

技术创新

基于WEB的航空航天环形锻件CAPP系统开发

张朝朝¹, 叶蕾², 曹志勇², 金俊松¹, 吴斌¹, 张祥林¹

(1.华中科技大学 材料科学与工程学院, 武汉 430074; 2.湖北大学, 武汉 430062)

摘要: **目的** 设计并实现基于B/S架构模式的航空航天环形锻件CAPP系统, 提升航空航天环形锻件的工艺设计效率, 保证产品工艺设计的一致性, 实现环形锻件工艺设计的自动化、智能化。**方法** 根据环形锻件工艺设计理论, 结合实际生产过程中环形锻件工艺的设计要求, 分析环形锻件工艺设计流程, 提炼环形锻件的工艺设计规则。根据环形锻件工艺设计需求和用户需求设计环形锻件CAPP系统架构, 选取C#作为系统后端开发语言, 利用HTML、CSS和JavaScript技术开发系统界面。选用SQL Server开发系统数据库, 配合MVC框架进行CAPP系统各功能模块的开发。**结果** 设计并实现了环形锻件CAPP系统, 系统包含工艺编制、环件信息管理、知识库管理、用户管理4个系统功能模块。在工艺编制模块中导入新增环件信息后可以选择基于规则或基于机器学习2种设计模式进行环形锻件的工艺编制, 能够自动生成标准化工艺卡片, 与人工设计相比, 工艺设计时间缩短了90%。**结论** 环形锻件CAPP系统具备良好的环形锻件工艺设计能力, 能够显著提高环形锻件的工艺设计效率及一致性。

关键词: 计算机辅助工艺设计; 轧环; 工艺设计; B/S架构; 智能制造

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.05.020

中图分类号: TG335; P315.69 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)05-00164-12

Development of CAPP System for Aerospace Ring Forgings Based on WEB

ZHANG Zhao-zhao¹, YE Lei², CAO Zhi-yong², JIN Jun-song¹, WU Bin¹, ZHANG Xiang-lin¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei University, Wuhan 430062, China)

ABSTRACT: This work aims to design and implement the CAPP system of aerospace ring forgings based on B/S architecture mode, to improve the process design efficiency of aerospace ring forgings, ensure the consistency of product process design, and realize the automation and intelligence of ring forging process design. Firstly, according to the process design theory of ring forgings and combined with the process design requirements of ring forgings in the actual production process, the process design flow of ring forgings was analyzed, and the process design rules of ring forgings were refined. Then, the CAPP system architecture of ring forgings was designed according to the requirements of ring forging process design and user requirements. C# was

收稿日期: 2022-11-24

Received: 2022-11-24

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFB1704500)

Fund: National Key R&D Program of China (2019YFB1704500)

作者简介: 张朝朝 (1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为智能制造。

Biography: ZHANG Zhao-zhao (1998-), Male, Postgraduate, Research focus: intelligent manufacturing.

通讯作者: 张祥林 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为智能制造、模具寿命、3D生物打印。

Corresponding author: ZHANG Xiang-lin (1963-), Male, Doctor, Professor, Research focus: intelligent manufacturing, die life, biological 3D printing.

引文格式: 张朝朝, 叶蕾, 曹志勇, 等. 基于WEB的航空航天环形锻件CAPP系统开发[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 164-175.
ZHANG Zhao-zhao, YE Lei, CAO Zhi-yong, et al. Development of CAPP System for Aerospace Ring Forgings Based on WEB[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5): 164-175.

selected as the back-end development language of the system, and the system interface was developed by HTML, CSS, and JavaScript technology. SQL Server was selected as the system database, and the development of each function module of the CAPP system was carried out with the MVC framework. The CAPP system of ring forgings was designed and implemented, which incorporated four system function modules: process preparation, ring information management, knowledge base management, and user management. After the new ring information was imported into the process preparation module, two design modes based on rules or machine learning could be selected for the process preparation of ring forgings. The standardized process cards could be automatically generated, and the process design time could be shortened by 90% compared with manual design. CAPP system of ring forgings has good process design capability of ring forgings, which can significantly improve the process design efficiency and consistency of ring forgings.

KEY WORDS: computer-aided process planning system; ring forging; process design; B/S architecture; intelligent manufacturing

环形锻件是一种重要的锻件类型,具有材料种类多、尺寸跨度大、成形工序复杂等特点^[1]。环形锻件被广泛应用在航空航天、燃气轮机等领域,用于机匣、燃烧室、密封环、支撑环等关键部位^[2-3]。环形锻件成形工艺涉及工序众多,各个工序之间相互影响,直接关系到环形锻件的质量以及可靠性。目前环形锻件的工艺设计主要依赖经验丰富的工艺工程师进行人工设计,工艺设计效率不高、一致性较差。

近年来,随着工业 4.0 概念的兴起,推动生产过程自动化和智能化变革成为构建智慧工厂的关键一步。计算机辅助工艺过程设计(Computer Aided Process Planning, CAPP)作为连接计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)和计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)的桥梁^[4],也需要进行自动化、智能化转型^[5]。一些学者对基于云/Web 的 CAPP 系统架构进行了设计和研究。Anbalagan 等^[6]提出了一种基于物联网的集成架构。Lu 等^[7]、Milosevic 等^[8]分别提出了 2 种基于云的流程规划系统架构。Ma 等^[9]提出了网络环境下的集成制造系统架构。一些学者对于不同类型的系统框架进行了研究,Kong 等^[10]研究了基于特征的多层集成框架。Zhao 等^[11]提出了一种用于工艺规划的数据驱动框架。Sarma 等^[12]开发了三轴混合线弧增材制造的集成框架。目前对于环件轧制的研究主要集中在环件成形工艺、尺寸设计等方面^[13-15]。Liu^[16]、Wu 等^[17]分别使用人工神经网络在 CAPP 工艺规划和工艺参数设计方面进行了应用。潘利波^[18]对环件变形规律进行了研究,并开发了单机版 CAPP 系统。

现阶段的研究主要集中在先进通用系统的架构设计和智能算法在流程/路径规划的应用上,与环件轧制相关的专用 CAPP 系统研究较少,不适应企业数字化、智能化的发展需求。因此,本文基于国内某环件制造企业环形锻件的工艺设计需求,选择 C#语言开发了基于 B/S 架构的环形锻件 CAPP 系统。该系统能够为环件产品进行工艺编制,输出标准化的工艺卡

