

铸造浇注系统敏捷数字化设计及其案例研究

向东, 董选普, 郭树人, 周楚昊, 曹华堂

(华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 针对铸造工艺设计阶段的迭代效率问题提出了浇注系统敏捷数字化设计方法。采用数据库开发技术, 将工艺设计过程中的数据和经验通过数字化形式进行转换、构建和存储形成数字化资产, 有机融合到了工艺结构分析和浇注系统设计实践中。研究了上下文设计、参数化设计、智能化推荐、实时验证一体化的快速设计模式, 形成了流程、方法、工具和信息统一的敏捷数字化设计框架, 提高了浇注系统设计效率, 加速提高铸造企业研发领域数字化转型能力。本文的设计思想和系统的实践方法能够有效的指导和扩展到其他铸造工艺设计中, 为实现完整、高效、易用的铸造工艺数字化、智能化设计系统提供指导。

关键词: 工艺迭代; 敏捷设计; 智能推荐; 上下文设计; 浇注系统

随着数字化、智能化技术在铸造行业的应用^[1-4], 铸造正在从依靠经验走向数字化指导生产的阶段^[5], 探索和实现敏捷的数字化设计方法是加速铸造行业数字化转型的关键。为了获取高质量的铸件, 铸造设计制造过程一般要通过三次以上的迭代过程, 即反复进行设计—分析—修改—优化^[6-7], 如图1所示, 前两次迭代过程主要集中在铸造工艺设计阶段, 后一次迭代主要是生产制造执行阶段。第一个迭代过程是从产品零件到铸件零件阶段, 零件的结构要符合铸造工艺要求, 在这个阶段需要根据产品零件的技术要求, 结合铸造工艺性进行铸造分析和结构修改, 生成适合铸件零件模型的过程。第二个迭代为铸件零件到铸造工艺设计完成的阶段, 主要通过工艺设计和模拟过程^[8]实现铸件成形的合理工艺, 涉及到浇注系统设计、补缩系统设计、模具设计、工装夹具等过程。通过数值模拟方式进行多轮试浇验证, 确定最优化工艺以便实际生产中获取最优铸件的工艺过程^[9]。

作者简介:

向东 (1985-), 男, 博士生, 主要研究方向为铸造行业数智化转型。电话: 13818631308, E-mail: xiangd@hust.edu.cn

通讯作者:

董选普, 男, 教授, 博士生导师。电话: 13037116051, E-mail: dongxp@hust.edu.cn

中图分类号: TG244

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

07-0877-07

收稿日期:

2022-12-08 收到初稿,

2023-02-12 收到修订稿。

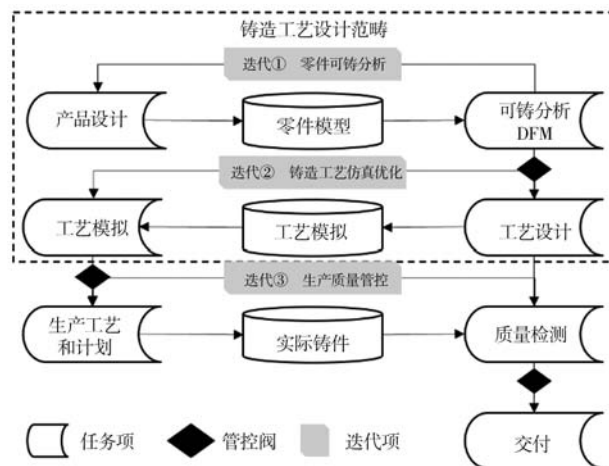


图1 铸造工艺设计及制造过程中的三次迭代

Fig. 1 Three iterations in the casting process design and manufacturing

结合两个迭代过程可以发现,在零件设计到铸件设计的零件结构的铸造工艺性阶段,需要结合工艺要求进行模型修改,传统的做法是通过查询铸造工艺手册中众多表格数据,效率低下且容易出错;同时使用通用的三维CAD软件功能进行零件模型修改,没有沉淀铸造工艺设计知识,操作繁琐也不利于后期多次优化的知识重用。在铸件零件到工艺设计过程中,尤其是浇注系统的设计,最小阻流截面的计算,浇道的设计过程需要反复的进行图表查询和计算验证,设计效率低下而且没有形成可复制的经验。细微的工艺参数修改都有可能致整体设计中的查询、计算过程重新开始,严重影响工艺设计效率。可见传统的设计方法并不能满足当前铸造数字化转型的需要,如何快速的将铸造工艺中的知识经验沉淀,实现更高效、更精确、更便捷的设计、加速迭代进程对铸造工艺设计快速数字化、智能化整体能力的提升尤为关键。

为此,本文提出的敏捷设计数字化研究方法可以提升工艺设计过程中两个迭代效率。结合数据库和CAD功能开发出一套快速的铸造工艺设计系统,从设计源头构建铸造工艺设计标准、设计规则、设计方法、工艺查询数据基础、可视化设计模式等过程,统一设计过程中的方法、流程、工具和信息(Process、Method、Technology、Information, PMTI),从而通过流程结合工具的方法构建铸前工艺前置处理、最小截面计算、浇注系统设计等一体化快速设计能力,提高迭代效率和设计速度。

本研究基于SiemensNX^[10]软件平台基础上进行功能的开发,充分考虑多种工艺数据的挖掘^[11]、参数化

设计^[12]、上下文设计^[13]方式等综合设计应用能力,对铸造工艺快速数字化设计具有实际的指导和实践意义。

1 架构设计和实现方法

1.1 基础数据库构建

数据库的设计能够将表格数据和设计经验数据进行存储,便于结合工艺设计过程数据的查询使用,同时结合设计的参数化应用,将上下文参数进行回写,扩充工艺数据,不断形成工艺知识的增长和闭环,将工艺数据和经验数据形成数字化资产。

数据库表的创建是对铸造工艺过程中关键工艺参数进行数字化存储的关键,是构建数字化转型过程中原数据和主数据的基础。结合铸造工艺设计类型、工艺参数、设计要求、生产模式等进行字段设计,针对铸件结构工艺性分析结合最小壁厚、铸件重量公差、铸件尺寸公差、加工余量、余量等级等关键参数进行表的构建,同时浇注系统的设计中涉及到的浇口比例、截面形状参数等进行数据库基础表创建。

视图的创建可以将多个表进行联合,形成特殊要求的视图结构。合理的进行表参数的约定、避免重复创建、歧义或者孤立的表非常重要。本研究结合铸造工艺设计的前期结构设计要求以及浇注系统设计过程中的多种复杂混合的计算方式创建了多个视图,方便后续上下文设计过程中数据的获取和接入。图2a为铸件材料、工艺方法和加工余量等级等基础表形成铸件机械加工余量等级(GB/T 6464—1999)视图,图2b为内浇道整体参数构建和推荐尺寸形成的视图。



(a) 铸件机械加工余量等级视图构建

(b) 内浇道截面及参数视图构建

图2 铸造工艺基础表和视图构建

Fig. 2 Casting process basic table and view construction

1.2 铸造结构工艺性分析前置处理

铸造工艺参数和相关图表数据繁多,通过系统数字化的方式进行数据的存储需要构建标准和一致的数据流,同时导入较为齐全、准确的数据非常关键。针对常见的术语进行统一约定,建立映射字典,进而在

相关方法调用中直接通过约定参数进行调用,也适合系统后期的扩展和集成。在铸造结构修改的操作中,涉及到最小壁厚、铸造收缩率、尺寸公差、重量公差、加工余量、最小铸孔、拔模斜度等多种工艺参数类型^[14],通过数据查询推荐结果自动和工艺修改操作

