

# 甘孜地热发电热力计算及优化

王延欣<sup>1,2</sup>, 王令宝<sup>3</sup>, 李华山<sup>3</sup>, 卜宪标<sup>3</sup>

(1. 中国石化集团新星石油有限责任公司, 北京 100083; 2. 中石化新星四川地热能开发有限公司, 四川 成都 610096; 3. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

**摘要:**为给后续地热电站建设提供设计依据,以甘孜地热井作为研究对象,根据放喷获得的冷热源数据对发电工艺进行选择并对热力过程进行计算,考虑发电规模和设备供应,选择有机朗肯循环及其两种改进型作为发电工艺。通过热力计算比较三种发电工艺的性能,优选出适宜的发电工艺。结果表明:存在最优的蒸发温度使单位热水发电量最大,基本朗肯循环(BORC)、闪蒸朗肯循环(FORC)和两级朗肯循环(TSORC)对应的最优蒸发温度分别为60、70和75℃,在该温度下,对应的热效率分别为10.74%、10.89%和11.45%,单位热水发电量分别为8.77、10.09和10.3 kW·h/t,地热尾水排放温度分别为45.02、35.55和37.9℃。仅从上述三个参数考虑,TSORC系统最优,FORC系统次之。

**关键词:**地热发电;热力计算;有机朗肯;性能对比;地热

**DOI:**10.11990/jheu.201504026

**网络出版地址:**<http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1390.u.20160421.1039.002.html>

**中图分类号:**TK52 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7043(2016)06-0873-05

## Thermodynamic calculation and optimization of geothermal power generation in Ganzi

WANG Yanxin<sup>1,2</sup>, WANG Lingbao<sup>3</sup>, LI Huashan<sup>3</sup>, BU Xianbiao<sup>3</sup>

(1. Sinopec Star Petroleum Co., Ltd, Beijing 100083, China; 2. Sinopec Star Petroleum Sichuan geothermal development Co., Ltd, Chengdu 610096, China; 3. GuangZhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** A geothermal well in Ganzi was chosen for the study. To provide a reference for the design and construction of a geothermal plant, power generation techniques were selected and the thermodynamic process was calculated based on cold and heat source data obtained through choke. Considering the power generation scale and equipment supply, the organic rankine cycle (ORC) and its two improved versions were selected as the power generation techniques. The power generation performances of the three techniques were compared using thermodynamic calculation. The results showed that there is an optimal evaporation temperature at which the power generation from unit hot water is at a maximum. The optimal evaporation temperatures for basic ORC (BORC), flashing ORC (FORC), and two-stage ORC (TSORC) are 60, 70 and 75 °C, respectively; the corresponding thermal efficiencies are 10.74%, 10.89% and 11.45%; the power generation from unit hot water 8.77, 10.09 and 10.3 kW·h/t; and the tail water temperature 45.02, 35.55 and 37.9 °C. Considering the above three parameters, the TSORC is the best cycle, followed by the FORC.

**Keywords:** geothermal power generation; thermodynamic calculation; organic Rankine; performance comparison; geothermal

随着化石能源的短缺,地热能的利用越来越受到人们重视<sup>[1]</sup>。2013年,全球地热发电量76 TW·h,直接利用量为91 TW·h(不包括地源热泵),地

热发电新增装机容量530 MW,截止到2013年底,全球地热发电总装机容量12 GW。目前世界范围内的地热发电主要采用160℃以上的热水或者蒸汽发电,对于120~160℃的地热资源利用较少<sup>[2-4]</sup>,而这个温度区间的资源却很丰富。为提高地热发电装机容量,温度120~160℃的热源必须加以合理充分的利用。有机朗肯循环(ORC),也叫双工质循环,是高效利用这个区间热源发电的方式之一。针对有机朗肯循环用于地热发电,国内外的学者进行了大量

收稿日期:2015-04-17.

网络出版日期:2016-04-21.

基金项目:国家高技术研究发展计划(2012AA053003);广州市珠江科技新星专项计划(2014J2200079);甘孜地区地热发电技术研究项目(10500000-14-ZC0607-0005).

作者简介:王延欣(1982-),男,工程师;

卜宪标(1979-),男,博士研究生.

