

基于 BP 神经网络的电弧熔丝增材制造数据库系统

吴悠¹, 潘建刚², 廖明潮¹, 张亮³

(1. 武汉轻工大学, 武汉 430023; 2. 西安石油大学, 西安 710065;
3. 深圳职业技术学院, 智能制造技术研究院, 广东 深圳 518055)

摘要: 通过对电弧熔丝增材制造(Wire and arc additive manufacturing, WAAM)单道焊缝试验数据的分类整理, 分析用户需求和需要使用, 基于 python 编程语言下的 Django 框架, 采用 B/S 架构开发了一个电弧熔丝增材制造数据库系统。试验结果表明, 该系统采用数据库与算法预测模型结合的方式开发而成, 主要设置了用户权限管理、基本打印数据和焊缝形貌预测三大模块, 具有存储扩展打印试验数据功能和预测未知工艺参数下焊缝形貌的功能。不同的打印工艺方法引入不同的 BP 神经网络结构, 使用时数据库系统自动读取库内已有的算法模型或根据已有的试验数据训练新的模型, 之后录入试验数据会自动对模型重新训练, 实现随数据库内试验数据扩展或修正自动适应的参数预测, 能够预测未知工艺参数下的焊缝形貌尺寸。最后, 基于 MIG 工艺设计了 1 组验证试验对数据库的预测功能效果进行检验, 熔宽预测误差为 1.3%, 余高预测误差为 1.5%, 说明了数据库系统预测功能的可行性。

创新点: 将传统数据库的数据分类存储功能与预测算法相结合, 充分发挥了已有试验数据的价值, 并且集成了不同试验材料、焊接工艺方法等数据构建算法模型, 实现了多种试验条件、焊接工艺方法下的焊接工艺参数预测功能。

关键词: 数据库; 电弧熔丝增材制造; 打印工艺; 焊缝形貌预测; BP 神经网络

中图分类号: TG44 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20211222002

Database system of wire and arc additive manufacturing based on BP neural network

Wu You¹, Pan Jiangang², Liao Mingchao¹, Zhang Liang³

(1. Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 2. Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;
3. Shenzhen Polytechnic, Institution of Intelligent Manufacturing Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: Based on the classification of single pass weld experiments data of wire arc additive manufacturing, this paper analyzes the needs of users and uses them. Based on the Django framework under python programming language, a database system of wire and arc additive manufacturing is developed with B/S architecture. The system is developed by the combination of database and algorithm prediction model. It mainly sets three modules: user authority management, basic experiments data management and weld geometry prediction. It has the function of storing and expanding printing experiment data and predicting weld geometry under unknown welding process parameters. Different printing process methods introduce different BP neural network structures. When in use, the database system automatically reads the existing algorithm model in the database or trains a new model according to the existing experimental data. After entering the experimental data, the model will be retrained automatically, so as to realize the parameter prediction automatically adapted with the expansion or correction of the experimental data in the database, it can predict the weld geometry and size under unknown process parameters. Finally, a set of validation tests are designed based on MIG process to test the effect of the prediction function of the database. The prediction error of melt width is 1.3% and the prediction error of

reinforcement is 1.5%, which shows the feasibility of the prediction function of the database system.

Highlights: This paper combines the data classification and storage function of the traditional database with the prediction algorithm, gives full play to the value of the existing experimental data, integrates the data of different experimental materials and welding process methods, constructs the algorithm model, and realizes the prediction function of welding process parameters under various experimental conditions and welding process methods.

