

# 基于 SINOvation 的铸钢件冒口 CAD 系统的开发

李娜娜<sup>1</sup>, 姜爱龙<sup>1</sup>, 房 夺<sup>1</sup>, 孙玉成<sup>1</sup>, 吴 霜<sup>2</sup>, 林晓航<sup>2</sup>, 田学雷<sup>2</sup>

(1. 内燃机可靠性国家重点实验室, 潍柴动力股份有限公司, 山东潍坊 261061; 2. 材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 山东大学材料科学与工程学院, 山东济南 250061)

**摘要:** 基于国产三维图形软件SINOvation的环境, 在源代码的层级上开发了铸钢件冒口CAD系统。利用点模数的概念开发了热节快速分析模块, 用于确定冒口位置; 开发了铸件局部模数计算模块, 计算冒口尺寸; 建立了铸钢件标准冒口数据的数据库, 开发了基于标准冒口数据的冒口三维图形构建模块。以重载卡车后桥铸钢件为例, 完成了其冒口的设计, 显著提高了准确性和效率。

**关键词:** SINOvation; 点模数; 铸钢件; 冒口CAD

铸造业是制造业的一个重要组成部分, 在促进经济发展方面发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。铸件最终的质量很大程度上取决于铸造工艺设计的合理性, 其中冒口设计是铸造工艺中最为重要的一方面, 铸件冒口设计一直是铸造技术工作者持续关注和研发重点, 铸钢冒口设计与计算机技术相结合亦是重要的发展方向。

依据均衡凝固技术的概念确立了铸钢凝固过程的动态顺序凝固原则<sup>[2]</sup>, 依此改进了浇冒口设计, 使得刮板、齿轮和制动毂等铸钢件的工艺出品率普遍提高了15%。对铸件凝固过程数值模拟结果进行分析, 识别孤立液相区<sup>[3]</sup>, 依据其位置、体积和表面积等信息, 利用周界商法在UG环境下开发了铸钢件的冒口CAD系统。在差分计算网格中<sup>[4]</sup>, 赋予铸件单元距离的概念, 形成了铸件的距离场, 由此获得热节信息, 利用几何模数、冒口设计原则和果蝇优化法, 开发了圆柱形铸钢件冒口CAD及优化系统。廖敦明等人利用华铸CAE<sup>[5]</sup>和UG开发了铸钢件冒口自动优化设计CAD系统, 王智平等人在ProE三维图形环境下<sup>[6]</sup>, 利用Visual C++开发了铸钢件冒口CAD系统, 提高了设计效率, 减轻了工艺设计师的设计强度。

由此可见, 对铸钢件冒口的设计及其CAD的研发主要集中在位置的确定和尺寸的设计计算, 冒口CAD系统大多数是基于国外商用图形软件, 利用二次开发功能进行研发的。

目前我国自主知识产权的三维图形软件SINOvation已经非常成熟, 本研究在该软件源代码层级上进行了冒口CAD的开发, 开发了点模数计算模块用于确定热节位置, 开发了局部模数计算模块, 建立了冒口参数数据库和冒口形状数据库, 能够进行热节快速分析, 热节部位局部模数和体积的计算, 冒口几何形状的构建。实现了冒口位置、尺寸和图形构建一体化设计的冒口CAD系统研发。

## 1 热节快速分析

铸件的模数用来表示铸件凝固时间, 对于铸件上的每一点建立模数概念, 表示每一点的凝固时间, 不仅可以处理复杂形状的铸件, 同时可以建立铸件整体凝固时间场, 获得铸件的凝固顺序, 为铸造工艺设计提供关键依据。Neises等人基于铸件二维截面提出了具有对称性的铸件点模数概念及计算方法<sup>[7]</sup>。点模数概念的提出对热

作者简介:

李娜娜(1988-), 女, 工程师, 主要从事柴油发动机材料和铸造工艺研究。  
E-mail: linn@weichai.com

通讯作者:

田学雷, 男, 教授。电话: 13065095545, E-mail: tianxuelei@sdu.edu.cn

中图分类号: TG244

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

06-0755-05

收稿日期:

2022-03-07 收到初稿,

2022-04-02 收到修订稿。

节快速分析提供了很好的途径, 一经提出就得到了不断地发展。Upadhyaya等人发展了点模数的算法, 不局限于对称性二维截面铸件<sup>[8]</sup>。到1996年, 点模数八象限模型能够计算简单三维形状铸件的点模数<sup>[9]</sup>。2015年<sup>[10]</sup>、2018年<sup>[11]</sup>点模数计算模型得到不断发展, 新一代的点模数不仅能够计算复杂三维形状铸件的点模数, 而且还包含了热物性参数, 丰富了点模数的物理意义。

### 1.1 基于点模数的快速热节分析

新一代的点模数计算模型是将铸件和铸型划分成众多的直角六面体(立方体)网格单元, 每个网格单元中心为计算点模数的点, 每个点的总散热能力可视为 $N$ 个方向的散热能力的总和。 $N$ 等于26, 是每个点所在的直角六面体(立方体)的所有面、棱和顶点方向总和, 每个方向均是从网格中心点到相邻(面、棱、顶点相邻)网格中心点的连线方向。假设所有铸件网格单元完成凝固时所散失的热量相同, 那么分析铸件的每个网格单元的导热速率即可得到铸件所有点的点模数。

根据傅里叶定律, 热传导速率与传热距离成反比关系, 如公式(1)所示:

$$q_i = -\frac{\lambda A \Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

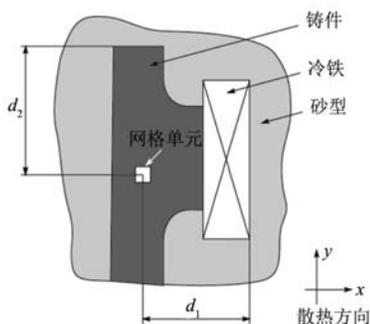
式中:  $\lambda$  为材料热导率(W/mK);  $A$  为散热表面积( $\text{m}^2$ );  $\Delta T/\Delta x$  为温度梯度(K/m);  $i$  为方向序号。

将 $M_p$ 定义为点模数, 表示等效综合散热距离(m), 它与热传导速率成反比, 即 $M_p$ 反比于 $q$ 。因此, 可由公式(2)计算 $i$ 方向的点模数。

$$M_{p_i} = -\frac{d_i}{k_\lambda \cdot k_T} \quad (2)$$

式中:  $k_\lambda$  为热导率系数;  $k_T$  为蓄热能力系数, 比热容和密度的乘积;  $d_i$  为从网格单元中心点到铸型型壁的距离, 如图1所示。

对于铸件与砂型直接接触( $d_2$ 情况)还是中间有冷



1在 $x$ 方向, 铸件接触冷铁; 2在 $y$ 方向, 铸件接触砂型

图1 网格中心点到型壁之间的距离  $d_i$  示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the distance  $d_i$  between mesh center point and profile cast

铁或保温材料( $d_1$ 情况), 对导热的影响不尽相同, 前者只考虑铸件导热系数, 而后者则要考虑不同材料的影响因素。如图2所示, 在距离上( $a+b$ )有两种导热系数的材料, 此时的 $k_\lambda$ 由公式(3)计算。

$$k_\lambda = \frac{(a+b) \lambda_{\text{cast}}}{a \cdot \lambda_{\text{cast}} + b \cdot \lambda_{\text{other}}} \quad (3)$$

假设某点 $O$ 在 $i$ 方向上的散热速率与相邻点 $X$ 反方向的散热速率之差称之为点 $O$ 在 $i$ 方向的净热传导速率, 将所有的26个方向的净热传导速率求和并取倒数, 则会得到代表凝固时间的参数, 即点 $O$ 的点模数 $M_p$ , 因此, 点 $O$ 的 $M_p$ 表达为公式(4)的形式:

$$M_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^N k_i \left[ \frac{1}{M_{p_o}^{(+i)}} - \frac{1}{M_{p_x}^{(-i)}} \right]} \quad (4)$$

