

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

周建新, 殷亚军, 计效园, 沈 旭

(华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉430074)

摘要: 数字化、智能化、大数据等技术的广泛应用正从各方面推动着铸造业的发展和变革, 它不仅可以提高生产效率和降低生产成本, 同时又能促使新技术和新工艺的不断出现, 使铸造生产正在从主要依靠经验走向科学理论指导生产的阶段。目前, 数字化、智能化、大数据等技术所形成的工业软件指导铸造生产主要是在铸造工艺设计系统 (CAD/CAE)、产品信息及生产管理系统 (PDM/ERP)、车间执行系统 (MES) 以及铸造设备采集与监控系统 (SCADA) 等四个方面对铸造企业信息化的支持。然而, 由于缺乏全局规划和统一的集成化系统架构, 各工业软件系统间难以集成通信, 存在诸多数据重复、数据孤岛、不一致, 经长时间积累造成系统维护困难、使用效率低下等问题和挑战, 严重制约着企业的发展。工业软件集成化已成为当前铸造信息化发展的迫切需求和必然趋势。为此, 笔者提出构建熔模铸造数字化智能化大数据工业软件平台的思路, 该平台从业务价值层、技术设计层、制造执行层、设备数据传感采集层四个层面进行CAD、CAE、ERP、PDM、MES、SCADA等工业软件系统的无缝集成方法, 定义了ERP对PDM进行设计驱动、PDM对MES进行工艺指导、SCADA结合MES对PDM进行生产过程工艺参数监控与预警的方法, 以及各层之间信息通讯与作用机制。与此同时, 该架构基于高度柔性化技术, 具有系统柔性集成, 系统模块按需搭建、按需增配特性。最后给出了该技术在熔模铸造企业的应用实例, 效果表明: 该工业软件平台, 一方面满足了企业信息化第一阶段的需求, 构建了ERP、MES、PDM集成化系统, 消除了信息孤岛、重复和不一致, 实现了全局信息共享, 大幅提高了企业协同运作效率; 另一方面促进了企业信息化第二阶段的发展, 集成构建SCADA系统, 对铸造设备运行中各关键参数进行数据采集、监控及预警。数字化智能化大数据工业软件平台将有助于促进精密铸造企业生成与管理的科学转变, 极大提升软实力并促进智能转型。

关键词: 熔模铸造; 数字化; 智能化; 大数据; 工业软件

作者简介:

周建新 (1975-), 男, 教授, 博导, 主要研究材料成形数字化技术、铸造数值模拟技术、铸造数字化管理技术。E-mail: zhoujianxin@hust.edu.cn

中图分类号: TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2021)

02-0160-015

基金项目:

国家重点研发计划 (2020YFB1710100); 国家自然科学基金项目 (No. 51605174、No. 51775205、No. 51905188); 国家重点实验室自课题 (2019-2022); 企业横向项目。

收稿日期:

2020-11-27。

21世纪以来, 数字化、智能化技术在制造业广泛应用, 制造系统集成式创新不断发展, 形成了新一轮工业革命的主要驱动力^[1]。在当前的数字化时代, “云计算、大数据、物联网、移动互联”正在深刻地影响着每个人的生活方式和每个企业的运营方式。《中国制造2025》明确提出, 要以新一代信息技术与制造业深度融合为主线, 以推进智能制造为主攻方向^[2-5]。

铸造是制造业的重要组成部分, 也是先进制造技术的重要内容, 随着汽车、机械、石油、化工、航空航天等工业的发展, 新世纪的铸造技术正朝着更轻、更薄、更精、更强、更韧及质量高、成本低、流程短的方向发展。因此, 铸造这个传统行业逐步从依赖劳动力、资源等生产要素转向知识密集型行业, 在新形势下的这一变革必然会导致铸造数字化、智能化的迫切需求。特别是在工业化和信息化深度融合的大背景下, 计算机、人工智能、大数据等技术的飞速发展, 将加速推进信息化技术与传统铸造行业的深度融合, 数字化、智能化、大数据等铸造技术将加速铸造行业转型升级^[6-7]。铸造工艺设计系统 (CAD/CAE)、产品信息及生产管理系统

(PDM/ERP)、车间执行系统(MES)以及铸造设备采集与监控系统(SCADA)等工业软件则是转型升级的“软实力”基础。

其中,铸造工艺设计系统包含CAD、CAE等。铸造CAD软件是一套集三维实体造型文件接口、模数分块计算(或孤立熔池收缩体积自动确定)、补缩区域确定、浇注系统设计、冒口、冷铁设计、工艺图、工艺卡绘制为一体的集成软件系统。借助这个软件系统铸造技术人员可以实现对铸件快速补缩系统设计、浇注系统设计、工艺图、工艺卡片绘制,从而实现对铸造工艺方案快速制定。

铸造CAE系统是利用计算机模拟仿真实际的铸造工艺,变传统“睁眼造型,闭眼浇注”为“睁眼造型,睁眼浇注”,使工艺人员不必经过工艺试验就能快速了解工艺结果,大大减少了传统“输错法”次数,也极大提高了工艺设计优化的效率,缩短开发周期的同时节省了时间、人力和物力^[8]。

铸造PDM系统是以产品为核心,实现对产品相关的数据、过程、资源一体化集成管理的技术。铸造PDM实现了铸造工艺(CAD、CAE等)全流程数据的规范管理和全三维工艺的协同设计。并作为部分数字化系统集成数据中枢,通过PDM系统向制造系统传递工艺路线、生产定额、BOM清单及质量参数等。

铸造ERP系统内涵主要是“打破铸造企业的四壁,把信息集成的范围扩大到企业的上下游,管理整个供需链,实现供需链制造。”它利用先进的管理理论和管理思想,基于最前沿的计算机信息处理技术,最大化的优化铸造企业的物资流、信息流、资金流,为铸造企业制造产品或提供服务创造最佳的解决方案,最终达到铸造企业的高效管理目标。

铸造MES系统是铸造企业车间层面生产管理技术与实时信息系统,能够帮助企业降低成本、按期交货、提高产品的质量和提高服务质量。填补ERP系统在车间层的管理空白。

铸造SCADA系统是铸造设备的数据采集与监视控制系统,其计算机为基础的铸造生产过程控制与调度自动化系统。它可以对铸造车间现场的运行设备进行监视和控制。

以上四大部分工业软件,从工艺、生产、管理、设备等多个角度形成整体铸造企业的“软实力”系统,是衡量铸造企业水平的一个重要标准^[9]。熔模铸造由于可保持铸件高尺寸精度和优质表面,广泛应用于各类要求关键任务部件的终端市场,如航空航天、国防、汽车、工程机械、液压设备等。正因为高端制造的需求以及工艺流程长等特点,熔模铸造升级转型对于“软实力”的工业软件需求更为迫切^[10-11]。本文主要内容是结合作者所在团队30多年的发展,尤其是近

年来在铸造企业数字化智能化等工业软件方面研发和应用工作经验,以及笔者出版的《铸造充型凝固过程数值模拟系统及应用》《铸造企业数字化管理系统及应用》两本书籍,对熔模铸造数字化智能化大数据工业软件从国内外现状进行分析,指明其存在的关键技术,最后列举部分数字化智能化工业软件在熔模铸造企业应用较好的实例。

1 国内外概况

1.1 铸造工艺设计软件系统国内外进展

铸造工艺CAD与CAE是工艺设计系统的最重要的组成部分。从20世纪60年代开始,国内外研究机构对铸造CAE技术的不断研究和开发。近60年发展,铸造数值模拟物理量已经从最初的凝固过程温度场扩充至三维的流动场、应力场、浓度场、电磁场等。目前,铸造充型凝固温度场、流动场数值模拟已较为成熟,可以很好指导铸造工艺优化。而铸造凝固应力场由于尚没有较好数学模型表征含液-固转变大范围温度变化下的力学行为,因此目前大都采用固体材料力学理论来近似铸造凝固的热力学模拟,结果也可以部分的指导铸造工艺优化。浓度场以及电磁场等其他物理量的模拟则是针对一些特殊铸造方式的需求,目前的结果也能定性的指导工艺优化。因此也涌现了多个商业化的铸造CAE模拟仿真软件以及在实际中的成功应用案例。这些CAE模拟仿真软件可以进行铸件充型凝固过程的计算,预测铸件可能出现的缺陷,并且已经广泛应用于包含熔模铸造的各种铸造方式以及各种铸造合金^[12-13]。目前,商业化的铸造CAE软件主要采用的方法是有限差分法、有限元法、有限体积法等。采用有限差分法的铸造CAE软件如国内清华大学铸造之星、华中科技大学的华铸CAE、德国的MAGMASOFT;采用有限元法的铸造CAE软件如法国的ProCAST等。

