

文章编号:1674-8190(2018)01-120-06

燃气轮机叶片精铸蜡型陶芯夹紧元件布局优化研究

朱金焰, 陆长哥, 张仲杰

(上海步朗电子科技有限公司 研发中心, 上海 200235)

摘要: 利用陶芯夹紧元件的布局优化方法可以解决燃气轮机叶片精铸蜡型的壁厚控制问题。首先,对注蜡过程进行模拟,得到陶芯的载荷变化曲线;然后,基于计算力学理论,建立陶芯在夹紧元件不完全约束下的运动模型,计算陶芯漂移量;接着,基于陶芯漂移与夹紧元件布局之间的映射模型,以减小陶芯漂移为优化目标,建立陶芯夹紧元件布局优化模型;最后,采用改进的遗传算法对夹紧元件布局方案进行优化。结果表明:陶芯夹紧元件优化方法可以有效控制陶芯的运动漂移,降低了蜡型壁厚偏差。

关键词: 燃气轮机叶片;精铸蜡型;夹紧元件;布局优化

中图分类号: TP391.7

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.01.016

Investigation on the Clamping Rods Layout Method for Wax Pattern of Gas Turbine Blade

Zhu Jinyan, Lu Changge, Zhang Zhongjie

(R&D Center, Shanghai BLAN Electronics Technology Co., Ltd., Shanghai 200235, China)

Abstract: Wall thickness monitoring of wax pattern of gas turbine blade could be solved by using clamping rods layout optimization method. First, the load curves of ceramic core are obtained based on the simulation results of wax injection process. Then, the ceramic core shifting computing model with incompletely constrained of clamping rods is established based on computational mechanics theory. The influence of shifting on wax pattern wall thickness is analyzed. Further, a clamping rods layout optimization model is established based on the mapping model between core shifting and clamping rods location to compute core shifting. Finally, an improved genetic algorithm is proposed to optimize the layout scheme for clamping rods. The experimental results indicates that the proposed method can monitor the shifting of ceramic core and decrease the wall thickness error.

Key words: gas turbine blade; wax pattern; clamping rod; layout optimization

0 引言

高性能燃气涡轮发动机(航空发动机及地面燃气轮机)是国防重大装备的“心脏”^[1-3]。为了进一步提升燃气轮机的效率,需要提高涡轮前进口温度^[4],为此必须增加涡轮叶片的耐高温能力。目前,涡轮叶片普遍采用复合气膜冷却单晶空心涡轮叶片技术提高其承温能力。涡轮叶片壁厚对叶片冷效及寿命具有决定性影响,K. Winens^[5]通过对

四种不同型号涡轮叶片失效模式的统计分析,认为壁厚是导致叶片失效最主要原因。制备壁厚精度合格的精铸蜡型是保证涡轮叶片壁厚的首要条件,而精铸蜡型壁厚主要依靠精确控制陶芯在蜡型模具中的位姿进行保证。通常在模具中设计定位元件及夹紧元件对陶芯空间位姿进行约束及调整^[6],其中定位元件主要控制和调整陶芯位姿,夹紧元件主要约束陶芯在充型过程的漂移。

通过陶芯定位元件的布局优化设计,可增强其定位稳定性,弱化陶芯及定位元件制造过程中的误差对定位匹配精度的影响。崔康等^[6]提出了基于蜡型壁厚测量结果的定位元件逆向调整方法,通过建立陶芯逆向调整模型,确定了陶芯壁厚偏差与定

位元件补偿量之间的映射关系,依据壁厚测量结果逆向调整陶芯定位元件,从而控制蜡型壁厚分布。Jiang R S 等^[7]通过分析陶芯定位误差传递链,建立了陶芯定位误差传递模型,并进一步基于 D-Optimality 方法,实现了陶芯定位元件的布局优化。冯炜等^[8]引入壁厚权值约束的匹配算法,实现了陶芯测量数据与蜡型模具型面的精确匹配;基于匹配结果建立了定位元件的尺寸计算方法,实现了陶芯位姿调整。

