

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212269

# 基于阶梯式预测控制的槽式太阳能集热场 温度控制研究

汤建方<sup>1</sup>, 董 军<sup>1</sup>, 梁 璐<sup>2</sup>, 徐二树<sup>3</sup>, 逢亚蕾<sup>2</sup>

(1.中广核新能源控股有限公司, 北京 100000; 2.华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206;

3.华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

[摘 要] 槽式太阳能光热电站运行过程中, 集热回路的导热工质出口温度稳定是电站安全可靠运行的重要控制目标。由于集热管的结构特点, 槽式集热器出口温度具有大惯性、大延迟、出口温度控制问题复杂等特性。为此, 构建了兆瓦级槽式太阳能集热回路的动态数学模型, 并在集热器出口构建了温度控制系统, 提出一种槽式太阳能发电集热回路出口温度的阶梯式预测控制器, 并基于 MATLAB/Simulink 平台进行了仿真。仿真结果表明, 对于槽式集热回路, 在辐照、导热油入口温度和环境温度扰动情况下, 相较于传统 PID 控制系统, 阶梯式预测控制器调节时间更短, 超调量更小, 鲁棒性更好, 控制效果提升明显。所提出预测控制器能很好地应对集热场出口导热油超温及导热油流量波动频繁的情况, 有利于槽式集热场的安全稳定运行。

[关 键 词] 槽式集热回路; 槽式太阳能; 预测控制; 光热发电; 温度控制

[引用本文格式] 汤建方, 董军, 梁璐, 等. 基于阶梯式预测控制的槽式太阳能集热场温度控制研究[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 181-189. TANG Jianfang, DONG Jun, LIANG Lu, et al. Research on temperature control of trough solar collector field based on step predictive control[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 181-189.

## Research on temperature control of trough solar collector field based on step predictive control

TANG Jianfang<sup>1</sup>, DONG Jun<sup>1</sup>, LIANG Lu<sup>2</sup>, XU Ershu<sup>3</sup>, PANG Yalei<sup>2</sup>

(1.CGNPC New Energy Holding Co., Ltd., Beijing 100000, China;

2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** During the operation of a trough solar power station, the stability of the outlet temperature of the thermal conductor is an important control objective for the safe and reliable operation of the power station. Due to the structural characteristics of the collector tube, the outlet temperature characteristics of the trough collector have large inertia and large delay, so the outlet temperature control problem is complicated. In order to solve this problem effectively, a dynamic mathematical model of MW trough solar power collector circuit is constructed in this paper, and a temperature control system is constructed at the collector outlet. A step prediction controller for the outlet temperature of trough solar power collector circuit is proposed. Simulation experiments were carried out based on MATLAB/Simulink platform. The simulation results show that, for the groove heat collecting loop, under the disturbance of irradiation, heat conduction oil inlet temperature and ambient temperature, the stepped predictive control system has shorter adjustment time, smaller overshoot, better robustness, and significantly improved control effect compared with the traditional PID control system. The proposed predictive controller can well cope with the situation of heat conduction oil overtemperature and heat conduction oil flow fluctuation at the outlet of heat collecting field, which is conducive to the safe and stable operation of the trough heat collecting field.

修回日期: 2022-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51976058)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51976058)

第一作者简介: 汤建方 (1969), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为太阳能热发电相关技术, tangjianfang@cgnpc.com.cn。

通信作者简介: 梁璐 (1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电技术, 120202227190@ncepu.edu.cn。

**Key words:** trough-type heat collecting circuit; trough solar energy; predictive control; photothermal power generation; temperature control

随着经济的快速发展,近十年我国能源消费快速增长,能源结构持续优化<sup>[1]</sup>。2021 年我国太阳能发电、风力发电等可再生清洁能源消费占能源消费总量的 25.5%,并将进一步持续增长<sup>[2-3]</sup>。可再生能源中,太阳能以其更安全、更可靠、更可持续的特征,在新型电力系统中占据重要的地位<sup>[4]</sup>。

目前太阳能已经开发出多种应用,如光热、光气、光化学等的转换<sup>[5]</sup>。但太阳能的能量密度较低,太阳能发电技术尚不成熟,必须采用聚焦技术来获得高质量的热能<sup>[6]</sup>。槽式太阳能热发电技术是目前最成熟的太阳能发电技术,其工作原理是将太阳辐射集中到安装在槽式太阳能电容器聚光位置的真空管吸热装置上,真空管中的导热介质通过热传导吸热升温,高温导热工质通过蒸汽发生器加热水,产生高温高压蒸汽,驱动涡轮发电机发电<sup>[7-8]</sup>。太阳辐照度随太阳上升、落下、尘埃反射或云层覆盖出现缓慢或迅速变化,出现随机性和不可控性,致使集热回路出口导热工质温度产生波动。保持集热器出口温度稳定不仅是槽式集热器系统安全可靠运行的重要控制目标,也是制约槽式太阳能集热系统发展的关键。因此,集热回路导热工质出口温度控制已经成为当前槽式太阳能集热场研究的一大热点问题。

槽式集热回路采用串、并联的方式,其长度较长,这样的结构特点决定了槽式集热器出口温度特性具有大惯性、大延迟和非线性。目前,国内光热发电技术的开发尚未成熟,许多国外的专家学者对此进行了研究。文献[9]提出了一种闭环收敛前馈控制模型,使用集热场入口温度和当前光辐射强度作为前馈变量。文献[10]通过调整集热场内工质流速,建立了线性预测控制模型,以保持集热场出口温度的稳定。文献[11]设计了一种基于集热场出口温度的改进鲁棒控制器,可以很好地控制集热场出口温度。文献[12]分析了集热场的各种特性,并以此为基础设计了神经网络自适应控制器。文献[13]将每个集热管进行分区,以此来实现控制系统的设计。文献[14]对直接蒸汽发生器(direct steam generation, DSG)进行了研究,并设计了出口蒸汽温度和汽包水位控制。虽然上述方法能在一定程度上改善槽式太阳能集热场的控制性能,但仍然存在两个问题:一是这些常用的反馈控制器,如 PID 控制、内模控制和

