

6-5-2020

Multiple Model Predictive Control of Waste Heat Recovery Systems based on Organic Rankine Cycle

Han Pu

Hebei Engineering Research Center of Simulation & Optimized Control for Power Generation (North China Electric Power University), Baoding 071003, China;

Ting Zhang

Hebei Engineering Research Center of Simulation & Optimized Control for Power Generation (North China Electric Power University), Baoding 071003, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multiple Model Predictive Control of Waste Heat Recovery Systems based on Organic Rankine Cycle

Abstract

Abstract: *A multiple model predictive control strategy based on offline linear model is proposed for controlling the ORC-based WHRSs (waste heat recovery systems). The proposed control strategy is described for a wide operation region of the ORC system. A switching mechanism considering both instant output errors of each model and error accumulation is applied for the switch of local controllers in different operation regimes.* Simulation results demonstrate that the proposed method can effectively regulate the evaporating pressure and the superheating temperature for the ORC-based WHRS throughout a wide operation region.

Keywords

ORC, waste heat recovery system, wide operation region, multiple model predictive control

Recommended Citation

Han Pu, Zhang Ting. Multiple Model Predictive Control of Waste Heat Recovery Systems based on Organic Rankine Cycle[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(11): 2811-2819.

有机朗肯循环余热利用系统的多模型预测控制

韩璞, 张婷

(华北电力大学 河北省发电过程仿真与优化控制工程技术研究中心, 保定 071003)

摘要: 针对有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, ORC)余热利用系统大范围运行工况(膨胀机转矩 $F_{exp} \in [20, 35] N \cdot m$, 工质泵转速 $R_{pp} \in [300, 550] r/min$)的控制问题, 提出基于线性离线多模型的多模型预测控制策略。对 ORC 实际运行过程中的不同工况进行基于离线线性模型的预测控制器设计。综合考虑当前时刻系统输出残差与输出残差累积值, 设计切换策略, 对不同运行工况下的子控制器进行切换。设计仿真实验对该算法在大范围运行工况的 ORC 系统上的控制效果进行验证。结果表明, 多模型预测控制能够适用于大范围运行工况的 ORC 系统, 并取得良好的控制效果。

关键词: 有机朗肯循环; 余热利用系统; 大范围工况; 多模型预测控制

中图分类号: TP13

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 11-2811-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201711030

Multiple Model Predictive Control of Waste Heat Recovery Systems based on Organic Rankine Cycle

Han Pu, Zhang Ting

(Hebei Engineering Research Center of Simulation & Optimized Control for Power Generation (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: A multiple model predictive control strategy based on offline linear model is proposed for controlling the ORC-based WHRSs (waste heat recovery systems). The proposed control strategy is described for a wide operation region of the ORC system. A switching mechanism considering both instant output errors of each model and error accumulation is applied for the switch of local controllers in different operation regimes. Simulation results demonstrate that the proposed method can effectively regulate the evaporating pressure and the superheating temperature for the ORC-based WHRS throughout a wide operation region.

Keywords: ORC; waste heat recovery system; wide operation region; multiple model predictive control

引言

经济的发展带来能源的急剧消耗, 日益紧张的能源局面促使了对工业废热回收以及新能源开发利用的关注。工业废热和新能源二者的一个共同点

是大部分可供使用的热能均为温度低于 250 °C 的低品位热能^[1]。文献[1-2]表明, 低品位热能占世界产生热能的 50%以上。因此, 对低品位热能的利用是世界范围内关注的热点。有机朗肯循环系统被认为是实现低品位热能与机械能之间转换的有效途径^[3]。有机朗肯循环是以低沸点有机物为工质的朗肯循环, 与传统的水蒸汽朗肯循环相比, 它对于中低品位热源有更高的回收效率。已有文献对 ORC 系统的研究包括很多方面: 工质的筛选^[4-5]、



收稿日期: 2017-01-06 修回日期: 2017-02-19;
基金项目: 国家自然科学基金(61773160), 中央高校基本科研业务费专项资金(2014XS45);
作者简介: 韩璞(1959-2017), 男, 河北, 本科, 教授, 博导, 研究方向为智能控制理论及应用, 网络化控制技术与系统, 火电站节能减排优化运行技术等。

<http://www.china-simulation.com>

• 2811 •

膨胀机的选择^[6]、系统特性分析^[7]、系统优化^[8]、系统控制^[9-15]、经济性和市场分析^[16]等。其中, ORC 系统的优化控制在系统的安全稳定运行方面具有十分重要的作用。已有不少学者对 ORC 控制系统表现出极大的兴趣。张建华等^[8]采用基于遗传算法的最小二乘支持向量机对 ORC 系统的蒸发压力和蒸发器出口温度的设定值进行优化。当余热源的质量流量和温度发生变化时,通过寻求系统的最优或者次优工况,提高 ORC 系统的能量转换效率。该工作为 ORC 余热利用过程的优化控制提供指导。在控制策略上,传统的 PID 控制最先被考虑应用于 ORC 系统^[13-15]。Sylvain Quoilin 等^[15]设计了两个 PI 控制器利用膨胀机转速和工质泵转速分别对蒸发温度和过热度进行控制。F. Padula 等^[14]采用自适应 PI 控制策略对一个 ORC 电厂的涡轮机转速进行控制。Johan Peralez 等^[13]将动态前馈与增益调度 PID 相结合,对 ORC 系统的过热度进行控制。以上所提及的 PID 类控制算法的优势是其结构简单,易于在 DCS(Distributed Control System)或者 PLC (Programming Logic Controller)上实现。然而,对于系统中出现的多变量、耦合、非线性、工况变化以及外部扰动等情况,可能会出现控制性能下降,导致控制效果不尽如人意。

