

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.04.029

挖掘机斗杆结构应力神经网络建模

李军, 罗承旭, 林述温

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:为了研究斗杆结构应力神经网络建模方法,在分析不同典型工况下斗杆结构的应力分布特征基础上,确定斗杆结构的应力特征截面,分析斗杆结构各尺寸参数对各特征截面应力的灵敏度,据此确定斗杆结构应力神经网络模型的输入变量,进行结构应力神经网络建模,并对不同神经网络模型结构进行预测误差对比分析。结果表明:所建立的模型可快速预测斗杆结构特征截面的应力,实训样本预测误差小于 10%。

关键词:挖掘机;斗杆结构;BP 神经网络;应力预测;应力特征截面

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)04-0154-07

Modeling of Stress Neural Network for Excavator Bucket Rod Structure

LI Jun, LUO Chengxu, LIN Shuwen

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract:To study the modeling method of the lever structure of stress neural network, based on the analysis of the stress distribution characteristics of the bucket lever structure under different typical conditions, determines the stress characteristic section of the bucket lever structure, and analyzes the sensitivity of the size parameters of the bucket lever structure to the stress of each feature section. Accordingly, the input variables of the stress neural network model of the bucket lever structure is defined, the model of the structural stress neural network is established, and the prediction error of different neural network model structures is compared and analyzed. The results show that the established neural network model of bucket structure can swiftly predict the stress of bucket structure section with prediction error less than 10%.

Keywords:excavator; bucket rod structure; BP neural network; stress prediction; stress characteristic cross section

0 引言

挖掘机斗杆结构优化设计过程中应力约束是斗杆结构整体结构强度能否满足设计要求的關鍵。传统优化设计过程中主要通过调用有限元软件进行应力计算以实现结构应力约束^[1]。寻优过程中反复调用有限元软件进行分析,影响优化效率。文献[2-3]通过建立神经网络预测模型来实现优化过程的应力计算,这种方式可以节省在优化过程中需要调用有限元软件而消耗的大量时间,提高了优化效率。但是由于其斗杆结构的尺寸变量选择不够合理导致尺寸变量与结构件应力相关性不强,结构应力模型预测精度较低。因此,

有必要探讨更为合理的斗杆结构应力神经网络建模变量的选择及建模的新方法,以提高模型的预测精度,从而提高斗杆结构优化过程的速度和质量。

1 斗杆结构应力特征截面的选取

文献[4]采用如图 1 所示(简称“方案一”)的斗杆结构尺寸表达形式,以其尺寸变量作为斗杆结构应力建模的输入变量,结构应力预测精度较低,预测模型的通用性以及泛化性能都有待提高。本文提出另一种斗杆结构尺寸表达形式,如图 2 所示(简称“方案二”),结构尺寸变量及取值范围如表 1 所示。