自适应控制等均不能有效处理槽式太阳能集热场的大惯性问题;二是国内对槽式太阳能热发电集热场的温度控制系统研究及应用尚不成熟,部分运行的槽式太阳能热发电站中,集热场出口导热油温度的控制基本采用手动方式,不利于光热电站的安全运行。

预测控制对于大时滞、大惯性系统具有良好的控制性能,在多种工业领域都有广泛应用。本文基于某 1 MW 槽式太阳能发电试验系统建立了仿真模型,分析了槽式集热场的特性并建立槽式集热回路系统数学模型,最后提出一种基于预测控制的槽式太阳能集热场温度控制系统,通过 MATLAB/Simulink 验证了模型的控制效果,结果表明:相较于传统 PID 控制,预测控制稳态时间更短,超调量降低了 2.54%,该控制系统为槽式太阳能集热场的出口温度控制提供了理论参考。

## 1 1 MW 槽式太阳能发电试验系统

图 1 为某 1 MW 槽式太阳能发电试验系统。由图 1 可见,太阳能集热系统由 3 条集热管道构成,3 条集热管道长度均为 600 m,开口尺寸为 5.76 m,聚光器焦距为 1.70 m。由导热油泵加压的导热油流经集热管换热,换热后的高温高压的导热油流入蒸汽发生器<sup>[15]</sup>。蓄热池储存的能量可以满足 1 MW·h 的发电需要。该系统主要包括集热系统、蒸汽发生系统、储热系统和汽轮发电机系统,系统额定工况运行时的系统设计参数见表 1。

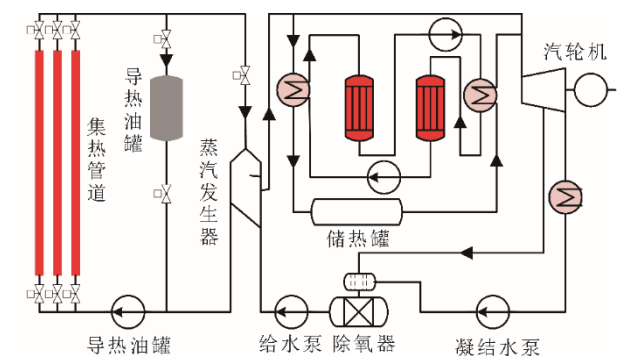


图 1 1 MW 槽式太阳能热发电试验系统  
Fig.1 1 MW trough solar thermal power generation system

## 2 槽式集热器数学模型

### 2.1 槽式集热器能量平衡模型

槽式太阳能真空集热器是槽式太阳能传热的

核心部件，涉及传热和热损失，机理复杂。集热场动态模型主要模拟集热器内部能量传递过程，依据能量守恒与质量守恒原理，有：

$$\rho_m c_m V_m \frac{dT_m(t)}{dt} = \eta_0 G I(t) - \alpha \frac{\pi d_1^2}{4} [T_m(t) - T(t)] - \beta \frac{\pi d_1^2}{4} [T_m(t) - T_e(t)] \quad (1)$$

表 1 1 MW 槽式太阳能热发电系统设计参数  
Tab.1 Design parameters of 1 MW trough solar thermal power generation system

参数	数值
凝汽器压力/MPa	0.006 7
凝结水温度/℃	38.0
除氧器压力/MPa	0.12
给水压力/MPa	4.10
给水温度/℃	104.0
蒸发器压力/MPa	3.20
蒸发器温度/℃	237.5
充能换热器后压力/MPa	2.52
充能换热器后温度/℃	265.0
蓄热器压力/MPa	2.50
蓄热器温度/℃	240.0
除氧器抽汽压力/MPa	0.316
除氧器抽汽温度/℃	230.0
过热器出口蒸汽压力/MPa	3.20
过热器出口蒸汽温度/℃	380.0
过热器出口蒸汽流量/(kg·h <sup>-1</sup> )	6 500
汽轮机入口蒸汽压力/MPa	2.35
汽轮机入口蒸汽温度/℃	375.0
导热油输油母管油压力/MPa	3.00
导热油回油母管压力/MPa	1.50
过热器入口导热油温度/℃	393.0
过热器入口导热油压力/MPa	1.00
过热器入口导热油流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	99.4
蒸发器入口导热油温度/℃	380.0
预热器入口导热油温度/℃	317.9
预热器出口导热油温度/℃	296.0

集热管内导热工质能量平衡可表示为：

$$\rho_f c_f V_f \frac{dT_o(t)}{dt} = \alpha \frac{\pi d_1^2}{4} (T_m(t) - T(t)) + v(t) \rho_f c_f (T_i(t) - T_o(t)) \quad (2)$$

式中： $G$  为集热管微元的聚光器开口面积， $m^2$ ； $\alpha$  为导热工质换热系数， $W/(m^2 \cdot g \cdot ^\circ C)$ ； $\beta$  为金属管对环节的热损失系数， $W/(m^2 \cdot g \cdot ^\circ C)$ ； $I(t)$  为太阳的辐照度， $W/m^2$ ； $\eta_0$  为聚光器的聚光效率，%； $v(t)$  为导热工质容积流量， $m^3/s$ ； $d_1$ 、 $d_2$  分别为集热管内、外径， $m$ ； $T$  为导热工质温度， $^\circ C$ ； $\rho_f$  为导热工质密度， $kg/m^3$ ； $c_f$  为导热工质比热容， $J/(K \cdot kg)$ ； $V_f$  为导热工质体积，

$m^3$ ； $T_e$  为环境温度， $^\circ C$ ； $T_i$  为导热工质入口温度， $^\circ C$ ； $T_o$  为导热工质出口温度， $^\circ C$ ； $T_m$  为金属管温度， $^\circ C$ ； $\rho_m$  为金属管密度， $kg/m^3$ ； $c_m$  为金属管比热容， $J/(K \cdot kg)$ ； $V_m$  为金属管体积， $m^3$ 。

$$\rho_f c_f V_f \frac{dT_o(t)}{dt} = -\rho_m c_m V_m \frac{dT_m(t)}{dt} - \beta \frac{\pi d_2^2}{4} (T_m(t) - T_e(t)) + \eta_0 G I(t) + v(t) \rho_f c_f (T_i(t) - T_o(t)) \quad (3)$$

