

- (1) 循环工质选用 R245fa;
- (2) 热源水温度设为 95 °C,流量 1 kg/s;
- (3) 蒸发器内循环工质与热源水换热的窄点温

差设为 5 °C;

(4) 冷凝器内工质出口设为饱和液,冷凝温度按不同工况(季节)分别设不同值;

(5) 膨胀机和工质泵的热力过程假设为无损失的理想过程,按等熵处理;

(6) 喷射器中工作流体与被引射流体的混合过程,假设为无损失的理想过程。

循环热效率 η_s :

$$\eta_s = \frac{W_{net}}{Q_{e1} + Q_{e2}} = \frac{(W_t - W_{p1} - W_{p2})}{m_{w1}(h_1 - h_7) + m_{w2}(h_3 - h_6)}$$

式中: Q_{e1}, Q_{e2} —一级与二级蒸发器吸热量, kW; W_t, W_{net} —膨胀机做功量与循环净功, kW; W_{p1}, W_{p2} —工质泵功, kW; m_{w1}, m_{w2} —一级与二级循环工质流量, kg/s; h —各点的焓值, kJ/kg。

喷射器喷射系数 u :

$$u = m_{w2} / m_{w1}$$

喷射器的引射效率 E_u :

$$E_u = u \frac{(h_4 - h_3) - T_{oc}(s_4 - s_3)}{(h_2 - h_4) - T_{oc}(s_2 - s_4)}$$

式中: T_{oc} —环境温度, K; s —循环各点的熵, kJ/(kg · K)。

1.3 AEORC 中喷射器主要尺寸

前期研究中,以净输出功最大为优化目标,对喷射式有机朗肯循环(EORC)分析得出了最佳运行工况^[18-19],以此作为计算的运行工况参数,在 MATLAB 上编制喷射器结构尺寸的设计程序,计算得到不同冷凝温度时,相应的喷射器关键部位的尺寸如表 1 所示。由表 1 可知,随冷凝温度升高,喷射器的整体结构尺寸有变小趋势。

冬季工况时,设冷凝温度 20 °C,喉部直径为 22.10 mm;春/秋季工况时,冷凝温度设为 30 °C,喉部直径为 18.20 mm;夏季工况时,冷凝温度设为 40 °C,喉部直径为 14.98 mm。

表 1 的计算结果是相对于不同冷凝温度下,喷射器每个部分的最佳尺寸。但是在应用可调式喷射器时,只通过喷针来调节喷嘴喉部直径,而对于其它尺寸如喷嘴长度、混合室直径长度等均不改变。

本研究对 AEORC 循环计算中所采用的喷射器,是以冷凝温度 20 °C 为额定工况设定的一固定尺寸喷射器,然后采用喷针调节喷嘴喉部直径以适应高于冷凝温度 20 °C 的运行工况。具体结果如图 3

-图6所示。

表1 不同冷凝温度时喷射器主要结构尺寸

Tab.1 Main structure size of ejector with different condensation temperature

冷凝温度/°C	喷嘴喉部直径 d_{p0} /mm	喷嘴出口直径 d_1 /mm	喷嘴收缩段长度 l /mm	喷嘴喉部长度 l_2 /mm	喷嘴扩散段长度 l_3 /mm	混合室入口直径 d_2 /mm	混合室出口直径 d_3 /mm	扩散器出口直径 d_c /mm	自由流束长度 L_{C1} /mm	混合室入口段长度 L_{C2} /mm	喷嘴距 L_c /mm	圆柱形混合室长度 L_m /mm	扩散器长度 L_d /mm
20	22.10	22.11	66.30	4	10	48.82	48.82	70.92	155.90	28.94	184.84	195.27	132.64
25	20.05	20.09	60.16	4	10	43.28	43.28	62.92	138.60	26.00	164.60	173.11	117.84
30	18.20	18.28	54.60	4	10	38.43	38.43	55.83	123.40	13.39	146.79	153.73	104.37
35	16.51	16.64	49.52	4	10	34.16	34.16	49.50	109.85	21.03	130.88	136.64	92.06
40	14.98	15.18	44.92	4	10	30.40	30.40	43.86	97.84	18.92	116.77	121.58	80.77