总体来说,铸造数值模拟近60年发展在宏观方面已经较为成熟。后续基础研究重点正由宏观模拟走向微观模拟,包括毫米级、微米级及纳米级,涉及结晶生核长大、树枝晶与柱状晶转变到金属基体控制及宏、介、微观之间模型的耦合计算等各个方面。另外,质量控制模拟正在由原来的控形向微观组织模拟、性能及使用寿命预测的控性方向发展^[14]。应用研究重点则正走向铸造数值模拟智能化的道路,主要是基于大数据、云计算等高效计算技术,与CAD/ERP等组建的铸造数字化智能化平台等^[15]。

1983年,美国密歇根大学的Pehlke教授和佐治亚理工学院的Derry教授提出了铸造工艺CAD的概念,将它归结为计算机模拟、几何造型和数据库的有机结合。

自此,各国相继开始了对铸造工艺CAD的研究。如美国铸造协会的AFS-software软件,可以进行浇冒口系统的工艺设计;英国的Foseco公司的FEEDERCALC软件,可以计算铸钢件浇冒口系统的工艺尺寸等。国内主要侧重于几何造型和数据库的结合,不包含计算机模拟部分,即铸造CAD与铸造CAE是独立的。国内对它的研究始于“七五”期间。沈阳铸造研究所开发了转轮单铸叶片浇冒口系统工艺辅助设计程序。此外,清华大学、哈尔滨工业大学、大连理工大学、华中科技大学等也对铸造工艺CAD进行了研究与开发,这些研究主要基于商业CAD软件进行二次开发。成果都侧重于铸造工艺如冒口、浇道、分型面等的设计,而对于三维CAD软件几何建模等研究则很少涉及^[16-18]。

铸造CAE和铸造工艺CAD的发展方向体现在集成化、智能化等方面。清华大学、华中科技大学、北京科技大学、中北大学均在此方面进行了大量的工作。在集成化方面开展了CAD、CAE甚至与ERP等工业软件数据层面上互通研究;在智能化方面,基于中性文件格式的智能化的工艺CAD设计、智能化的铸造CAE仿真模拟都有很多有益研究,但是离实际应用还有待进一步深入持续研究^[19-20]。

1.2 铸造 ERP、PDM 等管理系统国内外进展

企业资源规划系统ERP (Enterprise Resource Planning) 是20世纪90年代美国Gartner Group公司提出的,对ERP的定义:打破企业的四壁,把信息集成的范围扩大到企业的上下游,管理整个供需链,实现企业信息的集成、共享、规范和控制;包含MRP、FM、CRM、HRM、SCM等,实现企业的物流、资金流、信息流的集成。ERP的发展经历了50年代数据记录形式的管理信息系统MIS (Management Information System)、库存管理等,60年代线性计划形式的物料需求计划系统MRP,70年代闭环MRP,80年代闭环计划形式的制造资源计划MRP II,到90年代的企业资源计划ERP,逐步形成了趋于完善的现代化管理理念。ERP要从企业内部信息集成开始,核心价值在于管理整个供需链,实现企业内外信息共享^[21]。

产品生命周期管理PLM (Product Lifecycle Management) 根据CIMDATA的定义,PLM是一种解决方案,能够应用于在单点/多点的企业内部/企业之间、支持产品协同研发,支持产品全生命周期的信息创建、管理、分发和应用,能够集成与产品相关的人力资源、流程、应用系统和信息,PLM完全包含了PDM。根据John Stark的定义,PLM管理每一个产品的生命周期,从摇篮到坟墓,从产品最初的概念到报废处理。PLM的理念是以产品为中心,对产品的全

生命周期(从概念创建、设计、制造、交付、到客户使用、到最终报废,跨越供应链)的数据信息进行管理、跟踪、追溯和利用。

铸造行业处于制造业的底部,为装备制造业提供毛坯铸件,其信息化发展水平相对低于其他制造业,例如钢铁行业、工程机械行业和汽车行业。

对制造管理系统的研究与应用,国外起步较早,始于20世纪60年代,目前在欧、美、日、韩等发达国家,管理系统已经广泛应用于制造业且成为企业的标准配置。在国内,制造业信息化始于20世纪80年代,从沈阳鼓风机厂和沈阳第一机床厂率先引进MRPII系统开始,经过多年的探索和发展,取得了非常大的成绩,它促生了系列国产品牌的制造业信息管理系统,如用友、浪潮、艾普工华、开目等厂商的机械加工业ERP企业资源规划系统、PDM/PLM产品数据管理\产品生命周期管理系统等。

对铸造管理系统的研究与应用,发达国家起步早,现在应用比较成熟。我国起步晚,始于20世纪90年代,目前处于蓬勃发展阶段。国内一些科研单位及学者对此进行了积极的探索和研究,在企业中取得了一定的应用效果。相关的研究团队和人员不断地呼吁“加强企业管理”。这些研究团队和学者都为推动铸造行业信息化进程做出了积极的工作。从初期为企业开发某些模块的计算机系统(如质量管理,销售生产管理),到后来的多个模块构成的信息系统,再到更加全面的通用性ERP系统,现在发展到基于ERP系统的某些模块的深入研究,模式从C/S到基于Intranet/Internet的B/S,以及信息系统和ERP系统在企业实施的实践研究,研究越来越全面,越来越深入。铸造企业ERP系统的研究已经从通用性深入发展到专业性、柔性排产、集成性,研究向精细化、智能化、柔性化、考核精细化、管理在线化、业务集成化、硬件集成化、管理云端化、管理移动化等方面发展^[22-23]。

近年来,华中科技大学华铸软件中心在铸造数字化信息化管理方面的研究具有鲜明的特色,围绕ERP、PLM,提出了铸件单件管理模型、工期盈余期模型、任务驱动模型等,并构建了单件化管理方法体系、智能化方法体系、柔性化方法体系等,研发的铸造ERP、PDM管理系统成功应用于航空航天、军工兵器、铁路汽车、核电石油、工程机械、建筑五金等领域铸造企业,为推动铸造行业两化融合转型升级做出了积极的贡献。如针对航空航天、汽车铁路、核电石油等领域铸造多工序、多品种、自由组批/混批/拆批模式下单件生产质量管控和追溯的共性难题,创建了基于产品全生命周期(PLM)理论和全面质量管理(TQM)理论的铸件单件管理模型和方法体系(图1),实现了铸件

串并联多工位单件化溯源,解决了大容量的铸件单件生产和质量全过程的自动化跟踪与追溯难题,满足了复杂铸件、大件、关键件的单件化生产管控与客户质量要求。

1.3 铸造 SCADA 系统国内外进展

在设备数据监测领域应用最广的系统软件就是SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition),即数据采集与监控系统。它综合利用了计算机技术、控制技术、通信与网络技术等技术,完成对测控点比较分散设备的数据采集,实现本地或远程的控制,对设备的运行过程进行全面监控、安全控制、故障诊断,并为上级的MES车间制造执行系统提供数据接口。

SCADA系统作为企业生产过程和事务管理自动化最有效的计算机软硬件系统之一。主要包含三个部分,下位机、上位机以及将二者连接的数据通信网络。下位机是基于分布式的数据采集系统,上位机是设备运行过程监控与管理系统。SCADA系统的三个组成部分功能虽然不一致,但三者的结合使SCADA系统具有强大的功能,从而实现对整个设备的有效监控。

“管理集中、控制分散”的集散控制思想是SCADA系统的主要特点,因此,即使上位机和下位机的通信中断,也不会影响到上位机和下位机的运行。现场的设备监控装置仍然可以正常使用,确保了系统的可靠运行。

SCADA系统大致可包括设备数据采集、数据可

视化、关键参数异常监测及参数偏离预警与处置等内容,其研究与应用在机械制造业应用比较多,如车床、刀具信号采集与监控与寿命预期,设备监测与预测性保养等,在铸造企业研究与应用刚起步。

现在越来越多的铸造企业意识到设备数据监测与数据可视化是企业实现智能制造的重要环节。设备数据采集是铸造企业走向智能制造的重要关卡和必经之路,设备运行中关键参数的变化与产品质量息息相关,如浇注温度、浇注时间等。由于大部分铸造企业设备种类繁多、部分设备老旧且所处环境恶劣、运行过程产生大量数据,使得现有的人工监测与记录方式存在监测困难、数据记录效率低、数据可视化效果差、数据利用率低等问题。当前铸造车间设备运行关键数据主要依靠人工记录或拷贝等,实时性差、效率慢、数据存在失真可能;且车间设备众多、来源广、自动化程度不一,针对特定设备的数据采集方法实施周期长,难以快速适用于不同设备,普适性差。对此,华中科技大学华铸软件中心对钛合金熔模铸造企业根据铸造设备的数据存储方式,分别设计了基于PLC与组态相结合的设备数据柔性采集和基于数据库的设备数据柔性采集两种方法,研发了相应技术并应用于两家典型铸造企业,快速实现了车间不同来源、不同自动化程度设备运行数据的柔性采集与存储;还开发了一套设备监测与数据可视化系统,并应用于该铸造企业,实现了系统三个主要功能模块:设备数据监测、历史数据分析、报警管理模块,取得了良好的应用效果^[24]。

