

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.05.017

基于 EtherCAT 和遗传-BP 神经网络的等温锻造电液伺服系统优化研究

李 欣¹, 王晓燕²

(1. 南充职业技术学院 科研处, 四川 南充 637131; 2. 重庆大学 机电工程学院, 重庆 400030)

摘要: 针对等温锻造电液伺服系统有限滑块行程内锻造载荷和滑块速度控制精度低、横梁调平状态不稳定等问题, 提出了一种基于 EtherCAT 和遗传-BP 神经网络的等温锻造工艺参数优化控制系统。利用 LabVIEW 设计了主站监控界面, 配置了各模块间通信协议, 用 ActiveX 设计了遗传-BP 神经网络与 LabVIEW 间通信接口, 通过 UDP/IP 在 LabVIEW 和 EtherCAT 从站间交互实时监控数据, 利用仿真模拟了非线性模型的优化精度, 并实时监控了柱坯等温锻造过程的横梁状态。研究表明: 经遗传-BP 神经网络算法优化, 载荷和滑块速度的整体控制误差低于 2.5%, EtherCAT 从站反馈的横梁调平状态稳定, 有效改善了等温锻造电液伺服系统存在的问题, 提高了材料利用率和锻件成型质量。

关键词: 等温锻造电液伺服系统; EtherCAT; LabVIEW; 遗传-BP 神经网络

中图分类号: TH39; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2019)05-0534-05

Optimize for isothermal forging electro-hydraulic servo system based on EtherCAT and genetic-BP neural network

LI Xin¹, WANG Xiao-yan²

(1. Department of Scientific Research, Nanchong Professional Technic College, Nanchong 637131, China;

2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Aiming at the problems of low accuracy for forging load, speed, and unstable for beam in finite-stroke forokoked, a scheme for process optimization was proposed based on EtherCAT and genetic-BP network. Master monitoring interface was designed by LabVIEW. Then communication protocol between each module was configured, and ActiveX was used to design interface between genetic-BP and LabVIEW, UDP/IP was used to exchange monitoring data. Simulation precision was used to simulate the optimization accuracy of the nonlinear model, and beam state was monitored in real time. The results indicate that the overall control error of load and speed is less than 2.5% through genetic-BP algorithm optimization, and beam leveling state is stable, which effectively improves the problems of isothermal forging electro-hydraulic servo system.

Key words: isothermal forging electro-hydraulic servo system; EtherCAT; LabVIEW; genetic-BP neural network

0 引 言

等温锻造是加工钛合金等航空难变形材料的有效途径, 通过保持模具和坯料恒定的温度, 使其在较低的应变速率下锻造成型。因此, 等温锻造被广泛用于制造压机机盘、涡轮盘、进气机匣、翼芯和隔框等关键结构

件^[1-2]。难变形材料的成型质量直接受等温锻造工艺参数影响^[3], 即在有限的滑块行程内需要精确控制压头速度、主缸压力、模具和坯料温度等参数, 动态补偿锻坯表面不平整而引起的横梁受力不均匀, 从而改善材料与形状差异对锻件表面质量和尺寸精度的影响。

目前, 等温锻造主要通过电液伺服和 PID 算法在

线调节滑块速度及横梁四角的柱塞缸,控制滑块按工艺曲线变化,并以其中一角位移为基准,同步控制其他柱塞缸动作^[4-5]。由于难变形材料的等温锻造过程复杂,很难直接建立精确的数学模型,传统的PID算法无法实现对等温锻造参数的动态调节。鉴于此,丁曙光等人^[6]将免疫PID应用于YH10-2000等温锻造机,由免疫反馈改善控制系统的动态响应;BERG等人^[7]利用神经网络实现对压头速度的在线反馈控制,根据锻造参数的扰动动态优化压头速度;杜春燕等人^[8]设计了适于等温锻造速度控制的单神经元自适应PID算法,利用单神经元建立设定速度与实际速度的非线性关联,由带监督的Hebb学习修正关联权重,通过线性PID控制锻造速度;LU等人^[9]利用Talyor展开式逼近锻造的非线性模型,再根据反馈的偏差实时控制锻造参数。考虑等温锻件成型质量影响因素较多,等温加压、保压阶段的滑块速度和横梁调平控制不可忽略有限滑块行程内的等温锻造工艺参数的变化。

