

文章编号: 1000-6893(2006)03-0509-06

# 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

张丹, 张卫红, 万敏, 王继峰, 卜昆

(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, 陕西 西安 710072)

## Reversing Design Methodology of the Die Profile in Investment Casting Based on the Simulation of Displacement Field and Identification of Featured Parameters

ZHANG Dan, ZHANG Wei hong, WAN Min, WANG Ji feng, BU Kun

(The Key Laboratory of Contemporary Design & Integrated Manufacturing Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**摘要:** 提出了一种简单高效的涡轮叶片精铸模具型面逆向设计方法: 特征参数逆向调整法。一方面, 基于叶片收缩变形位移场的有限元仿真结果, 更为准确地计算铸件不同部位的收缩率; 另一方面, 通过 12 个反映叶型特征参数的提取、叶型的复原和调整技术, 实现了凝固和冷却过程中非线性收缩变形的补偿, 弥补了传统线性放缩法的不足。由于最终获得的型面仍然是参数化 CAD 模型, 和单纯网格直接反向叠加法相比, 无需后续复杂的曲面拼接和光顺技术。最后以叶片的叶身为例, 将该方法与传统型面放缩法和网格直接反向叠加法进行比较, 结果表明对于弦长为 60.5 mm 的涡轮动力叶片, 采用特征参数逆向调整法, 叶型的型面误差、弦长误差和扭转角误差与传统的收缩中心放缩法相比分别降低了 83.8%、96.3% 和 66.7%, 因此具有很好的工程应用前景。

**关键词:** 叶型; 特征参数; 精密铸造; 模具型面; 逆向设计

中图分类号: V261.3 文献标识码: A

**Abstract:** A simple and efficient reversing methodology of adjusting featured parameters is proposed for the casting die profile design of turbine blades. On the one hand, casting shrinkages at different positions of the blade are considered as nonlinear thermo-mechanical casting deformations that are calculated with accuracy by finite element analysis. On the other hand, twelve featured parameters describing the camber line and thickness of the blade profile are identified, analyzed and adjusted to counteract blade deformations. This method therefore exhibits its advantage over the traditional linear scaling method. As the reversing design of the die profile is directly based on the CAD parameterized model, the post processing of surface smoothing and surface patching is no longer needed as compared with the existing mesh-based reversing method. By investigating the investment casting of a typical blade with chord length of 60.5 mm, the proposed method is compared with the linear scaling method and mesh-based reversing method. Results show that the die profile obtained can satisfy the design requirement more accurately. Compared with the traditional linear scaling method, the maximum profile error, the chord length error and the twist angle error of the blade decrease by 83.8%, 96.3% and 66.7%, respectively.

**Key words:** blade profile; featured parameter; investment casting; die profile; reversing design

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。目前航空发动机涡轮叶片主要采用高温镍基合金材料, 由于高温合金机械加工能力差, 所以常采用熔模精铸净成形工艺制造。为保证零件成形的尺寸精

度、形位精度与表面粗糙度, 模具型腔设计必须考虑对铸件收缩变形的补偿<sup>[1]</sup>。据统计采用国内设计的模具和陶芯, 精铸涡轮叶片成品率不到 40%; 而采用国外引进的模具和陶芯由国内转包生产时, 成品率可达 80% 以上。显然精铸模具的设计是影响成品率的主要因素, 其中又以模具型面设计最为重要。型面设计的原则是在产生变形部位赋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。文献[2]较

收稿日期: 2004-12-10; 修订日期: 2005-04-18

基金项目: 国防基础科研项目(2001BF1011)、国家自然科学基金面上项目(10372082)及重大项目(90405016)、航空科学基金(04B53080)资助项目

全面地阐述了影响熔模铸件尺寸稳定性的各种因素,指出对铸件收缩率的准确赋值是提高熔模铸件尺寸精度,减少因尺寸超差造成废品的关键环节。精铸件的总收缩率由蜡模、合金收缩和少量的型壳膨胀综合而成。型壳膨胀约0.25%所起作用有限;蜡模收缩在测量上较困难,通常采用一平均值;合金比蜡模收缩得大,且影响因素多。其中铸件断面尺寸和型壳的约束最突出,而传统的根据热膨胀系数计算收缩率的线性方法只考虑了合金种类和温差的影响。

