

## 基于 ProCAST 仿真文件的精铸模具反变形方法\*

## Reverse Deformation Methodology of Investment Casting Die Based on Simulation File of ProCAST

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 董一巍 卜昆 窦杨青 张定华

**[摘要]** 基于 ProCAST 数值模拟网格文件,提出了一种精铸模具反变形方法。首先提取所需网格文件中节点信息,将无序节点进行匹配变为有序节点。网格文件简化法与快速排序法的结合提高了排序匹配的效率。建立了模具反变形系统,经验证,所采用的方法取得了良好的效果。

**关键词:** 精铸模具 反变形 节点匹配 数值模拟 ProCAST

**[ABSTRACT]** Based on the numerical simulation results of ProCAST, an reverse deformation method for investment casting die is presented. The node information is extracted first, and the disordered grids are changed into order ones. The efficiency of sorting and matching can be improved by the combination of the methods which are used for the simplification of grid files and quick sort. And the reverse deformation system of die is built. The example proves the better effect on die design of turbine blade.

**Keywords:** Investment casting die Reverse deformation Node matching Numerical simulation ProCAST

熔模铸造经过 40 余年的发展,已成为我国制造业中不可缺少的行业,但与国外精铸业相比,仍存在着一定的差距<sup>[1]</sup>,主要表现在铸件质量差、废品率高等方面。

为了保证零件成形的尺寸精度、形位精度及表面粗糙度,熔模精铸采用的模具型腔需考虑对铸件收缩变形的补偿<sup>[2]</sup>。精铸模具的设计是影响成品率的主要因素,其中又以模具型面的设计最为重要<sup>[3]</sup>。

模具型面的设计是一个复杂的过程,而型腔设计更是这个过程的重点。其设计原则是在变形部位给予适量反变形量以抵消铸件在凝固和冷却过程中的收缩变形。当高温液态合金注入模壳后,随着温度的降低,会产生收缩变形,因此在设计型腔时要考虑这方面的影

响。传统的模具型腔设计方法受到试验手段限制,通常采用综合收缩率计算型面,认为铸件各点收缩变形具有同样的收缩率<sup>[4]</sup>,这种方法显然不完全合理。对于具有复杂外形的铸件,冷却时因散热不均而导致的铸件收缩是非线性、非均匀的。

目前绝大多数研究和应用都集中在铸件内部组织和缺陷的预测、铸造工艺参数的优化等方面。但对于一些复杂精密铸件而言,除上述工作之外,还必须进一步研究它的尺寸精度问题,才能满足其净成形精度控制的要求<sup>[5]</sup>。目前国内针对这一问题的研究尚属空白,致使精铸模具型腔的优化设计一直缺乏科学的理论指导,仍然停留在过多地依赖经验的阶段。随着铸造过程数值模拟技术的成熟,一些大型有限元计算软件已广泛应用于生产,并在实际工程中得到验证<sup>[6]</sup>,因此可考虑采用模拟仿真手段更加准确地获得铸件不同位置所需的变形趋势及变形量。

## 1 模具型腔反变形原理

反变形的基本原理是根据铸件变形量的大小和分布对模具的形状进行修正,使得铸件在凝固收缩后的形状仍然能满足几何精度的要求。如图 1 所示,假设铸件设计形状为  $P$ ,变形后的形状为  $Q$ ,则反变形后的形状为  $R$ 。

在外形复杂的铸件设计中,一次反变形通常无法满足精度要求。通过迭代法可以较为精确地逼近外形,本课题采用精度闭环控制的方法加以解决。假设铸件的目标形状函数为  $D$ ,浇注前的形状函数为  $P$ ,浇注后的形

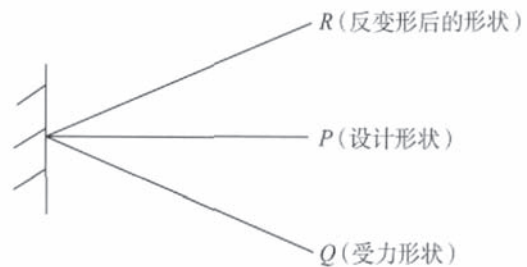


图 1 反变形原理

Fig.1 Principle of reverse deformation

\* 国家“863”高科技项目(2006AA04Z144)、国家科技支撑计划项目(2006BAF04B02)资助。

状函数为  $Q$ , 浇注变形函数为  $W$ , 便可分别得到有限元网格模型的节点坐标  $D(x, y, z)$ ,  $P(x, y, z)$ ,  $Q(x, y, z)$  和  $W(x, y, z)$ 。由第  $i$  次试算前初始形状  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  经过  $i$  次有限元试算可以得到浇注后的形状  $Q_i(x_i, y_i, z_i)$ , 则由  $i$  次具有反变形形状的结构经过浇注后与目标形状的误差  $\Delta D_i(x_i, y_i, z_i)$  应为:

$$\Delta D_i(x_i, y_i, z_i) = Q_i(x_i, y_i, z_i) - D(x, y, z) \quad (1)$$

如果误差  $\Delta D_i < \Delta M_{\max}$ , 则  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  就是最终的理想反变形形状, 反之则必须对反变形形状加以修正, 在前一步反变形的基础上反向叠加与目标形状的误差  $\Delta D_i$ , 即:

$$P_i = -\Delta D_{i-1} + P_{i-1} \quad (2)$$

这样就得到了反变形的递推公式, 用迭代法计算出  $P_{i+1}$ , 然后计算  $Q_{i+1}$ , 最后得到铸件的形状误差  $\Delta D_{i+1}$ , 如果误差满足了允许的形状误差精度, 程序就自动退出计算, 输出最终的反变形形状函数:

$$P(x, y, z) = P_i(x_i, y_i, z_i) \quad (3)$$

## 2 数值模拟各阶段生成的文件分析

ProCAST 精铸数值模拟的一般流程如图 2 所示。

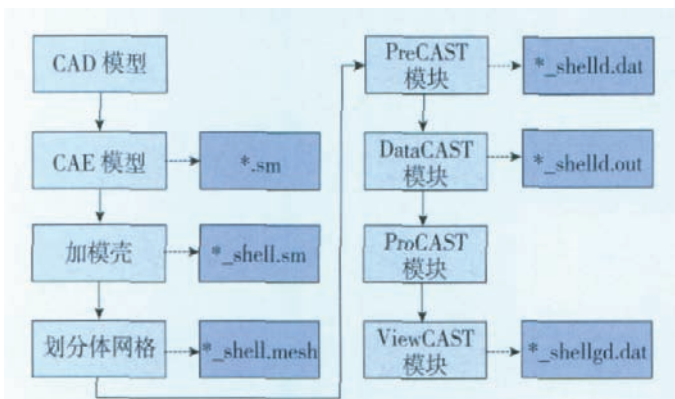


图 2 ProCAST 精铸数值模拟的一般过程

Fig.2 General process of ProCAST-based numerical simulation on investment casting die

(1) 首先利用通用的 CAD 软件(如 UG) 建立零件的 CAD 模型, 并完成浇注系统的设计。基于数据交换格式 Parasolid 格式进行信息传递。

(2) 在 PreCAST 导入零件的 CAD 模型文件后, 调用 MeshCAST 功能模块: 先将零件划分面网格, 然后添加模壳, 最后生成体网格文件。

(3) 在 PreCAST 模块中选择合适初始条件、边界条件和物理条件赋予相应节点单元, 并设置合理的运算结

束判断条件。

(4) 通过 DataCAST 模块将 PreCAST 模块生成的文本信息文件转换成二进制文件, 以加快有限元计算的速度。

(5) 在 ProCAST 模块中对模型进行有限元仿真计算。

(6) 调用 ViewCAST 功能模块: 查看数值模拟的结果, 如温度场、应力场和位移场的显示。

在用 ProCAST 进行的精铸数值模拟的过程中, 系统会生成相应的网格文件, 里面包含了有限元仿真计算所需的信息以及计算的结果。图 2 中虚线所指的文件是各阶段生成的文件名的后缀。其中 \*.sm 为面网格文件, 记录了有限元模型包含的面节点数、面单元数及节点坐标; \*\_shell.sm 为添加模壳后的面网格文件, 增加了一些节点信息; \*\_shell.mesh 为体网格记录文件, 包含了体单元的连接信息和体节点的信息; \*\_shelld.dat 文件记录了 \*\_shell.mesh 文件中包含的一切信息, 并添加了模壳和铸件表面对应节点的信息; \*\_shelld.out 文件记录了边界条件信息、热物性参数信息和节点信息等; \*\_shelldg.dat 文件则记录了仿真计算后的所有体节点的信息。

## 3 有限元网格文件处理

ProCAST 并未提供二次开发接口, 进行精铸仿真后, 为了进行模具型腔的优化, 必须对网格信息文件进行处理。处理过程包括 2 方面内容:

(1) 按照需要从相应的网格文件中读取必要的节点信息。在完成反变形运算后, 还需要按照原有的信息格式保存文件, 否则无法被 ProCAST 识别。网格信息读取的流程如图 3 所示。

(2) 在数值模拟时, 生成的网格节点量很大, 在节点中查找对应点将耗费大量计算资源, 因此需对网格节点

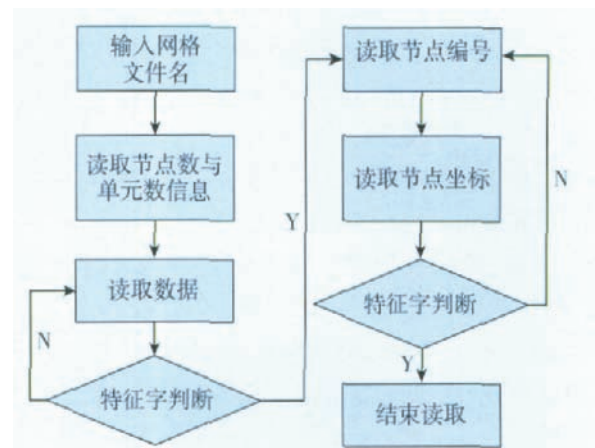


图 3 网格节点信息的获取

Fig.3 Grid node information acquisition

进行排序。另外, ProCAST 在模拟后生成的网格节点顺序与模拟前不一致, 如果直接匹配, 也会因节点不匹配造成网格严重变形, 图 4 为某型精铸涡轮叶片网格节点排序前后的节点叠加形状对比。

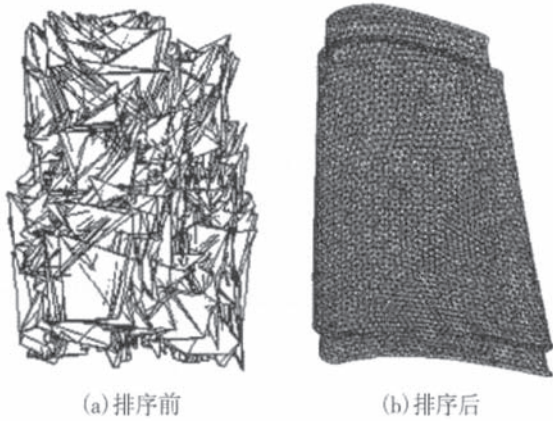


图 4 排序前后叶片网格节点叠加形状对比  
Fig. 4 Comparison on superimposition shape of blade grid node before and after sort

通过分析基于 ProCAST 平台的数值模拟中节点的变化, 可知在 2 个位置会发生节点的重排, 具体情形如下:

(1) 在 MeshCAST 模块中, 生成模壳后, 铸件与模壳间会产生间隙, 为了描述铸件与模壳间的温度变化, 系统将接触点复制 1 个, 将生成的新节点放在文件末尾, 此时会发生节点顺序的重排。

(2) 在 DataCAST 模块中, ProCAST 生成的 \*\_shelld.dat 是文本文件, 系统将它转化成二进制文件以提高运算速度, 此时也会发生节点顺序的重排, 同时系统生成 1 个节点排序文件。但是发生这类重排时面节点上的坐标已发生位移, 需要利用到 \*\_shelld.out 文件, 这个文件含有 1 份索引表, 记录了前后节点的对应关系, 利用这个索引表就可以完成节点的重排。

欲完成节点匹配, 需要同时解决 2 类重排的问题。需要在节

点重排处建立 2 张索引表, 通过索引表的对应得到节点反变形的对应关系, 其步骤如图 5 所示。

节点匹配后, 再将 ProCAST 生成的网格文件进行简化, 提取出所需要的节点坐标信息。本课题采用分界查找法搜索对应节点。分界查找法把数据与特殊设定的分界值作为大小对比的对象进行对比, 并根据对比结果调整分界值大小, 再次进行对比。迭代运算后, 不同的分界值将整个数据区域分解成足够多的按序排列的小单元。每个数据经过与不同分界值的对比, 能够迅速归位于其相应的单元内, 以达到排序的目的<sup>[7]</sup>, 其算法见图 6。