式中:  $X$  为点 $O$ 在 $i$ 的正方向上的相邻网格单元中心点;  $k_i$  为距离系数, 衡量在面、棱和顶点方向上相邻网格单元间距不同而引起的差异, 其值等于点 $O$ 和点 $X$ 之间的距离与所有相邻点之间的最小距离之比。

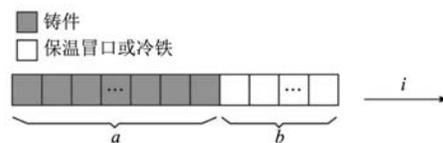


图2 非均匀介质等效热导率计算模型图

Fig. 2 Calculation model demonstration of the equivalent thermal conductivity of inhomogeneous medium

最后, 根据公式(2)和(4), 铸件任一点的点模数可以总结为公式(5):

$$M_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^N k_i \left[ \frac{k_\lambda^{(+i)} \cdot k_T^{(+i)}}{d_o^{(+i)}} - \frac{k_\lambda^{(-i)} \cdot k_T^{(-i)}}{d_x^{(-i)}} \right]} \quad (5)$$

据此可以计算铸件每个点在考虑了热物性参数情况下的模数, 给出凝固时间顺序, 分析铸件的点模数即可得到热节情况。图3为铸钢件载重卡车后桥点模数分布云图, 热节显而易见。此过程的网格单元数是 $10 \times 10^6$ , 时间为40 s。

由图3可见, 两端支撑部位和中间一侧的立面存在比较严重的热节。因此, 这些部位可确定为热节。

### 1.2 铸件局部模数的计算

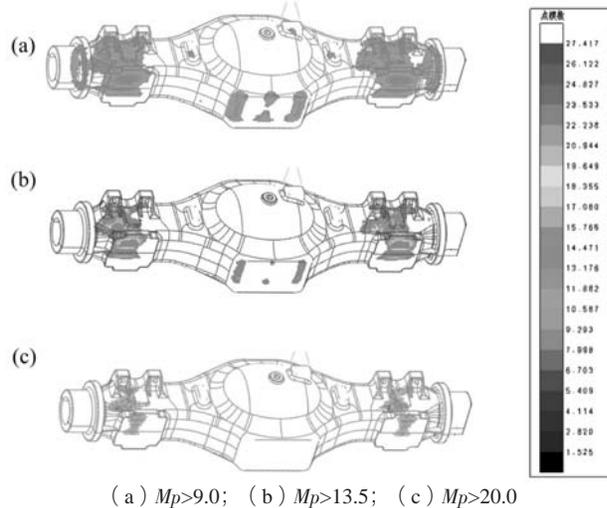
铸件的热节部位需要冒口进行补缩, 铸件热节部位的局部模数是冒口设计的基本依据。随着计算机图形学的发展, 用于局部模数计算的表面积和体积计算已经不再受图形复杂程度的影响, 但是非散热面积的识别和排除成为关键。

对于铸件的凝固时间可以用Chvorinov定律所述<sup>[12]</sup>:

$$t_r = C (V/A)^2 \quad (6)$$

式中： $C$ 是与铸件、铸型材质和温度有关的一个常数， $V$ 是铸件体积， $A$ 是铸件散热面积。

Chvorinov定律告诉我们，铸件凝固时间的平方根与 $V/A$ 的值成正比， $V/A$ 称为模数 $M$ ，即 $M=V/A$ ，通常用模数表示整个铸件凝固时间的长短。



