

文章编号: 1671-6612 (2021) 02-157-05

组合式冷却能量回收系统控制策略研究

陈 薇 袁中原 袁艳平

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘 要】 组合式冷却能量回收系统中蒸发温度是决定系统净发电量的关键参数, 控制组合式冷却系统中 ORC (Organic Rankine Cycle, ORC) 冷却单元蒸发器的蒸发温度在波动的热源特性参数和环境参数下及时响应至最佳蒸发温度, 可有效提高低温热源所携带热量的余热回收效率。结合已经建立的 LSTM 神经网络模型和 BP 神经网络以及 RBF 神经网络, 提出了神经网络前向控制 PID 控制器反馈控制的控制策略, 分别建立单级 ORC 系统和双级 ORC 系统净输出功率最大时的最佳蒸发温度控制系统, 并在波动的热源特性和环境参数下分析蒸发温度的响应曲线。结果表明, 单级 ORC 组合式冷却系统和双级 ORC 组合式冷却系统最佳蒸发温度均在 10s 内响应稳定, 说明此种控制策略可行, 为后续工程应用提供了参考。

【关键词】 有机朗肯循环; 余热回收; 组合式冷却; 控制策略; PID 控制
中图分类号 TM617 文献标识码 A

Study of Control Strategy Based on Optimal Temperature to Generate Maximum Net Power

Chen Wei Yuan Zhongyuan Yuan Yanping

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Evaporation temperature of ORC cooling unit has been an inevitable parameter in generating maximum net power for cascade cooling system, and make evaporation temperature run at optimal temperature could improve the recovery efficiency of low-grade waste heat. In this paper, LSTM neural networks are trained to forecast the temperature and mass flow of waste heat, respectively. Feedforward neural networks are trained to predict the optimal evaporation temperature (OET) of simple cascade ORC cooling system and two-stage ORC cascade cooling system, respectively. PID controller is used to control the evaporation temperature running at OET. The results show that both simple ORC cascade cooling system and two-stage ORC cascade system respond to OET within 10 seconds, which indicates that the proposed strategy is reasonable and it can provide reference for engineering applications.

【Keywords】 ORC; waste heat recovery; cascade cooling; controlling strategies; PID controller

基金项目: 四川省科技计划项目: 基于分级冷却的工业余热高效能量回收系统 (2019YFG0327)
百叶遮阳“二次得热”的预测及控制研究 (2019-YF05-01326-SN)

作者简介: 陈 薇 (1996-), 女, 在读硕士研究生, Email: vchen@my.swjtu.edu.cn

通信作者: 袁中原 (1983.8-), 男, 博士, Email: zhongyuan.yuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2021-02-07

0 引言

在煤化工和石化等行业中, 通常需要将温度范围在 60℃~200℃之内的低温工艺流体冷却到工艺要求的温度。目前工业上采用的常规冷却方式

大多为水冷和空冷, 冷却过程中不仅需要消耗大量能量, 且浪费了低温流体的热量^[1,2], 为了解决此问题提出了组合式冷却能量回收系统。组合式冷却能量回收系统的主要组成部分为有机朗肯循环

(ORC) 冷却单元, 目前 ORC 系统提出的控制策略主要可分为离线优化控制和动态在线控制策略。控制技术主要包括常规控制、优化控制 (OC) 和模型预测控制 (MPC), 控制变量主要包括工质流量、蒸发温度、蒸发压力、蒸发器出口的过热度^[3]。

Quoilin 等^[4]基于 PI 控制提出了三种控制策略, 一是控制系统在给定的蒸发温度及过热度下运行, 二是控制系统在离线稳态模型下得到的最佳蒸发温度下运行, 三是控制系统在离线稳态模型下得到的工质泵和膨胀机转速下运行。控制响应结果表明, 采用第二种控制策略的系统性能最优。Ni 等^[5]基于 PID 控制器, 提出通过控制工质泵和膨胀机的转速从而控制蒸发器的蒸发压力和蒸发器出口的过热度保持系统恒定运行的控制策略。Wu 等^[6]提出通过控制工质泵转速、膨胀机转速和空冷器风机的转速使系统在给定的蒸发器蒸发压力、出口过热度和冷凝压力下运行的控制策略。Hernandez A 等^[7]基于 MPC 控制器提出控制泵和膨胀机的转速使系统在给定蒸发温度和过热度条件下运行的控制策略。

本文采用的控制策略为建立 LSTM 神经网络模型提前一个时间步长预测热源特性和冷凝温度, 通过神经网络优化器得到当前热源特性和冷凝温度下使得组合式冷却系统净输出功最大的最佳蒸发温度, 通过 PID 控制器控制蒸发器使得蒸发温度在最佳蒸发温度下运行, 最佳蒸发温度采用前馈控制策略, 神经网络作为前向控制器得不同热源特性下对应的最佳蒸发温度值, 蒸发器内最佳蒸发温度值和过热度由膨胀机及工质泵的转速控制, 运行过程中对抗干扰的控制策略采用 PID 反馈控制策略。

