

文章编号: 2095-2163(2022)09-0115-05

中图分类号: TM715

文献标志码: A

# 有机朗肯循环工质筛选及参数优化

申有吉

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 通过液化天然气的冷能和工业余热回收,有效提高发电系统的效率。首先,建立膨胀机、冷凝器、水泵、锅炉的有机朗肯循环数学模型;其次,基于模拟的优化框架,利用液化天然气冷能对有机朗肯循环进行工质的筛选及参数优化;最后,采用 Matlab 对模型进行仿真,结果表明通过工质的选择、参数的优化,得到了各点处最优的工作状态参数,使 ORC 系统达到较高的净输出功率。

**关键词:** 有机朗肯循环; 液化天然气冷能; R22 工质; 参数优化

## Screening and parameters optimization of organic Rankine cycle working medium

SHEN Youji

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**[Abstract]** Through Liquefied Natural Gas (LNG) cold energy and industrial waste heat recovery, the efficiency of the power generation system can be effectively improved. Firstly, this paper establishes the mathematical model of organic Rankine cycle of the expander, condenser, water pump and boiler. Secondly, an optimization framework based on simulation is proposed to screen the working medium and optimize the parameters of organic Rankine cycle (ORC) by using LNG cold energy. Finally, the model is solved by Matlab. The results show that the selection of R22 working medium and the optimization of parameters have a far-reaching impact on improving the performance of the system and increasing the maximum output power.

**[Key words]** organic Rankine cycle; LNG cold energy; R22 working medium; parameters optimization

## 0 引言

能源是社会发展和人民生活的保障,故而能源问题已然成为全球关注的重要热点之一。液化天然气作为一种绿色、清洁的高效新能源,具有广泛的应用。本文通过液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)的冷能和工业余热回收,有效提高发电系统的效率,因此对系统工质的选择、参数的优化、整个循环系统设备的设计都要进行综合分析,选出最优工质、最大输出功率下的最优参数,对有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, ORC)发电系统的研究具有重要的意义<sup>[1]</sup>。

## 1 有机朗肯循环发电系统

### 1.1 涡旋膨胀机工作原理

涡旋式膨胀机是一种新型膨胀机,具有高效率、高可靠性、低能耗、低噪声、结构紧凑等突出优点,运用在有机朗肯循环中有重要的意义。

涡旋膨胀机的核心部分是运动涡旋盘和固定涡旋盘,有2个与外界接触的气口、即进气口和出气

口。涡旋膨胀机的一个特点是进气、膨胀和排气过程同时在进行,使得涡旋膨胀机体积优于其他膨胀机;另一个特点是气体体积的变化曲线呈直线变化,系统不会突然快速膨胀而导致对系统性能产生影响<sup>[2]</sup>。

涡旋膨胀机的工作原理如图1所示,涡旋膨胀机的循环过程为先进气、再膨胀、最后排气,通过连续进气、膨胀和排气的主轴旋转一周以上得到一个循环。由图1可见,图1(a)为气体的吸气过程;当运动涡旋盘逆时针转过90°时,使得封闭腔内容积增大;图1(b)为气体的膨胀过程;图1(c)为气体快速膨胀过程,气体快速膨胀,容积迅速增大;图1(d)为气体的排气过程,当运动涡旋盘继续旋转,气体将排除到外界<sup>[2]</sup>。

### 1.2 有机朗肯循环工作原理

有机朗肯循环发电系统结构示意图如图2所示。由图2可见,主要由4部分组成:锅炉、汽轮机、冷凝器和水泵。水蒸气在锅炉和过热器的作用下吸收热量,由饱和水变成过热蒸汽;过热蒸汽进入汽轮机,绝热膨胀,成为乏汽;乏汽进入冷凝器,冷却,又变为

