

## 电动执行机构定位精度实时补偿策略

孟昊, 田亮

引用本文:

孟昊, 田亮. 电动执行机构定位精度实时补偿策略[J]. 南方能源建设, 2021, 8(1): 80-86.

MENG Hao, TIAN Liang. Real-time Compensation Strategy for Positioning Accuracy of Electric Actuator[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(1): 80-86.

---

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 基于BP神经网络灰色回归组合模型的年最大负荷预测

Annual Peak Load Forecasting Based on Combination Model of Back Propagation Neural Network and Grey Regression  
南方能源建设. 2017, 4(2): 46-50,57 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.02.007>

#### 一种电动汽车光伏充电站的分时段有序充电策略

A Time-phased Order Charging Strategy for an Electric Vehicle Photovoltaic Charging Station  
南方能源建设. 2020, 7(3): 112-118 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.015>

#### 海底电缆超短基线定位系统误差分析及处理策略

Error Analysis and Treatment Strategy of Ultra Short Baseline Positioning System for Submarine Cable  
南方能源建设. 2018, 5(2): 138-142 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.020>

#### 电动汽车充电对住宅小区配电网的影响研究

Research on the Influence of Electric Vehicle Charging on Distribution Network of Residential District  
南方能源建设. 2018, 5(1): 51-58 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.01.008>

#### 基于MI时序处理的GA-BP脱硫制浆系统能耗建模

Energy Consumption Modeling of GA-BP for Desulfurization Pulping System Based on MI Time Series Processing  
南方能源建设. 2019, 6(4): 64-68 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.010>

# 电动执行机构定位精度实时补偿策略

孟昊<sup>✉</sup>, 田亮

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 保定 071003)

**摘要:** [目的] 为了减小电动执行机构定位精度受其内部参数变化的影响, 减少电动执行机构的维修频率。[方法] 在对电动执行机构的模型改进之后通过仿真试验得到稳态误差的影响因素, 进一步添加补偿回路来减小稳态误差, 补偿回路的参数使用BP神经网络算法求得。[结果] 仿真结果表明, 电动执行机构的稳态误差与控制器死区宽度、减速器齿隙宽度和输入信号符号有关。添加补偿回路后, 在控制器死区宽度和减速器齿隙宽度变化时能够保证稳态误差绝对值在0.1%的范围内波动。[结论] 解决了电动执行机构定位精度与稳定性之间的矛盾, 以及定位精度因减速器磨损而降低的问题。

**关键词:** 定位精度; 电动执行机构; BP神经网络

中图分类号: TM611; TP273

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)01-0080-07

开放科学(资源服务)二维码:



## Real-time Compensation Strategy for Positioning Accuracy of Electric Actuator

MENG Hao<sup>✉</sup>, TIAN Liang

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** [Introduction] In order to reduce the influence of the positioning accuracy of the electric actuator by the change of its internal parameters, and to reduce the maintenance frequency of the electric actuator. [Method] After the model of the electric actuator was improved, the influence factors of the steady-state error were obtained through simulation experiments. The compensation loop was further added to reduce the steady-state error. The parameters of the compensation loop were obtained by utilizing the BP neural network algorithm. [Result] The simulation result shows that the steady-state error of the electric actuator is related to the width of the dead zone of the controller, the backlash width of the reducer and the sign of the input signal. After adding the compensation circuit, the absolute value of the steady-state error can be guaranteed to fluctuate within 0.1% when the controller dead zone width and reducer backlash width change. [Conclusion] It solves the contradiction between the positioning accuracy and stability of electric actuator, and the problem of positioning accuracy being reduced due to the wear of reducer.

**Key words:** positioning accuracy; electric actuator; BP neural network

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

电动执行机构广泛应用于电力、冶金、石油、化工、轻工等行业的生产过程控制系统, 火电厂中的电动调节阀和风机的风门挡板都属于电动执行机构, 被大量用于蒸汽温度控制、给水控制、燃烧控制、负荷控制等环节, 一座拥有两台300 MW机组

的中型火电厂需要400~500台数量的电动调节阀才能满足控制需求<sup>[1]</sup>。定位精度会影响控制系统的控制品质, 是电动执行机构的一个重要性能指标。然而由于风电的大规模并网, 火电机组频繁的变动负荷增加了电动执行机构的动作频率, 使得电动执行机构的磨损速度加快从而导致定位精度下降。为了不会对控制品质产生较大影响需要愈加频繁的对电动执行机构进行维修工作, 对于关键部位的电动执行机构甚至需要停机维修, 这样一来会降低火电厂