假设导热工质与金属在理想状况下进行换热，金属温度等于导热工质温度，即  $T_m(t) = T_o(t)$ ，则有：

$$\frac{dT_o(t)}{dt} = - \left( \frac{\beta \pi d_2^2}{4(C_f + C_m)} + \frac{v(t) C_f}{V_f (C_f + C_m)} \right) T_o(t) + \frac{\beta \pi d_2^2}{4(C_f + C_m)} T_e(t) + \frac{\eta_0 G}{(C_f + C_m)} I(t) + \frac{v(t) C_f}{V_f (C_f + C_m)} T_i(t) \quad (4)$$

$$C_f = \rho_f c_f V_f \quad (5)$$

$$C_m = \rho_m c_m V_m \quad (6)$$

由式(4)一式(6)可知，除了聚光器本体特性外，影响出口工质温度的主要原因是集热场入口温度、环境温度和太阳辐射强度。

槽式集热场动态过程如图 2 所示。

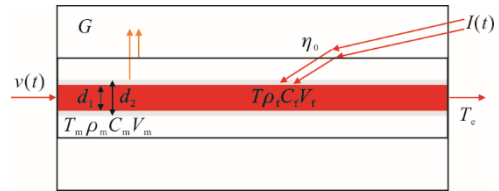


图 2 槽式集热场动态过程

Fig.2 Dynamic process of trough heat collection field

## 2.2 模型线性化

因为模型系数不是常数，且  $v(t)$  是一个函数，因此无法利用经典控制的传递函数对系统进行直接建模，需要将模型在某个时刻线性化。式(4)为某个短时间运行状态平均值下的能量平衡状态，在此状态下可以近似认为  $T_o(t)$ 、 $T_e(t)$ 、 $I(t)$ 、 $T_i(t)$  均为常量且接近相关参数实际运行值，而  $T_{o,0}$ 、 $T_{e,0}$ 、 $I_0$ 、 $T_{i,0}$  为该点实际运行值，则有：

$$0 = \frac{v_0 C_f}{V_f (C_f + C_m)} (T_{i,0} - T_{o,0}) + \frac{\beta A^2}{C_f + C_m} (T_{e,0} - T_{o,0}) + \frac{\eta_0 G}{C_f + C_m} I_0 \quad (7)$$

则该点导热工质容积流量为：

$$v_0 = V_f \frac{\beta \pi d_2^2 (T_{o,0} - T_{e,0}) - \eta_0 G I_0}{4 C_f (T_{i,0} - T_{o,0})} \quad (8)$$

集热场出口工质温度可表示为工质入口温度、工质容积流量、环境温度、太阳辐射的函数,则有:

$$\frac{dT_o(t)}{dt} = f(T_o(t), v(t), I(t), T_i(t), T_e(t)) \quad (9)$$

该工作点的模型线性化为:

$$\begin{aligned} \frac{dT_o(t)}{dt} = & f(T_{o,0}, v_0, I_0, T_{i,0}, T_{e,0}) + \\ & \frac{\partial f}{\partial T_o}(T_{o,0}, v_0, I_0, T_{i,0}, T_{e,0}) \cdot (T_o(t) - T_{o,0}) + \\ & \frac{\partial f}{\partial v}(T_{o,0}, v_0, I_0, T_{i,0}, T_{e,0}) \cdot (v(t) - v_0) + \\ & \frac{\partial f}{\partial I}(T_{o,0}, v_0, I_0, T_{i,0}, T_{e,0}) \cdot (I(t) - I_0) + \\ & \frac{\partial f}{\partial T_i}(T_{o,0}, v_0, I_0, T_{i,0}, T_{e,0}) \cdot (T_i(t) - T_{i,0}) + \\ & \frac{\partial f}{\partial T_e}(T_{o,0}, v_0, I_0, T_{i,0}, T_{e,0}) \cdot (T_e(t) - T_{e,0}) \end{aligned} \quad (10)$$

则有:

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{T}_o(t)}{dt} = & 0 - \left( \frac{\beta\pi d_2^2}{4(C_f + C_m)} + \frac{v_0 C_f}{V_f(C_f + C_m)} \right) \tilde{T}_o(t) + \\ & \frac{C_f(T_{i,0} - T_{o,0})}{V_f(C_f + C_m)} \tilde{v}(t) + \frac{\eta_0 G}{C_f + C_m} \tilde{I}(t) + \\ & \frac{v_0 C_f}{V_f(C_f + C_m)} \tilde{T}_i(t) + \frac{\beta\pi d_2^2}{4(C_f + C_m)} \tilde{T}_e(t) \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $\tilde{T}_o(t) = T_o(t) - T_{o,0}$ ,  $\tilde{v}(t) = v(t) - v_0$ ,  $\tilde{I}(t) = I(t) - I_0$ ,  $\tilde{T}_i(t) = T_i(t) - T_{i,0}$ ,  $\tilde{T}_e(t) = T_e(t) - T_{e,0}$ .

