

一类时变系统中补偿器的功能和设计

开平安¹, 曾世权², 邓 慧^{2†}

(1. 国家发展和改革委员会 能源研究所, 北京 100055; 2. 暨南大学 能源电力研究中心, 广东 珠海 519070)

摘要: PID控制器由于其结构简单和参数整定容易, 具有良好的控制功能, 被广泛应用在工程上的线性确定性系统中. 但是, 在非线性和不确定性系统中, PID控制器由于其固定的控制参数和结构限制, 很难克服系统中内外干扰的影响, 控制器鲁棒性能较差. 本文按照被控对象中的标称模型设计常规PID控制器优化参数, 对非线性系统中多个线性化模型和不确定性系统中的不同工作点模型, 设计了一类补偿器, 使得整个闭环系统具有与标称模型下相同的控制品质. 工程应用例子论证了本文提出的补偿器能提高不确定与非线性系统的控制品质和鲁棒性能.

关键词: PID控制器; 系统鲁棒性能; 补偿器; 时变系统; 间隙度

引用格式: 开平安, 曾世权, 邓慧. 一类时变系统中补偿器的功能和设计. 控制理论与应用, 2022, 39(6): 1098 – 1102

DOI: 10.7641/CTA.2021.10155

Function and design of compensator for time-variant system

KAI Ping-an¹, ZENG Shi-quan², DENG Hui^{2†}

(1. Energy Research Institute, State Development and Reform Committee of China, Beijing 100055, China;

2. Energy and Electricity Research Center, Jinan University, Zhuhai Guangdong 519070, China)

Abstract: The PID controller is widely applied in the liner time-invariant plants for all types of industries, due to the simple structure and easy tuning. However, the poor robustness is found in the application of PID Controller within the time-variant and non-linear plants, because of the fixed structure and parameters. The study presents a compensator to enhance control quality and robust performance in time-variant or non-linear plants for the PID controller based on the transfer function of nominal operation case. Under several optimization criteria, the compensator is designed by the maximum of gap metric within uncertain or non-linear model, it is shown that the outputs of control system for the different operational situations are same as the nominal operation cases. Furthermore, the engineering examples confirm the fine control quality and robust performances of the control systems with the compensator in the time-variant systems.

Key words: PID controller; system robust performance; compensator; time-variant system; gap metric

Citation: KAI Ping'an, ZENG Shiquan, DENG Hui. Function and design of compensator for time-variant system. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(6): 1098 – 1102

1 引言

由于功能完整、结构简单和参数易整定, PID控制器被广泛应用在实际过程控制中^[1], 特别是对于确定性时不变系统^[2], 有良好控制功能和控制品质. 但对于时变过程对象, 受限于其固定的控制参数和结构, PID控制器难以满足在对象在不同时间工况点下的品质要求^[3-4], 实现PID在非线性和不确定对象上的鲁棒性能增强^[5-6], 对拓展PID控制器应用范围, 有重要意义, 一般来说, 有以下两类途径.

第1类途径是PID参数优化整定, 如Grimholt等^[7]利用基于梯度优化的有限差方法, 来预估PID参数,

Huang等^[8]提出P系统变体算法对PID参数进行多目标优化, Martins^[9]使用积分最小时间标准, 设计PID参数优化算法, 但以上方法一般需要建立对象模型或需在线获取过程参数(即所谓的“数据驱动”); 第2类途径是控制器变结构, 如Boiko^[10]设计了一种根据状态向量值变化在多个PID之间切换的变结构控制器, 用于时变水位被控对象, Bedwani等^[11]提出了一类PI和PD变结构控制策略, 用来满足非线性对象对响应速度和稳态误差的双重需求, Zhang等^[12]组态了一种根据瞬态被控误差自动切换结构的PID控制器, 用于大型望远镜的变速控制, 以上变结构方法由于算法多样复

收稿日期: 2021-02-22; 录用日期: 2021-08-24.

†通信作者. E-mail: dengh@jnu.edu.cn.

本文责任编辑: 吴立刚.

白城发电公司1号机空冷岛冷端优化控制与运行技术研究项目(410011JX20200024)资助.

Supported by the Project of Optimization and Operation of Air-Cooled Condenser for Unit 1 of Baicheng Power Plant (410011JX20200024).

