

改进 PID 算法在浆液 PH 值控制系统中的应用

张许平, 周 兵, 周崇明

(南京工业大学 电气工程与控制科学学院, 南京 211800)

摘要: 为了对浆液 pH 值控制系统进行全面的优化控制, 使整个系统在最佳状态下运行, 提出了一种改进 PID 算法; 该算法利用单神经元具有自适应、自学习能力的优势, 将神经元加入到 PID 算法中后, 改进了控制系统稳定性和控制性能较差的问题; 并结合浆液 pH 值控制系统的特点; 设计了算法的具体流程; 最后, 利用改进前后的两种算法对优化问题进行了仿真分析, 结果表明单神经元自适应 PID 算法具有更好的优化效果。

关键词: PH 控制系统; PID 算法; 单神经元; 自适应

Application of Improved PID Algorithm in the Slurry PH Value Control System

Zhang Xuping, Zhou Bing, Zhou Chongming

(School of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing University of Technology, Nanjing 211800, China)

Abstract: For the optimization of slurry pH value control system to conduct a comprehensive control, the whole system run in the best state, an improved PID algorithm. The algorithm using single neuron with the advantages of adaptive, self-learning ability, after the neurons into the PID algorithm, the improved control system stability and control performance is poor; Combined with the characteristics of slurry pH value control system, designs the concrete process of the algorithm. In the end, both before and after using the improved algorithm for optimization problems are analyzed in the simulation, the results show that the single neuron adaptive PID algorithm has better optimization effect.

Keywords: PH control system; PID algorithm; single neuron; self-adaption

0 引言

随着社会环保意识的加强, 对燃煤电厂的发电过程中脱硫效率的要求也越来越高, 而随着脱硫工艺规模庞大, 设备类型繁多, 脱硫工艺的环境也变得越来越复杂, 其中吸收塔石灰石浆液 pH 值是一个非常重要的参数, 其变化一般具有非线性、大滞后、大惯性等特点^[1], 因直接对实际 pH 值控制系统的研究比较困难, 而且容易造成系统运行不稳定并存在一定的安全隐患, 故对其进行 Matlab 仿真研究^[2]。

本文以吸收塔浆液 pH 值为控制背景, 通过建立石灰石浆液 pH 值控制系统模型, 从而对控制系统进行仿真研究, 以获得一种性能指标更优的控制方案去指导实际控制系统算法的设计。

1 pH 值控制系统的结构图

本文以江苏省某燃煤电厂脱硫项目为背景, 在其脱硫吸收塔浆液 pH 值控制系统中, 影响 pH 值的因素主要有浆液流量、入口烟气量、烟气中 SO₂ 的比例和石灰石浆液供应量等^[3]。但锅炉恒定功率工作时, 产生的烟气量基本不变, 烟气中 SO₂ 的比例受燃煤原料变化的影响, 其变化相对于其它因素是比较小的。因此在 pH 值控制系统中, 入口烟气量和烟气中 SO₂ 量可以干扰量, 而石灰石浆液量作为调节参数。所以只要调节好浆液流量, 就能控制 pH 值在预设定值范围内, 从而保证较佳的脱硫效率^[4]。

因 pH 值的变化缓慢、精度要求高, 而浆液的流量控制相对比较快速、控制精度较低, 故采用串级控制系统结构, 主控

制器用来维持 pH 值的稳定与设定值; 为避免积分作用的引入导致负回路谐振峰值加大, 谐振频率降低, 而增大主、副回路共振的可能, 所以采用 PI 控制器, 副控制器接受主控制器的输出信号, 输出石灰石浆液控制阀门开度信号。系统的结构图如图 1 所示。

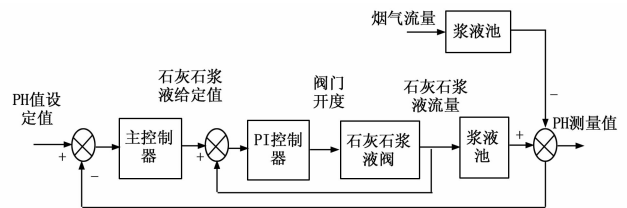


图 1 pH 值控制系统结构图

2 pH 值控制系统的数学模型

由控制系统的结构图可知, 在进行仿真研究之前应建立浆液池和石灰石浆液阀这两个子模型, 建立过程如下。

2.1 浆液池模型

2.1.1 确定传递函数

通过连续观察燃煤电厂浆液 pH 值的阶跃响应曲线图, 发现该过程是一个纯滞后、自平衡、单输入输出的系统, 并发现阶跃响应曲线基本符合一阶惯性环节。所以浆液池的数学模型可以用一阶惯性加滞后环节来描述, 其传递函数的形式如下所示:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1} \quad (1)$$