1.4 结果与分析

分别对 ORC、EORC 和 AEORC 进行热力学循环性能的计算和对比分析。

图3为 AEORC 与 EORC 中的引射压力随冷凝温度的变化。随冷凝温度升高,EORC 与 AEORC 的引射压力均增大。而经调节之后循环所达到的引射压力要大于固定结构喷射器循环达到的引射压力,这是造成做功能力下降的主要原因。

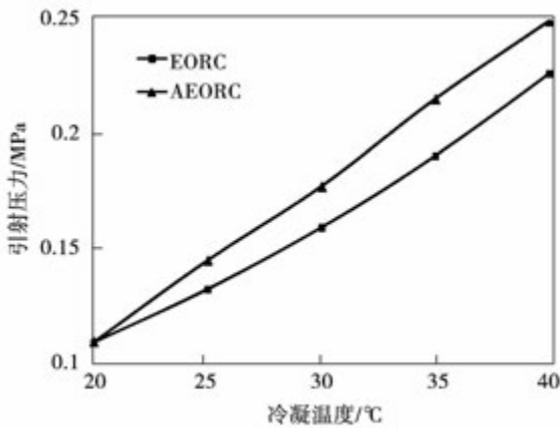


图3 引射压力随冷凝温度变化

Fig.3 Pressure of the entrained fluid with the condensation temperature

图4为 EORC 与 AEORC 中喷射器的喷射效率随冷凝温度的变化。随冷凝温度升高,喷射式有机朗肯循环喷射器所能达到的效率逐渐升高。而可调喷射式有机朗肯循环中可调节喷射器仅在额定工况下达到最理想状态,当对喷射器喷嘴喉部进行调节时,喷射器效率降低。在冷凝温度达到30-35 °C的某个温度之后时,喷射器效率出现负值即喷射器失

效,表明可调节喷射器的可调节范围是有限的,当达到一定限度后,喷射器将出现失效的状况。

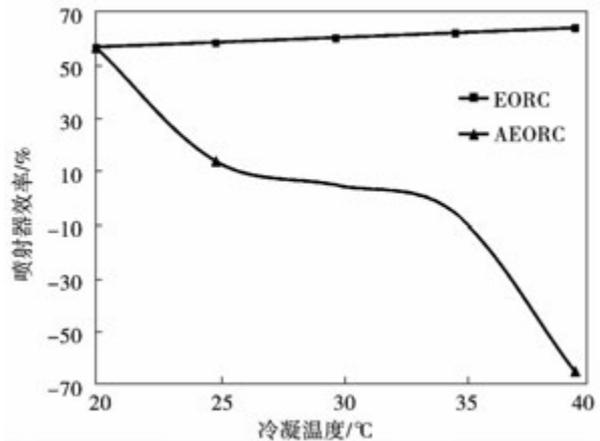


图4 喷射效率随冷凝温度的变化

Fig.4 Entrainment efficiency with the condensation temperature

图5为 ORC、EORC 与 AEORC 3种循环热效率的对比情况。随冷凝温度升高,3种循环的热效率均降低;在相同冷凝温度时,喷射式有机朗肯循环热效率大于可调喷射式有机朗肯循环,而有机朗肯循环 ORC 的热效率最高。

图6为 ORC、EORC 与 AEORC 的净输出功率对比。随冷凝温度升高,3种循环的净输出功率均降低。由于喷射器性能受其各个尺寸的约束,仅仅调节喉部直径是有一定局限性的,所以 EORC 离理想情况下的 EORC 仍有差距。在一定范围内(<30 °C), AEORC 的净输出功率要高于 ORC。