收稿日期: 2020-08-06 修回日期: 2020-09-11

基金项目: 国家重点研发计划资助项目“提升供热机组电出力调节能力的蒸汽系统流程改造”(2017YFB0902102); 中央高校基本科研业务费专项资金资助“供热机组灵活性提升理论及工程技术研究”(2017MS132)

的经济效益。因此,若能根据电动执行机构内部的参数对其定位精度进行实时补偿,减小定位精度的波动范围,将对提高热工控制系统的控制品质以及火电厂的经济效益具有重要意义。

电动执行机构主要由控制器、电动机和减速器三部分组成,关于电动执行机构定位精度的研究,目前相关文献大部分都未涉及到参数变化时的情况。艾昌文通过误差信号的大小确定电动机的转动时间<sup>[2]</sup>,赵全宝使用人工神经网络预估电动机的启停位置<sup>[3]</sup>,徐艳超通过优化电动机的速度曲线实现精准启停<sup>[4]</sup>,这三篇文献提到的方法是通过降低电动机惯性惰走的位移量,从而减小控制器的死区宽度使得定位精度提高,但是以上三篇文献未考虑减小控制器死区宽度后会降低系统的稳定性,容易使得输出信号在减速器齿隙宽度因磨损而增大时产生等幅振荡。马艳玲通过反步积分法设计了自适应控制器降低齿隙非线性的影响<sup>[5]</sup>,但是未考虑齿隙宽度发生变化的情况。苏亚洲设计了一种反向机械间隙软件补偿算法补偿齿隙特性的影响<sup>[6]</sup>,但是未考虑控制器死区特性的影响。

本文通过对电动执行机构特性的分析,在原有电动执行机构数学模型的基础上修改了减速器的数学模型,通过特性仿真试验确定了稳态误差的影响因素,然后通过添加补偿回路来减小稳态误差,补偿回路的参数使用BP神经网络算法离线求得,最后通过仿真试验评判该补偿方案的性能。

## 1 电动执行机构建模

### 1.1 电动执行机构结构

电动执行机构的结构如图1所示。来自上位机中的4~20 mA的电流信号在与位置反馈信号做差后将偏差信号送入控制器,控制器输出开关量信号控制电动机旋转,经减速器减速后带动调节机构运动,从而改变执行机构的开度。此外,减速器会带动绝对绝对编码器转动,位置检测变送器通过绝对编码器获得开度信号,经变送后送入控制器<sup>[7]</sup>。

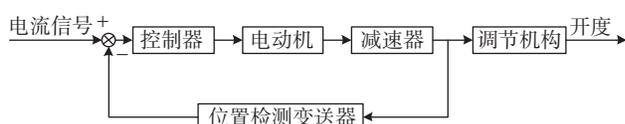


图1 电动执行机构结构

Fig. 1 Electric actuator structure

### 1.2 电动执行机构数学模型

理想状态下电动机可以用积分环节描述,减速器可以用比例环节描述。然而实际的电动机含有惯性特性,在控制器的输出信号改变后,电动机还会朝着原来的方向继续转动一段行程,这种特性被称为电机的惯性惰走。此外,减速器中传动部件间的齿隙非线性特性无法彻底消除。电动机的惯性惰走与传动机构的齿隙特性会使得输出信号产生等幅振荡,控制器也会不断输出变化的信号使电动机做正反转交替运动。这样会消耗能量、磨损减速器,甚至烧坏电动机,大大降低了电动执行机构的使用寿命。为了避免输出信号产生等幅振荡,需要在控制器中设置一定宽度的死区,死区的宽度可以人为进行调节,当误差的绝对值小于或等于死区宽度时,控制器不再输出使电动机转动的信号。这样做虽然可以提高执行机构的稳定性,但是死区特性的存在降低了定位精度,使输出的开度信号产生了稳态误差。

根据上述对电动执行机构特性的分析可以得到如图2所示的数学模型。关于控制器和电动机的结构,文献[8]已经做了相关研究,故本文不进行重点研究,由于该文献将减速器视为比例环节,忽略了齿隙特性的影响,因此本文对减速器的数学模型进行了修改。图2中,带死区的继电器模块表示控制器, $\sigma$ 为死区的宽度。电动机的传递函数根据文献[8]的研究得到。根据文献[5],[9]的研究,齿隙非线性主要可以用迟滞模型、死区模型及“振-冲”模型三种模型来描述,具体使用何种模型则根据齿隙非线性在系统中的位置及其他元件的特性来确定。减速器位于电动执行机构的输出端,而且调节机构含有一定的阻尼特性,因此本文使用迟滞模型来描述减速器的齿隙特性<sup>[10-11]</sup>, $\delta$ 为减速器齿隙宽度。位置检测变送器的增益为0.125 mA/mm。开度变化量与减速器输出端位移的比例系数为0.781 25%/mm。输出信号 $c(t)$ 表示执行机构的开度。