1 组合式冷却系统控制策略

1.1 单级 ORC 组合式系统控制策略

根据文献[8]的分析可知, 存在最佳蒸发温度 (OET) 使得单级 ORC 组合式系统净输出功最大, 针对单级 ORC 组合式冷却系统最佳蒸发温度的控制策略如图 1 所示。

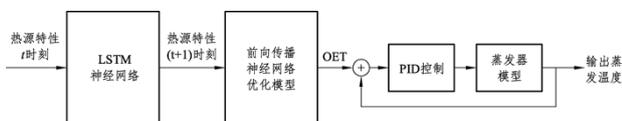


图 1 单级 ORC 组合式系统提前预测优化控制模型

Fig.1 Predictive optimal controlling strategy for simple ORC cascade cooling system

1.2 双级 ORC 组合式系统控制策略

同理, 存在最佳高级蒸发温度 (OET,h) 和低级蒸发温度 (OET,l) 使得双级 ORC 组合式系统的净输出功最大, 针对双级 ORC 组合式冷却系统两级最佳蒸发温度的控制策略如图 2 所示。

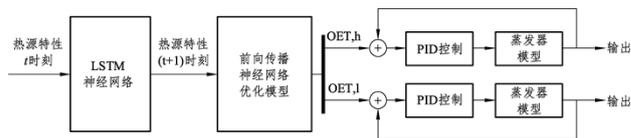


图 2 双级 ORC 组合式系统提前预测优化控制模型

Fig.2 Predictive optimal controlling strategy for two-stage ORC cascade cooling system

2 理论模型

2.1 蒸发器模型

2.1.1 蒸发器模型建模方法

组合式冷却系统的控制策略中, 换热器的时间延迟远远大于工质泵以及膨胀机, 所以主要控制目标为换热器^[9]。换热器控制方式主要有移动边界法和有限体积法, 移动边界法由于模型仅将换热过程分为预热段、蒸发段及过热段三个换热段, 并在三个换热单元运行集总法进行运算, 运算速度快。有限体积法虽然精度高, 每个换热段兼顾运算时间及运算精度最小划分单元为 20 段, 需求解共 240 个微分方程, 运算速度很慢^[3]。目前, 在控制应用中, 常采用的方法为移动边界法, 移动边界法的换热模型如图 3 所示。

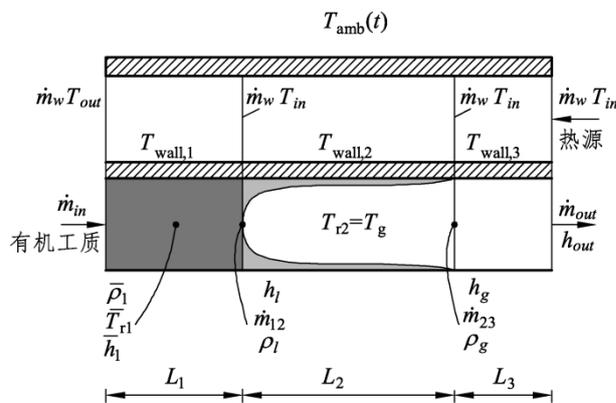


图 3 蒸发器移动边界分析法

Fig.3 Moving boundary evaporator model

2.1.2 微分控制方程

(1) 热源侧微分方程

忽略传热时的径向换热, 只考虑沿长度方向的

换热, 热源在换热器内换热不发生相变时, 认为换热前后密度变化可忽略, 换热前后质量守恒, 存在能量守恒方程如公式 (1)。

$$\rho_h A_{cross,h} C_{ph} \frac{\partial T_h}{\partial t} + C_{ph} \dot{m}_w \frac{\partial T_h}{\partial t} + Q_{conv,h} = 0 \quad (1)$$

(2) 工质侧换热微分方程

工质在换热过程中, 质量守恒及能量守恒方程如公式 (2)、(3)。

$$A_{cross,f} \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial \dot{m}_f}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$A_{cross,f} \frac{\partial \rho_f h_f}{\partial t} + \frac{\partial \dot{m}_f h_f}{\partial z} + \dot{Q}_{conv,f} = 0 \quad (3)$$

(3) 换热器壁面换热总微分方程

换热器壁面在换热过程中不存在质量变化, 只存在能量变化, 能量微分方程如公式 (4)。

$$\dot{Q}_{conv,f} + \dot{Q}_{conv,h} = M_{wall} \frac{\partial T_{wall}}{\partial t} \quad (4)$$

