

管道激光焊接数据库管理系统设计

李竹渊^{1, 2}, 冯英超^{1, 2}, 闫灿灿^{1, 2}, 杨晓宁^{1, 2}, 胡玉^{1, 2}, 王金明^{1, 2}, 孙秋阳^{1, 2}

1. 中国核工业二三建设有限公司 北京 101300

2. 中核集团高效智能化焊接重点实验室 北京 101300

摘要: 激光焊接数据库管理系统是实现管道激光自动化焊接的重要工具, 该系统主要包含了焊接参数的规划、焊接过程参数的实时监测记录及更新、焊接质量诊断3个功能。通过对管道激光焊接数据库管理系统的设计与搭建分析, 结果表明: 该管理系统能够实现管道激光焊接的实施过程指导和控制, 且在激光焊接速度快、无法人为干预的特性下能够有效起到质量控制作用, 为激光填丝焊接在管道焊接施工中的应用起到了关键作用。

关键词: 管道; 激光焊接; 数据库

Design of pipeline laser welding database management system

LI Zhuyuan^{1, 2}, FENG Yingchao^{1, 2}, YAN Cancan^{1, 2}, YANG Xiaoning^{1, 2}, Hu Yu^{1, 2},

WANG Jinming^{1, 2}, SUN Qiuyang^{1, 2}

1. China Nuclear Industry 23 Construction Co., Ltd., Beijing 101300, China

2. China National Nuclear Corporation Key Laboratory of High Efficiency Welding, Beijing 101300, China

Abstract: Laser welding database management system is an important tool to realize automatic pipeline laser welding. The system mainly includes three functions: planning of welding process parameters, real-time monitoring and updating of welding process parameters, and welding quality diagnosis. Through the design and construction analysis of the pipeline laser welding database management system, the results show that the management system can realize the guidance and control of the implementation process of pipeline laser welding, and can effectively play a role in quality control under the characteristics of fast laser welding speed and no human intervention, which plays a key role in the application of laser wire filling welding in pipeline welding construction.

Keywords: pipeline; laser welding; database

1 序言

近年来, 激光焊接技术广泛应用于各行各业, 随着激光焊接朝着智能化、数字化方向发展, 数据库管理系统已成为焊接领域重要的发展方向, 其发展应用对智能焊接起到了重要作用^[1]。为提高焊接效率, 在管道工程安装行业也在不断开展对激光焊

接的研究工作。由于激光焊接过程是一个复杂的物理化学变化过程, 并且在焊接过程中因速度快、安全因素而导致人眼无法直接观察, 焊接质量稳定性受到了制约^[2, 3], 因此数据库的应用显得尤为重要。