## 2 特性仿真

### 2.1 仿真参数

根据电动执行机构的数学模型搭建仿真模型对其特性进行分析。电动执行机构中减速器的齿隙宽

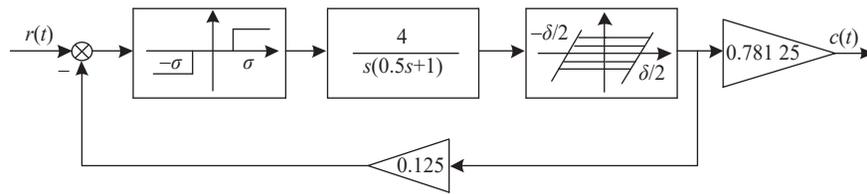


图2 电动执行机构数学模型

Fig. 2 Mathematical Model of Electric actuator

度 $\delta$ 会随着减速器的磨损而增大,而控制器死区宽度 $\sigma$ 需要根据输出特性人为的进行调节。电动机的惯性时间常数 $T$ 与其机电特性有关,可以视为定值。因此,本文主要研究 $\delta$ 和 $\sigma$ 对输出特性的影响。以 $\sigma$ 和 $\delta$ 为变量进行仿真,参数取值如表1所示,其中 $\sigma$ 等间隔取16个值, $\delta$ 等间隔取8个值,其他固定参数取值如图2所示。

表1  $\delta$ 和 $\sigma$ 参数取值Tab. 1  $\delta$  and  $\sigma$  parameter values

参数名称	最小值	间隔	最大值
死区宽度 $\sigma/\text{mA}$	0.02	0.02	0.32
齿隙宽度 $\delta/\text{mm}$	0.5	0.5	4

## 2.2 仿真结果

系统的单位阶跃响应曲线可以分为四类。在 $\delta=1\text{ mm}$ 时,通过改变 $\sigma$ 可以得到这四种类型的阶跃响应曲线,如图3所示。

图3(a)为 $\sigma=0.08$ 时,阶跃响应曲线出现等幅振荡特性,系统不稳定。图3(b)为 $\sigma=0.12$ 时,阶跃响应曲线经过一个波峰之后进入稳态,稳态误差 $e_{ss}(\infty) < 0$ 。图3(c)为 $\sigma=0.16$ 时,阶跃响应曲线无超调量,直接进入稳态,且 $e_{ss}(\infty) > 0$ 。图3(d)为 $\sigma=0.3$ 时阶跃响应曲线无超调量,但 $e_{ss}(\infty) < 0$ 。若 $\sigma$ 继续增大, $e_{ss}(\infty)$ 会持续增大,直至 $\sigma \geq r(t)$ 后, $c(t)=0$ , $e_{ss}(\infty)$ 不再变化。

在阶跃响应曲线无等幅振荡时,稳态误差和死区宽度 $\sigma$ 的关系如图4所示,由图4可知,死区宽度在 $0.1\sim 0.32\text{ mA}$ 的范围内变化时,稳态误差在 $-0.8\%\sim 0.6\%$ 的范围内波动。

根据仿真结果可以得到不同 $\delta$ 下使系统稳定的最小死区宽度 $\sigma_{\min}$ ,如图6所示。由图5可知, $\delta$ 增大时 $\sigma_{\min}$ 有可能增大。

通过对 $\sigma$ 和 $\delta$ 不变的系统施加幅值不同但符号为正的阶跃信号,系统稳态误差的波动范围不超过 $\pm 0.01\%$ ,相较于 $\sigma$ 和 $\delta$ 对稳态误差的影响,