具体各换热段的微分方程由文献[10]可得, 依据动态微分方程建立的换热器的模型如图 4 所示。

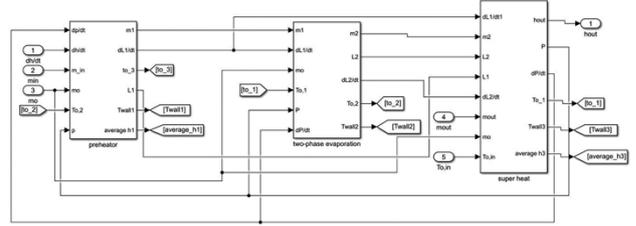


图 4 换热器动态模型

Fig.4 Dynamic model of evaporator

2.2 LSTM 神经网络模型

分别以热源温度和流量作为输出层, 以时序作为输入层建立两个 LSTM 神经网络用于提前预测热源的温度和流量, 训练所得模型参数如表 1 所示。根据文献[11]可知, 采用观测值更新网络的精度更高, 所以本文中的 LSTM 神经网络采用观测值更新网络。

表 1 LSTM 神经网络模型参数

Table 1 Hyperparameters of LSTM model

	学习速率	隐层神经元数目	Minibatch 大小	学习最大迭代次数	学习速率衰减步数
温度	0.01	200	128	1000	600
流量	0.01	300	128	1000	700

2.3 神经网络优化模块模型

单级 ORC 组合式冷却系统由于其结构简单, 采用 BP 神经网络就可以达到较好的预测精度, 单级 ORC 组合式系统最佳蒸发温度训练所得超参数如表 2 所示, 结构如图 5 所示。

表 2 单级 ORC 组合式系统神经网络超参数

Table 2 Hyperparameters of feedforward neural network for simple ORC cascade cooling system

学习速率	隐层数目	隐层神经元数目	训练函数	隐层激活函数	输出层激活函数
0.3	2	[25 25]	trainlm	tansig	purelin

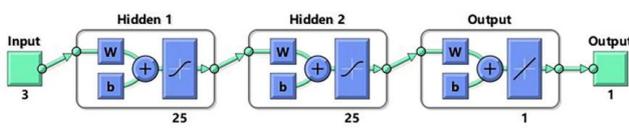


图 5 单级 ORC 组合式系统 BP 神经网络结构

Fig.5 Structure of BP neural network for simple ORC cascade cooling system

RBF 神经网络的训练时间最短, 且训练精度高, 本文采用 RBF 神经网络作为双级 ORC 组合式系统的优化器, RBF 训练超参如表 3 所示。RBF 神经网络的结构图如图 6 所示。

表 3 双级 ORC 组合式系统 RBF 训练超参数

Table 3 Hyperparameters of RBF neural network for two-stage ORC cascade cooling system

扩散速度	最小目标	神经元最大数目
22	10 ⁻³	100

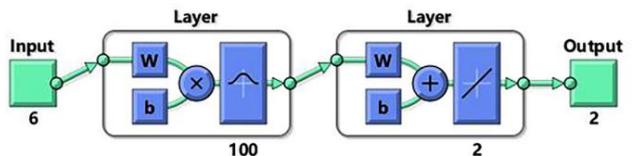


图 6 双级 ORC 组合式系统 RBF 神经网络结构

Fig.6 Structure of RBF neural network for two-stage ORC cascade cooling system

3 结果与讨论

3.1 单级 ORC 组合式系统

采用 Matlab 平台自带的 PID 控制器调试器多次调试，最终可得单级 ORC 组合式冷却系统蒸发器蒸发温度 PID 控制器的参数，如表 4 所示。给定外界条件每 50s 阶跃变化，传递延后时间为 1s，响应结果如图 7 所示。由图 7 可知，蒸发温度的响应基本在 10s 内达到稳定，说明单级 ORC 组合式系统采用此控制策略的 PID 控制器响应特性较好。

表 4 单级 ORC 组合式系统 PID 控制器参数

Table 4 Parameters of PID controller for simple ORC cascade cooling system

k_P	k_I	k_D
34.86	16.80	3.45

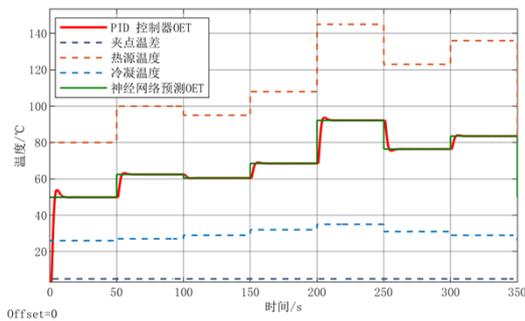


图 7 单级 ORC 组合式系统蒸发温度响应曲线

Fig.7 Evaporation temperature response curve of simple ORC cascade cooling system

