

热轧带钢层流冷却的精冷段 Smith PSO-BP-PID 反馈控制

任长辉, 田 海, 陶 震, 张 健, 雷思捷

(内蒙古科技大学 信息工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 为了实现对带钢卷取温度的精确控制, 采用以神经网络的前馈控制为主、反馈控制为辅的复合控制策略。层流冷却的精冷段属于大滞后、非线性系统, 针对大滞后问题提出使用 Smith 预估器进行补偿; 针对非线性问题, 采用多种手段优化的 PID 控制器, 加强其控制的实时性与动态性能。通过 BP 神经网络对 PID 控制器进行参数寻优, 使用粒子群优化算法对 BP 神经网络的初始权值和阈值进行优化, 并采用改进的粒子群算法来提高其迭代收敛速度。最后, 经过仿真验证了 Smith PSO-BP-PID 的超调量最小, 调节时间最短, 动态性能最好。

关键词: Smith 预估补偿; PID; BP-PID; PSO-BP-PID; Smith PSO-BP-PID

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.025

中图分类号: TG335.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 12-0177-05

Smith PSO-BP-PID feedback control on fine cold section for laminar cooling of hot rolled strip steel

Ren Changhui, Tian Hai, Tao Zhen, Zhang Jian, Lei Sijie

(School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: In order to achieve the accurate control of strip steel coiling temperature, a compound control strategy was adopted, which was based on the feedforward control of neural network and supplemented by the feedback control. The fine cooling section of laminar flow cooling was a nonlinear system with large lag, and Smith estimator was proposed to compensate for the problem of large lag. Aiming at the nonlinear problem, the PID controller optimized by various means was used to enhance the real-time and dynamic performance of its control. Furthermore, BP neural network was proposed to optimize the parameters of PID controller, and the particle swarm optimization algorithm was used to optimize the initial weights and thresholds of BP neural network, and the improved particle swarm algorithm was adopted to improve its iterative convergence speed. Finally, the simulation verifies that Smith PSO-BP-PID has the smallest overshoot, the shortest adjustment time and the best dynamic performance.

Key words: Smith estimated compensation; PID; BP-PID; PSO-BP-PID; Smith PSO-BP-PID

热轧冷却是热轧带钢获得良好的组织性能与力学性能的重要手段^[1]。冷却方式分为超快冷与层流冷却等, 在反馈控制过程中层流冷却会影响最终的卷取温度。针对层流冷却的控制方式, 国内外专家做了大量的研究。孙莉莉等^[2]在层流冷却控制中使用计算机+前馈控制, 其本质上是开环控制。郝智红^[3]在普通的 PID 控制算法中引入中立型延时控制的谱分解理论, 用来解决层流冷却的滞后问题, 但是实现有一定难度。刘恩阳等^[4]设计了层流冷却的

Smith+PI 控制方法, 使用 Smith 预估器对层流冷却的滞后问题进行了补偿, 但是 PI 控制器的积分项引入了延迟, 可能导致系统响应不够迅速。周继平等^[5]使用模糊 PID 算法对层流冷却进行控制, 取得了一定的控制效果, 但是模糊 PID 算法的模糊规则是根据自身经验设置的, 在产线改造升级时可能无法继续使用。李双红等^[6]使用广义预测控制算法对层流冷却的 PID 参数进行寻优, 带钢温度可以沿着最佳曲线降温, 但缺点是广义预测控制算法难以在线调整。李博群等^[7]使用径向基函数对 PID 参数进行寻优, 可以在线改善 PID 参数, 但是径向基函数的隐含节点中心难以求出。郭林峰等^[8]使用 BP 神经网络对 PID 参数进行调节, 针对 BP 神经网络易陷入局部极小值的问题, 提出使用快速模拟退火算法, 加快了 BP 神经网络的收敛速度, 改善了 PID

收稿日期: 2022-10-17; 修订日期: 2023-01-24

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金资助项目 (2022MS06005)

作者简介: 任长辉 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 2539018956@qq.com

通信作者: 田 海 (1968-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: tian680125@163.com