杂, 工程实现的难度要远大于常规PID控制器。

本文考虑控制工程的易实现, 通过控制器简单变结构, 针对标称工况工作点的多类优化指标, 提出在基本PID上增加一个补偿器, 使得在时变被控对象在变工况下控制系统的闭环输出与标称工况的输出相

同, 应用和仿真验证了本文提出的带补偿器PID能提高了时变系统鲁棒性能, 改进控制系统整体品质指标。

2 具有强鲁棒性能的补偿器设计

图1是本文设计的带补偿器强鲁棒性能控制系统框图。

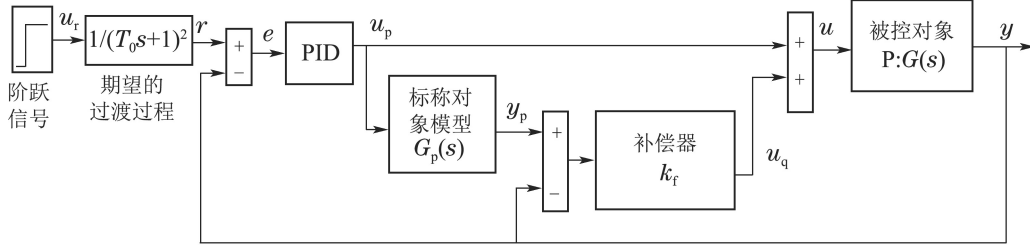


图 1 具有补偿功能的时变控制系统

Fig. 1 The time-varying control system with compensation function

在图1中, $PID(s) = k_r(k_p + k_i/s + k_d s/(t_d s + 1))$, 被控对象 P 是一个不确定或者非线性系统, $r = U_r/(T_0s + 1)^2$, 其中 U_r 是幅度为 $|U_r|$ 的阶跃信号, 闭环系统输出 y 跟踪期望的轨迹 r 。

定义 1 被控对象 P 是一个不确定或者非线性系统, 由一些不同运行工况表达为传递函数 $G_i(s)$, 构成 ($i = 0, 1, \dots, n$), 或者通过线性化非线性系统得到的传递函数 $G_i(s)$ 构成 ($i = 0, 1, \dots, n$)。

定义 2 不失一般性, 令 $G_i(s) \in P$,

$$G_i(s) = b_i e^{(-s\tau_i)} / (a_{i2}s^2 + a_{i1}s + 1), \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (1)$$

是稳定的。

定义 3 $G_p(s)$ 是标称运行工况下的传递函数, PID*控制器的参数 $K^* = [k_r^*, k_p^*, k_i^*, k_d^*, t_d^*]$ 是基于标称运行工况 $G_p(s)$ 经过某种优化指标设计的, PID*的输出 $u_p = PID^* e(t)$, 其中 $e(t) = r(t) - y(t)$, 基于 $G_p(s)$ 设计的优化PID*闭环系统输出 $y_p = G_p(s)u_p$ 是稳定的, 而且满足某种优化指标。

定义 4 优化指标^[13-14]包括

$$\begin{cases} IAE : S = \int_0^\infty |e(t)| dt, \\ ISE : S = \int_0^\infty |e(t)|^2 dt, \\ ITAE : S = \int_0^\infty t|e(t)| dt, \\ ITSE : S = \int_0^\infty t e^2 dt. \end{cases} \quad (2)$$

定理 1 如果基于标称运行工况 $G_p(s)$ 经过优化指标设计的PID*的输出 $u_p = PID^* e(t)$, 其中 $e = r - y$, 闭环系统输出 $y_p = G_p(s)u_p$ 是稳定的并且满足控制系统的品质指标, 设计的补偿器 k_f 如图1所示, 使得所有的闭环系统输出 $y_i = y_p, i = 1, 2, \dots, n$, 则补偿器 $k_f = G_i^{-1}(s)$, 其中 $G_i(s) \in P, i = 1, 2, \dots, n$ 。

证 根据定义3, $y_p = G_p(s)u_p$, 因为 $y_i = G_i(s)u_p \neq y_p$, 考虑带补偿器 k_f 的控制器, 其输出为 $u = u_p + u_q$, 使得所有的基于运行工况 $G_i(s)$ 闭环系统输出 $y_i = y_p, i = 1, 2, \dots, n$, 从图1可知

$$\begin{cases} (u_p + u_q)G_i(s) = y_p, \\ (u_p + (y_p - y_i)k_f)G_i(s) = y_p, \\ G_i(s)u_p + (y_p - y_i)k_f G_i(s) = y_p, \\ (y_p - y_i)k_f G_i(s) = y_p - G_i(s)u_p, \\ (y_p - y_i)k_f G_i(s) = y_p - y_i. \end{cases} \quad (3)$$