其中: T 为时间常数, 与系统反应速度成反比; τ 为纯滞后时间, 会使控制质量下降, 使被控量产生共振, K 为对象的放大系数, 与稳态误差成反比, 与被控参数对输入参数的变化灵敏度成正比。

收稿日期:2015-12-24; 修回日期:2016-01-18。

作者简介:张许平(1991-),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事智慧城市应急决策与控制方面的研究。

2.1.2 测定 pH 值过程阶跃响应曲线

在浆液变化时，每隔 10 s 记录一次 pH 值，得到相应 pH 数据如表 1 所示：

表 1 pH 值阶跃响应实验所测数据

t/s	0	10	20	30	40	50	60	70	80
pH	5.20	5.21	5.20	5.21	5.22	5.21	5.21	5.23	5.24
t/s	90	100	110	120	130	140	150	160	170
pH	5.23	5.22	5.22	5.30	5.38	5.41	5.50	5.39	5.51
t/s	180	190	200	210	220	230	240	250	260
pH	6.01	6.52	6.84	7.12	7.50	7.61	7.72	7.76	8.02
t/s	270	280	290	300	310	320	330	340	350
pH	8.25	8.39	8.63	8.62	8.70	8.48	8.77	8.82	9.01
t/s	360	370	380	390	400	410	420	430	440
pH	8.92	9.00	9.01	8.97	8.91	9.00	8.91	8.94	8.98

通过以上所测得的数据，利用 matlab 得到阶跃响应曲线如图 2 所示。

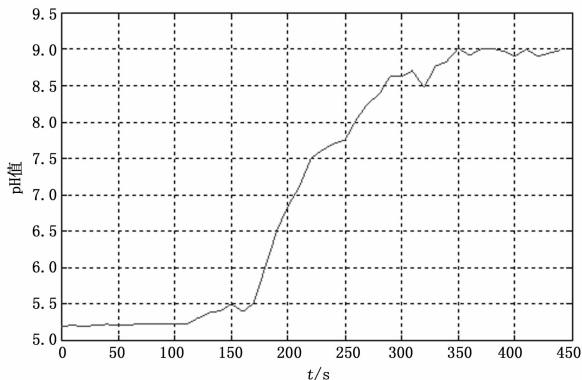


图 2 pH 值阶跃实验响应曲线

2.1.3 用两点法确定 pH 值浆液池数学模型

浆液池的基本模型如式 (2) 所示。则放大系数 K 为：

$$k = \frac{y(\infty) - y(0)}{x} = \frac{9.01 - 5.20}{1.97} = 1.934 \quad (2)$$

因曲线的起点为 $(0, 5.20)$ ，所以要将横坐标向上移 5.20，所以当 $r(t) = x * 1(t)$ 时有：

$$y(t) = \begin{cases} 0 & t < \tau \\ kx(1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}}) & t \geq \tau \end{cases} \quad (3)$$

从响应曲线上选取两个既能代表曲线特征又方便计算的两个点计算 T 和 τ 的值，本文选取 $(190, 0.393y(\infty))$ 和 $(230, 0.632y(\infty))$ 这两个点，代入公式 (3) 可以求得 $T = 80, \tau = 150$ ，为了验证参数的准确性，我们又选取了另外两个点进行验证：当 $t_1 = 183 \text{ s}, t_2 = 260 \text{ s}$ 时，代入验证公式得： $y(t_1) = 1.243, y(t_2) = 2.806$ ，结合曲线图验证：

$$\begin{cases} 0.327y(\infty) = 1.242 \approx y(t_1) = 1.243 \\ 0.739y(\infty) = 2.808 \approx y(t_2) = 2.806 \end{cases} \quad (4)$$