以上结果表明:一只可调喷射器仅能对小范围内的冷凝温度变化进行有效调节,不能适用大范围

的温度变化调节;仅使用一只可调喷射器的 AEORC 有一定的局限性,无法满足冷凝温度随四季环境温度的变化。

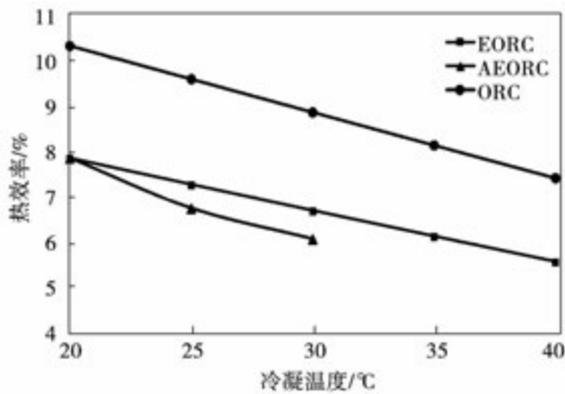


图 5 热效率随冷凝温度的变化
Fig. 5 Thermal efficiency with the condensation temperature

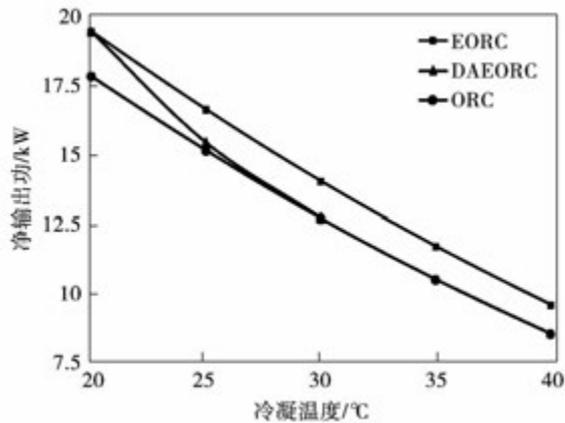


图 6 净输出功随冷凝温度变化
Fig. 6 Net power output with the condensation temperature

2 双可调喷射式有机朗肯循环

针对上述单只可调喷射器应用的局限性,为更好地适应季节环境温度变化造成的冷凝温度变化,本研究提出采用两只可调节喷射器应用于有机朗肯循环中,构成双可调喷射器的喷射式有机朗肯循环(简称 DAEORC),如图 7 所示。该两支可调节喷射器分别以冷凝温度 20 °C 和 30 °C 为基准设计的 1 号与 2 号可调式喷射器。

当冷凝温度为 20 - 30 °C,开启 1 号可调式喷射器,关闭 2 号可调式喷射器。

当冷凝温度为 30 - 40 °C 时,则关闭 1 号可调式喷射器,开启 2 号可调式喷射器。

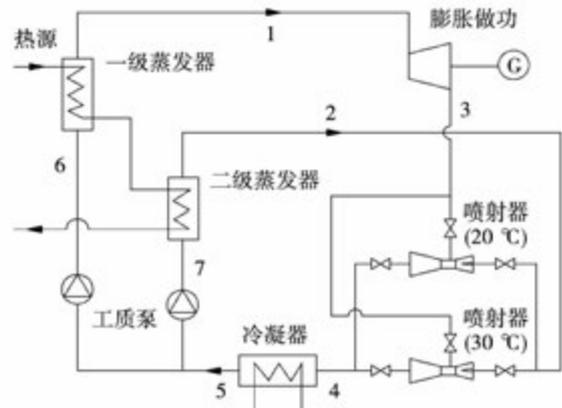


图 7 双可调喷射器有机朗肯循环原理图
Fig. 7 Schematic diagram of the organic Rankine cycle with double adjustable ejector (DAEORC)

图 8 给出了 ORC、EORC 与 DAEORC 的热效率对比情况。随冷凝温度升高,ORC 和 EORC 的热效率均降低;相同冷凝温度时,EORC 热效率高于 DAEORC,而 ORC 的热效率最高。

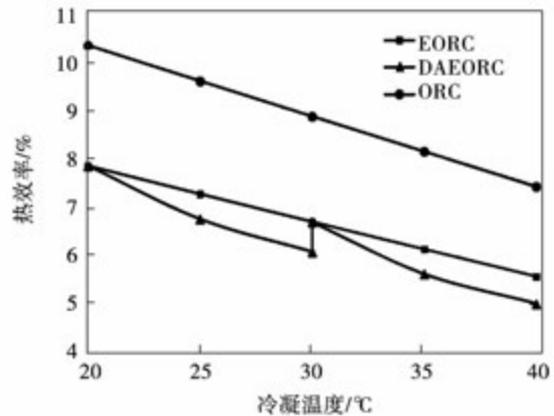


图 8 热效率随冷凝温度的变化
Fig. 8 Thermal efficiency with the condensation temperature

图 9 为 ORC、EORC 与 DAEORC 的净输出功对比。随冷凝温度升高,ORC 和 EORC 均降低;在相同冷凝温度时,EORC 大于另两种循环净输出功,在额定工况冷凝温度 20 和 35 °C 时,DAEORC 与 EORC 理想情况相同,而在额定工况两侧时,DAEORC 的净输出功小于 EORC。DAEORC 的优势在于只使用两只喷射器就可以使得循环在冷凝温度在