目前国内的模具型面设计主要采用型面放缩法进行补偿,具体可分为均匀放缩法、弦长放缩法、中弧线放缩法和收缩中心放缩法4种<sup>[3]</sup>。这类方法虽简便,但存在着明显的不足:首先铸件的均匀收缩近似,即假设在不同部位收缩率数值相同;其次是叶片体积收缩的比例近似,忽略叶片弯扭变形及叶身曲率等几何特征,将叶片设计型面坐标线沿法向比例增厚或者缩小实现模具型腔的补偿。一些研究者<sup>[4,5]</sup>提出沿 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 方向上给出不同的收缩率,在提高模具的精度方面取得了一定的效果,但是收缩率如前所述并没有考虑到铸件本身的结构和不同的约束条件。

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>。因此可考虑采用有效的模拟仿真手段更加准确地获得铸件不同位置所需的反变形量。Modukuru等人<sup>[7]</sup>提出一种网格位移场反向叠加法,利用有限元的网格和节点位移信息,将计算所得的变形量反向叠加于节点上再次进行分析,迭代直至叶片收缩变形后的形状与理想设计形状非常接近为止。这种方法相当于一种虚拟修模法,不足之处在于在铸件变形较大的地方,网格的质量有所降低,可能出现畸变,从而直接影响到数值模拟计算的收敛性和模拟结果的正确性。此外,最终得到的网格离散模型在设计模具型腔时还需要复杂的曲面拼接和光顺技术。

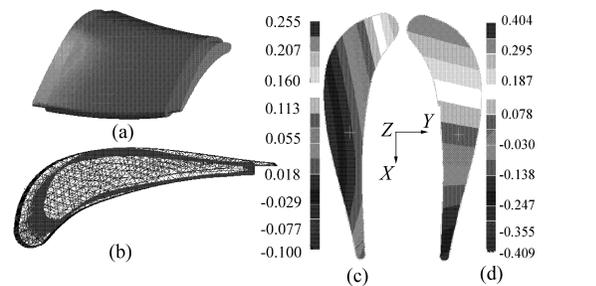
本文在前人研究基础上提出一种简单高效的叶片模具型腔逆向设计方法:特征参数逆向调整法。它集成了CAE位移场模拟仿真与叶片的CAD三维建模技术,通过提取叶型几何形状的特征参数,分析它们在凝固过程中的变化,然后采用反变形原理进行调整,最终获得模具型

腔的补偿形状而无需复杂的曲面拼接和光顺技术。考虑到模具型腔设计主要是针对叶身部分的内腔形状设计,本文着重研究叶身部分的变形补偿。

## 1 位移场仿真与收缩率求解

选择ProCAST软件作为数值模拟平台,假定浇注系统有很好的补缩能力,同时叶片尺寸比较小可瞬间充满,因此忽略充型过程的影响,只对精铸叶片进行温度场和位移场的耦合分析。图1(a)所示工作叶片的叶身部分,以重力浇注方式进行浇注。为便于计算,叶片材料选用1026钢,热物性参数和力学参数选自ProCAST自带数据库,采用上店土型壳,其膨胀系数为 $4.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

铸件初始温度为 $1540 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,模壳焙烧到 $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$ 进行浇注,计算终止温度为 $200 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,位移约束条件为叶身根部固定。结果表明叶片在径向方向的收缩比较均匀,截面的收缩并不均匀,图1(c)和1(d)给出了叶片温度从 $1540 \text{ } ^\circ\text{C}$ 降到 $200 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时距离根部 $4/5$ 处的叶片截面变形情况。由于铸件截面厚薄不均匀,导致铸件冷却时散热不一致,产生收缩应力分布不均匀。叶背厚处受拉应力,盆部前、后缘薄处受压应力,结果产生叶片向叶盆方向抱缩变形,如图1(b)所示,其中叶型弦线方向收缩变形最大。此外,由于叶身根部固定,叶型还产生了一定的扭转变形,安装角发生了一定的变化。