针对上述分析,本文将利用EtherCAT和遗传-BP神经网络实现对等温锻造电液伺服系统的优化控制,通过EtherCAT通讯和LabVIEW软件设计80 MN等温锻造液压机的实时控制平台,并在此基础上应用遗传-BP神经网络建立主缸压力和滑块速度与锻坯材料、几何形状、应变速率和变形温度间的非线性模型,由该模型响应参数变化和系统扰动,进而提高材料利用率和锻件成型质量。

1 等温锻造液压机及其优化控制

1.1 等温锻造液压机工作原理

等温锻造液压机包括机身、模具与加热保温装置、液压及控制系统等,其结构示意图如图1所示。

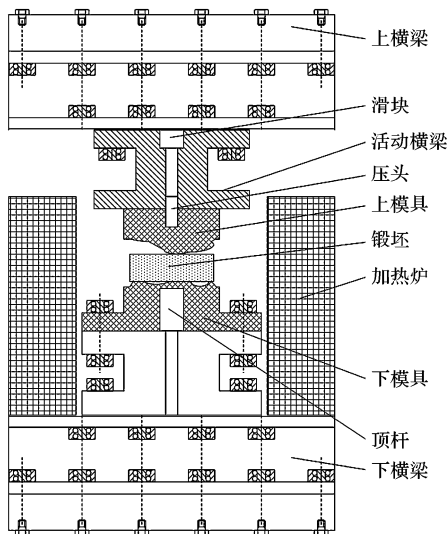


图1 等温锻造液压机的结构示意图

经预热、喷涂润滑剂的难变形材料锻坯置于带加热保温的等温锻模内,利用感应炉将模具和锻坯均匀加热到锻造温度。压头对锻坯施压前,滑块以100 mm/s ~ 200 mm/s的速度快降;压头接触锻坯,横梁四角的柱塞缸同步调平,确保压头作用均匀施压到锻坯,并控制滑块以0.001 mm/s ~ 1 mm/s的速度慢降以均匀镦粗锻坯。压头通过上模具对锻坯进一步挤压,调节滑块慢降速度和横梁状态,精确控制难变形材料的应变速率,通过保压促使材料均匀充填型腔。

1.2 控制方案与优化策略

锻坯镦粗与挤压阶段,等温锻造设备既要精确控制滑块速度,确保最优的应变速率,又要根据锻坯的高径比、应变速率和变形温度精确控制锻造载荷,调平横梁以使锻造压力均匀作用到锻坯。在等温锻造电液伺服系统中,优化控制锻造载荷、滑块速度和横梁状态有助于提高锻件最终的成型质量。为此,笔者利用EtherCAT和LabVIEW建立等温锻造液压机的实时控制平台,通过遗传-BP神经网络复合算法实现等温锻造过程电液伺服系统的优化控制。

控制方案与优化策略如图2所示。

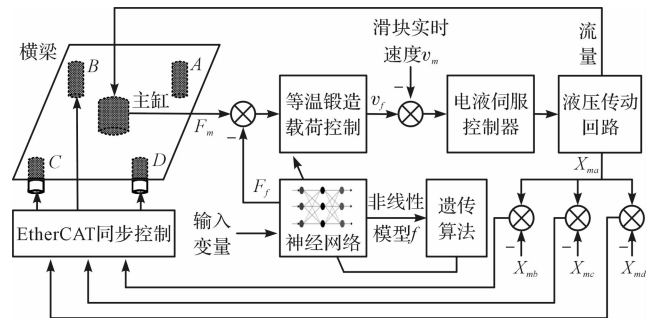


图2 控制方案与优化策略

本研究通过模拟田口方法、BP神经网络,建立了难变形材料高径比、锻坯表面平整系数、应变速率和变形温度与主缸压力 F_f 和滑块速度 v_f 的非线性模型 f 。根据LabVIEW设定的输入变量,遗传算法GA对非线性模型 f 进行多次迭代以获取满足最优应变速率和变形温度的主缸压力 F_f 和滑块速度 v_f ,并将其设为初始值。