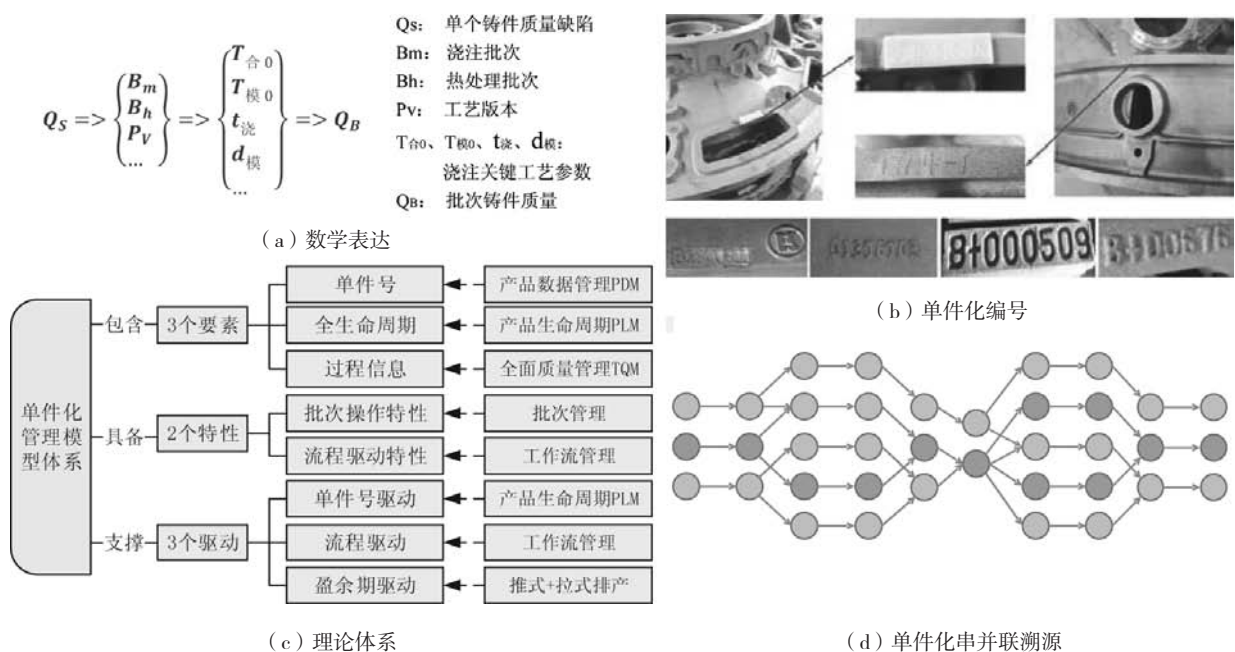


图1 铸件单件化管理模型

Fig. 1 Singleton management model of casting

2 熔模铸造数字化智能化大数据工业软件平台的构建及关键技术

近些年数字化、智能化、大数据等技术飞速发展，铸造企业普遍已经接受并应用数字化及其相关技术，有不少企业甚至开始向智能化方向发展^[25]。但是大多数都是针对单项点需求的技术应用，且由于熔模铸造工序控制难（流程长、热工序多耦合作用复杂）以及国内大多数企业都是点到面的数字化技术的布局，就导致了熔模铸造企业数字化应用系统多，存在诸多数据重复、数据孤岛、不一致等问题，长时间积累造成系统维护困难、使用效率低下。

本文针对熔模铸造特点，围绕铸造工艺设计系

统（CAD/CAE）、产品信息与生产管理系统（PDM/ERP）、车间执行系统（MES）以及铸造设备采集与监控系统（SCADA）四个方面来构建铸造数字化智能化大数据工业软件平台（图2）。在铸造企业突破业务价值层、技术设计层、制造执行层和设备数据传感采集层之间通信壁垒，形成对应的数据通讯机制（图3），消除铸造企业各部门之间及系统间信息孤岛，从而实现铸造特别是精铸企业由数字化、自动化、信息化走向智能化^[26]。

针对上述平台的建立需要开展高精高效的工艺设计、全流程单件化柔性化智能化的信息管理、工业软件集成化等方面的研究，以下重点介绍具体需要突破的关键技术。

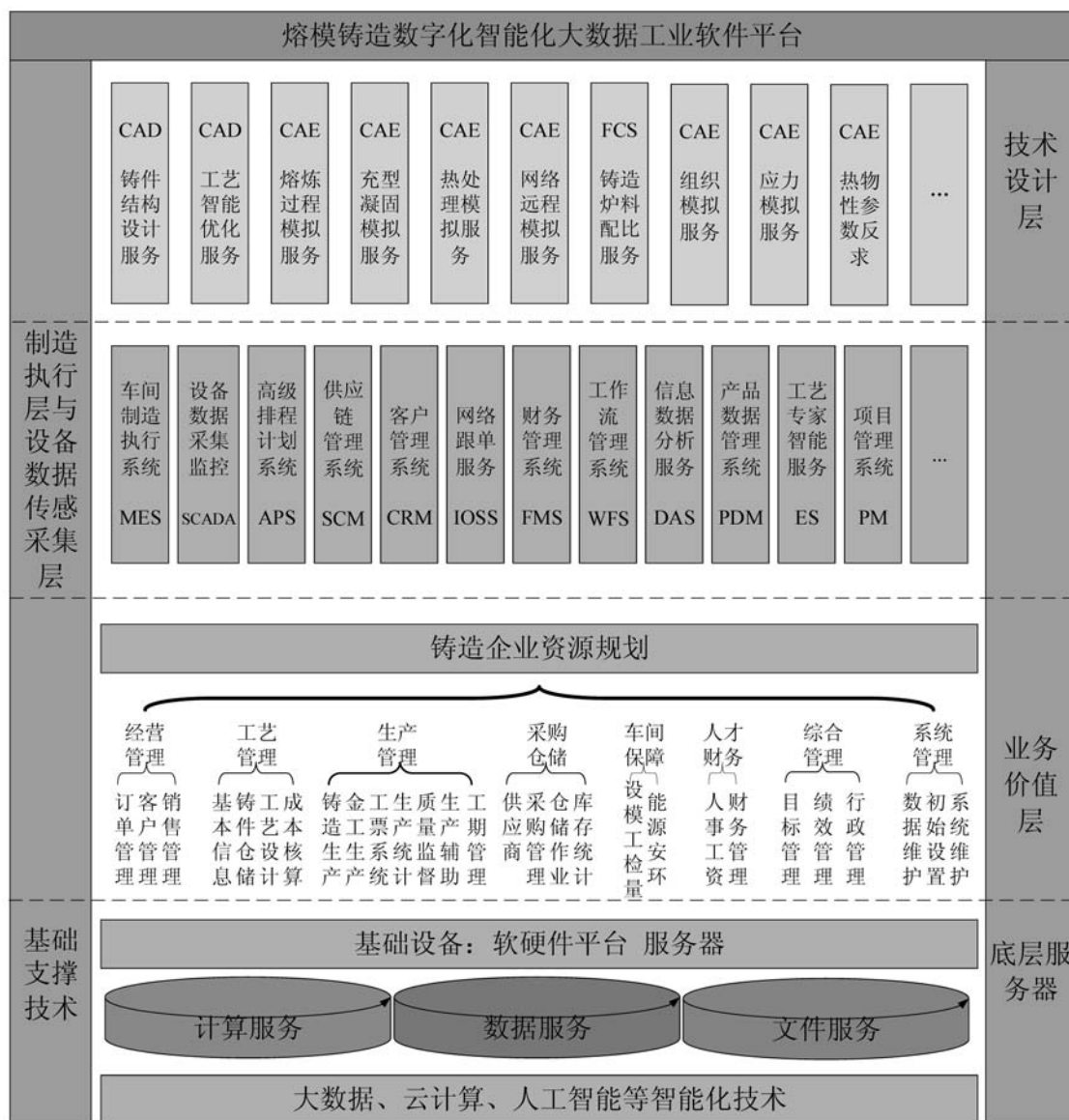


图2 熔模铸造数字化智能化大数据工业软件平台的架构

Fig. 2 Architecture of digital, intelligent, big data industrial software platform for investment casting

2.1 熔炼、充型凝固与热处理等全流程多尺度多物理场多相耦合建模

相对于锻造、焊接、增材等热工工艺，铸造数值模拟应用最为成功，但是也仅限于在铸造充型与凝固工序的数值模拟。因此，研究包含铸造熔炼、浇注、热处理等全流程的气-液-固三相仿真和互反馈式优化技术，温度、速度、成分等多物理场和宏-介-微观多尺度的自动耦合仿真，实现铸造熔炼、浇注、热处理等相关工艺智能化仿真。