从计算验证结果可以看出，所求参数符合模型系统的要求，故所得的数学模型为：

$$W = \frac{1.93}{80s + 1} e^{-150s} \quad (5)$$

2.2 石灰石浆液阀模型

石灰石浆液阀模型的输入为石灰浆液泵的转速，输出是浆液流量，它是根据浆液池中 pH 值的变化而变化，为了便于分析，

假定石灰石浆液阀的动作是连续的，根据自动控制原理，石灰石浆液阀的模型属于典型的一阶模型，其传递函数可以表示为：

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (6)$$

根据自动控制原理的知识可知，其阶跃响应曲线如图 3 所示。

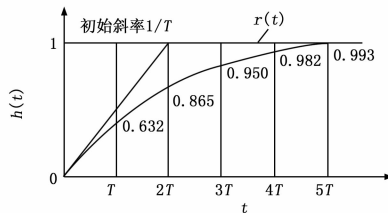


图 3 一阶系统单位阶跃响应曲线

根据本文的项目设备清单可知，浆液流量 $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ ，石灰石浆液泵的额定功率为 15.2 kW，额定转速为 $n = 1470 \text{ r/min}$ ，浆液阀门的开启时间为 15 s。由此计算出时间常数 $T = 3 \text{ s}$ ，增益 $K = 1.63$ ，故石灰石浆液阀的数学模型为：

$$G(s) = \frac{1.63}{3s + 1} \quad (7)$$

3 单神经元自适应 PID 的控制方法

常规的 PID 控制器是在电厂过程中引用最为广泛的一种闭环控制器，具有适用面广、算法原理简单、可靠性强等特点^[5]，对于建立精确模型的被控对象有着比较好的效果^[6]。而浆液 pH 值系统是一个时变性、非线性和过程复杂的动态系统，不适合建立精确模型，且常规 PID 的参数整定是一件非常繁琐的工作，由常规 PID 控制系统所得的调节时间、超调量都难以让人满意。而单神经元具有自适应、自学习能力、易于计算和结构简单等特点，故本文将其与常规的 PID 控制相结合，构建了单神经元自适应 PID 控制算法，并应用在燃煤电厂吸收塔石灰石浆液 pH 值控制系统中，能很好的适应环境变化，有较强的鲁棒性，在一定程度上提高了常规 PID 控制效果^[7-8]。

基于以上思路，在常规 PID 控制系统的原理图基础上，构建了单神经元自适应 PID 控制算法的结构框图，如图 4 所示。

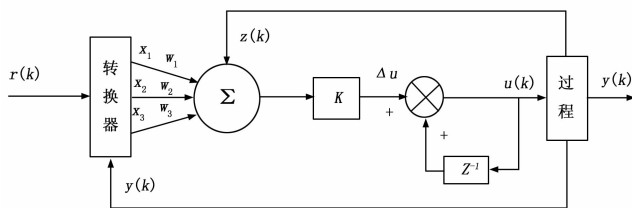


图 4 单神经元 PID 控制系统框图

在本文的控制系统中转换器的输入值设定为 $r(k)$ ，经过转化器后成为神经元的输入量 x_1, x_2, x_3 ，对象的输出值为 $y(k)$ 。其中 $z(k)$ 为神经元递推信号， $z(k) = e(k)$ ， w_i 为对应的加权系数， k 为神经元增益比例系数，且 $k > 0$ ，则神经元产生的控制信号为：

$$u(k) = u(k-1) + k \sum_{i=1}^3 w_i x_i \quad (8)$$

其中： x_i 为神经元输入的 x_1, x_2, x_3 ，而且：

$$\begin{cases} x_1 = r(k) - y(k) = e(k) \\ x_2 = e(k) - e(k-1) = \Delta e(k) \\ x_3 = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) = \Delta^2 e(k) \end{cases} \quad (9)$$

则控制量 $u(k)$ 的增量 $\Delta u(k)$ 为:

$$\Delta u(k) = k[\omega_1 e(k) + \omega_2 \Delta e(k) + \omega_3 \Delta^2 e(k)] \quad (10)$$

因为常规的 PID 控制算法的公式为:

$$u(t) = k_p \left[e(t) dt + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (11)$$