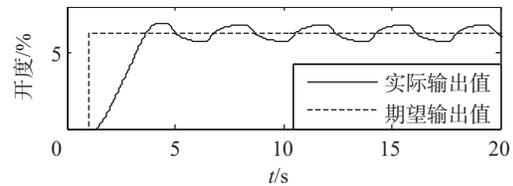
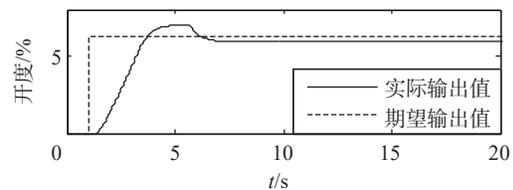
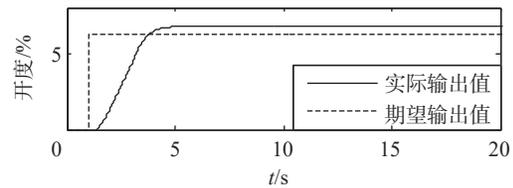
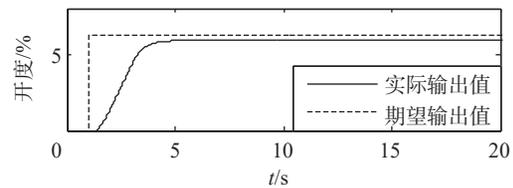
(a)  $\sigma=0.08\text{ mA}$ 时阶跃响应曲线(b)  $\sigma=0.12\text{ mA}$ 时阶跃响应曲线(c)  $\sigma=0.16\text{ mA}$ 时阶跃响应曲线(d)  $\sigma=0.30\text{ mA}$ 时阶跃响应曲线

图3 阶跃响应曲线

Fig. 3 Step response curve

可以认为稳态误差与阶跃信号幅值的绝对值大小无关。

通过对 $\sigma$ 和 $\delta$ 不变的系统输入幅值互为相反数的阶跃信号,系统的阶跃响应曲线 $c(t)$ 关于 $c(t)=0$ 对称,且稳态误差互为相反数。

综上所述,通过对仿真结果的分析,可以得到如下结论:

1) 减速器齿隙宽度增大时会使原本稳定的系统产生等幅振荡,此时可以通过增大控制器死区宽度消除等幅振荡,但死区宽度过大会使得稳态误差过大。

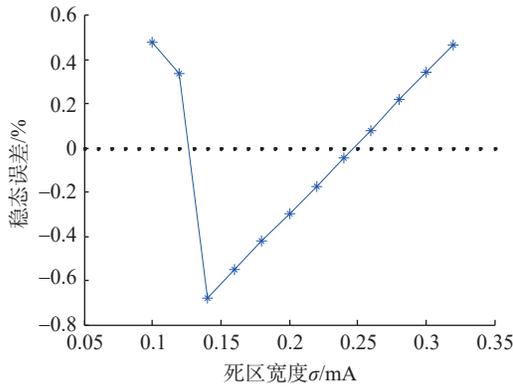


图 4 死区宽度与稳态误差的关系

Fig. 4 The relationship between dead zone width and steady state error

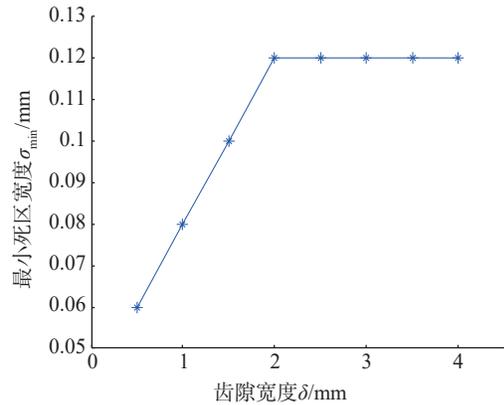


图 5 齿隙宽度与最小死区宽度的关系

Fig. 5 The relationship between backlash width and minimum dead zone width

2) 当系统稳定时, 稳态误差与控制器死区宽度和减速器齿隙宽度有关, 与阶跃信号幅值的绝对值大小无关。幅值互为相反数的阶跃信号造成的稳态误差互为相反数。

### 3 精度补偿方案

#### 3.1 补偿方案设计

本文的设计思路是为电动执行机构添加补偿回路来对定位精度进行实时补偿。根据上一节得出的

结论, 系统的稳态误差  $e_{ss}(\infty)$  与死区宽度  $\sigma$  和齿隙宽度  $\delta$  有关, 而互为相反数的阶跃信号会使  $e_{ss}(\infty)$  互为相反数, 因此本文设计了如图 6 所示的补偿方案。补偿器根据  $\sigma$  和  $\delta$  确定当阶跃信号幅值为正时补偿值的大小  $\beta$ , 当最近一次输入正向阶跃信号 (反向阶跃信号) 时, 符号判断模块的输出值  $\alpha=1$  ( $\alpha=-1$ )。最后再将符号判断模块的输出值  $\alpha$  与补偿器的输出值  $\beta$  相乘得到补偿回路的输出值  $\gamma$ 。