2 焊接数据库系统设计

管道填丝激光焊接数据库管理系统主要功能包

第一作者: 李竹渊, 大学本科, 高级工程师, 主要从事核电站自动焊装备及工艺研究工作, E-mail: lizhuyuan87@126.com。

含预制焊接参数的规划、焊接过程参数的实时监测记录及更新、焊接质量诊断3个部分。从焊接数据库管理系统的功能来看,该系统构建主要包含工艺数

据的初始填充及工艺参数推理机制的建立、焊接参数与焊接质量的关联性建模、焊接参数的新增及修正规则的建立,以及工艺区域估算规则构建(见图1)。

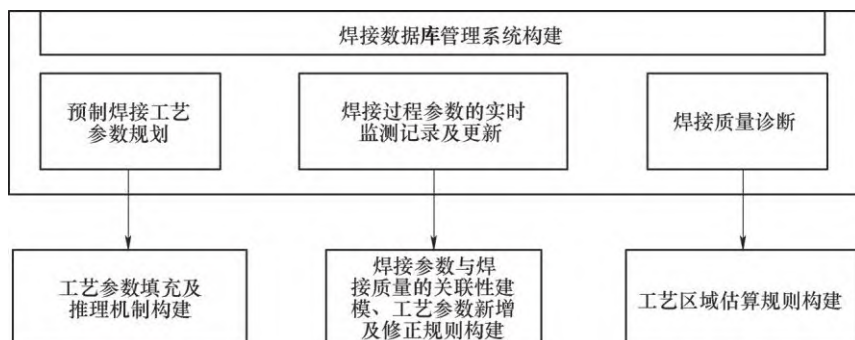


图1 焊接数据库管理系统框架

2.1 系统硬件设计

焊接数据库管理系统的硬件选取一个工控机,接收各个传感器检测信息并进行处理分析。主频需 $>2.5\text{GHz}$;内存8G以上;硬盘128G以上;包含多个串口和两个以上千兆网口,其中串口用于接收工艺参数传感器数据,千兆网口用于接收焊缝跟踪传感器图像信息和熔池图像信息,系统采用Windows10操作系统。

2.2 系统软件设计

(1) 预制焊接参数规划模块 预制焊接参数规划模块主要通过工艺参数填充及推理机制来构建,该模块数据主要包含材料(母材、焊丝)、焊缝尺寸(厚度、底部焊缝宽度、焊缝上端宽度)及工艺参数(焊接层数及各层激光功率、送丝速度、保护气流量、焊接速度)。模块参数主要通过工艺试验获取,工艺参数推理机制主要采用正向演绎推理的模式来实现,从已知条件(如材料和焊缝初始尺寸)出发推出结论(即焊接层数和各层工艺参数),其具体推理过程如图2所示。根据焊接工艺试验结果建立焊接参数(材料、壁厚、坡口形状、层数、激光功率、焊接速度、送丝速度及保护气体流量等)和焊接质量(焊缝熔池形状、焊后表面形状、缺陷等)的相关性模型。

(2) 焊接过程参数实时监测记录及更新模块 焊接过程参数的实时监控记录及更新模块主要包含工艺参数的实时在线监测记录和未知决策序列的新增,以及已知决策序列的修改及删除。

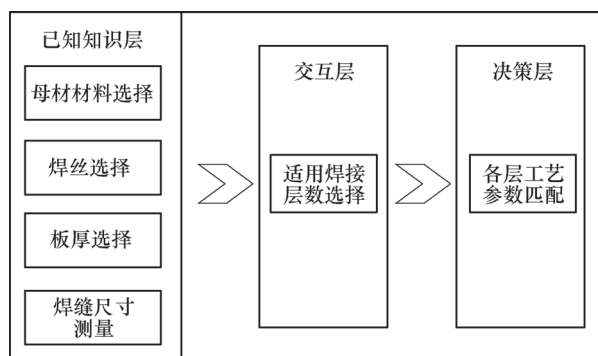


图2 预制焊接参数规划推理过程示意

焊接过程参数实时监测记录及更新模块主要通过工艺参数新增及修正规则的构建来建立。由于数据管理系统本身不可能包含所有出现的情况,当已知知识层数据在系统中找不到对应决策序列时,需要系统启用备选机制,即根据现有的数据及决策序列来对焊接工艺数据进行推演,这里将对焊接参数与焊接质量之间的关联性进行建模,并以此模型为依据结合现有决策序列来进行推演。当结果可行时将被列入“OK”序列,反之列入“NG”序列。

未知决策序列的新增主要依据所建立的数据模型,以已知层数据作为输入,结合现有的数据及决策序列,来实现未知决策序列中焊接工艺数据的推演。该模块主要通过焊接参数与成形尺寸之间的理论数据模型来实现工艺推荐及新增。