通信作者:卜宪标, E-mail: buxb@ms.giec.ac.cn.

的研究<sup>[5-6]</sup>。Baktosh 等<sup>[7]</sup>研究了双工质闪蒸系统,得出该系统比传统 ORC 系统多发电 25% 的结论。Sahar 等<sup>[8]</sup>依据热力学第一和第二定律比较了几种改进 ORC 系统的热效率和焓效率,并指出了焓损最大的部件。国内的多位学者研究了抽气乏气回热对有机朗肯循环性能的影响<sup>[9-11]</sup>。

随着能源供应紧张以及环境污染严重,中国越来越重视地热的开发利用,目前我国地热直接利用规模已据世界第一位,可是地热发电规模和水平较世界还有很大差距。基于此,拟在四川甘孜地区新建一小规模地热电站,通过该电站的建设运行,摸索和积累从地热资源勘探、地热井钻探、电站设计到运行管理的全套经验,为后续放大推广奠定基础。

本文以甘孜地区某地热井为研究对象,根据冷热源情况对发电工艺进行选择,同时对热力学参数进行优化计算,以便为后续地热电站设计及电站建设提供参考依据。

### 1 地热资源情况

地热井位于甘孜康定地区,海拔高度 3 100 m,完钻层位为三叠系杂谷脑组变质砂板岩,完钻井深 1 847 m,1 203 m 以上为固井止水,1 203~1 847 m 为花管。地热井区域大地构造位置图及井场分别如图 1 和 2 所示。

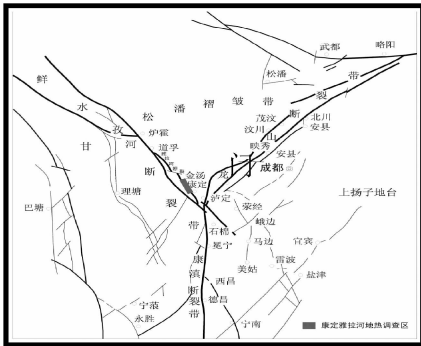


图 1 地热井区域大地构造位置图

Fig.1 The tectonic location map of geothermal well



图 2 地热井场

Fig.2 Geothermal well site

为准确把握地热井的热储参数,于 2014 年 8 月进行了放喷实验,有效放喷井段 1 203~1 847 m。放喷期间,测得地热井口温度 115 ℃,压力 0.34 MPa

(表压),稳定流量 41 t/h。在放喷实验期间提取地热水进行了水质分析,分析结果见表 1。

表 1 水质成分

Table 1 Water composition mg/L

PH	TDS	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
7.8	2 378.9	50	570	22.04	6.08
Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub>
143.6	15.82	1427.8	0.12	7.9	2.2

注:TDS-可溶性总固体,CO<sub>2</sub>-游离 CO<sub>2</sub>

### 2 发电工艺选择及热力计算

#### 2.1 发电工艺选择

热源情况:温度 115 ℃,压力 0.34 MPa(表压),稳定流量 41 t/h。冷源情况:因现场河水资源丰富,按冬季冷却水温度 2 ℃ 计算。

根据上述冷热源情况,可供选择的发电工艺很多,包括闪蒸、有机朗肯循环以及闪蒸和有机朗肯联合循环。由于热水条件限制,发电规模较小。考虑到设备紧凑型、施工难易程度、设备选型、设备设计制造日期、投资回收等,最终决定选择有机朗肯发电工艺。有机朗肯循环包括基本型和多种改进型,不同的形式其结构和热力学性能也不相同。本文主要考察热力学性能,设备投资以及焓分析将在后续文章中阐述。

提高有机朗肯循环热力学性能的措施主要有

- 1)降低地热尾水温度,尽可能多地利用热量;
- 2)提高蒸发温度;
- 3)利用乏气和抽气等内部热量;
- 4)利用补气等措施提高效率。

上述几种措施常常组合使用,以达到提高系统性能,降低设备投资的目的。

由于乏气回热和抽气回热研究的较多,本文选择两种带有补气的有机朗肯循环,即闪蒸有机朗肯循环(FORC)和两级有机朗肯循环(TSORC),主要分析热效率、单位热水做功能力、工质流量和地热尾水温度。通过和基本型有机朗肯循环(BORC)进行对比,选出较优异的发电工艺。三种朗肯循环的工艺图见图 3~5。

