

摘要

近年来我国的风电行业发展越来越快，成为新能源的一个重要方向。风电设备的重要部件，如轮毂、底座等都是轮廓和重量比较大的球铁铸件，因工作环境恶劣，对质量要求较高，因此必须对铸件的铸造环节加以改进。随着三维铸造工艺 CAD 在铸造领域的应用原来越广泛，在风电铸造领域可以采用三维 CAD 技术辅助工艺人员进行工艺设计和优化，并利用 CAE 的强大模拟验证功能进行进一步的工艺改进。这样不仅可以减少生产周期，降低成本，而且可以提高风电铸件的质量。UG 作为当今世界最先进的、应用广泛的三维造型软件，具有强大的实体造型和二次开发技术。基于此，本文开发了基于 UG 的大型风电球铁件的三维铸造工艺 CAD 系统。

本文对国内外铸造工艺 CAD 的现状和发展趋势进行了分析，简单介绍了我国风电铸造工艺的现状，综合铸造工艺的基本理论、企业生产实际和铸造标准，以 UG6.0 为软件平台，以 VC++6.0 和 UGOpen 为工具，设计开发了大型风电球铁件铸造工艺 CAD 系统。

本文设计的 CAD 系统总体结构采用了模块化法：分为简单工艺参数设计、冷铁设计、冒口设计、浇注系统设计等，并阐述了各模块的设计理论和开发流程；采用参数化设计设计了冷铁、冒口和浇道，并建立的相应数据库。其中浇注系统是本系统的核心部分，该系统包括了通用浇道设计和专用浇道设计，利用科学的计算方法计算浇道各部分的尺寸，并根据工厂实践设计了具有实用性的浇注模块。最后结合实例介绍了本 CAD 系统的应用。

本文开发的 CAD 系统初步实现了快速、高效绘图的开发目标，大致涵盖了铸造工艺设计的主要内容，可以辅助工艺人员快速设计出铸造工艺。

关键词：铸造工艺 CAD 系统 风电 大型球铁件

Abstract

In recent years, wind power industry of China grows fast and has become an important direction of new energy. Important components of wind power equipment, such as hub, base with large profile and weight are all ductile iron castings. Due to poor working conditions and high quality requirements, it is necessary to improve the casting part of the castings. With the three-dimensional CAD of casting process widely used in areas of casting, casting process CAD system can help technologist design and optimize casting process greatly before CAE simulation, and then improve the casting process with CAE simulation and verification functions in wind energy casting industry. It will not only reduce production cycle and cost ,but also improve the quality of wind power castings . UG, with its powerful modeling function and secondary development API, is the most advanced, widely used 3D software. Based on such background, this paper conducts research on 3D casting process CAD system for heavy ductile iron of wind power based on UG.

This paper analyzes the current status and development trend of CAD casting process. Combined with the characteristics of Chinese wind power industry, Considering the casting process theory, company requirements and foundry industry standards, the Heavy Ductile Iron Casting Process CAD of wind power is developed, using the secondary development API interface UG/Open provided by UG and VC++6.0 development tools.

The Casting Process CAD System is designed with the method of modularization for different functions. There is systematic introduction on each design theory and development process of the simple design of process parameters, cold iron design, riser design, gating system design. The system uses parametric design of cold iron design, riser, gating, and establishes the corresponding database. The gating is the core of this system, which includes a common runner design and a dedicated runner design. This

system uses scientific method to calculate the size of each part of runner, and designs a practical gating module accord with the facility practice. Lastly, the application of the whole system is shown through a real casting.

The casting process CAD system has achieved the goal of high efficiency drawing, roughly covers the main casting process design and provides a convenient casting system for technology staff. On this basis, farther research can be done on currency and standards of the system to achieve practical results.

The casting CAD system has the same interfaces as UG itself. The system consists of all aspects of work piece of casting process design and uses a lot of professional casting knowledge. Various functions make it achieve the goal of saving the time of casting process designing and improving the efficiency.

Key Words: Casting process CAD system Wind energy Heavy ductile iron

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
1 绪论	
1.1 选题背景与意义.....	(1)
1.2 铸造工艺 CAD 国内外研究概况.....	(2)
1.3 铸造工艺 CAD 发展趋势.....	(5)
1.4 主要研究内容.....	(6)
2 系统的总体设计及开发技术	
2.1 工艺 CAD 系统设计.....	(8)
2.2 UG CAD 系统开发工具.....	(10)
2.3 系统开发关键技术.....	(14)
2.4 小结.....	(18)
3 大型风电球铁件铸造工艺 CAD 系统开发	
3.1 主要工艺参数模块.....	(19)
3.2 冷铁设计模块.....	(21)
3.3 冒口设计模块.....	(23)
3.4 浇注系统设计模块.....	(27)
3.5 小结.....	(33)

4 大型风电球铁件工艺系统功能及应用	
4.1 系统菜单及工程初始化	(34)
4.2 主要工艺参数设计	(35)
4.3 冷铁系统设计.....	(38)
4.4 冒口系统设计.....	(40)
4.5 浇注系统设计.....	(44)
4.6 小结.....	(53)
5 总结与展望	
5.1 总结.....	(55)
5.2 展望.....	(56)
致 谢.....	(57)
参考文献.....	(58)
附录 1 攻读硕士学位期间发表论文	(62)

1 绪论

1.1 选题背景与意义

铸造是历史悠久的传统产业，是零件毛坯最常用的生产工艺之一。铸造工艺（造型、制芯、浇注、落砂、清理及其后处理等）是铸造生产的核心部分，直接关系到铸件质量的高低。传统的铸造工艺优化是建立在对生产经验的总结，通过多次试验和比较才获得的，这样不仅浪费了大量的人力、物力和财力，而且总结出来的工艺通用性较差。近年来计算机技术在铸造领域的应用越来越广泛，铸造企业大量采用 CAD 和 CAE 等技术来帮助更快更好地进行零件设计、工艺设计、工艺模拟、炉料配制、产品管理等，提高了生产效率和产品成品率^[1]。其中，CAD 是整个 CAD/CAE/CAM/CAPP/PDM 应用技术系统的基础，CAD 技术开始从二维过渡到三维。由于三维 CAD 更容易和 CAE、CAM 技术集成，因此铸造工艺设计采用三维 CAD 技术是未来的发展方向。二维绘图在一些简单的工艺设计中可以胜任，但是如果需要对零件进行有限元分析或机构分析时就显得诸多不足，而三维设计却不存在这些情况，并且三维设计还具有可视化造型、可以直接数控加工等优点，可以与铸造 CAE/CAM 无缝集成，实现了真正意义的“计算机辅助设计”。

风能是最绿色的可再生能源，我国近年来也在大力发展风电，因此风电设备的生产是非常具有前景的行业。目前风力发电的主流机型是 1.5MW~2MW 的大型风力发电机组^[2]，而且长期工作在恶劣环境中，因此对铸件的性能要求极高，这就有必要设计良好铸造工艺。而国内风电铸造工艺设计基本上处于人工设计阶段，因此有必要开发一套针对风电铸造行业的辅助工艺三维 CAD 系统。

UG 是目前最先进的三维 CAD 软件，特别是随着 UG6.0 版本的发布，具有了同步建模的优点，再加上本身就有的强大的参数化实体建模，成为了目前最流行的 CAD。同时 UG 也具有强大的二次开发功能，这就大大地方便了用户的特别专用需求的开发^[3]。

基于以上背景，本课题主要的研究任务是在 VC++6.0 环境下基于 UG NX6.0 进

行大型风电铸件三维铸造工艺 CAD 研究与开发。开发这套系统的目的在于促成铸造工艺 CAD 软件在生产风电工厂里实际应用，为工艺设计人员提供理论支持和快速绘图的捷径，并利用 CAE 反馈结果来优化工艺，提高工艺设计效率。因此，本研究具有较高的理论意义和重要的实用价值。

1.2 铸造工艺 CAD 国内外研究概况

CAD 的概念是由美国麻省理工学院 (M.I.T) 在 1959 年首次提出，此后计算机模拟技术就在铸造领域成为了一个世界性的热点^[4]。

铸造领域里，对于铸造工艺 CAD 和 CAE 的区分在刚开始并不明确。直到 21 世纪九十年代才明确划分：即铸件凝固模拟是 CAE；铸造工艺设计是 CAD。铸造 CAE 技术采用有限分析技术进行铸造过程（充型过程和凝固过程）的模拟，先在电脑中进行“模拟生产”，为制定合理的铸造工艺提供了理论和事实依据，主要研究内容有：流动场模拟、温度场模拟、应力场模拟和微观组织模拟等。铸造工艺 CAD 是指为铸造生产服务的措施，对于提高铸件质量提供保障，主要研究内容有：浇冒口设计、冷铁补贴设计、砂箱和砂芯系统、铸造工艺参数设计（分型面、加工余量、工艺补正量等）。铸造工艺的核心是浇冒口系统的设计，对于不同类型的材料根据大小等工艺设计差异较大^[5]。

1.2.1 国外发展概况

由于历史原因，国外在铸造领域对 CAD（工艺设计）研究比 CAE（数值模拟）研究要晚。据不完全统计，Forsund 是第一个采用计算机模拟技术的^[6]，之后铸造模拟的相关研究如雨后春笋般涌现出来。20 世纪 60 年代提出了多种计算方法^[7,8]；70 年代具有代表性的有：日本的新山英辅教授和大中逸雄教授^[9,10]，丹麦的 P.N.Hansen 教授^[11]等，他们都在铸造模拟领域做出了与实验结果一样的研究。自 80 年代，CAE 技术得到了飞速的发展，并开始出现了一些实用的软件，如 1989 年德国 Aachen 大学 Sahm 教授主持开发的 MAGMA 软件^[13]，ESI 公司的 ProCAST 等。

自美国的 R.D.Pehlke 教授和 J.T.Berry^[12]教授在第五十届铸造年会上第一次提出

了铸造工艺 CAD 之后，世界各国都对此技术进行了大量的研究，取得了一定的成果，出现了一些比较实用的商品化软件^[14]，如美国铸造协会的 AFS-Software 软件，英国 Delcam 公司的 DUCT 软件等，但是由于通用性较差等各种原因，实际应用效果并不理想。

1.2.2 国内研究概况

国内的铸造计算机应用始发于上世纪 70 年代末，发展较晚，但是发展较快。同国外的发展状况类似，国内也是首先对铸造凝固过程模拟（CAE 技术）进行了研究^[15-18]，这些大多都是高等院校和铸造方向的专业研究所，而铸造企业由于多种原因一般不会自行开发软件。具有能力的高校开始开发关于这方面的软件，如华铸 CAE（华中科技大学）^[19]是国内 CAE 软件的典型代表，目前在国内拥有众多客户，并创造了大量的生产价值。

国内的铸造工艺 CAD 的研究始于“七五”期间，始发于国家重点攻关项目“大型铸钢件铸造工艺 CAD 研究”，开发的软件在铸钢件的生产取得了相当好的成绩^[20-22]。当时铸造工艺 CAD 的研究在国际上也处于萌芽阶段，可以说我国的这一研究意义重大。此后，随着计算机技术的快速发展，应用铸造工艺 CAD 的也越来越多，相应的软件业多了起来。企业方面，太原重型机械厂和鞍钢机械制造公司熔炼厂都分别根据自己工厂的实际经验出发，运用计算机技术辅助铸造工艺设计和模拟，不但开发了一套具有科学性的适用于本厂的系统软件，使技术人员从大量的繁琐的工艺设计中解放出来；而且提高了生产效率，大大提高了铸件的质量。1996 年，石家庄水泵厂开始利用 GH-INTECAD 软件的二次开发工具，开发了浇冒口设计和铸造工艺参数库等模块，形成了一套比较完整的铸造工艺 CAD 系统。

国内高校和研究所方面，清华大学在这方面处于开拓者的地位^[23-27]，相继开发 THFSCAD 系统和 castCAD 软件，虽然取得了一定成果，但是同样存在着许多缺点，如开发界面不够友好，软件通用性差等。此后，沈阳铸造研究所^[27, 28]开发的 SRIFcast 软件和华中科技大学材料学院凝固模拟研究室开发的 HZCAD^[29-32]等软件具有一定的通用性，特别一提的是 HZCAD 的三维 CAD 技术软件在几个工厂试用过，得到

了用户的好评。

此后，铸造工艺 CAD 软件的开发都呈现了高校、研究所与企业联合开发的特点，这样不仅避免了企业在科研理论方面和科研人员的不足和高校在科研经费方面的缺乏，而且还能更加促进软件的实用化、通用化，使得铸造工艺 CAD 软件更好的发展，如天津大学和天津纺织机械厂联合开发了造型机用型板设计 CAD 软件和华中科技大学与烟台通用东岳厂合作开发的铸造工艺 CAD 系统等。

1.2.3 风电铸造工艺发展状况

近年来，随着能源的需求量迅速增大和不可再生能源的日益枯竭，可再生能源日益成为新能源的重点，因此，风力发电得到了突飞猛进的发展。风能由于其可再生性，以及使用过程中对环境的无害性，备受世界各国政府重视。中国是个风能大国，风能总量达到 10000GW。目前，我国新能源战略就明确指出要把风能当做发展重点，预计风能装机容量在 2010 年达到 200-300MW^[33]。

风力发电的关键技术之一就是风力发电设备的制造，风力发电设备的重要组成部分都是属于球墨铸铁件，主要有装置叶片的轮毂、齿轮箱体、底座、轴承座等构件，其中轮毂是铸件中的核心部分，这些部件基本上都需要铸造生产。另外，风电设备工作环境非常恶劣（常年运行在高达几十米至一百多米的空中，有些部件需要在零下 20 度至零下 40 度的环境工作 20 年）。因此，除了要求常规性能指标如耐腐蚀、耐磨性外，还必须要有很好的低温冲击性能。这些铸件一般轮廓和壁厚都很大，可以归为大型或重型铸铁件。如 1.5MW 轮毂，质量约为 9.4t，轮廓的长宽高方向都很大（27 立方米左右），该轮毂壁厚度在 120~178mm，属于厚大断面球墨铸铁件（壁厚大于 100mm），对铸件的内在质量要求很高。因此有必要对此类铸件的铸造工艺加以研究。

目前有关风电行业的铸造工艺国外已经比较成熟，而国内还是处于传统的人工设计阶段，如东方汽轮机的轮毂铸造工艺^[34]和江苏吉鑫风能科技股份公司的风电铸造工艺等（这些工艺系统恰好是本系统的理论和实践经验来源）。随着风电单机容量的增加，更大功率的风电设备正在研制或者生产，这其中的铸造技术和工艺

方面还有很多难点，而基于风电铸造企业的铸造工艺 CAD 系统更为稀少，因此有必要开发一套风电铸件的辅助铸造工艺 CAD 系统，这样不仅可以帮助风电铸造厂商提高现有生产率和节约成本，而且还加速风电铸造技术的创新和研究效率。

1.3 铸造工艺 CAD 发展趋势

当今世界竞争越来越激烈，企业要赢得竞争，就要以市场为中心、以用户为中心，快速的响应市场的需要、高质量的满足客户的需求。因此如何在最短时间内以最低的成本设计铸造工艺并生产出符合要求的铸件，CAD 是解决的问题的关键，这也是 CAD 技术发展的方向和趋势。特别是随着计算机、网络及相关技术的飞速进步，使铸造工艺 CAD 呈现出二维向三维化、集成化、智能化、通用化和绿色化的发展趋势如下所述。

1、二维向三维转变

传统的铸造工艺是在图纸上进行绘制表达，二维工艺图也可以转到计算机上绘制。在铸造工艺的 CAD 中，计算机主要是采用 Auto CAD 软件作为图形处理软件，国内也有很多在其基础上二次开发的软件。但是，目前，一方面铸造工艺 CAE、CAM 技术发展的已相当成熟，CAE、CAM 只有二维软件是远远不够的，它需要三维软件的支撑；另一方面三维软件发展很快，比起二维图形，三维图形更加直观化，而且能够提供更为丰富的信息量。随着铸造工艺 CAD/CAE/CAM 集成化，CAD 正逐渐由二维向三维转变。

2、集成化

以特征三维造型为基础的 CAD/CAE/CAM 的集成是未来产品设计开发的主要模式。尤其进一步与快速原型制造的集成，可以构成一个闭环快速产品开发系统，在并行工程环境下^[35]，能够对产品设计进行快速评价、修改，以响应大规模客户化的需要，提高了企业的竞争力。

3、智能化

智能化^[36]即希望能以更接近自然，也更能接近人类思维表达的方式建模、仿真

和制造，利用虚拟现实技术（Virtual Reality，简称 VR）、人工智能技术（Artificial Intelligence，简称 AI），实现人机一体的智能设计、分析和制造。一个最突出的方向就是铸造工艺专家系统，它是指将实际生产出来的有益经验总结出来，并用于解决铸造过程中出现的问题。

4、通用化

由于铸造的复杂性等多方面的原因，通用化一直都是铸造工艺 CAD 软件的通病，严重制约了此类软件的商品化。由于每个工厂的实际情况不同，例如都有自己对多年生产经验的总结，使得软件开发变得更加困难，因此要解决这些情况，软件开发者应深入实际，采纳众多企业的共性，尽量开发出具有一定通用性单个模块。这样不仅有利于软件的推广，而且便于软件的维护和升级。