2.2 复杂铸件成形全流程过程缺陷定量预测模型建立

铸造缺陷种类繁多，对应涉及到形成机理各不相同，而预测的缺陷结果是优化铸造工艺的重要依据，因此，缺陷的定量预测将是铸造数字化智能化一致要做的基础研究。在前述多尺度多物理场多相耦合数学模型建立基础之上，采用数字化智能化铸造技术构建复杂铸件的成形过程缺陷定量预测模型，从而快速实现复杂铸件缺陷信息反馈和工艺再优化^[27-29]。

2.3 复杂铸件成形过程中各种工艺数据库的建立及应用

数值模拟理论与基础学科的研究发展到现在已经很难有颠覆性的突破，因此工艺数据库的丰富与准确则是铸造CAE数值模拟准确的核心。因此，综合利用试验、物性参数反求、商业化数据库软件等获得复杂铸件热物性参数，为模拟仿真的准确性提供数据保障。基于数据库技术，建立其研制相关合金工艺数据库及专家系统，借助数据库技术驱动控制复杂铸件质量。

2.4 先进的复杂铸件全流程模拟仿真和工艺优化平台技术

采集复杂铸件各种热物性参数，进行铸造参数数

字化智能化集成，应用于复杂铸件铸造成形全流程仿真模拟技术，将模拟结果与实际比对，在此基础上完善模拟仿真技术。以数字化铸造工艺设计技术以及智能优化算法为基础，研究浇注系统和补缩系统智能化工艺优化系统，实现智能化的冒口设计、分型面设计和浇往系统设计。

2.5 铸件单件化管理技术

铸件单件化管理技术是采用基于产品全生命周期理论和全面质量管理理论的铸件单件全生命周期管理模型CLM（Casting Lifecycle Management），能够以单件标识/单件号（单个铸件的唯一标识）为索引，通过生产计划与验收中批次操作单件化自动管控功能，实现自动记录、管理、跟踪与追溯单个铸件的生产和质量全过程信息，如成分金相性能质量信息、各个过程的操作人员、设备、材料等信息^[30-31]。单件化管理，将管理理念由传统的以流程化（物流、资金流、信息流）为观察中心深化为以流程化中的单个产品为观察中心，将传统的批次管理带到单件化管理。单件化管理是一种精细化管理，是一种精益生产管理，是一种面向全流程的工作流管理。利用铸件单件化管理技术，可实现铸件串并联多工位单件化溯源，解决大容量的铸件单件生产和质量全过程的自动化跟踪与追溯难题，满足复杂铸件、大件、关键件的单件化生产管控与客户质量要求

2.6 设备数据采集技术

构建基于组态-PLC组件与基于数据库集成的设备数据采集方法、以及自适应高低频数据柔性采集与存储方法，实现分布式、多数据结构、多PLC型号、多厂商等各类复杂形式铸造设备集成、数据实时采集与监控，解决多源数据获取范围窄、准确率低、时效性差的难题。

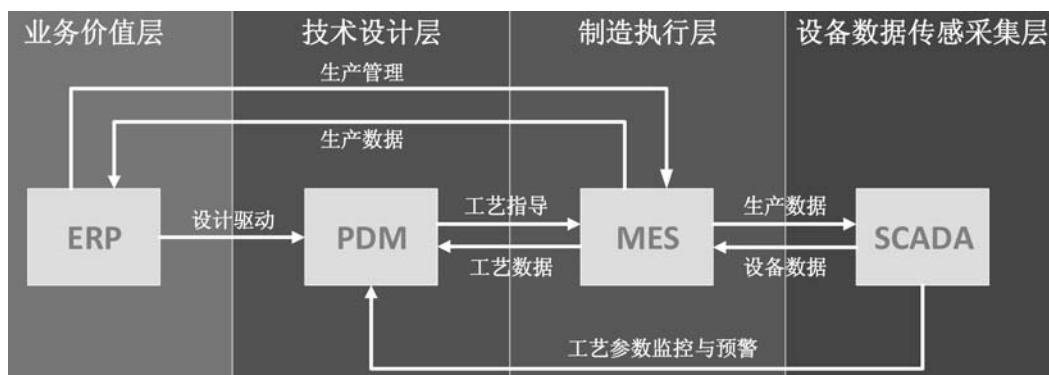


图3 工业软件平台各层之间数据的通讯机制

Fig. 3 Data communication mechanism of industrial software platform

2.7 信息系统柔性化技术

信息系统柔性化技术即系统柔性化技术，是一组提升信息系统适应和应对企业管理模式多样性和多变性能力的方法和技术体系，是一种支持铸造管理系统业务“即时重构”的参数化配置式的多维度即时柔性方法体系。该柔性方法体系基于信息系统三层四维结构模型和参数化与组件技术，本着“管理业务即时满足、管理系统即时重构”的理念，包括系统表单柔性、功能柔性、模块柔性和流程柔性四方面。该技术突破了传统的定制化方式和常规柔性化方式，可显著提升系统可重用性和应变能力、缩短实施周期长、降低铸造业信息化推进难度。

2.8 工业软件系统智能化技术

系统智能化技术即工业软件系统智能化技术，基于人机交互的“交互动作分解”、人工智能的“系统代替人”、专家系统的“专家推理”三个方面思想，是一组实现工业软件系统自动化任务分配、方案分析、校核等方法体系和技术，从而能够智能指导、推动用户工作，能够代替用户的部分工作甚至是能够替代部分用户进行工作。大数据、云计算等工业4.0技术的发展，给工业软件系统智能化技术的发展带了新的技术途径^[32]。虽然在铸造领域目前已经有了一些点的突破，但极少仍然是一片空白，也是后续特别是在熔模铸造行业持续研究的热点。

2.9 “1+N”数字化智能化集成技术

创建类脑协同调度方法，实现其他软件与主控系统逻辑层协同；创建共享数据池方法，实现同构/同源软件间数据层通信；创建资源Agent智能体方法，实现

异构/异源软件间及与硬件的应用层连接。通过逻辑层协同-数据层通信-应用层连接的软硬件集成方法，实现“1”个主控软件EMPS系统和“N”个铸造数值模拟、工艺优化设计、生产质量管理等软件以及车间/生产/质检/辅助显示等硬件的集成，构建“1+N”模式数字化铸造创新平台（图4），实现铸造数字化工艺设计优化、生产质量监测管控“N”个软硬件到“1”个主控软件系统的一体化集成应用^[33]。

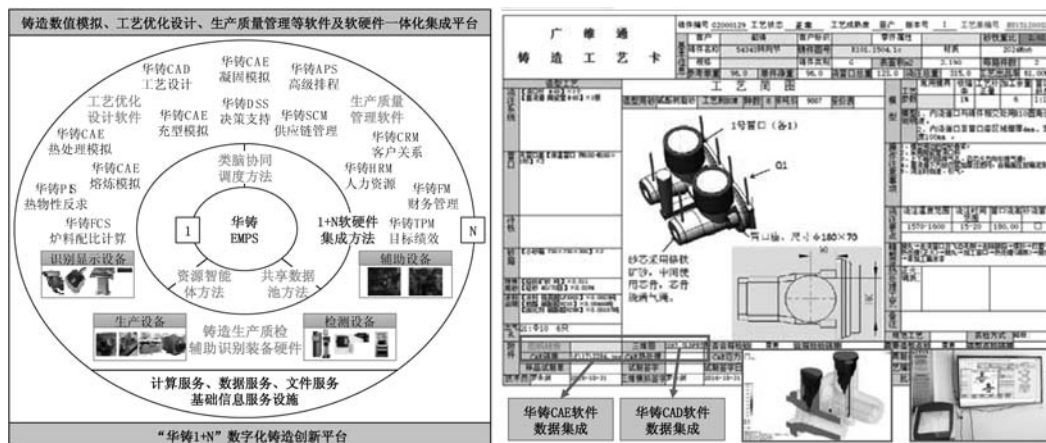
3 应用案例

3.1 熔模铸造数值模拟 CAE 应用实例

下面将以某企业正在生产的铸钢件阀体铸件为例，描述如何使用本研究完成铸造工艺的设计、模拟分析评估以及实现工艺优化。该铸件的三维图形如图5所示，材料的化学成分如表1所示

（1）初始工艺设计。考虑到阀体的结构特点以及熔模精铸的设计原则，对该铸件的工艺进行初始设计，如图6所示。然而，在使用该工艺进行试制过程中，发现铸件内部的关键受力部位出现明显的缩松缺陷。因此，采用华铸CAE对该工艺进行模拟分析，找到出现缺陷的原因，并进行相应的改进措施。模拟内容包括充型过程和凝固过程的模拟分析。