进行结合，快速进行结构修改。表1给出了部分约定的数据映射，在整个数字化设计开发过程中直接调用约定的名称，确保准确一致的数据源。

表1 铸造工艺设计基础属性约定举例
Table 1 Examples of basic attribute conventions for casting process design

产品零件信息		铸件基本信息	
PRD_MFSCALE	生产规模	CASTINGMATERIALS	铸件材料
PRD_DENSITY	产品密度 (kg/m ³)	CASTINGMASS	铸件质量/kg
PRD_VOLUME	产品体积/mm ³	POURINTTOTALMASS	浇注液总质量/kg
PRD_MASS	产品质量/kg	COFFICIENTLOSSFACTOR	流量损耗系数
PRD_SCALE	产品收缩比	CASTINGTHICKNESS	铸件壁厚/mm
PRD_CENTER	产品重心/mm	CASTINGPOURINGTIME	浇注时间/s
PRD_SIZE	产品尺寸/mm	POURINGGATESCALE	比例∑直：直横：直内
PRD_MAXSIZE	最大尺寸/mm	GATINGSTOKE	阻流截面/cm ²
PRD_SURFACEAREA	表面积/mm ²	THICKNESSRATIO	壁厚系数
PRD_MTLEVEL	重量公差等级	AVERAGECALPRESSURE	平均计算压力头/cm
PRD_CTLEVEL	尺寸公差等级	POURINGTYPE	浇注方式
PRD_RMALEVEL	加工余量公差等级	PRD_RMALEVEL	加工余量公差等级
PRD_MTVALUE	重量公差值/%	SPRUESTOKEAREA	∑直浇道阻流面积
PRD_CTVALUE	尺寸公差值/mm	CROSSGATESTOKEAREA	∑横浇道阻流面积
PRD_RMAVALUE	加工余量值/mm	INGATESTOKEAREA	∑内浇道阻流面积

1.3 基于上下文浇注系统设计

浇注系统的设计过程中需要考虑各种工艺参数，进行大量的查表和计算工作，阻流面积的计算需要考虑到不同的材料类型、铸件质量、浇注方式等因素。敏捷数字化设计过程充分融合计算相关的关键参数，计算逻辑和方式统一。譬如灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁计算方式相似，构建统一的计算逻辑，铸钢类型的计算根据转包浇注和漏包浇注工艺进行分别计算，其他类型材料可以很方便的在现有框架基础上快速进行定义和扩展^[15]。浇注时间的计算通过奥赞公式^[14] (1) 进行参数扩展。

$$A_{阻} = \frac{W}{\rho u t \sqrt{2gH_p}} \quad (1)$$

式中： $A_{阻}$ ，单位cm²； W 为金属液总重量，kg，通过选择工艺出品率 w 自动进行计算； t 为浇注时间，s； ρ 为金属液密度，kg/cm³； u 为流量损耗系数，一般为0.4~0.7，可锻铸铁是0.32系数，灰铸铁、球墨铸铁和铸钢都是0.31； g 为重力加速度，cm/s²； H_p 为平均静压力头高度，单位cm。