5、绿色化

绿色化^[37]已成为世界各国努力追求的发展方向，是人类可持续发展的核心内容之一。绿色设计/制造技术，在以集成、并行的方式设计产品及其相关过程的同时，优化设计方案，降低废品率，使整个铸造生产过程对环境造成的污染降低到最小，资源利用率达到最高。传统的铸造行业往往是高能耗、高污染，因此绿色铸造生产是社会进步的必然要求，铸造工艺 CAD 等绿色技术正是实现铸造绿色化的重要保证。

1.4 主要研究内容

本系统是基于西门子公司公司的 PLM 软件平台，以 VC++6.0 为开发平台，利用 C/C++ 及 UG 自带的二次开发工具对铸造工艺 CAD 系统进行二次开发。选用大型风电球铁件作为工艺设计对象，以高效率绘图为研究目的，力图使工艺设计人员能方便、快捷的设计工艺或对设计好的工艺进行修改，提高生产效率。本文的主要研究内容如下：

- 1、以 UG6.0 作为 CAD 系统平台，利用模块化的思想确定整个 CAD 系统的总体结构设计，将系统分为五大模块：系统初始化模块、主要工艺参数模块、冷铁系

统模块、冒口系统模块以及浇注系统模块。

2、根据铸造工艺经验数据及相关标准，采用 Microsoft Excel 初步建立风电球铁件相关工艺模块的工艺参数数据库，运用 UG 参数化设计建立冷铁、冒口及浇注系统图形库。

3、依据工艺设计理论对 CAD 系统各个子模块：分型面、加工余量、冷铁系统、冒口系统及浇注系统进行详细的操作界面设计及程序开发流程设计。

4、系统着重对风电球铁件的实用浇道做了实际设计，是此系统能更好的与工厂实际相结合，极大地减少了工艺人员的设计时间。

5、运用实例介绍大型风电球铁件工艺 CAD 系统功能的具体实现及应用过程。

2 系统的总体设计及开发技术

2.1 工艺 CAD 系统设计

2.1.1 铸造工艺设计流程

铸造生产是一个复杂的多工序组合的工艺过程。铸件的生产过程，从零件图开始，一直到铸件成品检验合格入库为止，要经过多道工序，从铸造生产需要的各种原材料的准备，到造型、制芯、合箱、浇注、落砂及清理，需要科学的设计和管理整个工艺和生产过程，有效地控制铸件的生产，确保铸件的质量。铸造工艺设计是根据铸件结构特点、技术要求、生产批量、生产条件等，确定铸造方案和工艺参数，绘制图样和标注符号，编制工艺卡和工艺规范等。它既是工厂生产技术准备和科学管理额依据，也是铸造工艺技术水平的体现，在整个铸造生产过程中占据着重要的地位。由本课题组多年的经验，一般铸件的铸造工艺设计方法有“分析零件图纸——铸造工艺性分析——铸造工艺方法设计——缺陷模拟并优化——铸造工艺文件”。不同材料、不同结构及不同生产条件的铸件的铸造工艺设计流程大致相同，内容如下所示^[37]：

1. 由铸件结构参数及技术要求、生产方式及条件进行铸造工艺性分析，选择铸造方法，确定铸造工艺方案。
2. 模样选择、砂芯设计、砂箱等工艺装备的设计。
3. 工艺参数设计，包括分型面的选择、铸件尺寸公差、机械加工余量、铸件收缩率、起模斜度、浇注温度等。
4. 浇注系统设计，冒口补贴设计，冷铁设计，有的还需要设计排气系统等。
5. 利用铸造数值模拟软件反求并进一步优化工艺。
6. 铸造工艺图、铸型装配图、工艺卡的绘制。

铸造工艺设计流程如图 2-1 所示。

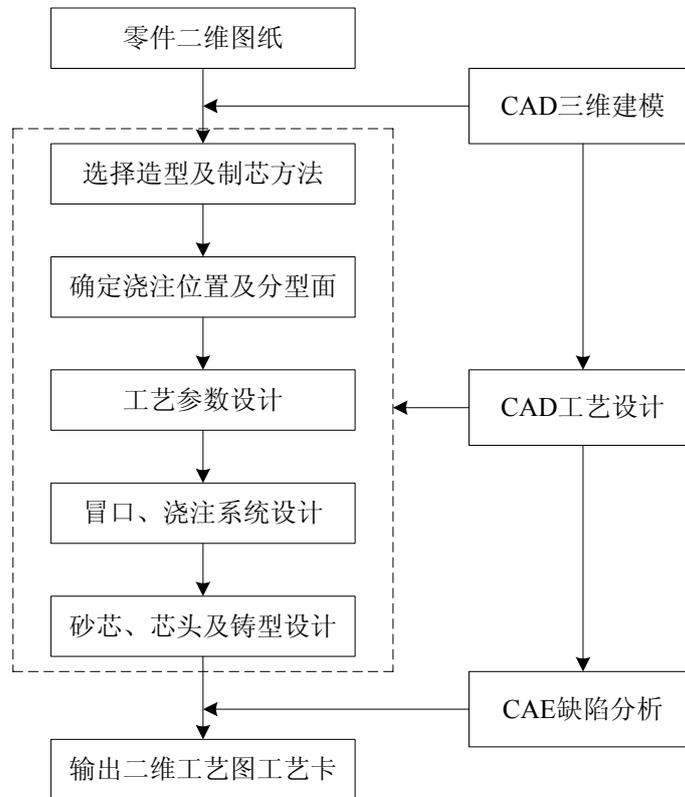


图 2-1 铸造工艺流程

2.1.2 工艺 CAD 系统结构

由图 2-1 可见，三维铸造工艺 CAD 在整个铸造工艺设计流程中占据着核心地位。大型风电球铁件三维铸造工艺 CAD 系统包括三维造型模块和铸造工艺设计模块，工艺数据库模块，因此将系统划分为不同的模块开发，这样降低了软件设计的难度和复杂性，同时可利于系统的升级和维护。

本文设计的工艺 CAD 系统总体结构如图 2-2 所示。其中最关键的是浇注系统和冒口系统设计。

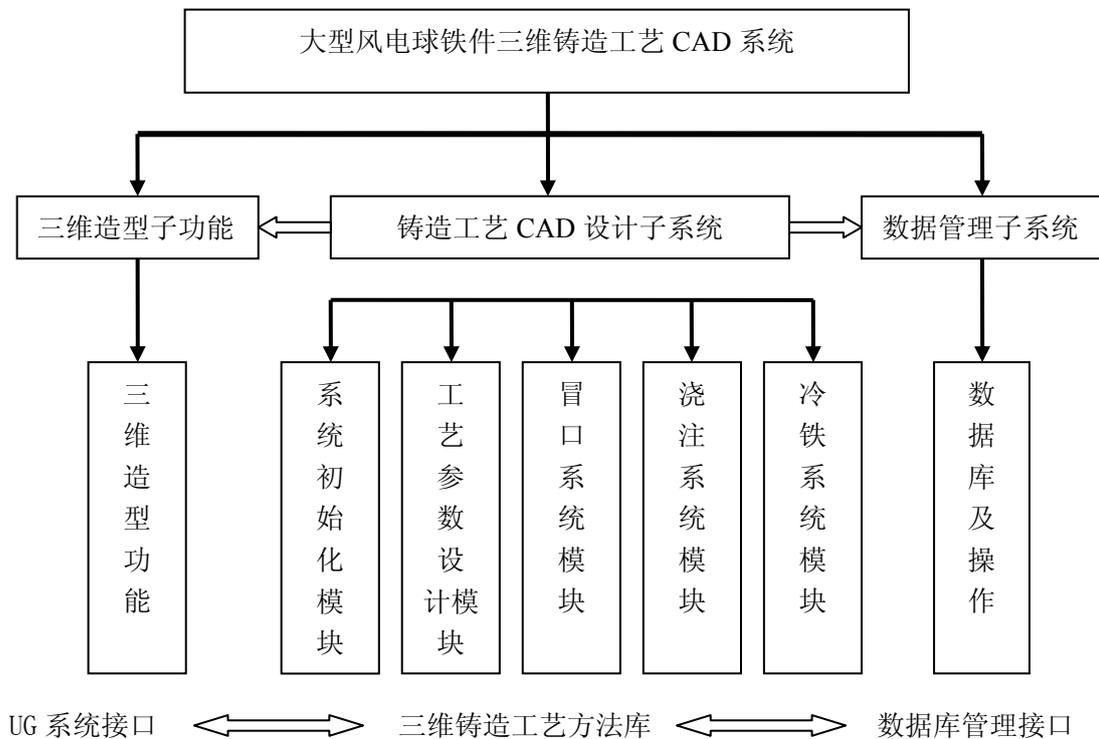


图 2-2 本铸造工艺 CAD 系统总体结构

2.2 UG CAD 系统开发工具

本系统是采用 MFC 和 UG/OPEN 二次开发包中的 UIStyler 工具混合开发的用户界面对话框；利用 UG 提供的自定义菜单脚本语言 MenuScript 工具，能方便的对菜单进行添加、修改、删除操作和改变菜单的显示文本或响应行为，通过选择相应的菜单按钮，就可以触发对话框界面。

2.2.1 系统开发平台

铸造工艺 CAD 系统的所有模块选择 Siemens PLM Software 发布的 NX6.0 作为软件平台，并利用 UG 自身提供的开发工具结合 VC6.0 进行系统开发。大多数风电铸件生产厂商都是 UG 的各户，UG 提供的 UGopen 开发语言功能强大，具备实现用户需求的各种功能，并且国内外都有类似的开发成功先例。

鉴于此，本系统选择 UG 软件作为大型风电球铁件铸造工艺 CAD 系统的平台(版本为 NX6.0)，其编译环境为 Microsoft VC++ 6.0。

2.2.2 系统开发工具

UG 是当今世界最先进的、应用广泛的三维造型软件。UG 软件起源于美国麦道飞机公司，后于 1991 年并入美国通用汽车公司下的 EDS 公司（电子资讯系统有限公司）。2007 年 5 月 11 日，西门子完成对 UG 的收购。UG NX6.0 包括了世界上最强大、最广泛的产品设计应用模块，不仅具有高性能的机械设计和制图功能，为制造技术提供了高性能和灵活性；同时还能直接生成用于产品的加工 NC 数控代码^[38,39]。另外，UG 提供了强大二次开发语言工具（UG/Open C, UG/Open C++（功能仅限于 CAD））和界面设计工具（UG/Open MenuScript 以及 UG/Open UIStyler），非常利于开发专用的 CAD 系统^[40-42]。

2.2.3 开发工具 UG/Open

UG/Open 就是 UG 最主要开发工具的总称。本系统核心技术是 UG/Open API 模块，因此对此模块详尽介绍，其他模块仅为了解。

1、UG/Open API

UG/Open API^[43]被设计成 UG 与外部应用程序之间交互的接口，故也被称为用户函数（User Function，简称 UF）。它是 UG/Open 使用最频繁的二次开发工具，里面封装了约 2000 个 C 函数。用户的二次开发，其实质就是通过正确调用这些函数，准确而合理的确定函数体内的参数，通过一个个函数的集合来实现复杂的功能：如修改模型，处理界面，甚至可以控制 UG 的行为等。UF 具备强大的功能，具体有以下几个：对 UG 文件及相应模型进行操作，包括 UG 模型的构建、编辑、装配体的建立、遍历，以及绘制工程图纸等；处理如一些复杂的机制，这是 UG 本身所实现不了的。此外，UF 和 C 语言可以紧密的合为一体，使开发者可以利用 C 语言的高效灵活实现 UG 的强大功能。

使用 UG/Open API 编写的代码按运行环境的不同可以分为两种模式(Model)：外部（External）和内部（Internal）。它们的主要区别就是可执行代码的类型以及执行方式的不同，External 指的是可以脱离 UG 环境而独立运行的可执行程序(EXE 文件)；而 Internal 则指在内部开发的程序的一个动态链接库（DLL 文件），只能

在 UG 环境下才能运行，可以看做是 UG 的子进程。

(1) 外部模式程序开发一般格式

在调用访问 UG 格式数据函数以前可以不先打开 UG 的部件文件。

```
# include <uf.h> /****头文件****/  
  
int main ( int argc, char **argv )  
{ /**** 定义变量，如： int i; char s; **** */  
    UF_initialize();  
    /****应用程序代码，如： uc1601 ( “hello” , 1) ;**** */  
    UF_terminate ();  
}
```

这种模式得到的 DLL 文件，程序代码小，连接速度快，并可以与用户进行交互，实现了与 UG 的无缝集成。

(2) 内部模式程序开发一般格式

Internal UG/Open API 必须使用 ufusr 或 ufsta 函数（主函数）作为程序运行的接口，如下：

```
# include <uf.h> /****头文件****/  
  
Extern void ufusr ( char * param , int * retcod , int parm_len )  
{ /****定义变量，如： int i; char s; **** */  
    UF_initialize();  
    /**** 应用程序代码，如： uc1601 ( “hello” , 1) ;**** */  
    UF_terminate ();  
}
```

这种模式虽然调用灵活，但不能与 UG 图形界面进行交互，因此运行的结果不能显示在 UG 界面中，所以应用较少。

所有的 UG/Open API 程序必须正确使用 UF_initialize()和 UF_terminate()这两个函数来开始或者终止许可权限，否则容易发生未知错误。如上述外部和内部模式的应用程序的一般格式所示。

2、UG/Open Grip

Grip^[44] (Graphics Interactive Programming) 是属于 UG 内部开发语言的首选。GRIP 是一种解释性语言, 有点类似于 BASIC 和 FORTRAN, 具有与一般编程语言相同的结构。

GRIP 比 API 出现的要早, 在早期二次开始时的主要语言。利用 Grip 几乎可以实现 UG 交互界面的绝大多数功能, 如模型的创建、计算和分析、装配的建立、工程图的绘制等功能。在某些情况下, Grip 可以执行高级的自定义操作, 而这些操作的执行效率要比单纯使用 UG 交互界面的效率高很多。

3、UG/Open MenuScript

UG/Open MenuScript 不仅可以对 UG 系统菜单进行编辑, 也可以以无缝的方式对用户自定义菜单的设计和修改。应用 UG/Open MenuScript 编程自定义菜单有两种方法, 如下表 2-2 所示。

表 2-2 自定义 UG 菜单的两种方法

方 法	说 明
一、使用 Add-on 菜单文件	添加编辑量很小的的菜单文件到菜单文件的目录中, 使用 Add-on 菜单可以移出用户不需要的菜单项; 添加新的菜单和菜单项; 重新组织 UG 的菜单; 修改菜单和菜单项的标题; 为已经存在的应用按钮添加动态库和菜单文件
二、复制和编辑系统菜单文件	复制、编辑系统菜单文件并将其放置在特定的目录下, 覆盖原始菜单文件

方法二不推荐使用, 主要是由于编辑和维护相当复杂, 特别是对于像 ug_main.men 这种大型菜单文件。

4、UG/Open UIStyler

UIStyler^[40] 是 UG 提供的交互式对话框的设计工具, 它为软件开发者创造了所见即所得的可视化设计环境, 通过集成各类 UG 风格对话框界面, 以及开放各种 UG 控件的可操作性和可定制性, 实现了外部应用程序与 UG 的无缝连接, 保证了新界面在风格上与 UG 的一致。在用户完成自定义工具对话框的布局之后, UG/Open UIStyler 将自动导出相应的 C 语言模板文件, 只需在 VC 环境下对模板中的有关代码段进行简单的调用和修改, 就可以实现对应的功能, 用户能够借此避免重复性的

编码工作，提高系统的整体设计效率。UIStyler 对话框有三种调用方法：CallBack、Menu 和 UserExit，可分别实现对话框之间的嵌套调用、菜单栏调用和用户接口调用的操作。

2.3 系统开发关键技术

2.3.1 参数化设计技术

首先，在三维建模和工艺设计时，如何能方便地绘制并修改工艺部件是解决的关键问题。考虑到在本铸造工艺系统中，如浇注系统、冒口，冷铁等，通常涉及到的三维模型外形相似，因此可以通过参数化技术设计工艺部件，可以避免在这方面浪费的大量时间和精力。

1、参数化设计的概念

参数化设计^[45, 46] (Parametric Design) 是一种采用尺寸驱动的方式来改变几何约束构成的几何模型，参数求解比较简单，设计结果的修改受到尺寸驱动 (Dimension Driven) 的影响。以前来设计对象的结构形状比较定型的产品，现在需要参数的模型基本上都需要参数设计。设计原理如图 2-3 所示。

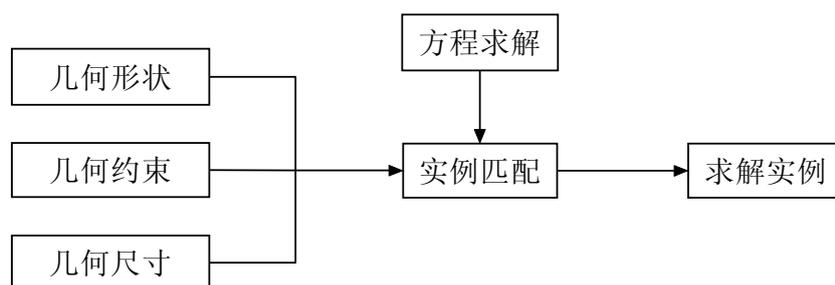


图 2-3 参数设计系统原理图

2、本系统参数化设计应用方向

(1) 基于特征和草图参数化

草图是 UG 特征造型的一个重要工具。草图设计具有很多优点：容易建立和修

改，特别是对于形状复杂的零件，可以建立多个具有约束关系的草图，使得模型建立就更加简单；草图绘制时不需要精确的绘制轮廓形状，然后通过添加几何约束来定义。但是使用草图时要注意的是草图约束时必须是全约束的，不然容易产生问题。