所以

$$k_f(s) = G_i^{-1}(s), \quad \forall G_i(s) \in P, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

证毕。

定理 2 如果所设计的补偿器为严格的真分式正则传递函数 $k_f^*(s) = \text{thr}(s)k_f(s)$, 其中 $k_f(s) = G_p^{-1}(s)$, $\text{thr}(s) = 1/(t_m^2 s^2 + 2t_m s + 1)$, t_m 是较小且合适的时间常数, 则补偿器 $k_f^*(s) = \text{thr}(s)k_f(s)$, 使得所有的基于 $G_i(s) \in P$ 的闭环输出 y_i 是稳定的, 而且 $\lim_{t \rightarrow \infty} |(y_i(t) - y_p(t))| = 0, i = 1, 2, \dots, n$ 。

证 在式(3)中, 令 $k_f = G_p^{-1}(s)$:

$$\begin{cases} (u_p + (y_p - y_i)k_f)G_i(s) = y_p, \\ y_i + (y_p - y_i)G_p^{-1}(s)G_i(s) = y_p, \\ y_i(1 - G_p^{-1}(s)G_i(s)) = y_p(1 - G_p^{-1}(s)G_i(s)), \\ y_i = y_p, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (5)$$

在图1中, 用 $k_f^*(s)$ 代替 k_f , 则闭环系统输出

$$y_i = k_f^*(s)G_i(s)y_p / (1 + k_f^*(s)G_i(s)), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

其中

$$k_f(s) = G_p^{-1}(s), \quad \text{thr}(s) = 1/(t_m^2 s^2 + 2t_m s + 1),$$

t_m 是较小且合适的时间常数, $k_f^*(s) = \text{thr}(s)k_f(s)$ 是严格真分式正则传递函数, 令灵敏度函数 $S = 1 - G_i(s)Q$, 则 $Q = k_f^*(s)/(1+k_f^*(s)G_i(s))$ 也是严格的真分式正则传递函数, 由于 $k_f^*(s) = (1 - QG)^{-1}Q$ 满足Youla-Kucera参数化(Youla-Kucera parametrisation)公式^[15], 所以补偿器 $k_f^*(s)$ 使得所有基于 $G_i(s) \in P$ 的闭环输出 y_i 是稳定的, 并且满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} |y_i(t) - y_p(t)| = 0, i = 1, 2, \dots, n$. 证毕.

此外, 由于在基于 $G_p(s) = b_p e^{-s\tau_p}/(a_{p2}s^2 + a_{p1}s + 1)$ 设计PID*控制器时, 已把纯延迟时间 τ_p 考虑在PID*优化计算中了, 所以在补偿器 k_f :

$$k_f = (a_{p2}s^2 + a_{p1}s + 1)/(b_p e^{s\tau_p}) \quad (6)$$

中, 应用 $\Delta\tau = \tau_q - \tau_p$ 代替式(5)中的 τ_p , 或在式(5)中应用函数 $f(\Delta\tau) = f(\tau_q - \tau_p)$ 来处理式(5)中的 $e^{s\tau_p}$, 在应用式(5)时, 将 $e^{s\tau_p} \simeq e^{sf(\Delta\tau)}$ 转化为幂级数. 通过设计 $\text{trs}(s) = 1/(t_m^2 s^2 + 2t_m s + 1)$, 其中 t_m 是较小而又合适的时间常数. 把式(5)转化为严格的真分式正则传递函数

$$k_f^*(s) = \text{thr}(s)k_f(s). \quad (7)$$

3 工程应用

3.1 无延迟系统

考虑造纸厂张力控制对象的不确定模型, P 在3种工况下的传递函数分别是

$$\begin{cases} G_1(s) = 0.5/(0.06s^2 + 0.17s + 1), \\ G_2(s) = 1.5/(0.11s^2 + 0.27s + 1), \\ G_3(s) = 0.75/(0.01s^2 + 0.20s + 1), \\ \text{gap}(G_3(s), G_2(s)) = 0.7 = \text{gap}_{\max}. \end{cases} \quad (8)$$

选择 $G_p(s) = G_3(s), G_q(s) = G_2(s)$, 在图1所示控制器中, 令控制周期 $t_s = 0.001 \text{ s}, T_0 = 0.04 \text{ s}$, 经过规一化处理后, U_r 为幅度为1的阶跃信号, 要求系统输出 y 在0.7 s内达到1.