浇注时间的计算根据不同的类型算法不同，针对灰铸铁和铸钢类型计算框架如图3所示。其他材料的计算方式根据手册要求进行逻辑算法调整即可。

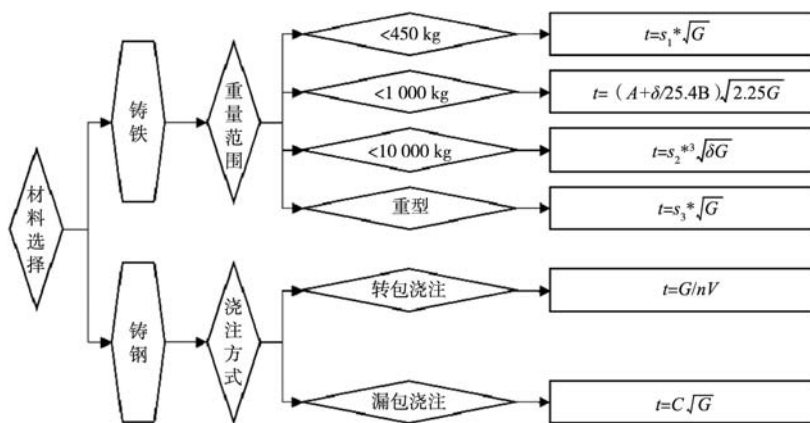


图3 不同材料浇注时间计算框架
Fig. 3 Calculation framework of different material pouring time

浇注系统组件的设计充分利用数据库查询、参数化设计以及结合CAD图形交互设计的优势，快速进行浇注系统组件的设计。整个设计过程中，数据可以动态更新和调整，无需反复查表计算、几何绘制，通过调用和修改界面上的相关设计参数以及动态进行设计交互界面调整即可完成。

2 原型开发和实现

2.1 铸造结构工艺性分析原型开发和实现

将铸造工艺涉及过程的数据和流程进行统一，铸造工艺可铸分析的数字化过程通过铸造工艺分析前置处理功能进行实现。基于数据库的数据准备和CAD软件自身的能力，将工艺参数数据和几何信息数据进行结合，通过调用数据库进行参数查询和几何属性信息的添加。在设计过程中调用相关CAD的API方法进行几何模型的修改操作，整体实现架构如图4所示。



图4 产品零件可铸造工艺分析前置处理属性和操作
Fig. 4 Product part castable analysis preprocessing properties and operations

2.2 阻流面积计算开发和实现

阻流面积的计算基于数字化的工艺设计过程，可以根据不同材料的选择，结合不同计算参数的需要进行灵活的数据调用和界面关键参数的输入来完成公式计算中所需的未知参数。结合工艺前置处理过程中已经完成的相关工艺参数选择，在进行阻流面积计算时，自动进行带入计算。通过简单的界面参数调整就可以实时获取不同工艺方式下阻流面积的大小，进而确定浇注系统组件的组元面积，阻流面积的数字化设计实现框架如图5所示。

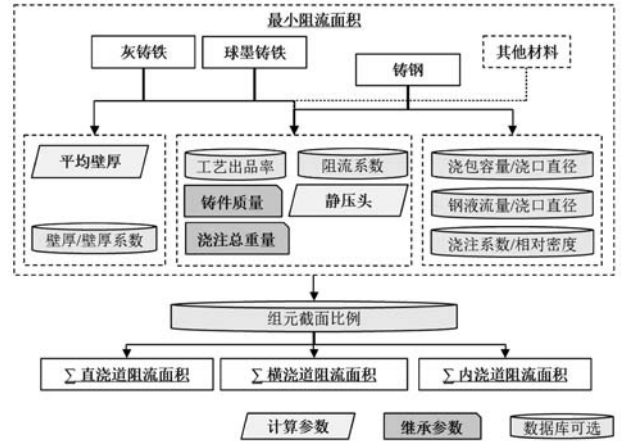


图5 不同材料阻流截面计算属性逻辑分类
Fig. 5 Logical classification of computational properties of choke sections of different materials

2.3 浇注系统上下文设计开发和实现

浇注系统的设计过程主要借助CAD的建模能力结合设计数据要求进行三维模型构建，完善建模过程中实时预览能力、动态交互能力以及相关辅助能力的结合，实现所见即所得（What You See Is What You Get, WYSIWYG）的上下文设计模式。直浇道、横浇道、内浇道常见的浇注系统截面有8种形状，不同形状都有各自的控制参数，合理的应用8种参数的特点进行交互界面上切换调用，同时实现实时更新预览。为了实时的上下文设计能力，需要综合考虑模型的动态预览生成能力、实时的设计规则检查和验证，形成设计上下文的闭环模式。浇注系统上下文数字化设计实现过程如图6所示。