同时,EtherCAT实时监测主缸压力 F_m 、滑块速度 v_m 和横梁A~D端柱塞缸位移 $X_{ma} \sim X_{md}$,一部分实测值与初始值间偏差经PID整定反馈修正主缸压力 F_m 、滑块速度 v_m ,另一部分以横梁A端柱塞缸位移 X_{ma} 为基准,通过 $X_{ma} - X_{mb}$ 、 $X_{ma} - X_{mc}$ 和 $X_{ma} - X_{md}$ 的差值同步控制B、C和D端柱塞缸位移。

2 电液伺服实时控制平台设计

由于钛合金等难变形材料的锻造温度范围较窄,在有限的滑块行程内需要动态处理和精确控制主缸压力和滑块速度等工艺参数,对应的控制系统应具有良好的动态响应,即要求监控硬件具有较高的实时性和稳定性。EtherCAT 能将锻坯墩粗与挤压成型阶段的锻造载荷 F_m 、滑块速度 v_m 和横梁 A~D 端柱塞缸位移等分布参数在线写入主站的监控报文,取代从站对工艺参数的预处理,并由主站集中优化等温锻造工艺。

等温锻造电液伺服实时控制系统硬件结构由上位机(带 LabVIEW 监控)、EtherCAT 实时 I/O、传感器模块(同步监测锻造载荷、滑块速度、主缸和柱塞缸位移、液压流量、温度等信号)、液压泵及流量控制电路等组成。

其硬件系统结构如图 3 所示。

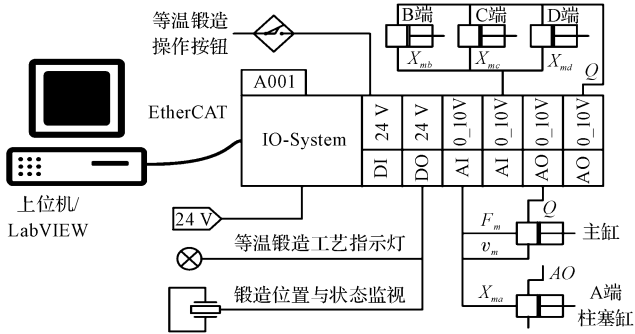


图 3 硬件系统结构

从站 A001 利用耦合器 EK1100 与上位机建立 EtherCAT 连接,并通过实时数字和模拟 I/O 在线监控等温锻造工艺参数。数字量 I/O 由 3 组 8 点输入 EL1018 和 8 点输出 EL2008 模块构成,用于等温锻造电液伺服控制按钮输入,以及锻造位置、工艺指示灯、压头与横梁液压泵开关等工艺状态的在线反馈输出。模拟量 I/O 由一组 4 点输入 EL3064、8 点输入 EL3068 和 8 点输出 EL4008 等模块组成,通过模拟量 AI 输入实时监视锻坯温度、锻造载荷 F_m 、滑块速度 v_m 、液压回路流量和横梁 A~D 端柱塞缸位移 $X_{ma} \sim X_{md}$ 等参数,以遗传-BP 神经网络算法优化的等温锻造载荷 F_f 、滑块速度 v_f 和横梁 A 端柱塞缸位移 X_{ma} 为设定基准,再利用模拟量 AO 输出实时控制等温锻造机电液伺服系统,进而间接控制难变形材料的应变速率和变形温度。

上位机作为 EtherCAT 主站,利用标准的以太网卡与从站 A001 建立实时 EtherCAT 通讯,并通过 LabVIEW 实时监控等温锻造工艺及电液伺服系统的运行状态。

LabVIEW 监控界面如图 4 所示。

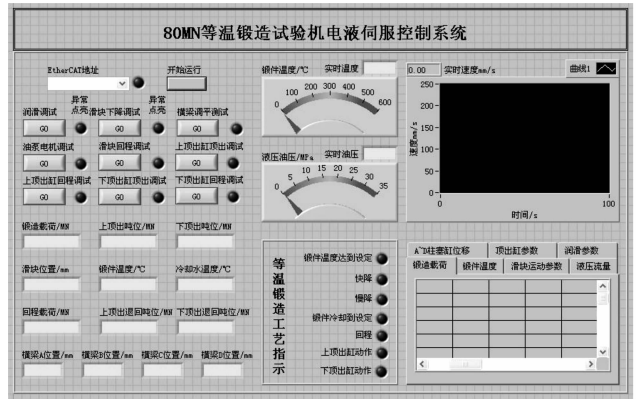


图 4 LabVIEW 监控界面

在上位机的 LabVIEW 内运行精确时钟同步算法,定义 UDP/IP 协议以实时监控和调试等温锻造工艺参数。此外,遗传-BP 神经网络算法优化输出的等温锻造载荷 F_f 和滑块速度 v_f 也通过上位机 LabVIEW 载入,并以 EtherCAT 和 LabVIEW 搭建的等温锻造实时监控平台为基础,同步控制锻造载荷、滑块速度和横梁状态。