的动态性能,但是因为 BP 神经网络的初始权值与阈值对 BP 神经网络的影响很大,所以不适合在线使用。目前,大部分专家学者对层流冷却的控制均使用开环控制或者单一的闭环控制,较少研究复合控制策略。本文提出以神经网络的前馈控制为主、反馈控制为辅的控制方案,针对 PID 的反馈控制,为了提高其控制性能,采取多种手段的复合式控制方法。

神经网络与前馈控制已经非常完善,孙丽荣等^[9]使用前馈补偿的方法对热轧带钢的卷取温度进行预测,补偿后卷取温度的精度为 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。张帅等^[10]利用改进的灰狼优化极限学习机对热轧带钢卷取温度进行预测,在 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下命中率高达 91.1%。所以,本文不对神经网络与前馈控制进行过多的阐述。

本文主要是对层流冷却的精冷段进行分析和控制,以便精确控制带钢的卷取温度,使得卷取温度精确跟踪设定值。首先,针对层流冷却存在大滞后的问题,提出使用 Smith 预估补偿;其次,针对层流冷却具有非线性问题,提出使用 BP 神经网络对 PID 进行参数调整;然后,针对 BP 神经网络的初始权值与阈值问题,提出使用 PSO 优化 BP 神经网络的初始权值与阈值;最后,因为 PSO 优化 BP 神经网络的迭代速度较慢,提出使用改进后的粒子群优化 BP 神经网络的初始权值与阈值,以提高其收敛速度,使系统获得良好的动态响应与控制精度。

1 改进后的控制工艺

热轧带钢从精轧段出来后,在进入到卷取机之前,需要先通过超快冷段与层流冷却的粗冷段进行大幅度降温,然后进入到层流冷却的精冷段进行微调,最后经过十几米的空冷段进入卷取机。带钢的头部冷却控制采用神经网络预测加前馈控制,层流冷却的精冷段不动作,经过头部卷取后,使用 Smith PSO-BP-PID 控制器对层流冷却的精冷段进行控制,输入为实测温度加上空冷补偿与目标卷取温度的偏差。图 1 为热轧带钢冷却系统改进后的控制工艺图。在层流冷却的精冷段与卷取机之间相隔 13 m,采用空冷模型计算降温。

2 Smith PSO-BP-PID 模型

2.1 Smith 预估补偿

针对热轧带钢层流冷却的精冷段为大滞后系统的特点,提出在 PID 反馈控制的基础上加入 Smith

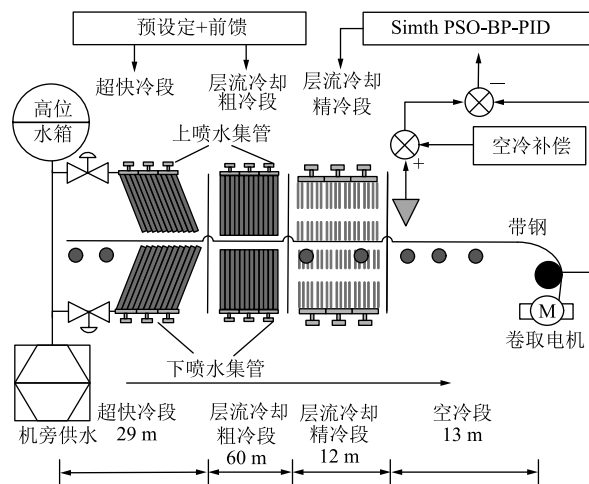


图 1 热轧带钢冷却系统改进后控制工艺图

Fig. 1 Control process diagram of cooling system for hot rolled strip steel after improvement

预估补偿。层流冷却精冷段的传递函数用 $G_0(s)e^{-\tau s}$ 表示,其中, τ 为系统的时间常数, s 为 Laplace 变换域中的复频率,则闭环结构框图如图 2 所示。图 2 中, $R(s)$ 为输入信号, $E(s)$ 为误差信号, $D(s)$ 为控制器, $U(s)$ 为控制器输出, $Y(s)$ 为输出信号, $G_0(s)$ 为未考虑时间延迟的传递函数。

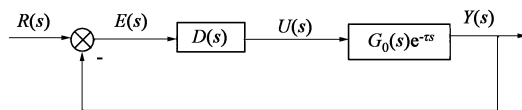


图 2 闭环结构框图

Fig. 2 Block diagram of closed-loop structure

闭环传递函数 $G_c(s)$ 的表达式为:

$$G_c(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{D(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1 + D(s)G_0(s)e^{-\tau s}} \quad (1)$$

