

# 基于干扰观测器的轧辊微孔系统滑模控制器的设计及应用

刘英明<sup>1</sup>, 孙 畅<sup>1</sup>, 陈彦明<sup>2</sup>, 林国福<sup>3</sup>

(1. 长春汽车工业高等专科学校 电气工程学院, 吉林 长春 130013; 2. 安徽大学 计算机科学与技术学院, 安徽 合肥 230601;  
3. 洛阳 LYC 轴承有限公司, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 为了提高轧辊间隙结构下非线性控制性能, 引入微分几何反馈技术来完成线性化解耦过程, 根据干扰观测器实现滑模控制的功能, 建立了基于干扰观测器的轧辊微孔系统滑模控制器设计, 并开展应用验证。该控制系统可以达到理想的跟踪性能, 能够有效补偿间隙导致的误差, 表明本设计控制算法具备较强的可行性。对干扰观测器进行滑模控制仿真测试, 根据实际测试结果判断滑膜控制器的有效性, 能够实现精确的跟踪轨迹功能。应用验证表明: 经过改造, 轧机达到了更小的轧制误差, 表明采用滑模控制方式有助于轧机叶片达到更高的生产合格率, 对提高板材的轧制质量具有重大的意义, 实际的应用推广价值很大。

**关键词:** 轧制; 微孔系统; 滑模控制; 干扰观测器; 轧辊间隙

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.018

**中图分类号:** TG339      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 03-0116-05

## Design and application on sliding mode controller for roller microporous system based on disturbance observer

Liu Yingming<sup>1</sup>, Sun Chang<sup>1</sup>, Chen Yanming<sup>2</sup>, Lin Guofu<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Changchun Automobile Industry College, Changchun 130013, China;  
2. School of Computer Science and Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;  
3. Luoyang LYC Bearing Co., Ltd., Luoyang 471000, China)

**Abstract:** In order to improve the nonlinear control performance under the structure of roller gap, the differential geometric feedback technology was introduced to complete the linearization decoupling process. According to the sliding mode control function of disturbance observer, the sliding mode controller design of roller microporous system based on disturbance observer was established, and its application verification was carried out. The results show that the control system can achieve ideal tracking performance and effectively compensate the errors caused by gap, which indicates that the designed control algorithm has a strong feasibility. The sliding mode control simulation test of the disturbance observer was carried out, and the effectiveness of the sliding mode controller was judged according to the actual test results, which could realize the function of tracking trajectory accurately. The application verification shows that the rolling error of the modified rolling mill is smaller, indicating that the sliding mode control method is helpful to achieve higher qualified rate of rolling blades, which has great significance for improving the rolling quality of sheet and has great practical application and promotion value.

**Key words:** rolling; microporous system; sliding mode control; disturbance observer; roller gap

为航空设备制备静子叶片时需要使用轧机来完成材料的辊压成形加工, 尺寸控制精度受到轧辊位置的直接影响<sup>[1-5]</sup>。轧机进行动力传递时通过蜗轮蜗杆与丝杠螺母机构完成, 引起系统输入和输出轴出现位移迟滞的情况, 无法达到精确调控的要

求<sup>[6-8]</sup>。董玉亮<sup>[9]</sup>设计了一种可以对连续死区间隙进行分析的模型, 同时, 为机械旋转运动平台构建了动态方程。黄文博<sup>[10]</sup>则对存在齿轮间隙的运动机械臂进行了动力学参数仿真, 构建了一种通过比例积分实现的鲁棒控制器, 同时, 利用 NI 设备完成机械臂运动控制的过程。潘博等<sup>[11]</sup>选择具备抗力矩饱和功能的非线性 PD 控制器补偿含间隙以及存在啮合误差的空间机械臂。刘福才等<sup>[12]</sup>设计了一种较间隙分析模型, 构建了包含间隙的空间机械臂运动模型, 同时, 设计了一种间隙补偿控制器, 验证了

收稿日期: 2021-05-29; 修订日期: 2021-08-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61802001); 吉林省高教科研项目 (JGJX2020D626)

作者简介: 刘英明 (1981-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: wise2014365@163.com

空间机械臂进行轨迹跟踪的效果。

本文主要研究了轧辊在间隙结构下表现出的非线性控制性能，同时，引入微分几何反馈技术完成线性化解耦过程，根据干扰观测器实现滑模控制的功能，能够避免间隙因素引起的传动系统运动控制性能的变化。