(a)  $M_p > 9.0$ ; (b)  $M_p > 13.5$ ; (c)  $M_p > 20.0$

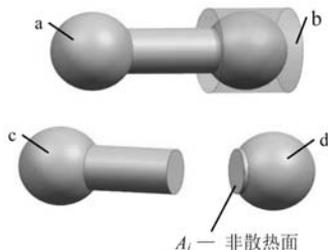
图3 重卡的铸钢后桥热节分析

Fig. 3 Analysis of the hot spot of cast steel rear axle of the heavy truck

在实际生产中，常常需要计算铸件被补缩部位的局部模数，铸件局部模数计算的关键在于散热面积与非散热面积的区分。为此，在SINOVATION环境下开发了铸件局部模数计算模块，可以用四种几何体包容需要计算局部模数的部分铸件，几何体分别为方盒体、球体、圆柱体和特制实体。图4展示了局部模数计算过程的原理，其中a为铸件，b为包容局部铸件的圆柱体，d为局部铸件，即需要计算模数的部分，c为铸件其余部分。

由图4可知，局部铸件（d）和其余铸件（c）的面积之和与铸件（a）的面积之差是非散热面积（图4中的 $A_i$ ）的两倍。设铸件（a）表面积为 $A_a$ ，局部铸件（d）表面积为 $A_d$ ，其余铸件（c）表面积为 $A_c$ ，则非散热面积 $A_i = (A_c + A_d - A_a) / 2$ 。

局部铸件（d）的散热面积 $A$ 为：



a.铸件; b.包容局部铸件的圆柱体; c.铸件其余部分; d.局部铸件

图4 非散热面积计算示意图

Fig. 4 Calculation schematic diagram of the non-radiating surfaces

$$A = A_d - (A_c + A_d - A_a) / 2 \quad (7)$$

式中： $A$ 为局部铸件的散热面积； $A_a$ 为铸件表面积； $A_c$ 为铸件其余部分表面积； $A_d$ 为局部铸件表面积。以上计算过程均通过编程调用图形软件的实体复制、交运算、体积计算、表面积计算和基本的算术运算等功能实现自动计算，完成铸件被包容部分的局部模数的计算，并记录模数和体积。

## 2 冒口设计

随着计算机的发展，推动了冒口设计方法应用的发展，如三次方程法<sup>[13-14]</sup>和周界商法<sup>[15]</sup>均已应用于冒口CAD系统。传统的模数法具有较强的科学性，能够适应各种复杂铸件，并形成了较为完备的设计体系和设计数据，被广泛应用于生产实际。但是由于铸件形状的复杂性，使得人工计算模数时较为困难，而计算机图形学的发展已经使这个问题迎刃而解。因此，基于模数法开发冒口CAD系统能够形成完善的体系。

### 2.1 冒口参数数据库的建立

铸钢件冒口参数比较完善，有标准明冒口、标准腰圆形明冒口、标准侧冒口、标准球形冒口、标准圆柱形暗冒口、标准腰圆形暗冒口等，每种冒口的规格不同，冒口参数包括模数、尺寸和补缩能力等数据，如表1所示标准侧冒口数据<sup>[16]</sup>。

由表1可知，标准冒口参数中包含冒口模数、尺寸和补缩能力，则从模数和补缩能力即可确定冒口尺寸，利用三维图形软件相应的图形函数，可实现相应冒口三维图形自动构建。因此，本研究采用通用的Access数据库，建立了冒口参数数据库，方便冒口设计使用。

### 2.2 冒口CAD系统开发

以上热节快速分析可以确定冒口位置，铸件局部模数计算能够获得需要补缩部位的模数，依据模数法即可进行冒口设计。

模数法冒口设计原则是冒口模数要大于铸件（或补缩部位）的模数，即，冒口扩大系数 $f=1.1\sim 1.3$ ，有保温冒口套的情况， $f=0.7\sim 0.9$ 。生产厂家可以根据自己的实际情况选取合适的数值。

一般冒口设计流程为，计算铸件（局部）模数及体积，在冒口数据库中选择模数满足要求的最小模数的冒口，核算冒口补缩能力，选出满足补缩能力的最小冒口，依据冒口尺寸完成冒口三维图形的绘制。所开发的铸钢件冒口CAD系统的流程图如图5所示。