针对陶芯夹紧元件的优化问题,崔康等^[9]提出了一种基于空间形封闭模型的夹紧点布局优化方法,以满足空间形封闭以及陶芯与夹紧元件接触压力要求为约束条件,实现了夹紧元件的优化。此外,在工件夹持问题上,K. P. Padmanaban^[10-11]及 F. M. T. Rex^[12]分别以夹紧元件载荷、工件表面型值点变形量以及工件弹性位移作为优化目标,分别利用有限元仿真技术与启发式算法给出工件定位夹紧布局的详细优化策略。由于陶芯存在制造误差,且陶芯材料具有硬脆性,夹紧元件与陶芯之间需保留一定间隙(通常为 0.1 mm),以保证陶芯在充型过程中的强压应力状态下具有适度退让性。由于该间隙的存在,使得陶芯在蜡料填充型腔时受蜡料流动影响在狭小的空间内易产生运动漂移,引起蜡型壁厚偏差。然而,上述研究并未针对该问题展开探讨。

本文针对空心涡轮叶片精铸蜡型制备过程中陶芯漂移引起壁厚偏差这一问题展开研究。首先对陶芯在蜡料流场作用下的载荷进行分析,进而计算陶芯在蜡料载荷和夹紧元件不完全约束下的运动漂移,建立夹紧元件布局与陶芯漂移的映射关系;在此基础上,以陶芯漂移引起的壁厚偏差为目标,建立夹紧元件布局优化模型,并通过改进的遗传算法优化夹紧元件的位置,以期控制蜡型壁厚偏差。

1 陶芯载荷计算方法

蜡型充型过程是非牛顿流体的非等温、非稳态流动过程,基于连续介质理论可推导出粘性流体动力学的基本方程,该方程可用来描述蜡料填充模具型腔的流动过程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) = \rho \mathbf{g} + (\nabla \cdot \underline{\sigma}) + \nabla p - [\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v})] \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla p \right) + \rho \mathbf{v} \mathbf{v} + (\underline{\sigma} : \nabla \mathbf{v}) + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

$$\underline{\sigma} = 2\eta(T, \dot{\gamma}, p) \underline{D} \quad (4)$$

$$\rho = \rho(p, T) \quad (5)$$

式中: ρ 为熔体密度; \mathbf{v} 为熔体速度矢量; \mathbf{g} 为重力矢量; $\underline{\sigma}$ 为偏应力张量; p 为压力; C_p 为熔体比热容; T 为熔体温度; \underline{D} 为应变率张量; η 为粘度; $\dot{\gamma}$ 为剪切率; k 为熔体导热率。

在获得各离散时刻蜡料网格节点的压强值后,陶芯的载荷可通过以下方法求取^[13-14]。陶芯受力计算示意图如图 1 所示,提取蜡料与陶芯接触区域三角形单元的节点坐标及其压力值(p_i^1, p_i^2, p_i^3);根据形函数插值法计算三角形单元 i 内部点的压力值,并积分计算三角形单元 i 上的等效力 f_i 。

$$f_i = \iint_{\Delta} p_{xy} ds \quad (6)$$

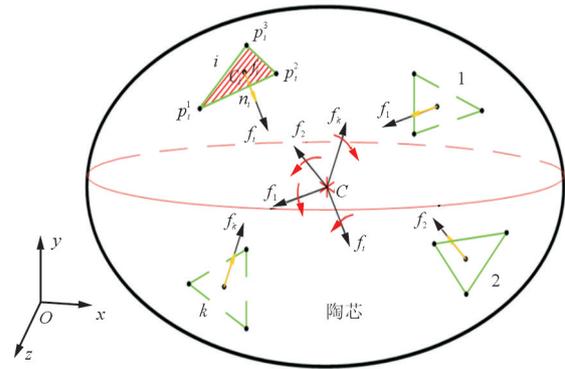


图 1 陶芯受力计算示意图

Fig. 1 Illustration of force computing for ceramic core

计算三角形单元 i 的重心坐标,并根据该重心坐标从几何模型中提取其法向矢量 \mathbf{n}_i ,即可获得蜡料与陶芯接触区域三角形单元 i 上的等效力矢量 \mathbf{f}_i 。