基于标称工况 $G_p(s)$ 设计优化的PID*控制器参数

$$K^* = [k_r^* \ k_p^* \ k_i^* \ k_d^* \ t_d^*] = [1.0 \ 1.75 \ 10 \ 0.06 \ 0.025]. \quad (9)$$

按照式(5)和式(6), 设计补偿器 $k_f^*(s)$ 为

$$k_f^*(s) = (0.18s^2 + 3.60s + 18.0)/(0.002s^2 + 0.075s + 0.750). \quad (10)$$

图2-4分别显示了有/无补偿器情况下, 应用相同的优化PID*控制器参数 K^* , 在单位阶跃信号 U_i 输入下, $G_p(s), G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 闭环系统输出 y 和 y_1 .

从图4可以看出, 在无补偿器情况下, $G_2(s)$ 的闭环系统输出是发散不稳定的, 应用补偿器后, 系统稳定, 满足控制系统的性能指标. 这说明应用补偿器后,

能够使得系统整体达到稳定.

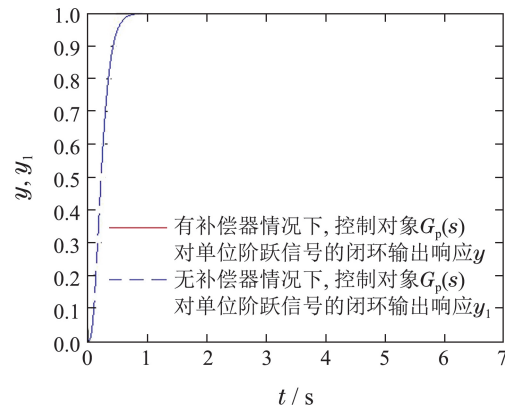


图2 有/无补偿器情况下 $G_p(s)$ 闭环系统输出(2个曲线重合)

Fig. 2 The closed-loop system output of $G_p(s)$ with and without compensator (the 2 curves coincide)

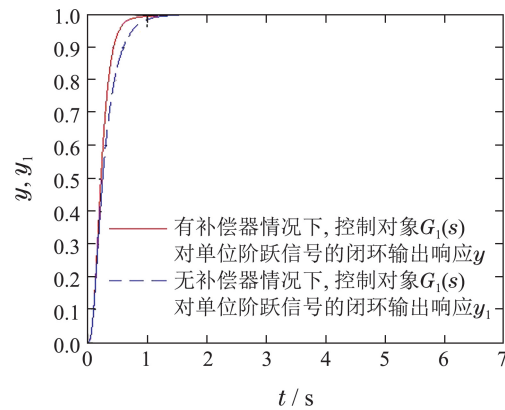


图3 有/无补偿器情况下 $G_1(s)$ 闭环系统输出

Fig. 3 The closed-loop system output of $G_1(s)$ with and without compensator

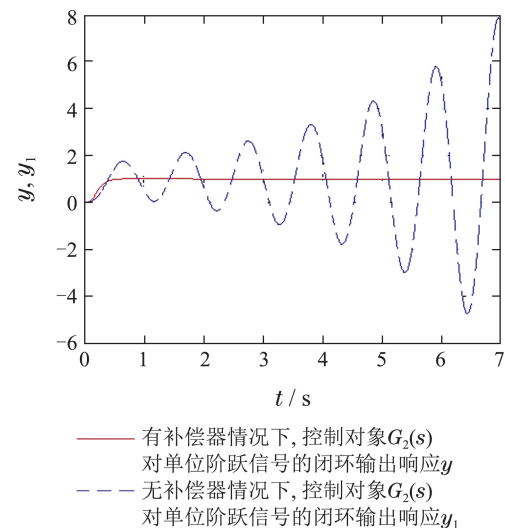


图4 有/无补偿器情况下 $G_2(s)$ 闭环系统输出

Fig. 4 The closed-loop system output of $G_2(s)$ with and without compensator

3.2 有纯延迟系统

考虑某发电厂热工控制对象不确定模型, P 在3种工况下传递函数分别是

$$\begin{cases} G_1(s) = 0.5e^{-24s}/(553.6s^2 + 47.1s + 1), \\ G_2(s) = 1.5e^{-46s}/(1175.5s^2 + 68.6s + 1), \\ G_3(s) = 0.75e^{-32s}/(816.3s^2 + 57.1s + 1), \\ \tau_q = \tau_{\max} = \tau_2 = 46. \end{cases} \quad (11)$$

选择 $G_p(s) = G_3(s)$, $G_q(s) = G_2(s)$, 图1所示控制器中, 令控制周期 $t_s = 0.2$ s, $T_0 = 7$ s, 经过规一化处理, U_r 为幅度为1的阶跃信号, 要求系统输出 y 在 190 s 内达到幅值1.