Key words: database, wire and arc additive manufacturing, welding process, geometry prediction, BP neural network

0 前言

电弧熔丝增材制造工艺是一种基于实体 3D 模型,采用逐层沉积方式“从无到有”制造实体工件的技术,其应用涉及航空航天、机械制造、土木工程等众多领域。电弧熔丝增材制造工艺是基于传统的电弧焊接技术而发展起来的一种 3D 打印技术,具有热输入高、成形速度快、材料利用率高等特点,尤其适合中等复杂程度、大型工件的快速制造。在电弧熔丝增材制造分层沉积过程中,单道焊缝的几何形状对金属零件的层厚、表面质量和尺寸精度有关键影响^[1]。焊丝成分、保护气体、工艺参数(电流、电压、扫描速度)等因素对单道焊缝成形有至关重要的影响。因此,在探索不同金属材料的成形参数的过程中,必然会产生大量的试验数据,针对这些试验数据的分析、管理及应用,并基于少量试验数据的工艺—成形预测,对于获得较优的工艺参数及成形构件尤其重要。因此,开发一款针对电弧增材制造技术的数据库系统显得十分必要。

许多研究者针对焊接数据库系统做了大量的工作,这些焊接数据库的设计开发一般可分为两类,第一类是数据库对焊接工艺参数、焊接流程、人员等基本信息进行分类储存,操作人员在数据库中可直接定位检索目的信息,如胡志鹏^[2]设计的焊接工艺数据库,可以将焊接的工艺参数录入到数据库系统中并对数据进行基本的增删改查,荣佑珍等人^[3]开发的航空专用焊接数据库及专家系统,可辅助焊接工艺文件的管理,陈振林等人^[4]采用 B/S 架构开发了应用于航空发动机焊接零件的焊接工艺资源数据库系统,焊接数据库系统涵盖了焊接基础数据库、焊接参数数据库、材料焊接性能数据库和典型零件案例库,促进了焊接知识自动化水平的提高;第二类是在传统数据库的基本信息储存功能上加入了推理、经验公式、回归模型等方法对数据库中没有录入的位置参数进行预测,如冯允宣等人^[5-6]设计的中厚板焊接数据库,不仅能够

实现参数信息的基本增删改查操作,还引入了 BP 神经网络建立了板材厚度与焊接参数之间的映射关系。BP 神经网络具有很强的非线性映射能力,一些学者将 BP 神经网络引入到电弧增材制造工艺的开发中^[7-8],然而目前关于电弧增材参数数据库的相关研究仍然相对匮乏。

文中开发的数据库系统实现了对试验数据的基本管理,主要用于储存金属材料种类,气体种类,基板种类,打印工艺方法及打印工艺参数,单道焊缝形貌等基本信息,针对电弧熔丝增材试验中使用的各类焊接工艺,引入 BP 神经网络建立打印参数与单道焊缝形貌的映射关系,实现对未录入打印参数下焊缝形貌的预测,并赋予模型实时更新功能,即使后续修改了数据库中的试验数据信息,也确保了模型预测能力的准确性。用户只需选择材料、基板种类、保护气种类、打印工艺方式及打印工艺参数即可自动调用算法模型预测出该参数下的焊缝形貌。该数据库系统不仅将已有试验数据进行完整备份,并进一步开发了已有试验数据的预测价值,大大节省了工艺开发的周期和成本。

1 系统总体设计

文中所开发的电弧熔丝增材制造数据库系统拥有三大功能模块:用户权限管理模块,基础数据信息模块,焊缝形貌预测模块。用户权限管理模块将管理员用户和普通用户进行分级管理以赋予不同权限。基础数据信息模块用于分类管理已有的试验数据信息,并将试验数据分类型实时地传递到焊缝形貌预测模块。焊缝形貌预测模块将基础数据信息模块传递的试验数据自动进行 BP 神经网络建模并预测单道焊缝形貌的熔宽和余高。电弧熔丝增材制造数据库系统的总体结构及相互依赖关系如图 1 所示。文中基于前期试验获得的低碳钢,不锈钢和铝合金等单道成形试验数据,通过开发电弧熔丝增材制造数据库实现数据存储和焊缝形貌(熔宽和余高)预测。