在图 3 中,蒸发器出口为饱和蒸汽。在图 4 中,从蒸发器出来的工质为气液两相,在分离器中进行气液分离,饱和气体进入膨胀机膨胀做功,饱和液体进入闪蒸罐闪蒸。闪蒸罐出口为饱和气体和饱和液体,饱和气体进入补气膨胀机做功,饱和液体经工质泵 2 加压后进入蒸发器,与来自冷凝器的工质混合,混合点的温度为闪蒸温度。

在图 5 中,从冷凝器来的工质经工质泵 1 加压后进入蒸发器 1,在蒸发器 1 中经加热变为饱和气体和饱和液体,饱和气体进入膨胀机做功,饱和液体

经工质泵 2 加压进入蒸发器 2,在蒸发器 2 中经加热变为饱和气体进入膨胀机。

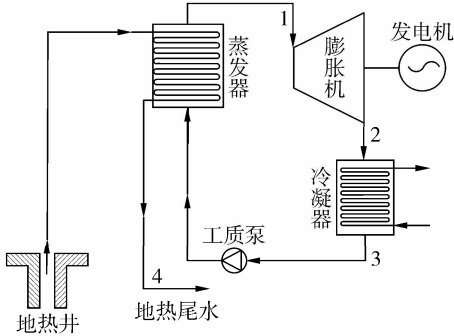


图 3 基本朗肯循环  
Fig.3 Basic ORC

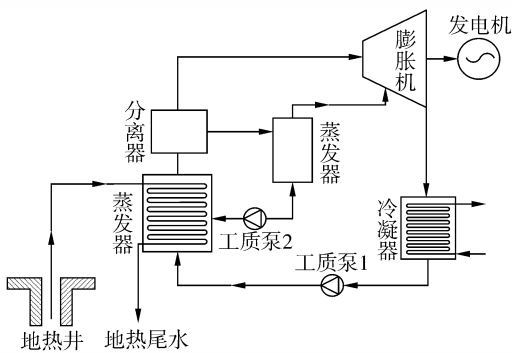


图 4 闪蒸朗肯循环  
Fig.4 Flashing ORC

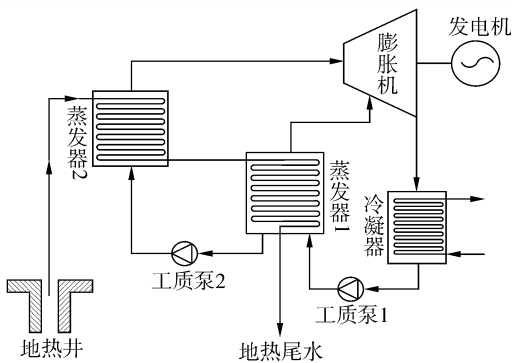


图 5 两级朗肯循环  
Fig.5 Two stage ORC

2.2 热力学计算

几点假设:

- 1) 蒸发器换热夹点温度 5℃, 冷凝器出口为饱和液体;
- 2) 忽略冷凝器、蒸发器和管道中的压力损失;
- 3) 忽略摩擦损失和环境散热;
- 4) 发电净功不考虑冷热水泵功耗。

以基本有机朗肯循环为例,热力计算公式为

$$Q_{eva} = m_{wf} \times (h_1 - h_4) = m_{hw} \times C_p \times (T_{hw,in} - T_{hw,out})$$

$$Q_{con} = m_{wf} \times (h_2 - h_3)$$

$$P_{pump} = m_{wf} \times (h_4 - h_3) = \frac{m_{wf} \times (h_{4s} - h_3)}{\eta_{pump}}$$

$$P_{exp} = m_{wf} \times (h_1 - h_2) = m_{wf} \times (h_1 - h_{2s}) \times \eta_{exp}$$

$$P_{net} = P_{exp} \times \eta_{gen} - P_{pump}, \eta_{th} = \frac{P_{net}}{Q_{eva}}, N = \frac{P_{net}}{m_{hw} \times 3.6}$$