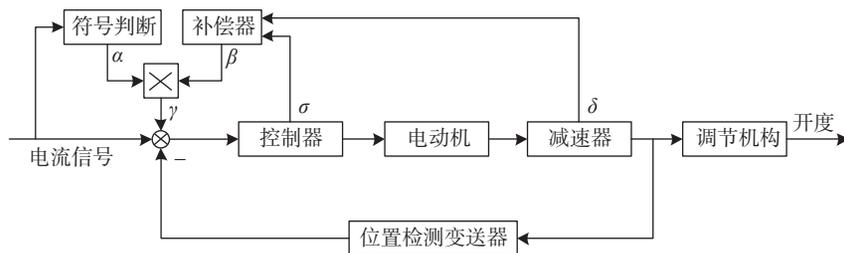


图 6 补偿方案示意图

Fig. 6 Schematic diagram of compensation scheme

#### 3.2 补偿器参数求取

补偿器的参数使用 BP 神经网络算法求取。补偿器的作用是根据控制器死区宽度  $\sigma$  和减速器齿隙宽度  $\delta$  确定补偿值的大小  $\beta$ 。人工神经网络是一种以人脑基本特性为基础的控制方法, 而 BP 神经网络由于其强大的非线性映射能力和柔性网络结构近年来常被用于处理非线性问题<sup>[12]</sup>, 是目前应用最多的神经网络模型之一。因此本文用 BP 神经网络算法建立了以  $\sigma$  和  $\delta$  为输入变量,  $\beta$  为输出变量的神经网络模型。神经网络输入层节点数为 2, 隐含层节点数为 5, 输出层节点数为 1, 激励函数取 Sigmoid 函数, 函数形式为:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

神经网络的训练数据通过仿真得到。 $\sigma$  和  $\delta$  取值如表 1 所示, 若仿真结果未出现等幅振荡, 记录下此时  $\sigma$  和  $\delta$  的取值, 并利用以下公式得到使稳态误差为零时期望补偿值  $\beta_c$  大小, 得到一组训练数据。

$$\beta_c = -e_{ss}(\infty) * 0.125 / 0.78125 \quad (2)$$

使用上述方法在 128 个仿真结果中最终得到 91 组训练数据。随机选择其中的 71 组数据对 BP 神经网络进行训练, 部分训练数据如表 2 所示。使用另外 20 组未参与训练的数据对训练得到的模型进行

测试, 测试结果如图 7 所示, 测试数据的误差如图 8 所示。

表 2 训练数据(部分)  
Tab. 2 Training data (partial)

序号	死区宽度 $\sigma/\text{mA}$	齿隙宽度 $\delta/\text{mm}$	期望补偿值 $\beta_c/\text{mA}$
1	0.1	0.5	0.040 4
2	0.12	0.5	0.018 8
3	0.14	0.5	-0.106 5
...	...	...	...
70	0.28	4	0.032 2
71	0.32	4	0.072 2