对式(11)进行拉普拉斯变换可得到:

$$\begin{aligned} sT_o(s) + \left( \frac{\beta\pi d_2^2}{4(C_f + C_m)} + \frac{v_0 C_f}{V_f(C_f + C_m)} \right) \tilde{T}_o(s) = \\ \frac{C_f(T_{i,0} - T_{o,0})}{V_f(C_f + C_m)} \tilde{v}(s) + \frac{\eta_0 G}{C_f + C_m} \tilde{I}(s) + \\ \frac{v_0 C_f}{V_f(C_f + C_m)} \tilde{T}_i(s) + \frac{\beta\pi d_2^2}{4(C_f + C_m)} \tilde{T}_e(s) \end{aligned} \quad (12)$$

即:

$$\begin{aligned} T_o(s) = & \frac{\tau}{\tau s + 1} \frac{C_f(T_{i,0} - T_{o,0})}{V_f(C_f + C_m)} \tilde{v}(s) + \\ & \frac{\tau}{\tau s + 1} \frac{\eta_0 G}{C_f + C_m} \tilde{I}(s) + \\ & \frac{\tau}{\tau s + 1} \frac{v_0 C_f}{V_f(C_f + C_m)} \tilde{T}_i(s) + \\ & \frac{\tau}{\tau s + 1} \frac{\beta\pi d_2^2}{4(C_f + C_m)} \tilde{T}_e(s) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\tau = \frac{4(V_f(C_f + C_m))}{\beta\pi d_2^2 V_f + v_0 C_f} \quad (14)$$

则  $\tilde{I}$ 、 $\tilde{T}_i$ 、 $\tilde{T}_e$ 、 $\tilde{v}$  对于  $\tilde{T}_o$  的传递函数  $w_1(s)$ 、 $w_2(s)$ 、 $w_3(s)$ 、 $w_4(s)$  分别为:

$$w_1(s) = \frac{\tilde{T}_o(s)}{\tilde{I}(s)} = \frac{\tau}{\tau s + 1} \frac{G\eta_0}{C_f + C_m} \quad (15)$$

$$w_2(s) = \frac{\tilde{T}_o(s)}{\tilde{T}_i(s)} = \frac{\tau}{\tau s + 1} \frac{v_0 C_f}{V_f(C_f + C_m)} \quad (16)$$

$$w_3(s) = \frac{\tilde{T}_o(s)}{\tilde{T}_e(s)} = \frac{\tau}{\tau s + 1} \frac{\pi\beta d_2^2}{4(C_f + C_m)} \quad (17)$$

$$w_4(s) = \frac{\tilde{T}_o(s)}{v(s)} = \frac{\tau}{\tau s + 1} \frac{C_f(T_{i,0} - T_{o,0})}{V_f(C_f + C_m)} \quad (18)$$

### 3 控制系统设计

槽式太阳能集热场系统是一个具有大延迟、大惯性的非线性系统,而系统的被控量为集热场出口温度,可以通过调节工质流量来使之稳定在一定范围内并尽可能接近设定值。而影响集热场出口温度的还有太阳辐射强度、集热场入口处工质温度和环境温度,可将这3个影响因素作为扰动量加入控制系统。

本文选取PID控制与阶梯式预测控制分别进行研究,依次分析太阳辐照、集热场导热油温度、环境温度对集热场出口温度的影响。

#### 3.1 PID 控制器设计

PID控制器原理简单、工程应用易于实现,对于时滞和惯性小的被控对象具有良好的控制效果。由于微分调节的控制信号主要依靠偏差的变化速度来生成<sup>[16]</sup>,因此控制器不使用微分调节。在国内外的研究中,槽式太阳能集热场温度控制系统一般为采用抗饱和积分的PI单反馈控制回路。PI控制器算法如式(19)所示,其中  $K_p$  为比例系数,  $T_i$  为积分时间<sup>[17]</sup>。

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (19)$$

建立基于PI控制器的槽式太阳能集热场温度控制系统,如图3所示。图3中:PI为控制器;  $T_{or}$  为导热工质集热场出口温度设定值;  $T_o$  为导热工质集热场出口温度实际值。

#### 3.2 预测控制器设计

预测控制是基于预测模型的高级控制算法。通过系统的过去输入输出信息和将来输入信息,预测

模型可以实时预测系统的将来输出，且不受模型结构和形式的限制<sup>[18]</sup>。本文选取一种阶梯式的预测控制方法，对未来的控制增量进行显示规划。阶梯式的预测控制形式可以抑制系统高频噪音<sup>[19]</sup>，避免执行机构频繁波动，降低机构的磨损程度。其原理如下：

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k+1) = \delta \quad (20)$$

$$\Delta u(k+1) = u(k+1) - u(k) = \beta\delta \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \Delta u(k+N_u-1) &= u(k+N_u-1) - \\ u(k+N_u-2) &= \beta^{N_u-1}\delta \end{aligned} \quad (22)$$

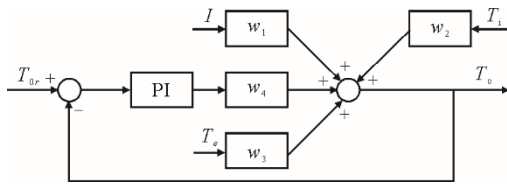


图 3 基于 PI 控制器的集热场温度控制系统  
Fig.3 PI controller-based temperature control system for heat collection field

### 3.2.1 预测模型

考虑受控自回归积分滑动平均 (CARIMA) 预测控制<sup>[20]</sup>模型：

$$\begin{aligned} A(q^{-1})y(t) &= B(q^{-1})u(t-1) + \\ C(q^{-1})v(t-1) &+ \frac{D(q^{-1})\xi(t)}{\Delta} \end{aligned} \quad (23)$$

式中： $A(q^{-1})$ 、 $B(q^{-1})$ 、 $C(q^{-1})$ 、 $D(q^{-1})$ 分别为  $n$ 、 $n_b$ 、 $n_c$ 、 $n_d$  阶的  $q^{-1}$  多项式； $y(t)$  为系统输出； $u(t)$  为系统输入； $v(t)$  为系统前馈； $\xi(t)$  为均值为 0 方差为  $\delta^2$  的白噪声； $\Delta$  为差分算子： $\Delta=1-q^{-1}$ ，将多项式  $B(q^{-1})$  的前  $d-1$  项系数设定为 0 可以控制通道的纯延迟时间  $d$ ，即： $b_0=b_1=b_2=\dots=b_{d-2}=0$ 。

引入 Diophantine 方程：

$$1 = E_j(q^{-1})A(q^{-1})\Delta + q^{-j}F_j(q^{-1}) \quad (24)$$

式中：

$$\begin{cases} E_j(q^{-1}) = e_{j,0} + e_{j,1}q^{-1} + \dots + e_{j,j-1}q^{-(j-1)} \\ F_j(q^{-1}) = f_{j,0} + f_{j,1}q^{-1} + \dots + f_{j,n}q^{-n} \end{cases}$$