式中:  $Q_{eva}$  为蒸发器换热功率, kW;  $m_{wf}$  为工质流量, kg/s;  $m_{hw}$  为地热水流量, kg/s;  $h_1$  为膨胀机进口焓值, kJ/kg;  $h_4$  为蒸发器进口焓值, kJ/kg;  $C_p$  为水的定压比热, kJ/(kg · K<sup>-1</sup>);  $T_{hw,in}$  为地热水进口温度, °C;  $T_{hw,out}$  为地热尾水温度, °C;  $Q_{con}$  为冷凝器换热功率, kW;  $h_2$  为膨胀机出口焓值, kJ/kg;  $h_3$  为冷凝器出口焓值, kJ/kg;  $P_{pump}$  为工质泵功耗, kW;  $h_{4s}$  为泵后工质等熵焓, kJ/kg;  $\eta_{pump}$  为工质泵的等熵效率;  $P_{exp}$  为膨胀机输出功, kW;  $h_{2s}$  为膨胀机后工质等熵焓, kJ/kg;  $\eta_{exp}$  为膨胀机的等熵效率;  $P_{net}$  为发电净功率, kW;  $\eta_{gen}$  为发电机效率;  $\eta_{th}$  为热电转换效率;  $N$  为单位热水发电量, kW · h/t。

FORC 和 TSORC 系统所用到的热力学公式和 BORC 系统中一致,不再一一列出。

要求出最优热效率和单位热水发电量,在 BORC 系统中,需要确定最优蒸发温度 ( $T_{eva}$ ),在 FORC 系统中,需要确定最佳蒸发温度和闪蒸温度,在 TSORC 系统中,需要确定两个蒸发器中的优化蒸发温度。为此,本文利用 Matlab 软件和 REFPROP 提供的物性参数进行编程求解。

求解过程中用到的参数如下:泵等熵效率 0.65, 膨胀机等熵效率 0.85, 发电机效率 0.95, 冷凝器中冷却水温升 5℃, 冷凝温度 10℃。采用 R245fa 作为发电工质。R245fa 中文名称五氟丙烷,是一种环保制冷工质,化学式 CF<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CHF<sub>2</sub>,分子量 134,沸点 (101.3kPa) 15.1℃,液体密度 (20 °C) 1 352 kg/m<sup>3</sup>,蒸汽压 (20 °C) 122.7 kPa。

3 结果与讨论

在图 5 中,蒸发温度  $T_{eva}$  指的是蒸发器 2 的蒸发温度。蒸发温度决定了系统的热力学性能,包括热效率、单位热水发电量、工质流量和地热尾水温度等,图 6~9 表示系统参数随蒸发温度的变化。

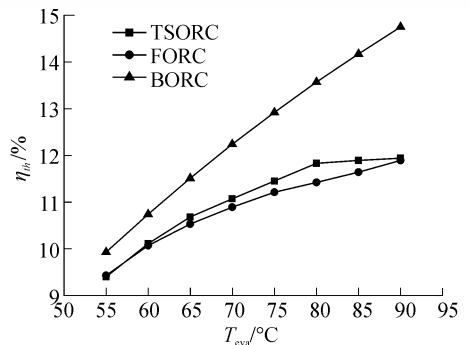


图 6 热效率随蒸发温度的变化  
Fig.6 Variation of  $\eta_{th}$  with  $T_{eva}$

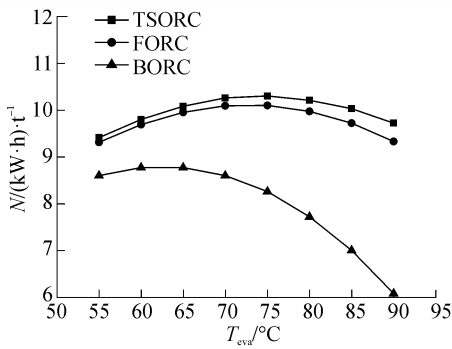


图7 单位热水发电量随蒸发温度的变化

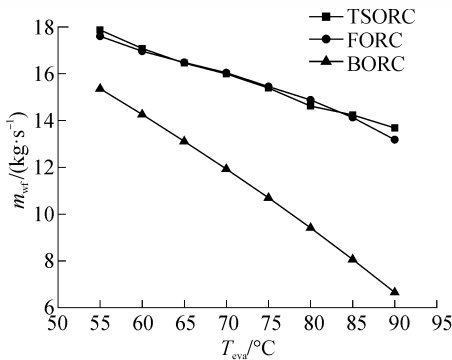
Fig.7 Variation of  $N$  with  $T_{eva}$ 

