

基于模态分析的动臂固有频率预测模型

黄健,林述温,林航

(福州大学 机械工程及自动化学院,福建 福州 350108)

摘要:以挖掘机动臂为研究对象,通过模态分析得到动臂各阶固有频率及振型特性,确定影响挖掘机动臂动态特性的关键固有频率。将关键固有频率作为神经网络预测目标,通过拉丁超立方抽样获取动臂固有频率神经网络训练样本,建立动臂神经网络预测模型,为液压挖掘机动臂的优化设计提供了依据。

关键词:模态分析;挖掘机动臂;神经网络;固有频率预测

中图分类号:TP183 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2019)04-0100-03

Prediction Model of Boom Natural Frequency Based on Modal Analysis

HUANG Jian, LIN Shuwen, LIN Hang

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

Abstract: The excavator boom is taken as research object, and its natural frequency and mode characteristics are obtained through the modal analysis. The dynamic characteristics having the influence on its critical natural frequencies is determined. The key natural frequency is used as the prediction target of the neural network. The training sample of the natural frequency prediction neural network is obtained by the Latin sampling, then, the prediction model of the boom neural network is established. The basis is provided for the optimal design of hydraulic excavator boom.

Keywords: modal analysis; excavator boom; neural network; natural frequency prediction

0 引言

挖掘机的动态特性直接影响到挖掘机的作业性能,是其重要的性能指标之一。在现有挖掘机工作装置设计过程中大多采用静力计算确定工作装置的载荷,通过选取安全系数来满足其强度及可靠性设计要求,而未能充分考虑工作装置在工作过程中所受动态载荷带来的冲击与振动问题。挖掘机在工作过程中工作装置处于复杂周期振动之中,工作装置受到冲击及振动将引起较大的动态应力,可能造成结构的破坏^[1-2],而现有的设计方法无法满足其动态特性的要求。在挖掘机设计时,应避免结构的固有频率与发动机的工作频率接近,以防止共振发生。通过模态分析可得到结构的固有频率和主要振型,作为结构动态性能分析和优化设计的基础^[3-4]。同时基于模态分析对机械结构动态特性进行了结构优化^[5-6],可提高结构刚度,降低结构变形。

传统的挖掘机动臂结构优化设计中,采用有限元分析的方法对优化过程中产生的个体进行约束,频繁调用有限元分析软件,消耗了大量的时间,优化效率较低。人工神经网络(artificial neural networks)是一种模仿动物神经网络的行为特征,进行分布式并行信息处理的算法数学模型。依靠系统的高维度链接关系,拥有强大的非线性映射能力,具有建立输入输出的非线性映射功能,在结构的优化过程中,通过构建预测模型来代替有限元计算^[7-10]。

1 动臂模态分析及固有频率样本获取

本文采用结构类型为鹅颈式双液压缸动臂为研究对象,其结构如图1所示,机构参数如表1所示,在Pro/E软件中建立动臂三维实体模型,再导入ANSYS中。动臂主要部件由各板件焊接而成,主要材料为Q235。按Q235材料属性设置材料弹性模量、泊松比、密度等相关参数。采用自由网格划分方法和六面体实体单元进行网格划分。为模拟实际工作状态,挖掘机动臂应进行约束模态分析。工作装置回转平台与动臂铰接,并由动臂液压缸进行支撑,故需在动臂与回转平台铰接孔内表面进行全约束。

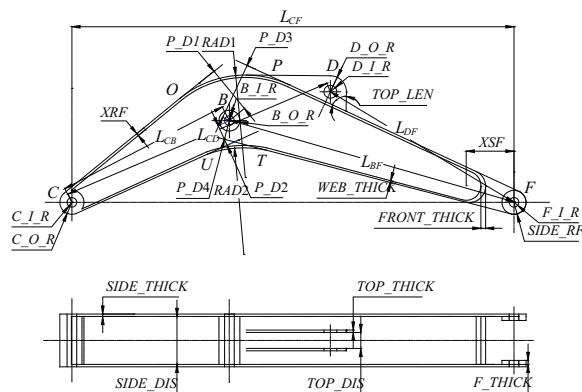


图1 鹅颈式双液压缸动臂参数模型

作者简介:黄健(1990—),男,硕士研究生,研究方向为工程机械智能优化、机械装备及自动化。

采用 APDL 语句将导入 ANSYS 中的模型进行模态分析,提取各阶模态频率及振型图。

表 1 动臂机构参数

机构参数名	L_{CB}	L_{CD}	L_{CF}	L_{BF}	L_{DF}
数值	2 601.3	3 245.7	5 691.3	3 482.0	3 079.8

