

基于Simulink的锅炉给水非线性控制系统

安 陈¹, 朱 兵^{1*}, 袁 宝¹, 穆洪林¹, 李 媛²

¹贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳

²中电建新能源集团有限公司贵州分公司, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年9月25日; 录用日期: 2023年11月10日; 发布日期: 2023年11月17日

摘 要

本文研究设计的非线性PI控制器是采用了在传统线性PI控制器基础上增加双曲余弦函数增益, 两者构成新非线性PI控制器。再借助Simulink仿真软件对所设计的非线性控制系统进行稳定性、准确性、快速性方面的性能分析, 并对锅炉给水非线性PI控制系统与锅炉给水线性PI控制系统进行了仿真比较, 结果表明非线性PI控制器对典型热力过程控制系统的动态性能有显著改善。

关键词

非线性PI控制器, 汽包水位, Simulink, 非线性设计模块, 系统仿真

Nonlinear Control System of Boiler Feed Water Based on Simulink

Chen An¹, Bing Zhu^{1*}, Bao Yuan¹, Honglin Mu¹, Yuan Li²

¹College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Guizhou Branch, CLP Construction New Energy Group Co., Ltd., Guiyang Guizhou

Received: Sep. 25th, 2023; accepted: Nov. 10th, 2023; published: Nov. 17th, 2023

Abstract

The nonlinear PI controller designed in this paper is based on the traditional linear PI controller to increase the gain of hyperbolic cosine function, which constitutes a new nonlinear PI controller. Then the stability, accuracy and rapidity of the designed nonlinear control system are analyzed by Simulink simulation software, and the nonlinear PI control system of boiler feed water is simulated and compared with the linear PI control system of boiler feed water. The results show that the nonlinear PI controller can significantly improve the dynamic performance of a typical thermal process control system.

*通讯作者。

文章引用: 安陈, 朱兵, 袁宝, 穆洪林, 李媛. 基于 Simulink 的锅炉给水非线性控制系统[J]. 建模与仿真, 2023, 12(6): 5380-5386. DOI: 10.12677/mos.2023.126488

Keywords

Nonlinear PI Controller, Drum Water Level, Simulink, Nonlinear Design Module, System Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电厂热工自动化水平的高低是衡量电厂生产技术的先进与否和企业现代化的重要标志。锅炉作为电厂中的一个重要设备,起着重要的作用。其中,汽包锅炉给水及水位的调节已经完全采用自动的方式加以控制[1]。在锅炉运行中,汽包水位是一个需要实时监控的重要指标,它间接反映了蒸汽流量与给水流量之间的物质平衡关系,锅炉给水控制的目的就是保证锅炉给水量与蒸发量相适应,保持两者的质量平衡。对于汽包锅炉,汽包水位作为被控对象,受给水流量、蒸汽流量、锅炉燃烧率等扰动因素的影响而波动,导致汽包水位不能保持静态平衡。手动控制给水很难维持汽包水位,随着火力发电机组容量的不断扩大,为确保发电厂的安全和稳定,为保证汽包水位始终维持在符合安全规则的范围内波动,使其他机组设备可以安全稳定的运行,就需要采用一套优良的水位自动控制系统来满足生产要求。对于汽包水位控制系统,国内外大多数电厂都采用基于传统 PID 控制策略的经典给水控制系统,此方式是根据被控对象的特性建立相应的数学模型,然后采用 PID 控制器,构成完整的汽包锅炉给水自动控制系统。目前,随着计算机在锅炉给水控制系统的发展及广泛应用,在国内许多科研人员针对给水控制本身的特点,提出了如下系列先进的控制理论来控制锅炉汽包水位:线性 PID 控制,非线性 PID 控制,模糊控制,预测控制,专家控制,神经网络控制等。为了突破常规 PI 控制器的线性特性对控制性能的制约,近年来出现了各种非线性 PI 控制器[2],以提高控制系统的性能。本文以某火力发电厂 300 MW 机组锅炉汽包水位为控制对象(锅炉汽包总水容积为 49.8 m^3 ,工作水容积为 25 m^3 ,直径长度为 1720 mm,正常水位在中心线 0 mm,即汽包机械中心线 860 mm 位置处[3]),设计了一种新型 PI 控制器,以提高给水控制系统的性能。