3.2 双级 ORC 组合式系统

采用 Matlab 平台自带的 PID 控制器调试器多次调试，最终可得双级 ORC 组合式冷却系统高温级蒸发器和低温级蒸发器蒸发温度 PID 控制器的参数，如表 5 所示。给定外界条件每 30s 阶跃式变化，传递延后时间为 1s，最佳高温级蒸发温度和低温级蒸发温度响应结果如图 8 所示。由图 8 可知，最佳两级蒸发温度的响应基本在 10s 内达到稳定，说明双级 ORC 组合式系统采用此控制策略的 PID 控制器响应特性较好。

表 5 双级 ORC 组合式系统 PID 控制器参数

Table 5 Parameters of PID controller for two-stage ORC cascade cooling system

	k_P	k_I	k_D
高温级 PID 控制器	43.82	17.51	5.44
低温级 PID 控制器	49.05	17.55	7.84

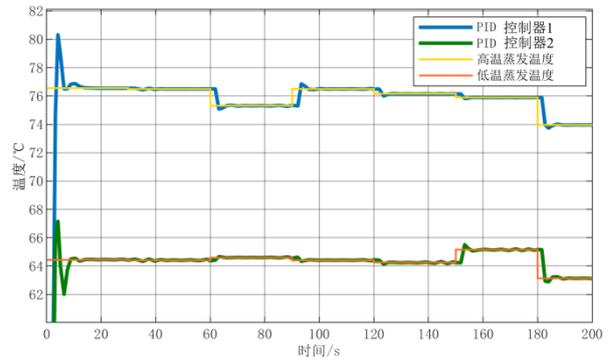


图 8 双级 ORC 组合式系统蒸发温度响应曲线

Fig.8 Evaporation temperature response curve of two-stage ORC cascade cooling system

4 结论

本文在建立的模型和提出的控制策略的基础上，随机给定外界条件的波动情况并得到相应控制策略下的响应曲线，得到以下结论：

(1)单级 ORC 组合式系统蒸发温度在提出的控制策略下，在 10s 内达到通过神经网络模型设定的最佳蒸发温度，可以得出结论，此种控制策略可以用于控制单级 ORC 组合式冷却系统以净输出功率最大时的蒸发温度。

(2)双级 ORC 组合式系统高温级蒸发温度和低温级蒸发温度在提出的控制策略下，在 10s 内都达到通过神经网络模型设定的最佳蒸发温度，可以得出结论，此种控制策略可以用于控制双级 ORC 组合式冷却系统以净输出功率最大时的蒸发温度。

(3)双级 ORC 组合式系统的响应曲线相较于单级 ORC 系统波动还是较大，是因为采用 Matlab 自带的 PID 参数调整器同时调整两个 PID 控制器的参数达到最优难度较大，后续可以考虑加入 BP 神经网络在线学习的方式，自动寻优找到 PID 控制器较优参数。

参考文献：

[1] 李赛赛, 李玉兰. 工业冷却循环水节能优化改造[J]. 节能, 2018, 37(3): 57-58.

- [2] LI X, DUNIAM S, GURGENCI H, et al. Full scale experimental study of a small natural draft dry cooling tower for concentrating solar thermal power plant[J]. *Applied Energy*, 2017,193:15–27.
- [3] IMRAN M, PILI R, USMAN M, et al. Dynamic modeling and control strategies of organic Rankine cycle systems: Methods and challenges[J]. *Applied Energy*, 2020,276:115537.
- [4] QUOILIN S, AUMANN R, GRILL A, et al. Dynamic modeling and optimal control strategy of waste heat recovery Organic Rankine Cycles[J]. *Applied Energy*, 2011,88(6):2183–2190.
- [5] NI J, ZHAO L, ZHANG Z, et al. Dynamic performance investigation of organic Rankine cycle driven by solar energy under cloudy condition[J]. *Energy*, 2018,147:122–141.
- [6] WU X, XIE L, CHEN J, et al. An Optimal Control Design of Organic Ranking Cycle Under Disturbances[C]. 2018 37th Chinese Control Conference (CCC), 2018:3475–3480.
- [7] HERNANDEZ A, DESIDERI A, IONESCU C, et al. Increasing the efficiency of Organic Rankine Cycle Technology by means of Multivariable Predictive Control[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014,47(3): 2195–2200.
- [8] 陈薇,袁中原.基于神经网络预测 ORC 系统的最佳蒸发温度[J].*制冷与空调*,2020,34(2):262–267.
- [9] QUIOLIN S. Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications[D]. university of liege, 2011.
- [10] DEUTSCHES M O, ELMQVIST H, AB D, et al. Moving Boundary Models for Dynamic Simulations of Two-Phase Flows[C]. *Proc of the Int Modelica Conference*, 2002.
- [11] 陈薇,袁中原,高波.基于 LSTM 神经网络预测低温热源动态特性[J].*制冷与空调*,2020,34(6):670–675.