表1 标准侧冒口数据  
Table 1 Data of the standard side riser

冒口						当收缩率 $\varepsilon$ 为下列值时, 最大能补缩的铸件体积 $V_C$ (重量 $G_C$ )							
$M_R/cm$	$d=a/mm$	$b/mm$	$h/mm$	$V_R/dm^3$	$G_R/kg$	4.5%		5%		6%		7%	
						$V_C/dm^3$	$G_C/kg$	$V_C/dm^3$	$G_C/kg$	$V_C/dm^3$	$G_C/kg$	$V_C/dm^3$	$G_C/kg$
1.89	100	53	150	1.04	7	2.2	17	1.8	14.6	1.4	11	1.04	8
2.08	110	59	165	1.38	9.4	2.9	22.7	2.5	19.4	1.4	14	1.37	11
2.26	120	64	180	1.79	12	3.8	29.5	3.2	25	2.4	18.6	1.79	11
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
10.96	580	308	870	203	1 380	428	3330	365	2 840	270	2 100	203	1 580
11.34	600	318	900	225	1 530	474	3690	404	3 150	299	2 330	224	1 750
11.71	620	329	930	248	1 690	523	4070	446	3 480	329	2 570	248	1 930
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

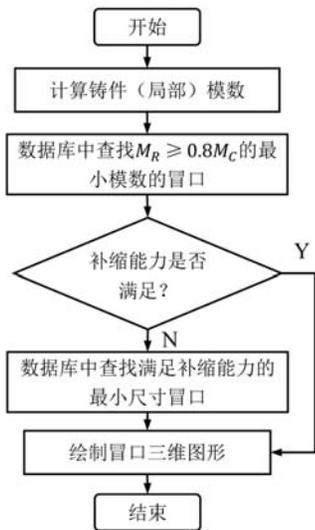


图5 冒口CAD流程图

Fig. 5 Flow chart of the riser CAD

2.3 设计案例

图6是铸钢件冒口CAD系统运行界面, 在对铸钢件冒口进行设计时, 要考虑到顺序凝固的因素, 冒口实



图6 载重车铸钢后桥冒口CAD运行界面

Fig. 6 CAD GUI for the riser design of the cast steel rear axle of the truck

际补缩的范围不仅仅是热节处, 应该是与热节相连并形成顺序凝固的区域。图7显示了应用冒口CAD系统设计并绘制的汽车后桥的冒口效果图。如图7所示, 两端的冒口补缩范围要大于热节部位, 即包括热节两侧的“冒口补缩范围”。冒口的设计计算还包含了三次方程法, 供设计人员选择。

通过实际应用表明, 基于传统的模数法和完善的冒口参数所建立的铸钢件冒口CAD系统设计结果能够满足实际应用, 并且设计效率和设计准确性均有显著提高。

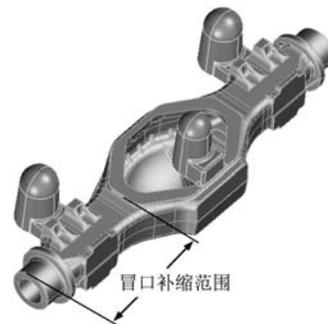


图7 载重车铸钢后桥冒口CAD效果图

Fig. 7 CAD result of the risers on the cast steel rear axle truck

3 结论

本研究在三维图形软件SINOVATION源代码的层级上, 开发了铸钢件冒口CAD系统, 包含标准冒口参数数据库、热节快速分析、局部模数、体积和重量计算、冒口三维图形构建等功能。