2. 非线性 PI 控制器

PI 控制,即比例积分控制中作为锅炉给水控制系统的控制器。锅炉给水控制系统中的 PI 控制器控制作用由比例和积分两种基本的控制作用组成。比例控制方式是一种最简单的控制方式,其控制器的输出与输入误差信号成比例关系。比例调节器加入积分调节作用后变成比例积分调节器。

图 1 的组态框图直观表示 PI 控制与 P 控制、I 控制之间的构成关系。

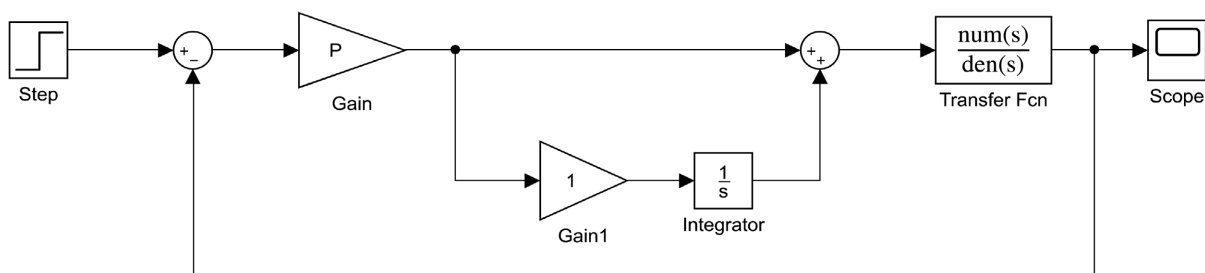


Figure 1. PI control configuration block diagram

图 1. PI 控制组态框图

利用比例控制和扣分控制构成的比例积分控制就是综合了比例控制和积分控制两者控制规律的优点，既能快速抵消干扰的影响，也消除静态偏差。它的控制方程为

$$\mu(t) = K_c e + K_i \int_0^t e dt \tag{1}$$

式中， K_c ——比例增益；

K_i ——积分增益；

传递函数为

$$G_R(s) = \frac{\mu(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) = \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \tag{2}$$

如图 2 所示是 PI 控制器的阶跃响应，它是由比例动作和积分动作两部分组成的。

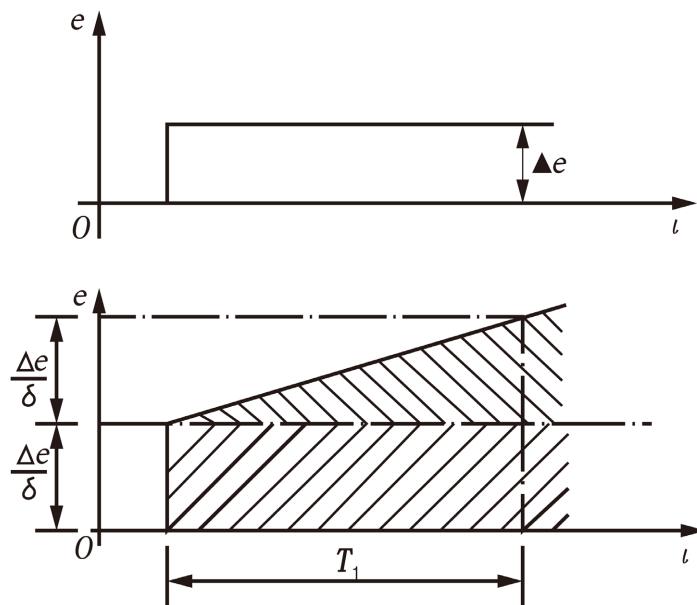


Figure 2. Step response of the PI controller
图 2. PI 控制器的阶跃响应

应当指出，PI 控制引入积分动作虽然能消除系统残差，但同时却降低了原有系统的稳定性。为保持控制系统与比例控制相同的衰减率，PI 控制器的比例带较纯 P 控制应适当加大。所以 PI 控制是在稍微牺牲控制系统的动态品质来换取系统无稳态误差。

3. 控制系统数值仿真

被控对象为典型的二阶加延迟热力过程[4]，其传递函数[5]：

$$G_w(s) = \frac{H(s)}{U_w(s)} = \frac{K_1}{s(1+T_1s)} = \frac{0.03}{5s^2 + 2s} \tag{3}$$

选择蒸汽流量前馈装置传递函数如下：

$$G_D(s) = \frac{H(s)}{U_D(s)} = \frac{K_2}{T_2s+1} - \frac{1}{Ts} = \frac{1}{4s^2 + 5s + 6} \tag{4}$$