(2) 基于表达式(Expression)参数化

表达式是参数化设计的一个重要工具，用户可以使用表达式定义和控制模型的尺寸。一个表达式是一个定义关系的声明，所有表达式都有一个数值，表达式的数值将被赋给表达式的左边，即表达式的名称，它在一个部件中是唯一的，也可以用于其它表达式的值中^[47-49]。在零部件的设计过程中，设计者在模型的组成部分之间通过表达式来设计正确的关联和约束。通过API函数设计和获得表达式和在UG界面下的表达式是完全一样的。

(3) 基于属性(Attribute)参数化

属性是附加给部件或者对象的信息，一般用来对部件或对象进行解释或说明。属性不仅可以用来记录一般的信息如几何信息、时间/日期、引用等，还可以包括一些高级信息如工艺设计、产品制造信息等。这些信息随同模型一起保存在部件文件中，因此可以在建立具有相关的模型时使用。属性对于分模块开发的设计之间的参数传递和查找具有非常重要的意义。

(4) 基于电子表格(Spreadsheet)参数化

电子表格(如, Microsoft Excel 或 Xess)在UG的参数化设计中其实是与数据库相关联的,与UG之间有特定的接口。在建模或修改模型时,用户通过在电子表格内直接修改数据来实现,因此可以看做是一种高级的表达式,这是一种新的参数化设计方法,而且在需要标准制定模型时用处更大。在一定意义上实现了电子表格驱动UG设计的目的^[50]。

2.3.2 数据库技术及 ODBC (Open Database Connectivity)

大型风电球铁件铸造工艺 CAD 系统包括工艺参数、浇冒口、冷铁系统等诸多部分,每一部分都有对应的经验数据和标准数据,因此,本 CAD 系统在设计时将这些数据添加到数据库中,并设计成标准。在工艺设计时,用户可以方便的得到对

应的标准数据参数，在标准需要改变时，只需修改数据库的数据就可以实现，这极大地提高了工艺人员的设计效率。

本系统的数据库管理系统（DBMS）采用 Microsoft Excel 形式，原因有两个：一是因为在 UG 中数据的存储都是基于 Excel 形式，因此可以和 UG 数据上的统一；二是因为工艺尺寸数据量有限，不需要很大的 Excel 数据库就可以满足数据存储的要求^[51]。系统采用 Excel 设计的压边冒口数据库如表 2-1。

表 2-1 压边冒口数据格式库

D_R	H_R	D	l	a	h	M_r
100	100	85	75	38	35	1.89
200	200	145	125	82	52	2.34
300	300	180	140	86	56	2.76

2.3.3 模块间参数传递技术

本课题是分模块来开发的工艺 CAD 系统，各个模块具有不同的功能，彼此之间相对独立，这样有利于实现模块开发、测试和维护。但他们又是一个有机的整体，因此彼此之间会有共同的参数，为了整体性和各个模块的独立性，创建各个模块都所需的公共数据是必须的。

在设计球铁件工艺 CAD 系统中采用了 UG 对象属性来存储公共数据，通过对对象的属性访问操作读写数据，实现模块间的信息传递。UG/Open API 中提供的属性操作函数主要有设置对象属性 UF_ATTR_assign()、寻找对象属性 UF_ATTR_find_attribute()、读取对象属性值 UF_ATTR_read_value()、对象命名 UF_OBJ_set_name() 以及查询遍历 UF_OBJ_cycle_by_name() 等^[52, 53]。利用属性操作寻找对象的函数如下：

```
logical FindUgObject(tag_t ug_obj_tag, string attr_name, int attr_type, tag_t *object_out)
{
    if( ug_obj_tag == NULL_TAG || object_out == NULL )
    {
        uc1601( "Object required is null tag or third param is null", 1 );
        return false;
    }
}
```

```
char name_buf[UF_ATTR_MAX_TITLE_LEN+1];
sprintf( name_buf, "%s", attr_name.c_str() );
int is_found = FALSE;
tag_t object;
int title_type;
object = UF_OBJ_cycle_all( ug_obj_tag, NULL_TAG );
while( object!= NULL_TAG )
{
    UF_ATTR_find_attribute( object, attr_type, name_buf, &title_type );
    if( title_type == UF_ATTR_integer )
    {
        *object_out = object;
        is_found = TRUE;
        break;
    }
    object = UF_OBJ_cycle_all( ug_obj_tag, object );
}
if( is_found )
    return true;
else
    return false;
}
```

2.3.4 对象重定位技术

重定位技术的应用对于本系统也是一个关键。以冷铁系统为例，在程序中使用 UF_PART_import()函数将包含草图的文件导入。由于由人工导入的工艺部件位置大多数都不符合工艺要求，因此必须进行相应的移动，即重新定位。

重定位原理：

由图形学 OPENGL 的知识，对对象（图形）进行变换，归根结底就是要求得相应的变换矩阵，然后反求即可。UG 中进行三维变换的矩阵是一个 4×4 的实数矩阵，可用 T 表示，如下：

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

从变换功能上 T 可分为四个子矩阵，其中： $\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$ 为比例、旋转、错

切等几何变换； $[a_{41} \ a_{42} \ a_{43}]$ 为平移变换； $\begin{bmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \end{bmatrix}$ 为投影变换； $[a_{44}]$ 为整体比例变

换。获取重定位的方式就是准确获得重定位所需的基准轴和重定位增量，如旋转角度、平移距离，缩放比例等。

2.4 小结

本章主要对开发大型风电球铁件铸造工艺系统的流程和所用的关键技术进行了分析，这些技术和工具是本文的理论核心和开发保障。主要内容如下：

1、对铸造工艺设计的基本流程以及总体结构进行了分析；通过对铸造工艺的了解和对模块化的运用，是本系统的结构得以简化。

2、介绍了 UG 二次开发工具 UG/Open 各个部分的功能；特别是 UG/Open API 的使用方法。

3、研究了 CAD 系统开发的一些关键技术，主要包括：利用参数化技术建立冒口系统等相关模块图形库、利用 ODBC 管理冒口等标准数据库、利用 UG 对象属性操作实现模块间的参数传递、利用矩阵变换原理实现对象重定位。

3 大型风电球铁件铸造工艺 CAD 系统开发

3.1 主要工艺参数模块

大型风电球铁件铸造工艺参数设计的主要参数有分型面确定、机械加工余量以及铸件基本参数获取，借助本课题组多年的开发经验，其结构如图 3-1 所示。

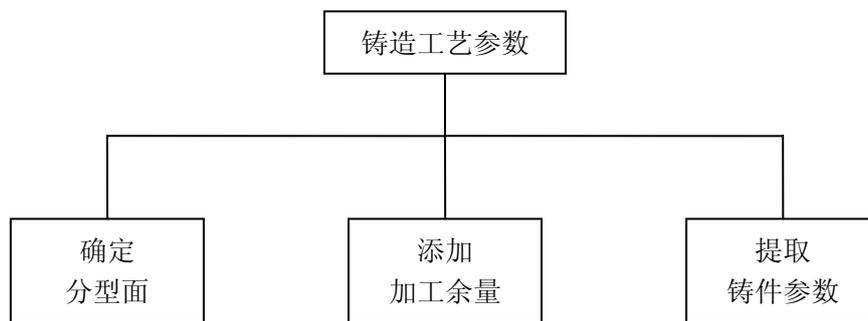


图 3-1 铸造工艺参数

3.1.1 分型面

铸造分型面是指铸型组元相互接触的表面。分型面一般是在确定浇注位置后再选择，尽量与浇注位置一致，这样可以使铸造工艺简化，利于保证铸件质量。另外分型面是可以重新修改变化的。

合理的选择分型面，对于简化大型风电球铁件铸造工艺、提高生产率、降低成本、提高铸件质量等有重要的关系。对不同结构的铸件，有着不同的分型面确定原则，选择分型面时，应注意以下原则^[54]，如表 3-1 所示。

表 3-1 分型面的确定原则

序号	确定原则
1	为减少误差：应使铸件全部或大部分置于同一半型内；把铸件加工定位面和主要加工面放在同一半型内
2	为利于取模：分型面应选择铸件最大截面处并避免使用活块
3	尽量减少分型面的数量。在机器造型中，一般采用一个分型面
4	应尽量使分型面是平面，必要时也可不做成平面
5	必须结合考虑造型、浇注、制芯等工艺方法
6	必须有利于铸件清理和机械加工量

在本工艺设计中，在造型方法是采用的是水平分型，且大部分分型面都为平面，也有几乎少量的为曲面分型，鉴于曲面分型比较复杂，在 CAD 实现上目前还具有一定的技术难度，本系统仅提供了简单的平面分型面设计，以绘制的基准平面作为分型面并进行上下模的文字标注。

3.1.2 机械加工余量

铸造时，铸件上为后续进行机械加工而预留的切除厚度被称为机械加工余量。铸件的机械加工余量一般都有国家标准规定。机械加工余量要适用于整个毛坯铸件，不同的铸造金属和铸造方法决定着不同的尺寸公差和加工余量的等级。加工余量的值应根据最终机械加工之后成品的最大轮廓尺寸来决定，并在相应的尺寸范围内选取，不宜过大也不宜过小。UG 生成加工余量的 API 函数为：UF_MODL_create_face_offset()，程序处理流程如图 3-2 所示。

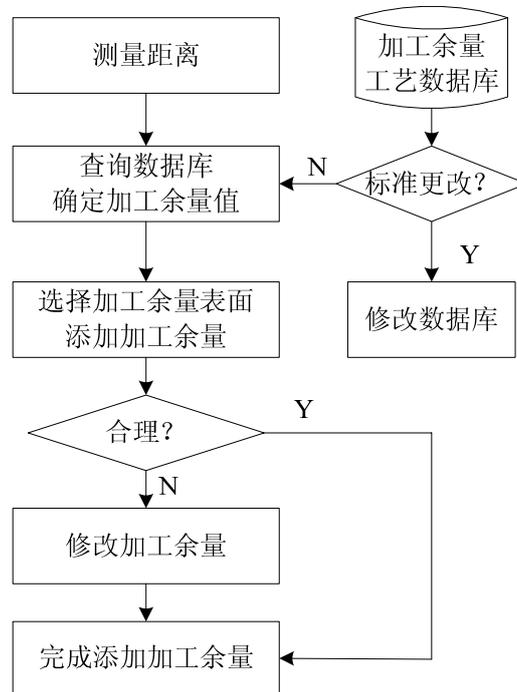


图 3-2 加工余量程序设计流程

3.1.3 提取铸件参数

铸件参数设计包括铸件的材质，密度，重量，体积（各个方向的长度）及浇注所需液体金属的总重量，这些参数对于后面模块如冷铁、冒口等需要计算铸件模数和浇注系统模块计算浇注时间有重要作用。本系统的铸件为球墨铸铁，密度可知，通过 UG 提取铸件的体积可以计算出铸件的重量，然后根据工艺出品率可以大致计算出所需金属液的重量。本模块设计原理：允许用户输入铸件密度和工艺出品率；利用 OpenAPI 函数获取铸件 X、Y、Z 方向的轮廓尺寸；计算铸件的体积和重量；最后获得浇注所需铁液的总重量。其中铸件的轮廓尺寸采用了最小包容盒原理。

3.2 冷铁设计模块

3.2.1 冷铁系统概述

冷铁是指为增加铸件局部冷却速度的在型内或表面放置的金属块，铸造生产中常将冷铁、冒口和浇注系统配合使用，合理的控制铸件的凝固，以获得优质的铸件。

冷铁按照放置位置不同可以分为内外两种形式。放置在型腔内的为内冷铁，一般与铸件熔合为一体；放在模样表面上的称为外冷铁。内冷铁铸造最终成为铸件的一部分，使用时一般和铸件的材质相同，外冷铁一般可回收并能重复使用。由于厚大型球墨铸铁件容易产生石墨漂浮现象，容易形成粗大石墨球，将影响铸件的机械性能。球墨铸铁石墨化自补缩能力很强，所以很少使用内冷铁，但是必须在自补缩不能消除缩孔的壁处设置外冷铁^[34]。

冷铁的作用有：

- 1) 与浇注系统和冒口配合控制铸件凝固次序；
- 2) 在冒口难于补缩的部位防止缩孔、缩松；
- 3) 防止壁厚交叉部位及急剧变化部位产生裂纹；
- 4) 减轻或防止厚壁铸件中的偏析；
- 5) 加速铸件的凝固速度，细化晶粒组织、提高铸件的力学性能。

3.2.2 冷铁材料的选择

在生产中常用的冷铁材料有铸铁、铝合金、石墨和铜合金等，各种冷铁材料的热物理系数不同，铸铁冷铁的热容量较大，可以吸收较多的热量，有比较强的激冷能力，而且制作方便、成本低廉；铝质冷铁热传导率较大，激冷速度快，但是熔点较低，在受金属液包围时容易和铸件熔合在一起；铜合金冷铁的传导率更大，激冷作用更强，但是价格贵，材料比较短缺；石墨冷铁具有比重轻，耐火度高，导热系数大，使用石墨冷铁可以较好的解决球铁件的缩孔、缩松问题，并能有效的解决金属冷铁产生的白口、气孔等铸造缺陷。本系统模块根据以上材料优缺点和工厂的实际经验选择了石墨冷铁和铁冷铁两种冷铁材料。

3.2.3 参数化冷铁设计

本系统采用 OpenAPI 和 MFC 混合编程来实现，所以本模块的主要功能设计主要来源于工厂的实际操作，首先选择冷铁材质（通用石墨冷铁和铁冷铁），每种冷铁材质都对应几种冷铁形状规格（如扇形、长条形等），每种形状规格下面还对应几种车间编号，并且冷铁的参数可以修改。

3.3 冒口设计模块

3.3.1 冒口系统概述

冒口^[54]是指在铸型内人为设置的存储金属液、具有补缩铸件的结构体，主要用来防止缩孔、缩松产生。此外还有出气、集渣和引导充型的作用。冒口系统设计的主要内容有：1、冒口位置的确定；2、冒口形状的确定；3、冒口尺寸的确定。其中内容1和2都是根据实际生产设定的，特别是冒口位置的优化也是目前铸造的难点之一，本系统仍然采用人工定位，而内容3是需要科学的设计，也最为复杂的，本冒口系统主要研究内容的就是冒口的尺寸。

球铁件凝固特点：球墨铸铁在凝固过程中析出石墨并伴随相变膨胀，有一定的自补缩能力，因而缩松、缩孔的倾向性较铸钢件小。国内目前有较为成熟的铸钢件的冒口设计软件，比如华中科技大学凝固模拟实验室开发的 HZCAD 软件，但是对于大型球铁件的补缩能力与铸钢件不同，因此又被必要设计一套适应大型风电球球铁件冒口设计系统。

3.3.2 冒口设计理论

合理的确定冒口尺寸，在铸造生产中是一个很重要的工艺问题。目前，还缺少适合各种金属、各种结构的、被大家所公认确定冒口尺寸的方法，往往是根据生产经验总结出来的近似算法，生产中常用的方法有：①收缩模数法；②控制压力法；③经验比例法。

1、冒口模数

铸件凝固时间决定于铸件体积(V)与传热表面积(A)的比值，这个比值称为“凝固模数”，简称模数(M)，即 $M=V/A$ 。铸件的模数在冒口尺寸的计算具有重要作用，它是铸件凝固时间长短的标志，一般情况下，冒口的模数在一定的比例范围内应大于铸件的模数，以保证冒口晚于铸件凝固。

有的结构复杂铸件，在计算铸件模数比较困难，解决此类问题的方法就是：将该铸件分割成几何形状简单的局部实体，通过计算局部实体的模数来确定冒口的模

数，这个局部实体的模数又叫做局部模数。可以通过公式(3-1)计算相应的局部铸件的模数：

$$M = \frac{V}{S - S'} \quad (3-1)$$

其中， M — 局部模数 (mm) ，

V — 局部实体体积 (mm^3) ，

S — 局部实体表面积 (mm^2) ，

S' — 非传热表面积 (mm^2) 。

采用铸件局部模数法设计的冒口，冒口补缩的位置和大小更加准确，因此大大提高了冒口的补缩作用。

冒口模数 M_r 可以通过计算铸件被补缩部位的局部模数 M_s ，进而根据表 3-2 算出冒口模数 M_r 。

表 3-2 冒口模数 M_r 与局部模数 M_s 的关系

<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">冶金质量</div> <div style="border-bottom: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 5px;">M_r/mm</div> </div>	$M_s < 10$	$10 < M_s < 25$	$M_s > 25$
好	$M_r = 0.6M_s + 1.524$	$M_r = 0.343M_s + 4.24$	$M_r = 0.51M_s$
中	$M_r = 0.8M_s + 1.524$	$M_r = 0.335M_s + 0.35$	$M_r = 0.59M_s$
差	$M_r = M_s + 1.524$	$M_r = 0.327M_s + 8.38$	$M_r = 0.66M_s$