在充型过程中，金属流体的温度分布和压力分布是两个重要的分析对象。其中，通过对不同时刻的流体温度进行观察和分析（图7a-d），充型时间为0.93~2.20 s时，温度分布较为均匀，有利于液体保持良好的流动性，降低出现冷隔、浇不足等缺陷的可能性；充型时间到了3.98 s，铸件边角部分有一定的温度下降，但整个温度分布还是较为均匀，表明工艺的金属填充慢后温度分布合理。再考察不同时刻的流体压力分布（图



(a) 平台集成架构

(b) 平台集成应用

图4 “1+N”模式的软硬件集成方法与数字化铸造创新平台

Fig. 4 Soft hardware integration method of “1+N” and digital casting innovation platform

8a-d)，充型时间为0.93~1.39 s时，由于金属从上往下掉落，流体形成瀑布和雨淋状，并存在大面积的负压区域，这样的流动状态，容易形成卷气和夹杂缺陷；充型时间2.20 s时，负压区域开始减少，到了3.98 s时，压力分布趋于合理。

基于以上分析，根据熔模精铸的特点，浇注系统基本设置合理，但需要控制稳定的浇注速度和金属熔炼的纯净度，以降低出现卷气和夹杂缺陷的可能性。

通过对凝固过程液相分布分析发现，在铸件的内部出现了孤立液相区（图9），这说明该区域不能得到

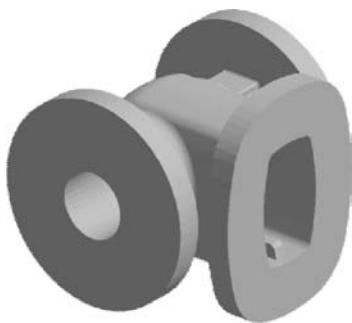


图5 铸件三维图（STL模型）

Fig. 5 Graphic model of casting

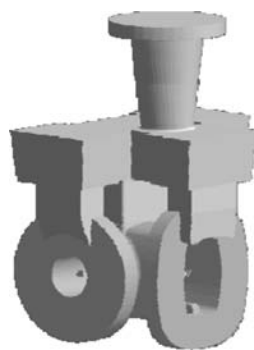


图6 初始工艺设计

Fig. 6 Initial process design of casting

表1 合金主要成分
Table 1 Main chemical composition of alloy

							$w_B/\%$
C	Si	Mn	Cr	S+P	Mo	Ni	V
0.20	0.40	0.90	0.40	0.07	0.10	0.40	0.02

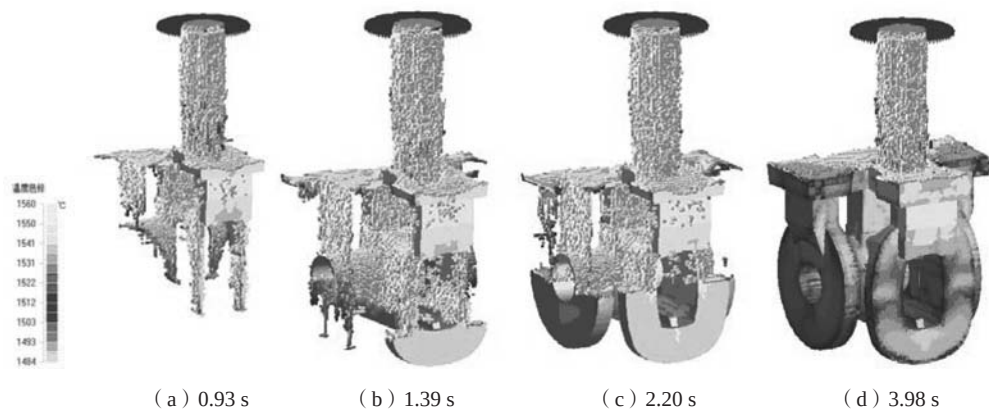


图7 充型过程流体温度分布（不同充型时刻）

Fig. 7 Melt temperature distribution during mold filling

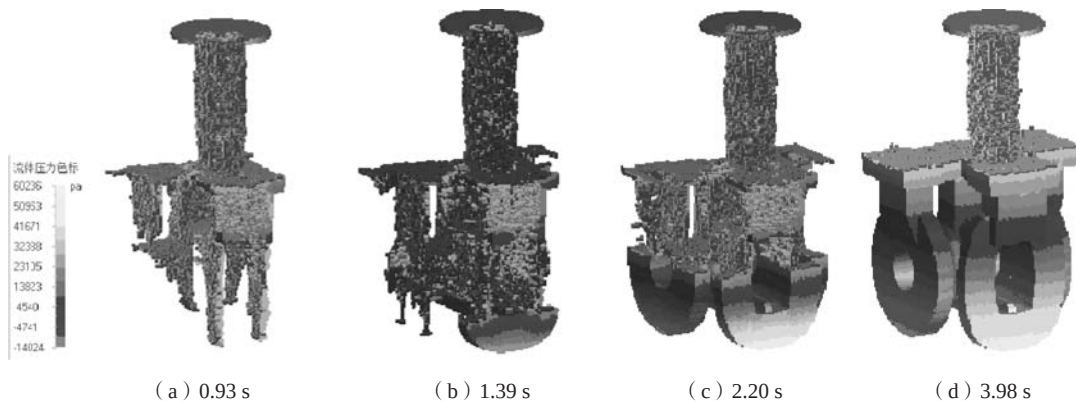


图8 充型过程流体压力分布（不同充型时刻）

Fig. 8 Press distribution during mold filling

浇冒部分金属液的补充，在进一步的凝固过程中，容易形成缩松缺陷（图10）。

通过华铸CAE提供的量化预测结果发现，在铸件的底部出现了3个较大面积的缩松缺陷，如图10所示。缺陷的出现会严重影响铸件的质量，使其达不到使用的要求。通过华铸CAE软件提供的数值鼠标功能，能否方便快速地追踪到某一个缺陷的位置和体积，统计结果如表2所示。在实际生产中，通过试制铸件检测发现在相应位置出现不同严重程度的缩松缺陷，与模拟结果高度吻合。由于铸件存在较严重的缩松缺陷，因此需要对其补缩工艺进行必要的改进。

（2）优化设计与工艺修改。华铸软件提供辅助补缩系统设计的分析功能，能够快速提供优化的补缩方案。由于缩松缺陷出现在3个开口处的底部，将上部分的浇冒系统向下延长，增大补缩通道的厚度，以便在凝固过程中实现有效的补缩，如图11所示。将改进后的工艺再一次放入到华铸CAE中模拟进行验证。

模拟结果（图13）分析发现，在凝固过程中，未凝固的液相能够与补缩系统保持连接，直到最后凝固的液相都移至浇冒系统内部，在铸件内部没有出现孤立液相区，因此冒口能够较好地对铸件进行补缩。

试验结果对比表明（图13a，13b），改进后的工艺很好地解决初始方案出现的缩松缺陷，只在铸件中出现了很小的、分散的缩松，不会影响到铸件的正常使用，并且符合质检要求的缺陷控制标准。模拟结果与实验结果吻合度较高，并且该方案已经应用到实际的生产当中。

3.2 熔模铸造 ERP 应用实例

S公司是一家熔模精铸为主、砂铸为辅的民营中大型集团式企业，主要面向核电、石油等领域，是中国铸造行业的百强企业之一，其主要产品为各类阀门、泵、管道等复杂铸件。一方面，随着S公司快速发展，客户交货要求愈发严苛，原有的管理方法无法满足企业现有需求。另一方面，S公司以多品种小批量为主、工序多流程长、组批混批拆批频繁、质量要求高、交期要求短、过程要求可追溯等，这种生产模式造成了生产管理极大混乱和困难，依赖人工电子表格管理模式无法解决此问题。

为了更好地加强内控、规范化流程、控制库存和加强质量管控等，S公司2016年引进华中科技大学的华铸ERP软件，逐步实现了阀门、泵等大型复杂铸件的单件串联多工位全流程管理和溯源，生产工艺质量三角协同缺陷统计与控制，以及生产质检流程优化，实现了总部计划部对分厂生产的有效调度、控制，以及生产过程全流程的准确、实时、严格控制；最终实现了大型复杂铸件产品单件化全流程管理，大幅提升企业

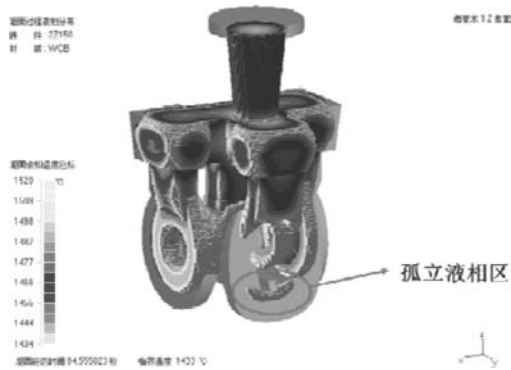


图9 初始工艺方案中孤立液相区分布
Fig. 9 Isolated liquid region distribution in initial casting process