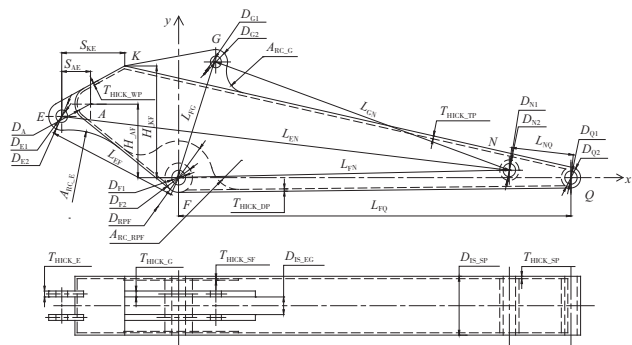


图1 方案一斗杆结构尺寸表达形式

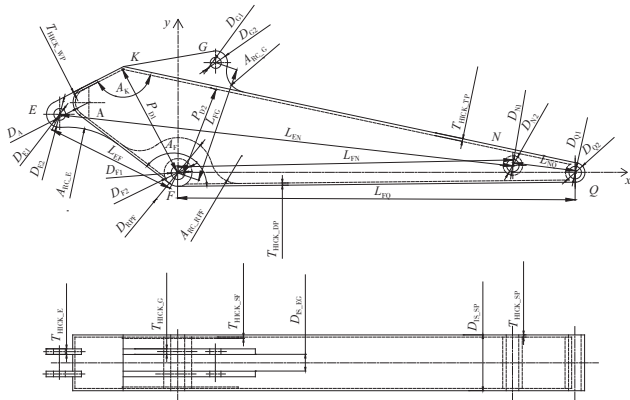


图2 方案二斗杆结构尺寸表达形式

表1 斗杆结构主要尺寸变量及其取值范围

单位:mm

编号	参数名	取值范围	编号	参数名	取值范围	编号	参数名	取值范围
1	L_{EF}	[585,1 050]	13	D_{E2}	[60,160]	25	T_{HICK_G}	[9,42]
2	L_{FQ}	[1 765,3 180]	14	D_{F2}	[85,200]	26	A_{RC_E}	[1 100,1 400]
3	L_{NQ}	[280,500]	15	D_{G2}	[70,160]	27	A_{RC_G}	[300,500]
4	L_{FG}	[515,924]	16	D_{N2}	[47,113]	28	D_{RPF}	[185,530]
5	L_{EN}	[2 305,3 640]	17	D_{Q2}	[55,135]	29	A_{RC_RPF}	[185,570]
6	L_{FN}	[1 490,2 665]	18	D_{IS_SP}	[135,440]	30	T_{HICK_SF}	[6,30]
7	L_{GN}	[1 390,2 480]	19	D_{IS_EG}	[50,165]	31	D_A	[95,250]
8	D_{E1}	[35,75]	20	T_{HICK_TP}	[5,21]	32	P_{D1}	[440,870]
9	D_{F1}	[45,100]	21	T_{HICK_DP}	[5,26]	33	P_{D2}	[370,750]
10	D_{G1}	[35,80]	22	T_{HICK_FP}	[5,26]	34	A_K	[109,141]
11	D_{N1}	[25,58]	23	T_{HICK_WP}	[6,31]	35	A_F	[130,157]
12	D_{Q1}	[31,68]	24	T_{HICK_E}	[9,42]	—	—	—

针对图2所示的斗杆尺寸表达形式,在各尺寸变量取值区间内进行拉丁超立方抽样,共获取800组斗杆结构样本。通过对斗杆结构样本的应力普查确定不同典型工况下斗杆结构潜在应力危险区域和关键区域,如图3所示。以E、Q两铰孔中心的连线EQ为基准,将整个斗杆结构等分为44个垂直于EQ的截面,并对各截面进行编号,如图4所示。再对所有的样本进行4个典型工况下各截面应力普查,总结出斗杆结构潜在应力危险区域和关键区域主要位置如下:1)斗杆液压缸耳板铰孔E内径处,截面编号1、2;2)斗杆液压缸耳

板上侧区域,截面编号3、4所含区域;3)斗杆液压缸耳板与弯板的焊接位置,即y轴正半轴截面5与y轴负半轴截面8;4)弯板与斗杆上盖板的焊接处附近区域,即y正半轴截面7、8处;5)铰孔F内径与加强板外径之间,即y负半轴截面11—14;6)铰孔F处加强板与斗杆下盖板焊接区,y负半轴截面16、17所含区域;7)铲斗液压缸耳板铰孔G左侧区域,y正半轴截面13、14所含区域;8)斗杆结构中部靠前处腹板与下盖板连接区域,即y负半轴截面34、35;9)连杆铰孔N附近区域,截面38、39;10)与铲斗连接铰孔Q附近区域,截面43。