浇注组件的参数可以通过两种方式进行输入，方式一通过交互界面的方式，选择不同的截面形状进行关键参数调整，形成设计参数；方式二直接录入不

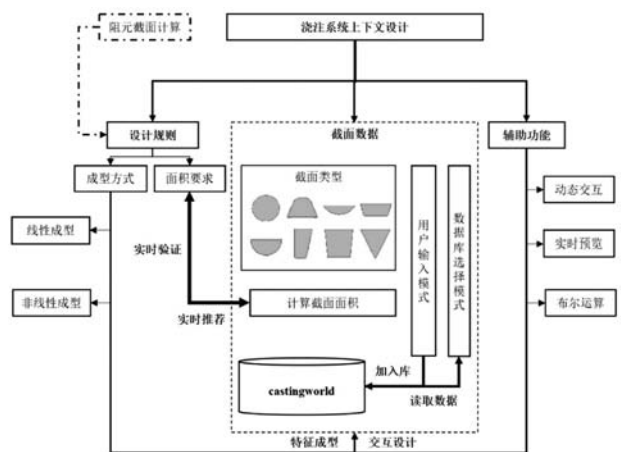


图6 浇注系统上下文设计交互模式
Fig. 6 Gating system in context design interaction mode

同工艺要求的经验数据进行选择调用。方式一中要充分考虑到交互的实时意图以及动态参数修改后面积变化和规则之间的关系，能够预测和提供上下文帮助能力，同时最佳实践的经验参数能存储于知识库用于数据复用，从而形成知识增长模式。方式二数据库的调用在录入多种标准数据后，充分考虑到数据查询和推荐参数的自动化能力，将查询分类和自动推荐，结合数据库的能力进行界面结果展现，提高数据的利用效率。敏捷设计能力能够结合当前浇注系统组件设计的内容进行实时规则反馈，根据组元截面的面积要求，结合当前上下文设计的浇道面积进行动态的下一个浇道面积的智能推荐，常见截面形状的智能求解值如表2所示。

2.4 案例使用

敏捷数字化设计流程主要通过三个步骤完成：步骤一，使用铸造“工艺前置处理”工具可以迅速的对

铸件的几何特征、公差要求进行设置，使用工艺调整自动捕捉工艺参数进行模型修改，整个过程调用数据库数据动态调整，杜绝了通过工艺手册查询的过程；步骤二，使用“阻元截面计算”工具，自动继承上一步骤设置的工艺标准，通过多种计算方式进行阻流截面的计算，实时高效调整计算，并存储计算结果；步骤三，使用“浇注系统组件设计”工具直接调用阻元截面计算的结果进行设计，模型设计中可以选择实时设计、数据库调用、阵列复制等方式。针对多个浇道情况，通过浇道数量进行动态调整，设计结果进行统一存储管理，支持多次编辑修改。表3展示了浇注系统设计过程中的主要步骤，同时将传统设计方法和敏捷数字化设计方法进行了对比。从结果来看，敏捷数字化方法能够极大的减少重复的手动操作，在整个浇注系统设计的18个核心操作步骤中，基本上全部能够进行自动化设计，在统一流程的基础上，结合数据库、参数化设计等设计方法的应用极大的提高了设计效

表2 浇道设计参数智能推荐
Table 2 Intelligent recommendation of gating design parameters

截面形状	截面参数	智能求解
扁梯形、高梯形、帽形		$\sqrt{\frac{2*checkArea}{hfactor+hfactor*afactor}}$
等高梯形		$\sqrt{\frac{2*checkArea}{1.0+afactor}}$
月牙形		$\sqrt{\frac{2*checkArea}{2.0+atan(1.75)-0.875}}$
圆形		$\sqrt{\frac{2*checkArea}{\pi}}$
半圆形		$\sqrt{\frac{checkArea}{\pi}}$
三角形		$\sqrt{2.0*checkArea}$