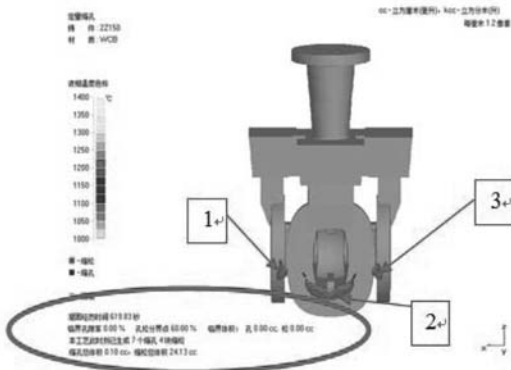


图10 初始方案缺陷分析
Fig. 10 Defects analysis of initial casting process

表2 缺陷统计结果
Table 2 Defects statistics results

孔松位置	体积/cm ³
1	7.02
2	10.22
3	6.88
总体积	24.12

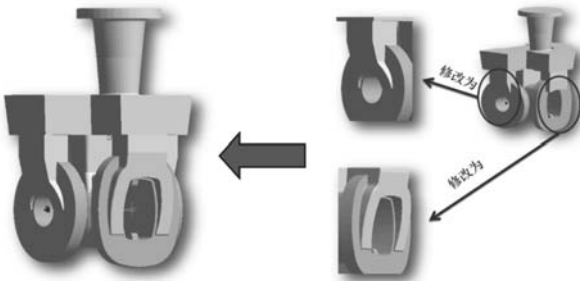


图11 冒口优化设计与工艺方案修改
Fig. 11 Optimized riser designing and improved casting process

管理水平。图14所示为S熔模铸造企业ERP系统应用流程指导中心,包括订单管理、工艺管理、计划管理、铸造生产管理、加工管理、质量管理、采购管理、物流转运管理、销售发货管理等。

应用效果与传统方法对比,降低了对人工经验的依赖程度,公司全流程管控能力成倍提升,生产效率提升50%;生产质量分析追溯效率提升明显,铸件质量和工艺稳定性提升了20%左右;把传统纸质记录、文档等转变为数字信息,实现了过程记录对质量分析、工艺改进的支撑,达到了数字化管理的目的与效果。相关研究成果已成为保证高质量完成客户订单的重要手段,促进了S公司整体技术水平的提升,自2017年稳定应用以来为公司带来了良好的经济效益。

3.3 熔模铸造 PDM 应用实例

图15所示为应用于某航空钛合金熔模铸造企业的PDM系统模块中铸件产品的工序工艺数据文件编制,

包括产品工艺状态的基本信息、参考规程、模具工装、设备准备、技术参数、操作步骤、检验要求、变更记录等。

图16所示为熔模铸件产品的生产质量全过程数据管理,如压蜡工序的现场工艺、熔炼浇注过程记录、

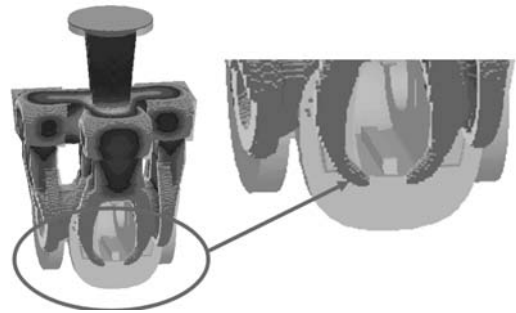


图12 改进的工艺方案中孤立液相区分布
Fig. 12 Isolate liquid phase region distribution aftercasting processimprovement



(a) 初始工艺 (b) 改进工艺

图13 定量缩孔、缩松预测结果对比图

Fig. 13 Comparison of results of quantitative shrinkage hole and porosity prediction

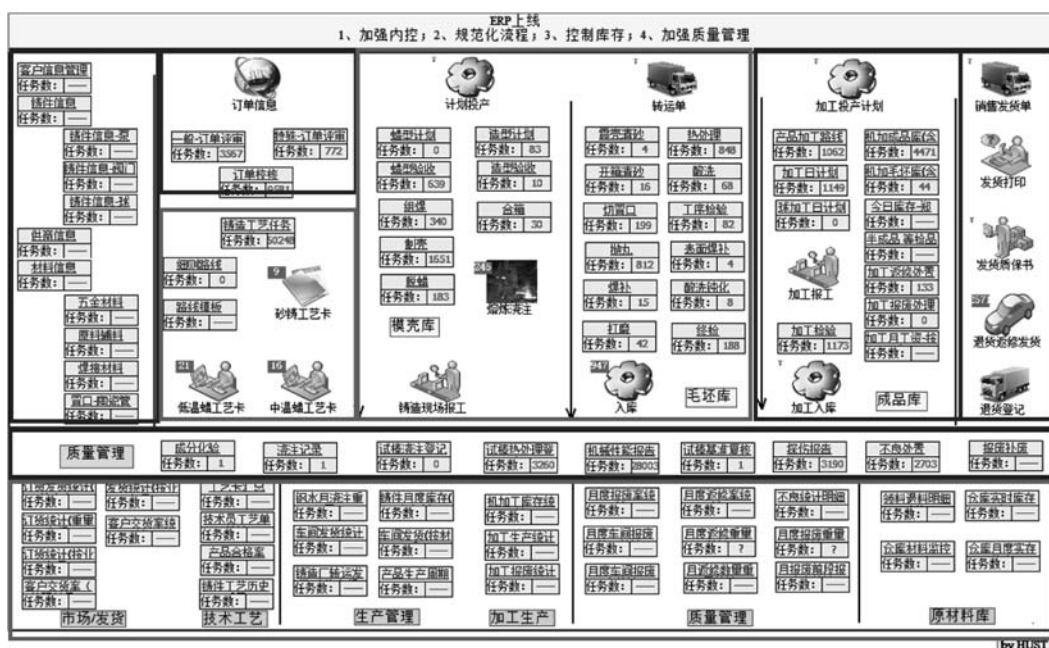


图14 某熔模铸造企业ERP系统应用指导中心

Fig. 14 ERP system applied technique research centre of investment casting enterprise

焊接过程、X光检验、外观检验、理化检验等过程数据，甚至是产品服役使用过程的性能数据等。

3.4 熔模铸造 SCADA 应用实例

B公司是中国钛合金精密铸造企业，由于铸造行业的特殊性，B公司部分铸造设备所处的环境比较恶劣，有些设备所处的环境粉尘较多，空气湿度大，温度高，导致设备改造和数据采集难度很大，而且有些特殊设备所处的环境空气存在有毒物质，工作人员需要带防毒面具才能进入，所以通过远程监控设备的运行数据就显得尤为重要。

数据采集的流程图如图17所示。在设备层，由于企业的设备种类繁多，设备的数据存储也是种类不一，有的设备具备PLC，有的设备不具备PLC，有的设备只有开关量，有的只有模拟量。通过PLC将铸造设备的数据转换到新增的PLC中，在PLC站点将采集到的数



图15 熔模铸件产品的工序工艺数据文件编制
Fig. 15 Technical documentation of investment casting products



图16 熔模铸件产品的生产质量全过程数据管理
Fig. 16 Data management of production process of investment casting products

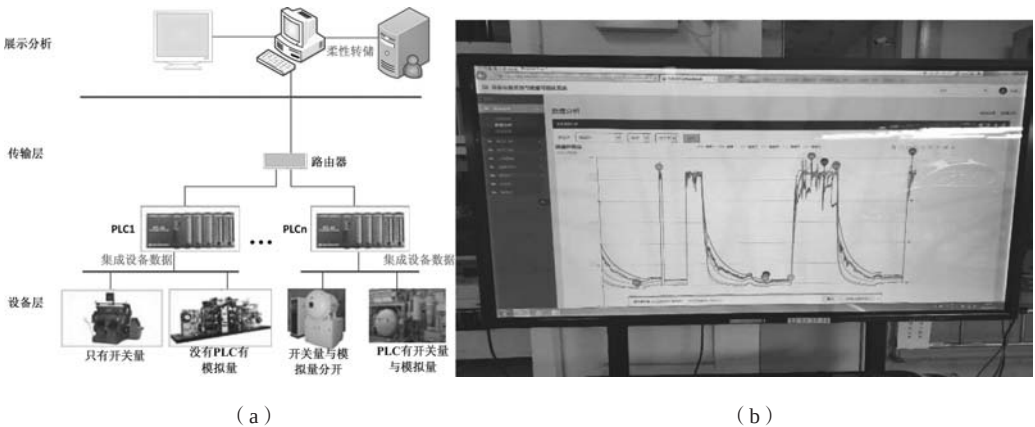


图17 设备数据采集与可视化监测显示
Fig. 17 Data collection and visual monitoring display

据保存到组态软件的实时数据库中。采集过程主要包含以下几个步骤：①把需要采集的设备开关量和模拟量信号在原有的基础上分流集成到附件的数据采集站点，同时，要在PLC寄存器中设置好变量的存储地址和上位机通讯所需要的通讯参数。②新建的采集站点通过通信协议实现与上位机的通讯，并将采集到的数据传输到上位机中。③上位机软件可以设置数据的传输方式，通过ODBC或ADO传输到设备互联系统的SQL SERVER 2008中，实现数据存储。④最后在设备监测与数据可视化系统中进行数据展示和数据分析。