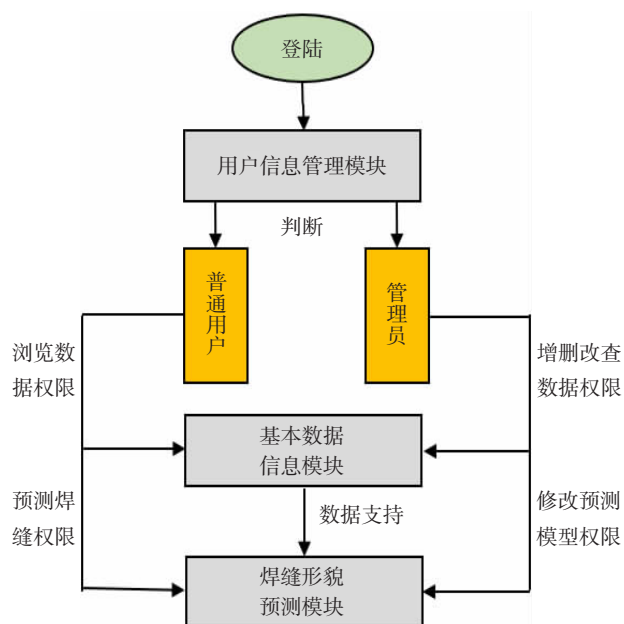


图1 电弧熔丝增材制造数据库系统结构示意图

2 系统功能设计及实现

电弧熔丝增材制造数据库系统采用 B/S 架构,开发过程使用前后端分离模式,后端使用 python 编程语言下的 Django 框架进行开发,前端使用 Vue 框架进行页面 UI 搭建,数据库使用 MySQL 作为主要关系型数据库存储基础数据模块的试验数据信息,采用 Redis 作为缓存数据库用于存储训练好的神经网络结构及权重等信息。Django 引入了 ORM 的概念,可以连接到 MySQL 数据库中操作数据。用户从前端发来对数据的操作请求后,由 Django 后端接受到请求,后端选择先到缓存中获取数据并进行处理,若是缓存没有获得数据再到数据库中对数据进行操作,最后将处理好的数据封装传递回前端,由前端动态的渲染到用户页面上。

2.1 用户权限管理模块设计

用户的权限分级分为管理员用户与普通用户,普通用户可以根据前端注册,管理员权限只能通过后台系统赋予。该系统赋予管理员用户最高权限,可以对整个数据库的所有信息、模型预测算法内容等进行增删修改;仅赋予普通用户对库内试验数据的检索权以及焊缝形貌的预测权。

2.2 基础数据信息模块设计

基础数据信息模块主要由丝材、基板、保护气体、工艺方法及打印参数、焊缝形貌等基本信息组成,用于存储试验数据,如图2所示。后台数据存储是依靠关系型数据库数据存储模式的表格制成,通过表格中字节

之型间进行关联。由于电弧熔丝增材制造涉及多种工艺,每种工艺设置的打印参数种类也不甚相同。因此,对于打印工艺表的设计,需要引入“多态”的概念^[9],具体设计过程:每种工艺方法及该工艺方法下设置的工艺参数标签及数据都单独地创建成一张表;另外建立一个中间关联表将工艺方法和该工艺方法下的具体某一组参数关联起来,就可实现用户界面工艺方法及打印参数展示的简洁,在此基础上进一步设置了工艺方法增加扩展功能,需要添加新的工艺只需再创建一张表,表中存储该工艺对应的参数即可,这样的设计极大地节省了存储空间,并增加了该数据库系统的扩展性。该模块关系表实体联系图(E-R图)如图3所示,E-R图描述本数据库系统内各项数据实体之间的关系以及每张数据表的具体表字段。