(3) 焊接质量诊断模块 焊接质量诊断模块主要用于对监测到的工艺数据进行分析,当数值偏离合理区域时则需要提示缺陷出现报警。焊接质量

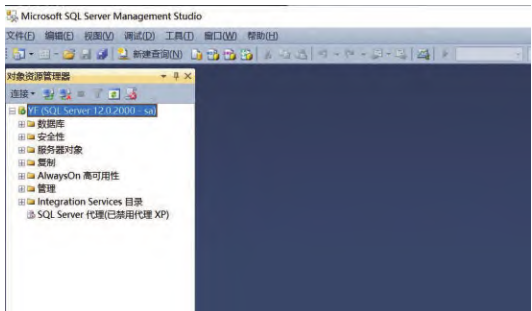
3 焊接数据库系统搭建

3.1 工艺数据库模块搭建

(1) 新建工艺参数 在工控机上安装SQL Server 2014 Management Studio, 安装完毕后打开, 点击“连接”, 则可以连接到数据库, 如图3所示。



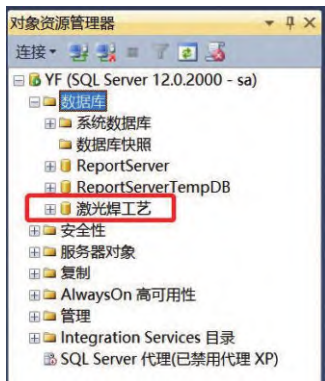
点击“连接”后，将连接到服务器后弹出对象资源管理器，如图4所示。



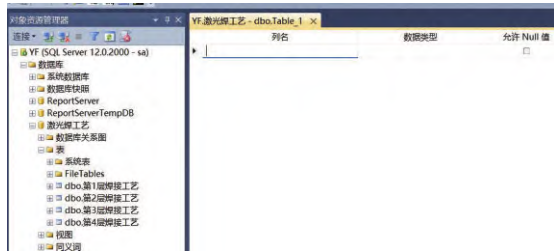
右击“数据库”，点击“新建数据库”。输入

[illegible]

激光焊工艺数据库创建成功,如图6所示。



激光焊工艺数据库中,新建工艺表。新建后则出现新的表,表名为 table_1,如图7所示。



写入列名：离焦量、功率、焊接速度、送丝速度及余高增加量。数据类型写为float。点击“保存”按钮，输入表名，第3层焊接工艺，如图8所示。



金属加工®热加工

以此类推，可建立多层焊接工艺表，如图9所示。

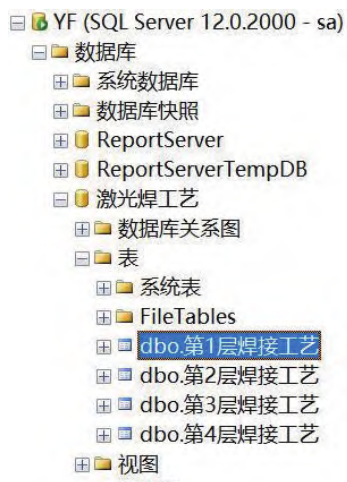


图9 新建多层工艺表

右击“第1层焊接工艺表”，选择编辑前200行，如图10所示。

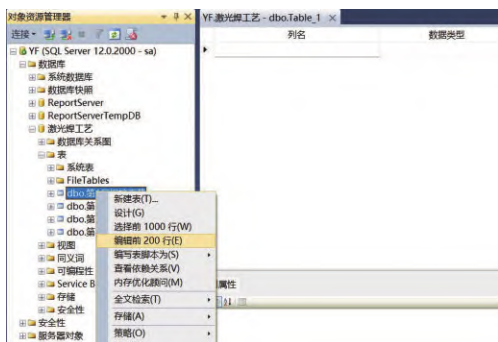


图10 编辑前200行

可在表格中直接写入焊接参数，见表1。至此，工艺库框架建立完毕。

表1 工艺库内容

离焦量 /mm	功率 /kW	焊接速度 / (m/min)	送丝速度 / (m/min)	余高增加 /mm
2	2	4	1	9
0	2	5	1	7
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