片,节省工艺编制时间,提高生产效率。

1 系统需求分析及功能模块设计

1.1 系统需求分析

对环形锻件成形工艺流程中的重点环节和关键工艺参数进行分析,确定系统进行环形锻件工艺编制需要实现的系统功能。航空航天环形锻件的一般工艺流程如图 1 所示,其中下料、加热、制坯、环件轧制、热处理 5 个部分是环形锻件工艺设计过程中的重点环节。根据环形锻件工艺流程,环形锻件 CAPP 系统要实现工艺编制功能需满足以下需求:(1) 根据新增环件产品信息和出货要求设计环形锻件的生产流程和工序组合;(2) 根据新增环件产品信息设计锻件尺寸、环坯尺寸、冲孔尺寸、镦粗尺寸、料段尺寸,若需要进行马架扩孔,则进行马架扩孔尺寸的设计;(3) 根据料段尺寸和环坯尺寸,结合材料的保温时间系数分别设计锻造加热曲线和轧环加热曲线,确定装炉温度、预热温度、保温温度、预热时间、保温时间、冷却时间等工艺参数,并选取加热设备,设计装炉量和冷却方式等;(4) 根据环件出货的热处理要求进行热处理方式和热处理加热曲线的设计,包括装炉温度、保温温度、保温时间、冷却速度、冷却方式等工艺参数;(5) 完成工艺编制后输出标准化的工艺卡片。

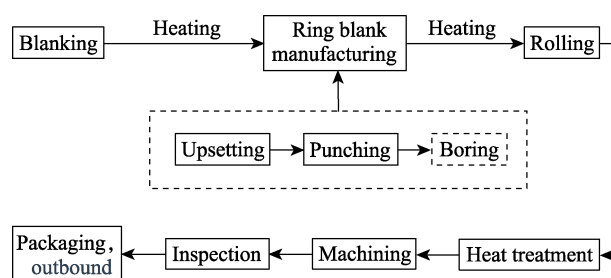


图 1 环形锻件工艺流程

Fig.1 Process flow chart of ring forging

1.2 系统功能性需求分析

根据航空航天环形锻件 CAPP 系统的使用场景和用户需求,进行 CAPP 系统的功能性需求分析,确定系统需要实现的功能。环形锻件 CAPP 系统除了需要满足工艺编制功能外,还需要满足以下功能性需求。

1) 多角色权限用户管理功能。系统管理员需要对用户账号的角色权限(如工艺工程师、审核人员、校对人员等)和用户信息(如用户名、密码、联系方式等)进行创建、修改、删除等操作,以保证不同角色的工作人员可顺利登录系统行使工作职责。

2) 产品信息管理功能。特定权限的用户需要在企业业务流程管理系统(Business Process Management, BPM)中导入新增订单的环件产品信息,并能对 CAPP 系统中的产品信息(产品尺寸、材料、重量等)及对应的工艺方案信息进行搜索、修改、删除、备注等操作。

3) 知识库管理功能。特定权限的用户需要能够对 CAPP 系统的知识库进行更新和管理,如对材料库、设备库、工序库、余量公差库等进行查询、新增、修改、删除等操作。

1.3 系统功能模块设计

基于环形锻件 CAPP 系统的需求分析和功能性需求分析,按模块化设计思想^[19],将系统划分为用户管理模块、知识库管理模块、产品信息管理模块、工艺卡编制模块4个模块,并依据系统需求分析将每个模块需要完成的功能细分,设计了如图2所示的系统功能模块。

1.4 工艺编制流程设计

根据环形锻件工艺设计规则和设计习惯,规划了环形锻件 CAPP 系统中工艺编制模块的工作流程如图3所示。具备工艺编制权限的用户登录系统后使用产品信息管理模块中的BPM导入功能将新增的环件产品信息导入 CAPP 系统中,开始进行环形锻件的工艺编制。

首先进行工序的规划,系统根据环件的材料从工序库中推荐典型的工序组合,用户可根据需求进行自由调整。确定成形工序后进行锻件尺寸、环坯尺寸、镗粗尺寸、冲孔尺寸、马架扩孔尺寸、下料尺寸的全流程尺寸设计。系统提供2种方式对锻件成形过程中的各个尺寸进行设计:(1)基于锻件成形工艺设计规则,使用理论公式对上述尺寸进行计算;(2)基于机器学习模型,使用系统数据库中已有环件成形过程的尺寸数据推理新增环件的环坯尺寸、马架尺寸等数据。其次进行锻造和轧环加热曲线的参数设计,如装炉温度、预热温度、保温温度、预热时间、保温时间、加热速度、冷却速度、冷却时间等工艺参数。最后进入锻件的热处理设计部分,确定热处理方式进行热处理加热曲线的参数设计,如装炉温度、保温温度、保温时间、冷却速度、冷却方式等参数。完成所有的参数设计后,输出标准化的工艺卡片。