2、冒口颈模数

(1) 直接压力冒口设法：适用于 $M_s \leq 0.48cm$ 的球墨铸铁，

冒口颈的模数 M_n 的计算公式

$$M_n = M_s \frac{t_p - 1150}{t_p - 1150 + \frac{L}{c}} \quad (3-2)$$

式中 M_n —— 冒口颈模数 (mm)

M_s —— 铸件的“关键模数”，是计算冒口时起决定作用的模数

ρ —— 铁液密度，约为（7g/cm³）

c —— 铁液比热容（0.835J/(g·°C)）

L —— 铸铁的溶化热（或结晶潜热 209J/g）

t_p —— 浇注温度（°C），浇注后铸型内铁液的平均温度

(2) 控制压力冒口设计法：适用于 $0.48\text{cm} < M_s < 2.5\text{cm}$,

采用短冒口颈，冒口颈的模数依下式确定

$$M_n = 0.67M_r \quad (3-3)$$

短冒口颈的截面形状可以选用圆形、正方形或矩形。

从上述不难看出，铸件被补缩部位模数是冒口尺寸设计的重要依据，直接关系到该铸件的冒口和冒口颈的尺寸。因此，如何准确获取局部实体的模数将是本冒口设计的关键。

3、具体设计实现

准确计算铸件的局部模数的前提就是如何获取铸件的局部实体，本系统采用空间截取体的方式实现，即创建一个空间体，得到该实体的有效体积和表面积，然后通过公式计算出该铸件的局部模数。本系统提供了三种基本形状的截取体：长方体形截取体、扇形截取体和圆柱形截取体和用户自定义形状的截取体。得到局部实体后，利用 UG/Open API 函数 UF_MODL_ask_mass_props_3d() 输出参数 mass_props[47] 得到局部实体的体积 V 和表面积 S ，减去非传热面积 S' 利用模数计算公式得到铸件局部模数 M_s 。得到铸件局部模数 M_s 后，根据其于冒口模数 M_r 的对应关系，从而确定冒口与冒口颈模数。

3.3.3 冒口设计

3.3.3.1 冒口设计流程

本模块的设计思路是：1、采用模数法确定冒口的模数：获取铸件的局部模数，通过公式计算冒口模数；2、选择冒口类型（发热或压边）；3、根据冒口模数查找

冒口数据库，系统将自动匹配一个较为合适的冒口（显示冒口模数及尺寸）；4、加载冒口，并调整位置和尺寸。整个冒口系统包括两个基本环节：铸件局部模数计算和冒口设计。冒口系统程序设计流程如图 3-5 所示。

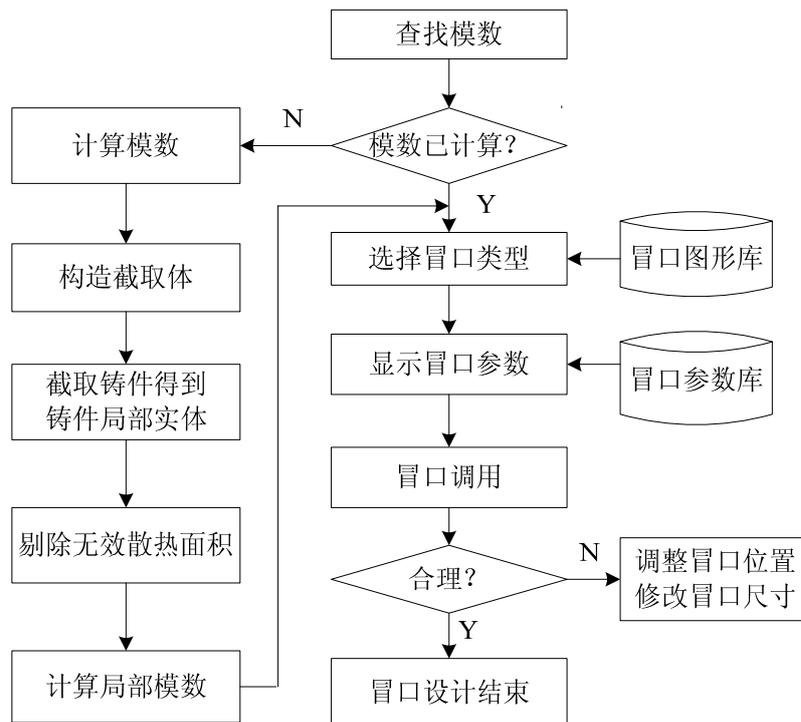


图 3-5 冒口系统程序设计流程

3.3.3.2 冒口类型及参数设计

由于大型风电球铁件冒口及其冒口颈设计的复杂性，没有通用的标准冒口形式，对于本系统而言，其冒口形式及参数来源于厂家内部使用的工艺数据。根据长期以来的生产工艺经验，总结出了两种常用的冒口：常规冒口（压边冒口）及顶冒口（发热冒口），系统对这两种冒口建立了图形库。同冷铁一样，对于同一类型的铸件，冒口数据一般不会改变，不同模数的冒口仅仅是尺寸有所差别，因此可考参数化设计成冒口标准件。本模块根据风电工厂内部常用标准制定冒口及冒口颈数据库，用户可以根据实际情况修改冒口参数以及冒口标准。

在设计冒口数据库时，系统将冒口模数、尺寸参数等标准数据都写入 excel 表格中，每次调用冒口时，都会将冒口的参数显示给用户，以参数驱动冒口尺寸。

3.4 浇注系统设计模块

3.4.1 浇注系统设计流程

浇注系统^[54]是为填充型腔和冒口而开设于铸型中的一系列通道。浇注系统大多由浇口杯（浇口盆）、直浇道、横浇道、内浇道等组元组成。浇注系统设计是本风电铸造工艺 CAD 系统设计的重要核心环节。

球墨铸铁件凝固的特点：铁液经过球化、孕育处理后温度下降很多，且易产生氧化。因此，其浇注系统要有两个特点，既能够大流量地输送铁液；且具有比灰铸铁更好的挡渣作用。因此，大型风电球铁件的浇注系统设计必须满足以下原则：

表 3-3 浇注系统设计原则

序号	原则	目的
1	引导金属液平稳、连续的充型	避免由于湍流过于强烈而造成夹卷空气、产生金属氧化物夹杂和冲刷型芯
2	充型过程中流动的方向和速度可以控制	保证铸件轮廓清晰、完整
3	在合适的时间内充满型腔	避免形成夹砂、冷隔、皱皮等缺陷
4	调节型腔内的温度分布	有利于强化铸件补缩、减少铸造应力、防止铸件出现变形、裂纹等缺陷
5	具有挡渣、溢渣能力	净化金属液
6	系统结构应当简单、可靠	减少金属液消耗、便于清理

此外，浇注系统设计时还需综合考虑铸件的结构特点、技术条件、铸造合金的特性、生产批量以及具体的生产条件等因素，因素不同，所设计的浇注系统的类型和结构不同，浇注系统所在的位置也不一样，内浇道数目和浇注系统各组元的截面比例和截面尺寸等也会有差异。本系统主要的设计内容是浇道的数目和尺寸，即内浇道的数量，各组元的截面比例和各个截面的形状和尺寸等重要参数。

图 3-6 显示了本系统浇注系统设计的大致流程。

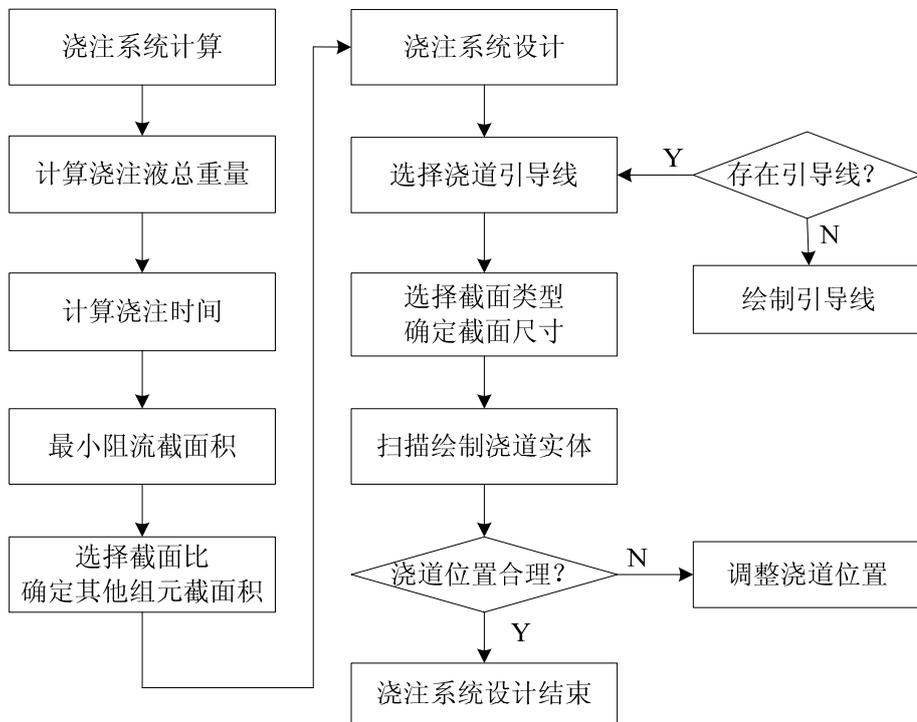


图 3-6 浇注系统设计流程

3.4.2 浇注系统参数计算

由于大型风电球铁件浇注系统的类型和形式以及布置都是生产中总结出来并具有很好的效果的，因此本系统主要在此基础上计算浇注系统各单元的尺寸。尺寸设计步骤：先确定浇注系统的阻流截面（最小截面），对于开放式浇注系统（本模块的选择），阻流截面是内浇道前的某个位置截面；然后按照经验比例关系确定其他单元的截面。

3.4.2.1 各组元截面积比

截面比例可以参考以下经验比例：

(1) 一般球铁件采用封闭式浇注系统：

$$\Sigma A_{内} : \Sigma A_{横} : \Sigma A_{直} = 1 : (1.2 \sim 1.3) : (1.4 \sim 1.9)$$

(2) 厚壁球铁件采用开放式浇注系统：

$$\Sigma A_{内} : \Sigma A_{横} : \Sigma A_{直} = (1.5 \sim 4) : (2 \sim 4) : 1$$

或 $(1.2 \sim 2.0) : (1.2 \sim 2.0) : 1$

(3) 薄壁小型球铁件多采用半封闭式浇注系统:

$$\Sigma A_{内} : \Sigma A_{横} : \Sigma A_{直} = 0.8 : (1.2 \sim 1.5) : 1$$

由于风电球铁铸件普遍都属于重量较大、壁厚较大、轮廓较大,因此选择开放式或半开放式浇注系统是合理的选择。截面比例确定之后,关键就是获取阻流面积。

3.4.2.2 阻流截面计算

根据本工艺对象选择大孔出流理论计算阻流截面,采用截面比设计法:

$$A_{内} = G_L / (\mu t \rho_L \sqrt{2gh_p}) \quad (3-4)$$

式中 $A_{内}$ —— 浇注系统最小截面积(cm^2)

G_L —— 流经 $A_{内}$ 截面的金属液总重量(kg), 即浇注液总重量

ρ_L —— 金属液密度(kg/cm^3)

μ —— 流量损耗系数, 一般为 0.3~0.7

t —— 浇注时间(s)

g —— 重力加速度($g=981\text{cm}/\text{s}^2$)

h_p —— 平均计算静力头 (cm)

由公式可以看出, 上式中的 G_L 、 t 、 H_p 等各项数值决定着阻流截面的大小, 因此如何准确确定上述参数将十分关键。流量损耗系数 μ 的计算不但非常繁琐, 而且计算结果也不会非常准确, 所以采用多次实验的方法或根据生产经验来确定, 计算中一般取为 0.3~0.7。

1、浇注液总重量 G_L

$$G_L = \rho_L V g / w \quad (3-5)$$

式中 ρ_L —— 铸件的密度(kg/cm^3)

g —— 重力加速度($g=981\text{cm}/\text{s}^2$)

V —— 铸件体积(cm^3)

w —— 工艺出品率

铸件的体积可由 API 函数 `UF_MODL_ask_mass_props_3d()` 获得, 工艺出品

率是指铸件的重量与铸件及浇冒口总重量的比值，工艺人员可以事先确定。

2、浇注时间 t

充满铸件浇注系统和型腔所需的时间称为浇注时间。影响浇注时间的因素有：铸件结构、材质、铸型条件、浇注温度等。一般根据铸件的重量来确定。大型风电球铁件浇注时间的确定可按灰铸铁浇注时间计算方法确定，然后减少 1/2~1/3，灰铸铁浇注时间计算如下：

(1) 对于重量小于 10000kg 以下的中、大型铸件，浇注时间按以下公式计算：

$$t = S_1 \sqrt[3]{G_L} \quad (3-6)$$

式中 t —— 浇注时间(s)

G_L —— 型内金属液总质量(kg)，包括浇、冒口系统重量

S_1 —— 一般情况下 $S_1 = 2$

(2) 对于重量大于 10t 重型铸铁件，浇注时间可按公式 (3-7) 计算

$$t = S_2 \sqrt{G_L} \quad (3-7)$$

式中 G_L —— 型内金属液总质量(kg)

S_2 —— 系数，与铸件壁厚有关，见表 3-4

表 3-4 系数 S_2 与铸件壁厚的关系

铸件壁厚/mm	<10	10 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 80
系数 S_2	1.1	1.4	1.7	1.9

3、平均静压头高度 H_p

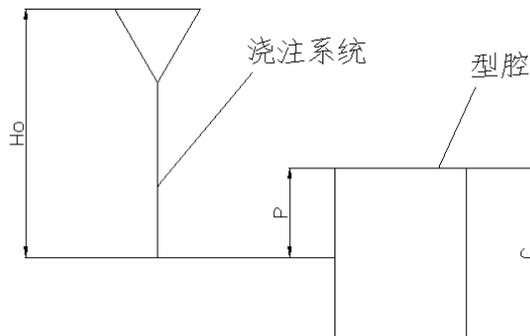


图 3-7 平均压力头计算公式中各物理量的实际意义

平均静压头高度与浇注形式和铸件的浇注位置等因素有关，由公式(3-8)准确计算出，各物理量的意义如图3-7所示：

$$H_p = H_0 - \frac{P^2}{2C} \quad (3-8)$$

式中 H_p —— 平均计算压力头，单位为毫米，以下同

H_0 —— 阻流截面以上的金属液面高度

P —— 阻流截面以上的型腔高度

C —— 铸件在浇注位置总高度

对于底注式： $P=C$ ，故

$$H_p = H_0 - \frac{P}{2} \quad (3-9)$$

对于中注式： $P=C/2$ ，故

$$H_p = H_0 - \frac{P}{4} \quad (3-10)$$

对于顶注式： $P=0$ ，故

$$H_p = H_0 \quad (3-11)$$

3.4.3 浇道设计

在实际应用上，对于大型铸铁件为了更好的利于浇注液体的流动，风电铸造生产厂商直浇道选择不同直径耐火管材料拼接而成，规格如表3-5所示。在横浇道或直浇道设置了纤维过滤网，浇道结构比较复杂。

表 3-5 部分直浇道耐火管规格

种类	规格
直管	$\phi 120$ 、 $\phi 100$ 、 $\phi 80$ 、 $\phi 70$ 、 $\phi 60$ 、 $\phi 50$ 、 $\phi 40$ 、 $\phi 30$