(2) 增加工艺参数 焊接一层之后，可以选择将参数增加到工艺库中，操作方法如图11所示。在输入框中输入对应工艺参数值，点击“增加”按



图11 增加工艺参数功能

钮，程序内部连接数据库，工艺参数数据增加到工艺库中。

在 SQL Server 2014 Management Studio 软件中，激光工艺库中的第1层工艺表中已经添加了该工艺参数，见表2。

表2 第1层焊接参数

离焦量 /mm	功率 /kW	焊接速度 / (m/min)	送丝速度 / (m/min)	余高增加 /mm
2	2	4	1	9
0	2	5	1	7
0	3	6	1	6
1	1	5	1	6
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

(3) 删除工艺参数 点击“删除”按钮后，程序内部开始连接数据库，工艺库中自动删除离焦量为0、送丝速度为1、功率为3、焊接速度为6、余高为4的工艺参数，再点击“查询”时，则搜索不到相关工艺参数，如图12所示。



图12 删除工艺参数功能

在 SQL Server 2014 Management Studio 软件中，激光工艺库中的第1层工艺参数表中已经删除了该工艺参数，见表3。

表3 更新后的第1层焊接参数

离焦量 /mm	功率 /kW	焊接速度 / (m/min)	送丝速度 / (m/min)	余高增加 /mm
2	2	4	1	9
0	2	5	1	7
0	3	6	1	6
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

(4) 修改工艺参数 选中需要修改的行，输入需要修改的工艺参数，如图13所示，将第一行的原离焦量由0改为1，点击“修改”按钮，弹出对话框



图13 修改工艺参数功能

修改成功。

修改后进行工艺查询，离焦量由0改为1，修改成功，如图14所示。



图14 修改后查询

在 SQL Server 2014 Management Studio 软件中，激光工艺库中的第 1 层工艺参数表中已经修改了该工艺参数，见表4。

表4 修改后第1层焊接参数

离焦量 /mm	功率 /kW	焊接速度 / (m/min)	送丝速度 / (m/min)	余高增加 /mm
2	2	4	1	9
0	2	5	1	7
0	3	6	1	4
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

(5) 查询工艺参数 输入需要查询的层数，出现与图14相同的界面，其他5个工艺参数在不输入的情况下，点击“查询”，则下方表格中，出现该层工艺表中所有的工艺参数。

输入需要查询的层数，输入需要查询的离焦量、送丝速度、功率、焊接速度及余高，进行工艺库筛选，查询与输入对应参数一致的工艺参数，如图15、图16所示。输入功率为2kW，则在工艺库中筛选出 2kW的工艺参数。