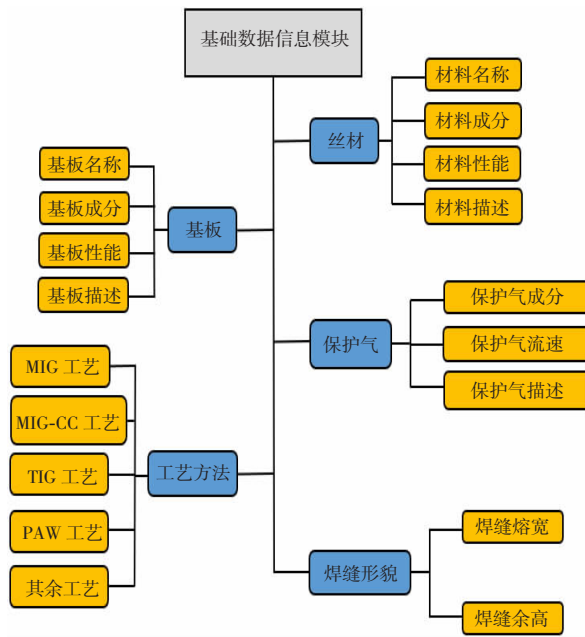


图2 基础数据信息模块设计示意图

2.3 焊缝形貌预测模块设计

基于基础数据信息模块已录入的试验数据,焊缝形貌预测模块结合 BP 神经网络算法模型对焊缝形貌进行了预测,设计示意图如图4所示。不同工艺方法下设置的打印参数种类也不相同,相应地,BP 神经网络算法的模型结构也不相同。在预测过程中,根据已有的试验数据,选择对焊缝形貌影响较大的参数用于算法预测,而不是将所有参数都用于模型预测,避免影响模型的预测准确度。文中所涉及到的焊接工艺均基于 SKS 焊机系统研发,但数据库系统仍可适用于其他焊机下的焊接工艺,针对该焊机系统的 MIG 工艺及