根据图 9 可知, 20 组测试数据的相对误差绝对值小于 12%, 且有 90% 的数据的相对误差绝对值小于 6%, 因此该模型有较好的泛化能力。

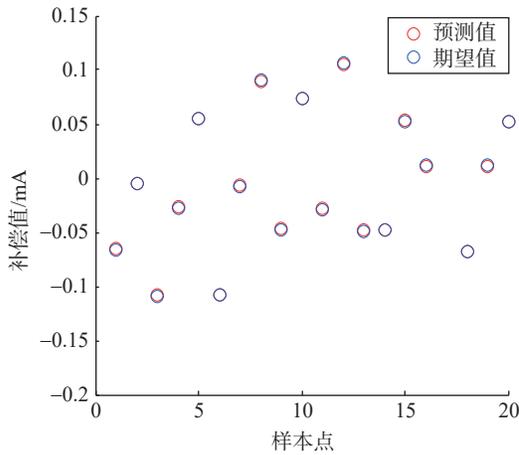


图 7 BP 神经网络测试结果  
Fig. 7 BP neural network test results

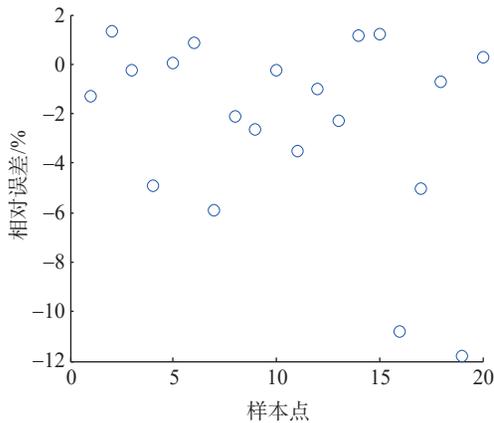


图 8 测试数据相对误差  
Fig. 8 Relative error of test data

#### 4 仿真实验

设置控制器死区宽度  $\sigma=0.1 \text{ mA}$ , 减速器齿隙宽度  $\delta=0.5 \text{ mm}$ 。图 9 为补偿前后系统的阶跃响应曲线。

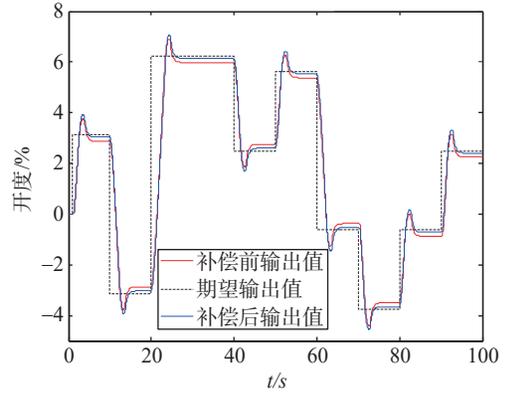


图 9 补偿前后系统的阶跃响应曲线

Fig. 9 Step response curve of uncompensated system and compensated system

通过图 9 可知, 对于不同幅值的阶跃输入信号, 补偿之后系统的稳态误差比未补偿系统的稳态误差小, 通过计算得到经过补偿能够使系统稳态误差的绝对值降低至 0.1% 以内。

图 10 为  $\delta=1 \text{ mm}$  时,  $\sigma$  与稳态误差的关系曲线, 通过比较图 4 和图 10 可知, 补偿后系统的稳态误差波动范围变小, 稳态误差的绝对值稳定在 0.1% 的范围内。

图 11 为  $\sigma=0.12 \text{ mA}$  时, 保证系统稳定的前提下补偿前后稳态误差的绝对值与  $\delta$  的关系。根据图 11

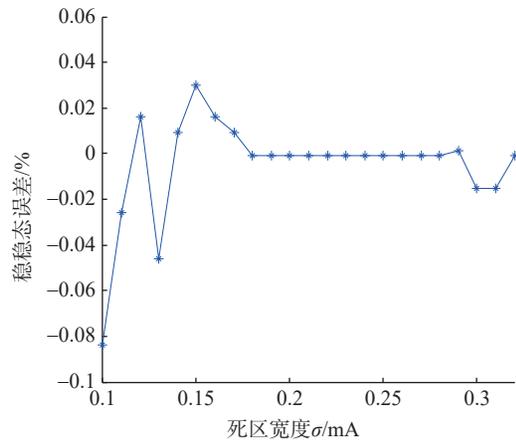


图 10 补偿后稳态误差与死区宽度的关系

Fig. 10 The relationship between the steady-state error and dead zone width after compensation

可知, 补偿后系统稳态误差的绝对值不再与  $\delta$  呈正相关, 始终在小于 0.1% 的范围内小幅波动。

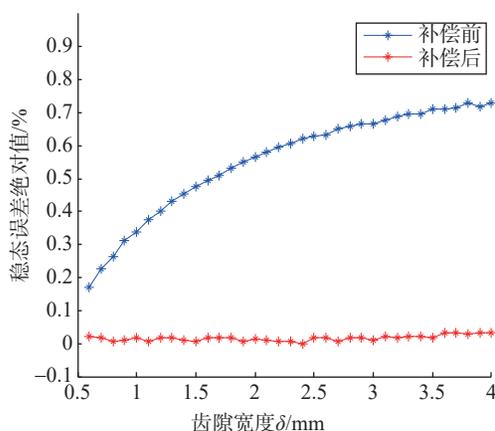


图 11 稳态误差绝对值与齿隙宽度的关系

Fig. 11 The relationship between absolute value of steady-state error and backlash width

## 5 结 论

针对电动执行机构的定位精度会因内部参数的变化而产生大幅波动的问题, 提出了通过添加补偿回路来稳定定位精度, 补偿回路的输出值与控制器死区宽度、减速器齿隙宽度和输入信号符号有关, 补偿回路的参数使用 BP 神经网络算法确定。仿真结果表明:

1) 添加补偿回路后, 定位精度不再因控制器死区宽度的增大而大幅降低, 解决了电动执行机构定位精度与稳定性之间的矛盾。

2) 该补偿方案能够在减速器齿隙宽度发生变化时减小定位精度的波动范围, 解决了电动执行机构的定位精度因减速器磨损而降低的问题。

### 参考文献:

[1] 徐一森. 工业控制中电动调节阀开度控制特性研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2016.  
XU Y S. Research on the control characteristics of the electric control valve opening in industrial control [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.