为了能更好的与实际生产结合，本系统设计了圆形截面（主要作为横浇道）、阶梯圆型（主要作为直浇道截面），如图3-10，披缝浇道，如图3-9，三种形式的浇

道和过滤网模块如图 3-8。

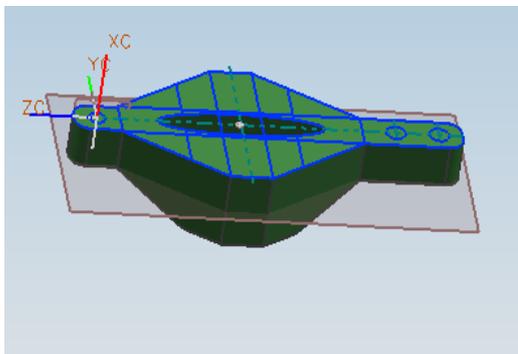


图 3-8 过滤网模型

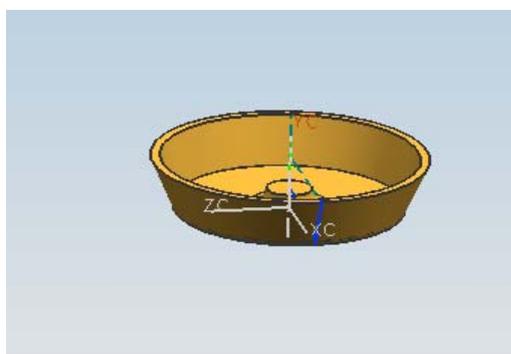


图 3-9 披缝浇道（内浇道）

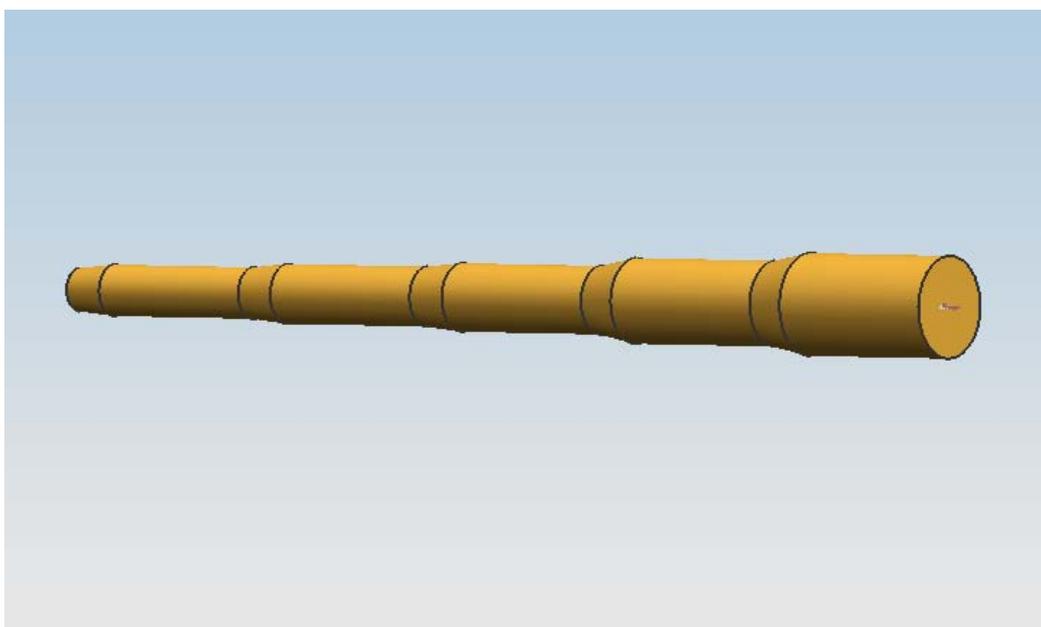


图 3-10 直浇道模型

本模块分为通用浇道设计和实用浇道设计。

通用浇道设计：对于普通的要求简单的浇道，用户事先利用 UG 的曲线功能绘制浇道引导线，然后选择浇道截面形式，根据计算所得的浇道截面积确定截面参数，系统自动完成浇道实体的扫描绘制。

实用浇道设计：对于结构复杂的浇注结构，系统将每种组元都单独设置成一个参数化的标准件，浇道截面和长度采用参数化设计，用户加载组元其实就是调用标准件，不论是否修改参数都将会生成一个新的实体。

在参考工厂工艺人员的经验和初步研究后，实用浇道设计的步骤如下：

1、选择分型面，放置过滤网：选择分型面的主要目的在于确定过滤网平面，因为在铸件的浇注过程中，过滤网平面和分型面是重合的，分型面的确定也决定了上直浇道的长度；在确定好过滤网平面之后，就需要确定过滤网的具体位置，系统先给过滤网设定一个初始位置，用户可以通过 curve 功能设定基准点和基准方向，初始位置确定之后，既可以加载过滤网；另外，可以根据实际情况做重定位。

2、确定披缝浇道：由于本浇道比较复杂，因此在工艺上确定好直浇道之后接下来确定披缝浇道的位置，披缝浇道的位置比较简单，一般与过滤网平面平行。披缝浇道位置确定之后，即可大概测得下直浇道的长度和横浇道的参数，为后面浇道的总体布局奠定了基础。

3、测量上下直浇道长度，并加载上下直浇道，此模块也可进行参数修改。

4、最后采用通用化设计模块生成横浇道。

3.5 小结

本章详细分析了系统各个模块的开发原理和流程，研究内容如下：

1、介绍了铸造工艺参数设计的内容和设计流程：分型面、加工余量、铸件参数获取，此模块的主要作用是方便设计整个铸造工艺。

2、介绍了冷铁系统的设计方法和流程，在冷铁材料和车间编号上设置了不同的规格。

3、详细的阐述了冒口系统设计理论和流程，以模数法来设计冒口和冒口颈尺寸，并给出了具体的计算公式，使得冒口部分更为科学。

4、重点介绍了浇注系统的设计理论和流程，根据大型球铁件的凝固特点，通用浇道模块采用截面比法设计了各浇道的截面尺寸；另外，在浇道设计上考虑到风电铸造的实际生产情况，特别设计了专门的浇注系统。

4 大型风电球铁件工艺系统功能及应用

4.1 系统菜单及工程初始化

系统对话框采用 Menu 菜单调用方式，使用 UG/Open Menu Script 工具编制的系统菜单如图 4-1 所示。

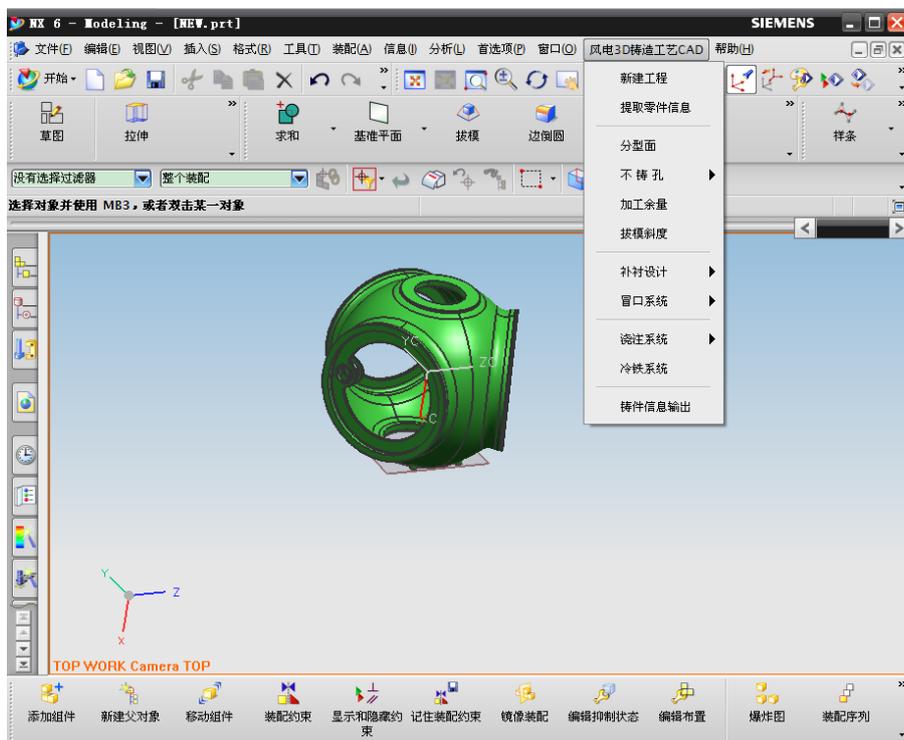


图 4-1 系统菜单

系统在进行设计工艺之前需要加载一个 part 零件，工程初始化模块负责载入零件。具体操作如下：单击“新建工程”按钮，系统弹出“工程初始化”对话框，如图 4-2 所示，对话框列表区域显示了当前界面中已经打开的部件文件，还可以显示部件文件的本地存放路径，如果需要加载其他铸件，则点击“选择其他铸件”按钮即可。选中“选择时改变视图”按钮，则可以方便的在打开过的零件之间进行切换（视图切换）。在零件选取并打开后就可以进一步设计工艺。

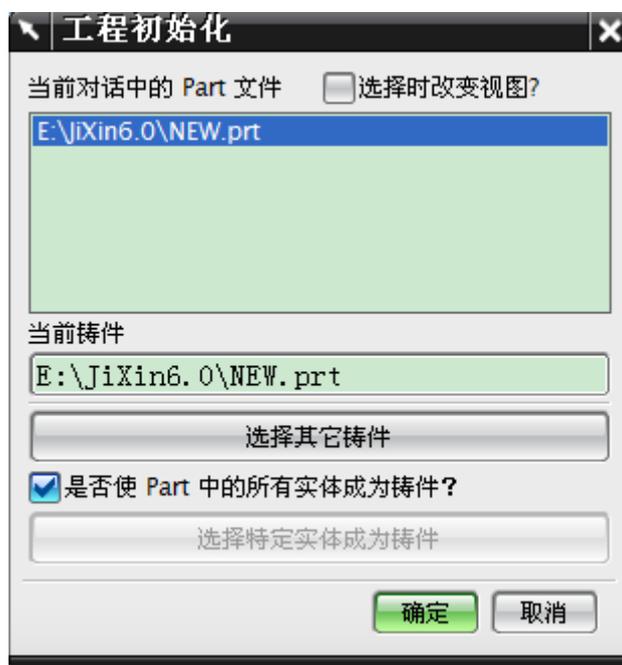


图 4-2 工程初始化

4.2 主要工艺参数设计

4.2.1 分型面设计

本系统提供简单的平面分型面的设计界面如图 4-3 所示，用户首先需要确定分型面的位置，然后以类似构造基准面的方式构造分型面或者直接选取面或基准面，添加分型面“上模”和“下模”标识，利用系统设计的分型面如图 4-4 所示。

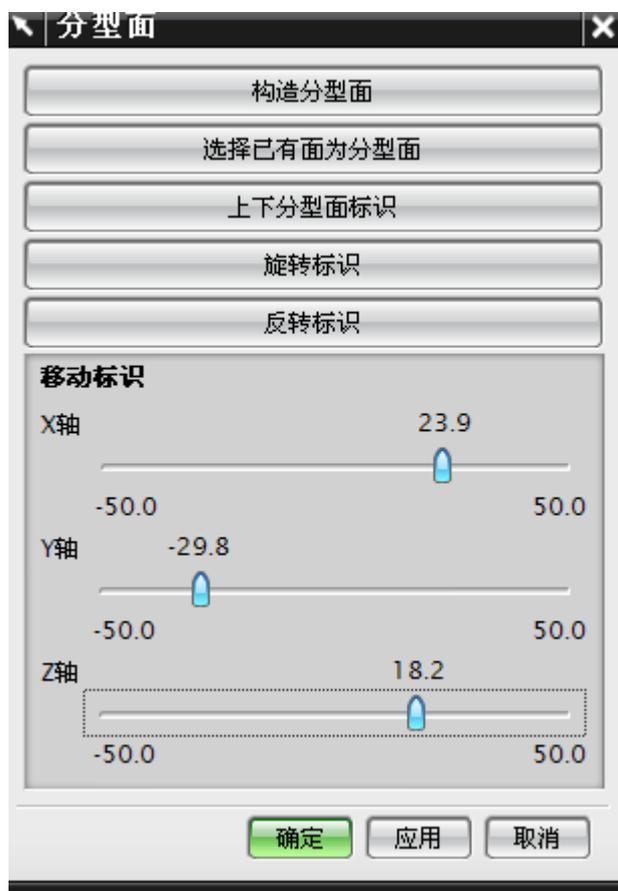


图 4-3 分型面设计对话框

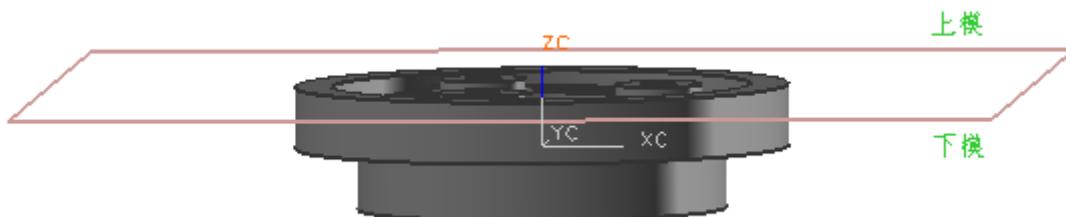


图 4-4 分型面设计结果示意图

4.2.2 添加加工余量

用户首先需要测量最终机加工后铸件的最大轮廓尺寸，系统自动查询数据库得到加工余量的值，然后选择要添加加工余量的表面，实现添加加工余量的工艺，系统还提供了用户修改和删除加工余量的功能。系统加工余量设计界面及设计结果如图 4-5 所示。

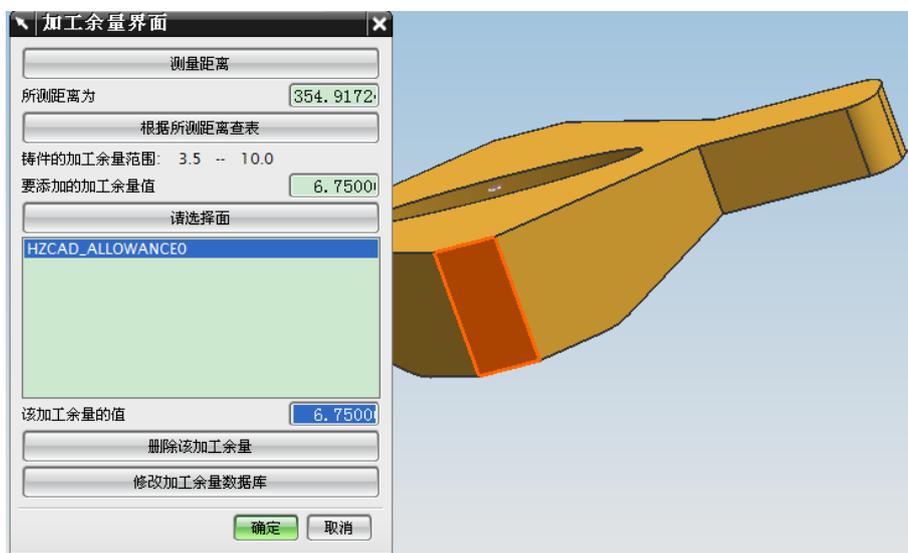


图 4-5 加工余量设计对话框

4.2.3 提取铸件参数

为了后面设计冷铁、冒口系统和浇注系统所需的铸件信息，用户可以事先输入铸件密度和工艺出品率，然后选择铸件，则可以得到整个铸件的体积和重量参数，并根据工艺出品率计算出大致的浇注总重。铸件参数的设计界面如图 4-6 所示。

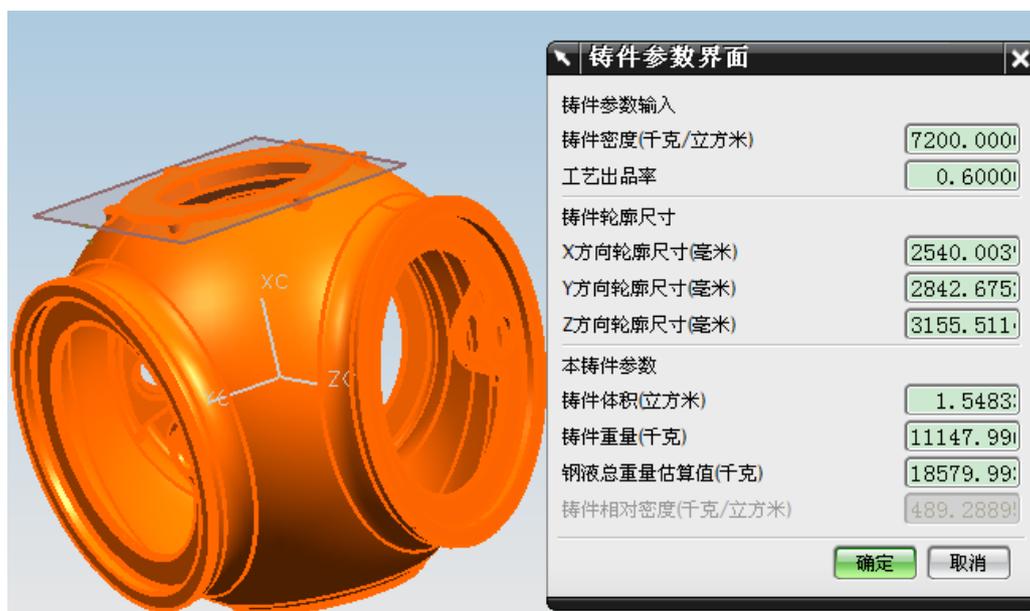


图 4-6 铸件参数设计对话框

4.3 冷铁系统设计

此部分的主要功能是基于参数化的冷铁绘制，放置到铸件上合适的位置。冷铁的型号来源于工厂的部分实际运用，当然总的类型远远不止设计的几种，该冷铁系统还需要进一步完善，在用户需求方面要更加明确，操作需要更加简洁。