联立可解  $t+j$  时刻的预测输出为：

$$\begin{aligned} y(t+j) &= E_j(q^{-1})B(q^{-1})\Delta u(t+j-1) + \\ &E_j(q^{-1})C(q^{-1})\Delta v(t+j-1) + \\ &F_j(q^{-1})y(t) + E_j(q^{-1})D(q^{-1})\xi(t+j) \end{aligned} \quad (25)$$

由于未来噪声未知，所以最佳预测应采用：

$$\begin{aligned} \hat{y}(t+j) &= E_j(q^{-1})B(q^{-1})\Delta u(t+j-1) + \\ &E_j(q^{-1})C(q^{-1})\Delta v(t+j-1) + F_j(q^{-1})y(t) \end{aligned} \quad (26)$$

### 3.2.2 滚动优化

假设系统的性能优化指标为：

$$\begin{aligned} J &= \sum_{j=N_1}^{N_2} (w(t+j) - y(t+j))^2 + \\ &\lambda \sum_{j=1}^{N_u} (\Delta u(t+j-1))^2 \end{aligned} \quad (27)$$

式中： $w$  为被控对象的期望参考值； $N_1$  为优化时域的起始值； $N_2$  为优化时域的终止值； $N_u$  为控制时域； $\lambda$  控制权重。其中，对象的期望参考值计算公式为：

$$w(t+j) = \alpha^j y(t) + (1-\alpha^j) y_\gamma, \quad j=1,2,\dots \quad (28)$$

式中： $y(t)$  为槽式集热场出口温度实际值，是实际输出值； $y_\gamma$  为槽式集热场出口温度设定值； $\alpha$  为柔滑因子， $0 \leq \alpha < 1$ 。

使得：

$$\begin{aligned} G_j(q^{-1}) &= E_j(q^{-1})B(q^{-1}) = g_{j,0} + g_{j,1}q^{-1} + \dots + \\ &g_{j,n_b+j-1}q^{-(n_b+j-1)} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} H_j(q^{-1}) &= E_j(q^{-1})C(q^{-1}) = h_{j,0} + h_{j,1}q^{-1} + \dots + \\ &h_{j,n_c+j-1}q^{-(n_c+j-1)} \end{aligned} \quad (30)$$

则式(26)可写为：

$$\begin{aligned} \hat{y}(t+j) &= G_{N_1}(q^{-1})\Delta u(t+j-1) + \\ &H_j\Delta v(t+j-1) + F_j(q^{-1})y(t) \end{aligned} \quad (31)$$

由于未来时刻前馈通道的增量未知，则性能指标的未来量为：

$$\begin{cases} \hat{y}(t+N_1|t) = G_{N_1}(q^{-1})\Delta u(t+N_1-1) + \\ H_{N_1}(q^{-1})\Delta v(t+j-1) + F_{N_1}(q^{-1})y(t) = \\ g_{N_1,0}\Delta u(t+N_1-1) + \dots + g_{N_1,N_1-1}\Delta u(t) + f_{N_1}(t) \\ \vdots \\ \hat{y}(t+N_2|t) = G_{N_2}(q^{-1})\Delta u(t+N_2-1) + \\ H_{N_2}(q^{-1})\Delta v(t+j-1) + F_{N_2}(q^{-1})y(t) = \\ g_{N_2,0}\Delta u(t+N_2-1) + \dots + g_{N_2,N_2-1}\Delta u(t) + f_{N_2}(t) \end{cases} \quad (32)$$

其中：

$$\begin{cases} f_{N_1}(t) = q^{N_1-1} [G_{N_1}(q^{-1}) - g_{N_1,0} - \dots - g_{N_1,N_1-1} \\ q^{-(N_1-1)}] \Delta u(t) + q^{N_1-1} [H_{N_1}(q^{-1}) - h_{N_1,0} - \dots - \\ h_{N_1,N_1-1} q^{-(N_1-1)}] \Delta v(t) + F_{N_1}(q^{-1})y(t) \\ \vdots \\ f_{N_2}(t) = q^{N_2-1} [G_{N_2}(q^{-1}) - g_{N_2,0} - \dots - g_{N_2,N_2-1} \\ q^{-(N_2-1)}] \Delta u(t) + q^{N_2-1} [H_{N_2}(q^{-1}) - h_{N_2,0} - \dots - \\ h_{N_2,N_2-1} q^{-(N_2-1)}] \Delta v(t) + F_{N_2}(q^{-1})y(t) \end{cases} \quad (33)$$

当  $i \geq 0$  时,  $\Delta u(t+N_u-i)=0$ , 当  $N_1 < N_u$  时,  $g_{N_1, N_1-N_u} = g_{N_1, -1} = 0$ , 因此上述预测输出可表示为:

$$\begin{cases} \hat{y}(t+N_1|_t) = g_{N_1, N_1-N_u} \Delta u(t+N_u-1) + \dots + g_{N_1, N_1-1} \Delta u(t) + f_{N_1}(t) \\ \hat{y}(t+N_2|_t) = g_{N_2, N_2-N_u} \Delta u(t+N_u-1) + \dots + g_{N_2, N_2-1} \Delta u(t) + f_{N_2}(t) \end{cases} \quad (34)$$

若令:

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} \hat{y}(t+N_1|_t) \\ \vdots \\ \hat{y}(t+N_2|_t) \end{bmatrix}, \Delta u = \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \vdots \\ \Delta u(t+N_u-1) \end{bmatrix}, f = \begin{bmatrix} f_{N_1}(t) \\ \vdots \\ f_{N_2}(t) \end{bmatrix}$$

则有:

$$\hat{y} = G\Delta u + f \quad (35)$$

式中:  $G$  为  $(N_2-N_2+1) N_u$  维矩阵。

$$G = \begin{bmatrix} g_{N_1, N_1-1} & \dots & g_{N_1, N_1-N_u} \\ \vdots & & \vdots \\ g_{N_2, N_2-1} & \dots & g_{N_2, N_2-N_u} \end{bmatrix} \quad (36)$$