Jianhua Zhang 等^[10,12]采用了多变量预测控制策略分别对跟踪用电负荷方式^[12]和跟踪余热源方式^[10]下的 ORC 系统进行控制。Marco Crialesi Esposito 等^[9]基于非线性物理模型设计了非线性预测控制器对 ORC 系统进行控制。Guolian Hou 等^[11]设计了多变量最小方差控制器对 ORC 系统中来自于热源的随机扰动进行处理。鉴于 ORC 系统本身的非线性、耦合性、多变量等特征,其非线性建模非常困难和复杂,给基于非线性模型的控制设计增加了难度。预测控制和最小方差控制以线性模型为基础,线性模型比较简单,然而线性时不变模型却只能在其建模工况附近适用,当工况点发生变化时,为了取得好的控制效果,需要对模型进行在线辨识,对控制器参数进行在线优化,这不仅给系统

的实时处理能力增加了负担还给控制器的设计增加了难度。

如何设计一个相对简单且能适用于 ORC 系统大范围运行工况的控制器成为一个需要解决的问题。多模型预测控制(Multiple Model Predictive Control, MMPC)对复杂的多变量非线性系统有很好的控制效果,且能满足多样化的控制要求^[17]。本文采用多模型预测控制策略对 ORC 系统大范围运行工况问题进行解决。针对 ORC 系统不同运行工况进行基于离线线性子模型的预测控制器设计,综合考虑当前时刻模型输出残差和输出残差的累计值,设计切换准则,当 ORC 系统运行于不同工况时,进行相应控制器的切换。如此,实现对 ORC 大范围运行工况的控制。

1 ORC 系统及控制方案设计

1.1 ORC 系统

基本 ORC 系统(如图 1 所示)主要由蒸发器、膨胀机、冷凝器、储液罐、工质泵及其辅助设备组成。整个循环过程如下:储液罐中的有机工质经工质泵加压进入蒸发器,在蒸发器内有机工质与低温热源完成热交换,变成过热蒸汽。过热蒸汽进入膨胀机做功,做功之后的乏汽进入冷凝器被冷却成液态,最后回到储液罐,完成一次循环。

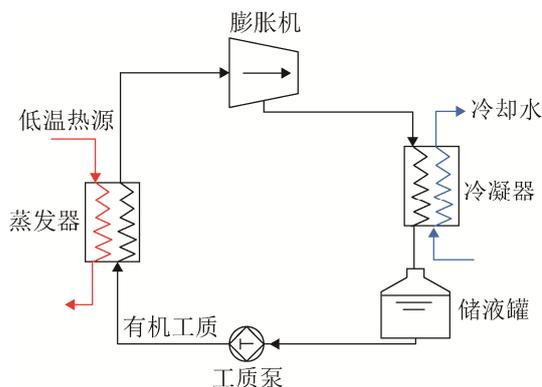


图 1 基本有机朗肯循环系统图

Fig. 1 Schematic diagram of a basic ORC system

实际的 ORC 系统要复杂的多。图 2 为本文 ORC 试验台系统设计图,该试验台主要由工质回

路、热源回路、冷却水回路、润滑油回路以及交流测功单元组成。本试验平台占地约 $5 \times 3 \text{ m}^2$, 系统的有机工质选择 R123, 以导热油模拟低温热源, 以水冷方式对有机工质进行冷却。

有机工质回路主要由工质泵、蒸发器、膨胀机、冷凝器、储液罐等主要设备以及一些辅助和测量设备组成。

热源回路中由一个可提供 100 kW 加热功率的导热油锅炉对导热油进行加热, 该锅炉的控制精度为 $1 \text{ }^\circ\text{C}$, 通过该锅炉为系统提供稳定低温热源。回路中安装一个轴流泵保证导热油在锅炉和蒸发器之间的循环。

冷却水回路中通过冷却水对膨胀机排汽进行冷却, 由循环水泵保证冷却水的循环, 在室外安装闭式喷淋冷却塔, 带走系统多余热量。润滑油主要用于膨胀机的润滑、密封和冷却, 通过润滑油泵保证循环, 通过膨胀机出口处的油气分离器完成与有机工质的分离。交流测功单元主要由变频器、交流电机、转速转矩测试仪、监控测量软件以及相应的传感器、机械传动装置组成, 可以完成对膨胀机转速和转矩的实时测量和控制, 并可以实时监测工质泵的实际消耗功率, 实时计算膨胀机的输出功。