网格的变形(30 $\times$ ) Y方向的收缩变形/mm X方向的收缩变形/mm

图1 叶型的有限元模型和收缩变形结果

Fig 1 FEM model and shrinkage of the blade

图2所示实线为初始设计的叶型A,虚线为收缩变形后的叶型B(对收缩变形量进行了1.5倍的放大)。可见叶片的收缩并非线性的,前后缘的收缩较大,叶盆上的点比叶背上的点收缩大。如果以叶片最大内切圆心作为收缩中心,叶背、前缘、叶盆和后缘上点的相对收缩率分布计算结果可按

图 3 表述, 横坐标叶型弦线的百分比。显然手册<sup>[3]</sup>中给出的收缩率  $K = 1.012$  近似等于截面型线上模拟结果所有点的平均收缩率  $K = 1.0115$ 。

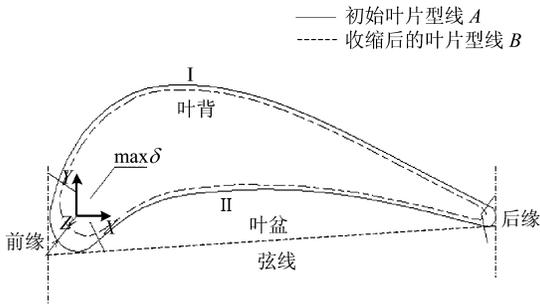


图 2 叶片凝固过程中产生的收缩变形

Fig. 2 Comparison of the blade profiles before and after deformation

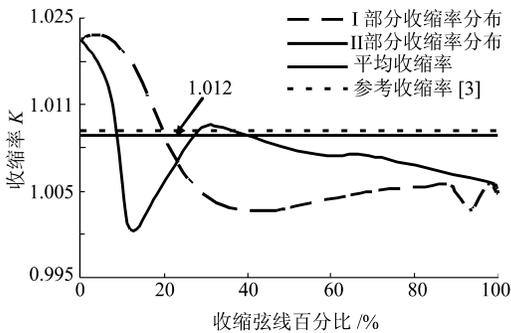


图 3 数值模拟计算的铸件收缩率分布

Fig. 3 Coefficient of casting shrinkage by FEM simulation

## 2 特征参数逆向调整法

### 2.1 特征参数的提取和叶型的复原

涡轮叶片的型面从几何特征上可分为两类: 直纹面和自由曲面。自由曲面叶片的设计过程是首先按照气动载荷与气动性能要求, 通过求解微分方程获得叶盆、叶背上一些关键控制点的坐标以及前缘、后缘圆心位置和半径; 然后根据这些控制点, 设计出叶型的各截平面曲线外形(截面线拟合), 最后将各个截面在径向进行叠加(曲面放样)来完成, 因此截面叶型设计是基础。尽管过程比较直观, 但是控制点过多很难反映叶片形状的特征; 同时设计结果若以截面离散型值点坐标的形式传递给造型系统, 叶片的许多外形特征参数则会丢失, 因此需要将叶片进行参数重构。文献[8, 9]给出了一种叶片参数化设计方法, 可以通过改变中弧线和与叶片厚度密切相关的特征参数实现型线的调整。深入分析叶片在制造过程中特征参数的变化, 就可有效地进行模具型面的补偿。本文首先通过特征参数的提取技术实现叶片参数化

造型的转变。

参数提取技术包括两部分: 一方面要从截面型值点中提取反映外型设计的特征参数; 另一方面在获得这些特征参数后对叶片再进行参数化特征造型, 这与通常意义上的参数化造型有所不同。尽管与叶片结构、强度、制造工艺相关的参数多达二三十种, 但本文主要研究如何对模具的型面进行调整, 以补偿叶身外型的截面线在凝固冷却过程中的收缩变形, 因此选取参数的准则是能够对截面线包含的四段曲线(叶背、叶身、前缘和后缘)进行重构, 并以比较高的精度拟合出原始叶身的截面线。综上选取可有效控制中弧线和叶型厚度的几何特征参数各 6 种进行提取。表 1 给出这些特征参数的名称, 位置见图 4。