图8 工质流量随蒸发温度的变化

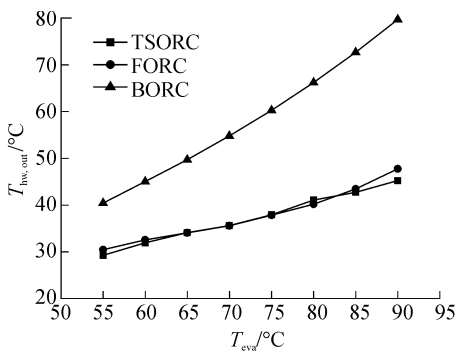
Fig.8 Variation of  $m_{wf}$  with  $T_{eva}$ 

图9 地热尾水温度随蒸发温度的变化

Fig.9 Variation of  $T_{hw,out}$  with  $T_{eva}$ 

图6中,三种发电工艺的热效率均随着蒸发温度的提高而提高,BORC系统热效率最高,TSORC系统次之,FORC系统最小。热效率高表示系统较紧凑。蒸发温度提高,地热尾水排放温度随之提高,如图9所示,由于冷凝温度不变,导致系统热效率提高。三种系统中,BORC系统热效率随蒸发温度变化的斜率最大,其他两种系统变化稍小。

图7表示单位热水发电量随蒸发温度的变化趋势,也就是系统对外做功能力。从图7可知, $N$ 随蒸发温度的增加先增大后减小,存在最大值。在相同蒸发温度下,TSORC系统对应的 $N$ 最大,FORC系统次之,BORC系统最小。BORC系统对应的 $N$ 随蒸发温度的变化比较剧烈,其他两种系统的变化较缓。三种系统中,最大值 $N$ 对应的蒸发温度各不相同,

BORC系统在 $T_{eva} = 60^\circ\text{C}$ 时出现最大值,为 $8.77\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ,FORC系统在 $T_{eva} = 70^\circ\text{C}$ 时出现最大值,为 $10.09\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ,TSORC系统在 $T_{eva} = 75^\circ\text{C}$ 时出现最大值,为 $10.3\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。两种改进型ORC系统最大 $N$ 对应的蒸发温度均大于基本ORC。在最优 $N$ 时,BORC、FORC和TSORC系统对应的热效率分别为 $10.74\%$ 、 $10.89\%$ 和 $11.45\%$ 。仅从热效率和单位热水发电量这两个参数进行对比,TSORC系统是最优的,FORC系统次之,两种改进型系统均优于BORC系统。

图8反映的是工质流量随蒸发温度的变化。工质流量指的是通过膨胀机的流量,也就是冷凝器中的工质流量。工质流量,在BORC系统中是蒸发器中的流量,在FORC系统中是分离器中的气体和闪蒸罐中的气体之和,在TSORC系统中指蒸发器1和蒸发器2中的气体流量和。从图8可知,工质流量随蒸发温度的提高而降低,两种改进型ORC系统工质流量基本相同,都大于基本ORC系统。在压力相同时,工质流量大表示工质体积流量大,意味着系统体积大。也就是说,对于低压冷凝侧,FORC和TSORC系统的冷凝器体积及配套气体管道直径大于BORC的。对于高压蒸发侧,在蒸发温度相同时,膨胀机的一级进气压力和密度相同,由于FORC和TSORC系统有补气,其补气压力和密度均小于一级进气系统,再加上FORC和TSORC系统的工质流量大于BORC,结果是FORC和TSORC系统对应的气体体积流量大于BORC系统,因此,FORC和TSORC系统对应的气体管道直径和膨胀机体积均大于BORC系统。

图9表示地热尾水温度随蒸发温度的增大而增加,FORC和TSORC系统的地热尾水温度基本相同,均低于BORC系统的。如果地热尾水无回灌,考虑到环境热污染,优先采用FORC和TSORC系统,如果地热尾水有回灌或者有后续利用,可以考虑采用BORC系统。