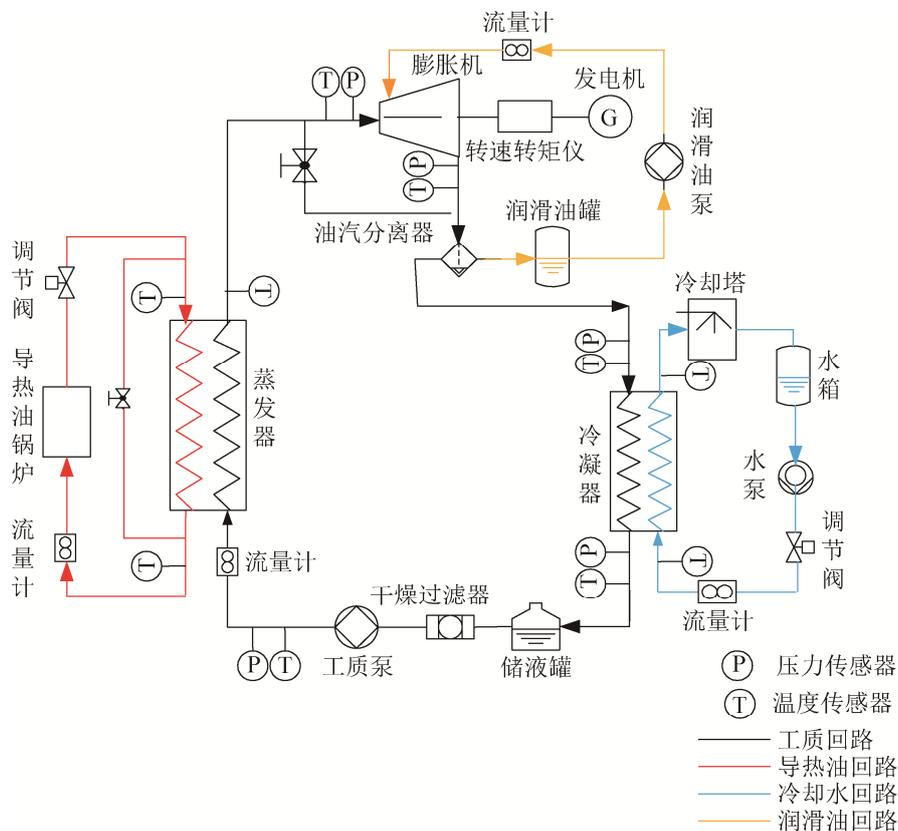


图 2 ORC 系统设计图
Fig. 2 Design of the ORC test bench

1.2 控制方案设计

蒸发压力、过热度 and 冷凝压力是 ORC 系统至关重要的参数。其中, 冷凝压力可以通过冷却水回路中对冷却水质量流量的调节进行单回路控制。本文主要研究工作在大范围工况下的 ORC 系统的蒸

发压力和过热度的控制。选择什么样的控制变量或者过程变量来对工况进行表征, 很大程度上依赖于这些变量对于系统非线性特性的影响程度以及获得它的难易程度。对于一个冷热源基本稳定的 ORC 余热利用试验系统, 由于具体设备参数已经

确定,系统运行过程中,各个环节的温度和压力是相互影响的,并且与外部环境因素紧密相关。此时,系统的运行状态主要受两方面的影响:工质流量和外部负载(膨胀机转矩或者输出功率)^[1]。而工质流量主要是通过工质泵的转速进行调节。所以,亦可以说,在固定冷热源的情况下,系统的运行状态主要受膨胀机转矩和工质泵转速的影响。综上,本文选择膨胀机转矩 F_{exp} 和工质泵转速 R_{pp} 对系统工况进行表征。系统的工况范围为 $F_{exp} \in [20,35]$ N·m, $R_{pp} \in [300,550]$ r/min。

一个有效的 ORC 控制系统需要满足以下几个方面:

(1) ORC 系统运行过程中,过热度应该保持在一个合适的值;

(2) ORC 运行过程中,蒸发压力能够在合适的范围进行变化;

(3) 系统运行工况发生变化时,ORC 系统仍然能够保持良好的跟踪蒸发压力和过热度设定值的能力;

(4) ORC 系统运行过程中,控制变量保持在其物理上下限之内,以保证系统安全运行。

为了满足 ORC 系统的控制要求,本文选择二自由度变量膨胀机转矩 F_{exp} 和工质泵转速 R_{pp} 对蒸发压力 P_{ev} 和过热度 T_{sh} 进行控制。

为了解决 ORC 系统大范围运行工况和变量约束问题,并获得满意的控制效果,本文选择多模型预测控制策略对 ORC 系统进行控制。

2 多模型预测控制系统设计

ORC 系统的多模型预测控制结构框图如图 3 所示,该多模型预测控制器主要由局部子模型、局部控制器以及切换器组成。

2.1 局部子模型的获取

ORC 系统的运行工况被划分为 N 个子空间。在每个子空间内,ORC 系统的特性可以用一个 CARIMA (Controlled Auto-regressive Integrated

Moving Average)模型来描述。选择带有遗忘因子的递推最小二乘算法对 ORC 试验台的输入输出数据进行辨识,得到各个子空间的 CARIMA 模型。

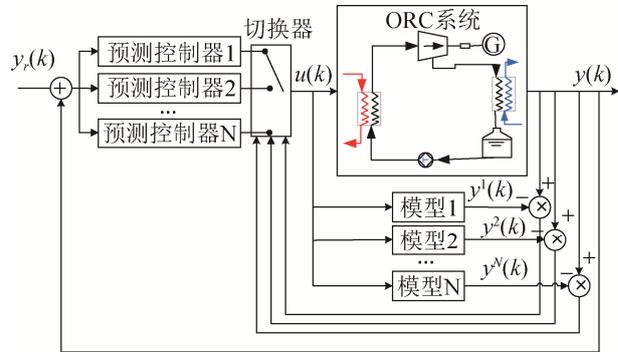


图3 ORC 系统多模型预测控制结构图

Fig. 3 Control diagram of the MMPC strategy for an ORC system

第 j ($j=1,2,\dots,N$) 个子空间的 CARIMA 模型如下:

$$A^j(z^{-1})y(k) = z^{-d}B^j(z^{-1})u(k-1) + \frac{C^j(z^{-1})}{\Delta}\xi(k) \quad (1)$$