特征方程为:

$$1 + D(s)G_0(s)e^{-\tau s} = 0 \quad (2)$$

从式 (2) 可以看出,闭环控制系统的特征方程带有纯滞后环节 $e^{-\tau s}$,当滞后环节很大时可以导致闭环系统不稳定,所以,针对此问题提出使用 Smith 预估补偿。Smith 预估补偿是并联在 $D(s)$ 上的,其补偿后的系统框图如图 3 所示。

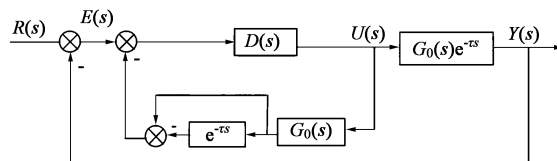


图 3 Smith 预估补偿后的系统框图

Fig. 3 System block diagram after Smith predictive compensation

从 $E(s)$ 到 $U(s)$ 的闭环传递函数的表达式为:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{D(s)}{1 + D(s)G_0(s)(1 - e^{-\tau s})} \quad (3)$$

使用 Smith 预估补偿的闭环传递函数 $G'_c(s)$ 的表达式为:

$$G'_c(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{D(s)G_0(s)}{1 + D(s)G_0(s)} e^{-\tau s} \quad (4)$$

从式 (4) 中可以看出, 使用 Smith 预估补偿后的闭环控制系统有效消除了纯滞后对控制系统的不利影响。

2.2 BP-PID 模型

热轧带钢控制系统的层流冷却的精冷段所使用的控制器为 PID 控制器, 传统 PID 控制器存在参数难以在线调整、鲁棒性差等缺点, 特别是当控制对象发生变化时, 原 PID 参数可能无法适用于新系统, 而 PID 控制器参数的再次设置非常消耗时间且无法保证设置的参数为最优参数。经过对比分析, BP 神经网络最突出的特点是在求解非线性和大滞后问题上具有优势, 所以, 提出使用 BP 神经网络对 PID 控制器进行参数寻优。

热轧带钢层流冷却的精冷段的反馈控制系统的 BP-PID 控制方案如图 4 所示, 其中, $r(k)$ 为设定降温温度, $y(k)$ 为实际降温温度, $u(k)$ 为控制器的输出, $e(k)$ 为 k 时间点层流冷却精冷段的设定降温温度与实际降温温度的偏差, K_p 、 K_i 、 K_d 分别为输出层的 3 个神经元。

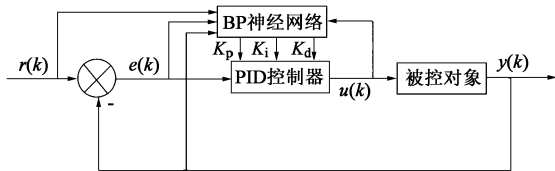


图 4 BP-PID 控制方案

Fig. 4 BP-PID control scheme

BP 神经网络分为输入神经元、隐含神经元、输出神经元^[11]。输入层神经元为 4 个, 分别为目标值、实际输出、偏差和控制变量。输出层神经元为 3 个, 分别为 K_p 、 K_i 和 K_d 。隐含层神经元的数量 n_1 由式 (5) 求出:

$$n_1 = \sqrt{n + m} + a \quad (5)$$

式中: n 为输入层神经元的数量; m 为输出层神经元的数量; a 为常数, 通常取 1~10。

经过调试, 隐含层神经元的数量设置为 5 个,

将系统误差的平方除以 2, 即 $[r(k) - y(k)]^2/2$ 作为评价指标 $E(k)$, 从而简化在梯度下降法时的导数计算, 使用梯度下降法, 计算输入层到隐含层的加权系数 $\Delta\omega_{ij}$ 与隐含层到输出层的加权系数 Δq_{jl} , 其中 i 、 j 、 l 分别表示为输入层、隐含层、输出层节点。BP-PID 流程图如图 5 所示。