3 控制系统基本功能设计与实现

3.1 等温锻造非线性模型建立

等温锻造非线性模型 f 的建立选用面向特定材料的遗传-BP 神经网络算法,其输入为量化的锻坯高径比、表面平整系数、应变速率和变形温度,输出为等温锻造载荷 F_f 和滑块速度 V_f ,由 BP 神经网络的非线性拟合训练模型 f ,并以该模型 f 与输出变量之差为个体适应度值,利用遗传算法在 4 维输入的量化空间内全局寻优,获取最优的载荷 F_f 、速度 V_f 及输入量化指标。

该算法设计与实现的具体步骤如下:

(1) 利用 BP 神经网络训练等温锻造非线性模型 f ,训练样本取 4 因素 3 水平正交试验 $L_9(3^4)$ 参数。根据 Kolmogorve 定理^[10-11],4 输入、2 输出的隐含层数目为 9,构造的 BP 神经网络结构为 4-9-2。输入与隐含层间传递函数选择 $logsig$ 函数,隐含与输出层间传递函数选择 $purelin$ 函数。为消除正交试验 $L_9(3^4)$ 样本参数间的数量级差别,各参数按下式归一化到 $[0,1]$ 区间:

$$x_n = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中: x, x_n 分别为归一化前、后样本参数; x_{\max}, x_{\min} 分别为归一化前样本的最大值、最小值。

所建立非线性模型 f 为:

$$Y = purelin[w_2 \times logsig(w_1 \times X_n + o_1) + o_2] \quad (2)$$

式中: X_n —归一化的4维输入向量; Y —2维输出向量; w_1, w_2 —输入到隐含层、隐含到输出层间连接权值; o_1, o_2 —输入到隐含层、隐含到输出层间连接阈值。

(2) 通过遗传算法在锻坯高径比、表面平整系数、应变速率和变形温度构成的4维量化空间内全局寻优,获取最优的载荷 F_f 、滑块速度 v_f 及输入量化指标。遗传算法中,个体长度为4,每个个体采用实数编码,初始种群为 $P(0)$,种群规模设为30。计算每组种群对应的适应度值,其中适应度函数 $fitness$ 为

$$fitness = (Y(;1) + Y(;2)) - (F_f + v_f) \quad (3)$$

式中: $Y(;1), Y(;2)$ —分别为非线性模型 f 输出的列向量。

设置交叉概率0.6、变异概率0.2,从父代种群 $P(i)$ 中选择适应度值较小的个体进行交叉、变异,并输出满足最优适应度值的子代种群,从而实现等温锻造工艺参数的优化。

3.2 通信协议配置与实现

3.2.1 非线性模型与 LabVIEW 间接口设计

等温锻造非线性模型基于 Matlab 开发,GA-BP 神经网络优化输出的锻造载荷 F_f 和滑块速度 v_f 需要在线载入 LabVIEW,再通过 LabVIEW 和 EtherCAT 实现等温锻造工艺参数的实时优化控制。因此,上位机端需要建立 Matlab 与 LabVIEW 间通信接口,并在 LabVIEW 上配置 EtherCAT 通信协议,以实现上位机对等温锻造过程电液伺服系统的优化控制。

Matlab 与 LabVIEW 间通信接口设计采用双向支持的 ActiveX 函数模板^[11-13],通过引用 VI 程序启动 Matlab 自动化服务器,在 LabVIEW 中向指定的 Matlab 工作空间写入数组变量,借助 Matlab 开发的 GA-BP 神经网络优化锻造载荷 F_f 和滑块速度 v_f ,将结果转化为合法字符串,并从工作空间获取优化的等温锻造工艺参数。以 Automation Open. VI 为启动 Matlab 自动化服务器的引导程序,LabVIEW 中分别调用 PutFullMatrix()、GetFullMatrix() 函数在工作空间写入、读取数组变量,利用 Variant to Data. VI 将 Execute() 函数导出的字符串转化为上位机监控界面的控件输入,再以 Automation Close. VI 为引导关闭 Matlab 服务。