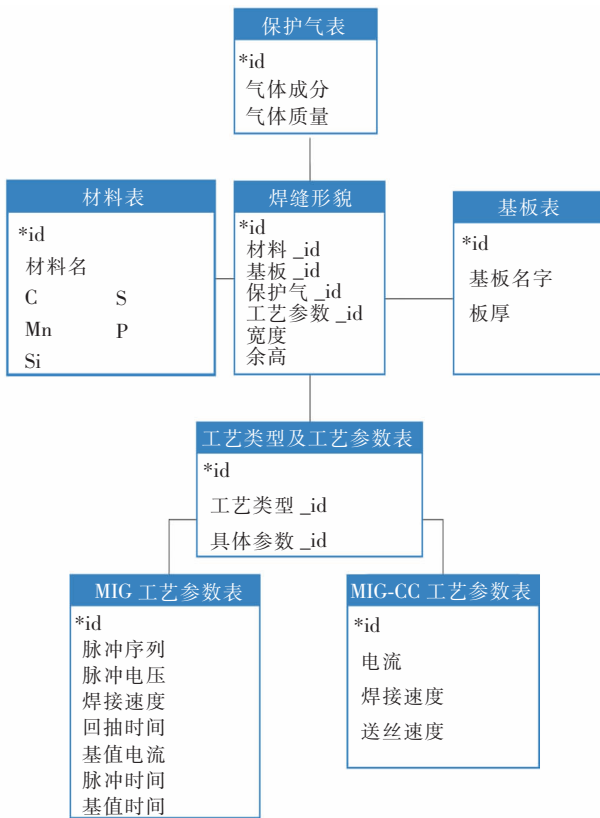


图3 电弧熔丝增材制造数据库系统 E-R 图

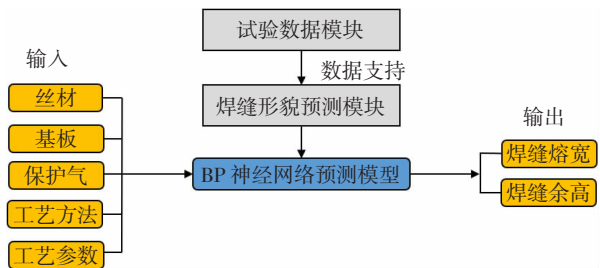
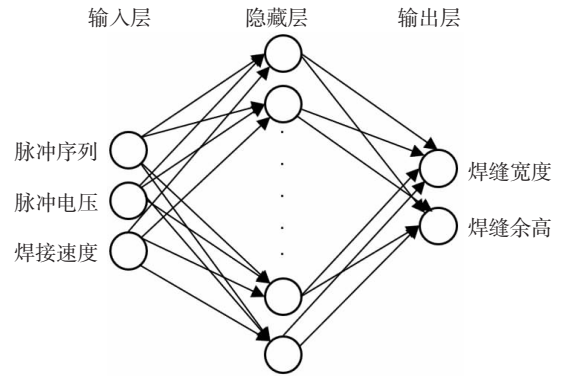


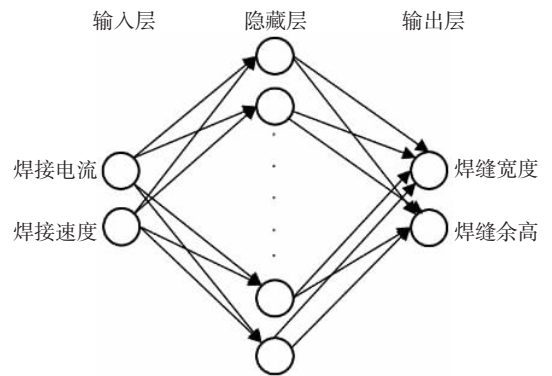
图4 焊缝形貌预测模块设计示意图

MIG-CC 工艺,焊缝形貌预测模块使用的 BP 神经网络结构如图 5 所示。

MIG 工艺的熔滴过渡为脉冲熔滴过渡与短路熔滴过渡相结合的方式,其对应的工艺参数中脉冲序列决定了单位时间内的脉冲数,每一次脉冲都会产生熔滴过渡,效率更高,MIG-CC 工艺为 SKS 焊机特有的工艺,其熔滴过渡方式为短路熔滴过渡,因此只用通过调整电流即会较大程度的改变熔滴过渡的速度。由于只选出了对焊缝形貌影响程度较大的参数用于神经网络的训练,神经网络的输入层神经元不多,不需要使用复杂的网络结构,因此所有的神经网络都由一个输入层、一个隐藏层和一个包含两个神经元的输出层组成。



(a) MIG 工艺



(b) MIG-CC 工艺

图5 BP 神经网络模型

将数据库的数据放入神经网络训练之前,需要将数据进行归一化处理,这样做的目的是将一个数据范围转换为表示数据特征的另一个数据范围,以确保每个焊接参数对网络的影响相同,并适应由神经网络输出层的激活函数计算的值。数据处理后,所有的训练数据归一化到闭合区间 $[0,1]$ 内,即

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

式中: x 为各个工艺参数的值,通过式(1)将所有输入工艺参数在训练前归一化到 $[0,1]$ 内。

隐藏层神经元是神经网络拟合任何非线性关系的关键点。神经元中的激活函数会扭曲输入和输出之间的线性关系,从而使网络模型能够逼近任何复杂的映射关系。训练过程中,所有神经元的激活函数选择 sigmoid 函数,反向传播过程中使用 Adam 作为优化器,相较于使用随机梯度下降,Adam 优化器不容易陷入局部最小值^[10],损失值函数选择平均绝对误差公式用于评定神经网络的性能,即

$$ER = \frac{|y_{\text{pred}} - y_{\text{true}}|}{y_{\text{true}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: y_{pred} 表示神经网络的预测值; y_{true} 表示数据的原始值。之后基于Tensorflow框架进行BP神经网络模型的搭建,以MIG工艺为例,使用一层循环调整隐藏层的神经元个数,最后确定神经网络结构为3-12-2时损失值最小。