20–40 °C 之间变化时,高效地输出功。

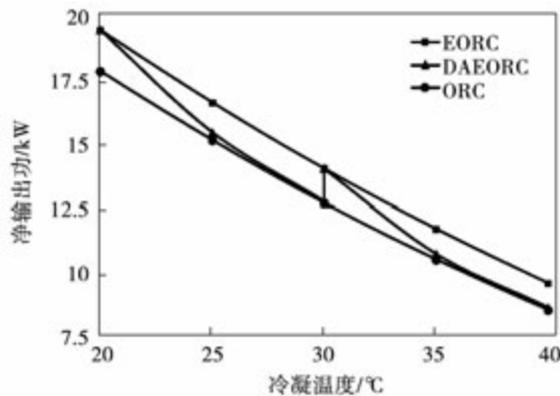


图9 净输出功率随冷凝温度的变化

Fig. 9 Net power output with the condensation temperature

上述结果表明,冷凝温度变化范围较大时,两只并联的可调喷射器可以对循环进行有效的调节,可以有效地提高循环输出功。如不考虑成本情况,采用多只可调喷射器并联,则能更有效地提高对冷凝温度变化范围的调节能力,可以使喷射式有机朗肯循环接近于理想情况。

3 结 论

(1) 提出可调喷射式有机朗肯循环(简称 AE-ORC)。在一定范围内 AEORC 可以适应工况的变化,但调节范围有限,超出一定范围后喷射器将无法有效调节。以冷凝温度 20 °C 设计的可调节喷射器,在冷凝温度 30–35 °C 范围,可调节喷射器可以对 AEORC 进行调节,但超出这一范围后,喷射器失效。

(2) 提出双可调喷射器 EORC(简称 DAE-ORC)。分别按冷凝温度 20 °C 和 30 °C 设计两支可调喷射器,可以实现冷凝温度 20–40 °C 范围内的有效调节,DAEORC 的净输出功高于 ORC。

(3) 基于 DAEORC,可以考虑采用多只喷射器并联的喷射式有机朗肯循环,可以使喷射式有机朗肯循环接近于理想情况。

参考文献:

[1] Chen H J, Goswami D Y, Stefanakos E K. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat [J]. *Renew Sust Energy Rev*, 2010, 14(9): 3059–3067.

[2] He C, Liu C, Gao H, et al. The optimal evaporation temperature and working fluids for subcritical organic Rankine cycle [J]. *Energy*, 2012, 28(1): 136–143.

[3] Wang Z Q, Zhou N J, Guo J, et al. Fluid selection and parametric optimization of organic Rankine cycle using low temperature waste heat [J]. *Energy*, 2012, 40(1): 107–115.

[4] Wang E H, Zhang H G, Fan B Y, et al. Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery [J]. *Energy*, 2011, 36(5): 3406–3418.

[5] Wang J F, Yan Z Q, Wang M, et al. Thermodynamic analysis and optimization of an (organic Rankine cycle) ORC using low grade heat source [J]. *Energy*, 2013, 49(1): 356–365.

[6] 杨新乐, 黄菲菲, 戴文智, 等. 抽汽-乏汽联合回热对低温蒸汽 ORC 系统热力性能影响 [J]. *热能动力工程*, 2014, 29(3): 249–255.

YANG Xin-le, HUANG Fei-fei, DAI Wen-zhi, et al. Study of the influence of the extraction steam-exhaust steam combined recuperation on the thermal performance of a low temperature steam ORC system [J]. *Journal of Engineering For Thermal Energy And Power*, 2014, 29(3): 249–255.

[7] 杨新乐, 赵阳升, 冯增朝, 等. 对流热采油页岩过程低温余热 ORC 系统热力分析 [J]. *热能动力工程*, 2012, 27(2): 664–668.

YANG Xin-le, ZHAO Yang-sheng, Feng Zeng-chao, et al. Thermodynamic analysis of a low temperature waste heat organic rankine cycle system in the process of the convection heat-based oil shale exploitation [J]. *Journal of Engineering For Thermal Energy And Power*, 2012, 27(2): 664–668.