根据B公司的复杂铸造设备现状，成功应用基于PLC与组态的设备数据柔性采集方法。实现对铸造设备的数据实时采集与存储，并通过华铸ERP、华铸SCADA系统访问历史数据和实时监控设备运行，为企业后期的工艺参数预警和工艺分析提供基础。

3.5 熔模铸造 1+N 数字化智能化铸造平台应用实例

针对铸造企业信息化进程中陆续应用多套系统、缺乏全局规划和整合造成各系统间的“信息孤岛”问题，作者2012年提出了“1+N”模式的数字化铸造平台。在当前新时代背景下，铸造企业两化融合呈现新特点和趋势：倾向整体规划、选用专业面向铸造的ERP、MES、PDM/PLM、SCADA等信息化集成系统解决方案。针对此，团队构建研制了“华铸1+N”数字化铸造创新平台2.0（图18），实现了以华铸EMPS集成化系统为“1”，代替原来铸造ERP系统，与其他“N”个软件、硬件系统进行同异构/源软件间、软件与硬件间集成互联。

在“工业4.0”的大背景下，B公司从2015年开始积极探索与实践数字化智能化制造，逐步建立起企业的“1+N”模式的熔模铸造数字化智能化制造平台，平

台中的“1”-EMPS系统架构如图19所示。在车间现场数字化方面，基于华铸ERP/MES/PDM集成系统，包括制模、制壳、熔炼浇注、荧光检、X光检等车间工序全过程生产/工艺/质量的信息数字化方法，大幅提升了现场管理水平，并给出了典型产品的全过程应用案例。在车间设备互联方面，基于华铸SCADA系统，包括设备数据监测、历史数据分析、报警管理和设备管理，实现了第一批试点设备的运行数据实时监测与异常预警，为生产工艺数据准确性、产品质量稳定性和基于工业大数据的质量诊断与控制奠定良好基础。

图20为B公司熔模铸造“1+N”数字化智能化铸造平台的应用，一方面满足了企业信息化第一阶段的需求，构建了ERP、MES、PDM集成化系统，消除了信息孤岛、重复和不一致，实现了全局信息共享，大幅提高了企业人机物协同效率；另一方面促进了企业信息化第二阶段的发展，集成构建SCADA系统，对铸造设备运行中各关键参数进行数据采集、监控及预警，并积累工业大数据为下一步的深度智能感知、自主学习、自律执行及智能优化打基础。

B公司从2015开始建设和应用“1+N”数字化智能化铸造平台，产值从2014年不足2亿元提升到2019年超4亿元；研制批产混线模式下得到了很好应用，解决了多工序多品种频繁组批/混批/拆批生产模式下单件缺陷溯源困难，质量分析追溯效率提升了3~4倍；有效解决了质量失控和缺陷修复不及时问题，铸件质量和工艺稳定性得到了显著提升。“1+N”熔模铸造平台已成为保证高质量重要手段，促进了B公司的整体技术水平的提升，几年来带来了巨大经济效益。建成的数字化制造平台成为航材院标杆，发挥了行业引领示范作用，来访学习交流单位包括国外波音、空客、RR、SF等，国内的商发、航发各主机厂、航天科技等。

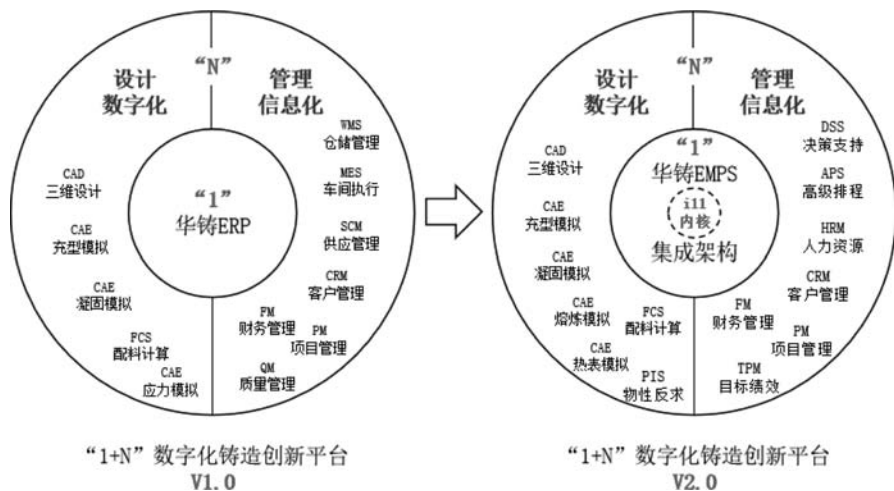


图18 铸造1+N数字化铸造平台从1.0走向2.0

Fig. 18 Casting 1+N digital platform from 1.0 to 2.0

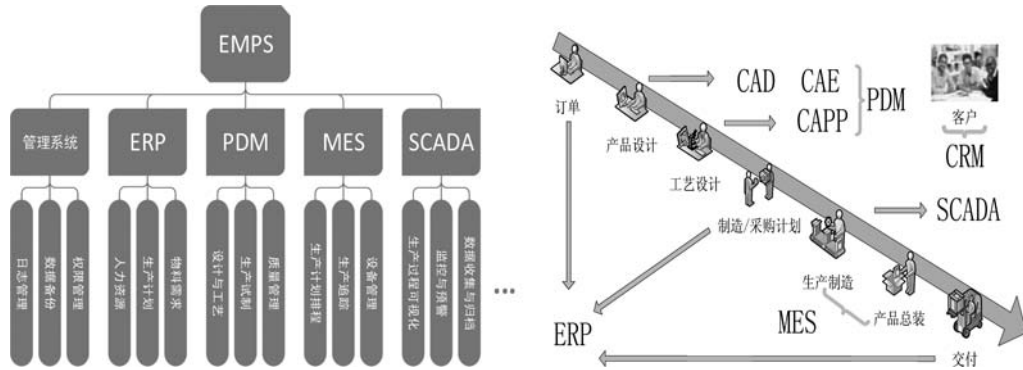


图19 EMPS系统架构

Fig. 19 EMPS system architecture

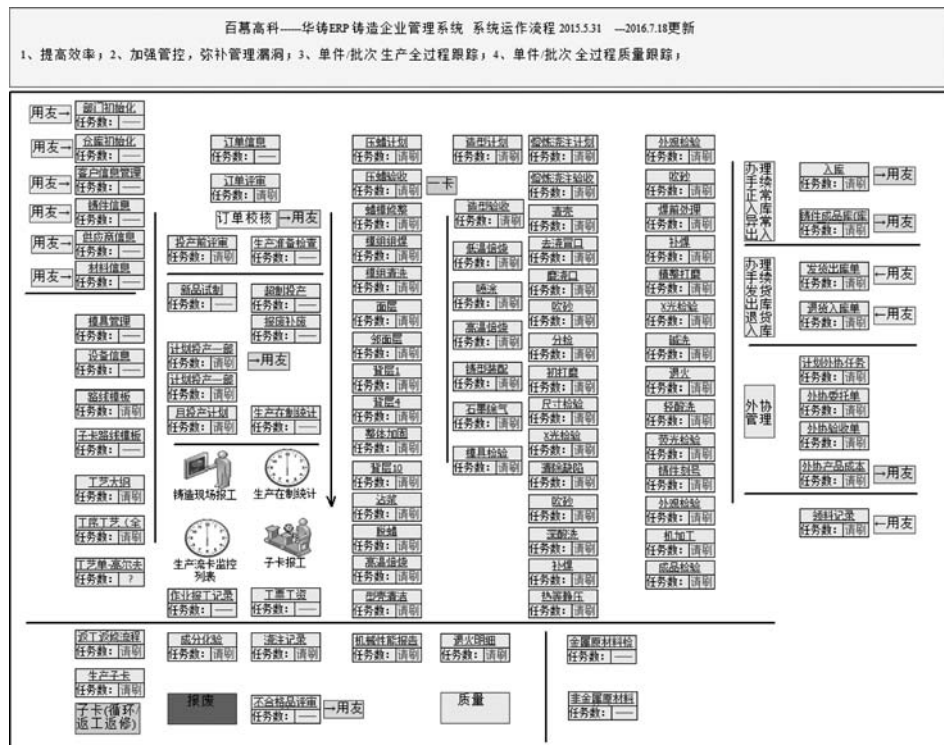


图20 某熔模铸造企业EMPS集成系统部分流程指导中心

Fig. 20 EMPS integrated system partial production processes tutoring center of an investment casting enterprise