2 系统架构及数据库设计

2.1 系统架构设计

常见的系统架构有2种模式,分别是B/S(浏览

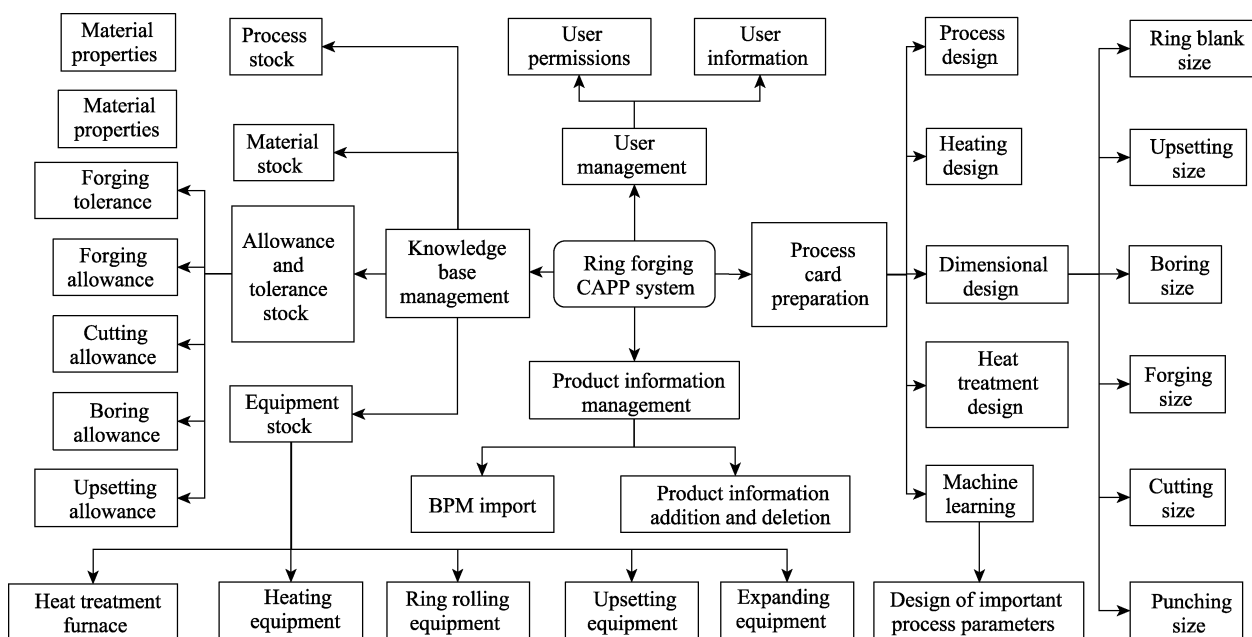


图2 系统功能模块示意图

Fig.2 Schematic diagram of system function module

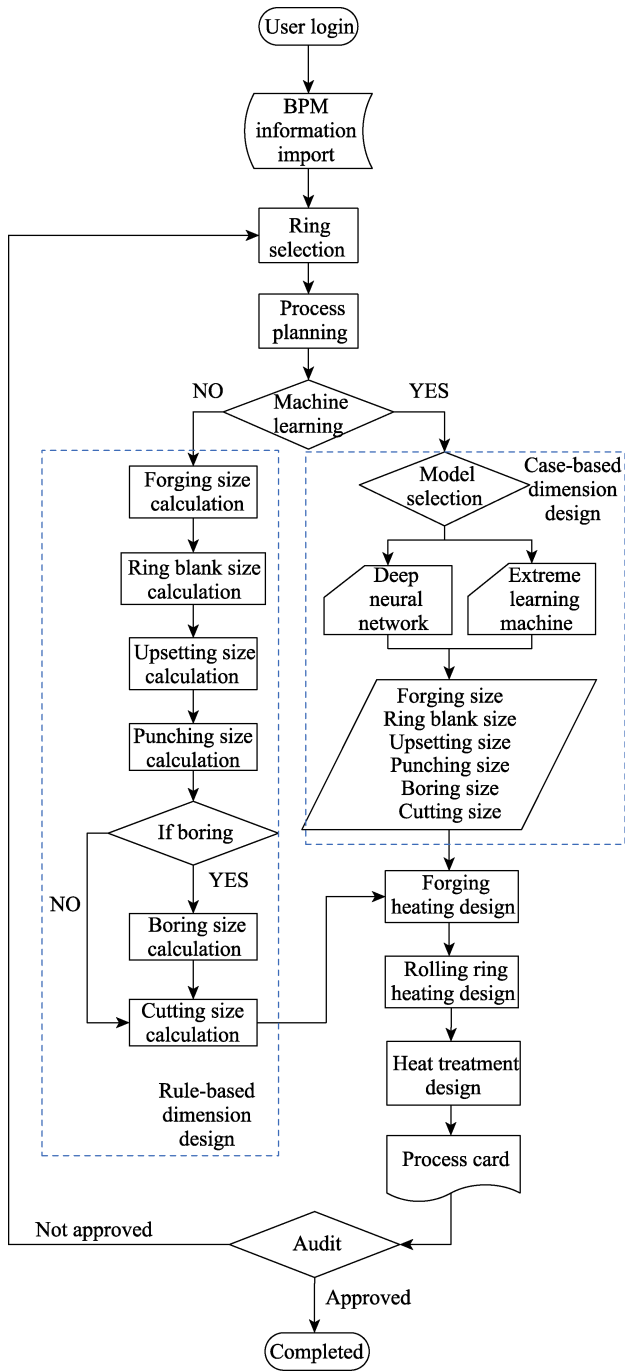


图 3 工艺编制模块工作流程
Fig.3 Working flow chart of process preparation module

器/服务器)模式^[20-22]和 C/S(客户端/浏览器)模式^[23],与 C/S 模式相比,B/S 模式的系统维护操作更加简便^[24]。环形锻件的工艺设计和审核过程复杂、步骤繁多,存在多人协同工作场景,系统生成的工艺设计案例需要进行统一的数字化存储和管理。根据环形锻件 CAPP 系统的使用需求和使用场景,选择 B/S 模式进行环形锻件 CAPP 系统的开发。

将环形锻件 CAPP 系统分为数据层、接口层、业务逻辑层、展示层 4 个部分,设计了如图 4 所示的局域网下基于 B/S 模式的多层分布式系统架构。数据层

使用 SQL Server 技术构建数据库对 CAPP 系统中产生和需要调用的数据进行存储。接口层将数据层和业务逻辑层进行隔离,只有通过调用接口程序才能完成数据的调用、保存或修改,保证了系统数据的安全。业务逻辑层通过建立不同的对象和类方法,对 CAPP 系统中各个模块的功能进行程序实现,完成系统的功能需求。展示层使用 MVC 框架^[25]进行实现,负责接收和响应用户在浏览器端提交的请求,并分发不同的图形界面展示在浏览器中。

基于上述架构方案的环形锻件 CAPP 系统直接部署在企业服务器上,无须在本地电脑安装软件,用户可直接在局域网环境下通过浏览器或使用 VPN 软件登录和使用 CAPP 系统。这种架构方式不仅提升了系统的安全性能,方便系统的维护和升级,降低了企业成本,还满足了多场景下多人协同工作的需求,提高了生产效率。

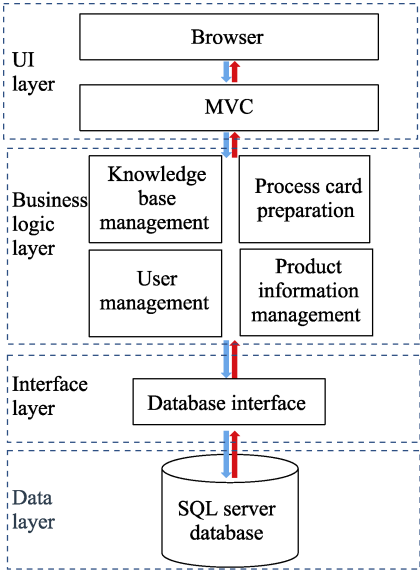


图 4 系统架构示意图
Fig.4 Schematic diagram of system architecture

2.2 系统数据库设计

常见的数据库类型有关系型数据库和非关系型数据库 2 种^[26]。关系型数据库和常见的表格比较相似,表与表之间相互关联,可以直观反映实体间的关系。非关系型数据库简化了数据库结构和数据表连接,适用于非结构化数据的处理。根据系统需求分析可知,关系型数据库更加适用于 CAPP 系统的数据库设计。SQL Server 数据库技术属于关系型数据库,具备界面图形化、操作简单、读写速度快等优点,因此本系统选用 SQL Server 数据库。

使用 SQL Server 客户端将环形锻件 CAPP 系统中的数据如用户信息、环件产品信息、设备信息等构建不同的数据表,并设计表与表之间的逻辑关系。

1) 用户信息表。用户信息表中的字段包括用户

编号、用户名、用户密码、角色权限、联系方式、创建时间、修改时间等。其中用户编号作为数据表的外键与其他表建立联系。

2) 环件产品信息。环件产品信息表中的字段包括产品编号、产品名称、锻件类别、工艺编码、材料代码、材质、尺寸、下料重量、锻件质量、交货重量、交货状态、客户厂家、备注等。其中产品编号作为数据表的外键与其他表建立联系。

3) 设备信息表。设备信息表中的字段包括设备编号、设备名、设备型号、设备类型、备注等。其中设备编号作为数据表的外键与其他表建立联系。

除上述用户信息表、产品信息表、设备信息表外，还在数据库中构建了系统所需的其他数据表，如料段公差表、锻粗公差表、锻件公差表、马架公差表、锻件余量表、材料参数表、工序表、设备参数表、热处理参数表、锻件成形参数表、加热曲线数据表、热处理参数表等 30 余张数据表。