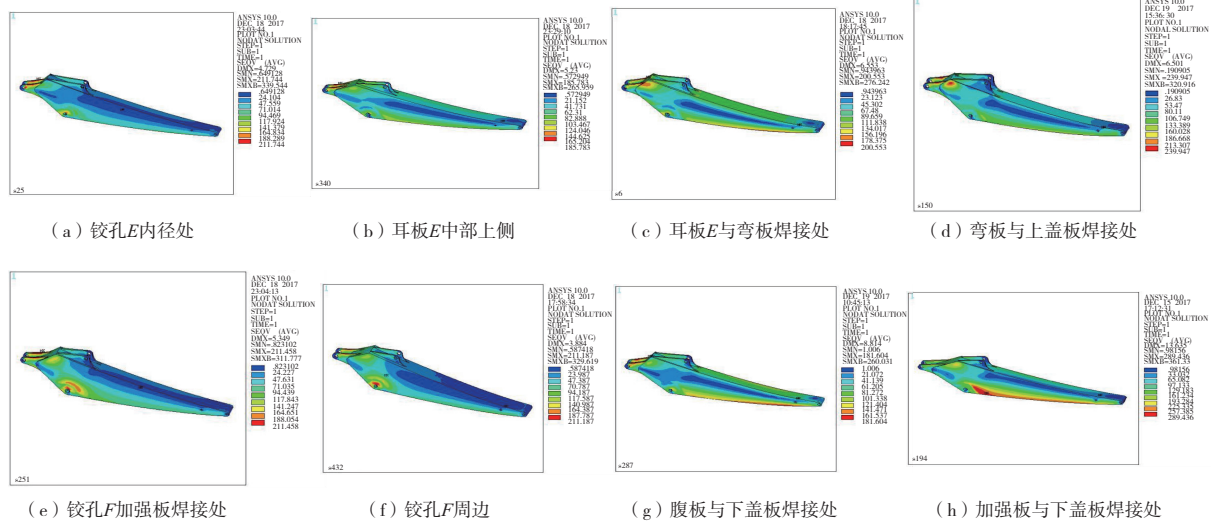


图3 斗杆样本主要截面应力云图

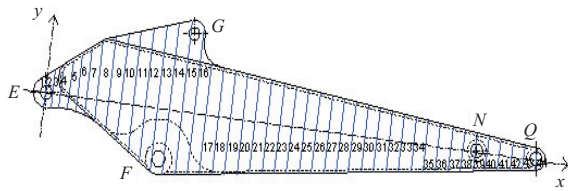


图4 斗杆结构应力特征截面分布情况

综合分析可知:潜在危险应力截面主要集中在斗杆 10 个特定区域。这些特定区域设定为 10 个应力特征截面,如图 5 所示。本文建立两个坐标系用于确定斗杆结构应力特征截面位置,分别为:以 E 为原点, EQ 连线为 x 轴建立笛卡儿坐标系(命名为 E 坐标系),对应的应力特征截面为 $C1$ 、 $C2$ 、 $C3$ 、 $C4$ 、 $C6$ 、 $C8$,其中应力特征截面 $C1$ 位于过坐标原点并垂直于 x 轴;应力特征截面 $C2$ 位于垂直于 x 轴且距离原点 $0.2L_{EF} \cdot L_{FQ} / L_{EN}$;应力特征截面 $C3$ 位于沿 x 轴正方向斗杆液压缸耳板 E 与弯板上下焊接点的连线位置,截面与 x 轴交点位置距离原点 E 为 $0.45L_{EF} \cdot L_{FQ} / L_{EN}$;应力特征截面 $C4$ 位于垂直于 x 轴,距离原点 $0.6L_{EF} \cdot L_{FQ} / L_{EN}$ 的 y 轴正半轴部分;应力特征截面 $C6$ 位于垂直于 x 轴且距离原点 $(L_{EF} \cdot L_{FQ} / L_{EN} + L_{FG} \cdot L_{GQ} / L_{FQ} - D_{G1}) / 2$;应力特征截面 $C8$ 位于垂直于 x 轴距离原点 $0.77L_{EN}$ 。以 F 为原点, FQ 连线为 x 轴建立笛卡儿坐标系(命名为 F 坐标系),对应的应力特征截面为 $C5$ 、 $C7$ 、 $C9$ 、 $C10$,其中应力特征截面 $C5$ 位于以原点为圆心,以铰孔 F 直径 D_{F1} 与侧板加强板直径 D_{RPF} 为直径构成的同心圆;应力特征截面 $C7$ 位于垂直于 x 轴距离原点 $(D_{RPF} +$

$A_{RC_RPF}) / 2$;应力特征截面 $C9$ 位于垂直于 x 轴距离原点 $(L_{FN} \cdot L_{FQ} / L_{EN} - D_{N2}) / 2$;应力特征截面 $C10$ 位于垂直于 x 且与铰孔 Q 外径相切。