[8] 张新铭, 王德华, 虹光, 等. 应用热力学分析方法与 AHP-熵值法对 ORC 的工质比较及优化 [J]. *热能动力工程*, 2014, 29(2): 146–148.

ZHANG Xin-ming, WANG De-hua, HONG Guang, et al. Comparison and optimization of the working media for organic rankine cycles by using the thermodynamic analytic method and AHP-entropy value method [J]. *Journal of Engineering For Thermal Energy And Power*, 2014, 29(2): 146–148.

[9] 索科洛夫. 喷射器 [M]. 黄秋云译. 北京: 科学出版社, 1977.

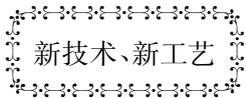
Соколов ЕЯ, Зигеля НМ (Huang Qiuyun) [M]. *Ejector*. Beijing: Science Press, 1977.

[10] Deberne N, Leone JF, Duque A, et al. A model for calculation of steam ejector performance [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1999, 25(5): 841–855.

[11] Hemidi Amel, Henry François, Leclair Sébastien, CFD analysis of a supersonic air ejector Part I: Experimental validation of single-phase and two-phase operation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(8–9): 1523–1531.

[12] 陆宏圻. 喷射技术理论及应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版

- 社,2004.
- LU Hong-qi. Theory and application of injection technology [M]. Wu Han: Wu Han University Press,2004.
- [13] Ji J G, Wang R Z, Li L X. Performance computation and analysis of steam ejector [J]. Ship Engineering,2006,28(5):46-49.
- [14] Zhu Y H, Cai W J, Wen C Y, et al. Simplified ejector model for control and optimization [J]. Energy Conversion and Management,2008,9(6):424-1432.
- [15] 沈胜强,张 琨. 可调式气体喷射器调节性能计算分析 [J]. 石油化工高等学校学报,2007,20(1):74-76.
- SHEN Sheng-qiang, ZHENG Kun. Calculation and analysis on the performance of adjustable ejector [J]. Journal of Petrochemical Universities,2007,20(1):74-76.
- [16] 沈胜强,李素芬,夏远景. 喷射式热泵的设计计算与性能分析 [J]. 大连理工大学学报 1998; 38(5):558-561.
- SHENG Sheng-qiang, LI Su-fen, XIA Yuan-jing. Performance analysis and optimal structure design of steam ejector heat pumps [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1998, 38(5):558-561.
- [17] 李新国,贾艳敏. 采用喷射泵提高低温热源发电能力的系统 [P]. 中国: ZL200910070578.3,2012.1.21.
- LI Xin-guo, JIA Yan-min. Increasing the generation capacity of low-grade heat source by ejector in power generation system [P]. China, ZL200910070578.3,2012.1.21.
- [18] Li X G, Zhao C C, Hu X C. Thermodynamic analysis of organic Rankine cycle with ejector [J]. Energy,2012,42:342-349.
- [19] Li X G, Li X J, Zhang Q L. The first and second law analysis on an organic Rankine cycle with ejector [J]. Solar Energy,2013,93:100-108.
- (陈 滨 编辑)



安德列斯克火力发电厂 ПГУ - 180 型发电机实际运行反馈

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2015.04.006

据《Теплоэнергетика》2013 年 9 月刊报道,安德列斯克发电厂 ПГУ - 180 发电机组于 2012 年 8 月开始投入运行。

热力系统中每台 ПГУ - 180 蒸燃联合装置配备 2 台 AE64.3A 燃气轮机装置(每台为 65.8 MW 功率)、2 台 ПК - 69 卧式锅筒式双压余热锅炉、1 台 T - 48/62 - 7.4/0.12 热电分汽式汽轮机装置、3 台发电机和辅助设备。

安德列斯克发电厂蒸汽部分配备有国产设备(即余热锅炉和汽轮机),功率达蒸燃联合装置 180 MW 因此该电厂能快速投入运行,并保证高效运行。

2 台蒸燃联合装置发电机组(4 台燃气轮机和 2 台汽轮机)工作时,安德列斯克发电厂额定负荷(391 - 397 MW)的效率达 52%,同时 NO_x 和 CO 排放时也明显低于生态标准。

(吉桂明 摘译)