表 1 中弧线及叶片厚度特征参数的分类

Table 1 List of featured parameters

中弧线控制参数		叶片厚度控制参数	
参数	名称	参数	名称
$B_0^*$	内弦长	$r_{max}$	最大半径
$\beta^*$	安装角	$T_{max}$	最大半径位置
$F_{max}$	最大挠度	$r_1^*$	前缘半径
$P_{max}$	最大挠度位置	$r_2^*$	后缘半径
$\alpha_1$	前缘几何进气角	$\gamma_1$	前缘楔形角
$\alpha_2$	后缘几何出气角	$\gamma_2$	后缘楔形角

注: \* 表示参数值已知

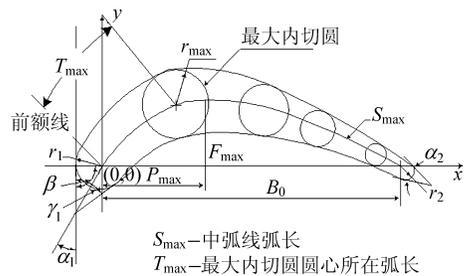


图 4 中弧线及叶片厚度特征参数示意图

Fig. 4 Sketch of camber line and thickness featured parameters

表 1 中 12 个特征参数分为两类: 一类是中弧线控制参数, 控制叶型的尺寸和弯曲趋势。由图 4 可见, 中弧线内弦长  $B_0$  定义为中弧线前、后缘圆心之间的距离, 是反映叶型尺寸的特征参数; 安装角  $\beta$  为内弦长方向与前额线之间的夹角, 它表征了叶型的整体安装位置; 中弧线最大挠度  $F_{max}$  定义为中弧线上的点与内弦之间最大的距离, 表征叶型最大的弯曲程度; 最大挠度位置  $P_{max}$  定义为最大挠度点在内弦长上的位置, 表征叶型最大弯曲点的位置; 前缘几何进气角  $\alpha_1$  定义为中弧线前缘切线方向与前额线的夹角, 表征中弧线前缘斜率; 后缘几何出气角  $\alpha_2$  定义为中弧线后缘切线方向与后额线的夹角, 表征中弧线后缘的斜率。

另一类是叶片厚度控制参数控制叶型厚度的变化。最大半径  $r_{max}$  定义为中弧线上各点中的最大半径, 表征叶型的最大厚度; 最大半径相对位置  $T_{max}$  定义为最大半径点的中弧线弧长距离, 表征最大厚度在叶型上的位置; 前缘半径  $r_1$  定义为前缘圆弧半径, 表征叶片“头部”的大小; 后缘半径  $r_2$  定义为后缘圆弧半径, 表征叶片“尾部”的厚薄; 前缘楔形角  $\gamma_1$  定义为叶片型线前缘上、下切线的夹角, 表征了前缘叶片厚度的变化趋势; 后缘楔形角  $\gamma_2$  定义为叶片型线后缘上、下切线的夹角, 表征后缘叶片厚度的变化。由此这两类控制参数可合理地描述出叶型的主要特征。

中弧线是指叶身截面线内切圆圆心构成的连续曲线, 是叶身截面线的重要属性之一。叶身截面的多种参数, 如几何进气角  $\alpha_1$ 、几何出气角  $\alpha_2$  和安装角  $\beta$  等都是由中弧线确定的, 因此在提取叶片特征参数时最重要的是重新构造叶片的中弧线。由于中弧线上的点是内切圆的圆心, 因此该点到圆与叶背和叶盆相切的点距离相等。

由此结论可以设计如下求解中弧线数据点的方法:

- (1) 如图 5 所示, 对于叶背和叶盆相邻 4 个点做 3 次多项式拟合, 得到曲线  $S_1$  和  $S_2$ ;
- (2) 过点  $V$  做叶背曲线法矢方向的直线与叶盆曲线相交  $M$  点, 取  $VM$  的中点  $O$  作为初始圆心点;
- (3) 求解曲线  $S_2$  上与  $O$  距离最近点  $P$ ;
- (4) 比较  $OP$  距离和半径  $R$ , 若差值小于  $\epsilon$  ( $\epsilon$  为指定最小容差值, 一般可以取工程精度  $10^{-3}$ ), 则  $O$  点为内切圆圆心, 求解结束, 否则采用二分法移动  $O$  点在直线  $VM$  上的位置;