3.2.2 主从 EtherCAT 通信与实时交互设计

上位机与 EtherCAT 从站间数据交互基于 LabVIEW 上配置的 EtherCAT 通信协议,利用时钟同步算

法确保上位机与 EtherCAT 从站间时钟同步,再通过 UDP/IP 将 EtherCAT 数据帧嵌入传输。EtherCAT 数据帧由 EtherCAT 帧头和子报文组成,每个从站对应一个子报文存储空间,各从站依次检测对应子报文内16位状态,并实时响应上位机同步时钟,将从站监测或执行结果写入存储区。EtherCAT UDP 将 EtherCAT 协议嵌入到 UDP/IP 数据报文中,从站依次检测子报文状态位的置位状态,响应上位机同步时钟,实现 EtherCAT 数据实时交互。

锻造载荷、滑块速度和横梁状态等电液伺服系统工艺参数实时优化基于 EtherCAT 实时通讯和 LabVIEW 监控。利用 ActiveX 函数模板,将遗传神经网络优化输出的等温锻造载荷 F_f 和滑块速度 v_f 载入到 LabVIEW,通过 UDP/IP 将 EtherCAT 数据嵌入传输,同步采样等温锻造电液伺服系统的实际载荷 F_m 、滑块速度 v_m 、横梁 A~D 端柱塞缸位移 $X_{ma} \sim X_{md}$,并根据优化输出与实测偏差同步控制等温锻造过程电液伺服系统。

4 优化及结果分析

$L_9(3^4)$ 组训练样本对应特定材料的锻坯高径比、表面平整系数、应变速率和变形温度。如果锻坯初始条件与样本数据有偏差,则需要经过 GA-BP 神经网络优化,获取与实际高径比、表面平整系数、应变速率和变形温度相匹配的锻造载荷 F_f 和滑块速度 v_f 。取12组 TC4 钛合金隔框的等温锻造工艺构成训练样本,其中 TC4 钛合金锻坯几何形状为圆柱坯,高径比 3:2; TC4 柱面表面平整系数范围 0~1;应变速率范围 $10^{-3} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$;变形温度范围 $900 \text{ }^\circ\text{C} \sim 980 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

经 BP 神经网络训练后,利用遗传算法迭代 50 次,适应度值变化曲线如图 5 所示。

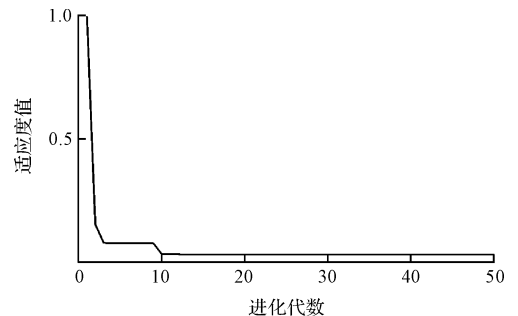


图5 适应度值变化曲线

经 10 次交叉、变异,适应度函数 $fitness$ 趋于最小。优化后训练样本的变化率如图 6 所示。

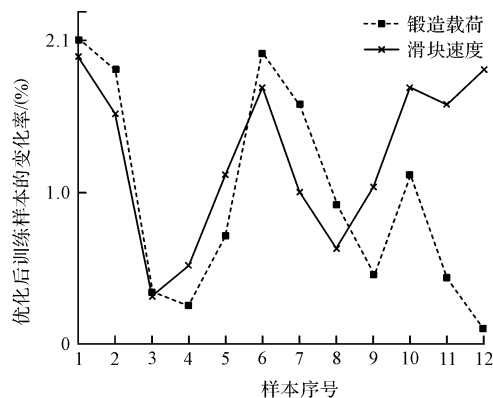


图 6 优化后训练样本的变化率

对于第 1 组样本,载荷和速度变化率均较大,当 TC4 钛合金柱坯的高径比 3:2,柱面表面平整系数 0.6,应变速率 $3.55 \times 10^{-3} s^{-1}$,变形温度 $920^{\circ}C$ 时,训练样本给定的实际等温锻造载荷 80 kN、滑块速度 0.05 mm/s,而优化的等温锻造载荷 78.3 kN、滑块速度 0.0491 mm/s,载荷、速度变化率分别为 2.1%、1.8%,即整体控制误差低于 2.5%。