神经网络模型会根据数据库中的信息,将不同条件下的工艺参数数据进行模型训练,并将训练过后神经网络的参数存储记录在服务器端的缓存数据库,当普通用户使用预测功能时,不需要等待神经网络重新训练,直接加载对应的神经网络模型与模型

参数即可,当数据库中原始数据发生较大变化时,系统内部会重新对神经网络进行训练,并重新记录缓存模型参数。

为验证焊缝形貌预测功能的准确度,额外进行验证试验,验证试验的具体打印参数见表1。使用数据库系统预测功能得出的结果是焊缝宽度的预测误差为1.3%,焊缝余高的误差为1.5%。结果表明,BP神经网络算法可以很好地拟合焊接工艺参数与焊缝形貌之间的关系,并且可以实现高精度的焊缝形貌预测效果。

表1 验证试验—焊缝形貌的打印参数及实际尺寸

丝材	基板	保护气体	工艺方法	脉冲序列	脉冲电压 U/V	焊接速度 $v/(cm \cdot min^{-1})$
CHM-308 不锈钢	低碳钢	80% Ar + 20% CO ₂	MIG	22	35	58
预测熔宽 W/mm	预测余高 H/mm	实际熔宽 W'/mm	实际余高 H'/mm	熔宽误差 $\delta_w(\%)$	余高误差 $\delta_H(\%)$	
8.61	3.37	8.73	3.32	1.3	1.5	

3 结论

(1)文中开发的电弧熔丝增材制造数据库系统,实现了不同工艺方法下工艺方法与焊缝形貌的试验数据分类管理以及预测功能,并保留了数据库的扩展功能,降低试验成本,实现了电弧增材试验数据的信息化管理。

(2)引入BP神经网络算法,赋予焊缝形貌预测模型实时更新功能,充分开发已有试验数据的信息价值,实现对未知工艺参数下焊缝形貌的高精度预测,验证试验焊缝宽度的预测误差为1.5%,焊缝余高的误差为5%。

参考文献

- [1] Xiong J, Zhang G, Hu J, et al. Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2014, 25(1):157–163.
- [2] 胡志鹏. 基于B/S模式的焊接工艺管理系统[D]. 南昌:南昌航空大学, 2012.
- [3] 荣佑珍, 刘仁培, 魏艳红. 航空专用焊接数据库及专家系统[J]. 航空制造技术, 2017(12):43–47.
- [4] 陈振林, 张玉莲, 苑兴楠, 等. 航空发动机焊接工艺资源数据库系统开发[J]. 机械制造文摘——焊接分册, 2020(4):1–5.

- [5] 张兆栋, 冯允宣, 祝美丽, 等. 基于BP神经网络的中厚板焊接数据库系统设计[J]. 焊接设备与材料, 2021, 50(5):107–110.
- [6] 冯允宣. 中厚板高效平位置焊接工艺研究及焊接数据库的建立[D]. 大连:大连理工大学, 2021.
- [7] Hu Z, Qin X, Li Y, et al. Welding parameters prediction for arbitrary layer height in robotic wire and arc additive manufacturing [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(4):1683–1695.
- [8] Xia C, Pan Z, Polden J, et al. Modelling and prediction of surface roughness in wire arc additive manufacturing using machine learning [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2022, 33(5):1467–1482.
- [9] 刘晶东, 赵栋梁, 刘达. 基于多态的自然资源数据库研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(S1):68–69.
- [10] 王建辉, 冉金鑫, 沈莹莹, 等. 基于GA-ADAM优化算法的BP神经网络农业灌水量预测模型[J]. 中国农村水利水电, 2022(4):138–143.

第一作者: 吴悠, 硕士研究生;主要从事电弧增材制造及深度学习的研究;472624271@qq.com。

通信作者: 张亮, 博士, 副研究员;主要从事金属增材制造的研究;已发表论文20余篇;zhangliang@szpt.edu.cn。

(编辑:曲畅)