首先把排序数据用分界值 (最大、最小值的平均值及分界值) 分解成 2 个较小的单元 (第 1 阶), 同理再把第 1 阶的 2 个单元分别分解成 2 个更小的单元 (第 2 阶), 经迭代运算, 直至达到单元个数足够多的第 H 阶为止。这样一共分解出由小到大排列的  $2^H$  个数据单元, 每个数据从第 1 阶开始, 根据自身的大小逐阶与不同的分界值进行对比分流, 到达第 H 阶后进入其相应单元。把各单元数据按顺序进行连接, 最终完成数据排序。

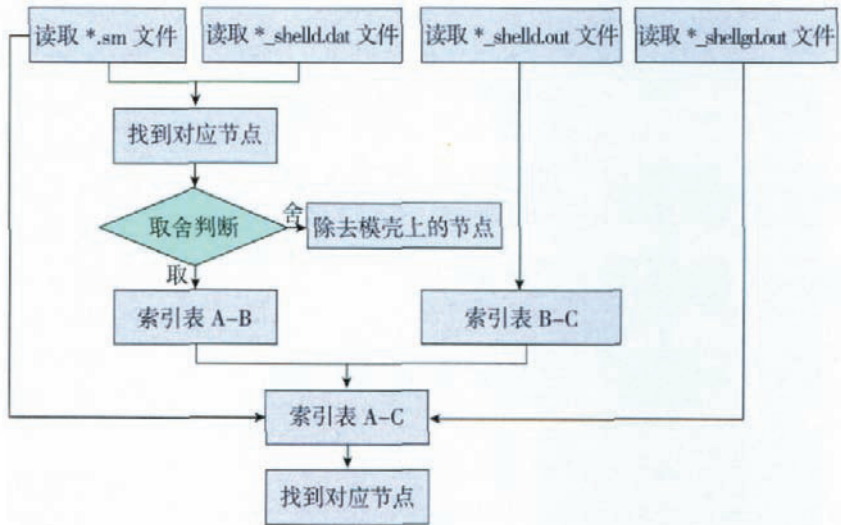


图 5 网格节点匹配流程图  
Fig.5 Flow chart of grid node matching information

|       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
| 第 1 阶 | 1 |   |   |   |   |   |   |   | 2 |    |    |    |    |    |    |    |
| 第 2 阶 | 1 |   |   |   | 2 |   |   |   | 3 |    |    |    | 4  |    |    |    |
| 第 3 阶 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 第 4 阶 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 第 5 阶 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| ⋮     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |

图 6 分解单元示意图  
Fig.6 Sketch of element decomposition

#### 4 实例分析

涡轮叶片是航空发动机的关键部件,其形状和精度直接影响发动机的性能,精铸模具设计是影响涡轮叶片成品率的主要因素。本课题采用 ProCAST 对涡轮叶片的精铸过程进行数值模拟,提取出模拟各阶段的仿真文件,基于 C++ 在 UG 平台下进行了二次开发,编写了基于数值模拟的精铸模具反变形系统,如图 7 所示。

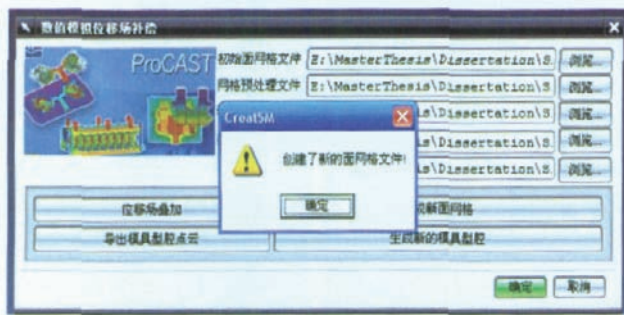


图 7 精铸模具反变形系统界面

Fig.7 Interface of reverse-deformation system for investment casting die

系统读取数值模拟阶段生成的各种文件,对网格节点排序和匹配后进行位移场的叠加,可以生成新的面网格文件。图 8 为优化后的模具型腔点云。

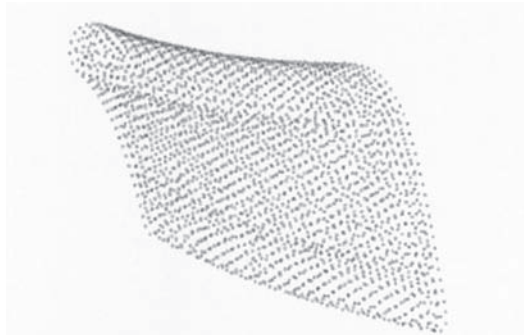


图 8 优化后的模具型腔点云

Fig.8 Optimized mould cavity point cloud

再次基于 ProCAST 对精铸过程进行模拟,得到新的涡轮叶片模型。本课题利用形状误差来评定位移场补偿的结果,定义形状误差:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n |E_i - F_i|}{n}, \quad (4)$$