## 1 轧辊微孔系统的动力学模型

本文设计了一种轧辊微孔系统来实现对轧辊左右位置的控制，如图1所示，轧辊微孔系统为一种对称结构，包含了轧辊、蜗轮、斜铁、螺母、滚珠丝杠、伺服电机、蜗杆和联轴器等多个组成部分。轧辊进行机构控制的原理为：伺服电机1首先利用蜗轮蜗杆将动力传输至滚珠丝杠5，之后带动螺母4发生移动，再带动斜铁7往外完成拔出的过程，并保留调整空间；接着，另外一侧伺服电机对斜铁提供驱动力，将其推进到制定位置并锁定，由此实现精确控制轧辊左右位置的功能。

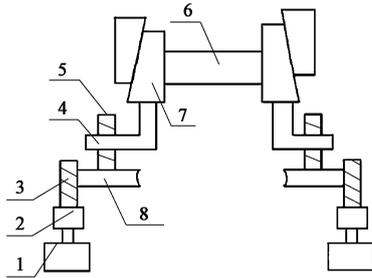


图1 轧辊微孔系统的结构

1. 伺服电机 2. 联轴器 3. 蜗杆 4. 螺母 5. 滚珠丝杠
6. 轧辊 7. 斜铁 8. 蜗轮

Fig. 1 Structure of roller microporous system

轧辊微孔系统具有左右对称的特点，构建单侧动力学仿真模型，实现了对蜗轮蜗杆与丝杠螺母的刚度、间隙、阻尼各项参数的等效处理<sup>[13-14]</sup>。图2为轧辊微孔系统的动力控制模型。其中， $J_m$ 为电机转子的转动惯量； $\theta_m$ 与 $C_m$ 分别为电机轴的转动惯量与阻尼； $T_g$ 、 $T_s$ 分别为轧辊微孔系统驱动和从动力矩； $T_m$ 为电机转矩； $m$ 、 $x$ 、 $c$ 分别为斜铁质量、

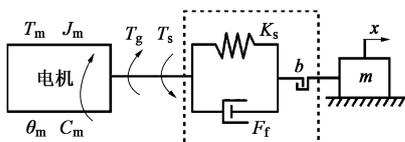


图2 轧辊微孔系统的动力学模型

Fig. 2 Dynamic model of roller microporous system

位移和阻尼系数； $F_f$ 为斜铁摩擦力； $K_s$ 为传动结构等效刚度； $b$ 为传动系统等效间隙。

以下为轧辊微孔系统的动力方程表达式<sup>[14]</sup>：

$$\begin{cases} J_m \ddot{\theta}_m + C_m \dot{\theta}_m = T_m - T_g \\ m \ddot{x} + c \dot{x} = T_s/l - F_f \end{cases} \quad (1)$$

式中：斜铁的阻尼系数； $l$ 为传动轴力臂。

将 $T_s$ 表示为：

$$T_s = \begin{cases} K_s(\Delta x - b), & \Delta x > b \\ 0, & -b < \Delta x < b \\ K_s(\Delta x + b), & \Delta x < -b \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\Delta x$ 为电机轴和负载轴之间产生的位移差。

为简化控制器的设计过程，通过转化式(1)得到控制系统的状态方程：

$$\begin{cases} J_m \ddot{\theta}_m + C_m \dot{\theta}_m + \frac{K_s}{N} \left( \frac{\theta_m}{N} - x \cdot r \right) = T_m \\ m \ddot{x} + c \dot{x} - \frac{K_s}{l} \left( \frac{\theta_m}{N} - x \cdot r \right) = -F_f \end{cases} \quad (3)$$

式中： $r$ 为蜗杆分度圆的半径； $N$ 为系统的传动比。

以 $x = [x_1, x_2, x_3, x_4] = [\theta_m, \dot{\theta}_m, x, \dot{x}]$ 表示轧辊调整模型的状态变量，再对式(2)进行等价转变得得到式(4)：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ -\frac{K_s}{N^2 J_m} x_1 + \frac{C_m}{N l J_m} x_2 + \frac{K_s r}{J_m} x_3 \\ x_3 \\ \frac{K_s}{N l m} x_1 - \frac{K_s r}{l m} x_2 + \frac{C_m}{m} x_3 + \frac{F_f}{m} x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{T_m}{J_m} \quad (4)$$