基于标称工况 $G_p(s)$ 设计优化的 PID* 控制器参数

$$K^* = [k_r^*, k_p^*, k_i^*, k_d^*, t_d^*] = [0.3, 1.75, 0.035, 16, 7]. \quad (12)$$

按照式(5)和式(6), 设计补偿器 $k_f^*(s)$ 为

$$k_f^*(s) = [(816.33s^2 + 57.14s + 1.0)/(0.24s^2 + 1.20s + 1.50)][(0.041s^2 + 0.29s + 1.0)/(9s^2 + 6s + 1)]. \quad (13)$$

图5-7分别显示了有/无补偿器情况下, 应用相同的优化PID*控制器参数 K^* , 在单位阶跃信号 U_r 输入下, $G_p(s)$, $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 闭环系统输出 y 和 y_1 .

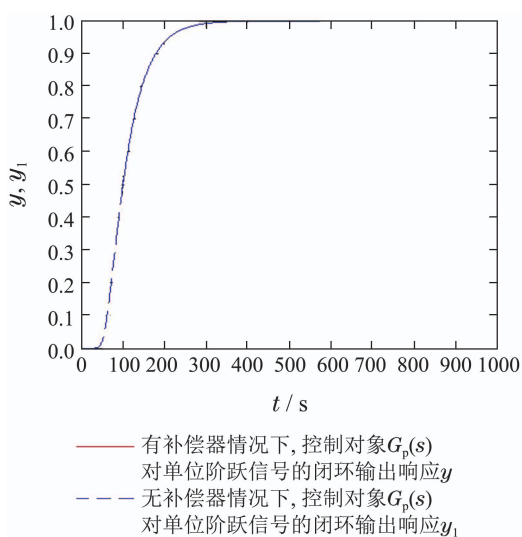


图 5 有/无补偿器情况下 $G_p(s)$ 闭环系统输出(2个曲线重合)
Fig. 5 The closed-loop system output of $G_p(s)$ with and without compensator (the 2 curves coincide)

从图6看出, 有补偿器时, $G_1(s)$ 工况下的闭环输出达到稳态时间比无补偿器时要快. 从图7看出, 有补偿器时, $G_2(s)$ 工况下的闭环输出比无补偿器时超调量要小, 达到稳态时间要快. 在2种工况下, 有补偿器比无补偿器, 系统的控制品质都得到改善, 鲁棒性能得到提高.

4 结论

为提高时变系统的鲁棒性能, 改善控制系统的品质指标, 本文基于标称工况工作点在某一优化指标下

设计PID控制器, 为了使其他工况下系统的闭环输出与标称工况下的输出相同, 本文设计了具有严格的真分式正则传递函数补偿器 $k_f^*(s)$, 工程仿真验证了本文设计的补偿器能有效提高时变系统鲁棒性能, 改善了控制系统的品质指标.

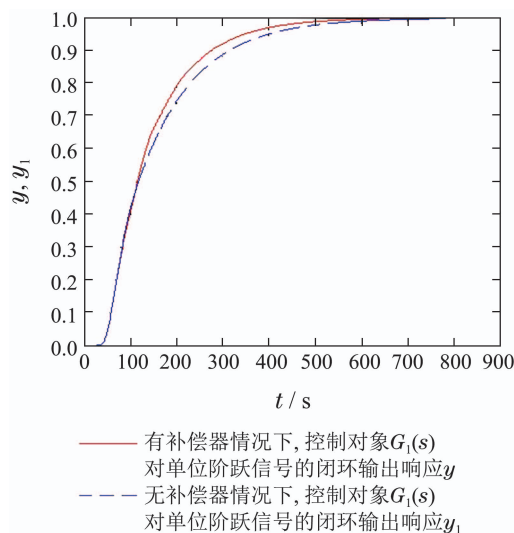


图 6 有/无补偿器情况下 $G_1(s)$ 闭环系统输出
Fig. 6 The closed-loop system output of $G_1(s)$ with and without compensator