式中, $\Delta=1-z^{-1}$ 是差分因子, d 为 ORC 系统的纯迟延。ORC 系统的输出和输入变量分别为 $y=[y_1 y_2]^T=[P_{ev} T_{sh}]^T$, $u=[u_1 u_2]^T=[F_{exp} R_{pp}]^T$ 。 $\xi(k)$ 表示系统的噪声向量, $A^j(z^{-1})$, $B^j(z^{-1})$ 和 $C^j(z^{-1})$ 为 z^{-1} 的多项式, 表示如下:

$$A^j(z^{-1}) = I + A_{1a}^j z^{-1} + A_{2a}^j z^{-2} + \dots + A_{n_a}^j z^{-n_a}$$

$$B^j(z^{-1}) = B_{0b}^j + B_{1b}^j z^{-1} + B_{2b}^j z^{-2} + \dots + B_{n_b}^j z^{-n_b}$$

$$C^j(z^{-1}) = C_{0c}^j + C_{1c}^j z^{-1} + C_{2c}^j z^{-2} + \dots + C_{n_c}^j z^{-n_c}$$

将式(1)两边同时乘以 Δ , 得到:

$$\begin{aligned} \Delta y(k) = & -A_{1a}^j \Delta y(k-1) - \dots - A_{n_a}^j \Delta y(k-n_a) + \\ & B_{0b}^j \Delta u(k-d-1) + \dots + \\ & B_{n_b}^j \Delta u(k-d-n_b-1) + C_{0c}^j \xi(k) + \dots + \\ & C_{n_c}^j \xi(k-n_c) = \varphi^T(k) \theta^j + C_{0c}^j \xi(k) \quad (2) \end{aligned}$$

式中: $\varphi^T(k)=[-\Delta y(k-1), \dots, -\Delta y(k-n_a),$

$$\Delta u(k-d-1), \dots, \Delta u(k-d-n_b-1), \xi(k-1), \dots, \xi(k-n_c)] \quad (3)$$

θ^j 是模型的参数向量, 它的估计值可以表示如下:

$$\hat{\theta}^j = [A_1^j, A_2^j, \dots, A_{n_a}^j, B_0^j, B_1^j, \dots, B_{n_b}^j, C_1^j, C_2^j, \dots, C_{n_c}^j] \quad (4)$$

采用带有遗忘因子的递推最小二乘算法对 θ^j 进行辨识:

$$\begin{cases} \hat{\theta}^j(k) = \hat{\theta}^j(k-1) + K(k)(\Delta y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}^j(k-1)) \\ K(k) = H(k-1)\varphi(k)[\beta + \varphi^T(k)H(k-1)\varphi(k)]^{-1} \\ H(k) = \frac{1}{\beta}(I - K(k)\varphi^T(k))H(k-1) \end{cases} \quad (5)$$

式中, β 为遗忘因子, $K(k)$ 和 $H(k)$ 分别为方差的增益矩阵和估计矩阵。

2.2 局部预测控制器的设计

根据第 j ($j=1,2,\dots,N$) 个子空间的 CARIMA 模型设计其对应的预测控制器。式(1)方程两边同时乘以 Δ , 得到:

$$A^j(z^{-1})\Delta y(k) = z^{-d}B^j(z^{-1})\Delta u(k-1) + C^j(z^{-1})\xi(k) \quad (6)$$

模型预测控制通过对目标函数的优化得到其最优控制量。目标函数为:

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \|\hat{y}(k+i) - y_r(k+i)\|_{Y_y}^2 + \sum_{i=1}^{N_c} \|\Delta u(k+i-1)\|_{Y_u}^2 \quad (7)$$

式中: $\hat{y}(k+i)$ 是系统的 i 步预测输出; $y_r(k+i)$ 是系统的参考输出; 控制输入为 $\Delta u(k+i-1) = u(k+i-1) - u(k+i-2)$ 。 N_p 和 N_c 分别为预测时域和控制时域。认为, 控制变量在 N_c 步之后保持不变, 即当 $i \geq N_c$ 时, $u(k+i-1) = u(k+N_c-1)$, 即 $\Delta u(k+i) = 0$ 。定义加权项 $\|q\|_{\Lambda}^2 \stackrel{def}{=} q^T \Lambda q$ 。

权重矩阵定义为:

$$Y_u = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2), Y_y = \text{diag}(\beta_1, \beta_2) \quad (8)$$

一个真实的 ORC 控制系统, 其控制作用会受到执行机构的限制, 被调量也不能超出物理上下限。因此, 设计控制器时, 应将控制量和被调量的约束考虑在内。

$$\begin{cases} \underline{u}_i \leq u_i(k) \leq \bar{u}_i \\ |\Delta u_i(k)| \leq \Delta \bar{u}_i \quad i=1,2 \\ \underline{y}_i \leq y_i(k) \leq \bar{y}_i \end{cases} \quad (9)$$

式中: \underline{u}_i 和 \bar{u}_i 分别为第 i 个控制量的下限和上限; $\Delta \bar{u}_i$ 是第 i 个控制量在一步内所能改变的最大幅

度; \underline{y}_i 和 \bar{y}_i 分别是第 i 个被调量的下限和上限。

利用丢番图方程:

$$I = E_i(z^{-1})A^j(z^{-1})\Delta + z^{-i}F_i(z^{-1}) \quad (10)$$

式中, $E_i(z^{-1})$ 和 $F_i(z^{-1})$ 分别是阶次为 $i-1$ 和 n_a 的 z^{-1} 的多项式。

将式(6)乘以 $E_i(z^{-1})z^i$, 得到:

$$\begin{aligned} A^j(z^{-1})E_i(z^{-1})\Delta y(k+i) = \\ B^j(z^{-1})E_i(z^{-1})\Delta u(k-d+i-1) + \\ C^j(z^{-1})E_i(z^{-1})\xi(k+i) \end{aligned} \quad (11)$$

将式(10)带入式(11), 得到:

$$\begin{aligned} y(k+i) = F_i(z^{-1})y(k) + \\ E_i(z^{-1})B^j(z^{-1})\Delta u(k-d+i-1) + \\ E_i(z^{-1})C^j(z^{-1})\xi(k+i) \end{aligned} \quad (12)$$