$$\mathbf{f}_i = f_i \mathbf{n}_i \quad (7)$$

将蜡料与陶芯接触区域各三角形单元的矢量力 \mathbf{f}_i 合成到陶芯的重心 C 处,即可获得该时刻陶芯的合力 \mathbf{F}_C 及合力矩 \mathbf{M}_C :

$$\begin{aligned} \sum \mathbf{f}_i &= \mathbf{F}_C \\ \sum \mathbf{M}_C(\mathbf{f}_i) &= \mathbf{M}_C \end{aligned} \quad (8)$$

最后,将充型各离散时刻的合力及合力矩进行插值,即可获得陶芯的充型载荷函数。

2 陶芯漂移计算方法

计算得出陶芯在充型过程中的载荷后,即可基于刚体运动学理论,研究陶芯的漂移计算方法。当陶芯运动过程中与夹紧元件或定位元件接触碰撞时,针对碰撞力的计算,采用弹簧阻尼接触碰撞模型计算碰撞力。该模型假设变形发生在接触点的附近区域,借助弹簧阻尼系统,将瞬态的接触碰撞问题转化为连续的动力学过程进行求解,如图2所示,接触碰撞力可表示为

$$f_e = \begin{cases} S\delta + D\dot{\delta} & (\delta \geq 0) \\ 0 & (\delta < 0) \end{cases} \quad (9)$$

式中: δ 为接触面法向相对压入变形量; $\dot{\delta}$ 为相对压入速度; S 为刚度; D 为阻尼系数。

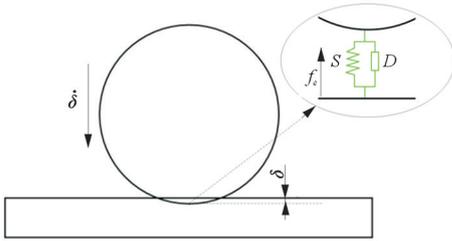


图2 弹簧阻尼接触碰撞模型示意图

Fig. 2 Spring-damping force model

由于定位元件和夹紧元件的不完全位置约束,陶芯在狭小空间内受力做空间自由运动。处于自由运动状态的陶芯具有六个方向的自由度,所以需要六个参数描述其在空间中的运动。陶芯的自由运动可以分解为刚体随着其质心的平移运动和相对于质心的定点转动。

陶芯在定位元件和夹紧元件不完全约束下的平移运动方程的矢量形式为

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{F}_C + \sum \mathbf{f}_e + \mathbf{G} = m_c \ddot{\mathbf{r}}_c \quad (10)$$

式中: $\sum \mathbf{F}$ 为作用在陶芯上的合力; \mathbf{F}_C 为蜡料流动对陶芯的作用力; \mathbf{f}_e 为陶芯与夹紧元件或定位元件的接触碰撞力; \mathbf{G} 为陶芯受到的重力。

选择与陶芯固连且随陶芯运动的坐标系作为动坐标系 $Cx'y'z'$,在运动过程中,陶芯相对于坐标轴的转动惯量和惯性积将保持恒定,故陶芯转动的

动力学方程可表示为矢量形式。

$$\sum \mathbf{M} = (\dot{\mathbf{H}}_C)_{x'y'z'} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{H}_C \quad (11)$$

式中: $\sum \mathbf{M}$ 为作用在陶芯质心上的合力矩; \mathbf{H}_C 为陶芯质心的角动量; $\boldsymbol{\omega}$ 为陶芯绕固连坐标轴 x' , y' , z' 轴的角速度。

通过求解方程组(10)和方程组(11)得到陶芯质心处的平移矢量 $\mathbf{r} = \Delta \mathbf{r} = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$ 和绕动坐标系的转动矢量 $\boldsymbol{\theta} = [\phi, \theta, \varphi]^T$ 。