4 结束语

数字化管理技术作为智能制造的重要组成部分,是改造传统产业和实现信息化带动工业化的突破口。进入新世纪,尤其是近十年,我国铸造数字化管理技术在应用中快速发展,目前,数字化、智能化、大数据等技术所形成的工业软件指导铸造生产主要是在铸造工艺设计系统(CAD/CAE)、产品信息及生产管理系统(PDM/ERP)、车间执行系统(MES)以及铸造设备采集与监控系统(SCADA)这四个方面对铸造企业信息化的支持。本文首先介绍了熔模铸造工艺设计软件系统国内外研究进展,其次提出了数字化智能化铸造技术涉及的关键技术,最后给出了在熔模铸造企业的应用实例,表明数字化智能化工业软件平台将有助于促进精密铸造企业生成与管理的科学转变,该平台能极大提升软实力并促进智能转型。下一步可进行的研究为人工智能与工业软件、铸造生产的结合,如基于元启发式的铸造智能排产、基于图像处理的质量智能检测、基于多源数据的质量/工艺优化,将进一步提升工业软件、铸造生产的智能化水平。

参考文献:

- [1] ZHOU J, LI P, ZHOU Y, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. Engineering, 2018, 4 (1): 11-20.
- [2] 柳百成. 创新·强基·智能——建设制造强国 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (1): 13-18.
- [3] MUHURI P K, SHUKLA A K, ABRAHAM A. Industry 4.0: Abibliometric analysis and detailed overview [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2019, 78: 218-235.
- [4] 周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向 [J]. 中国机械工程, 2015, 26 (17): 2273-2284.
- [5] 柳百成. 《中国制造2025》——建设制造强国之路 [J]. 表面工程与再制造, 2016, 16 (1): 2-6.
- [6] 周建新, 计效园, 殷亚军, 等. 铸造企业数字化管理系统及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [7] ZANI F, FELDHAUS S, MICHELON G, et al. Products of industry 4.0 application in continuous casting [C] //Venice, Italy: Associazione Italiana di Metallurgia, 2018.
- [8] 周建新, 殷亚军, 沈旭, 等. 铸造充型凝固过程数值模拟系统及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [9] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造行业“十三五”技术发展规划纲要 [J]. 铸造, 2015, 64 (12): 1165-1202.
- [10] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望 [J]. 铸造, 2012, 61 (4): 347-356.
- [11] 张耘. 精密铸造模具进步助力精铸高端制造发展 [R]. 湖北武汉: 2020.
- [12] 王忠, 王孟, 冯显磊, 等. 铸造凝固过程数值模拟发展现状研究 [J]. 金属加工 (热加工), 2014 (11): 96-98.
- [13] THOMAS B G. Review on modeling and simulation of continuous casting [J]. Steel research international, 2018, 89 (1): 1700312.
- [14] KHAN M AA, SHEIKH A K. Simulation tools in enhancing metal casting productivity and quality: A review [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of engineering manufacture, 2016, 230 (10): 1799-1817.
- [15] 王同敏, 魏晶晶, 王旭东, 等. 合金凝固组织微观模拟研究进展与应用 [J]. 金属学报, 2018, 54 (2): 193-203.
- [16] 周建新. 铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势 [J]. 铸造, 2012, 61 (10): 1105-1115.
- [17] 李瑶林. 基于UG的铝合金铸造工艺CAD系统研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [18] 彭泽普. 基于统计特征识别算法的冒口工艺推荐设计系统的开发与应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [19] 王志贤. 基于中性文件的铸钢件铸造工艺CAD系统开发 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [20] 王林苑. 铸造CAE数值模拟系统与CAD及ERP系统接口技术的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [21] 周建新. 铸造CAD/CAE [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [22] 周建新, 刘飞, 陈立亮, 等. 我国铸造企业ERP系统应用现状与展望 [J]. 铸造, 2008 (9): 885-891.
- [23] 周黔, 邓蔚林, 计效园, 等. 钛合金精密铸造企业生产流程卡主子卡方案研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (11): 1184-1187.
- [24] 计效园, 周建新, 殷亚军, 等. 数字化智能化铸造技术的研究与应用 [C] //中国铸造活动周, 郑州, 2014.
- [25] 王武兵. 铸造企业设备数据柔性采集方法及应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [26] VANLI A S, AKDOGAN A, DURAKBASA M N. Tools of industry 4.0 on die casting production systems [C] //Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2020.
- [27] JIXiaoyuan, YEHu, ZHOUJianxin, et al. Digital management technology and its application to investment casting enterprises [J]. China Foundry, 2016, 13 (5): 301-309.
- [28] 周建新, 刘瑞祥, 陈立亮, 等. 华铸CAE软件在特种铸造中的应用 [J]. 铸造技术, 2003 (3): 174-175.
- [29] ZHOU J X, CHEN L L, LIU R X, et al. High pressure diecasting module of InteCAST software and its applications [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2007, 192: 249-254.
- [30] 杨世洲, 陈攀. 华铸CAE软件在熔模铸造中的应用 [J]. 西华大学学报 (自然科学版), 2010, 29 (4): 75-78.
- [31] 计效园. 单元化与智能化方法及其在铸造信息化中的应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [32] ZHOU Jianxin, JI Xiaoyuan, YIN Yajun, et al. Research and application of enterprise resource planning system for foundry enterprises [J]. China Foundry, 2013, 10 (1): 7-17.
- [33] JU Y L, JOO S Y, K Bo-hyun. A big data analytics platform for smart factories in small and medium-sized manufacturing enterprises: an empirical case study of a die casting factory [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18 (10): 1353-1361.
- [34] 周建新, 计效园, 殷亚军, 等. “1+N”模式的数字化铸造平台的构建与实例研究 [C] //中国铸造活动周, 苏州, 2012.

Construction and Application of Digitization, Intellectualization and Big Data Industrial Software Platform for Investment Casting

ZHOU Jian-xin, YIN Ya-jun, JI Xiao-yuan, SHEN Xu

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

Abstract:

The wide application of digital, intelligent, big data and other technologies is promoting the development and reform of casting industry from all aspects. It can not only improve the production efficiency and reduce the production cost, but also promote the continuous emergence of new technologies and new processes, which makes the casting production from mainly relying on experience to the stage of scientific theory guiding production. At present, the industrial software for guiding foundry production formed by digitization, intellectualization and big data technologies mainly supports the informatization of foundry enterprises in four aspects: casting process design system (CAD/CAE), product data and information management system (ERP/PDM), workshop execution system (MES) and casting equipment acquisition and monitoring system (SCADA). However, due to the lack of overall planning and unified integrated system architecture, it is difficult to integrate communication among industrial software systems, and there are many data duplication, data islands and inconsistencies. Therefore, after a long time of accumulation, the system maintenance difficulties, low efficiency and other problems and challenges, seriously restrict the development of enterprises. The integration of industrial software has become the urgent demand and inevitable trend of the development of foundry information. Therefore, author puts forward the idea of building digital intelligent big data industrial software platform for investment casting. The platform integrates CAD, CAE, ERP, PDM, MES, SCADA and other industrial software systems seamlessly from four levels (business value layer, technical design layer, manufacturing execution layer, equipment data sensing and acquisition layer). Some concepts are defined, such as ERP's driving data for PDM design, PDM's providing process guidance data to MES, method of the combination of SCADA and MES to monitor and warn PDM process parameters, as well as information communication and action mechanism between different layers. Based on highly flexible technology, the system modules are built on demand and are added on demand and have the characteristics of flexible system integration. Finally, an application example of this technology in investment casting enterprises is given. The results show that, on the one hand, the industrial software platform meets the needs of the first stage of enterprise informatization, constructs the integrated system of ERP, MES and PDM, eliminates the information island, duplication and inconsistency, realizes the global information sharing, and greatly improves the efficiency of enterprise collaborative operation. On the other hand, it promotes the development of the second stage of enterprise informatization and integrates the construction of SCADA system, and data acquisition, monitoring and early warning of key parameters in the operation of casting equipment are carried out. The digital intelligent big data industrial software platform will help to promote the scientific transformation of the generation and management of precision casting enterprises, greatly enhancing the soft power and promote the intelligent transformation.

Key words:

investment casting; digital; intelligent; big data; industrial software