设计界面如图 4-7 所示。

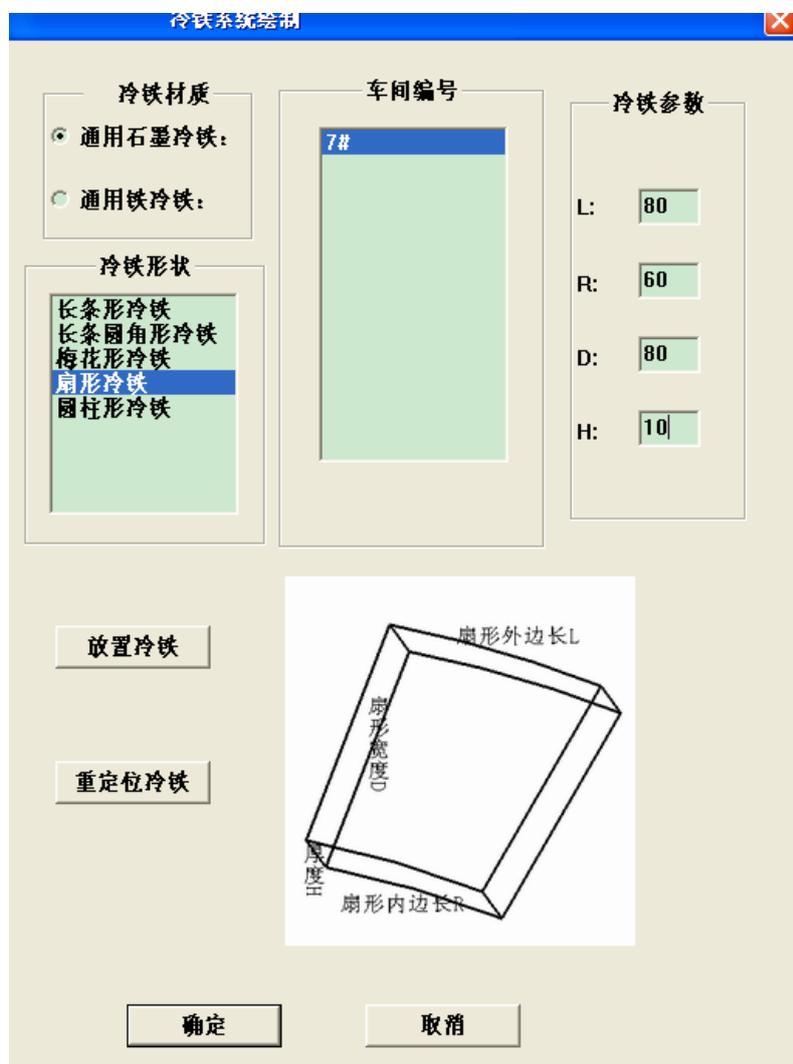


图 4-7 冷铁绘制对话框

放置冷铁模块是利用 UG 提供的点构造器对话框，如图 4-8 所示。通过各种方法确定一个精确地点，点击确定即可。



图 4-8 选择合适的点

其中重定位模块是后面浇注系统和冒口设计都会用到的。先做稍微介绍：首先会提示选择所需重定位的实体，然后根据前面重定位原理，以此选择平移或者旋转变换，平移变换矩阵的 API 函数是 `uf5943`，旋转变换矩阵的 API 函数是 `uf4945`，这两个函数使用的关键就是正确获取函数体内相应的参数，图 4-9 所示的对话框就是获得相应参数的实现方法，获得相应矩阵之后通过 `uf5947` 来实现相应的重定位。

首先选择冷铁材质类型，再依次选择冷铁形状和车间编号，系统会显示该具体冷铁的各种参数，如果满足需求，则点击放置冷铁，冷铁将被加载到铸件中，如果位置不合适，则可以通过重定位冷铁，实现冷铁的正确定位。

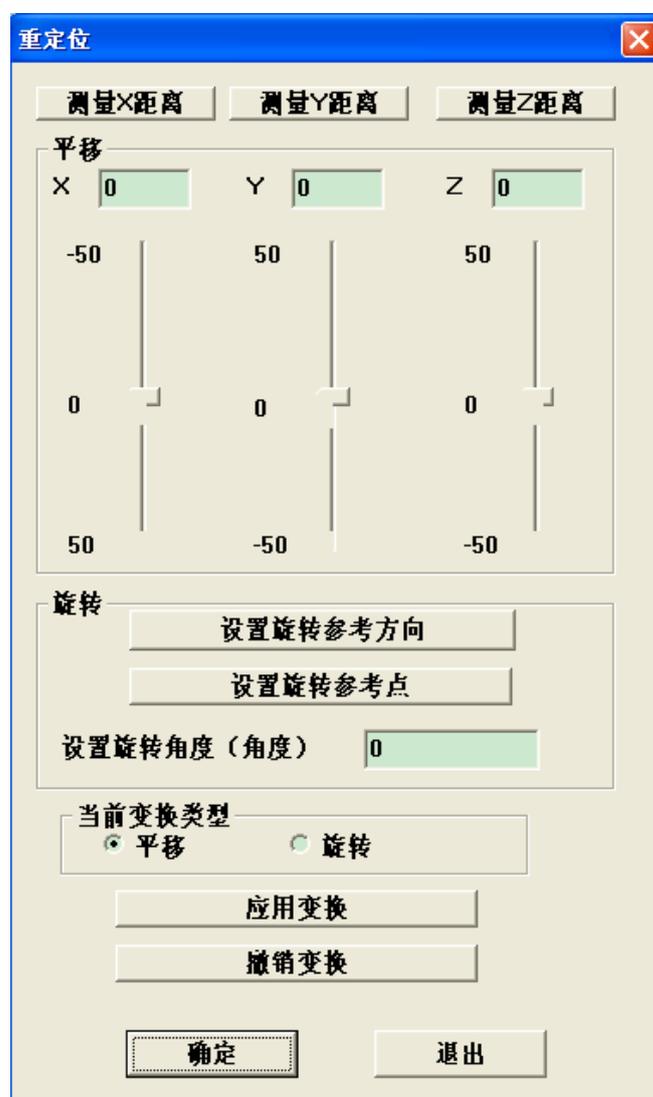


图 4-9 重定位模块

4.4 冒口系统设计

4.4.1 计算模数

本系统设计了冒口局部模数的方法。首先选择安放冒口的铸件；然后构造截取体来分割冒口附近的局部铸件，运用 UGAPI 函数求得局部铸件的体积，表面积；最后再进行非散热面的剔除，获得局部铸件的散热表面积，进而通过公式计算出铸件的局部模数，以供添加冒口时查询对应的数据库。本模块提供了四种形式的截取体以满足多种形状的要求：长方体形截取体、扇形截取体、圆柱形截取体以及用户

自定义截取体。系统还提供了简单求取模数的功能可以方便求取用户指定的截取体或者铸件的局部。模数计算及截取实体工具对应的对话框分别如图 4-10 和图 4-11 所示。



图 4-10 模数计算对话框



图 4-11 截取体类型选择对话框

4.4.2 冒口绘制

系统针对大型风电球铁件实际生产情况设计了两种形式的冒口：压边冒口和发热冒口。冒口的尺寸采用参数化设计。绘制原理如下：设冒口模数为 M_r ，冒口颈模数为 M_n ，依据所求的铸件局部模数 $M_s = 1.4793$ ，则根据表 3-1 与公式 3-1，有 $M_r = 0.6 * M_s + 1.524 = 2.4116$ ， $M_n = 0.67 * M_r = 1.6158$ ，通过查询数据库选择最相近的冒口模数对应的冒口及冒口颈的具体尺寸，如图 4-12 所示。冒口确定之后点击添加冒口，即可在铸件上绘制冒口。

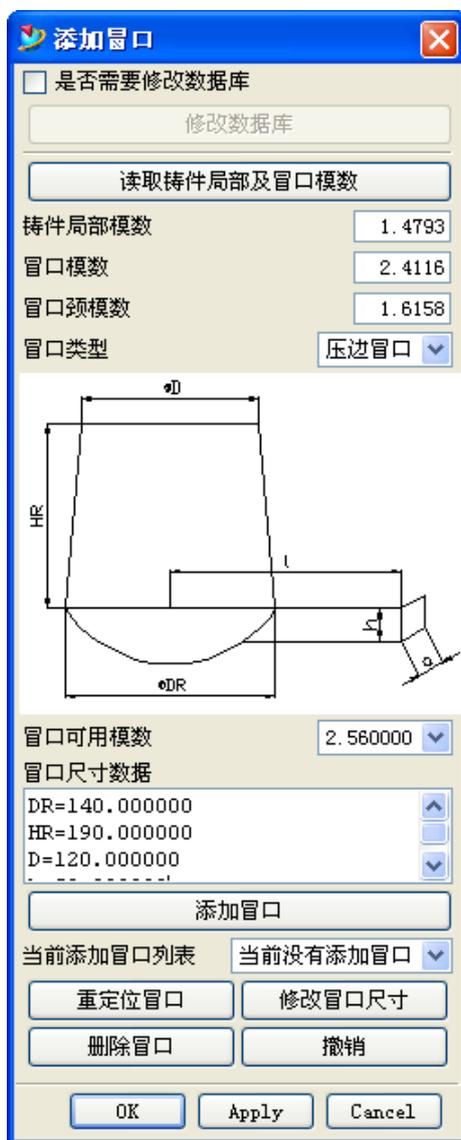


图 4-12 冒口调用对话框

但是由于冒口位置的确定目前难以自动优化，冒口尺寸有时需作修改，本系统在添加冒口的同时提供了修改尺寸和重新定位的功能，修改冒口的主要功能是修改冒口及冒口颈的尺寸参数，如图 4-13 所示；而重定位冒口则是为了确保将冒口放置到合适的位置而设计的，如图 4-9 所示。通过这两个功能可以比较准确的放置冒口修改冒口和冒口颈参数。



图 4-13 冒口参数修改对话框

经过冒口尺寸和位置的修改，冒口安放如图 4-14 所示。

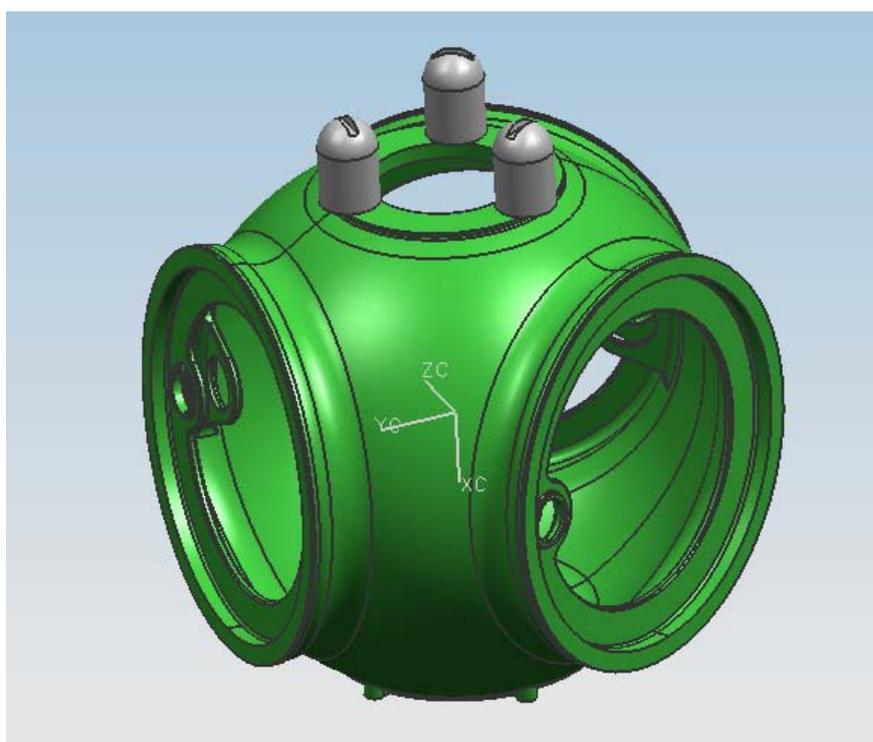


图 4-14 冒口添加的最终结果

4.5 浇注系统设计

考虑到大型风电球铁件浇注系统的特点，本系统设计了通用浇注系统和实用浇注系统。如图 4-15 所示。

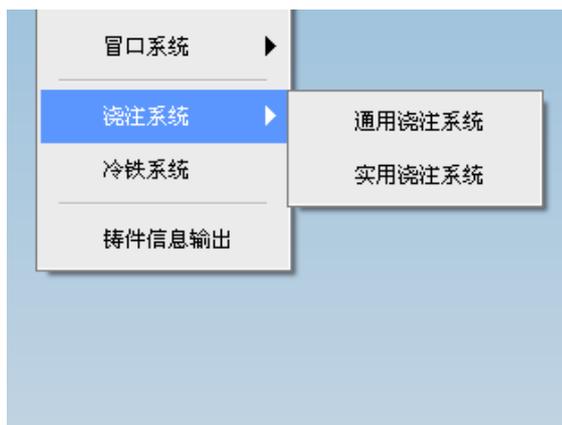


图 4-15 浇注系统模块

4.5.1 通用浇注系统

本浇注系统适用于浇注系统（主要是指浇道截面）比较简单的铸件，包括浇注系统计算和浇注系统绘制两大部分，总体界面如图 4-16 所示。

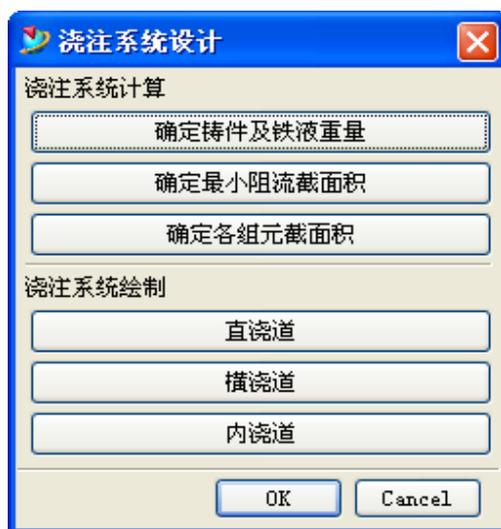


图 4-16 浇注系统模块对话框

浇注系统计算用于准确获得浇注系统各浇道的截面尺寸。首先，工艺系统需要知道浇入系统的铁液总重量，用户在铸件参数界面可以获得铸件和铁液的重量，

得到浇注液重量后，通过输入流量损耗系数，平均静压头等各项参数，系统依据公式自动计算得到浇注时间和最小阻流截面积如图 4-17 所示，选择合适的截面比，得到浇注系统各组元的截面积，如图 4-18 所示。

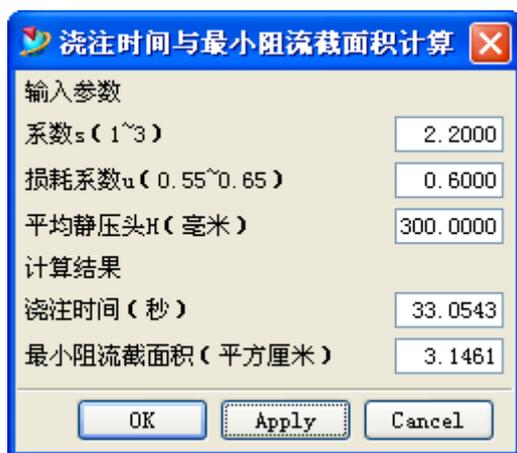


图 4-17 最小阻流截面积

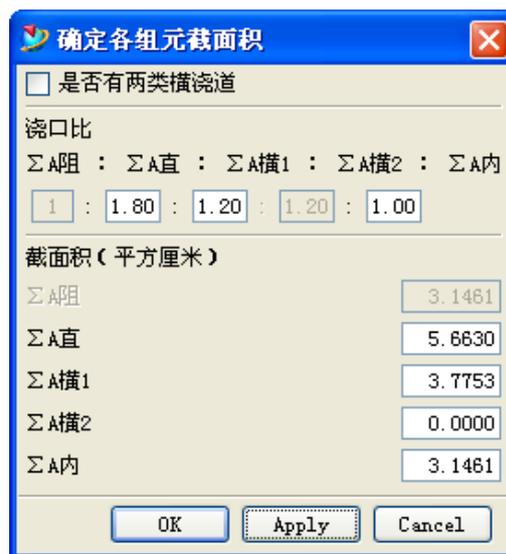


图 4-18 各组元截面积

系统实现绘制浇道，需要用户事先提供扫描引导线，这可以使用 UG 自身的曲线(curve)功能绘制，如图 4-19 所示。

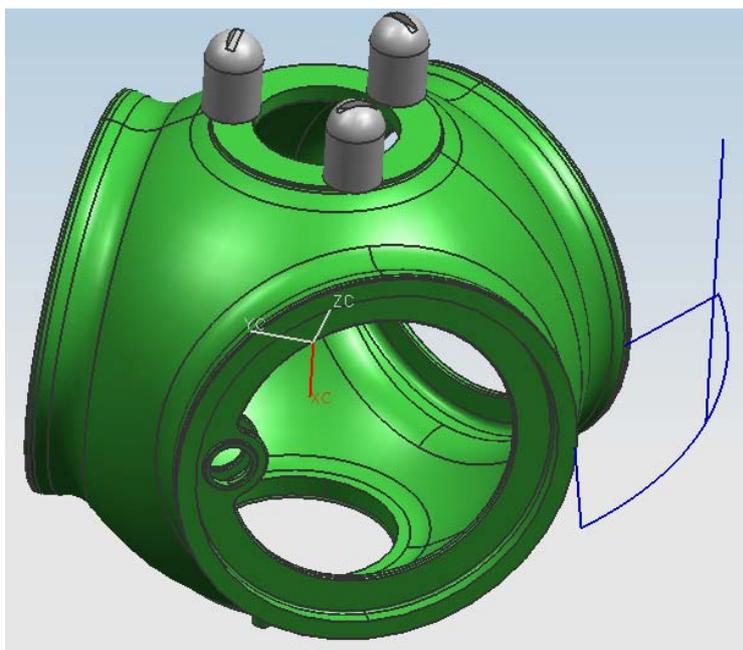


图 4-19 绘制引导线

得到引导线后，可以根据实际情况选择相应的截面类型（本系统设计了圆形截面和梯形截面），截面尺寸也采用参数化设计，方便用户自行修改。系统会根据之前计算的阻流截面计算出各个浇道的截面积自动匹配一个合适的截面尺寸，如图 4-20 所示。