[2] 艾昌文, 曹良坤. 电动阀门高灵敏度控制技术及其研究 [J]. 自动化仪表, 2014, 35(11): 80-82+86.  
AI C W, CAO L K. Research and application of high-sensitivity control technology for electric valves [J]. Automation Instrumentation, 2014, 35(11): 80-82+86.

[3] 赵全保. BP 神经网络在电动执行器控制中的应用 [J]. 华北科技学院学报, 2018, 15(3): 93-97.

ZHAO Q B. The application of BP neural network in the control of electric actuators [J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2018, 15(3): 93-97.

[4] 徐艳超. 基于调速执行机构的一种高精度阀门控制方法实现 [J]. 电工技术, 2019(12): 17-18+21.  
XU Y C. Implementation of a high-precision valve control method based on speed-regulating actuators [J]. Electrical Engineering Technology, 2019(12): 17-18+21.

[5] 马艳玲. 含齿隙环节伺服系统的补偿控制 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.  
MA Y L. Compensation control of servo system with backlash link [D]. Xi'an: Xidian University, 2008.

[6] 苏亚洲. 高精度电动执行机构的设计研究 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2014.  
SU Y Z. Design and research of high-precision electric actuator [D]. Xi'an: Shanxi University of Science and Technology, 2014.

[7] 许海明, 何光辉. 电动执行器的行程位置检测 [J]. 仪表技术, 2019(2): 44-46.  
XU H M, HE G H. The stroke position detection of electric actuators [J]. Instrument Technology, 2019(2): 44-46.

[8] 王海荣. 电动执行机构的智能控制研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
Wang H R. Research on intelligent control of electric actuators [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.

[9] 谢志伟. 基于齿隙效应补偿的机电传动系统高性能控制方法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.  
XIE Z W. Research on high performance control method of electromechanical transmission system based on backlash effect compensation [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.

[10] 孙辉, 章立新, 杨其国, 等. 基于 GA-BP 神经网络的 S-CO<sub>2</sub> 折射率及密度预测 [J]. 热力发电, 2020(49): 1-6.  
SUN H, ZHANG L X, YANG Q G, et al. S-CO<sub>2</sub> refractive index and density prediction based on GA-BP neural network [J]. Thermal Power Generation, 2020(49): 1-6.

[11] 欧卫海. 液偶调速电动给水泵节能改造方案解析——行星齿轮变矩调速器与变频器方案对比 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(增刊 1): 22-26.  
OU W H. Analysis of the energy-saving transformation plan of the liquid-coupled speed-regulating electric feedwater pump—the comparison between the planetary gear torque converter and the inverter plan [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(Supp. 1): 22-26.

[12] WANG Y, DENG X, SUN P. A kind of electric actuator controller solving the problem of motor concussion [C]//

Anon. 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Changchun, China, August 5-8, 2018. Changchun:IEEE, 2018: 1015-1019.

#### 作者简介:



孟昊

孟昊 (通信作者)

1997-, 男, 内蒙古呼和浩特人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为智能发电系统分析与优化 (e-mail) 2994685468@qq.com。

#### 田亮

1976-, 男, 内蒙古磴口人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为热力发电过程建模、软测量及大机组智能优化控制。

#### 项目简介:

**项目名称** 提升供热机组电出力调节能力的蒸汽系统流程改造 (2017YFB0902102)

**承担单位** 西安热工研究院有限公司

**项目概述** 项目通过调研东北地区供热机组的类型的技术现状, 归纳影响供热机组电出力调节能力的限制因素; 研发低压缸末端高真空小汽流冷却技术、减温减压系统的高效分级集成及装置可靠性提升技术、多源供热抽汽流程设计及参数匹配技术; 研究蒸汽流程改造后供热机组的电、热负荷变工况特性, 分析不同蒸汽流程改造方案的经济性和适应性; 建立蒸汽流程改造关键部件的实验台, 开展