作者简介: 申有吉(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统市场优化。

收稿日期: 2022-02-25

饱和水;饱和水进入水泵,水泵将其送回锅炉,完成一个循环,如此往复循环,实现热能向机械能的转变<sup>[3]</sup>。

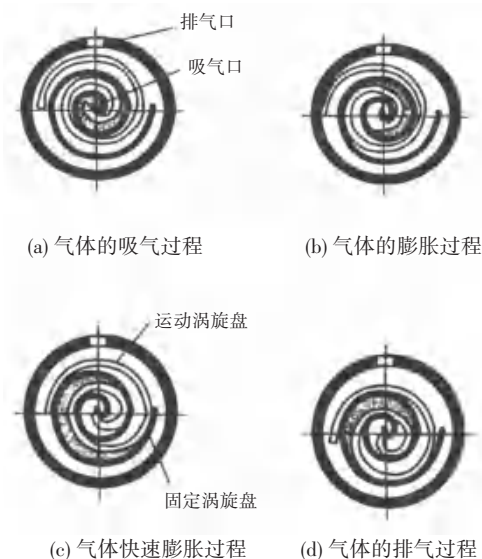


图1 涡旋膨胀机的工作原理

Fig. 1 Working principle of the scroll expander

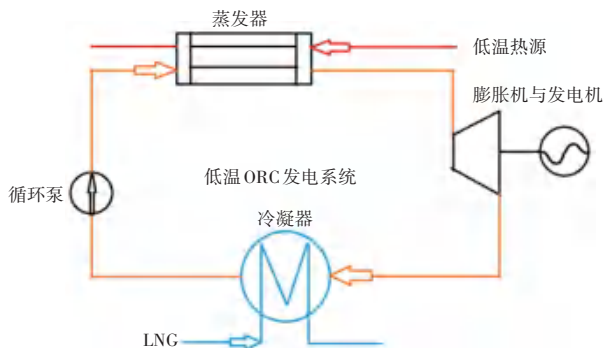


图2 有机朗肯循环发电系统结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of ORC power generation system

有机朗肯循环的循环过程可以表示为以温度  $T$  为纵坐标、熵  $S$  为横坐标的状态图过程曲线,即有机朗肯循环温熵图,如图3所示。图3中,1-2为压缩过程,熵不变,理想过程可视为可逆定熵压缩;2-3为吸热过程,温度升高的同时熵也增大,理想过程视为一个可逆定压吸热过程;3-4为膨胀过程,温度降低,熵不变,理想过程视为可逆绝热过程;4-1为冷却过程,温度不变,熵减小,理想过程可视为定温过程。

热力学第一定律表明能量只能从一种形式转换成另一种形式,总的能量保持不变。热力学第二定律表明能量在转换或传输的过程中,存在能量损耗。

应用热力学第一定律和第二定律,将存在能量损耗。应用热力学第一定律和第二定律,通过对有机朗肯循环发电系统进行建模、对工质进行选择,对系统各个关键点参数进行优化,使系统获得较高净输出功率。

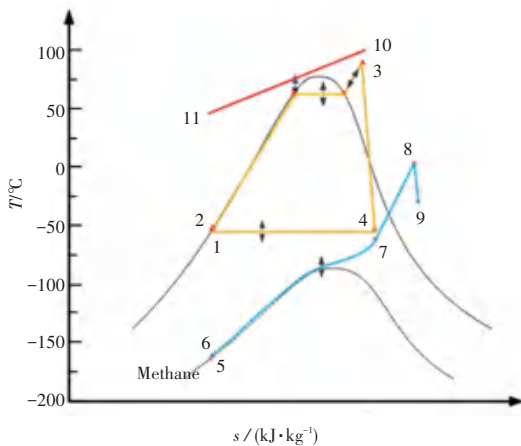


图3 ORC发电系统温熵图

Fig. 3 Temperature entropy diagram of ORC power generation system

## 2 建立系统的数学模型

基于热力学第二定律及有机朗肯循环发电系统的基本原理,建立含有膨胀机、冷凝器、水泵、锅炉的有机朗肯循环发电系统的数学模型。

### 2.1 建立膨胀机的数学模型

在有机朗肯循环发电系统中,高压有机工质蒸汽在膨胀机中膨胀做功,绝热膨胀,成为乏汽,建立系统膨胀机的数学模型。对此拟做研究分述如下。

(1) 工质在膨胀机出口焓值为(理想状态下):