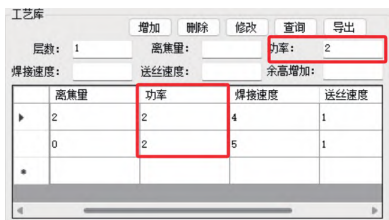


图15 功率筛选



图16 功率和焊接速度筛选

输入功率2kW，焊接速度5m/min，则筛选出同时符合二者数值的工艺参数。

3.2 工艺推荐模块搭建

输入坡口尺寸的参数，可以推荐一组5层工艺，如图17所示。推荐原则是根据数据库中每一层工艺参数焊接后的余高增加量，叠加后，符合最终成形标准的一组工艺参数。



图17 工艺推荐界面

选中点击“数据下载”按钮，则将功率、送丝速度、焊接速度参数下载到工控机上，如图18所示。



图18 工艺下载功能

工控机可以显示出将列表中选中的功率、送丝速度、焊接速度下载到软件界面中，如图19所示。



图19 工控机控制界面

3.3 工艺修正模块搭建

利用Matlab神经网络工具箱进行数据训练。输

入层为激光功率、焊接速度、送丝速度，其中隐含层10层，输出层为余高增加量，神经网络模型如图20所示。

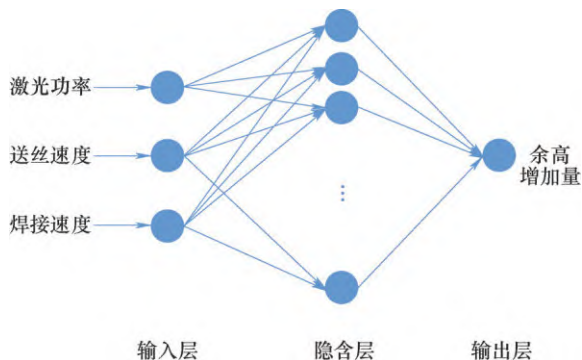


图20 神经网络模型

训练得到的神经网络模型公式如下

$$b1 = \begin{bmatrix} 1.4132 \\ 2.2817 \\ -2.6478 \\ -0.1964 \\ -2.4642 \\ -2.2756 \\ -2.4207 \end{bmatrix} \quad b2=0.0799 \quad IW = \begin{bmatrix} 0.1688 & -2.578 & 1.4745 \\ -3.6309 & -2.2254 & -0.0774 \\ -0.029 & 2.0346 & 0.9095 \\ -1.6764 & -1.2715 & 2.0952 \\ -2.821 & 0.2163 & 1.0313 \\ -0.617 & -0.528 & 2.5877 \\ -0.9192 & -2.8001 & -2.98 \end{bmatrix} \quad LW = \begin{bmatrix} -0.19 \\ -0.294 \\ -0.2062 \\ 0.1632 \\ 0.445 \\ 0.1453 \\ -0.5677 \end{bmatrix}$$

将相关计算方式写入程序中。输入为激光功率、焊接速度、送丝速度，输出为余高增加量，界面如图21所示。

图21 工艺修正

点击“数据库”，则会弹出提示，是否导入数据库提示，如果点击“是”，则导入；点击“否”，则退出，如图22所示。

图22 导入数据库提示

如果点击“是”，数据导入到数据库。点击“查询”按钮，可以发现当前导入的数据，如图23所示。

离焦量	功率	焊接速度	送丝速度
0	2	4	1

图23 数据导入完成

3.4 数据记录模块搭建

焊接过程中具备采集的数据实时保存功能。如图24所示，其中产品型号可以填写管径，输入当前焊接层数，开始焊接后，点击“开始记录”，则间隔1s，记录数据到Excel表中，焊接完成后，点击“停止记录”。

图24 数据实时保存功能

3.5 工艺参数监测模块搭建

工艺参数的实时在线监测记录主要是由上位机通过串口通信从传感器端实时读取监测数据并按照固定时间记录和显示成动态曲线，如图25所示。工艺参数监测模块主要包括工艺参数曲线显示区域和检测开关按钮，其中检测开关按钮用于开启或者关闭送丝速度、保护气流量、激光功率及焊接速度等参数的监测，工艺参数曲线显示区域主要用于工艺参数的集中监测，并结合工艺数据库中的合理工艺范围数据进行波动性对比分析，得到如图26所示的效果。其中，工艺数据库基准范围区域由焊接质量评定及报警模块中的工艺数据库部分提供。

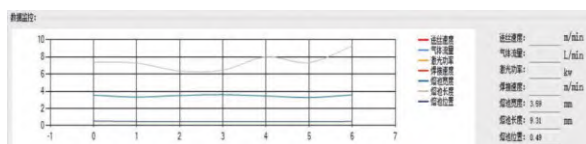


图25 工艺参数实时记录界面

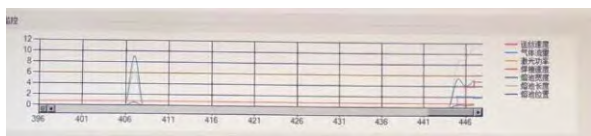


图26 工艺参数波动示意

3.6 焊接质量诊断模块搭建

焊接质量诊断模块主要包含工艺数据库部分、焊接质量预测模型及预警部分。其中，工艺数据库由大量的工艺试验建立并存储于文档中，文档数据可以通过软件自动添加，也可以通过人工输入。在实际焊接工作中，所建立的工艺数据库为各道焊缝提供最佳焊接参数，并生成焊接参数的合理波动范围，用于辅助焊接参数的实时监控，并起到焊接参数异常预警功能。焊接质量预测模型及预警部分主要根据焊接熔池各个参数的波动并结合焊接参数的异常数据对焊接质量有异常的部分进行评定记录并预警。