新型非线性 PI 控制器[4] [6]是在传统 PI 控制器基础上采用双曲余弦函数增益[7]与之构成,其只需要利用原先的传统 PI 控制器,再设计非线性函数中的一个参数便可实现。为消除双曲余弦补偿引起控制系统比例增益过大导致的震荡,在非线性控制器的结构过程中增加了误差限值。采用双曲余弦函数增益建立的非线性系统的控制方程[8]:

$$u(t) = k(e_1) \left[K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5)$$

$$k(e_1) = ch(k_0 \times e_1) = \frac{\exp(k_0 \times e_1) + \exp(-k_0 \times e_1)}{2} \quad (6)$$

$$e_1 = \begin{cases} e(t), & |e(t)| \leq e_{max} \\ e_{max} \operatorname{sgn}(\operatorname{sgn}(e)), & |e(t)| > e_{max} \end{cases} \quad (7)$$

式中, K_0 ——非线性增益的参数;

K_p ——比例系数;

K_i ——积分系数;

K_d ——微分系数。

这里我们使用 Check Step Response Characteristics 模块(MATLAB7.13 及以上版本)以 Simulink 模块的形式,集成了基于图形界面的非线性系统控制器优化设计及仿真功能。

加入优化模块后的锅炉给水串级三冲量非线性控制系统 Simulink 仿真图如图 3 所示。

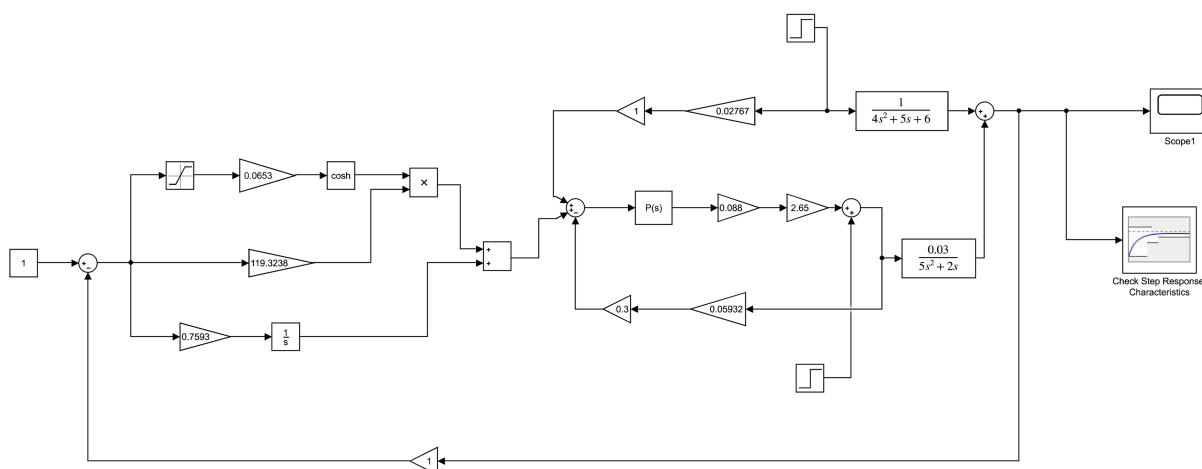


Figure 3. Simulink simulation diagram of cascade three-impulse nonlinear control system after adding optimization module
图 3. 加入优化模块后的串级三冲量非线性控制系统 Simulink 仿真图

选取超调量和调节时间作为系统动态性能指标,利用 Simulink 工具箱中的非线性模块对参数进行优化设计[9] [10]定控制器整定参数为:

$$K_0 = 0.0653, \quad K_p = 119.3238, \quad K_i = 0.7593$$

利用 Check Step Response Characteristics 模块对 PI 控制器优化之后得到的锅炉给水串级三冲量非线性控制系统阶跃响应曲线如图 4 所示。

将锅炉给水非线性控制系统的阶跃响应曲线与非线性控制系统的阶跃响应曲线绘制在同一图上,可清楚直观比较其控制性能。锅炉给水串级三冲量非线性控制系统与线性系统的组态框图如下图 5 所示:

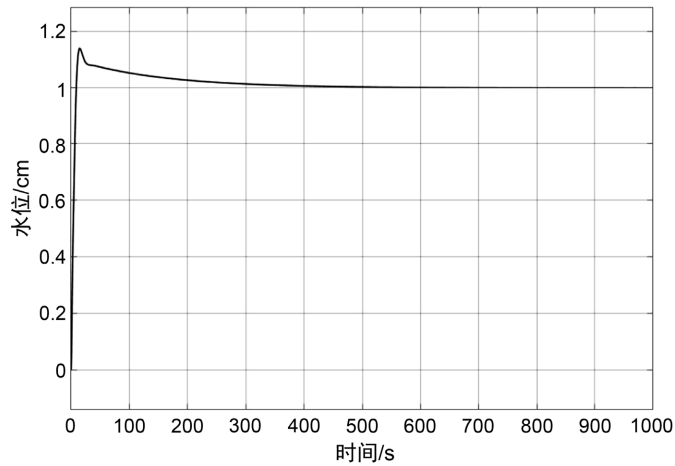


Figure 4. Step response curve of boiler feed water cascade three-impulse nonlinear control system
图 4. 锅炉给水串级三冲量非线性控制系统阶跃响应曲线

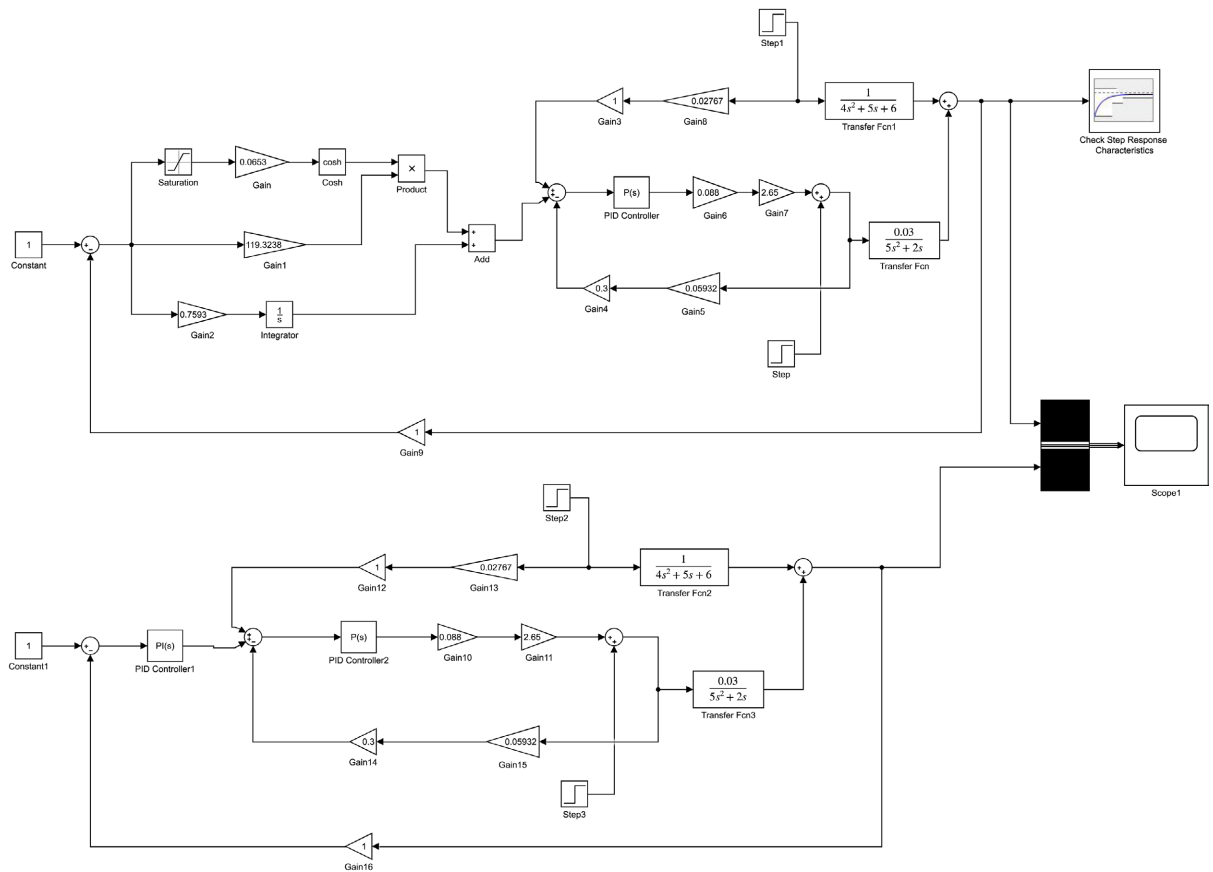


Figure 5. Configuration block diagram of cascade three-impulse nonlinear control system and linear system for boiler feed water
图 5. 锅炉给水串级三冲量非线性控制系统与线性系统的组态框图