基于 EtherCAT 和 LabVIEW 搭建的等温锻造液压机实时控制平台,将优化后的载荷和滑块速度作为锻造 TC4 钛合金柱坯的设定值, EtherCAT 从站反馈的横梁 A~D 端柱塞缸位移 $X_{ma} \sim X_{md}$ 基本保持同步,等温锻造电液伺服系统运行平稳。

5 结束语

根据某 80 MN 等温锻造机电液伺服系统存在的锻造载荷和滑块速度控制精度低、横梁调平状态不稳定等问题,本文提出了基于 EtherCAT 实时通信和遗传-BP 神经网络算法的等温锻造工艺参数优化方案,搭建了以 EtherCAT 为核心的实时监控平台,利用 LabVIEW 设计了 EtherCAT 主站监控界面,由遗传-BP 神经网络算法优化了锻造载荷和滑块速度,并配置了各组成模块间通信协议。

对于特定材料,本研究应用遗传-BP 神经网络算法能根据锻坯材料和几何特征获取最优的锻造载荷和滑块速度,并控制整体误差低于 2.5%;通过 EtherCAT 主、从通信,确保了横梁四角柱塞缸位移保持同步变化,横梁调平状态稳定。整套系统实现了等温锻造电

液伺服系统优化控制,有助于提高钛合金等难变形材料的成型质量和材料利用率。

参考文献 (References):

- [1] 占立水,张 华,史国中,等. TA15 钛合金支臂近等温锻造工艺[J]. 航空制造技术,2009(10):143-145.
- [2] 蒋红琰,程 峰. 复杂结构钛合金机翼的等温锻造试验研究[J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(11):3182-3187.
- [3] 丁平平,杨 屹, YI Q, 等. 钛合金等温锻造工艺优化研究[J]. 锻压技术,2009,34(3):121-124.
- [4] 陈庆华. 大型液压设备四角调平控制系统的研究与应用[J]. 机械设计,2011,28(6):81-84.
- [5] 韩其义,张英男. 等温锻造液压机的四角调平控制系统[J]. 锻压装备与制造技术,2010,45(6):28-30.
- [6] 丁曙光,王亮亮,桂贵生,等. 免疫 PID 算法在 YH10-2000 型等温锻造液压机中的应用研究[J]. 机床与液压,2012,40(3):19-21.
- [7] BERG J M, ADAMS R J, MALAS J C, et al. Nonlinear optimization-based design of ram velocity profiles for isothermal forging [J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 1995,3(3):269-278.
- [8] DU C, WU A, ZHENG A. The application of single neuron adaptive PID method to the speed control of isothermal forging processes[C]. Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian: IEEE, 2006.
- [9] LU X J, HUANG M H. A simple online modeling approach for a time-varying forging process[J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2014(75):1197-1205.
- [10] 张庆庆,贺兴时. BP 神经网络结点数选取的改进方法及其应用[J]. 西安工程大学学报,2008,22(4):502-505.
- [11] 苏一新,马彦会,苏 倩,等. 基于 BP 神经网络模型的磁悬浮水磊 PID 参数优化[J]. 流体机械,2018,46(1):20-24,33.
- [12] 姚世锋,薛德庆,张彦斌,等. LabVIEW 与 Matlab 的混合编程[J]. 兵工自动化,2005,24(6):116-117.
- [13] HORNG J H. Hybrid Matlab and LabVIEW with neural network to implement a SCADA system of AC servo motor[J]. **Advances in Engineering Software**, 2008,39(3):149-155.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

李 欣,王晓燕. 基于 EtherCAT 和遗传-BP 神经网络的等温锻造电液伺服系统优化研究[J]. 机电工程,2019,36(5):534-538.

LI Xin, WANG Xiao-yan. Optimize for isothermal forging electro-hydraulic servo system based on EtherCAT and genetic-BP neural network[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(5):534-538.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>