3 环形锻件 CAPP 系统实现

3.1 系统开发环境及工具

系统选用如表 1 所示的开发工具进行环形锻件 CAPP 系统的实现，使用 Microsoft Edge 浏览器进行系统测试。

3.2 用户管理模块

用户管理模块是系统管理员对用户信息如用户名、密码、角色权限等进行管理操作的通道，如图 5 所示。系统管理员在用户管理页面进行相关操作后，由 JQuery 获取用户输入的表单元素发送到业务逻辑层，业务逻辑层代码根据用户需求调用数据库接口对数据中的用户信息表进行修改，并生成修改时间。如

表 1 系统开发工具
Tab.1 System development tool

Tools	Version	Purpose
Microsoft Windows	10	Development Environment
Visual Studio	2019	Development Tools
C#	8.0	Backend Development
SQL Server	2019	Database Development
Html5, css, javascript	—	Frontend Development
Microsoft Edge	—	Testing Browser

操作成功，数据库接口会返回 success 字符串，否则返回 fail 字符串，并弹出异常提示框。

3.3 产品信息管理模块

产品信息管理模块对普通用户提供环件信息的查询、修改、删除等功能，用户可以通过产品编号或工艺编码查询产品信息如产品尺寸、出货要求、工艺信息等，如图 6 所示。在用户输入产品编号或者工艺编码、点击搜索后，系统调用数据库接口中的查询方法在数据库中检索。若存在该信息，则以表格形式在页面进行数据展示，否则弹出相应信息提示框。在每条产品信息的左边提供了工艺设计和工艺修改接口，用户可由此进入新增环件产品的工艺设计流程或修改已有工艺方案。

3.4 知识库管理模块

知识库管理模块提供各个知识信息表的管理功能，如材料参数表、余量表、公差表、工序表、设备信息表等，具备知识库管理权限的用户可以在该页面进行新增、修改、删除知识信息的操作，如图 7 所示。业务逻辑层代码根据用户提交的表单和请求，调用数据库接口层中的数据库操作方法生成对应的 SQL 语

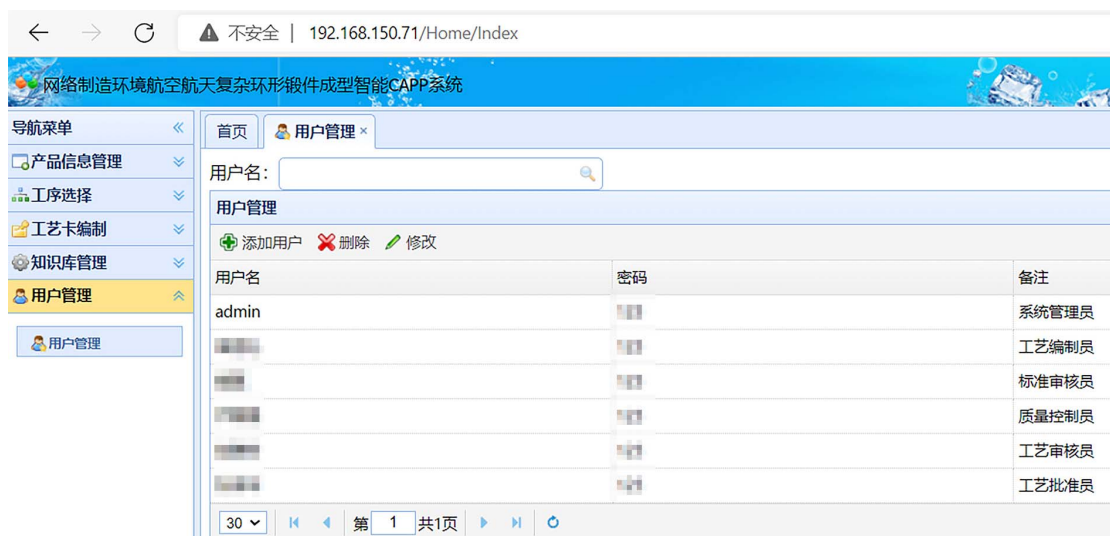


图 5 用户管理模块页面

Fig.5 User management module page

产品信息录入与管理 ×					
同步BPM数据 产品编号: 工艺编码: 搜索					
操作	申请时间	工艺编码	产品名称	锻件类别	工艺分类
设计 修改 删除	2022-02-14 00:00:00		支臂	I	特材
设计 修改 删除	2022-02-14 00:00:00		支臂	I	特材
设计 修改 删除	2022-02-14 00:00:00		尾喷管法兰	I	特材
设计 修改 删除	2022-02-14 00:00:00		尾喷管后法兰	I	特材
设计 修改 删除	2022-02-14 00:00:00		中心锥法兰	I	特材
设计 修改 删除	2022-02-14 00:00:00		中心锥中间连接前法	I	特材
设计 修改 删除	2022-02-14 00:00:00		中心锥中间连接前法	I	特材
设计 修改 删除	2022-02-14 00:00:00		中心锥中间连接后法	I	特材
设计 修改 删除	2022-02-14 00:00:00		前封严后挡板	I	特材
设计 修改 删除	2022-02-14 00:00:00		中心锥中间连接后法	I	特材
设计 修改 删除	2022-02-14 00:00:00		中心锥中间连接后法	I	特材

图 6 产品信息管理模块页面

Fig.6 Product information management module page

导航菜单	材料参数 ×					
	新增					
	操作	材料代码	锻造装炉温度	锻造预热温度	锻造保温温度	锻造冷料保温时
	修改 删除	35				
	修改 删除	45				
	修改 删除	2219				
	修改 删除	7050				
	修改 删除	7085				
	修改 删除	0Cr12Mn5Ni4Mo				
	修改 删除	0Cr17Ni4Cu4Nb				
材料属性	修改 删除	0Cr18Ni10Ti3				
下料高度公差	修改 删除	13Cr11Ni2W2Mo				
锻件余量	修改 删除	16Mn IV				
锻件公差	修改 删除	16Mn3				
马架公差						
墩粗公差						
工序库						
热处理炉						
加热炉						

图 7 知识库管理模块页面

Fig.7 Knowledge base management module page

句进行数据库操作。若操作成功返回 success 字符串，弹出操作成功提示，否则弹出异常信息提示框。

3.5 工艺编制模块

工艺编制模块向相应权限的用户提供新增环件的工艺编制功能，如工序设计、锻件尺寸设计、环坯尺寸设计、冲孔尺寸设计、料段尺寸设计、加热参数设计、机器学习环坯尺寸推演等。

1) 工序设计页面为用户提供工序设计功能。工序设计是环件成形工艺编制的基础，不同的工序组合

直接影响锻件成形的生产效率和最终质量。在工序设计页面使用组件 Vue.Draggable 可以实现拖拽式穿梭框效果，使系统具备柔性工序编制功能，如图 8 所示。穿梭框左边列出了该种材料环件的所有成形工序，右边则为系统根据产品信息推荐的合适工序组合，用户可以通过自由拖拽对系统推荐的工序组合进行增删和调整以得到满意的工序组合。