根据斜铁输出位移 $v = x_3$ ，将式(3)简化为式(5)：

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x) \\ v = h(x) \end{cases} \quad (5)$$

式中： $f(x)$ 、 $g(x)$ 为实数集上经过光滑处理的向量场； $h(x)$ 为实数集上经过光滑处理的非线性函数。

## 2 滑模控制器的设计

为实现轧辊微孔系统精确传动的控制性能，以提升控制系统的运行稳定性并改善鲁棒性，构建了一种通过干扰观测器实现的滑模控制方法。图3显示了轧辊微孔系统的具体控制策略，其中， $v_d$ 为轧辊转速输入信号， $y$ 为输出信号。

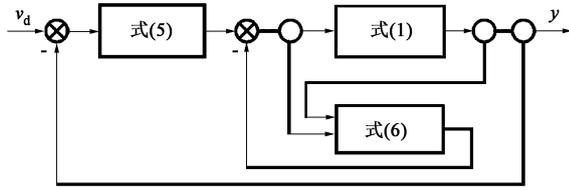


图 3 轧辊微孔系统控制策略  
Fig. 3 Control strategy of roller microporous system

干扰观测器的控制函数和切换函数  $Z(s)$  分别为:

$$s = m_0 e + m_1 e^2 + m_2 e^3 + e^4 \quad (6)$$

$$Z(s) = -\mu(s + \Omega \text{sgns}) \quad (7)$$

式中:  $s$  为控制方程因变量;  $e$  为控制方程自变量;  $\mu$  为滑模系数;  $m_0$ 、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $\Omega$  均为控制参数。

针对滑模控制算法设置了干扰观测器, 具体工作原理见图 4, 其中,  $G_p(s)$  为传递函数,  $G_n(s)$  为参考模型,  $Q(s)$  为滤波器控制函数,  $\rho$  为外控制影响输入值,  $u$  为干扰观测器输入值,  $d$  为等效干扰输入值,  $d_f$  为观测干扰输入值。

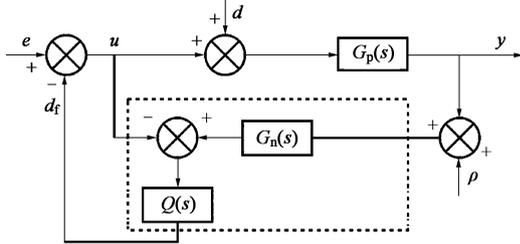


图 4 干扰观测器原理图  
Fig. 4 Principle diagram of disturbance observer

干扰观测器的输入为:

$$u = e - d_f + d \quad (8)$$

干扰观测器的控制方程  $G_Y(s)$  为:

$$G_Y(s) = \frac{G_p(s) G_n(s)}{G_n(s) + Q(s) [G_p(s) - G_n(s)]} \quad (9)$$

将低通滤波器控制函数表示为:

$$Q(s) = \frac{3\tau + 1}{\tau^3 s^3 + 3\tau^2 s^2 + 3\tau s + 1} \quad (10)$$

式中:  $\tau$  为响应周期, 取值为 0.5。

### 3 轧辊微孔系统滑膜控制的仿真分析

采用 MATLAB 软件对轧辊机构与干扰观测器算法进行了 Simulink 仿真测试, 得到图 5 所示的滑模控制仿真模型, 其中, 1 为  $x$  输入, 2 为  $dx$  输入,  $K$  为滑膜控制调节,  $y$  为滑模控制输出信号, 50 为系统封装率,  $\Delta u / \Delta t$  为干扰观测器输入值的变化量,

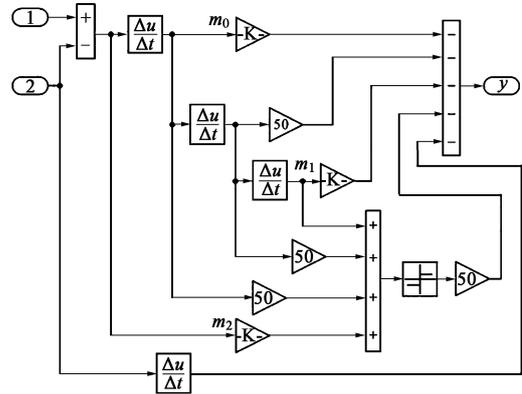


图 5 轧辊微孔系统滑膜控制仿真示意图  
Fig. 5 Simulation schematic diagram of sliding mode control for roller microporous system