预测输出为:

$$\hat{y}(k+i) = F_i(z^{-1})y(k) + E_i(z^{-1})B^j(z^{-1})\Delta u(k-d+i-1) \quad (13)$$

令 $E_i(z^{-1})B^j(z^{-1}) = G_i(z^{-1}) + z^{-i}G_{ip}(z^{-1})$,

$f_i(k) = G_{ip}(z^{-1})\Delta u(k-d-1) + F_i(z^{-1})y(k)$, 式(13)

变形为:

$$\hat{y}(k+i) = G_i(z^{-1})\Delta u(k-d+i-1) + f_i(k) \quad (14)$$

将式(14)所表示的系统 i 步预测输出写成矩阵形式:

$$\hat{Y} = G\Delta U + f \quad (15)$$

式中:

$$\hat{Y} = \begin{bmatrix} y(k+1) \\ y(k+2) \\ \dots \\ y(k+N_p) \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} G_0 & 0 & \dots & 0 \\ G_1 & G_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ G_{N_p-1} & \dots & G_1 & G_0 \end{bmatrix},$$

$$\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta u(k-d) \\ \Delta u(k-d+1) \\ \dots \\ \Delta u(k-d+N_c-1) \end{bmatrix}, f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_{N_p} \end{bmatrix}.$$

将式(15)代入目标函数(7), 得到:

$$J = \frac{1}{2}\Delta U^T R \Delta U + 2Q\Delta U + C_0 \quad (16)$$

式中: $R = 2(G^T Y_y G + Y_u)$, $Q = (f - y_r)^T Y_y G$,

$C_0 = (f - y_r)^T Y_y (f - y_r)$ 。

将不等式组(9)表示为:

$$L\Delta U \leq M \quad (17)$$

式中:

$$L = \begin{bmatrix} I_1 \\ S \\ -S \\ G \\ -G \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} I_1 \Delta \bar{U} \\ S_2 \bar{U} - S_2 u(k-1) \\ -S_2 \underline{U} + S_2 u(k-1) \\ S_3 \bar{Y} - S_3 f \\ -S_3 \underline{Y} + S_3 f \end{bmatrix},$$

$$I_1 = S_2 = \text{diag}(I', I'), \quad I' = I_{N_c \times N_c},$$

$$S = \text{diag}(I_2, I_2), \quad I_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{N_c \times N_c},$$

$$S_3 = \text{diag}(I_3, I_3), \quad I_3 = I_{N_p \times N_p},$$

$$\Delta \bar{U} = \text{diag}(\Delta \bar{U}_1, \Delta \bar{U}_2), \quad \Delta \bar{U}_1 = \Delta \bar{u}_1 I',$$

$$\Delta \bar{U}_2 = \Delta \bar{u}_2 I', \quad \bar{U} = \text{diag}(\bar{U}_1, \bar{U}_2), \quad \bar{U}_1 = \bar{u}_1 I',$$

$$\bar{U}_2 = \bar{u}_2 I', \quad \underline{U} = \text{diag}(\underline{U}_1, \underline{U}_2), \quad \underline{U}_1 = \underline{u}_1 I',$$

$$\underline{U}_2 = \underline{u}_2 I', \quad \bar{Y} = \text{diag}(\bar{Y}_1, \bar{Y}_2), \quad \bar{Y}_1 = \bar{y}_1 I_3, \quad \bar{Y}_2 = \bar{y}_2 I_3,$$

$$\underline{Y} = \text{diag}(\underline{Y}_1, \underline{Y}_2), \quad \underline{Y}_1 = \underline{y}_1 I_3, \quad \underline{Y}_2 = \underline{y}_2 I_3.$$

因此, 第 j 个局部预测控制器的输出可以通过求解下列标准二次规划问题得到:

$$\begin{aligned} J_{\min} &= \frac{1}{2} \Delta U^T R \Delta U + 2Q \Delta U + C_0 \\ \text{s.t. } &L \Delta U \leq M \end{aligned} \quad (18)$$

2.3 切换机制

切换机制决定每一时刻采用哪个子控制器的输出对 ORC 系统进行控制。本文设计一个切换性能指标, 每一时刻对各个子模型的切换性能指标进行计算, 将控制器切换到性能指标最小值所对应的子控制器。切换性能指标的设计从输出残差的角度考虑, 综合考虑每一时刻各个子模型的输出残差和从上一次切换发生开始的残差累计。本文多模型预测控制切换算法如下:

(1) 计算 k 时刻各局部子模型的残差性能指标。

设 k 时刻 ORC 系统输出为 $y(k)$, 第 j ($j=1, 2, \dots, N$) 个子模型的输出为 $y^j(k)$, 定义输出残差为 $\varepsilon^j(k) = y(k) - y^j(k)$ 。定义第 j 个子模型的残差性能指标:

$$O^j(k) = \lambda_1 (\varepsilon^j(k))^2 + \lambda_2 \sum_{i=k_0}^k \rho^{i-k_0} (\varepsilon^j(k))^2 \quad (19)$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2, \rho$ 为可调参数, 其中, $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0, \rho \in [0, 1], k_0$ 是切换到第 j 个子模型的时刻。

(2) 计算 k 时刻切换变量的值。

定义切换变量 $SW^j(k)$:

$$SW^j(k) = H(\min_{j \in [1, N]} (O^{jj}(k)) - O^j(k)) \quad (20)$$

式中: $H(x)$ 是 Heaviside 单位阶跃函数, 定义如下:

$$H(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (21)$$

(3) 若切换变量 $SW^j(k) = 1$, 则将控制器切换到第 j 个子控制器, 将第 j 个子控制器的输出作为多模型预测控制器的输出对 ORC 系统进行控制。