2) 锻件尺寸设计页面为用户提供锻件尺寸设计功能。锻件是经轧环机轧制后的环件，锻件尺寸通常由环件的产品尺寸加上余量和公差得到。以矩形截面



图8 柔性工序编制页面

Fig.8 Flexible process preparation page

产品为例, 锻件尺寸的计算如式(1)所示, 锻件尺寸设计页面如图9所示。

$$\begin{cases} D = D_p + \Delta D \\ d = d_p + \Delta d \\ H = H_p + \Delta H \end{cases} \quad (1)$$

式中: D 、 d 、 H 分别为锻件外径、内径、高度; D_p 、 d_p 、 H_p 分别为环件产品的外径、内径、高度; ΔD 、 Δd 、 ΔH 分别为锻件外径、内径、高度的余量。

3) 环坯尺寸设计页面为用户提供环坯尺寸设计功能。环坯尺寸是坯料进行轧制前的尺寸, 通常根据体积不变原则, 利用锻件尺寸设计环坯尺寸。以矩形截面产品为例, 环坯尺寸的计算如式(2)所示, 环坯尺寸设计页面如图10所示。

$$\begin{cases} d_0 = d_c \\ \frac{H_0 - H}{B_0 - B} = \eta \\ D_0 - d_0 = 2B_0 \\ \frac{\pi}{4}(D_0^2 - d_0^2)H_0 = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)H \end{cases} \quad (2)$$

式中: d_c 为冲孔环坯内径; D_0 、 d_0 、 H_0 、 B_0 分别为环坯外径、内径、高度、壁厚; D 、 d 、 H 、 B 分别为环形锻件外径、内径、高度、壁厚; η 为径向变形量与轴向变形量的比值, 企业俗称轧制角。

4) 冲孔环坯尺寸设计页面为用户提供冲孔尺寸设计功能。冲孔环坯常由料段锻粗到相应尺寸后冲孔获得, 当冲头尺寸小于冲孔尺寸或冲孔系数小于临界值时, 需要对冲孔环坯进行马架扩孔。冲孔环坯尺寸的计算如式(3)所示。

$$\begin{cases} H_c = H_0 \\ (D_c^2 - d_c^2)H_c = (D_0^2 - d_0^2)H_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: D_c 、 d_c 、 H_c 分别为冲孔环坯外径、内径、高度。

5) 料段尺寸设计页面为用户提供料段尺寸设计功能。料段是制造环坯的初始材料, 料段的质量由最终锻件质量、成形过程中的火耗量、冲孔落料质量3部分组成。在合适的高径比范围内, 由料段质量和库存料段的直径计算料段长度, 如式(4)所示。

$$\begin{cases} m = m_1 + m_2 + m_3 \\ m = \pi \left(\frac{D_1}{2} \right)^2 l \rho \\ K = \frac{l}{D_1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: m 、 m_1 、 m_2 、 m_3 分别为料段质量、锻件质量、火耗量、冲孔芯料质量; K 为高径比; D_1 为料段直径; l 为料段长度; ρ 为料段密度。

6) 加热参数设计页面为用户提供加热曲线设计功能, 系统页面如图11所示。环形锻件成形过程中的加热有锻造加热和轧环加热2种, 分别是环坯锻造成形前和环坯上轧环机前的加热。加热曲线的设计包括装炉温度、预热温度、保温温度、预热时间、保温时间等工艺参数的设计和加热设备的选择。在设计过程中系统先在材料参数表中检索环件材料牌号, 获取装炉温度、预热温度、保温温度、冷料保温时间系数、热料保温时间系数等材料参数, 再将冷料保温时间系数和热料保温时间系数分别乘以环件壁厚得到预热时间和保温时间。

7) 热处理参数设计页面为用户提供热处理温度曲线设计功能。锻件热处理的一般方式有淬火、正火、退火、回火4种, 通过不同的热处理组合方式和热处理参数设计实现目标锻件的表面硬度要求。4种热处理方式的曲线设计大同小异, 以淬火的温度曲线设计