将三种发电系统最优 $N$ 对应的参数汇总在表2中。

表2 热力性能对比

Table 2 Comparison of thermodynamic performance

系统	$T_{eva}/^\circ\text{C}$	$\eta_{in}/\%$	$N/(\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1})$	$m_{wf}/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	$T_{hw,out}/^\circ\text{C}$
BORC	60	10.74	8.77	14.26	45.02
FORC	70	10.89	10.09	16.04	35.55
TSORC	75	11.45	10.3	15.39	37.9

从表2可知,仅考虑热效率、单位热水发电量和地热尾水排放温度,FORC和TSORC系统均优于BORC系统,其中属TSORC系统最优。仅考虑工质

流量,BORC系统优于两种改进型。在实际电站建设时,不仅要考虑热力性能,还要考虑设备复杂性、设备成本以及后续维护管理等。

## 4 结论

基于甘孜某地热井的冷热源参数,本文以基本朗肯循环和两种改进型朗肯循环作为备选发电工艺系统,对其热力学参数进行了优化计算和对比,得到如下结论:

1)三种发电系统的热效率和地热尾水温度均随蒸发温度的增加而增加;存在最优的蒸发温度使单位热水发电量最大,三种发电系统对应的最优蒸发温度各不相同;

2)BORC, FORC和TSORC系统对应的最佳蒸发温度分别为60、70和75℃,在该温度下,三个系统对应的热效率分别为10.74%、10.89%和11.45%,单位热水发电量分别为8.77、10.09和10.3 kW·h/t,地热尾水排放温度分别为45.02、35.55和37.9℃;

3)仅从热效率、单位热水发电量和地热尾水排放温度考虑,两种改进型系统均优于基本朗肯系统,其中TSORC系统最优,FORC系统次之。

## 参考文献:

- [1] DIPIPPO R, RENNER J L. Geothermal energy [M]. LETCHER T M. Future energy. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2014: 471-492.
- [2] DIPIPPO R. Geothermal power plants[M]. 2nd ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2008: 79-98.
- [3] BERTANI R. Geothermal power generation in the world 2005-2010 update report[J]. Geothermics, 2012, 41: 1-29.
- [4] HUENGES E, LEDRU P. Geothermal energy systems: exploration, development, and utilization [M]. Amsterdam:

## 本文引用格式:

王延欣,王令宝,李华山,等. 甘孜地热发电热力计算及优化[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(6): 873-877.

WANG Yanxin, WANG Lingbao, LI Huashan, et al. Thermodynamic calculation and optimization of geothermal power generation in Ganzi[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(6): 873-877.

Wiley-VCH, 2010: 35-49.

- [5] ASTOLFI M, ROMANO M C, BOMBARDA P, et al. Binary ORC (Organic Rankine Cycles) power plants for the exploitation of medium-low temperature geothermal sources-Part B: techno-economic optimization [J]. Energy, 2014, 66: 435-446.
- [6] KARADASA M, CELIK H M, SERPEN U, et al. Multiple regression analysis of performance parameters of a binary cycle geothermal power plant[J]. Geothermics, 2015, 54: 68-75.
- [7] EDRISI B H, MICHAELIDES E E. Effect of the working fluid on the optimum work of binary-flashing geothermal power plants[J]. Energy, 2013, 50: 389-394.
- [8] SAFARIAN S, ARAMOUN F. Energy and exergy assessments of modified organic Rankine cycles (ORCs)[J]. Energy reports, 2015, 1: 1-7.
- [9] 张红光, 张健, 杨凯, 等. 柴油机全工况下抽气回热式有机朗肯循环系统分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 19-26.  
ZHANG Hongguang, ZHANG Jian, YANG Kai, et al. Performance of regenerative organic Rankine cycle over whole operating range of diesel engine[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2014, 45(8): 19-26.
- [10] 王智, 于一达, 韩中合, 等. 低温抽气回热式有机朗肯循环的参数优化[J]. 华东电力, 2013, 41(2): 448-451.  
WANG Zhi, YU Yida, HAN Zhonghe, et al. Parameter optimization of low-temperature regenerative extraction organic Rankine cycle[J]. East China electric power, 2013, 41(2): 448-451.
- [11] 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 Xinle, HUANG Feifei, DAI Wenzhi, 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 the thermal energy and power, 2014, 29(3): 249-255.