(1) 铸钢件冒口CAD系统在SINOVATION源代码层级上开发, 能够充分利用图形软件的底层功能, 能够添加铸造工艺所需的特殊图形功能。

(2) 基于新型点模数的快速热节分析的实现, 有利于冒口位置的确定, 模数法和三次方程法并存, 为设计者提供了更多的选择。

(3) 标准冒口参数数据库的建立和冒口三维图形的生成, 能够适应大多数的生产实际, 实现了计算机

完成繁琐的数据查找和冒口图形构建工作, 一定程度上提高了准确性和设计效率。

#### 参考文献:

- [1] JACOB E, SASIKUMAR R, PRAVEEN B, et al. Intelligent design of feeders for castings by augmenting CAD with genetic algorithms [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2004, 15: 299-305.
- [2] 卢景秀, 魏胜辉, 张帆, 等. 均衡凝固技术及其应用 [J]. *中国铸造装备与技术*, 2017 (6): 1-4.
- [3] 刘东, 廖敦明, 唐玉龙, 等. UG环境下铸造CAD/CAE一体化系统的后处理显示及冒口工艺设计 [J]. *铸造*, 2016, 65 (10): 980-989.
- [4] 王瞳. 铸钢件浇冒口工艺优化设计方法及CAD/CAE集成系统的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [5] 廖敦明, 陈立亮, 周建新, 等. 铸造CAD/CAE智能冒口工艺优化设计 [J]. *铸造*, 2010, 59 (5): 482-486.
- [6] 王智平, 裴晓亮, 朱昌盛, 等. 基于Pro/E的铸钢件工艺CAD系统冒口模块开发 [J]. *铸造技术*, 2009, 30 (7): 849-852.
- [7] NEISES S, UICKER J, HEINE R. Geometric modeling of directional solidification based on section modulus [J]. *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 1987, 95: 25-30.
- [8] UPADHYA G, PAUL A. Comprehensive casting analysis model using a geometry-based technique followed by fully coupled, 3-D fluid flow, heat transfer and solidification kinetics calculations [J]. *AFS Transactions*, 1992: 925-933.
- [9] 邹德宁, 苏俊义, 朱宪华, 等. 铸件点模数计算模型的分析 [J]. *铸造技术*, 1999 (3): 15-17.
- [10] 刘晓伟. 基于SINOVIATION的铸钢件铸造工艺CAD系统的开发 [D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [11] 赵洪阳. 基于SINOVIATION的砂型铸造通用工艺CAD系统的开发 [D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [12] FLEMINGS M C. *Solidification processing* [M]. McGraw-Hill, Inc., US.1974: 11.
- [13] RUDDL R W. Riser aids in steel foundry practice [J]. *AFS Trans*, 1975 (83): 577-588.
- [14] 高尚书, 于志亚. 三次方程解析法冒口计算 [J]. *铸造*, 2000 (9): 533-537.
- [15] 王济洲, 周尧和. 借助周界商求解铸钢件冒口尺寸的新方法 [J]. *铸造*, 1995 (12): 16-19.
- [16] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册第五卷: 铸造工艺 [M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2003: 322-351.

## Development of Riser CAD System for Steel Castings Based on SINOVIATION

LI Na-na<sup>1</sup>, JIANG Ai-long<sup>1</sup>, FANG Duo<sup>1</sup>, SUN Yu-cheng<sup>1</sup>, WU Shuang<sup>2</sup>, LIN Xiao-hang<sup>2</sup>, TIAN Xue-lei<sup>2</sup>  
(1. State Key Laboratory of Engine Reliability, Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261001, Shandong, China; 2. Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution and Processing of Materials, Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

#### Abstract:

Based on the domestic three-dimensional graphics software SINOVIATION, the riser CAD system of steel castings was developed. A hot spot rapid-analysis module was developed to determine the position of the riser using point modulus method. The calculation module of casting local modulus was developed to get the size of the risers. The database of standard riser data of the casting steel was established, the riser generation module based on standard riser data was developed. Taking the rear axle of heavy truck as an example, the riser design was completed, which significantly improved the accuracy and efficiency.

#### Key words:

SINOVIATION; point modulus; steel castings; riser CAD