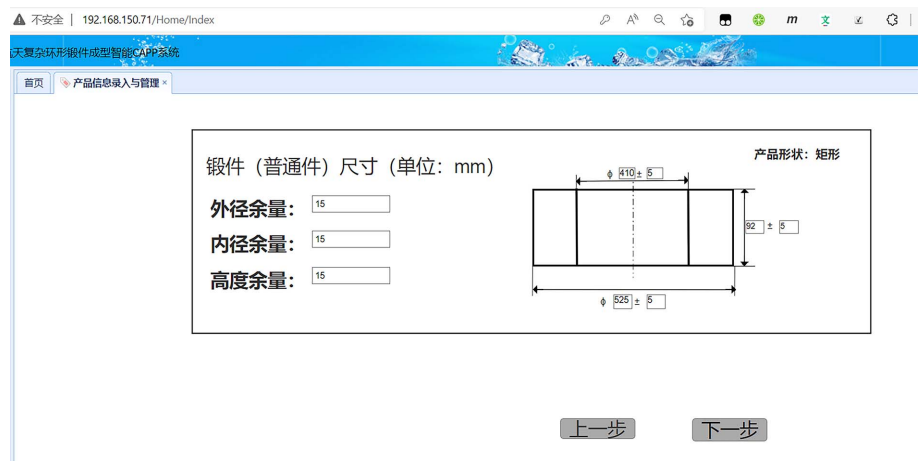


图 9 锻件尺寸设计页面
Fig.9 Forging size design page

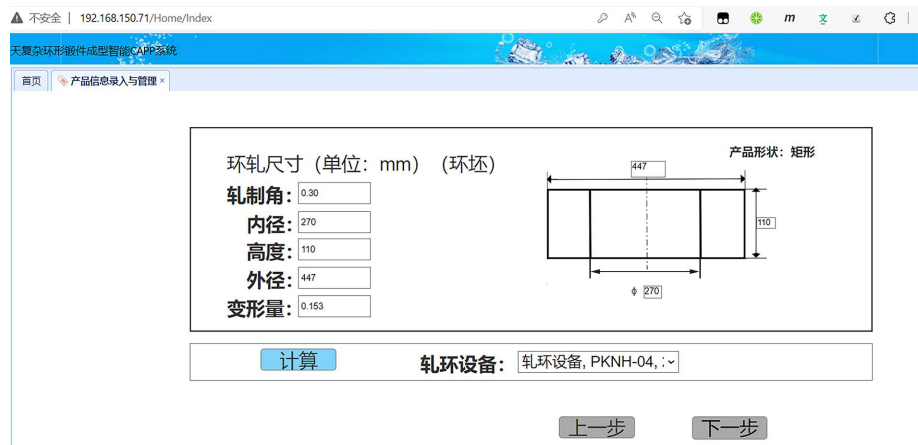


图 10 环坯尺寸设计页面
Fig.10 Ring blank size design page

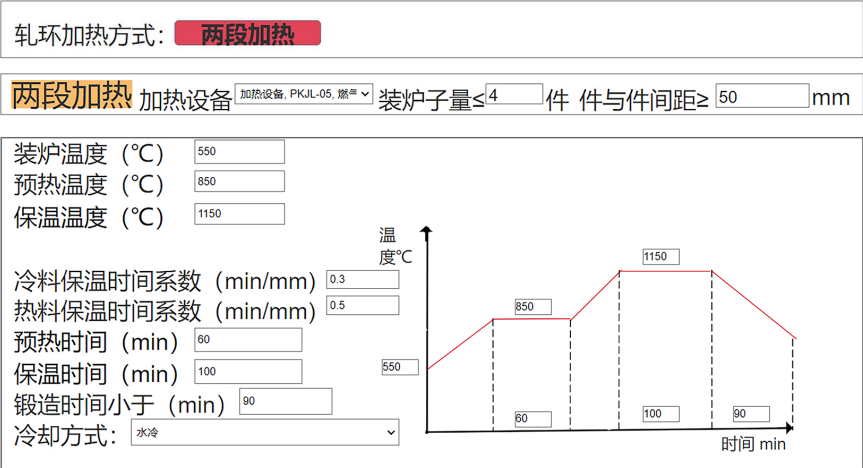


图 11 加热曲线设计页面
Fig.11 Heating curve design page

为例，主要参数包括装炉温度、保温温度、保温时间、冷却方式等。在系统淬火页面中除了温度曲线的设计之外，还需确定热处理加热设备、装炉量等参数，系统页面如图 12 所示。

8) 机器学习页面为用户提供环坯尺寸设计功能，

系统页面如图 13 所示。除上述基于规则进行环坯尺寸的设计方法外，还在系统中开发了基于机器学习模型的环坯尺寸推演方法。使用 Matlab 软件构建神经网络模型和极限学习机模型，根据已有案例中的锻件—环坯尺寸数据进行训练，测试集结果的总相关系数

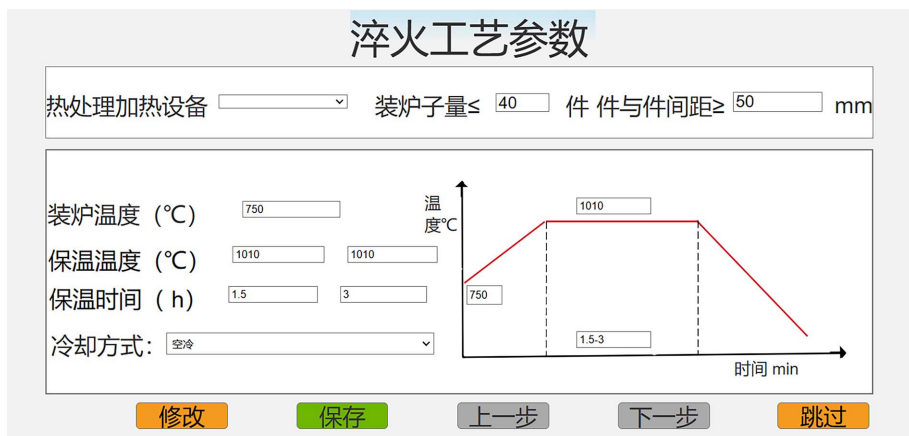


图 12 热处理曲线设计页面
Fig.12 Heat treatment curve design page

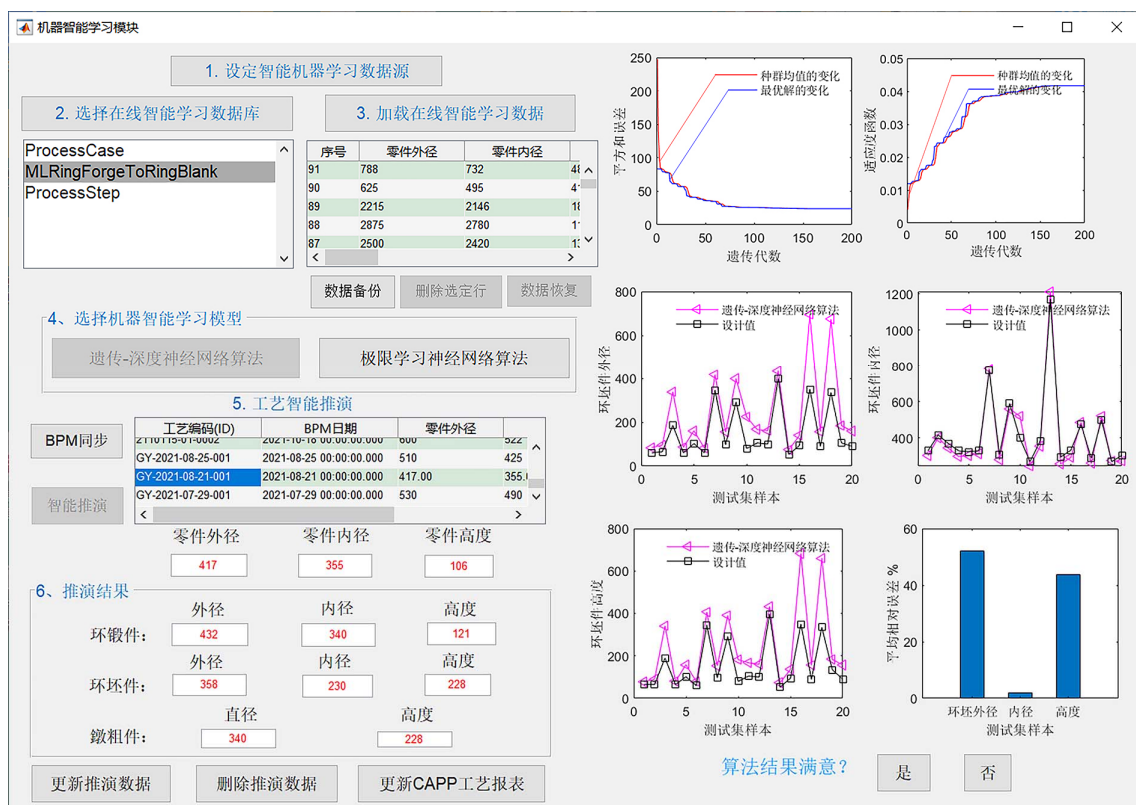


图 13 机器学习环坯尺寸设计页面
Fig.13 Ring blank size design page based on machine learning

在 0.95 以上。使用训练好的模型对新增环件的环坯尺寸进行推演,并基于推演结果计算其他尺寸参数。

4 系统运行测试实例

系统在企业局域网内部署运行后,依据系统功能模块设计图,使用黑盒测试方法^[27]对环形锻件 CAPP 系统进行整体功能测试,验证系统各个模块的功能完整性。

1) 用户管理模块功能测试。使用系统管理员账号登录系统,测试用户管理模块中用户新增、用户删

除、角色权限修改、用户信息修改(如用户名、密码)等功能,系统运行正常如图 5 所示。

2) 产品信息管理模块功能测试。使用工艺编制员账号登录系统,测试产品信息管理模块中 BPM 信息导入、产品信息检索、环件信息修改、环件信息删除、工艺编制模块接口等功能,系统运行正常如图 6 所示。