其中,  $F_i$  为第  $i$  个节点的 CAD 叶型坐标,  $E_i$  为第  $i$  个节点的仿真计算后的型面坐标,  $n$  为面节点的总个数。

形状误差  $M$  反映了 2 个面网格的重合程度,  $M$  越

小,表示经过优化浇注数值模拟后得到的面网格与 CAD 原型面网格越接近。结果见表 1,  $X, Y, Z$  分别表示 3 个坐标方向的平均形状误差。可看出经过 3 次迭代后,叶片的综合形状误差由最初的 0.516mm 降到 0.003mm,收敛效果显著,能够满足叶片精铸的误差要求。图 9 所示为叶片的形状误差随迭代次数增加的变形情况。图中列出了叶宽的变形误差、叶厚变形误差、叶长变形误差和综合形状误差,可以看出随着迭代次数的增加,误差越来越小。

表 1 形状误差随迭代次数增加的变化情况 mm

|        | 型腔部位   | 1 次迭代     | 2 次迭代     | 3 次迭代     |
|--------|--------|-----------|-----------|-----------|
| 平均形状误差 | X (叶宽) | 0.194 366 | 0.001 802 | 0.001 249 |
|        | Y (叶厚) | 0.054 674 | 0.002 627 | 0.001 771 |
|        | Z (叶长) | 0.453 754 | 0.002 917 | 0.001 035 |
| 综合形状误差 |        | 0.515 815 | 0.004 667 | 0.002 557 |

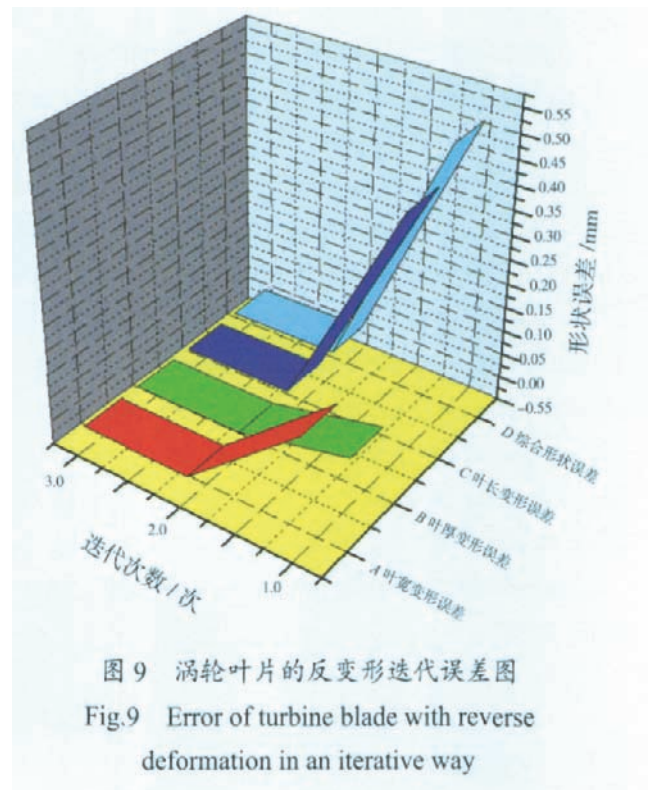


图 9 涡轮叶片的反变形迭代误差图

Fig.9 Error of turbine blade with reverse deformation in an iterative way

#### 5 结束语

本课题基于 ProCAST 平台,利用数值模拟生成的网格文件,编写了网格信息处理程序。实现了网格节点的排序与匹配,将无序节点转变为有序节点。通过分析网格文件的特点,提出了一种模具型腔的反变形方法,经

(下转第 79 页)

在具体实现过程中,应围绕部件和零件展开知识的收集。对于部件结构,重点应放在与部件设计有关的结构布置与承力系统设计、结构连接方式、设计分离面和工艺分离面、结构开口设计和补强、材料选择、工艺和装配等知识以及工程算法的收集;对于构件,应从设计要求、设计输入、采用的设计分析方法(工程算法)和设计过程、材料/加工方式/表面处理及图纸技术条件、设计报告等几个方面进行知识和工程算法的收集。