*参数说明：截面要求面积下宽因子高度因子

3 结束语

综上铸造工艺敏捷数字化设计的研究,产品零件在迭代一过程中能够显著提高设计效率5倍以上,同时能够将设计过程的数据进行沉淀和复用,为后续设计更改、质量溯源和工艺分析提供可靠的数据资产。本文提出的敏捷数字化设计方法可以快速推广并应用

到其他工艺组件的设计中,形成铸造工艺数字化设计整体框架。充分规范铸造工艺数字化设计流程,将经验数据进行充分挖掘和整合治理,形成敏捷化的统一设计流程、方法、工具和信息(Process、Method、Tool、Information, PMTI)是加速铸造工艺设计数字化转型、智能化升级的基础。

参考文献:

- [1] 许庆彦. 铸造技术路线图: 数字化、网络化、智能化铸造 [J]. 铸造, 2017, 66 (12): 1243-1250.
- [2] 陈立亮, 刘瑞祥, 林汉同. 我国铸造行业计算机应用的回顾与展望 [J]. 铸造, 2002, 51 (2): 63-67.
- [3] 宋量. 铸造企业数字化转型与实践 [C]//2020中国铸造活动周. 合肥, 2020.
- [4] TOLBOOM I H. The impact of digital transformation [D]. Delft: Technische Universiteit Delft, 2016.
- [5] 周建新, 殷亚军, 计效园, 等. 熔模铸造数字化智能化大数据工业软件平台的构建及应用 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 160-174.
- [6] ZHANG H, DENG S, QU Y. High working efficiency of rapid custom design [J]. World Pumps, 2016 (3): 34-36.
- [7] 贺云峰, 廖敦明, 陈涛, 等. 基于UG的铸件成形CAD/CAE系统 [C]//长沙: 2015中国铸造活动周, 2015.
- [8] 柳百成. 铸件充型凝固过程数值模拟国内外研究进展 [J]. 铸造, 1999, 48 (8): 42-45.
- [9] 聂伟钢. 数值模拟在铸造过程中的应用 [J]. 铸造工程, 2010, 34 (5): 16-19.
- [10] ZHANG L, BERISHA B, LOBOV A. A parametric model of umbilical cable with siemens NX considering its reliability [J]. IFAC-PapersOnLine, 2021, 54 (1): 187-192.
- [11] 郝先臣, 张德干, 高光来, 等. 数据挖掘工具和应用中的问题 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2001, 22 (2): 183-187.
- [12] 孟祥旭, 徐延宁. 参数化设计研究 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14 (11): 1086-1090.
- [13] BROWN C V, MAGILL S L. Reconceptualizing the context-design issue for the information systems function [J]. Organization Science, 1998, 9 (2): 176-194.
- [14] 王君卿. 铸造手册: 第5卷铸造工艺 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [15] PNRAO. 制造技术: 第1卷铸造、成形和焊接 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

Case Study on Agile Digital Design of Casting Gating System

XIANG Dong, DONG Xuan-pu, GUO Shu-ren, ZHOU Chu-hao, CAO Hua-tang

(State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mold Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract:

Aiming at the iterative efficiency in the casting process design stage, an agile digital gating system design method was proposed. Using database development technology, the data and experience in the process design process were converted, constructed and stored in digital form to form digital assets, which were organically integrated into process structure analysis and gating system design practice. The rapid design mode integrating contextual design, parametric design, intelligent recommendation and real-time verification were investigated, and an agile digital design framework with unified processes, methods, tools, and information was formed to improve gating system design efficiency, which accelerated the digital transformation capabilities of foundry enterprises in R&D. The design ideas and systematic practice methods of this paper can be effectively guided and extended to other casting process designs, providing guidance for the realization of a complete, efficient, and easy-to-use digital and intelligent design system for casting processes.

Key words:

process iteration; agile design; intelligent recommendation; context-design; gating system