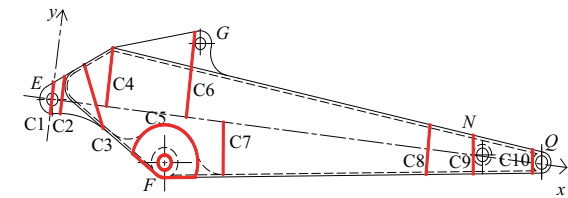


图5 斗杆结构应力特征截面分布情况

2 斗杆结构尺寸参数对应力影响的灵敏度分析

对方案二斗杆结构尺寸表达形式对应的表 1 所示的 35 个斗杆结构尺寸参数进行抽样和参数化建模,并进行典型工况下的自动有限元分析,获取不同典型工况下斗杆结构各特征截面的最大应力信息。综合分析典型工况下斗杆结构各尺寸参数对各应力特征截面最大应力值变化影响的敏感度大小,确定斗杆结构各尺寸参数对各应力特征截面应力值大小变化的影响程度,为后期以灵敏度大小为依据选取斗杆结构尺寸参数作为神经网络应力预测模型的输入变量而建立的满足预测精度要求的预测模型提供依据。

本文对所抽取的 800 组斗杆结构样本采用基于 spearman 秩相关分析方法进行斗杆各尺寸参数对各应力特征截面的最大应力值的秩相关分析^[5-6],斗杆结构尺寸参数对综合多工况 10 个应

力特征截面最大应力值的灵敏度分析如图 6 所示(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。图中横坐标 1—35 表示表 1 中斗杆结构各尺寸参数编号,纵坐标 Max1—Max10 代表 4 个典型工况下每个斗杆结构尺寸参数对斗杆结构 10 个关键应力特征截面最大应力值相应的灵敏度大小。若灵敏度值大于 0,则表示该尺寸参数与相应的特征截面最大应力值正相关,且灵敏度值越靠近 1 则两者正相关性越强;反之若灵敏度值小于 0,则该尺寸参数与相应的特征截面最大应力值为负相关,且灵敏度值越靠近 -1 则两者负相关性越强。图 6 可知尺寸参数 1、2、3、4、5、6、7、12、14、18、21、22、23、24、31、32、33、34、35 对相应应力特征截面最大应力值具有较大的相关性,影响灵敏度较大,其灵敏度绝对值均处于 0.20~1.00 之间。调整这些结构参数可以最大化地影响相应应力特征截面的最大应力值。这些参数与应力特征截面最大应力值相关性很强,其变化能够直接对相应的应力特征截面应力值产生较大影响。