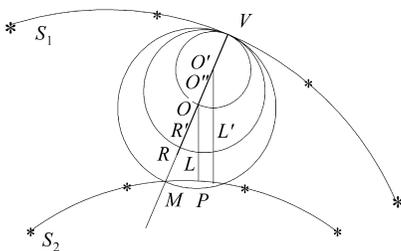


图 5 内切圆求解示意图

Fig. 5 Sketch for the determination of the inscribed circle center

- (5) 重复步骤(3)和(4)。

建立了中弧线和叶型厚度的离散模型后, 利用 UG 软件生成样条曲线的功能, 可以方便地获得中弧线在两端点处的斜率即进气角和出气角、

中弧线峰值点的位置和最大内切圆圆心位置, 结合设计所给出的前后缘圆心坐标和半径条件, 获得前后缘的楔形角。至此, 表 1 列出的 12 个参数中未知参数可全部提取。

为保证叶型的中弧线和厚度分布曲线均有曲率变化较为缓慢和单峰值特征, 将中弧线和厚度模型在峰值点处划分为前后两段, 采用三阶多项式模型, 曲线方程可统一表示如下

$$f = at^3 + bt^2 + ct + d \quad (1)$$

$$f' = 3at^2 + 2bt + c \quad (2)$$

利用表 1 中所给出的 12 个特征参数及表达式(1)和式(2)可以求解出曲线方程的系数。对于中弧线而言,  $f$  对应于  $y$ ,  $t$  对应于  $x$ ; 对于叶片厚度变化而言,  $f$  对应于  $r$  (内切圆半径),  $t$  对应于  $s$  (中弧线弧长)。端点  $(x_1, y_{max})$  为曲线峰值点, 一阶导数(即斜率)为 0; 另一端点为  $(x_0, y_0)$ , 其斜率为  $y_0$ 。峰值  $y_{max}$  对于中弧线模型为最大挠度  $F_{max}$ , 厚度模型为最大半径  $r_{max}$ ; 斜率对于前者为  $\cot\alpha_i$ , 对于后者为  $\sin(\gamma_i/2)$ , ( $i = 1, 2$ )。

叶片型线的生成通过求取包络线的方法获得。如图 6 所示, 中弧线上相邻两圆的圆心为  $(x, y)$ ,  $(x + dx, y + dy)$ , 半径分别为  $r, r + dr$ , 两圆心间的矢量  $ds = dx\mathbf{i} + dy\mathbf{j}$ , 圆心至公切点的单位法向矢量  $\mathbf{m} = m_x\mathbf{i} + m_y\mathbf{j}$ , 两圆的公切线矢量  $d\mathbf{t} = ds + dr\mathbf{m}$ 。

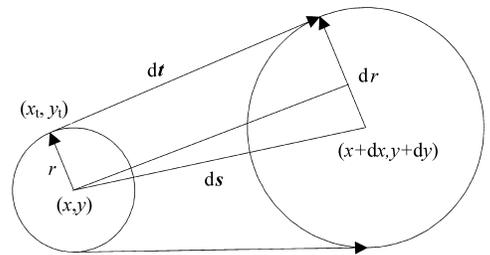


图 6 两圆公切点求解示意图

Fig 6 Determination of common tangent points of two inscribed circles

由以上定义, 公切点坐标  $(x_t, y_t)$  可以表示为

$$x_t = x + r\{(-y'/x') \times [-y'r' \pm (1 - r'^2)^{1/2}x'] - r'/x'\} \quad (3)$$

$$y_t = y + r[-y'r' \pm (1 - r'^2)^{1/2}x'] \quad (4)$$

式中:  $x', y'$  和  $r'$  分别表示圆心坐标  $x, y$  和半径  $r$  对弧长的一阶导数, 式中的  $\pm$  号对应上、下切点。由所有圆心在中弧线上的内切圆的公切点  $(x_t, y_t)$  形成的包络线就是叶片型线。