+ 为正信号, - 为负信号。为实现更直观的仿真效果, 轧辊微孔系统的线性模块与非线性模型进行单独封装。

参考文献 [14], 设定  $\mu = 400$ ,  $\Omega = 1.2$ 。各项控制参数依次为  $m_0 = 820$ ,  $m_1 = 550$ ,  $m_2 = 0.15$ , 将期望信号设置为正弦曲线, 持续仿真 30 s, 得到图 6 与图 7 所示的信号跟踪结果。

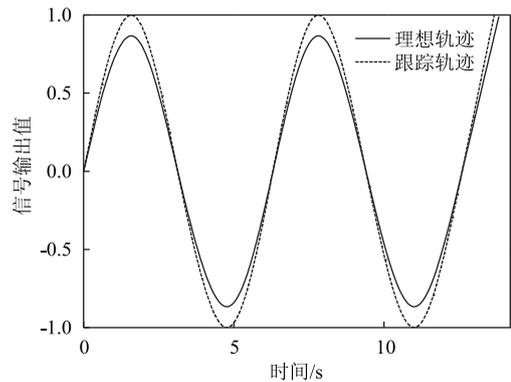


图 6 信号的跟踪曲线  
Fig. 6 Tracking curves of signal

根据图 6 与图 7 可以发现, 系统输出信号仅在最初始阶段发生了短暂波动, 之后形成了与输入信号良好吻合的状态, 可以推断该控制系统可以达到理想的跟踪性能, 能够有效补偿间隙导致的误差, 表明本文设计的控制算法具备较强的可行性。

### 4 应用验证

对控制算法的有效性进行验证, 并对轧辊机实施了改造, 同时加入了滑模控制器。从图 8 中可以看到轧辊机的实物结构。同时, 将其外罩去除, 方便对其内部结构进行深入观察。

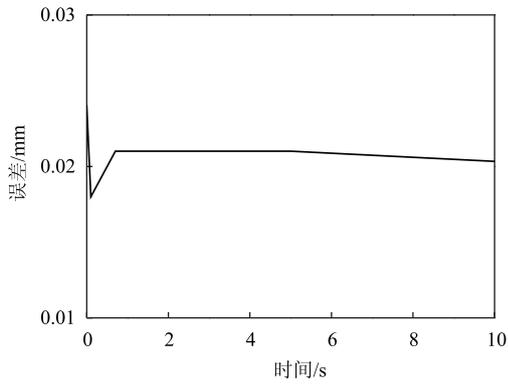


图7 信号的跟踪误差

Fig. 7 Tracking error of signal

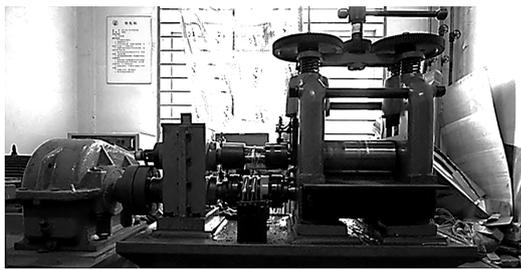


图8 轧机实物

Fig. 8 Roll mill object

为了对实际滑模控制效果进行测试，依次选择改造前后的轧机进行轧制，得到30个叶片试样，再通过随机方式选择3个叶片完成性能测试。对各叶片做好编号标记，其中，将由改造后的轧机进行轧制而得到的叶片标记为1~3，再将由没有改造的轧机轧制得到的叶片标记为4~6。参考文献[14]，设定图9所示的对各叶片的截面标记方案，X方向为平行于叶片方向，Y方向为垂直于叶片方向。对21组截面尺寸与型面尺寸的误差进行了测试，需在21组关键截面均达到精度要求的条件下才可以判断叶片是否满足合格标准。比较截面的测试尺寸和标准值，获得图10所示的检测距离误差。