3 夹紧元件布局优化方法

3.1 夹紧元件布局优化模型

因夹紧元件布局不同,使得陶芯受蜡料流动作用力所产生的漂移量不同,令 C_j ($j=0, 1, \dots, i$) 为夹紧元件,其位置矢量为 C_j ; 设 $\boldsymbol{\Omega}$ 为对应于某种夹紧方案的运动漂移量, $\boldsymbol{\Omega} = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \phi, \theta, \varphi]^T$ 。以夹紧元件位置组合 $\mathbf{C} = (C_1, C_2, \dots, C_i)$ 为自变量,则夹紧元件布局 \mathbf{C} 为自变量集合 \mathbf{X} 中元素;运动漂移量 $\boldsymbol{\Omega}$ 为因变量集合 \mathbf{Y} 中的元素,其他条件视为理想状况。按照第2节刚体动力学分析的对应该法则 f_{RDA} ,集合 \mathbf{X} 中的每一个元素(夹紧元件布局方案 \mathbf{C}),在集合 \mathbf{Y} 中都有唯一的元素(运动漂移量 $\boldsymbol{\Omega}$)与其对应,则有从 \mathbf{X} 到 \mathbf{Y} 的映射:

$$f_{\text{RDA}} : \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Y} \quad (12)$$

元素 \mathbf{C} 在映射 f_{RDA} 下对应的像 $\boldsymbol{\Omega}$:

$$\boldsymbol{\Omega} = f_{\text{RDA}}(\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_i) \quad (13)$$

在陶芯型面上取监测点 P_j , 设 \mathbf{P}_{j0} 为其初始位置矢量, \mathbf{P}_{jt} 为其在陶芯运动漂移后位置矢量,则该监测点的位移大小为

$$D_j(\boldsymbol{\Omega}) = |\mathbf{P}_{jt} - \mathbf{P}_{j0}| \quad (j=1, \dots, k) \quad (14)$$

在陶芯型面上选取 k 个监测点,以其位移大小之和衡量陶芯的运动漂移量(即将六个分量的陶芯运动漂移量 $\boldsymbol{\Omega}$ 转化为一个量),并以该位移和最小为优化目标求解使陶芯运动漂移最小的夹紧元件布局,描述为

$$f_{\text{obj}} = \min \left(\sum_{j=1}^k D_j \right) \quad (15)$$

3.2 布局优化模型求解

求解优化的夹紧元件布局方案使得陶芯的运动漂移量最小,该问题可归结为最优化问题。在3.1节的优化模型中,除了自变量集合、对应该法则

和因变量集合外,无法获得陶芯的曲面方程、截面线方程以及搜索的梯度等精确信息,难以采用基于梯度信息的确定性优化算法,故本文采用改进的遗传算法求解夹紧元件的优化布局方案。以夹紧元件的位置为自变量,刚体动力学分析为对应法则,获得对应于一种夹紧元件布局下的陶芯运动漂移情况。针对如图 3 所示的陶芯,考虑工艺要求设置夹紧元件候选点,每一个夹紧元件的编号为一个基因,故共 5 个基因;依次排列夹紧元件的位置编号(“基因”)为一个“染色体”,即一个个体;并以随机生成的 N 个个体为初始种群。

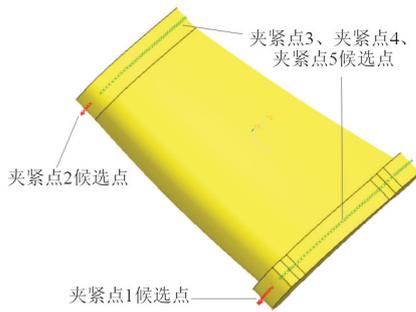


图 3 夹紧元件分布及候选点示意图

Fig. 3 Diagram of the clamping rods and their candidate locations

标准遗传算法^[15]是按照种群中个体对环境的适应能力对其执行选择、交叉和变异等进化操作,以使种群的下一代个体具有更好的适应环境的能力,但易陷入局部最优解、早熟等问题。为此,本文通过对标准遗传算法的算子进行改进,在保持种群多样性的同时提高优化效率。