图 7 给出了利用特征参数复原的叶片型线(虚线)和原始设计给出的叶片型线(实线)比较的结果, 两条型线的最大绝对误差为 0.09 mm, 该算

例叶片型面允许的最大公差为  $\pm 0.15 \text{ mm}$ 。因此利用特征参数复原的叶型可以满足要求。

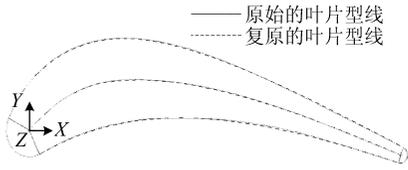


图 7 原始叶片及复原叶片型线的比较

Fig. 7 Comparison of the initial blade profile and the restored one

### 2.2 特征参数的逆向调整过程

对图 2 中两个叶型分别进行特征参数的提取,表 2 和表 3 分别给出收缩变形前后参数大小的变化。将特征参数进行逆向调整生成新的平面型线,平面型线的重构基准是前缘圆心位置与叶型的弦长。由于变形后叶型前缘圆心位置发生了移动,因此需要首先将参数反向调整后生成的叶型沿变形前后两前缘圆心连线反向平移;之后再将其弦长绕前缘圆心顺时针旋转安装角的变化值以弥补叶型扭转的变形。图 8 中的实线为理想的叶片型线,点划线为调整后的叶片型线,为方便对比将其放大 1.5 倍,可见调整后的叶片型线对叶型的不同部位补偿量不同。通过 ProCAST 软件再次进行数值模拟,结果得到叶型收缩变形后的形状,很明显与理想的叶片型线非常接近。

表 2 中弧线特征参数的变化

Table 2 Variations of featured parameters of the camber line

中弧线参数	变形前	变形后	变形量	反变形
弦长 $B_0/\text{mm}$	60.50	59.93	-0.57	61.07
进气角 $\alpha_1/^\circ$	54.80	54.87	0.07	54.73
出气角 $\alpha_2/^\circ$	16.07	16.39	0.32	15.72
安装角 $\beta/^\circ$	0	0.11	0.11	-0.11
最大挠度 $F_{\max}/\text{mm}$	8.86	8.75	-0.11	8.97
最大挠度的位置 $P_{\max}/\text{mm}$	18.77	17.03	-1.74	20.51

表 3 叶型厚度特征参数的变化

Table 3 Variations of thickness featured parameters of the blade

叶片厚度参数	变形前	变形后	变形量	反变形
最大半径 $r_{\max}/\text{mm}$	6.47	6.47	0	6.47
最大半径所在位置 $T_{\max}/\text{mm}$	17.12	14.03	-2.09	20.12
前缘半径 $r_1/\text{mm}$	4.07	4.03	-0.04	4.11
后缘半径 $r_2/\text{mm}$	1.25	1.23	-0.02	1.27
前缘楔形角 $\gamma_1/^\circ$	38.01	34.01	-4.0	42.01
后缘楔形角 $\gamma_2/^\circ$	-9.15	-9.15	0	-9.15

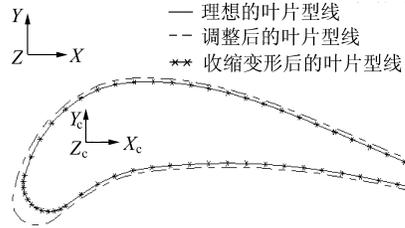


图 8 特征参数逆向调整后生成的叶型(1.5 倍放大)

Fig. 8 Reversing design of blade profile before and after deformation(enlargement factor 1.5)