挖掘机动臂固有频率的阶次很多,低阶频率对其影响最大,高阶频率影响甚微,并且在工作中的频率能接近高阶频率而产生共振的可能性很小,在进行动臂结构模态分析时,选取动臂的前 6 阶频率即可满足需要。图 2-图 7 模态振型图为动臂前 6 阶模态频率。

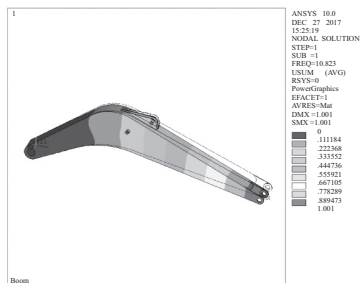


图 2 1 阶固有频率与振型

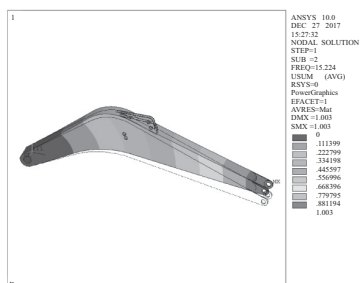


图 3 2 阶固有频率与振型

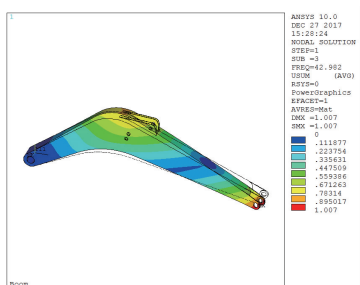


图 4 3 阶固有频率与振型

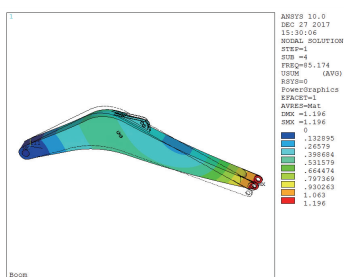


图 5 4 阶固有频率与振型

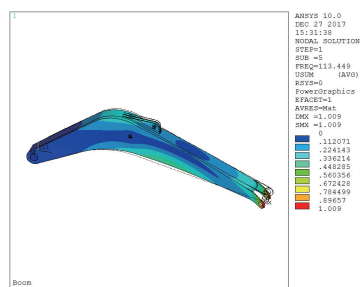


图 6 5 阶固有频率与振型

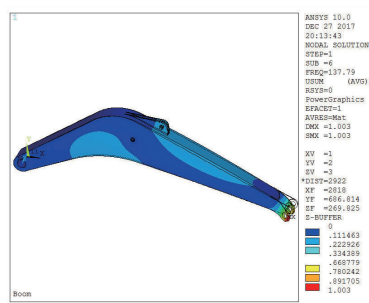


图 7 6 阶固有频率与振型

模态是构成各种工程结构复杂振动最基本的振动形态。分析模态计算结果,可以清楚观察在不同模态下的振型对结构的影响。通过整理的 250 个动臂样本,对各动臂样本进行模态分析得到其前 6 阶固有频率值。各阶固有频率及振型汇总如表 2 所示,前 4 阶振型连续为水平或竖直平面内的弯曲振动,无明显突变,最大位移都出现在与斗杆连接的耳板处。第 5、6 阶振型动臂与斗杆连接处出现扭转弯曲。

表 2 动臂模型固有频率与振型汇总

阶次	频率/Hz	振型特性	阶次	频率/Hz	振型特性
1	4.582~15.673	水平面内一阶弯曲	4	31.174~113.520	竖直面内二阶弯曲
2	6.352~20.213	竖直面内一阶弯曲	5	88.501~150.232	水平面内三阶弯曲
3	27.233~58.321	水平面内二阶弯曲	6	120.79~180.233	竖直面内三阶弯曲

发动机爆发频率计算公式:

$$f = \frac{ni}{60\tau} \quad (1)$$

式中: f 为爆发频率(Hz); n 为发动机转速(r/min); i 为气缸数; τ 为冲程系数,二冲程 $\tau=1$,四冲程 $\tau=2$ 。

以该动臂所对应的挖掘机型号为例,采用四缸四冲程柴油机,额定转速为 1800 r/min。可计算得到挖掘机作业时,额定转速下的爆发频率为 60 Hz,离 3 阶及 4 阶频率较近。而其怠速为 700~900 r/min,根据发动机爆发频率公式计算出怠速时工作频率为 23~30 Hz,在 2 阶和 3 阶频率之间。而针对不同发动机类型,爆发频率主要集中在 10~60 Hz,故选取前 4 阶固有频率作为关键频率。