3 实验与仿真

本文中建模数据来自前文所介绍的实验平台。该实验是在冷热源基本保持稳定的情况下进行的, 导热油锅炉出口导热油温度为 150°C , 质量流量约为 2020 kg/h 。冷凝器入口处冷却水温度约为 17°C , 质量流量为 2620 kg/h 。

ORC 多模型预测控制系统参数设置如下: 采样时间 $T_s = 2 \text{ s}$, 各局部子控制器的参数设置如下:

控制器 1: $N_p = 60, N_c = 30$,

$$\Upsilon_u = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}, \quad \Upsilon_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}.$$

控制器 2: $N_p = 60, N_c = 10$,

$$\Upsilon_u = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}, \quad \Upsilon_y = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 8 \end{bmatrix}.$$

控制器 3: $N_p = 50, N_c = 30$,

$$\Upsilon_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \Upsilon_y = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}.$$

施加在膨胀机转矩 F_{exp} 和工质泵转速 R_{pp} 上的约束如下: $20 \leq F_{exp} \leq 35 \text{ N}\cdot\text{m}$, $300 \leq R_{pp} \leq 550 \text{ r/min}$; $|\Delta F_{exp}| \leq 5 \text{ N}\cdot\text{m}$, $|\Delta R_{pp}| \leq 50 \text{ r/min}$ 。

ORC 系统运行过程中, 各子工况的划分如表 1 所示。

表 1 ORC 系统运行工况划分
Tab. 1 Operation regions of the ORC system

工况	F_{exp} (N·m)	R_{pp} (r/min)
1	$28 \leq F_{exp} \leq 34$	$300 \leq R_{pp} < 370$
2	$24 \leq F_{exp} < 28$	$370 \leq R_{pp} < 420$
3	$20 \leq F_{exp} < 24$	$420 \leq R_{pp} \leq 540$

ORC 系统运行过程中, 期望过热度保持在 20 °C。通过增大和减小蒸发压力期望值的实验, 展现 ORC 系统运行工况的变化, 验证本文所提算法的有效性。并且为了验证本文算法的优势, 将该算法与传统的 PID 控制进行对比分析。通过 MATLAB 软件的 NCD 工具箱对蒸发压力和过热度控制回路的 PI 控制器进行参数优化, 优化结果分别为:

$$G_{PI1}(s) = 0.0178(1 + \frac{0.0183}{s}),$$

$$G_{PI2}(s) = 0.156(1 + \frac{0.00767}{s}).$$

(1) 蒸发压力升高

ORC 系统稳定运行于工况 1, 此时, $P_{ev} = 750$ kPa, $T_{sh} = 20$ °C, $F_{exp} = 28$ N·m, $R_{pp} = 350$ r/min。在 $t = 50$ s 时, 蒸发压力设定值从 750 kPa 升高至 920 kPa, 过热度保持不变。MMPC 和 PID 控制下蒸发压力和过热度的响应曲线如图 4 所示。

由图 4 可知, MMPC 与 PID 控制都能取得比较好的控制效果。但是, 与 PID 控制相比, MMPC 控制下蒸发压力能够更快速地跟踪期望值的变化, 且超调量较小。由于蒸发压力扰动, 过热度发生波动。与 PID 相比, MMPC 控制下, 过热度波动幅值较小, 且在一个较短的时间回到稳定值。

MMPC 控制下, 膨胀机转矩和工质泵转速的变化如图 5 所示。蒸发压力从 750 kPa 升高至 920 kPa, 膨胀机转矩从 28 N·m 降为 23 N·m, 工质泵转速从 350 r/min 增加到 450 r/min, ORC 系统从工况 1 变迁到工况 3。

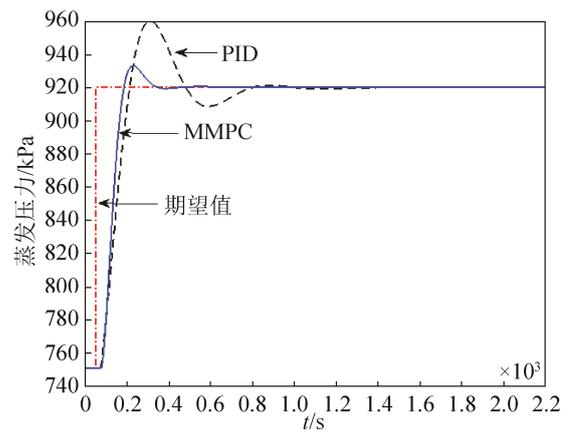
(2) 蒸发压力下降

ORC 系统稳定运行于工况 3, 此时,

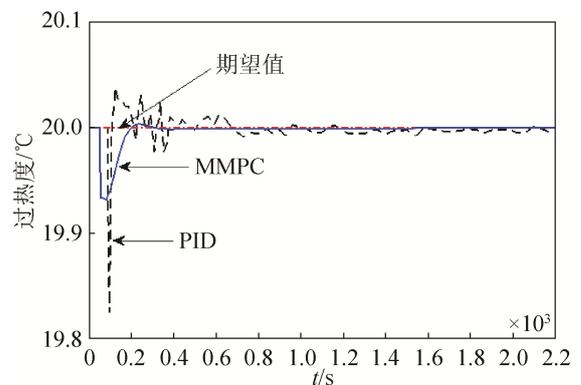
$P_{ev} = 940$ kPa, $T_{sh} = 20$ °C, $F_{exp} = 23$ N·m, $R_{pp} = 460$ r/min。在 $t = 50$ s 时, 蒸发压力期望值从 940 kPa 下降至 840 kPa, 过热度保持不变。MMPC 和 PID 控制下蒸发压力和过热度的响应曲线如图 6 所示。