(1) 选择

选择操作是从当代种群中挑选适应环境能力强的个体以便对其基因进行后续的遗传操作,以使种群中的优良基因能够被保留至后代。本文采用基于排序的轮盘赌选择策略,可描述为:将个体数为 n 的群体按照其个体适应度值由小到大的顺序排成一个序列,如果个体 i 的排序序号为 $rank_{fitness}(i)$, 则其被选择概率:

$$P_i = \frac{rank_{fitness}(i)}{\sum_{j=1}^k j} \quad (16)$$

(2) 交叉和变异

交叉和变异操作主要由交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 控制,而 P_c 和 P_m 值的大小直接影响算法的

收敛性。本文采用基于 Sigmoid 函数的交叉和变异概率调整策略,使得算法尽快跳出局部收敛。

$$P_c = \begin{cases} \frac{p_{cmax} - p_{cmin}}{1 + \exp\left[A\left(\frac{2(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}\right)\right]} + p_{cmin} & f' \geq f_{avg} \\ p_{cmax} & f' < f_{avg} \end{cases}$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{p_{mmax} - p_{mmin}}{1 + \exp\left[A\left(\frac{2(f - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}\right)\right]} + p_{mmin} & f \geq f_{avg} \\ p_{mmax} & f < f_{avg} \end{cases} \quad (17)$$

4 实例验证及讨论

本文以如图 4 所示蜡型为对象,对其充型过程进行计算分析。蜡料采用 Argueso Cerita wax F30-75 进行分析,其材料数据由 Moldflow Corp 测定;充型工艺参数如表 1 所示。通过提取充型各时刻接触面网格节点压强值,利用充型载荷计算模型获得陶芯的载荷分布曲线,如图 5 所示。

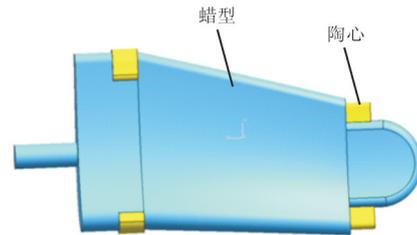


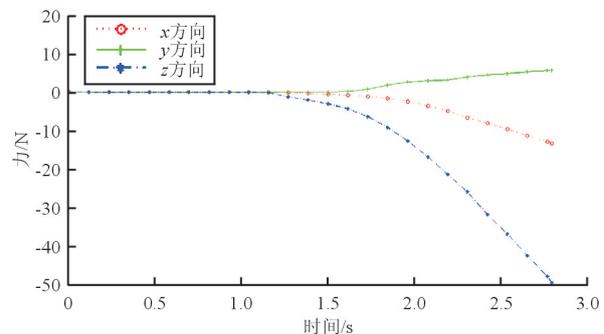
图 4 蜡型示意图

Fig. 4 Diagram for wax pattern

表 1 压蜡工艺参数

Table 1 Injection process parameters

项目	参数	项目	参数
注射压力/MPa	1.0	保压时间/s	20
保压压力/MPa	1.0	冷却时间/s	20
蜡料温度/°C	60		



(a) 合力

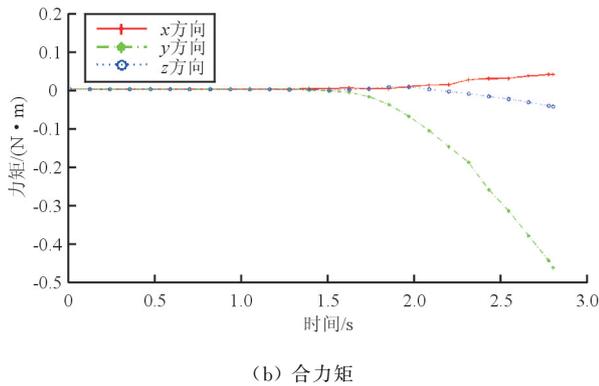


图5 压蜡过程陶芯载荷分布

Fig. 5 Load diagram of wax injection process

以图4所示蜡型为对象,从叶尖至叶根方向等间距取22条截面线(如图6所示),检查陶芯在载荷作用下产生的漂移对叶片内表面偏差的影响,并以此作为量化依据对陶芯夹紧元件进行优化。