通过拉丁超立方抽样法对动臂各结构参数合理区间

(表3),进行均匀抽样,生成动臂结构参数样本集。进行批量动臂结构参数化建模得到250个几何形状合理的动臂模型。而后通过ANSYS批处理计算得到不同结构参数动臂对应的前4阶固有频率,作为动臂神经网络固有频率预测模型样本。

表3 动臂结构参数抽样区间 mm

变量名	抽样区间	变量名	抽样区间
RAD1	[550 , 1200]	XRF	[8 , 20]
RAD2	[650 , 1300]	WEB_THICK	[8 , 20]
P_D1	[180 , 780]	BOR	[75 , 125]
P_D2	[100 , 580]	TOP_THICK	[8 , 20]
P_D3	[150 , 400]	SIDE_THICK	[8 , 20]
P_D4	[155 , 600]	F_THICK	[10 , 25]
COR	[80 , 200]	SIDE_DIS	[250 , 400]

2 动臂固有频率 BP 神经网络预测模型

本文通过建立三层 BP 神经网络(图8),实现对动臂固有频率预测。动臂固有频率预测模型输入变量为: P_D1 、 P_D2 、 P_D3 、 P_D4 、 $RAD1$ 、 $RAD2$ 、 COR 、 CIR 、 $SIDERF$ 、 FIR 、 DOR 、 BOR 、 XRF 、 WEB_THICK 、 $FRONT_TICK$ 、 TOP_THICK 、 $SIDE_THICK$ 、 F_THICK 、 $SIDE_DIS$ 、 XSF ,而输出变量为动臂前4阶固有频率: $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ 、 $F4$ 。

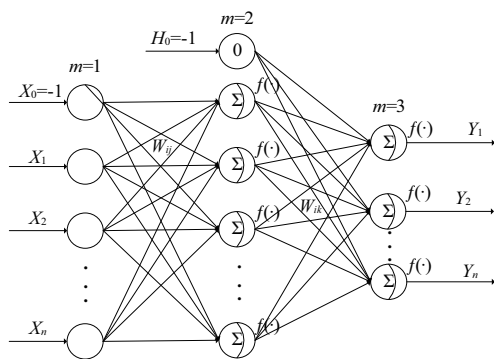


图8 神经网络固有频率预测模型结构

采用图8所示的神经网络结构进行建模。中间层神经元激活函数采用Sigmoid函数,输出层神经元激活函数采用线性函数。根据经验公式

$$m = \sqrt{n+l} + \alpha \quad (2)$$

式中: m 为隐含层神经元个数; n 为输入层神经元个数; l 为输出层神经元个数; α 为1~10常数。

可确定隐含层神经元个数范围,通过Matlab编程得到最佳隐含层神经元个数,使神经网络模型误差最小。将上述动臂250个分析样本作为训练样本进行训练。以目标精度为0.001,最佳隐含层节点数20个,进行21220次训练得到总误差为0.5312的神经网络预测模型。神经网络训练过程及误差曲线如图9所示。

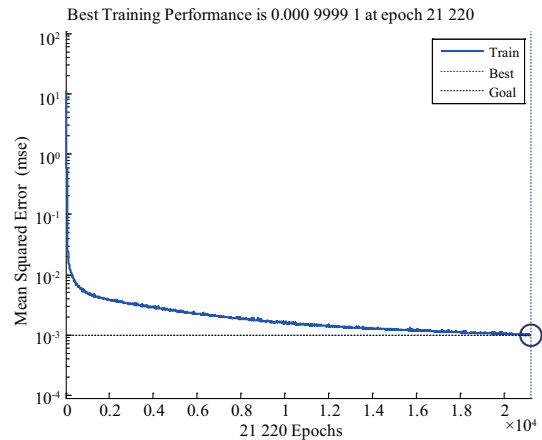


图9 动臂神经网络预测模型训练过程

3 实例验证与结果分析

需要对已建立的固有频率预测模型进行预测精度验证。针对上述建立的动臂预测模型,通过对动臂各结构参数合理区间内进行拉丁超立方抽样获取20个样本进行建模及有限元分析,作为测试样本,得到动臂前4阶固有频率预测值。计算动臂预测值与实际固有频率值之差,即得神经网络预测模型的误差值。前4阶固有频率预测误差曲线如图10所示。