$$h_{tur,os} = f(p_{tur,o}, s_{tur,i}) \quad (1)$$

$$h_{tur,i} = f(t_{tur,i}, p_{tur,i}) \quad (2)$$

$$s_{tur,i} = f(t_{tur,i}, p_{tur,i}) \quad (3)$$

其中:  $p_{tur,i}$  为进口压力;  $p_{tur,o}$  为出口压力;  $s_{tur,i}$  为进口熵值;  $h_{tur,i}$  为进口焓值;  $h_{tur,os}$  为出口焓值。

(2) 实际的膨胀机出口焓值,可由如下公式计算求出:

$$h_{tur,s} = h_{tur,4} - (h_{tur,4} - h_{tur,os}) \cdot \eta_{tur} \quad (4)$$

其中,  $\eta_{tur}$  为等熵效率。

(3) 膨胀机的实际输出功,推得的数学公式可写为:

$$W_{tur} = m_l \cdot (h_{tur,i} - h_{tur,os}) \quad (5)$$

其中,  $m_l$  为循环工质流量。

(4) 膨胀机的不可逆损失,具体公式见如下:

$$I_{tur} = m_l \cdot (e_{tur,i} - e_{tur,o}) - W_{tur} \quad (6)$$

其中,  $e_{tur,i}$ ,  $e_{tur,o}$  分别为工质单位进、出口焓值。

### 2.2 建立冷凝器的数学模型

在有机朗肯循环发电系统中, 膨胀机出口的乏汽进入冷凝器后吸收 LNG 冷能, 冷凝为饱和液体。对此拟展开阐释论述如下。

(1) 冷凝器的出口焓值, 推得的公式见式(7):

$$h_{con,o} = f(p_{con,o}, q) \quad (7)$$

其中,  $p_{con,o}$  为工质的出口压力,  $q$  为工质的气相分率。

(2) 工质在冷凝器中的换热量, 可由如下公式来计算:

$$Q_{con} = m_l \cdot (h_{con,i} - h_{con,o}) \quad (8)$$

其中,  $h_{con,i}$  为冷凝器的进口焓值。

(3) 冷却循环工质所需 LNG 流量, 可由如下公式来计算:

$$m_{LNG} = \frac{Q_{con}}{h_{LNG,o} - h_{LNG,i}} \quad (9)$$

其中,  $h_{LNG,i}$ ,  $h_{LNG,o}$  分别为 LNG 的进、出口焓值。

(4) 冷凝器中不可逆损失, 推得的计算公式可写为:

$$I_{con} = m_{LNG} \cdot (e_{LNG,i} - e_{LNG,o}) - m_l \cdot (e_{con,o} - e_{con,i}) \quad (10)$$

其中,  $e_{LNG,i}$ ,  $e_{LNG,o}$  分别为 LNG 的单位进、出口焓值,  $e_{con,i}$ ,  $e_{con,o}$  分别为工质的单位进、出口焓值。

### 2.3 建立系统水泵的数学模型

在有机朗肯循环发电系统中, 饱和水进入水泵, 水泵将其送回锅炉, 将热能转换为机械能。拟给出分析表述如下。

(1) 水泵进口焓值为:

$$h_{p,i} = f(t_{p,i}, p_{p,i}) \quad (11)$$

其中,  $t_{p,i}$  为进口温度,  $p_{p,i}$  为进口压力。

(2) 水泵理想状态下出口焓值, 计算公式为:

$$h_{p,os} = f(p_{p,o}, s_p) \quad (12)$$

其中,  $p_{p,o}$  为出口压力,  $s_p$  为出口熵值。

(3) 水泵实际出口焓值, 计算公式为:

$$h_{p,o} = h_{p,i} + \frac{(h_{p,os} - h_{p,i})}{\eta_p} \quad (13)$$

其中,  $\eta_p$  为泵效率。

(4) 水泵实际压缩耗功, 可由如下公式计算确定:

$$W_p = m_l \cdot (h_{p,o} - h_{p,i}) \quad (14)$$

(5) 水泵不可逆损失, 可由如下公式计算确定:

$$I_p = W_p - m_l \cdot (e_{p,o} - e_{p,i}) \quad (15)$$

其中,  $e_{p,i}$ ,  $e_{p,o}$  分别为泵单位进、出口焓值。

### 2.4 建立系统锅炉的数学模型

在有机朗肯循环发电系统中, 工质通过循环泵加压输送至锅炉, 在锅炉中吸收低温热源(水)热能, 形成高压有机蒸汽。

锅炉的加热阶段如图 4 所示。图 4 中,  $t_1 - t_2$  为预热阶段,  $t_2 - t_3$  为蒸发阶段,  $t_3 - t_4$  为过热阶段, 水蒸气先变为饱和液体, 进而变为饱和蒸气, 最后变为过热蒸气。这里将给出探讨论述如下。

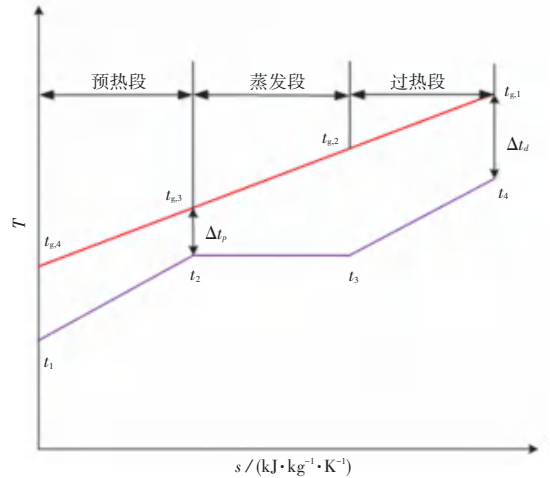


图 4 锅炉中流体换热过程

Fig. 4 Fluid heat transfer process in the boiler

(1) 热源(水)在预热段的进口温度, 得到的数学表示为:

$$t_{g,3} = t_2 + \Delta t_p \quad (16)$$

其中,  $\Delta t_p$  为夹点温差。

(2) 循环工质在过热段出口温度, 得到的数学表示为:

$$t_4 = t_{g,1} - \Delta t_d \quad (17)$$

其中,  $t_{g,1}$  为热源(水)在过热段的出口温度,  $\Delta t_d$  为接近点温差。

(3) 热源(水)在预热段出口焓值, 得到的数学表示为:

$$h_{g,3} = f(t_{g,3}, p_{g,3}) \quad (18)$$

其中,  $p_{g,3}$  为热源(水)在预热段的出口压力。

(4) 循环工质流量。根据能量守恒定律, 推得的计算公式为:

$$m_l = \frac{m_g \cdot (h_{g,1} - h_{g,3})}{h_4 - h_2} \quad (19)$$

其中,  $h_{g,1}$  为热源(水)在过热段的进口温度;  $h_4$  为工质的出口焓值;  $h_2$  为工质在预热段的出口焓值。

(5) 热源(水)在锅炉的出口焓值,推得的公式可写为:

$$h_{g,4} = h_{g,3} - \frac{m_l \cdot (h_2 - h_1)}{m_g} \quad (20)$$

其中,  $m_g$  为水的流量。

(6) 热源(水)在锅炉的出口温度,推得的公式可写为:

$$t_{g,4} = f(h_{g,4}, p_{g,4}) \quad (21)$$

其中,  $p_{g,4}$  为热源(水)在过热段的出口压力。

(7) 余热锅炉的换热量,推得的公式可写为:

$$Q_{SG} = m_l \cdot (h_4 - h_1) \quad (22)$$

(8) 余热锅炉的不可逆损失,数学公式具体如下:

$$I_{SG} = m_g \cdot (e_{g,1} - e_{g,4}) - m_l \cdot (e_4 - e_1) \quad (23)$$

其中,  $e_{g,1}, e_{g,4}$  分别为热源(水)在锅炉的单位进、出口焓值,  $e_1, e_4$  分别为工质在锅炉中的单位进、出口焓值。

基于热力学第二定律的有机朗肯循环发电系统的基本原理,建立了膨胀机、冷凝器、水泵、锅炉的数学模型。通过分析有机朗肯循环发电系统中不可避免的损失和工质及参数的优化,改善系统的性能、提高最大输出功。

## 3 工质的选择

### 3.1 工质简述

工质的选择一直都是低温 ORC 系统研究的重点。工质一般分为 2 类,即纯工质和混合工质。其中,纯工质就是在 ORC 系统中循环流动,通过自身状

态变化与外界发生能量交换,从而实现能量的转换;混合工质由 2 种及 2 种以上纯工质混合而成,具有较高的热效率。混合工质存在以下问题:热力学性质未知、传热机理未知、设备成本较高、组分迁移和分馏,且如果纯工质工作良好,则无需设计混合工质<sup>[4]</sup>。

本文研究的重点是回收液化天然气冷能的 ORC 系统纯工质选择,选择合适的工质对系统设计和系统研究具有重要意义。

### 3.2 工质的筛选

工质的候选体较多,有必要对其进行初步筛选,以减少搜索空间。工质应满足环境效应、热物理性能、化学稳定性等方面的要求<sup>[5]</sup>。

ORC 中工质需要具有如下特性:

(1) 工质不应具有臭氧消耗潜能 (ODP) 和低全球变暖潜能 (GWP)。

(2) 工质应能保持涡轮出口干燥。

(3) 无污染、无腐蚀性、无毒性、不可燃性、易得性和低成本。

R22 工质满足上述工质选择要求,本文将 R22 工质作为候选工质。

## 4 系统仿真结果与分析

通过 Matlab 仿真涡旋膨胀机有机朗肯循环发电系统,得到以 R22 为工质的最终优化结果,见表 1。得到 R22 作为循环工质时最优的各状态点参数,净输出功率可达 45.6%,利用 R22 用于有机朗肯循环发电系统是可行的。

表 1 以 R22 为工质的最终优化结果

Tab. 1 Final optimization results with R22 as working medium

状态点	温度/℃	压力/MPa	焓值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	熵值/(kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	焓值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	流量/(kg·s <sup>-1</sup> )
循环泵入口	-41.09	0.10	153.70	0.82	71.98	0.02
循环泵出口	-40.78	0.69	154.26	0.82	72.60	0.02
膨胀机入口	15.00	0.69	412.23	1.75	53.03	0.02
膨胀机出口	-41.09	0.10	382.43	1.80	6.83	0.02
蒸发器入口(热源)	25.00	0.35	105.15	0.37	0.25	0.18
蒸发器出口(热源)	19.23	0.35	81.04	0.29	0.49	0.18
冷凝器入口(LNG)	-162.00	0.10	-1.80	-0.02	1 085.08	0.01
冷凝器出口(LNG)	-161.64	0.10	510.56	4.58	227.48	0.01

## 5 结束语

本文基于热力学第二定律的有机朗肯循环发电系统的基本原理,建立了膨胀机、冷凝器、水泵、锅炉的数学模型;以 25 ℃ 环境水作为热源,以液化天然

气作为冷源,选用 R22 作为循环工质,对系统各个关键点(蒸发器进出口、冷凝器进出口、膨胀机进出口等)处的参数进行了优化,得到各点处最优的工作状态参数,从而使系统达到较高净输出功率。

(下转第 122 页)