采用阶梯控制的思想, 对未来控制增量进行显示规划, 则有:

$$\begin{cases} \Delta u(t) = \delta \\ \Delta u(t+j) = \beta \Delta u(t+j-1) = \beta^j \delta \\ 1 \leq j \leq N_u \end{cases} \quad (37)$$

$$\Delta u(t) = (\Delta u(t) \Delta u(t+1) \dots \Delta u(t+N_u+1))^T = (\delta \beta \delta \dots \beta^{N_u-1} \delta)^T = (1\beta \dots \beta^{N_u-1})^T \delta \quad (38)$$

$$\begin{aligned} G\Delta u &= \begin{bmatrix} g_{N_1, N_1-1} & \dots & g_{N_1, N_1-N_u} \\ \vdots & & \vdots \\ g_{N_2, N_2-1} & \dots & g_{N_2, N_2-N_u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ \beta^{N_u-1} \end{bmatrix} \delta = \\ &= \begin{bmatrix} g_{N_1, N_1-1} & \dots & \beta^{N_u-1} g_{N_1, N_1-N_u} \\ \vdots & & \vdots \\ g_{N_2, N_2-1} & \dots & \beta^{N_u-1} g_{N_2, N_2-N_u} \end{bmatrix} = \tilde{G} \delta \end{aligned} \quad (39)$$

因此式(37)可表示为:

$$\hat{y} = \tilde{G}\Delta u + f \quad (40)$$

性能优化指标可表示为:

$$\begin{aligned} \min J &= (\tilde{G}\delta + f - w)^T - (\tilde{G}\delta + f - w) + \\ &\lambda(1 + \beta^2 + \dots + \beta^{2(N_u-1)})\delta^2 \end{aligned} \quad (41)$$

最小化目标函数  $\frac{\partial J}{\partial \delta} = 0$ , 获得最优化控制规律:

$$\delta = \frac{\tilde{G}^T(w-f)}{\tilde{G}^T \tilde{G} + \lambda(1 + \beta^2 + \dots + \beta^{2(N_u-1)})} \quad (42)$$

在实际控制过程实施当前控制量, 则:

$$\Delta u(t) = \Delta u(t-1) + \delta \quad (43)$$

### 3.2.3 反馈校正

在广义预测控制算法中, 滚动优化过程中强调了优化起点与实际系统一致, 这就意味着在控制的每一步, 都会将实际输出与预测输出进行比较, 并修正预测值, 使优化控制建立在准确预测的基础上。综上, 建立基于预测控制的槽式太阳能集热场温度控制系统如图 4 所示。

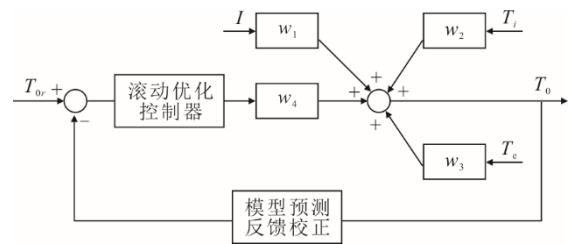


图 4 基于预测控制的槽式太阳能集热场温度控制系统  
Fig.4 Temperature control system of trough solar heat collection field based on predictive control

## 4 仿真实证

集热场温度设定值在 150 s 时从 293 °C 阶跃上升为 393 °C (图 5), 太阳辐射强度为 700 W/m<sup>2</sup>, 导热工质入口温度为 293 °C, 环境温度为 18 °C。

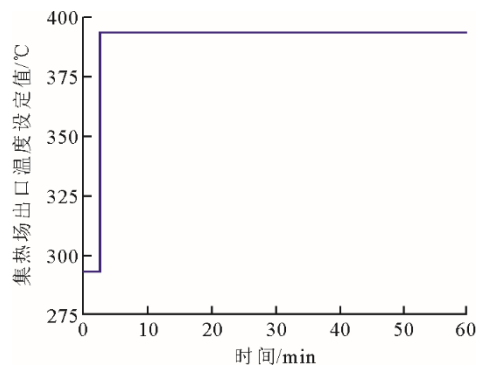


图 5 集热场出口温度设定值  
Fig.5 Outlet temperature set point of collector filed

得到 PID 控制和预测控制下的集热场出口温度, 如图 6 所示, 计算得到无扰动下 PID 控制及预测控制参数对比见表 2。由图 6 和表 2 可以看出, 预测控制系统下的出口温度超调量比 PID 控制系统小 2.54%, 稳态时间、峰值时间分别减少了 69.53% 和 14.14%。传统的 PID 控制下, 导热油出口温度波动较大, 容易超温, 需要运行人员时刻关注, 否则会对槽式集热场安全运行造成威胁, 采用阶梯式预

测控制系统后，出口温度的超调量和稳态时间都有明显改善，整个集热场安全系数得到有效提升。

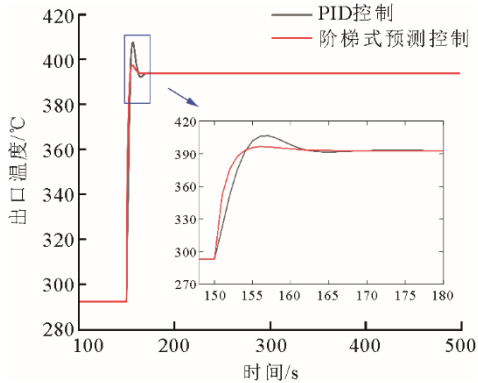


图 6 无扰动下 PID 控制及预测控制出口温度对比  
Fig.6 Comparison of outlet temperature between PID control and predictive control without disturbance

表 2 无扰动下 PID 控制及预测控制参数对比  
Tab.2 Comparison of PID control and predictive control parameters without disturbance