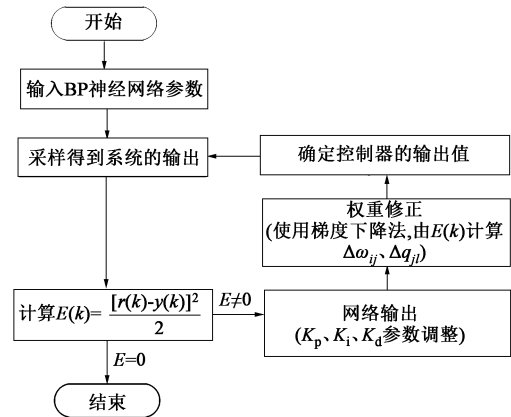


图 5 BP-PID 流程图

Fig. 5 Flow chart of BP-PID

2.3 PSO-BP-PID 模型

BP 神经网络的缺陷是初始权值难以设置, 初始权值设置不当时, 会造成神经网络陷入局部最优, 并导致训练速度慢等。而粒子群的优点为可以快速找到全局最优, 且粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) BP (PSO-BP) 神经网络可以克服 BP 神经网络的缺点^[12], 进而更好地对 PID 参数进行全局寻优, 为了方便查看 PSO 对 BP 神经网络进行了几次寻优, 设置步数 T ^[13], PSO-BP-PID 的流程图如图 6 所示。

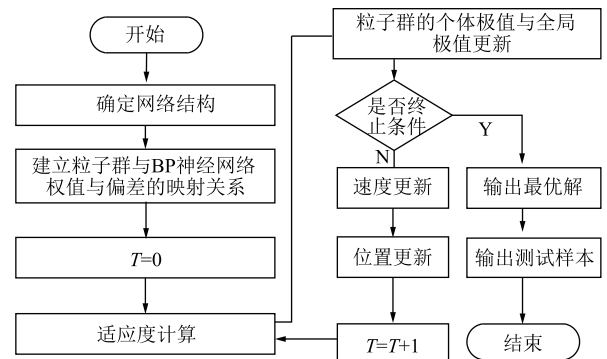


图 6 PSO-BP-PID 寻优流程图

Fig. 6 Flow chart of PSO-BP-PID optimization

2.4 改进粒子群算法

因为 PSO-BP 神经网络的迭代速度较慢, 所以采用改进的粒子群算法^[14-15]。标准粒子群惯性权重

ω^i 的迭代公式如式 (6) 所示:

$$\omega^i = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times \frac{iter}{iter_max} \quad (6)$$

式中: ω_{\max} 为最大惯性权重值; ω_{\min} 为最小惯性权重值; $iter$ 为当前的迭代次数; $iter_max$ 为粒子群最大迭代次数。

标准的粒子群算法中, ω^i 在前期快速下降, 会导致前期搜索不足, 后期迭代缓慢。针对此现象, 对 ω^i 进行加权处理, 改进后的公式如式 (7) 所示:

$$\omega^i = \omega_{\max} - \frac{(iter - 1) \times (\omega_{\max} - \omega_{\min})}{iter_max - 1} \quad (7)$$

使用 Smith 预估补偿加改进后的粒子群优化 BP 神经网络对 PID 寻优 (Smith PSO-BP-PID), 运行时间如表 1 所示。带钢通过层流冷却的精冷段的时间约为 8.0 s, 而程序运行时间为 1.3 s, 能够满足在线实时调整 PID 参数的需要。

表 1 Smith PSO-BP-PID 平均运行时间对比 (s)

Table 1 Comparison of average running time for Smith PSO-BP-PID (s)

运行次数	10	100	1000	1500	2000
改进前	15.4182	14.9421	15.4274	15.3431	15.3017
改进后	1.2626	1.1741	1.2104	1.2056	1.2012

3 Smith PSO-BP-PID 仿真

3.1 模型指标

模型指标一般由超调量 $\sigma\%$ 、调节时间 t_s 、峰值时间 t_p 3 部分判定。超调量公式为:

$$\sigma\% = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (8)$$

式中: $c(t_p)$ 为系统的最大偏离量; $c(\infty)$ 为系统的最终稳定值。

调节时间表示为系统在输入给定之后, 经过一定时间的响应进入到 $\pm 5\%$ 的误差带之内的最短时间, 峰值时间表示控制系统从开始达到第 1 个最高峰值所需要的时间。