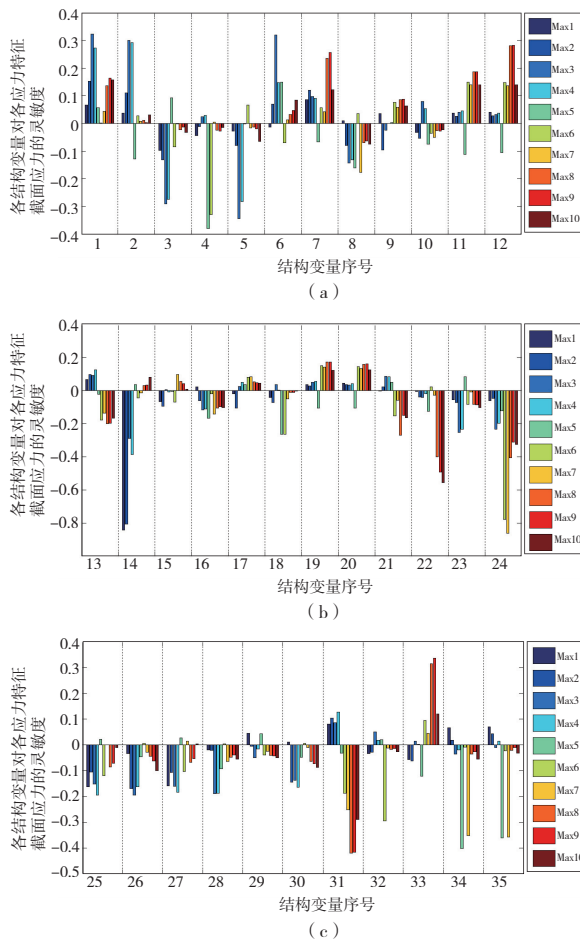


图 6 斗杆结构尺寸参数对综合多工况最大应力值的灵敏度分析图

3 斗杆结构应力神经网络建模

BP 神经网络能够实现输入-输出之间各种复杂非线性关系的映射^[7-8],本研究以斗杆结构应力特征截面 C1—C10 的最大应力值作为各个典型工况下所构建的应力神经网络的输出变量。中间隐含层神经元个数则根据经验公式 $d = \sqrt{I+K} + L$ 来确定,其中 I 和 K 分别代表输入层和输出层神经元个数, L 为神经元调节常数,一般取 1~10 之间,根据经验公式隐含层神经元个数为 15~25 个。分别训练含有不同隐含层神经元个数的神经网络模型,以模型训练总误差最小的神经网络模型所含隐含层神经元个数作为该工况下斗杆结构应力神经网络模型最佳隐含层个数。以工况一为例,该工况下神经网络模型隐含层个数为 22 时,其模型训练总误差最大为 1.365 4,隐含层个数为 17 时,其模型训练总误差最小为 0.954 5,故该工况下应力神经网络模型最佳隐含层个数为 17。隐含层神经元作用函数采用对称型 Sigmoid 函数,输出层神经元作用函数采用线性函数,建立 3 层的 BP 神经网络斗杆结构应力预测模型。在不同工况下斗杆结构潜在危险应力截面分布是不一样的,若只用一个神经网络结构模型进行不同典型工况下斗杆结构应力特征截面应力值预测,难以达到理想的预测精度。因此,本文针对 4 种典型工况建立 4 个斗杆结构应力预测神经网络模型。为简化神经网络模型结构,探究斗杆结构不同输入变量的选择对应力预测模型的应力预测精度。根据斗杆结构尺寸参数在不同典型工况下对特征截面最大应力影响的灵敏度分析结果,分别选取斗杆结构灵敏度绝对值在 0.20 以上的 19 个斗杆结构尺寸参数为 1、2、3、4、5、6、7、12、14、18、21、22、23、24、31、32、33、34、35 和灵敏度绝对值在 0.18 以上的 25 个斗杆结构尺寸参数为 1、2、3、4、5、6、7、11、12、13、14、18、21、22、23、24、25、26、27、28、31、32、33、34、35 作为斗杆结构 4 个典型工况下应力预测模型的输入变量,建立 4 个典型工况下斗杆结构神经网络应力预测模型,如表 2 所示。通过对两种不同灵敏度绝对值下所建立的 4 种典型工况下斗杆结构神经网络应力预测模型的应力预测误差的对比,确定 4 种典型工况下斗杆结构不同输入变量对神经网络应力预测模型预测误差的影响。斗杆结构主要尺寸变量取值范围如表 1 所示,该神经网络结构如图 7 所示。

表 2 典型工况下斗杆结构不同输入变量对应力预测模型的影响

典型工况	输入变量	隐含层节点数	输出变量
1	灵敏度绝对值大于 0.18 的 25 个斗杆结构尺寸参数	17	C1—C10
2		19	
3		20	
4		22	
1	灵敏度绝对值大于 0.20 的 19 个斗杆结构尺寸参数	18	C1—C10
2		20	
3		21	
4		16	