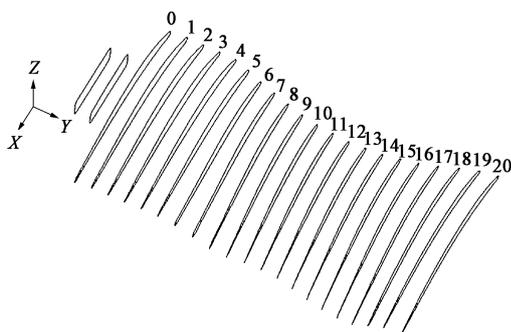
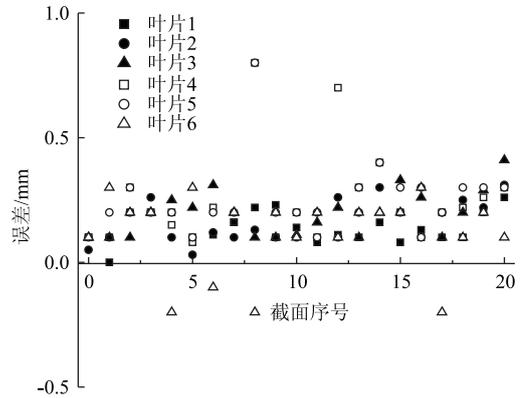
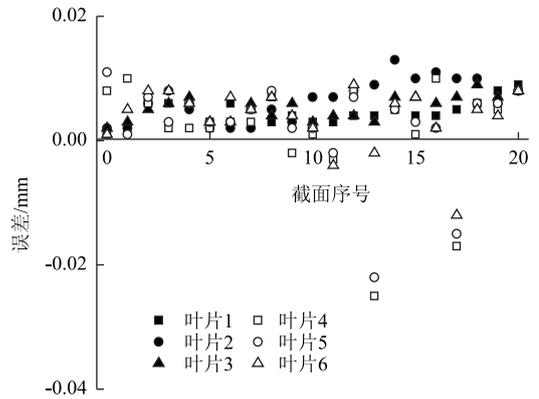


图9 叶片截面标记方案图

Fig. 9 Scheme diagram of blade section marking



(a)



(b)

图10 叶片检测误差

(a) X方向位移误差 (b) Y方向位移误差

Fig. 10 Blade detection errors

(a) Displacement errors in X direction

(b) Displacement errors in Y direction

对图10进行分析可以发现，1~3叶片的误差明显小于4~6叶片，尤其是对比X方向的位移误差结果。表明相对于采用原轧机轧制得到的叶片，经过改造处理的轧机达到了更小的轧制误差，可见采用滑模控制方式有助于轧制叶片达到更高的生产合格率。

### 5 结论

(1) 为包含间隙的轧机构建了非线性模型，同时，以微分几何反馈线性分析方法将轧辊间隙非线性系统转化为了线性系统。

(2) 传统输出信号仅在最初阶段发生了短暂波动，之后形成了与输入信号良好吻合的状态，可以推断该控制系统可以达到理想的跟踪性能，能够有效补偿间隙导致的误差，表明本文设计的控制算法具备较强的可行性。