3.2 仿真分析

根据现场工艺情况, 层流冷却的精冷段的传递函数可以近似为 $\frac{0.9}{s+1}e^{-4.1s}$ [16], Smith PSO-BP-PID 控制方案原理图如图 7 所示, 补偿之后的仿真曲线如图 8 所示, PID 的模型指标如表 2 所示。根据表 2 可知, Smith PSO-BP-PID 模型在对热轧带钢层流冷却精冷段的大滞后问题上进行了补偿, 使其大幅度降

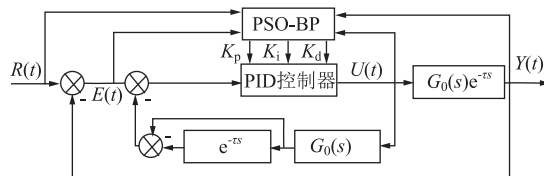


图 7 Smith PSO-BP-PID 控制框图

Fig. 7 Block diagram of Smith PSO-BP-PID control

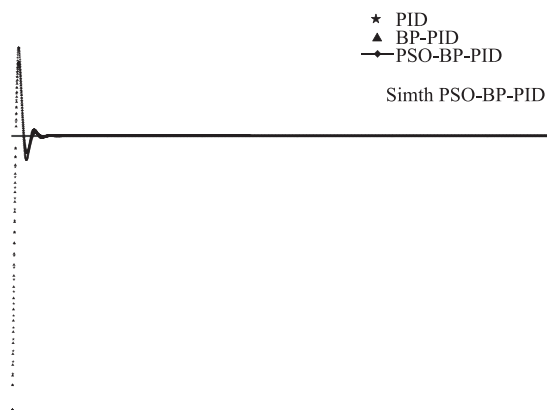


图 8 Smith PSO-BP-PID 模型与其他模型的仿真曲线对比

Fig. 8 Comparison of simulation curves between Smith PSO-BP-PID model and other models

表 2 Smith PSO-BP-PID 模型与其他 PID 模型的指标对比

Table 2 Comparison of indexes between Smith PSO-BP-PID model and other PID models

模型	PID	BP-PID	PSO-BP-PID	Smith PSO-BP-PID
超调量 $\sigma\%$	32.32	27.00	20.15	0.03
峰值时间 t_p/s	0.48	0.48	0.19	0.33
调节时间 t_s/s	5.22	4.89	2.55	0.50

低了超调量, 并且调节时间也得到了有效减少, 动态性能也得到有效提高。观察图 8 可知, 使用 Smith PSO-BP-PID 控制器的调节系统的稳态误差小, 系统调节快, 稳定性好。

4 结论

(1) 本系统采用复合控制策略, 在超快冷段与层流冷却的粗冷段采取基于卷取温度预测的预定+前馈控制, 在层流冷却的精冷段采取组合优化的 PID 闭环控制策略。

(2) 由于热轧带钢层流冷却的精冷段是大滞后

系统, 针对大滞后问题, 提出了使用 Smith 预估器对滞后问题进行补偿。

(3) 由于 PID 控制器的参数难以在线调整, 提出了使用 BP 神经网络对 PID 参数寻优, 由于 BP 神经网络的初始权值和阈值对 BP 神经网络影响很大, 因此, 使用 PSO 对 BP 神经网络的初始权值与阈值进行优化, 因为 PSO 优化 BP 神经网络的迭代速度较慢, 不适合工业在线控制时使用, 所以提出使用改进的粒子群算法, 大大提高其运行速度, 改进后运行时间为 1.3 s, 完全满足在线使用要求。

(4) 使用 Smith PSO-BP-PID 控制器进行仿真, 仿真结果表明, 使用 Smith PSO-BP-PID 控制器的超调量最小, 调节时间最短, 动态性能最好。

参考文献:

- [1] Chen D, Zhang R, Li Z L, et al. Temperature distribution prediction in control cooling process with recurrent neural network for variable-velocity hot rolling strips [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120 (11): 7533–7546.
- [2] 孙莉莉, 李博. 安钢集团热连轧层流冷却过程控制系统研究及优化 [J]. 数字技术与应用, 2015, (4): 18.
Sun L L, Li B. Research and optimization of laminar cooling process control system for hot strip rolling in Anshan Iron & Steel Group [J]. Digital Technology & Application, 2015, (4): 18.
- [3] 郝智红. 谱分解理论在热轧卷取温度控制系统改造中的应用 [J]. 冶金自动化, 2014, 38 (3): 29–32.
Hao Z H. Application of spectral decomposition theory on retrofit of hot strip coiling temperature control system [J]. Metallurgical Industry Automation, 2014, 38 (3): 29–32.
- [4] Liu E Y, Zhang D H, Sun J, et al. Algorithm design and application of laminar cooling feedback control in hot strip mill [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2012, 19 (4): 39–42.
- [5] 周继平, 田海, 魏学松. 短冷却线 UFC 工艺控制系统优化——基于轧后冷却技术 [J]. 工业技术创新, 2022, 9 (1): 113–122.
Zhou J P, Tian H, Wei X S. Optimization on control system for short cooling line UFC process-Based on post-rolling cooling technology [J]. Industrial Technology Innovation, 2022, 9 (1): 113–122.
- [6] Li S H, Li X, Yang Y P. Intelligent model building and GPC-PID based temperature curve control strategy for metallurgical industry [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, (3): 7454805. 1-7454805. 16.
- [7] Li B Q, Zhang S L, Wang J J, et al. Application of RBF-PID to MN-AGC in hot continuous rolling [A]. Proceeding of 2020 Chinese Control and Decision Conference (CCDC) [C]. Hefei: IEEE, 2020.
- [8] Gou L F, Shao W X, Zeng X Y, et al. Rapid simulated annealing algorithm for optimization of aeroengine control based on BP neural network [A]. Proceeding of Chinese Control Conference (CCC) [C]. Guangzhou: IEEE, 2019.
- [9] 孙丽荣, 王国栋, 文雄, 等. 热轧带钢卷取温度前馈补偿的方法研究 [J]. 重型机械, 2022, (3): 68–72.
Sun L R, Wang G D, Wen X, et al. Research on feedforward compensation method of system identification for coiling temperature of hot strip mills [J]. Heavy Machinery, 2022, (3): 68–72.
- [10] 张帅, 王俊杰, 李爱莲, 等. 基于改进 GWO-ELM 的热轧带钢卷取温度预测 [J]. 电子测量技术, 2021, 44 (22): 50–55.
Zhang S, Wang J J, Li A L, et al. Improved GWO-ELM based hot rolled strip coiling temperature prediction [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44 (22): 50–55.
- [11] 张坚, 双远华, 胡建华, 等. 基于改进的 BP 神经网络无缝钢管连轧轧制力的预测 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 153–160.
Zhang J, Shuang Y H, Hu J H, et al. Prediction on rolling force in continuous rolling of seamless steel pipe based on improved BP neural network [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 153–160.
- [12] 朱其萍, 徐红玉, 王晓强, 等. 基于 PSO-BP 的超声滚挤压轴承套圈表面加工硬化程度预测 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 190–196.
Zhu Q P, Xu H Y, Wang X Q, et al. Prediction on degree of work hardening for surface of bearing ring by ultrasonic rolling extrusion based on PSO-BP [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 190–196.
- [13] 彭月, 苏芷玄, 杨杰, 等. 基于 PSO-BP-PID 单点混合悬浮球控制算法研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19 (6): 1511–1520.
Peng Y, Su Z X, Yang J, et al. On hybrid single-point magnetic levitation ball control algorithm based on BP-PID [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19 (6): 1511–1520.
- [14] Dong Y K, Zhang Y, Liu F B, et al. Research on an optimization method for injection-production parameters based on an improved particle swarm optimization algorithm [J]. Energies, 2022, 15 (8): 1–18.
- [15] Wang Y T, Liu J, Li R, et al. Application of PSO-BPNN-PID controller in nutrient solution EC precise control system: Applied research [J]. Sensors, 2022, 22 (15): 58.
- [16] 魏学松, 田海, 周继平. 卷曲温度控制系统的设计与研究 [J]. 自动化应用, 2021, (10): 4–9.
Wei X S, Tian H, Zhou J P. Research and design of curling temperature control system [J]. Automation Application, 2021, (10): 4–9.