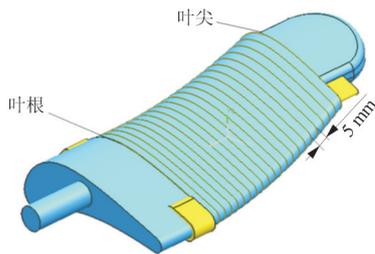
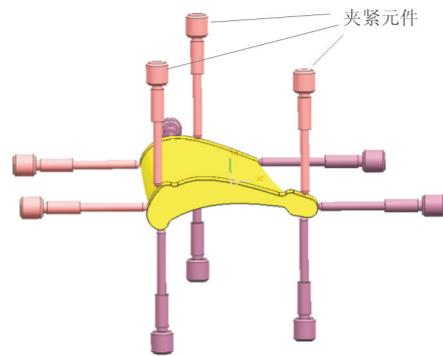


图6 漂移评价截面示意图

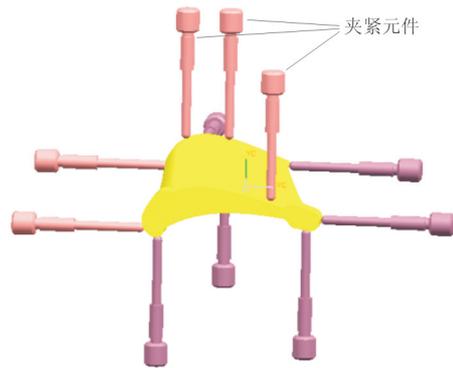
Fig. 6 Diagram of shifting evaluation cross sections

工程实践中,夹紧元件布局是与定位元件位置对称分布确定的,如图7(a)所示;根据本文提出的陶芯夹紧元件布局优化算法计算的优化的夹紧元件布局方案如图7(b)所示。在叶尖和叶根区域,优化后的定位元件和夹紧元件分别为两侧加中间分布,即“三角形”分布,更加有效、稳固。该优化方案下,以陶芯质心为基点,计算得最终的运动漂移量为 $\Omega = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \psi, \theta, \varphi]^T = [-0.090\ 4, 0.014\ 7, -0.015\ 3, -3.376\ 6, 0.067\ 1, 3.440\ 0]^T$ 。

按照图6所示截面方案,对夹紧元件布局方案优化前和优化后的内腔截面偏差进行评价,优化后与优化前的夹紧元件布局效果相比,陶芯漂移量减小,蜡型内腔截面线最大偏差和平均偏差均明显减小,具体数值如表2所示。



(a) 优化前夹紧元件布局图



(b) 优化后夹紧元件布局图

图7 夹紧方案对比

Fig. 7 Comparison of clamping rods layout

表2 夹紧元件布局方案优化前和优化后空心叶片内腔截面线偏差

Table 2 Error comparison of inner cavity cross sections before and after clamping rods layout optimization