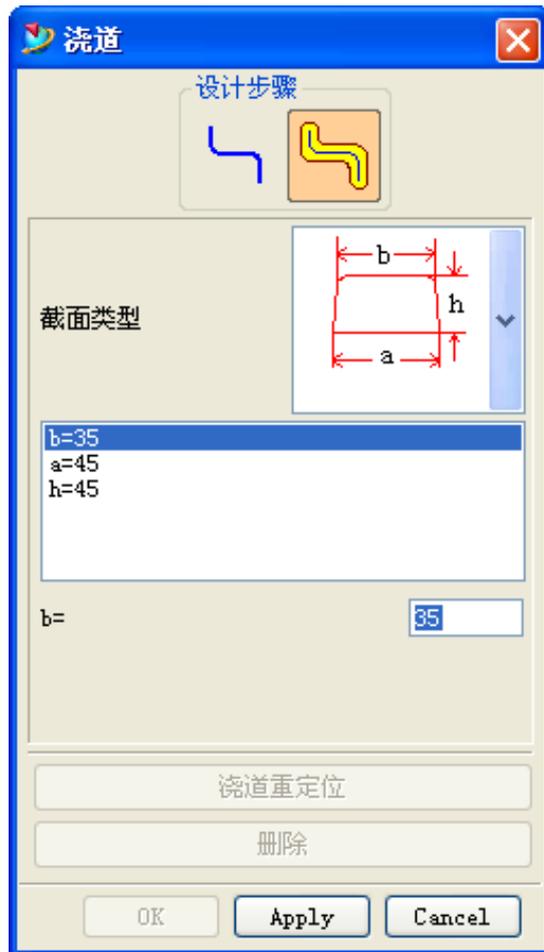


图 4-20 确定截面类型及尺寸

编辑浇道尺寸后，点击确定即可绘制。利用重定位的功能，可以实现浇道的移动和旋转，使浇道置于合理的位置，如下图 4-21 所示。

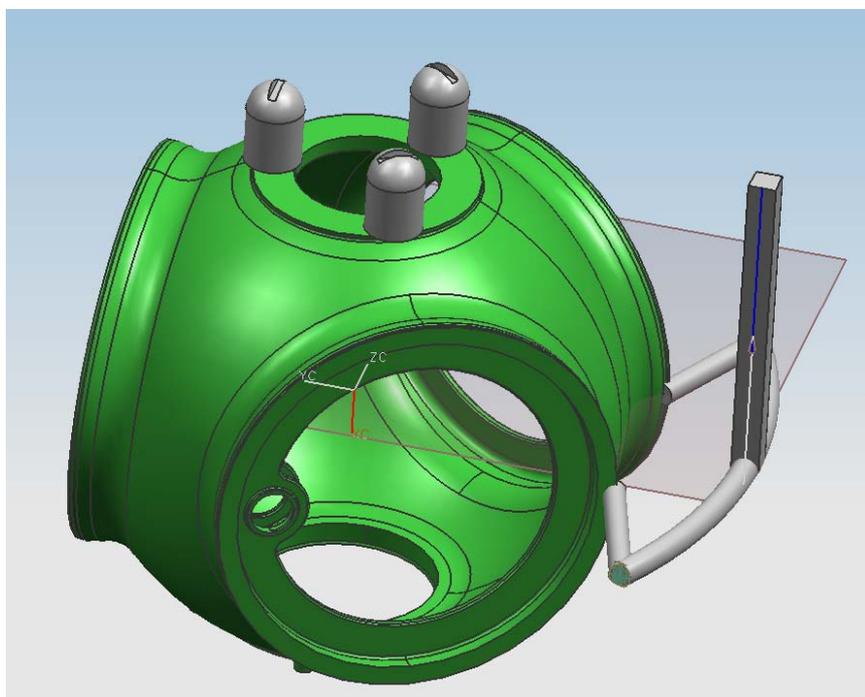


图 4-21 绘制浇道

4.5.2 实用浇注系统

以大型风电球铁件典型例子 1.5WM 的轮毂为例。该浇注系统具有一定的特殊性：直浇道分为上下两个部分，中间以过滤网连接，并且直浇道是由直径不同的耐火陶瓷管拼接而成；横浇道部分是环形弯曲的；并且具有环形的披缝浇道。这对于采用通用浇道只能绘制其横浇道部分，因此有必要采用专用的浇道设计。

由于此系统浇道系统结构比较复杂，所以采用引导线扫描的方式有很大难度；而且此浇道的各模块的形状和参数基本不变，因此这部分模块将采用参数化加载模式：即先用 UG 将过滤网，上下直浇道，横浇道和披缝浇道统一标准性建模，即加载进入的浇道模型，进入系统之后将由重定位和修改参数的方式进行正确的绘制和修改。

总体操作流程如下：确定好浇注位置以后，选择合适的分型面，依次载入过滤网并确定好位置和披缝浇道，然后根据过滤网和披缝浇道以及铸型来计算直浇道和横浇道的长度；最后分别绘制上下直浇道，横浇道。

流程图如 4-22 所示。

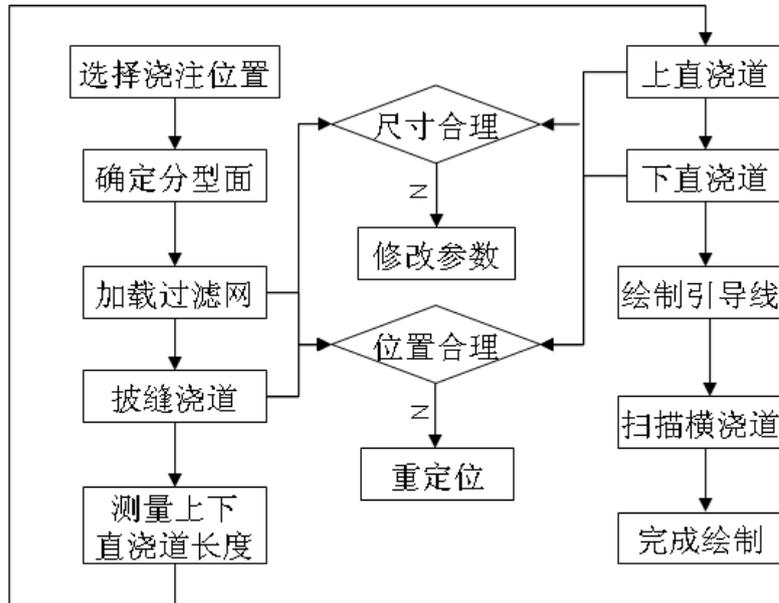


图 4-22 实用浇道绘制流程

1、加载过滤网模块

在参考了工厂实际之后，过滤网是本系统必须要添加的模块。考虑到过滤网的型号较少而且参数变化不大，设计了三种型号，以风电功率为后缀区分，这样可以方便工艺人员理解和操作。另外过滤网上还设计了上下直浇道的定位中心。

本系统过滤网的位置与分型面的选取有关，即在过滤网模型上的坐标系与分型面所在的坐标系一致，这样可以在加载时自动优化部分位置方向，使重定位只发生在分型面上，这样就减少了工艺人员的手动操作。系统还设计了过滤网中心与轮毂的距离，这样方便工艺人员大致确定过滤网的位置。还可以人工构造定位点，同样可以大致确定过滤网的位置。

定位点确定之后选择放置过滤网，并重定位之后结果下图所示。

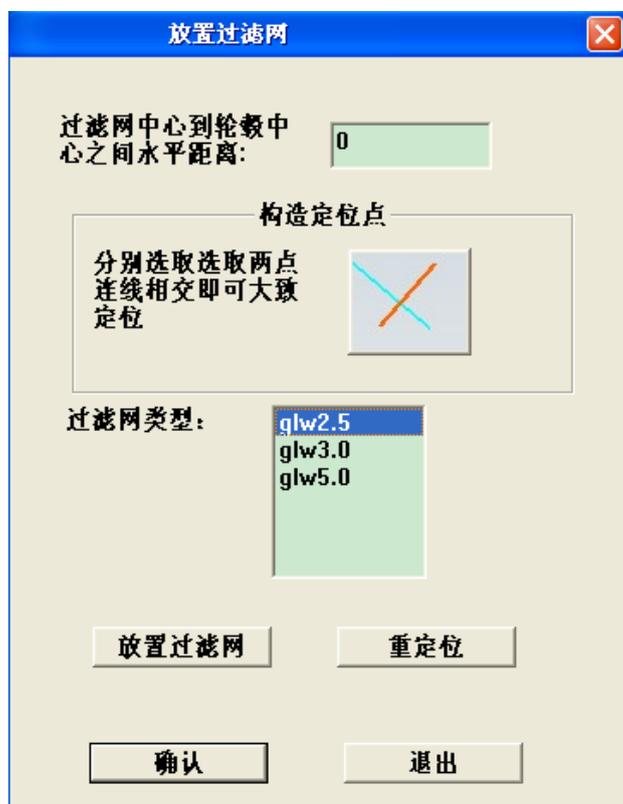


图 4-23 过滤网绘制界面

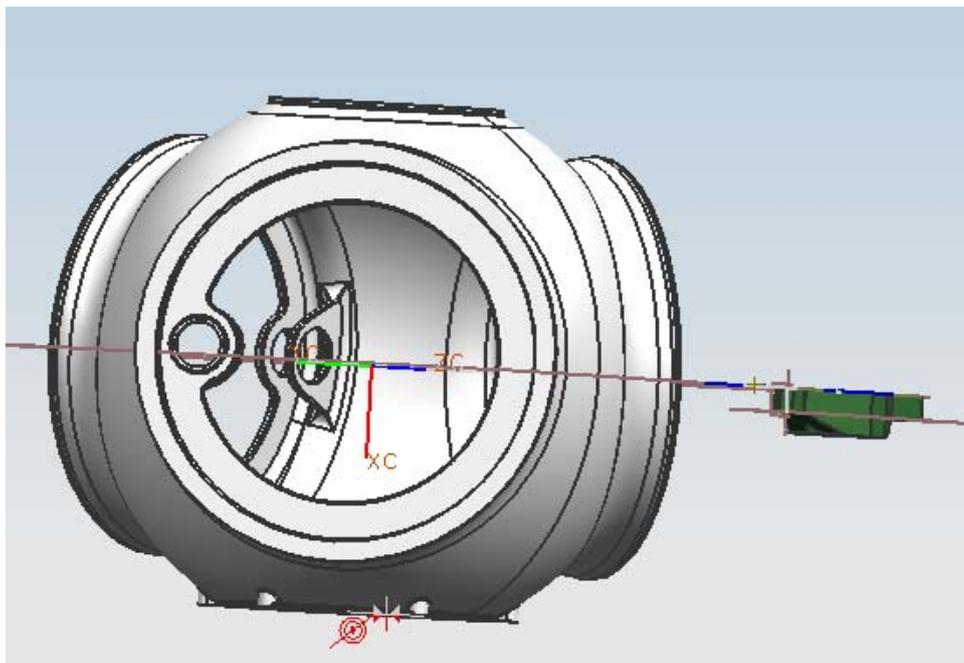


图 4-24 过滤网位置示意图

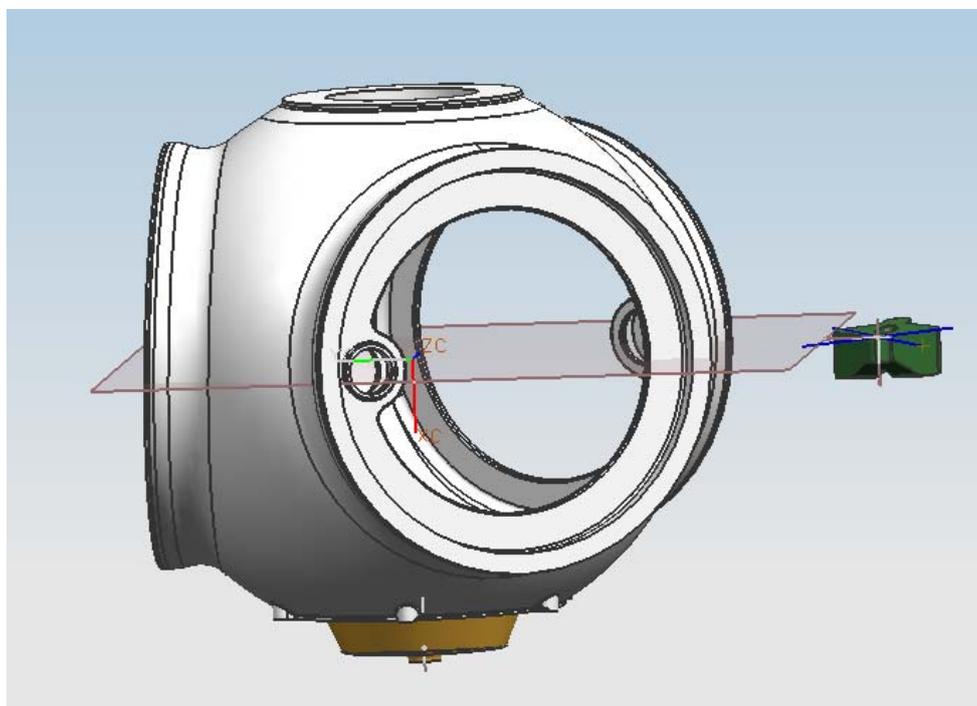
2、加载披缝浇道

在加载过滤网之后需要加载内浇道，本模块的内浇道是披缝形状。



图 4-25 内浇道界面

点击放置披缝浇道则如下图所示位置。



4-26 内浇道加载位置

3、加载上下直浇道

本模块的直浇道非常复杂，是由直径不同的耐火管拼接而成，浇道长度一定的情况下中间耐火管得类型和数目基本不变，不同的是是浇道两端的耐火管可能不是完整的，有时需要打折。由于直浇道的参数很多，系统在建立模型是采用全约束的参数化，在界面上只给出了关键的也是最经常修改的参数，即两端耐火管的参数修改。如果用户在特定情况下修要修改全体参数，则可以进入浇道模型手工修改。添加浇道之前，先测量上下直浇道的大概长度，可以预估浇道参数和类型。



图 4-27 直浇道界面

添加步骤：先添加上直浇道并可作重定位，正确位置是根据过滤网的上直浇道定位中心；再添加下直浇道并可做重定位，正确位置也是过滤网的下直浇道定位中心。上下直浇道加载之后如图 4-28 所示。

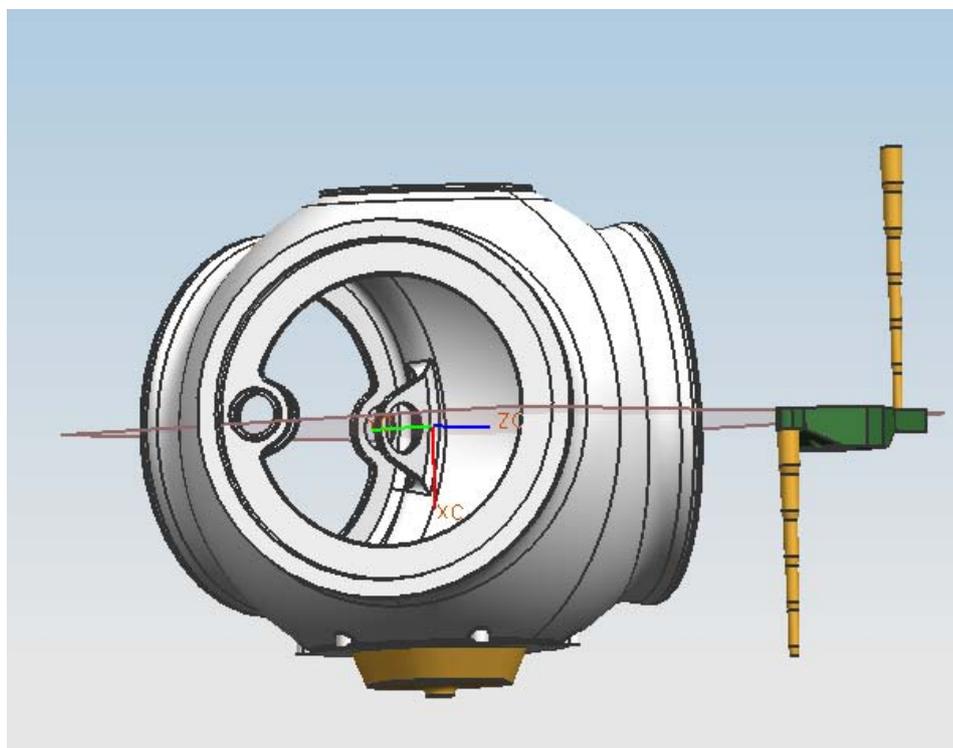


图 4-28 上下直浇道示意图

4、绘制横浇道

横浇道的绘制可以采用通用浇道设计模块的功能，即在确定披缝浇道和下直浇时，由浇道的连通性实际上也确定了横浇道的大致位置和尺寸。用户利用 UG 的曲线绘制模块设置好引导线，然后通过浇道扫描即可生成完整的浇注系统。