锅炉给水串级三冲量非线性控制系统与线性系统的阶跃响应曲线如下图 6 所示。

衡量一个 PID 控制系统快速性和准确性的指标主要有：上升时间、超调量、调节时间和稳态误差，这四个参数反映了系统的响应能力和准确性，通过它们就可以判定一个系统性能的好坏。锅炉给水非线性控制系统与线性控制系统串级三冲量之间的性能指标比较如下表 1 所示：

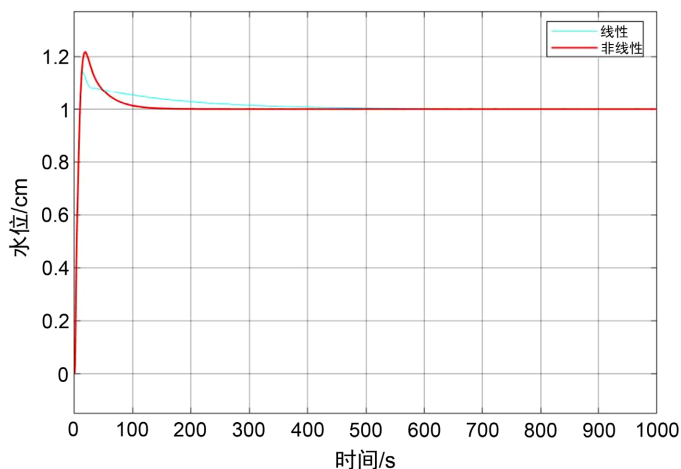


Figure 6. Step response curves of cascade three-impulse nonlinear control system and linear system for boiler feed water
图 6. 锅炉给水串级三冲量非线性控制系统与线性系统的阶跃响应曲线

Table 1. Comparison of performance indexes of nonlinear system and linear system

表 1. 非线性系统与线性系统的性能指标比较

系统类别	上升时间 t_r (s)	调节时间 t_s (s)	超调量 Mp	稳态误差 $e(\infty)$
非线性系统	14.13	27.53	16.5%	0
线性系统	7.95	40.28	21.7%	0

通过表 1 的比较得知, 采用非线性控制器的控制系统的上升时间和超调量都要小于采用线性控制器的系统, 非线性控制器比线性控制器具有更好的鲁棒性, 非线性 PI 控制器提高了控制系统的性能。

4. 结语

本文采用的非线性 PI 控制器是在传统线性 PI 控制器基础上增加双曲余弦函数增益, 两者构成非线性 PI 控制器。利用 Simulink 工具箱中的非线性模块对控制器参数进行优化, 通过一系列的控制系统的仿真试验, 证实了非线性 PI 控制器较常规线性 PI 控制器具有更好的动态性能。

基金项目

贵州省科技支撑计划项目(No. 2017YFB0902100)。

参考文献

- [1] 刘宗义, 万玉良. 汽包锅炉给水控制系统的设计[J]. 科技创新导报, 2009(2): 95-96. <https://doi.org/10.16660/j.cnki.1674-098x.2009.02.079>
- [2] Shahruz, S.M. and Schwartz, A. L. (1997) Nonlinear PID Compensators That Achieve High Performance. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, **119**, 105-110. <https://doi.org/10.1115/1.2801198>
- [3] 雷婷. 汽包锅炉水位智能控制系统[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2014.
- [4] 顾红艳, 龙兴权, 曾河华, 等. 双曲余弦增益的非线性 PI 蒸汽温度控制研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2012, 29(4): 63-66.
- [5] 雷婷, 虎恩典, 刘勇. 火电厂 300MW 汽包锅炉给水控制系统[J]. 自动化技术与应用, 2014, 33(11): 12-17.
- [6] 程根伟. 1998 年长江洪水的成因与减灾对策[M]//许厚泽, 赵其国. 长江流域洪涝灾害与科技对策. 北京: 科学出版社, 1999: 32-36.

- [7] 苏玉鑫, 段宝岩. 一种新型非线性 PID 控制器[J]. 控制与决策, 2003, 18(1): 126-128.
- [8] 顾红艳. 基于 Simulink 的非线性控制系统研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2015(6): 70, 73.
- [9] (2001) NCD: Nonlinear Control Design Blockset User's Guide. The Math Works Incorporated, Natick.
- [10] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.