### 3 3 种型面放缩法的比较分析

引言中提到 4 种工程常用的型面放缩法,其中收缩中心放缩法要比其他方法精确性高。在此比较收缩中心放缩法、网格直接反向叠加法和特征参数逆向调整法 3 种方法所获得的最终型线与理想型线的差异。以叶片的型面误差、弦长误差以及扭转角为衡量标准。表 4 给出了比较的结果。结果表明,收缩中心放缩法的误差最大,超过了允许公差带,所以还需要进一步的修正。误差偏大的原因主要是因为该方法只考虑了厚度对收缩变形的影响,叶型的最大内切圆是叶片最厚的地方,因此圆心是最后凝固点,所以将它作为收缩中心。但是叶片的凝固过程一方面要受到热边界条件的影响,另一方面收缩变形与力学边界条件有很大关系,不同的散热和固定方式会影响到铸件收缩中心的实际位置。后两种基于位移场仿真的型面设计方法通过数值模拟考虑了边界条件对收缩变形的影响,因此误差大大地减小。从结果上看后两种方法的型面和弦长误差都比较小,在允许公差之内。对于弦长在 25 mm 到 100 mm 的叶片,允许扭转角为  $0.25^\circ$ ,3 种方法的扭转角均能满足要求,其中利用特征参数逆向调整法得到的扭转角误差最小。此外,网格直接反向叠加法的最大型面和弦长误差最小,但是由于得到的是离散网格形式,模具型腔的设计必须经过曲面重构、拼接以及光滑,工作量非常繁重,同时也会因网格的划分精度导致累积误差。另外铸件变形后也会影响网格形状,某些网格的形状可能变得狭长,若要进行二次数值模拟,可能导致在某些节点上产生不正确的计算结果。特征参数逆向调整法不仅能够很好地补偿叶片在凝固过程中的收缩变形,而且方便了模具型腔的设计;同时也利于后续与优化技术的结合,具有很好的应用前景。

表4 3种方法的误差比较

Table 4 Error comparison by three methods

型面设计方法	最大型面误差 $\delta/\text{mm}$	弦长误差/ $\text{mm}$	扭转角/ $^\circ$
无修正叶型	0.42	0.57	0.11
收缩中心放缩法	0.37	0.54	0.09
网格直接反向叠加法	0.04	0.01	0.04
特征参数逆向调整法	0.06	0.02	0.03

## 4 结论

(1) 提出精铸模具型腔特征参数逆向调整法,本方法集成了叶片 CAE 位移场模拟仿真与 CAD 三维建模技术,避免了完全依赖网格信息求解模具型腔所产生的曲面拼接和光顺问题与工作,是一种比较简单高效的模具型腔逆向设计方法。

(2) 对于弦长为 60.5 mm 的涡轮动力叶片,采用传统的型面放缩法、网格直接反向叠加法与特征参数逆向调整法进行了比较,后者相对收缩中心放缩法使叶型的型面误差、弦长误差和扭转角误差分别降低了 83.8%、96.3% 和 66.7%。

## 参 考 文 献

- [1] Balendra R. Economic considerations in die form compensation for net forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 115(2): 260-263.
- [2] 陈冰. 熔模铸件的尺寸稳定性和精度[J]. 特种铸造及有色合金, 2003(1): 53-56.  
Chen B. Dimensional stability and accuracy of investment castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2003(1): 53-56. (in Chinese)
- [3] 郭文有, 廖华清, 丁雪明, 等. 航空工程手册[M]. 第1版. 北京: 航空工业出版社, 1998.  
Guo W Y, Liao H Q, Ding X M, et al. Manual of aeronautical engineering[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1998. (in Chinese)

- [4] Jones S, Yuan C. Advances in shell moulding for investment casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135(2-3): 258-265.
- [5] Ito M, Yamagishi T, Oshida Y. Effect of selected physical properties of waxes on investments and casting shrinkage[J]. The Journal of Prosthetic Dentistry, 1996, 75: 211-216.
- [6] Gebelin J C, Jolly M R. Modelling of the investment casting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135(2-3): 291-300.
- [7] Modukuru S C, Ramakrishnan N, Sriramamurthy A M. Determination of the die profile for the investment casting of aerofoil-shaped turbine blades using the finite element method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 58(2-3): 223-226.
- [8] Korakianitis T, Pantazopoulos G I. Improved turbine blade design techniques using 4th order parametric spline segments[J]. Computer Aided Design, 1993, 25(5): 289-291.
- [9] 陈铁, 刘仪, 刘斌, 等. 轴流式叶轮机械叶型的参数设计方法[J]. 西安交通大学学报, 1997, 31: 52-57.  
Chen T, Liu Y, Liu B, et al. A character-parameter method for axial turbomachinery blade design[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1997, 31: 52-57.

作者简介:

张丹(1975-) 女,西北工业大学机电学院博士研究生,主要从事数值仿真与优化研究。



张卫红(1964-) 男,工学博士,国家第二批“长江计划”特聘教授,西北工业大学博士生导师,主要从事结构优化设计与加工仿真研究。

(责任编辑:蔡斐)