则 $u(t)$ 的增量 $\Delta u(t)$ 为:

$$\Delta u(t) = k_p e(t) + k_i e(t) + k_d [\Delta e(t) - \Delta e(t-1)] \quad (12)$$

将式 (10) 与 (12) 进行对比, 发现两种控制规律的形式完全相同, 不同的是 (10) 中权值 ω_i 可以通过单神经元自学习能力自适应的调整, 而常规的 PID 控制算法中的参数是事先设定好的, 整个控制工程中都不会发生变化, 故单神经元的 PID 控制算法提高了控制系统的鲁棒性。

本文单神经元自适应 PID 算法的学习规则是采用有监督 Hebb 的学习规则, 其算法神经元是在教师信号 $e(k)$ 的指导下, 通过外界未知环境变化进行自主学习, 调整各状态量的加权系数 ω_i , 使系统输出 $y(k)$ 适时的发生变化^[9]。具体算法实现的表现形式如下:

$$\begin{cases} \omega_1(k+1) = \omega_1(k) + \eta_p e(k) u(k) x_1(k) \\ \omega_2(k+1) = \omega_2(k) + \eta_i e(k) u(k) x_2(k) \\ \omega_3(k+1) = \omega_3(k) + \eta_d e(k) u(k) x_3(k) \end{cases} \quad (13)$$

其中 η_p, η_i, η_d 表示比例、积分、微分的学习速率。为了保证学习算法的收敛性和控制鲁棒性, 对上述学习算法进行规范化处理可得:

$$\begin{cases} \omega_1(k+1) = \omega_1(k) + \eta_p e(k) u(k) x_1(k) \\ \omega_2(k+1) = \omega_2(k) + \eta_i e(k) u(k) x_2(k) \\ \omega_3(k+1) = \omega_3(k) + \eta_d e(k) u(k) x_3(k) \\ \omega'_i(k) = \frac{\omega_i(k)}{\sum_{i=1}^3 \omega_i(k)} \\ \Delta u(k) = k \sum_{i=1}^3 \omega'_i(k) x_i(k) \end{cases} \quad (14)$$

综上所述, 单神经元自适应 PID 控制的流程如图 5 所示。

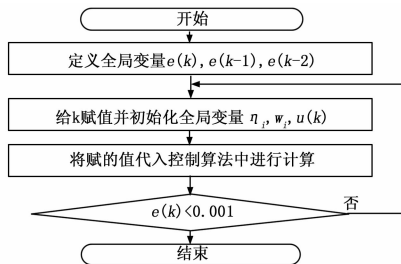


图 5 单神经元自适应 PID 控制流程图

4 PH 值控制系统仿真分析

在该控制算法中, 比例、积分、微分的学习速率应取不同的值, 以便对它们的权重系数进行分别调整^[10]。在监督 Hebb 学习算法中可调的参数有四个, 分别为 η_p, η_i, η_d 和 k , 它们的选取规律一般如下:

- (1) 初始值可以任意选取。
- (2) 在调整学习速率时, η_d 选择较小值, 先调整其他参数, 当对象有较好的性能后再逐渐增大 η_d ; 当对象响应特性上升时间短, 超调大时, 则应减少 η_i , 其他参数不变; 如果上

升时间长, 但调 η_p 又会超调过大, 则增加 η_p 。

(3) 增益 k 是系统最敏感的参数, 故先选定一个值, 再根据仿真与实验结果进行调整, 对于阶跃响应, 若超调量较大, 则减小 k 值, 若上升时间长, 无超调则应增大 k 值。

根据以上规则, 在本文的 pH 值控制系统中, 各个参数取值如下: 增益 k 设置为 1.3, 学习速率 $\eta_p = 200, \eta_i = 0.36, \eta_d = 10$, 神经元连接权系数初始值为 $\omega_i = 0.1$, 采样周期选择 1 s。

在常规的 PID 控制系统的仿真模型中, 依据其相应的参数选定规则, 并结合实际中多次仿真分析比较, 得出当 $k_p = 0.32, T_i = 238, T_d = 63$ 时, 控制效果较优。