由图 6 可知, MMPC 与 PID 都能取得比较好的控制效果。但是, 与 PID 控制相比, MMPC 控制下蒸发压力的调节更快速、超调量更小。过热度在蒸发压力扰动的情况下, 波动幅值更小, 能够更快地回到稳定值。

MMPC 控制下, 膨胀机转矩和工质泵转速的变化如图 7 所示。蒸发压力从 940 kPa 下降至 840 kPa 时, 膨胀机转矩从 23 N·m 增加至 25.5 N·m, 工质泵转速从 460 r/min 下降到 410 r/min, ORC 系统从工况 3 变迁到工况 2。



(a) 蒸发压力响应曲线



(b) 过热度响应曲线

图 4 蒸发压力和过热度的响应曲线
Fig. 4 Response curves of the evaporating pressure and superheating temperature

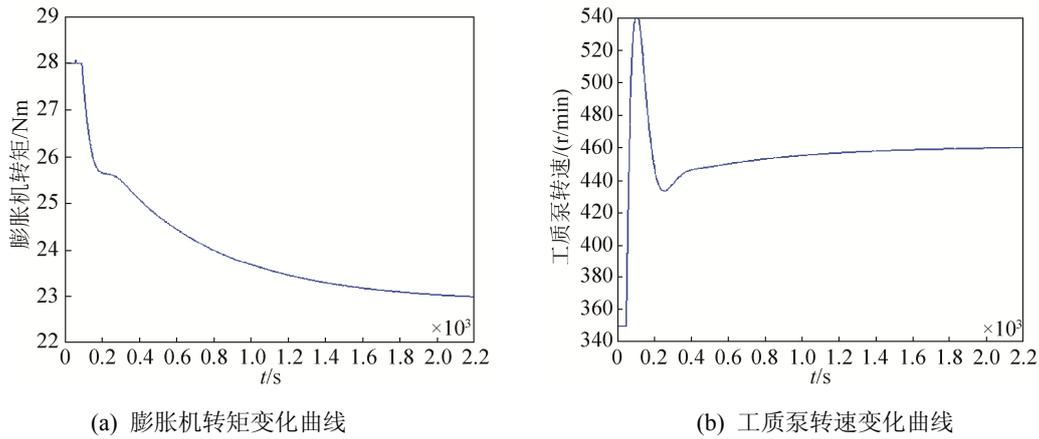


图 5 膨胀机转矩和工质泵转速的变化曲线

Fig. 5 Variations of the expander torque and the pump speed

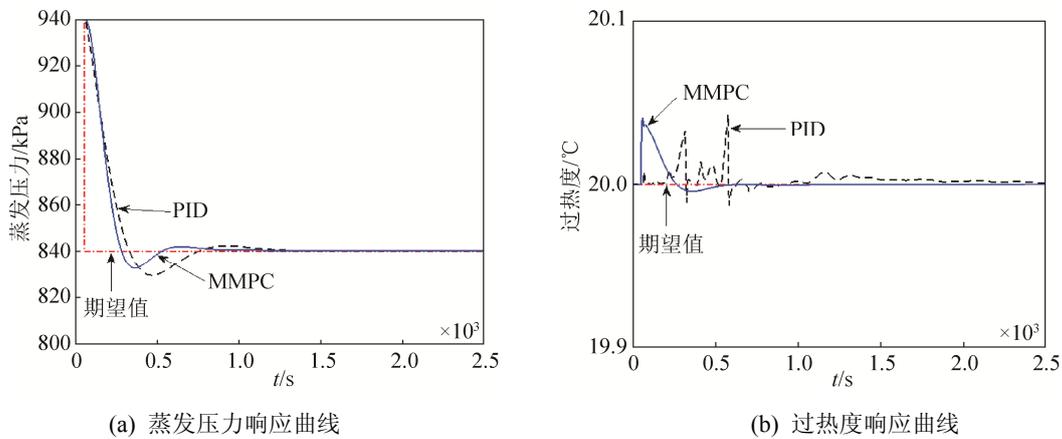


图 6 蒸发压力和过热度的响应曲线

Fig. 6 Response curves of the evaporating pressure and superheating temperature

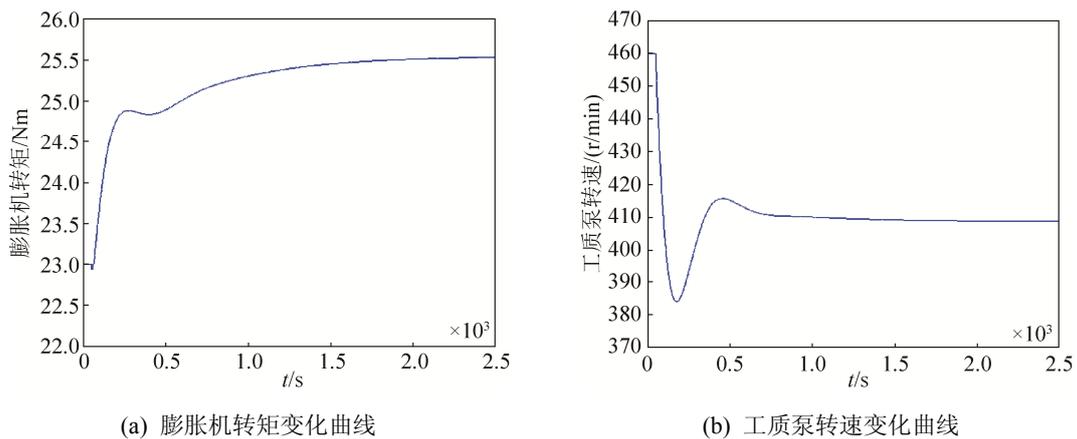


图 7 膨胀机转矩和工质泵转速的变化曲线

Fig. 7 Variations of the expander torque and the pump speed

4 结论

针对 ORC 余热利用系统大范围运行工况的控制问题, 在不同工况进行了基于线性离线子模型的预

测控制器设计, 并基于模型输出残差设计多模型切换策略以完成不同工况下对 ORC 系统的控制, 通过仿真实验对算法的有效性进行验证, 得到如下结论:

(1) 本文所采用的控制策略能够对运行于大范围工况的 ORC 系统进行有效控制。ORC 控制系统能够保持对蒸发压力的良好跟踪, 并保持过热度稳定在期望值, 各系统变量被限制在其安全范围内。

(2) 本文所采用的算法基于离线线性模型和离线控制器。与非线性物理模型相比, 线性模型的建立要相对简单。并且避免了在线模型辨识和参数调整, 减小了系统实时性和计算量上的负担, 节省了资源。

(3) 实验仿真结果表明, 与传统的 PID 算法相比, 该算法快速性和抗干扰性更好。

参考文献:

- [1] 苗政, 杨绪飞, 徐进良, 等. 有机朗肯循环系统动态特性[J]. 科学通报, 2014, 59(28/29): 2764-2775.
Miao Zheng, Yang Xufei, Xu Jinliang, et al. Development and Dynamic Characteristics of an Organic Rankine Cycle[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(28/29): 2764-2775.
- [2] Hung T C, Shai T Y, Wang S K. A Review of Organic Rankine Cycles (ORCs) for the Recovery of Low-grade Waste Heat[J]. Energy (S0360-5442), 1997, 22(7): 661-667.
- [3] Xu J, Liu C. Effect of the Critical Temperature of Organic Fluids on Supercritical Pressure Organic Rankine Cycles [J]. Energy (S0360-5442), 2013, 63: 109-122.
- [4] Chen H, Goswami D Y, Stefanakos E K. A Review of Thermodynamic Cycles and Working Fluids for the Conversion of Low-grade Heat[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews (S1364-0321), 2010, 14(9): 3059-3067.
- [5] Drescher U, Brüggemann D. Fluid Selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in Biomass Power and Heat Plants[J]. Applied Thermal Engineering (S1359-4311), 2007, 27(1): 223-228.
- [6] Bao J, Zhao L. A Review of Working Fluid and Expander Selections for Organic Rankine Cycle[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews (S1364-0321), 2013, 24: 325-342.
- [7] 赵力, 黄炜. 动态热源的车载有机朗肯循环系统特性分析[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(1): 1-7.
Zhao Li, Huang Wei. Respond Performance to Dynamic Heat Resource of Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery on Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(1): 1-7.
- [8] 张建华, 林明明, 史斐, 等. 有机朗肯循环控制系统的设定值优化[J]. 科学通报, 2014, 59(28/29): 2792-2798. doi:10.1007/s11434-014-0590-1.
Zhang J H, Lin M M, Shi F, et al. Set point optimization of controlled organic Rankine cycle systems[J]. Chinese Science Bulletin 2014, 59(28/29): 2792-2798.
- [9] Esposito MC, Pompini N, Gambarotta A, et al. Nonlinear Model Predictive Control of an Organic Rankine Cycle for Exhaust Waste Heat Recovery in Automotive Engines[J]. IFAC- PapersOnLine (S2405-8963), 2015, 48(15): 411-418.
- [10] Zhang J, Zhou Y, Wang R, et al. Modeling and Constrained Multivariable Predictive Control for ORC (Organic Rankine Cycle) based Waste Heat Energy Conversion Systems[J]. Energy (S0360-5442), 2014, 66: 128-138.
- [11] Hou G, Bi S, Lin M, et al. Minimum Variance Control of Organic Rankine Cycle based Waste Heat Recovery[J]. Energy Conversion and Management (S0196-8904), 2014, 86: 576-586.
- [12] Zhang J, Zhou Y, Li Y, et al. Generalized Predictive Control Applied in Waste Heat Recovery Power Plants[J]. Applied Energy (S0306-2619), 2013, 102: 320-326.
- [13] J Peralez, P Tona, Lepreux O. Improving the Control Performance of an Organic Rankine Cycle System for Waste Heat Recovery from a Heavy-Duty Diesel Engine using a Model-Based Approach[D]. 52nd IEEE Conference on Decision and Control, 2013: 6830-6836.
- [14] F Padula, R Sandrini, Cominardi G. Adaptive PI Control of an Organic Rankine Cycle Power Plant[D]. IFAC Conference on Advances in PID Control, 2012: 459-464.
- [15] Quoilin S, Aumann R, Grill A, et al. Dynamic Modeling and Optimal Control Strategy of Waste Heat Recovery Organic Rankine Cycles[J]. Applied Energy (S 0306-2619), 2011, 88(6): 2183-2190.
- [16] Vélez F, Segovia J J, Martín M C, et al. A Technical, Economical and Market Review of Organic Rankine Cycles for the Conversion of Low-grade Heat for Power Generation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews (S1364-0321), 2012, 16(6): 4175-4189.
- [17] Ning LI, Shao-Yuan LI, Yu-Geng XI. Multiple Model Predictive Control for MIMO Systems[J]. Acta Automatic Sinica (S0254-4156), 2003, 29(4): 516-523.