3) 知识库管理模块功能测试。使用工艺编制员账号登录系统,测试知识库管理模块中知识库新增、知识库删除、知识库修改等功能,系统运行正常如图 7 所示。

4) 工艺编制模块功能测试。使用工艺编制员账

号登录系统，测试工艺编制模块的 2 种工艺设计模式。首先测试工艺编制模块基于规则的工艺设计模式，依次完成环件产品的工序编制、锻件尺寸设计、环坯尺寸设计、冲孔环坯尺寸设计、料段尺寸设计、加热曲线设计、热处理参数设计。其次测试工艺编制模块基于机器学习的工艺设计模式，依次选定数据集、机器学习模型、新增环件的尺寸信息，点击智能

推演生成各个阶段环件的尺寸数据如图 13 所示。最后由工艺人员确认是否接受系统计算出的工艺参数，确认后输出标准化的工艺卡片。经工艺人员测试，系统运行正常,使用系统编制工艺卡片的时间为 2~3 min，输出的部分工艺卡片如图 14 所示。通常由熟练的工艺人员人工编制一份这样的工艺卡片需要 20~30 min，使用系统后时间缩短了 90%。

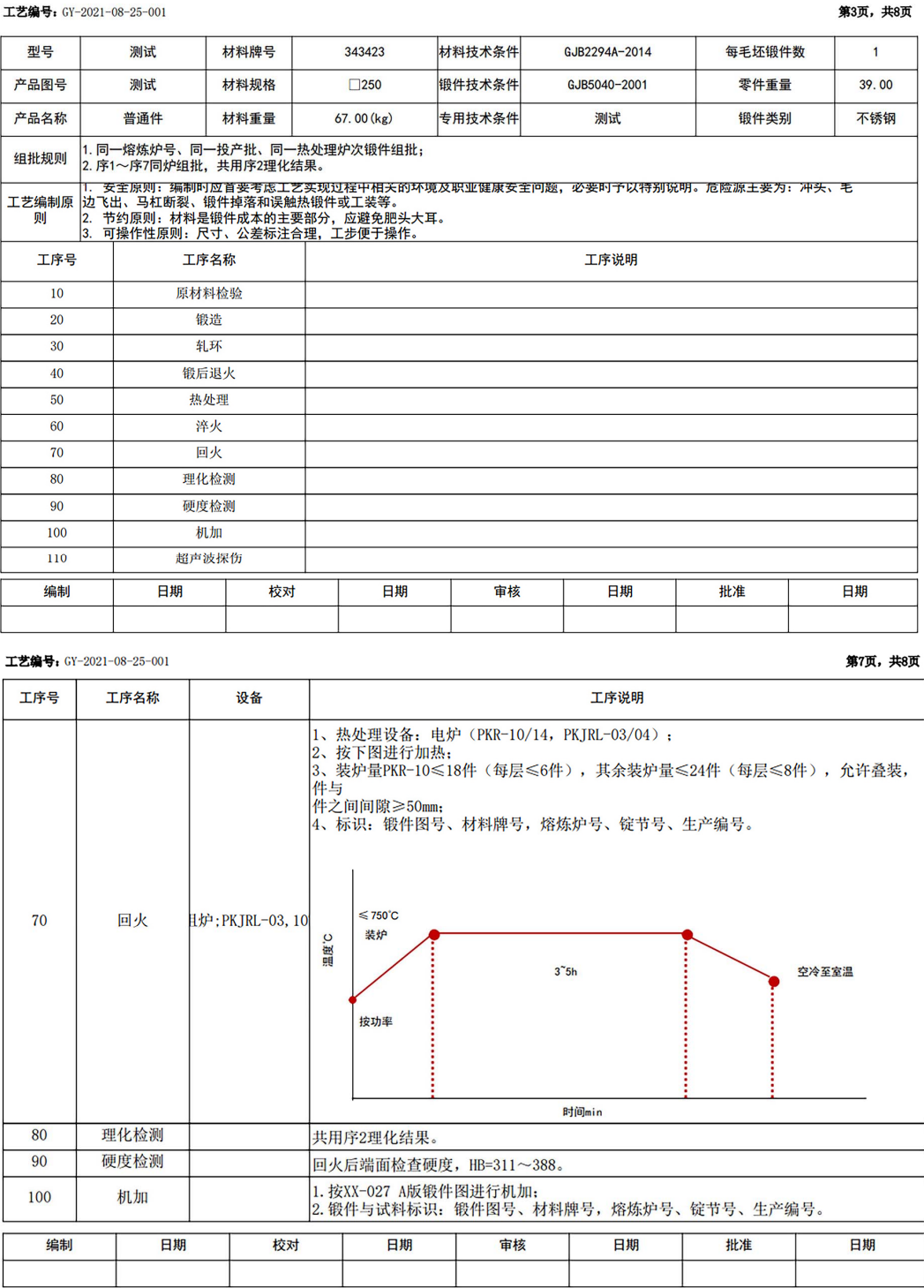


图 14 部分工艺卡片图
Fig.14 Part of the process cards

5 结论

对航空航天环形锻件 CAPP 系统总体构架及各功能模块进行了开发,使用黑盒测试方法进行了功能测试,结论如下。

1) 分析了环形锻件的工艺流程和工艺设计流程,结合用户需求为系统设计了工艺编制、用户信息、环件信息管理、知识库管理 4 个系统功能模块,并设计了基于 B/S 模式的系统架构。

2) 根据系统数据库需求,对数据库进行了逻辑设计,并选取 SQL Server 作为环形锻件 CAPP 的数据库,构建了系统所需的用户信息表、产品信息表、设备信息表等 30 余张数据表。

3) 选用 C#语言作为系统后端开发语言,选用 HTML5、CSS 和 JavaScript 技术开发系统前端页面,实现了工艺编制、用户管理、环件信息管理、知识库管理 4 个模块的全部功能设计。

4) 对开发的 CAPP 系统进行了运行测试,结果表明,开发的 CAPP 系统能够很好地实现环形锻件的工艺编制功能,缩短工艺设计时间,输出标准化的工艺卡片,提升生产效率,规范企业的工艺信息管理。

参考文献:

- [1] 江河,何方有,许亮,等. 高温合金环形件环轧工艺研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(5): 1860-1866.
JIANG He, HE Fang-you, XU Liang, et al. Research Progress on Ring Rolling Technology of Superalloy Ring Forging[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(5): 1860-1866.
- [2] 王丹,刘智,王建国,等. GH4738 高温合金异形环件组织与性能研究[J]. 锻压技术, 2020, 45(5): 128-132.
WANG Dan, LIU Zhi, WANG Jian-guo, et al. Study on Microstructure and Properties of Shaped Ring Parts for Super Alloy GH4738[J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45(5): 128-132.
- [3] 马义伟,王志宏,刘东,等. GH4169 合金异形环件轧制过程的最优主辊转速[J]. 航空学报, 2011, 32(8): 1555-1562.
MA Yi-wei, WANG Zhi-hong, LIU Dong, et al. Optimization of Rotational Speed of Main Roll in Profile Ring Rolling of GH4169 Alloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(8): 1555-1562.
- [4] SOORI M, ASMAEL M. Classification of Research and Applications of the Computer Aided Process Planning in Manufacturing Systems[J]. Independent Journal of Management & Production, 2021, 12(5): 1250-1281.
- [5] TRSTENJAK M, OPETUK T, CAJNER H, et al. Process Planning in Industry 4.0 Current State, Potential and Management of Transformation[J]. Sustainability, 2020, 12(15): 1-25.
- [6] ANBALAGAN A, MORENO-GARCIA C F. An IoT Based industry 4.0 Architecture for Integration of Design and Manufacturing Systems[C]// 3rd International Conference on Materials, Manufacturing and Modelling, Vellore, 2021: 7135-7142.
- [7] LU Yu-qian, XU Xun. Process and Production Planning in a Cloud Manufacturing Environment[C]// ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference, Charlotte, 2015: 1-8.
- [8] MILOSEVIC M, LUKIC D, BOROJEVIC S. A Cloud-Based Process Planning System in Industry 4.0 Framework[C]// International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing, Industry 4.0 and Internet of Things for Manufacturing, Belgrade, 2019: 202-211.
- [9] MA Hui-juan, HUANG Xiang, CUI Xu-hua, et al. Management Control and Integration Technology of Intelligent Production Line for Multi-Variety and Complex Aerospace Ring Forgings: A Review[J]. Metals, 2022, 12(7): 1-24.
- [10] KONG Lin, WANG Li-ming, LI Fang-yi, et al. Multi-Layer Integration Framework for Low Carbon Design Based on Design Features[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 61: 223-238.
- [11] ZHAO Chang-xuan, DINAR M, MELKOTE S N. A Data-Driven Framework for Learning the Capability of Manufacturing Process Sequences[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 64: 68-80.
- [12] SARMA R, KAPIL S, JOSHI S N. Development of a Framework for Computer Aided Design and Manufacturing of 3 Axis Hybrid Wire Arc Additive Manufacturing[C]// International Conference on Advancements and Futuristic Trends in Mechanical and Materials Engineering, India, 2021: 7625-7634.
- [13] 黄维鑫,郭良刚. $\Phi 11$ m 超大型 2219 铝环多工步轧制研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(12): 51-57.
HUANG Wei-xin, GUO Liang-gang. Study on Multi-Step Rolling of $\Phi 11$ m Super-Large 2219 Aluminum Ring[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(12): 51-57.
- [14] 华林,钱东升,邓加东,等. 超大型环件轧制理论与技术[J]. 锻压技术, 2018, 43(7): 17-31.
HUA Lin, QIAN Dong-sheng, DENG Jia-dong, et al. Theory and Technology of Superlarge Ring Rolling[J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(7): 17-31.
- [15] 徐立亮,邓加东,胡志力,等. 基于机器学习的环形锻件轧制毛坯智能推演设计方法[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(4): 23-29.
XU Li-liang, DENG Jia-dong, HU Zhi-li, et al. Intelligent Deduction Design Method of Ring Forging Rolling Blank Based on Machine Learning[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(4): 23-29.
- [16] LIU Hao. Optimal Selection of Control Parameters for Automatic Machining Based on BP Neural Network[J].

- Energy Reports, 2022, 8: 7016-7024.
- [17] WU Wen-bo, HUANG Zheng-dong, ZENG Jia-ni, et al. A Fast Decision-Making Method for Process Planning with Dynamic Machining Resources via Deep Reinforcement Learning[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 392-411.
- [18] 潘利波. 环件径轴向轧制变形规律与 CAPP 系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007: 7-9.
PAN Li-bo. On Deformation Laws and CAPP System for Radial-Axial Ring Rolling[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007: 7-9.
- [19] 潘永红. 精细化工厂工艺系统模块化设计的分析与探究[J]. 化工管理, 2022(23): 165-168.
PAN Yong-hong. Analysis and Research on Modular Design of Process System in Fine Chemical Plant[J]. Chemical Management, 2022(23): 165-168.
- [20] 费斐, 章建程, 张佳佳. 基于 B/S 结构船舶食品仓库管理信息系统设计与实现[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(2): 104-107.
FEI Fei, ZHANG Jian-cheng, ZHANG Jia-jia. Design and Implementation of Warehouse Management Information System for Vessel Food Based on B/S Structure[J]. Automation & Instrumentation, 2021(2): 104-107.
- [21] 石安, 张卓若, 代立云. 基于 B/S 架构的实时系统建模验证工具[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(10): 11-17.
SHI An, ZHANG Zhuo-ruo, DAI Li-yun. Real-Time System Modeling and Verification Tool Based on B/S Architecture[J]. Computer Applications and Software, 2022, 39(10): 11-17.
- [22] 程思竹, 罗永康, 肖刚锋, 等. 模具电极加工生产线设备信息管理系统的设计与开发[J]. 精密成形工程, 2022, 14(10): 147-154.
CHENG Si-zhu, LUO Yong-kang, XIAO Gang-feng, et al. Design and Development of the Information Management System for the Die Electrode Processing Line[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(10): 147-154.
- [23] 何斌, 王锋, 张粤东, 等. C/S 架构的电火花线切割系统设计[J]. 电加工与模具, 2021(4): 31-35.
HE Bin, WANG Feng, ZHANG Yue-dong, et al. Design of WEDM System Based on C/S Structure[J]. Electro-machining & Mould, 2021(4): 31-35.
- [24] 林伟婷. C/S 与 B/S 架构技术比较分析[J]. 科技资讯, 2018, 16(13): 15-16.
LIN Wei-ting. Comparative Analysis of C/S and B/S Architecture Technology[J]. Science & Technology Information, 2018, 16(13): 15-16.
- [25] 薛峰, 梁锋, 徐书勋, 等. 基于 Spring MVC 框架的 Web 研究与应用[J]. 合肥工业大学学报, 2012, 35(3): 337-340.
XUE Feng, LIANG Feng, XU Shu-xun, et al. Research on Spring MVC Framework Based Web and Its Application[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2012, 35(3): 337-340.
- [26] 陈娟, 李炜. 非关系型数据库与关系型数据库技术综述[J]. 电子技术与软件工程, 2020(18): 147-148.
CHEN Juan, LI Wei. Overview of Non-Relational Database and Relational Database Technology[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2020(18): 147-148.
- [27] 黄天开. 计算机软件测试方法及应用研究[J]. 中国新通信, 2020, 22(16): 56-57.
HUANG Tian-kai. Research on Computer Testing Methods and Applications[J]. China New Telecommunications, 2020, 22(16): 56-57.

责任编辑: 蒋红晨