所有模块绘制完成之后，并隐藏相关基准之后浇注系统示意图如 4-29 所示。

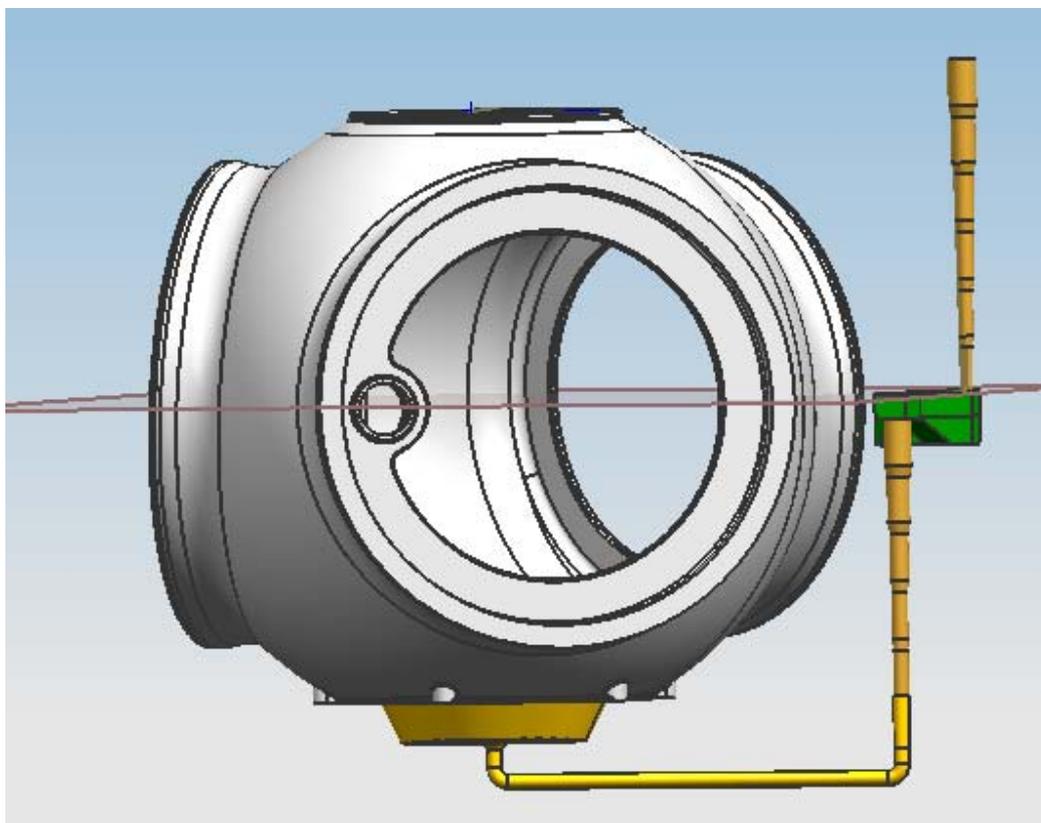


图 4-29 完整浇道示意图

4.6 小结

本节大致介绍了大型风电球铁件铸造工艺 CAD 系统各个模块的功能，主要内容有：

1、大致介绍了系统初始化、工艺参数设计（分型面、加工余量等）、冷铁设计模块的设计，并介绍了各个模块都可能使用到的功能，如重定位模块。

2、详细的介绍了冒口设计模块并运用实例来说明此模块的功能，主要分为冒口模数计算和冒口尺寸设计，这样使得冒口部分兼有科学性和实用性。

3、重点介绍了浇注系统的设计：分为通用浇注系统和实用浇注系统模块，通用浇注系统设计采用科学的计算，实用浇注系统结合工厂实际设计，在通用的基础上兼有一定的专业性，最后分别给出具体实例来说明操作和设计。

4、本系统处于研究阶段，接触的风电厂商较少获得的生产数据不是很充足，

因此部分模块如冷铁、冒口设计（如没有浇口杯）不够齐全，浇注系统模块划分的不够精细，以后开发可以补充。使用本模块总体可以实现大部分工艺设计。

5、借助本三维铸造 CAD 系统完成工艺设计的大型风电球铁件实体可以整体进行 CAE 模拟分析，然后利用 CAE 的反求对工艺进一步优化，可以高效快速的实现最优化的铸造工艺。

5 总结与展望

5.1 总结

三维铸造工艺 CAD 系统和风电都是铸造行业应用中的研究热点。本文以 VC++6.0、UG/Open 和 Microsoft Excel 集成开发环境为开发平台，以大型球墨铸铁铸造工艺理论为基础，以参数化设计为原理，以数据库技术为支撑，并结合工厂实际经验开发了一套大型风电球铁件铸造工艺 CAD 系统。主要完成的工作如下：

1、分析了大型风电球铁件铸造工艺 CAD 系统的总体架构。运用软件工程中的模块化方法，结合 UG 二次开发，将工艺系统划分为多个软件模块进行开发。各个模块之间相对独立但又组成一个有机整体，可以针对单个模块进行升级和改进，具有很好的扩展性。

2、利用参数化技术完成了包括工艺参数（分型面、加工余量等）CAD、冷铁系统、冒口系统 CAD 和浇注系统 CAD 等铸造工艺的开发。根据大型球铁件铸造工艺设计理论，结合工厂实际生产要求，实现了冒口设计方法在冒口系统设计中的应用以及阻流截面比例法在浇注系统设计中的应用。

3、本文以 VC++6.0 作为开发平台，结合三维软件 UG（版本 NX6.0）进行铸造工艺 CAD 系统的开发，借助 MFC 和 UG 提供的二次开发工具 UG/Open API 实现相应的模块功能。本系统具有一定的风电铸造领域工艺设计的实用性。

4、分别根据铸造标准和工厂实际建立了相应的数据库，并设计了便捷简单的修改参数和标准的界面，进一步提高了设计的科学性和快捷性。

综上所述，本文进行了基于 UG 的大型风电球铁件铸造工艺 CAD 系统的开发并着重对浇冒口部分进行了理论分析和科学设计，在设计过程中，兼顾了铸造国家标准和我国风电工厂的实际生产习惯。工艺设计人员在设计铸造工艺时借助本 CAD 系统，可以完成大部分铸造工艺措施，对提高工艺设计效率具有重要意义。基本上实现了“CAD 工艺设计-CAE 模拟验证-CAD 工艺再优化”的现代铸造工艺分析模式。

5.2 展望

开发大型风电球铁件铸造工艺 CAD 系统是一项复杂的工作，需要结合铸造的专业知识特别是结合风电铸造的特点和 CAD 软件开发经验。本文在铸造工艺系统的冷铁、冒口和浇注系统绘制方面取得了一定的成果，但是有些地方还有待进一步改善和提高；本界面采用 MFC 和 UIstyler 混合模式，界面不太友好，后续开发可以改进。

1、由于编程能力所限，本系统的冷铁设计模块只提供了冷铁绘制开发，没有设置冷铁的计算方法。可以在后续开发中设计冷铁的计算，使应用更加科学和通用。

2、本系统在浇注模块进行了一些摸索，发现通用浇道模块的应用与实际应用上有较大差异，因而专门设计了专用浇注系统模块。由于风电铸造行业的特殊性，使得这部分的通用性较差。后续开发阶段要进一步调查风电铸造企业的生产经验，使本系统更加通用化。

3、铸造工艺系统应由一系列完整的功能模块组成，如型腔摆放、分型设计、砂箱设计、铸造工艺参数设计、冷铁补贴设计和浇冒口设计等。本系统研究了铸造工艺参数的部分功能、冷铁、浇冒口系统模块，在以后的开发中要完善工艺系统的其他模块。

致 谢

本文是在导师廖敦明副教授的悉心指导下完成的，廖老师诲人不倦的良师风范、宽厚豁达的为人和平易近人的态度是我学习的榜样，他教我做人与做学问的道理将使我终生受益。近三年来，廖老师在科研和生活中都给予了我无微不至的关怀，对我的职业发展和人生道路产生了极为重要的影响。值此论文完成之际，特此廖老师致以崇高的敬意和衷心的感谢！

同时还要感谢课题组的周建新和庞盛永老师，在学习和研究工作中，给予了热情的关怀和指导，谨在此向您们表示深深的感谢！

感谢实验室的博士生殷亚军、沈旭、陈涛在课题研究中给予的无私帮助。感谢同级硕士生王珑、郭春付、陈钊、张彬、傅显均等以及师弟王超、袁贝在学术上和生活上给予我的热情支持和帮助。

还要感谢我的师兄刘明、彭波、朱炳文等，是你们带领我进入UG和铸造的世界，再次感谢你们！

深深感谢我的家人给予我的理解、支持和关心，是他们的默默奉献才使我走到了今天，他们永远是我的坚强后盾和精神动力，我将用以后的行动来报答他们的爱。

另外，感谢教育部新世纪优秀人才支持计划（No.NCET-09-0396）、国家数控重大专项（2011ZX04014-052）、湖北自然科学基金创新群体项目（2010CDA067）以及中央高校基本科研业务费专项资金（2011TS039）对本研究的资助。

最后再次对所有关心、帮助过我的师长、亲人、同学、朋友表示最诚挚的感谢！

贾保恒

2011年12月于华中科技大学

参考文献

- [1] 刘从庆. 铸造工艺 CAD 研究近年来在我国的发展[J]. 铸造, 1995(4): 40~41
- [2] 苟国强. 大型风力发电机组轮毂铸件的铸造工艺[J]. 东方电气评论, 2008, 22 (88) : 66~69
- [3] 赵波, 龚勉, 屠建中. UG CAD 实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [4] 大中逸雄. 计算机传热凝固解析入门[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988
- [5] 王云爱, 许庆彦, 柳百成. CAD 技术在铸造过程中的研究与应用[J]. 机械工艺师, 2001(6): 13~14
- [6] 鲁俐. 基于微机的三维铸造工艺 CAD 系统[D]. 北京: 清华大学机械工程系硕士学位论文, 1996
- [7] 张旭. 三维 CAD 基础知识和基本方法(一)[J]. 计算机辅助设计与制造, 2000(1): 84~88
- [8] Von K.Forsund. Das Eindringen von Stahl in Formsand Einflub der Oberflächen-reaktionen und der Temperatur[J]. Giesserei Tech, 1962(14): 51~61
- [9] J.G.Henzel, J.Keverian. Theory and Application of Digital Computer in Predicting Solidification Patterns[J]. Journal of Metals, 1965, 17(5): 561~568
- [10] R.Nomura, Y.Otsuka, M.Kurosawa et al. Industrial Application of Computer Simulation System to Sand Mold Castings[C]. 48th International Foundry Congress, Varne, Bulgaria, 1981
- [11] I.Ohnaka, Y.Konda, T.Fukusako. Numerical Analysis of Quasi-Steady Flow in Gating System[J]. IMONO(Japanese), 1983, 55(3): 164~169
- [12] E.Niyama. Development and Implementation of a Simplified Casting Solidification Simulator[J]. IMONO(Japanese), 1986, 58(4): 244~250
- [13] T.X.Hou, R.D.Pehlke. Computation Solidification of a Steel Casting in a Sand Mold[J]. AFS Transactions, 1986, 94: 477~484
- [14] T.X.Hou, R.D.Pehlke. Computation Solidification of a Steel Casting Against a Chill Mold Wall[J]. AFS Transactions, 1998, 96: 151~160
- [15] Yanwei Li, Yi Zhang. A Study of the Fundamental Process of Applying CAD to Steel Castings Productions[J]. Cast Metals, 1989, 1(4): 201~209
- [16] P.H.Hansan, P.R.Sam, E.Flender. How to Select and Use Criterion Functions in Solidification Simulation[J]. AFS Transactions, 1993, 101: 443~436

华中科技大学硕士学位论文

- [17] Feddy Syvertsen. Modeling and Control of Casting and Welding Process[M]. CAD /CAM in the Foundry, 1986(5): 386~387
- [18] L.A.Radar, D.R.Haines. Computer Simulation of Experimental Rising Studies[J]. AFS Transactions, 1982, 91: 89~94
- [19] 刘焯, 刘瑞祥通用铸造工艺 CAD 的研究与开发[J]. 中国铸造装备与技术, 2004(4): 14~16
- [20] 李永保, 柳百成. 面向并行工程的铸造工艺 CAD/CAE 系统的研究[J]. 中国机械工程, 1997(7): 40~42
- [21] 张士彦, 阎平. 铸钢件铸造工艺 CAD 软件的研制与应用[J]. 铸造, 2002, 51(10): 628~632
- [22] 黄天佑, 胡邦红, 刘亚东等. 基于图纸自动输入的铸造工艺 CAD 系统[J]. 中国铸机, 1995(5): 31~33
- [23] 裴清祥. 铸造充型三维数值模拟及铸造工艺 CAD 系统的研究[D]. 北京: 清华大学博士学位论文, 1991
- [24] 李永保, 荆涛, 柳百成. 微机在铸造工艺 CAD 中的应用[J]. 中国铸造装备与技术, 1997(1): 24~26
- [25] 柳百成. 铸造工艺计算机辅助设计进展[J]. 机械工程学报, 1993(5): 28~34
- [26] 柳百成, 许庆彦. “铸造之星”软件第二次用户大会论文集[C]. 北京: 清华大学机械工程系, 1999
- [27] 沈阳铸造研究所. 大型铸钢件铸造工艺 CAD 研究报告[R], 1990
- [28] 马永杰. 计算机技术在铸造行业中的应用[J]. 铸造设备研究, 2003(5): 20~23
- [29] 龚雪丹, 廖敦明, 万晖等. 基于 UG 的铸钢件浇注系统 CAD 的研究与开发[J]. 铸造, 2005, 54(10): 1006~1009
- [30] 庞晓辉, 廖敦明, 陈立亮, 刘瑞祥. 基于 UG 的铸造工艺 CAD 分模模块的开发[J]. 中国机械工程, 2006, 11(增刊): 306~308
- [31] 王彬, 廖敦明, 陈立亮. 基于 UG 的铸钢件浇注系统 CAD 二次开发[J]. 中国机械工程, 2006, 11(增刊): 216~218
- [32] 李辉, 廖敦明, 陈立亮. 华铸 CAD 系统关键技术的研究[J]. 中国机械工程, 2006, 11(增刊): 205~208
- [33] 薛强军, 王忠, 王志明. 风电装备整机与铸铁生产的现状及展望[J]. 现代铸铁, 2009 (3) : 19~21.
- [34] 岳明, 罗超. 风电轮毂铸造技术研究[J]. 东方电气评论, 2010,24 (93) : 36~40

华中科技大学硕士学位论文

- [35] 柳百成, 荆涛. 并行工程环境下成形铸件制造工艺 CAD/CAM 系统[J]. 高技术通讯, 1996, 6(3): 40~42
- [36] 杨千里. 机械 CAD 的历史回顾和现代 CAD 的技术发展趋势[J]. 中国科技信息, 2005(11): 123~125
- [37] 周建新, 廖敦明. 铸造 CAD/CAE[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009
- [38] 安受铺, 魏周宏. UG 软件在我国的应用综述[J]. 机械研究与应用, 1996(4): 15~17
- [39] Unigraphics Solution Inc. 著. 唐海翔编译. UG 注塑模培训教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [40] 董正卫, 田立中, 付宜利. UG/Open API 编程基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [41] 范元勋, 庄亚红, 王华坤. UG 二次开发工具的使用[J]. 电气技术与自动化, 2002(6): 70~72
- [42] UGS Co.. UG/OPEN API Reference[M], 1998
- [43] 胡道钟. 微机平台的 UG 二次开发技巧[J]. 计算机辅助设计与制造, 2000(1): 13~15
- [44] 王庆林. UG/Open GRIP 实用编程基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [45] 阎瑛. CAD 系统集成中产品定义的核心——参数化特征造型技术[J]. 电子机械工程, 2001(2): 28~30
- [46] 马亮有, 马卫军, 郑荣. 基于特征参数化三维造型技术及其应用[J]. 山西科技, 2003(5): 30~31
- [47] Wu S.H., Lee K.S., Fuh J.Y.H.. Feature-based parametric design of a gating system for a die-casting die[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 19(11): 821~829
- [48] A.Z.Qamhiyah. A strategy for the construction of customized design libraries for CAD[J]. Computer-Aided Design, 1998, 15(11): 897~904
- [49] Chipley K., Viswanathan S., Copper H.H.. Concurrent Engineering and Rapid Prototyping for Die Castings[J]. Die Casting Engineer, 1996(3): 18~26
- [50] A Z Qamhiyah. A strategy for the construction of customized design libraries for CAD. Computer-Aided Design, 1998(11): 897~904
- [51] E.Niyama, T.Uchida, M.Monkawa et al. A Method of Shrinkage Prediction and Its Application to Steel Casting Practice[J]. AFS International Cast Metal Journal, 1982, 7(3): 52~63

华中科技大学硕士学位论文

- [52] 黄翔, 李迎光. UG 应用开发教程与实例精解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
- [53] Yunmin Chen, Yun Tauhsiao. A Collaborate Data Management Framework for Concurrent Product and Process Development[J]. Computer Integrated Manufacturing, 1997(6): 446~469
- [54] 中国机械工程学会铸造专业学会. 铸造手册 第5卷 铸造工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003

附录 1 攻读硕士学位期间发表论文

- [1] 贾保恒, 廖敦明, 周建新. 大型风电球墨铸铁轮毂铸造工艺 CAD 系统的研究与开发. 热加工工艺, 2011, 40(23): 38, 39, 42