考虑抽气系统的凝汽器变工况特性研究 = **A Study on Variable Condition Features for Condenser with Air Extracting System** [刊, 汉] WANG Zheng-ming, LIU De-you, WANG Feng (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu, China, Post Code: 210098) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(4) . -515 -520

Based on the balance equation of water ring vacuum pump air extracting and condenser air leakage, a new condenser pressure model by considering water ring vacuum pump was formed. Taking a 300 MW thermal power plant as an example, the variable condition features for condenser with air extracting system and without air extracting system were analyzed. The results show that the condenser pressure calculation without considering air extracting system cannot reflect the real pressure in the condenser when the output of vacuum pumping system is insufficient. And low exhaust steam heat load, poor condenser vacuum tightness, large circulation cooling water and the change of circulation cooling water inlet temperature were the main factors of insufficient output of vacuum pumping system and condenser vacuum deterioration. It has also been found that the insufficient output of water ring vacuum pump would occur when the intake air temperature of water ring vacuum pump is close to the circulation cooling water temperature. And this can be taken as a great judgment of whether the output of the water ring vacuum pump is insufficient or not. **Key words:** condenser, air extracting system, water ring vacuum pump, air extracting temperature, variable condition features

可调喷射器应用于有机朗肯循环的热力学分析 = **Thermodynamic Analysis of Organic Rankine Cycle with Adjustable Ejector** [刊, 汉] LI Xin-guo, LIN Die-die, ZHU Qiang (Department of Thermal Engineering, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, China, Post Code: 300072) , ZHANG Qi-lin(COOEC-ENPAL Engineering CO, LTD. , Qingdao, Shandong, China, Post Code: 266061) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(4) . -521 -526

Based on an organic Rankine cycle with ejector (EORC) proposed by the authors, an organic Rankine cycle with adjustable ejector (AEORC) is put forward to adapt to the change of operation conditions in this paper. For the condensation temperature of the cycle varies with the environmental temperature, the performance of the ejector and the EORC will change with the condensation temperature. The thermodynamic performance of the cycles in different operating conditions is calculated and analyzed on the basis of Matlab platform. The emphasis is on the net output power as the evaluation index. Due to the limited regulating range of single adjustable ejector, an organic Rankine

cycle with double ejectors (DAEORC) is proposed and analyzed. The results show that the two adjustable ejectors designed at condensation temperature of 20 °C and 30 °C respectively can realize the regulation of the DAEORC within the condensation temperature of 20 – 40 °C. And the net output power of DAEORC is higher than ORC. **Key words:** adjustable ejector, Organic Rankine cycle with ejector, Organic Rankine cycle with adjustable ejector, thermodynamic analysis

矩形小翼纵向涡发生器流动换热研究 = **A Study of the Flow and Heat Exchange in a Longitudinal Vortex Generator with Rectangular Winglet** [刊, 汉] ZENG Zhuo-xiong(College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200090) , WANG Zhang-jun, ZHANG Long, XU Yi-hua (School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, China , Post Code: 330063) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2015, 30(4) . – 527 – 534

H-type fin heat exchange mechanism equipped with small rectangular winglet of the longitudinal vortex generator is researched adopting the numerical simulation method. The results show that with the increase of flow velocity, the temperature in the reflow zone is gradually raised. With the same Reynolds number value, the temperature difference between import and export, pressure loss, Nusselt number, Euler number and heat exchange factor are all increased with the increase of angle of attack. But the comprehensive performance increases at first, then decreases. With the increase of Reynolds number, the pressure drop and Nusselt number increase, however the temperature difference between import and export, Euler number, heat exchange factor and comprehensive performance are all decreased. **Key words:** H-type fin, longitudinal vortex generator, convective heat transfer flow characteristics, rectangular winglet

双层板冲击 – 气膜复合冷却结构冷却性能的数值分析 = **Numerical Analysis on Cooling Performance of Combined Impingement and Film Cooling on Double-layered Plate** [刊, 汉] LI Yue-ru, DAI Ren(College of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) , WANG Jiao, XU Qiang(Technology Development Center of Shanghai Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 201612) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2015, 30(4) . – 535 – 540

Internal impingement and external film cooling of high pressure turbine blades are combined together to enhance the cooling effectiveness. This study applies the method of Flow-heat Coupling to compute and simulate the combined