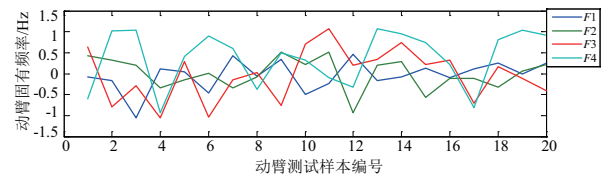


图10 动臂固有频率神经网络预测误差

所得到的动臂神经网络固有频率预测模型的预测误差基本控制在-1~1 Hz之间,可满足预测精度要求。同时对250个动臂样本在ANSYS软件中进行批处理计算前4阶固有频率,总耗时256 min。而同样对250个动臂样本进行神经网络映射总耗时0.01 min。ANSYS软件计算时间是神经网络映射25600倍,故神经网络映射大幅缩短计算时间。

4 结语

通过Pro/E建立挖掘机动臂模型,导入ANSYS软件对挖掘机动臂结构进行模态分析,得出结构固有特性:固有频率、振型。为液压挖掘机动臂的动态特性分析及结构动力特性的优化设计提供了依据。

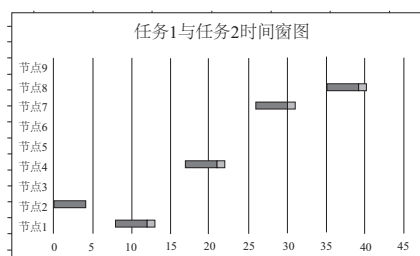
通过挖掘机动臂模态分析确定影响动臂性能的关键固有频率,同时构建动臂BP神经网络固有频率预测模型有较高的预测精度,同时可减少优化平台对有限元软件的调用,可提高优化效率。

(下转第115页)

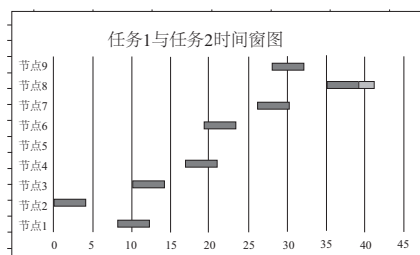
得到最优或次优路径。

表 4 3种算法规划路径序列

任务编号	分布式动态算法	集中式动态算法	Dijkstra 静态算法
1	1 478	1 478	1 478
2	23 698	23 698	1 478



a) Dijkstra算法时间窗分布图



b) 分布式与集中式算法时间窗分布图

图 4 3种算法最终路径时间窗分布比较图

4 结语

本文针对医院轨道物流传输系统中多RGV路径规划问题,提出了一种基于区域自治的分布式动态路径规划算法,该算法旨在解决传统集中式两阶段动态路径规划算法应对大规模地图实时性较差的问题。首先通过区域划分,

构建了引入边缘节点的区域自治地图模型,随后在该模型的基础上,结合时间窗理论和两阶段控制策略,解决区域内多RGV路径规划问题。对于跨区域路径规划问题,通过引入启发式策略寻找边缘节点,最终实现多RGV分布式动态路径规划问题的解决。通过设计相应示例程序完成了小型地图仿真实验,实验验证了该算法相对于集中式动态路径规划算法在实时性上的优越性。

参考文献:

- [1] 沈崇德. 医院物流传输系统浅析[J]. 中国医院, 2009, 13(3): 74-76.
- [2] 赵红梅, 李远达. 医院物流自动化输送系统分析[J]. 中国医院, 2015, 19(6): 76-78.
- [3] 赵昆. 快速轨道医流智能监控与调度系统关键技术的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [4] Chang W Kim, Jose MA Tanchoco. Conflict-free shortest-time bi-directional AGV routing[J]. The International Journal of Production Research, 1991, 29(12): 2377-2391.
- [5] Lee J H, Lee B H. Real time traffic control scheme of multiple AGV systems for collision Free minimum time motion: a routing table approach[J]. IEEE Transactions on Systems, Man And Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 1998, 28(3): 347-358.
- [6] 刘国栋, 曲道奎, 张雷. 多AGV调度系统中的两阶段动态路径规划[J]. 机器人, 2005(3): 210-214.
- [7] 王佳溶, 楼佩煌, 王晓勇. 基于改进的两阶段控制策略的AGV路径优化调度研究[J]. 机械科学与技术, 2008(9): 1211-1216.
- [8] 胡彬, 王冰, 王春香, 等. 一种基于时间窗的自动导引车动态路径规划方法[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(6): 967-971.
- [9] 张峥炜, 陈波, 陈卫东. 时间窗约束下的AGV动态路径规划[J]. 微型电脑应用, 2016, 32(11): 46-49.
- [10] Ling Qiu, WenJing Hu, SheYing Huang, et al. Scheduling and routing algorithms for AGVs: A survey[J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(3): 745-760.

收稿日期: 2018-02-26