焊接质量模型的建立主要考虑两种方法。

(1) 采用非线性模型建立两者关系 该方法的焊接质量诊断模块主要通过非线性模型来作为判断依据，通过工艺参数的输入来对焊接质量做出判断。考虑采用BP神经网络，来实现建模，BP神经网络无论在网络理论还是在性能方面已比较成熟，并且由于其优点已成为模型建立的首选方式，如图27所示。其突出优势就是具有很强的非线性映射能力和柔性的网络结构。网络的中间层数、各层的神经元个数可根据具体情况任意设定，并且随着结构的差异其性能也有所不同，可以满足从焊接参数到焊接质量的映射机制建立要求。

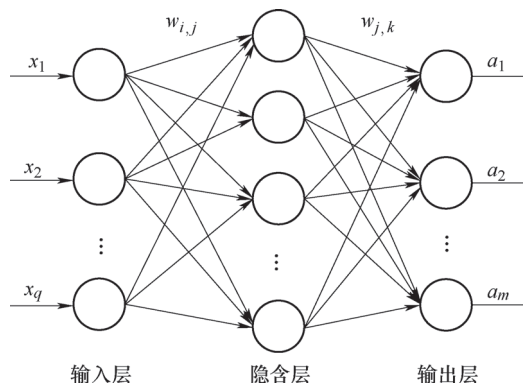


图27 神经网络示意

(2) 采用概率来对焊接质量进行估算 该方法的焊接质量诊断模块主要根据数据管理系统中的

历史数据进行概率推算，从而得到出现缺陷概率较小的工艺数据范围，如图28所示（绿色区域）。即由历史数据可以得到出现“OK”结果和“NG”结果之间的上限工艺曲线和下限工艺曲线的所在的范围，通过概率估算得到上下限工艺曲线作为质量诊断的依据。该估算方式主要通过设定概率阈值来实现，即当概率阈值设置较小时，上下限曲线接近于“NG”边缘线；当设置阈值较大时，上下限曲线接近于“OK”边缘线。

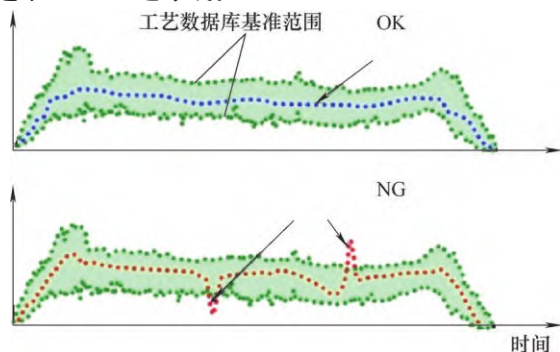


图28 工艺参数波动示意

4 结束语

本文基于工程实践设计搭建了一套针对管道填丝激光焊接应用的数据库管理系统，该系统能够实现焊接过程中参数的推荐、焊接过程的实时监控及焊接质量的预警功能，可指导焊接实施，是实现管道激光焊接稳定性的重要保障。该系统基于神经网络模型搭建了工艺参数推荐、监测、修正功能，能够进一步确保管道激光焊接的高精度、高质量实施。

参考文献：

- [1] 常晶舒. 激光—电弧复合焊接数据库与专家系统研究与设计[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2019.
- [2] 吕碧峰. 弧焊工艺专家系统的开发[D]. 大连：大连铁道学院，2003.
- [3] 李巍，魏艳红. 焊接工程数据库系统综述[J]. 焊接，2006（11）：17-21.
- [4] 薛龙，王德国，邹勇，等. 水下管道全位置焊接过程控制专家系统[J]. 电焊机，2014（7）：64-67.

MW 20240309