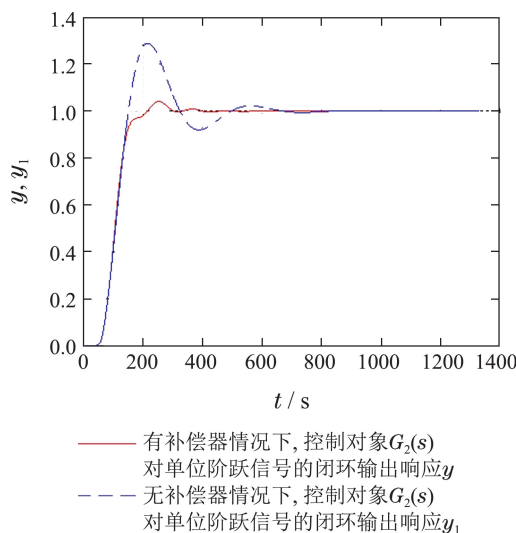


图 7 有/无补偿器情况下 $G_2(s)$ 闭环系统输出
Fig. 7 The closed-loop system output of $G_2(s)$ with and without compensator

参考文献:

[1] O'DWYER A. *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. Singapore: World Scientific, 2009.
[2] LIANG Chunyan, ZHONG Qingchang. Adaptive PID controller based on model reference. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000, 34(5): 711 - 714.
(梁春燕, 钟庆昌. 基于模型参考的自适应PID控制器. 上海交通大学学报, 2000, 34(5): 711 - 714.)

- [3] ASHIDA Y, WAKITANI S, YAMAMOTO T. Design of an implicit self-tuning PID controller based on the generalized output. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, 50(1): 13946 – 13951.
- [4] RAO C S, SANTOSH S. Tuning optimal PID controllers for open loop unstable first order plus time delay systems by minimizing ITAE criterion. *IFAC-PapersOnLine*, 2020, 53(1): 123 – 128.
- [5] HO M T, DATTA A, BHATTACHARYYA S P. Robust and non-fragile PID controller design. *International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-PapersOnLine*, 2001, 11(7): 681 – 708.
- [6] RAM V D, RAJAPANDIYAN C, CHIDAMBARAM M. Steady-state gain identification and control of multi-variable unstable systems. *Chemical Engineering Communications*, 2015, 202(2): 151 – 162.
- [7] GRIMHOLT C, SKOGESTAD S. Improved optimization-based design of PID controllers using exact gradients. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2015, 37: 1751 – 1756.
- [8] HUANG L, NING W. Multiobjective optimization for controller design. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(4): 472 – 477.
- [9] MARTINS F G. Tuning PID controllers using the ITAE criterion. *International Journal of Engineering Education*, 2005, 21(5): 867.
- [10] BOIKO I. Variable-structure PID controller for level process. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(5): 700 – 707.
- [11] BEDWANI W A, ISMAIL O M. Genetic optimization of variable structure PID control systems. *Proceedings ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications*. Los Alamitos, CA: IEEE, 2001: 27 – 30.
- [12] ZHANG B, LI H, GUO L, et al. Application of variable structure PID in velocity control for large telescope. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1613 – 1619.
- [13] GUO B Z, WU Z H, ZHOU H C. Active disturbance rejection control approach to output-feedback stabilization of a class of uncertain nonlinear systems subject to stochastic disturbance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 61(6): 1613 – 1618.
- [14] KAI Ping'an, LIU Jianmin, JIAO Songming, et al. *Advanced Control Technology of Thermal Process in Thermal Power Plant*. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
(开平安, 刘建民, 焦嵩鸣, 等. 火电厂热工过程先进控制技术. 北京: 中国电力出版社, 2010.)
- [15] LANDAU I D. On the use of Youla-Kucera parametrisation in adaptive active noise and vibration control—a review. *International Journal of Control*, 2020, 93(2): 204 – 216.

作者简介:

开平安 教授, 目前研究方向为能源系统与自动化, E-mail: pingank@aliyun.com;

曾世权 硕士研究生, 目前研究方向为火电机组复杂过程控制, E-mail: eliot2020@stu2020.jnu.edu.cn;

邓慧 副教授, 目前研究方向为先进控制理论及其工程应用, E-mail: dengh@jnu.edu.cn.