### 2.3 知识库与构件库的关联

伴随知识库最终服务于构件库,两者之间的关联体现在构件库中的构件与知识库中的知识存在一定的引用关系。

本系统中知识库和构件库的关联主要通过数据表的设计来实现,在表中设计保存两者关系的字段,它们的关系通过知识入库时指定以方便后续使用。具体实现时,可以使用关键字、利用构件库的分类特征和知识库的分类结构之间的相似性。在构件、知识导入时,同时应设置相关的检索工具,完成两者之间的相互检索和应用。

### 2.4 合理的审核流程

知识审核是知识准确性和合理性的基本保证,伴随知识库系统面向知识库管理人员、知识审核人员和一般使用人员,知识库管理人员负责知识的导入、修改更新和删除的操作,但是这些操作必须由知识审核人员审核后才能完成,一般使用人员可以通过浏览和查询使用经过审核的知识。

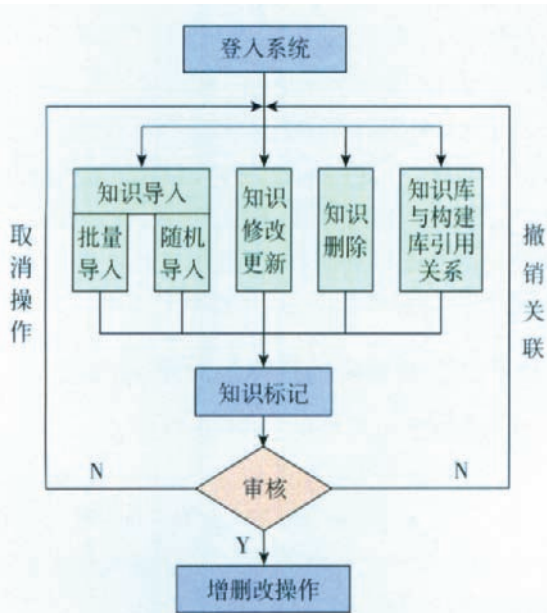


图6 知识审核流程

Fig.6 Checking flow of knowledge

考虑伴随知识库自身的特点并结合审批的基本流程,确定了本系统的审核流程,如图6所示。

### 3 结束语

目前,我国飞机的产量逐年上升,已有批量生产的态势。飞机研制与装配周期的缩短可使企业减少大量人力物力的浪费。

本课题设计并创建了一个可供用户使用和扩展的知识库系统,重点建立了与结构设计有关的相关知识,并按所划分的层次结构建立了结构设计专业的部件和零件设计知识,在建立其他类似知识库系统时可以起到一定的借鉴作用。

### 参 考 文 献

- [1] 梅中义,周俊,范玉青.基于CATIA的复合材料构件设计知识库系统.航空制造技术,2008(3):56-59.
- [2] 张虹,周来水.飞机复合材料构件工装设计知识库研究与实现.中国制造业信息化,2007,36(15):16-19.
- [3] 曹文君.知识库系统原理及其应用.上海:复旦大学出版社,1995.
- [4] 《飞机设计手册》总编委会.飞机设计手册.北京:航空工业出版社,2000.

(责编 玉龙)

(上接第75页)

迭代,使精铸后的几何误差满足设计要求。通过设置的涡轮叶片模具型腔反变形算例,验证了本方法具备良好的收敛性和精度,可初步解决实际的应用问题。

### 参 考 文 献

- [1] 蒋书彬.熔模精密铸造的研究与发展.汽车工艺与材料,1998(10):2-7.
- [2] Balendra R. Economic considerations in die-form compensation for net-forming. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 115(2): 260-263.
- [3] 张丹,张卫红,万敏,等.基于位移场仿真与特征参数提取的精铸模具型面逆向设计方法.航空学报,2006(3):509-514.
- [4] 郑清娟,王敏杰,祝铁丽.基于注塑件收缩率预测的模具型腔尺寸生成方法研究.模具技术,2003(3):5-8.
- [5] 卜昆,赵杰,王继锋,等.基于位移场的涡轮叶片模具设计中的反变形技术研究.中国制造业信息化,2006(5):28-31.
- [6] Jones S, Yuan C. Advances in shell moulding for investment casting. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135 (2-3): 258-265.
- [7] 陈书让.超大数据量的快速排序法.物探化探计算技术,2000(4):374-379.

(责编 玉龙)