参数	PID 控制	预测控制
稳态时间/s	9.19	2.80
超调量/%	3.46	0.92
峰值时间/s	6.93	5.95

光热电站安装环境复杂，太阳辐射、工质入口温度以及环境温度等因素也会导致集热场出口温度控制难度增加，为了模拟不同环境因素对控制系统的影响，对 PID 和预测控制系统增加了相应扰动试验，扰动条件为：太阳辐射使用初值  $700 \text{ W/m}^2$ 、幅值波动  $100 \text{ W/m}^2$ 、频率  $0.005 \text{ rad/s}$  的正弦扰动；导热工质入口温度使用初值为  $293 \text{ }^\circ\text{C}$ 、幅值波动为  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 、频率为  $0.005 \text{ rad/s}$  的扰动；环境温度使用初值为  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 、幅值为  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、频率为  $0.005 \text{ rad/s}$  的正弦扰动；扰动信号如图 7 所示。

在施加扰动后，PID 控制器和预测控制系统仿真结果如图 8 所示，由图 8 可见，在施加扰动以后，出口温度设定值阶跃增加时，2 种控制策略都能较好地稳定在设定值，说明 2 种控制策略都有较好的鲁棒性。相比之下，预测控制的超调量和调节时间明显更小，由图 8b)可见：在设定值稳定后，由于环境因素的波动，出口温度也会存在一定的波动，预测控制下出口温度的波动更小，可以更好地适应不同的环境变化，预测控制系统的稳定性更强。

表 3 为 2 种控制策略下系统性能指标。由表 3 可见，预测控制下超调量减少了 2.57%，稳态时间减少了 69.84%，峰值时间减少了 11.35%。

导热油出口温度设定值在连续变化工况下，不

同控制策略的温度变化情况对比如图 9 所示。由图 9 可见，连续变化情况下，不论是导热油温度上升还是下降，预测控制效果都明显优于传统 PID 控制。

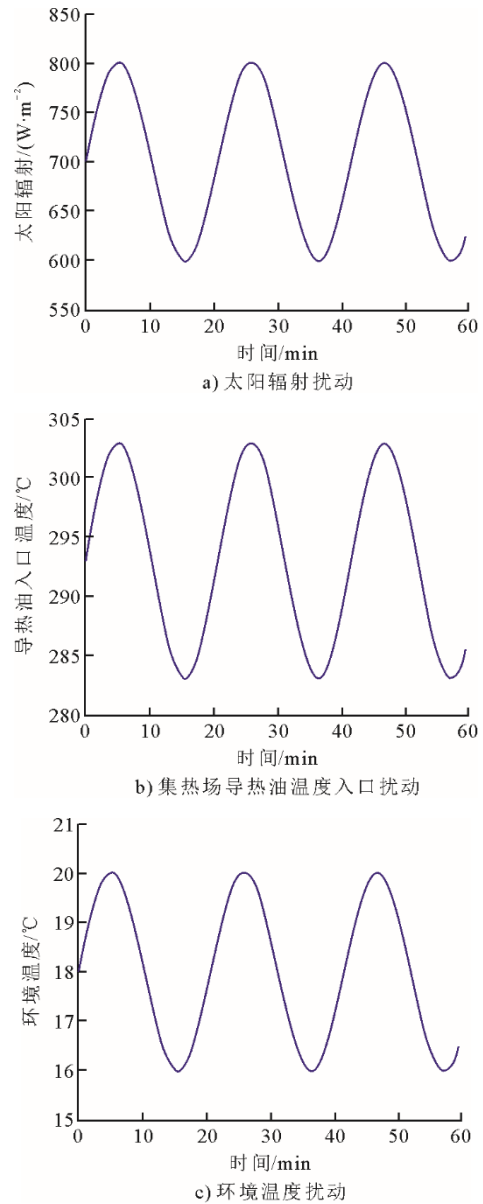
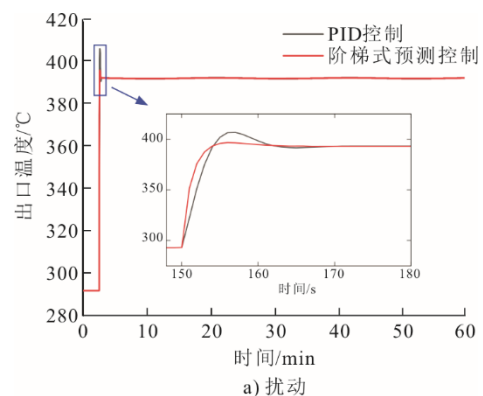


图 7 集热场扰动  
Fig.7 Disturbances of collector filed



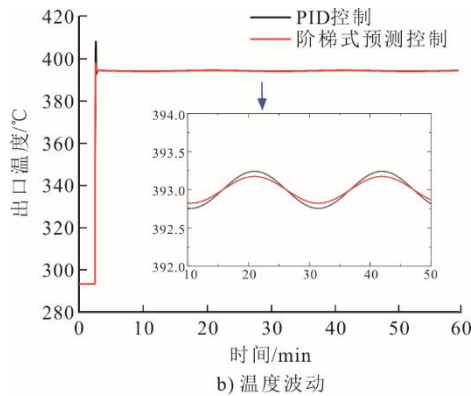


图8 有扰动时PID控制及预测控制出口温度对比  
Fig.8 Comparison of outlet temperature between PID control and predictive control under disturbance

表3 有扰动时PID控制及预测控制系统性能指标对比  
Fig.3 Comparison of PID control and predictive control system performance indexes under disturbance

参数	PID控制	预测控制
稳态时间/s	9.25	2.79
超调量/%	3.51	0.94
峰值时间/s	6.96	6.17

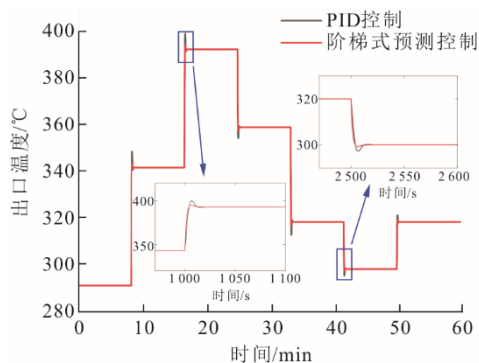


图9 设定值连续变化时PID控制及预测控制出口温度对比  
Fig.9 Comparison of outlet temperature between PID control and predictive control under continuous change of set value