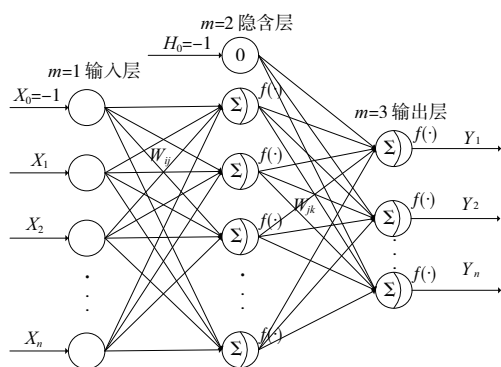


图 7 3 层 BP 神经网络结构

通过对表 1 所示的斗杆尺寸参数进行拉丁超立方抽样和参数化建模,并进行典型工况下斗杆结构应力自动有限元分析,获取 4 种典型工况下斗杆结构 800 组样本作为神经网络的训练样本。利用这些训练样本分别对 4 种典型工况下所建立的 4 个斗杆结构应力预测神经网络模型进行训练。首先分别训练不同灵敏度下 4 种典型工况隐含层神经元个数为 15~25 的神经网络模型,以神经网络预测模型输出的 10 个特征截面应力值与期望输出值差值的均方误差为判断标准,利用 Matlab 循环程序依次对该典型工况下含有不同隐含层神经元个数为 15~25 的神经网络模型输出的均方误差进行对比,取误差最小的神经网络模型所含隐含层个数作为该典型工况下斗杆应力特征截面应力值预测模型,确定 4 种典型工况下神经网络模型最佳隐含层节点数,最终以确定的最佳隐含层节点数建立 4 种典型工况下的斗杆结构神经网络应力预测模型。以典型工况 1 下训练误差曲线为例如图 8 所示。

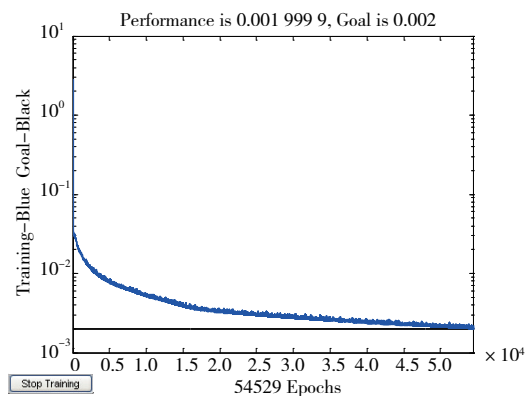
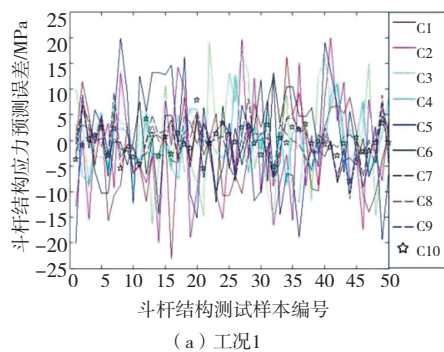
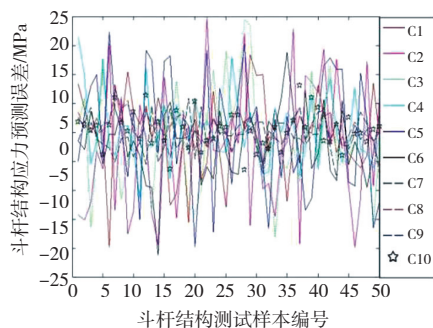


图 8 挖掘机典型工况 1 下斗杆结构应力模型的训练误差曲线

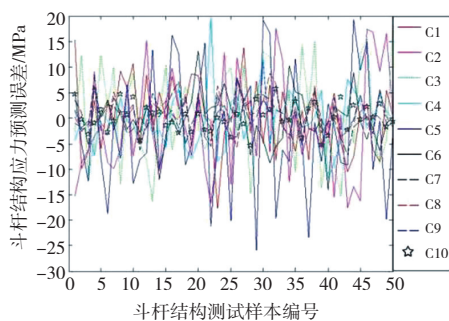
为了验证所建立的 4 个典型工况下斗杆结构神经网络应力预测模型的可行性和预测精度。再重新随机抽取 50 组样本斗杆结构尺寸,利用所建立的 CAD/CAE 分析模块对抽取的样本进行自动有限元分析。对比建立的神经网络应力预测模型预测的斗杆结构应力值与实际有限元分析应力值差值大小作为预测模型准确性的判断标准,以检验预测模型的正确性。图 9 为 19 个斗杆结构尺寸参数作为输入变量所构建的斗杆结构神经网络应力预测模型对应的 50 个检测样本误差曲线,图 10 为 25 个斗杆结构尺寸参数作为输入变量所构建的斗杆结构神经网络应力预测模型对应的 50 个检测样本误差曲线。