夹紧元件布局方案	最大偏差/mm	平均偏差/mm
优化前	0.188 6	0.063 6
优化后	0.105 0	0.020 5

从表2可以看出:该夹紧元件布局优化方案可以减小空心叶片蜡型内表面型面偏差,从而能够提高蜡型壁厚精度。

5 结论

(1) 通过陶芯在蜡料流场作用下的合力及合力矩计算方法,发现在注蜡方向上的陶芯受力较大,为z轴负方向,x和y方向上合力相对较小。

(2) 基于优化的夹紧元件布局方案,蜡型壁厚最大偏差下降了约44%,平均偏差下降了约68%,

从而实现了壁厚偏差的控制,表明本文所提的陶芯夹紧元件优化方法可以有效控制陶芯的运动漂移,降低了蜡型壁厚偏差。

参考文献

- [1] 刘大响, 陈光, 等. 航空发动机——飞机的心脏[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003: 1-5.
Liu Daxiang, Chen Guang, et al. Aero-engine—Heart of airplane[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003: 1-5. (in Chinese)
- [2] 雷杰, 苏三买, 周顾庭, 等. 民用涡扇发动机结构与建模分析研究[J]. 航空工程进展, 2013, 4(4): 450-457.
Lei Jie, Su Sanmai, Zhou Guting, et al. Investigation of civil turbofan structure and components modeling[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(4): 450-457. (in Chinese)
- [3] 刘伟, 陈玉春, 贾琳渊, 等. 基于技术参数评估的涡扇发动机总体性能设计[J]. 航空工程进展, 2014, 5(3): 312-319.
Liu Wei, Chen Yuchun, Jia Linyuan, et al. Turbofan engine performance design based on technical parameters evaluation[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(3): 312-319. (in Chinese)
- [4] 商体松, 赵明, 涂冰怡. 航空发动机燃烧室冷却结构的发展及浮动壁结构的关键技术[J]. 航空工程进展, 2013, 4(4): 407-413.
Shang Tisong, Zhao Ming, Tu Bingyi. Development of aero-engine combustor cooling structure and the key technologies of floating-wall[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(4): 407-413. (in Chinese)
- [5] Winens K. Airfoil thickness as a life limiting factor of gas turbine blades[C]. In 20th Symposium of the Industrial Application of Gas Turbines Committee Banff, Alberta, Canada, 2013: 1-14.
- [6] 崔康, 汪文虎, 蒋睿嵩, 等. 涡轮叶片精铸模具陶芯定位元件逆向调整算法[J]. 航空学报, 2011, 32(10): 1924-1929.
Cui Kang, Wang Wenhui, Jiang Ruisong, et al. Reverse adjustment algorithm of ceramic core locators in hollow turbine blade investment casting die[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(10): 1924-1929. (in Chinese)
- [7] Jiang R S, Wang W H, Zhang D H, et al. Wall thickness monitoring method for wax pattern of hollow turbine blade [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(5-8): 949-960.
- [8] 冯炜, 汪文虎, 王孝忠, 等. 空心涡轮叶片精铸蜡型陶芯定位元件尺寸计算方法[J]. 航空学报, 2013, 34(1): 181-186.
Feng Wei, Wang Wenhui, Wang Xiaozhong, et al. Size calculation method of ceramic core locators for hollow turbine blade investment casting wax pattern[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(1): 181-186. (in Chinese)
- [9] 崔康, 汪文虎, 蒋睿嵩, 等. 空心涡轮叶片精铸模具陶芯夹紧布局优化方法[J]. 计算机集成制造系统, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20171110.1101.006.html>.
- [10] Padmanaban K P, Prabhakaran G. Dynamic analysis on optimal placement of fixturing elements using evolutionary techniques[J]. International Journal of Production Research 2008, 46(15): 4177-4214.
- [11] Padmanaban K P, Arulshri K P, Prabhakaran G. Machining fixture layout design using ant colony algorithm based continuous optimization method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(9-10): 922-934.
- [12] Rex F M T, Ravindran D. An integrated approach for optimal fixture layout design[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(7): 1217-1228.
- [13] Bakharev A, Fan Z, Han S, et al. Prediction of core shift effects using mold filling simulation[C]. In ANTEC Conference Proceedings, vol. LXII, Society of Plastics Engineers. New Jersey: Brookfield, 2004: 621-625.
- [14] Wang N, Wang W H, Jiang R S, et al. Ceramic core shifting monitoring through clamping rods optimization for wax pattern of turbine blade[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(5-8): 2193-2204.
- [15] Michalski R S, Carbonell J G, Mitchell T M. Machine learning: An artificial intelligence approach [M]. New York: Springer Science & Business Media, 1983: 7-9.

作者简介:

朱金焰(1979—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:复杂零件精密成型技术。

陆长哥(1980—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:计算机图形图像处理及自动控制技术。

张仲杰(1981—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:集成电路封装与设计技术。

(编辑:赵毓梅)