## 5 结 语

本文构建了1 MW光热发电试验系统集热回路的动态数学模型,并将模型在某个工作点线性化以建立传递函数模型。在此基础上,提出一种针对槽式太阳能集热回路出口温度的阶梯式预测控制方法,并在MATLAB/Simulink仿真平台进行验证。

在Simulink平台构建集热器出口温度控制系统,比较了本文所提预测控制方法和传统PID控制方法的效果。仿真结果可以看出,针对大惯性、大延迟、非线性的槽式集热回路,无扰动时,相比传统PID控制,预测控制的超调量减少了2.54%,稳态时间减少了69.53%。与预测控制系统相比,PID

控制系统存在较大的超调量,会导致集热场出口热油超温严重,热油流量波动频繁,这不利于导热油流量调节机构的运行,对槽式集热场的安全稳定运行会产生一定的影响。在辐照、导热油入口温度和环境温度扰动下,预测控制系统体现出更好的鲁棒性,稳态时温度波动范围更小。超调量减少了2.57%,稳态时间减少了69.84%。因此,针对大惯性大延迟的槽式集热回路,本文所提预测控制系统控制效果强于传统PID控制效果。

## 【参考文献】

- [1] 李盛丰. 中国碳税法律制度构建研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2020.  
LI Shengfeng. Research on the construction of carbon tax legal system in China[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2020.
- [2] 宋子旭, 由世俊, 张欢, 等. 槽式太阳能新型腔式吸热器的热性能研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 475-479.  
SONG Zixu, YOU Shijun, ZHANG Huan, et al. Thermal performance of solar trough system with a novel cavity receiver[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(3): 475-479.
- [3] 闫云飞, 张智恩, 张力, 等. 太阳能利用技术及其应用[J]. 太阳能学报, 2012, 33(增刊1): 47-56.  
YAN Yunfei, ZHANG Zhien, ZHANG Li, et al. Application and utilization technology of solar energy[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2012, 33(Suppl.1): 47-56.
- [4] 殷志强. 探讨太阳能热利用发展[J]. 太阳能, 2009(6): 6-9.  
YIN Zhiqiang. Discussion on the development of solar thermal utilization[J]. Solar Energy, 2009(6): 6-9.
- [5] 胡成骏. 基于虚拟仪器的太阳能电池测试实验教学平台的设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.  
HU Chengjun. Design of the test experimental teaching platform of solar cell based on virtual instrument[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015.
- [6] 郝军, 王晨华, 王璟, 等. 二次反射塔式光热发电技术的发展前景分析[J]. 中国包装, 2017, 37(7): 62-65.  
HAO Jun, WANG Chenhua, WANG Jing, et al. Analysis of the development prospect of secondary reflection tower photothermal power generation technology[J]. China Packaging, 2017, 37(7): 62-65.
- [7] 熊亚选, 吴玉庭, 马重芳, 等. 槽式太阳能聚光集热器热性能数值研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(3): 495-498.  
XIONG Yaxuan, WUYuting, MA Chongfang, et al. Numerical study on thermal performance of parabolic trough collector[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(3): 495-498.
- [8] 郭苏, 刘德有, 张耀明, 等. 循环模式DSG槽式太阳能集热器出口蒸汽温度控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 62-68.  
GUO Su, LIU Deyou, ZHANG Yaoming, et al. Research on control strategy of outlet steam temperature for DSG in parabolic troughs solar power under recirculation operation mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 62-68.

- [9] JOHANSEN T A, STORAA C. Energy-based control of a distributed solar collector field[J]. *Automatica*, 2002, 38(7): 1191-1199.
- [10] STUETZLE T, BLAIR N, MITCHELL J W, et al. Automatic control of a 30 MWe SEGS VI parabolic trough plant[J]. *Solar Energy*, 2004, 76(1): 187-193.
- [11] FARKAS I, VAJK I. Internal model-based controller for solar plant operation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 49(3): 407-418.
- [12] HENRIQUES J, GIL P, CARDOSO A, et al. Adaptive neural output regulation control of a solar power plant[J]. *Control Engineering Practice*, 2010, 18(10): 1183-1196.
- [13] PASAMONTES M, ÁLVAREZ J D, GUZMÁN J L, et al. A switching control strategy applied to a solar collector field[J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(2): 135-145.
- [14] 朱瑞, 徐玉杰, 李斌, 等. 太阳能蓄热式压缩空气储能系统特性分析[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(6): 1536-1544. ZHU Rui, XU Yujie, LI Bin, et al. Characteristic analysis of solar regenerative compressed air energy storage system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(6): 1536-1544.
- [15] XU E, ZHAO D, XU H, et al. The Badaling 1 MW parabolic trough solar thermal power pilot plant[J]. *Energy Procedia*, 2015, 69: 1471-1478.
- [16] 历风满. 数字 PID 控制算法的研究[J]. *辽宁大学学报(自然科学版)*, 2005(4): 367-370.
- LI Fengman. The research of controlling arithmetic for figure PID[J]. *Journal of Liaoning University (Natural Science Edition)*, 2005(4): 367-370.
- [17] 安军涛. 基于模糊神经网络的智能 PID 控制器研究与设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010. AN Juntao. Research and design of intelligent PID controller based on fuzzy neural networks[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [18] 邹健. 智能预测控制及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002. ZOU Jian. Research on intelligent predictive control and its applications. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [19] 俞基安, 杜伟, 胡勇, 等. 基于阶梯式广义预测控制的脱硝优化控制应用[J]. *锅炉技术*, 2020, 51(4): 7-14. YU Ji'an, DU Wei, HU Yong, et al. Application of optimized denitration control based on stair-like generalized predictive control[J]. *Boiler Technology*, 2020, 51(4): 7-14.
- [20] 张昊清, 魏东, 熊亚选. 住宅小区燃气调压系统预测控制策略[J]. *电子技术与软件工程*, 2020(4): 229-232. ZHANG Haoqing, WEI Dong, XIONG Yaxuan. Predictive control strategy of gas pressure regulation system in residential community[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2020(4): 229-232.

(责任编辑 杜亚勤)