基于以上基础, 将常规的 PID 控制算法和单神经元自适应 PID 控制算法应用在相同条件下进行仿真分析, 二者仿真运行结果如图 6、图 7 所示。

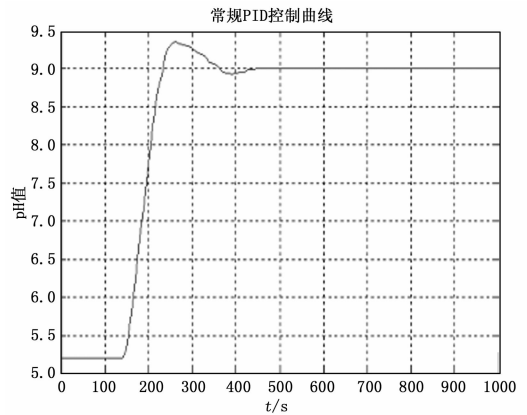


图 6 常规 PID 控制曲线图

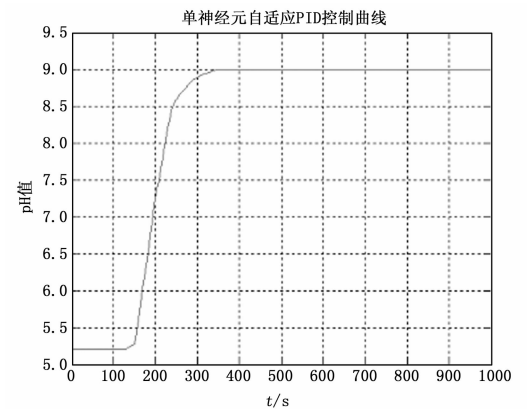


图 7 单神经元自适应 PID 控制曲线图

由仿真结果可知: 两种控制器性能指标如表 2 所示。

表 2 性能指标对比表

性能指标	类型	超调量 $\sigma\%$	调节时间 t_{ss}	稳态误差 e_{ss}
	常规 PID		6.9%	426
单神经元自适应 PID		0	328	0

对比表 2 可以看出, 与常规的 PID 控制器相比, 当采用本文的单神经元自适应 PID 控制时, 系统基本无超调, 调节时间减少, 系统的稳定性增强, 具有更优的控制品质。

5 结论

本文首先根据吸收塔工艺流程的特点,设计了 pH 值的串级控制系统结构,并结合实测 pH 值阶跃响应数据建立了浆液阀、浆液池的数学子模型,然后对该模型进行了算法优化。针对常规 PID 控制系统稳定性较差、控制性能较差的问题,把具有自适应、自学能力的单神经元加入 PID 算法中。然后,结合浆液 pH 值控制系统的特点,对算法流程进行了具体设计。最后在 Matlab/Simulink 平台上对两种算法进行了仿真分析,研究结果表明单神经元自适应 PID 控制系统更稳定,控制性能更优。

参考文献:

[1] 李波. DCS 在火力发电厂烟气脱硫控制系统的应用及实施 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
 [2] 马银萍. 生物柴油提炼过程的监控系统设计与实现 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014.

[3] 王俊. 火力发电厂石灰石—石膏湿法脱硫系统优化运行研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
 [4] 丁宁, 杨玉林, 王关晴, 等. 湿法烟气脱硫中脱硫效率影响因素及调节方法研究 [J]. 能源工程, 2009 (02): 39-41.
 [5] 王伟. 具有故障检测功能的新型温度控制器研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013.
 [6] Damour C, Benne M, Lebreton C, et al. Real-time implementation of a neural model-based self-tuning PID strategy for oxygen stoichiometry control in PEM fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy. 2014, 39: 12819-12825.
 [7] 张丽丽, 王玉惠, 陈峭东, 等. 基于改进的神经元 PID 战术网络拥塞控制 [J]. 电光与控制, 2013 (10): 14-17.
 [8] 王艳杰, 陈得友. 基于神经元纠偏控制的非线性系统鲁棒性研究 [J]. 科技通报, 2015 (10): 184-186.
 [9] 蔡红梅, 张光利. 基于模糊 PID 控制算法的回转窑温度控制系统的研究 [J]. 现代电子技术, 2015 (23): 167-170.
 [10] 梁宇恩, 钱飞, 许素安. 基于单神经元 PID 控制器的压电陶瓷控制方法 [J]. 计算机测量与控制, 2015 (11): 3657-3660.