减温减压装置及引射混流装置流动特性和安全性实验研究; 研究蒸汽流程改造后汽轮机本体、辅助设备、供热系统的安全运行范围, 指定蒸汽流程改造的安全评估方案; 建立蒸汽流程改造后的供热机组仿真和控制平台, 研发机组不同供热模式下的柔性控制技术, 实现电出力的宽领域灵活调节。

**主要创新点** 针对供热机组效率高, 但电出力调节受限的矛盾, 在分析影响热供电机组电出力调节能力受限制因素和变化规律的基础上, 提出蒸汽流程改造原则性技术方案及其电、热负荷适用性选择原则。在此基础上, 研发低压缸末端高真空小汽流冷却、多源供热抽汽流程设计及参数匹配等蒸汽流程关键技术; 同时采用关键设备实验台和现场试验相结合的方式, 对蒸汽流程改造技术方案进行安全评估并提出相应的提升机组运行安全性的技术措施, 论证各技术方案的安全运行边界和典型控制参数的控制范围; 建立改造后供热机组的非线性动态模型, 搭建运行仿真和控制平台, 研发多供热模式下的柔性控制技术, 形成兼顾机组效率和灵活性的系列蒸汽改造流程改造集成技术, 降低电、热出力的耦合强度, 在保障供热负荷下, 实现电出力高效、灵活调节。

**项目名称** 供热机组灵活性提升理论及工程技术研究 (2017MS132)

**承担单位** 华北电力大学

**项目概述** 建立蒸汽流程改造后供热机组的简化非线性动态模型; 研究改造后机组运行控制参数极限和安全性评估方法; 研究实现供热机组快速变负荷的多尺度协调控制系统; 研究机组不同供热模式间切换的柔性控制方法。

**主要创新点** 通过减弱供热机组电热耦合提高发电负荷调节范围、利用机组和热网蓄热提高发电负荷调节速率中的控制优化和安全性评估等问题。

(责任编辑 李辉)

## 核电阀门知识

核电阀门是指在核电站中核岛 N1、常规岛 CI 和电站辅助设施 BOP 系统中使用的阀门。从安全级别上分为核安全 I 级、II 级、III 级、非核级。其中核安全 I 级要求最高。核电阀门在核电站中是使用数量较多的介质输送控制设备, 是核电站安全运行中的必不可少的重要组成部分。据统计一座具有两台 100 万 kW 机组的核电站有各类阀门 3 万台。

据统计目前全世界共有 447 个核电机组正在运行, 总装机容量为 3.8 亿 kW, 约占全球总发电量的 16.2%。有 17 个国家核电站装机容量占其本国总发电量的 25% 以上。其中法国占 77%, 韩国占 38%, 日本占 36%, 英国占 28%。美国也达到了 20%。在所运行的核电机组中, 50% 以上为压水堆, 其次有重水堆、沸水堆、石墨堆、快中子增殖堆、高温气冷堆。我国最早应用核动力技术的领域是军事工业。20 世纪 70 年代初海军第一艘压水堆核动力潜艇正式投入使用。从 1985 年我国自行设计建造秦山一期 30 万 kW 核电机组以来, 先后通过自主设计建造, 引进国外技术方式又建了大亚湾秦山二期、秦山三期、岭澳、田湾共 6 座核电站, 总装机容量达到 870 万 kW。占全国发电装机容量的 2%。我国计划到 2020 年核电装机容量将由现在的 870 万 kW 增加到 4 000 万 kW, 届时占全国电力装机总量的 4% 左右, 即从现在起, 平均每年至少建造两个百万 kW 的核电机组。已建成的核电站中, 除秦山三期采用加拿大重水堆型外, 其它均为压水堆。由俄罗斯提供的田湾核电站单机功率参数最大, 为 106 万 kW。

中国原子能科学研究院、清华大学等单位建造的快中子增殖反应堆, 先进堆、高温气冷堆等在国内尚属研究试验堆, 取得经验后将扩大建造商业用堆。值得关注的是由美国西屋公司设计的超第三代压水堆核电机组 AP600、AP1000 具有更高的运行安全性, 其设计采用了非能动原理如重力、对流、冷凝等, 用来做为安全系统中的驱动力, 大大减少了电、液、气等能动驱动力。同时阀门使用量减少 50%, 泵减少 35%、电缆用量减少 80%, 抗震等级要求设备数量下降了 45%, 电站寿命可达 60 年 (现为 30~40 年)。但这种核电站目前世界上还没有建成运行的范例。我国目前也在进行第三代核电站的研究和实验工作。

(孟昊 引自中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司官网)