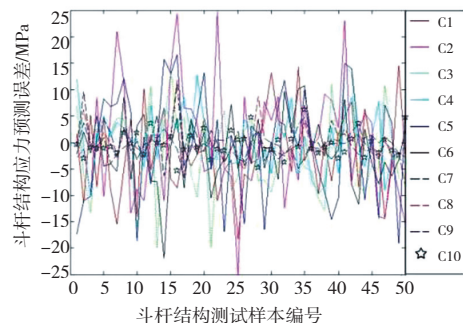
(a) 工况 1



(b) 工况 2

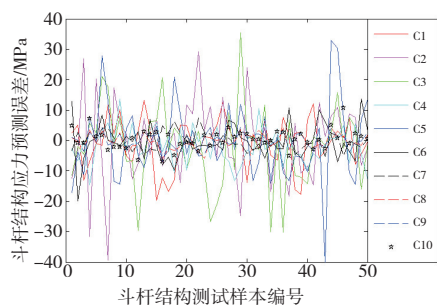


(c) 工况3

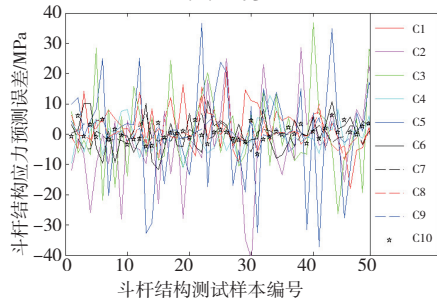


(d) 工况4

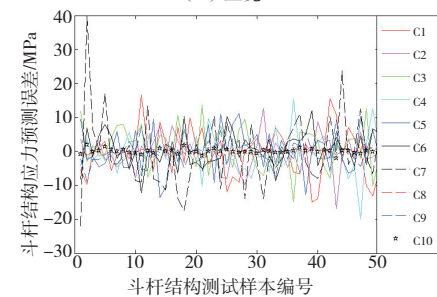
图9 19个斗杆结构尺寸参数作为输入变量的应力神经网络模型的误差曲线



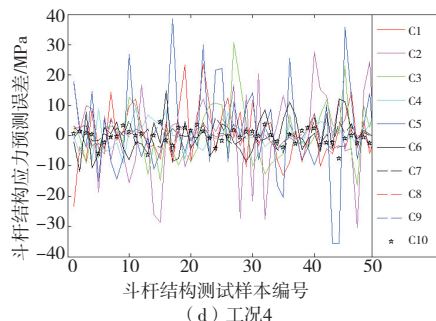
(a) 工况1



(b) 工况2



(c) 工况3



(d) 工况4

图10 25个斗杆结构尺寸参数作为输入变量的应力神经网络模型的误差曲线

对比图9和图10可知:图9为19个斗杆结构尺寸参数作为输入变量所构建的斗杆结构神经网络应力预测模型对应力特征截面C1—C10的应力值,预测误差在25 MPa左右;而图10为25个斗杆结构尺寸参数作为输入变量所构建的斗杆结构神经网络应力预测模型的应力值预测误差,其值在40 MPa左右。结果表明:通过灵敏度分析能够有效确定合理的斗杆结构尺寸参数作为神经网络模型输入变量,所构建的斗杆结构应力预测模型不仅能够有效简化神经网络建模的模型结构,还可以进一步减小应力预测模型的预测误差。

4 结语

本文通过对斗杆结构应力的神经网络建模,得到以下结论:

1)通过选取合理的应力特征截面表达斗杆结构在各种典型工况下的应力分布状态作为神经网络模型输出变量,可以有效提高神经网络模型预测速度,进一步提高应力神经网络模型预测精度,并实现神经网络模型在不同类型斗杆结构中的通用性和泛化能力;

2)通过对综合典型工况下斗杆结构尺寸参数对10个应力特征截面应力值的灵敏度分析,选取与应力特征截面相关性更强的结构尺寸参数作为神经网络输入变量,可以有效简化神经网络模型结构,进一步提高应力神经网络模型预测精度;

3)针对不同典型工况下神经网络结构的建模分析,以样本训练总误差最小确定最佳神经网络隐含层数目,建立最优应力神经网络模型,模型预测精度得到有效提高。通过不同结构类型神经网络模型预测误差对比分析,应力神经网络模型预测精度可以达到90%以上。

参考文献:

[1] LUIGI S. Design of aluminium boom and arm for an

- excavator[J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47(4): 201-207.
- [2] HUAH Y, LIN S W. New knowledge - based genetic algorithm for excavator boom structural optimization[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27: 392-401.
- [3] 杨铁明. 基于知识的综合多工况挖掘机斗杆结构优化设计关键技术研究[D]. 福州: 福州大学, 2012.
- [4] 张洋梅. 知识引导的挖掘机斗杆结构智能优化设计关键技术研究[D]. 福州: 福州大学, 2014.
- [5] 唐竞, 宋超, 刘夫云, 等. 基于结构参数灵敏度分析的商用车驾驶室轻量化方法研究[J]. 机械设计, 2021, 38(11): 97-101.
- [6] 张焕梅, 杨瑞刚. 基于响应面法的起重机结构可靠性灵敏度分析[J]. 中国工程机械学报, 2020, 18(2): 131-136.
- [7] PENG Z S, JI H C, PEI W C, et al. Constitutive relationship of TC4 titanium alloy based on back propagating (BP) neural network (NN) [J]. Metalurgija, 2021 (3/4): 60.
- [8] LI Y, LI J, HUANG J, et al. Fitting analysis and research of measured data of SAW micro - pressure sensor based on BP neural network[J]. Measurement, 2020, 155: 107533.

收稿日期: 2023 - 01 - 13

(上接第 96 页)

明, 并通过有限元仿真方法对分水器的结构强度和出水口流速进行了校核, 通过仿真结果对出水阀盖和出水阀道进行了设计优化, 优化后的结构通过验证初步满足了设计要求。

1) 分水器采用机械式结构设计, 内嵌有集成电路可控制配套高压水泵和空气压缩机协调运作。该集成电路可与整车网络相连, 接收网络信息, 过滤需求信号并发出的指令, 实现驾驶模型下的自动清洗工作。

2) 进水阀盖为工作状态下分水器应力最大位置, 进水阀盖外侧应具有足够的刚度来抵抗内部水压引起的变形。另外水路设计时应尽量采用圆弧过渡避免造成结构的应力集中。

3) 出水阀吼道设计应具有一定的宽度, 避免由于通道狭窄造成的涡流现象。

本文所设计的装置对各个水路进行充分整合, 可以有效简化清洗系统, 降低能耗和成本, 为车辆探头清洗系统的应用推广提供高效率的解决方案, 可推动汽车智能清洗市场的发展。

参考文献:

- [1] ARROYO-FIGUEROA G, SUCAR L E, VILLAVICENCIO A. Fuzzy intelligent system for the operation of fossil power plants [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2000, 13(4): 431-439.
- [2] BISHOP R. Intelligent vehicle applications worldwide[J]. IEEE Intelligent Systems and Their Applications, 2000, 15(1): 78-81.
- [3] NAZMUL H M, DIDAR-AL- ALAM S M, REZWANUL H S. Intelligent car control for a smart car [J]. International Journal of Computer Applications, 2011, 14(3): 15-19.
- [4] 常江. 面向智能驾驶的摄像头自动清洗系统及性能评价标准研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- [5] WENGER J. Automotive radar - status and perspectives[C]// IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, 2005. CSIC '05. Palm Springs, CA, USA: IEEE, 2006.
- [6] 翁莎. 大陆集团摄像头清洗系统: 离“零愿景”更进一步[J]. 汽车与配件, 2017(18): 73.
- [7] 王维华. 基于机器视觉的轨道车辆侧向盲区障碍物识别[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(6): 212-214.
- [8] TANAKA H, MATSUMOTO M. Cleaning apparatus for in-vehicle optical sensor: US, US9663073 [P]. 2017-05-30.
- [9] 罗小平, 曾峰, 谢涌铁, 等. 车载摄像头清洁装置及车载摄像头模块: 中国, CN213559009U [P]. 2021-06-29.
- [10] 代祥, 肖静, 徐幼林等. 动态下电磁阀控对靶喷雾流量特性及控制方法[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(2): 476-483.
- [11] 姜伟. 多路电磁阀控制系统的故障检测与容错控制研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [12] 薛飞, 张晓峰. 车灯清洗器新型喷嘴的数值研究[J]. 机械设计与制造, 2011(11): 250-252.

收稿日期: 2023 - 01 - 13