(上接第 86 页)

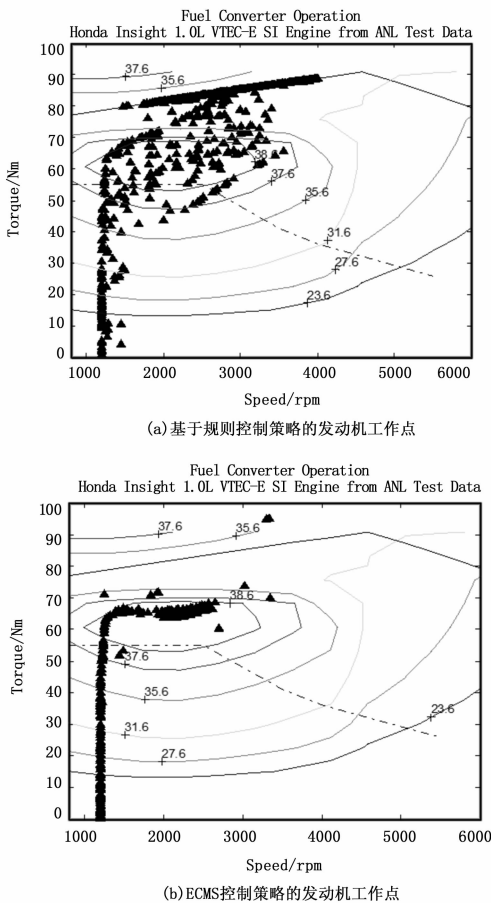


图 6 NEDC 路况下发动机工作点

4 结论

本文通过对 ISG-FHEV 进行等效燃油消耗分析,设计了一种包含发动机和电机驱动系统的功率分配、ISG 电机和主电机间的功率分配两个控制变量的等效燃油消耗最小策略,并进行了仿真和对比分析。结果表明,采用等效燃油消耗最小策略

后,与基于规则的控制策略相比,ISG-FHEV 的发动机效率提高了 9%,电机总效率提高了 11.4%,百公里耗油量降低了 9.98%,节能效果明显。

参考文献:

[1] 欧阳明高. 我国节能与新能源汽车发展战略与对策 [J]. 汽车工程, 2006, 28 (4): 317-321.
 [2] 张晓伟, 孙逢春, 邢杰, 等. 基于 CAN 总线的混合动力汽车监控系统开发 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (10): 2427-2429.
 [3] 秦大同, 叶心, 胡明辉, 等. ISG 型中度混合动力汽车驱动工况控制策略优化 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (12): 86-92.
 [4] 秦大同, 隗寒冰, 段志辉, 等. 重度混合动力汽车油耗和排放多目标实时最优控制 [J]. 机械工程学报, 2012, 48 (6): 83-89.
 [5] Adhikari S, Halgamuge S, Watson H C. An online power-balancing strategy for a parallel hybrid electric vehicle assisted by an integrated starter generator [J]. IEEE Vehicular Technology Society, 2010, 59 (6): 2689-2699.
 [6] 秦大同, 刘东阳, 杜波, 等. 重度混合动力汽车驱动模式切换动力源转矩协调控制 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (7): 151-158.
 [7] Paganelli G, Delprat S, Guerra T M, et al. Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid power trains [A]. Proceedings of the 2002 Vehicle Technology Conference [C]. 2002: 2076-2081.
 [8] Jihun H, Youngjin P, Dongsuk K. Optimal adaptation of equivalent factor of equivalent consumption minimization strategy for fuel cell hybrid electric vehicles under active state inequality constraints [J]. Journal of Power Sources, 2014, 267 (1): 491-502.
 [9] Sciarretta A, Serrao L, Dewangan P C. A control benchmark on the energy management of a plug-in hybrid electric vehicle [J]. Control Engineering Practice, 2014 (29): 287-298.
 [10] 林歆悠, 孙冬野. 基于 ECMS 混联式混合动力客车工况识别控制策略 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2012, 39 (10): 43-49.
 [11] 杨阳, 巩慧, 秦大同, 等. 基于效率优化的 CVT 重混汽车驱动控制策略 [J]. 中国公路学报, 2014, 27 (3): 108-115, 121.
 [12] Sciarretta A, Back M, Guzzella L. Optimal control of parallel hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12 (3): 352-363.