(3) 对干扰观测器进行滑模控制仿真测试，根

据实际测试结果判断了滑膜控制器的有效性,能够实现精确的跟踪轨迹功能。

#### 参考文献:

- [1] 毛君, 孟辉, 陈洪月, 等. 叶片辊轧机高精度调整机构运动精度分析 [J]. 机械设计与研究, 2015, 31 (4): 20-23, 26.  
Mao J, Meng H, Chen H Y, et al. Kinematic accuracy analysis of high precision adjusting mechanism of blade rolling mill [J]. Machine Design & Research, 2015, 31 (4): 20-23, 26.
- [2] 葛正, 王维锐, 王俊鼎. 电子机械制动器间隙调整控制策略研究 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2017, 51 (1): 138-144.  
Ge Z, Wang W R, Wang J D. Control strategy for brake clearance adjustment of electronic mechanical brake [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2017, 51 (1): 138-144.
- [3] 刘碧茜. 滚珠丝杠进给系统神经网络自适应控制方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.  
Liu B Q. Adaptive Neural Networks Control of High Speed Ball Screw Drives [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [4] Ouyang P R. An adaptive switching learning control method for trajectory tracking of robot manipulators [J]. Mechatronics, 2006, 16 (1): 51-61.
- [5] Zhou J, Zhang C J. Robust adaptive output control of uncertain nonlinear plants with unknown backlash nonlinearity [J]. IEEE Transactions on Automation Control, 2007, 52 (3): 503-509.
- [6] Li Y M, Tong S C. Adaptive fuzzy output feedback control of uncertain nonlinear systems with unknown backlash-like hysteresis [J]. Information Sciences, 2012, 198 (1): 130-146.
- [7] 孙龙飞, 房立金. 基于变偏置力矩的双电机系统消除控制方法研究 [J]. 电机与控制学报, 2017, 21 (3): 89-96.  
Sun L F, Fang L J. Anti-backlash control method of dual-motor driving system based on switching bias torque [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21 (3): 89-96.
- [8] 喻立. 新型变齿厚齿轮侧隙控制方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [9] 董玉亮. 含有摩擦和间隙的机械系统建模与跟踪控制研究 [D]. 济南: 济南大学, 2014.  
Dong Y L. Modeling and Tracking for Mechanical System with Friction and Backlash [D]. Jinan: University of Jinan, 2014.
- [10] 黄文博. 含齿轮传动机械臂系统间隙识别与控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
Huang W B. Research on Clearance Identification and Control of Mechanical Arm System with Gear-driven [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [11] 潘博, 孙京, 于登云. 大型空间机械臂容错关节设计与控制 [J]. 机械传动, 2010, 34 (9): 1-5.  
Pan B, Sun J, Yu D Y. Fault-tolerant joint design and control for large-scale space manipulator [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010, 34 (9): 1-5.
- [12] 刘福才, 侯甜甜, 秦利, 等. 考虑铰间间隙和重力影响的空间机械臂轨迹跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32 (5): 665-673.  
Liu F C, Hou T T, Qin L, et al. Trajectory tracking control of space manipulator considering joint clearance and gravity [J]. Control Theory & Applications, 2015, 32 (5): 665-673.
- [13] 刘金坤. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
Liu J K. MATLAB Simulation for Sliding Mode Control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [14] 张瑜, 王立新, 陈洪月, 等. 考虑间隙的叶片辊轧机轧辊调整机构滑模控制研究 [J]. 工程设计学报, 2020, 27 (5): 585-591.  
Zhang Y, Wang L X, Chen H Y, et al. Research on slipping mode control for roll adjusting mechanism of blade roller mill with clearance [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2020, 27 (5): 585-591.

### 关于举办“全国锻压技术与装备高级研修班”的通知

(可申请参加“材料锻压工程师(见习、中级和高级)技术资格认证”)

为了进一步提高企业技术人员的综合素质、强化其专业技术能力与水平,促进锻压行业的技术进步,提高锻压产品的质量水平,增强企业的竞争实力,为制造业的发展做出更大的贡献;同时,为我国锻压专业的青年教师、在校学生的培养创造条件,中国机械工程学会塑性工程分会拟于2022年6月15-19日在上海举办“全国锻压技术与装备高级研修班”。

一、培训对象: 锻压行业企业技术骨干、高校青年教师、在校学生等相关人员。

二、培训内容: 先进塑性成形技术与装备前沿论坛; 锻造目的、特点及前后处理; 自由锻工序及工艺规程制定; 模锻工序及模锻工艺设计; 锻模设计及案例分析; 精密模锻; 模锻工艺发展趋势及最新模锻技术简介; 锻压装备、自动化生产线、智能制造等相关内容。

三、授课教师: 王雷刚(江苏大学, 教授); 王以华(上海交通大学, 研究员); 张浩(北京机电研究所有限公司, 研究员)

四、考试与证书: 1. 培训结束后, 进行闭卷考试, 考试合格的学员将获得由中国机械工程学会塑性工程分会颁发的结业证书; 2. 取得结业证书, 且符合条件者, 可按照规定申报“材料锻压工程师技术资格认证(含见习、中级和高级)”, 详细申报条件请浏览中国机械工程学会塑性工程分会官方网站 [www.cstp-cmes.org.cn](http://www.cstp-cmes.org.cn)。

五、联系方式: 李佳盈(15711032068, 微信同号)、秦思晓(15201461873, 微信同号) E-mail: [duanya@cmes.org](mailto:duanya@cmes.org)

中国机械工程学会塑性工程分会