

涡轮叶片精铸蜡型陶芯定位布局优化求解算法研究

Research on Greedy Algorithm and Interchange Algorithm to Optimize Wax Pattern Ceramic Core Locator Layout of Turbine Blade

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 姚业建 汪文虎 王孝忠 王怀亮

[摘要] 为求解陶芯的定位布局优化方案,提高涡轮叶片精铸蜡型陶芯的定位精度以保证精铸叶片成品率,本文提出并研究了基于不同算法对蜡型陶芯定位点布局进行优化。基于陶芯定位误差传递方程,采用 Greedy 算法和 Interchange 算法对蜡型陶芯定位点布局方案进行求解;并对两种算法的计算精度和计算时间进行对比研究。结果表明, Greedy 算法具有较好的计算精度, Interchange 算法时间较短。该研究对工程实践中求解定位点布局优化方案有重要的意义。

关键词: 蜡型陶芯定位 布局优化 Greedy 算法 Interchange 算法

[ABSTRACT] In order to achieve the optimal layout of ceramic core locators, improve turbine blade casting ceramic core positioning accuracy and high yield investment casting parts, the ceramic core locator optimization is proposed and studied by Greedy algorithm and Interchange algorithm. Based on ceramic core positioning error transfer chain, the optimal layout of ceramic core locators is solved by using greedy algorithm and Interchange algorithm. At the same time, computation accuracy and computation time is compared and studied. The result shows that the computation accuracy of Greedy algorithm is better and the computation time of Interchange algorithm is better. The study is of great importance to achieve the optimal layout of ceramic core locators in engineering practice.

Keywords: Wax pattern ceramic core location Layout optimization Greedy algorithm Interchange algorithm

涡轮叶片是航空发动机动力系统的重要组成部分,形状复杂且尺寸精度高。在实际生产过程中采用无余量精密铸造完成,但废品率高。其中不合格铸件中约 50% 是由壁厚超差所导致的,而陶芯定位点布局是影响壁厚的一大因素。因此,为减少壁厚超差,提高铸件成品率,须对陶芯定位点布局进行优化。

针对定位点的布局优化问题,国内外做了大量有意义的探索与研究。Y. Kang^[1] 基于零件平面定位方

法建立了描述零件位置偏移与夹持元件制造、安装误差之间关系的定位方案几何模型; Kim 和 Ding^[2] 基于 Interchange 算法研究了多工位装配中的定位优化问题; Jon Kleinberg 等^[3-4] 研究了 Greedy 算法在求解解空间中的运用; 马骊溟等^[5] 针对复杂曲面类毛坯通常没有定位基准的情况,提出了大型复杂曲面类毛坯加工定位的全局优化算法。但目前对于 Greedy 算法和 Interchange 算法用于蜡型陶芯定位点布局优化求解中的研究还较少,在现有的研究成果基础上,本文提出利用 Greedy 算法和 Interchange 算法对蜡型陶芯定位点布局优化方案进行求解,并做了进一步的对比研究。

针对陶芯定位点布局优化求解的问题,本文提出对简化的陶芯定位模型,基于 D-Optimality 优化准则,分别采用 Greedy 算法和 Interchange 算法求解优化定位方案,并分析对比 Greedy 算法和 Interchange 算法的精度和计算时间。

1 基于 Greedy 算法的蜡型陶芯定位布局优化

陶芯定位过程的简化如图 1 所示。假设 δ_r 为定位接触点的一个微小扰动, δ_q 为陶芯质心处姿态变化量。则陶芯定位误差传递方程为^[6]:

$$J\delta_q = \delta_r \Rightarrow \|\delta_r\| = \sqrt{\|J\delta_q\|^2} = \sqrt{\|J^T J\| \cdot \|\delta_q\|^2} \quad (1)$$

J 为 Jacobian 矩阵。令 $M=J^T J$, 有:

$$\max \det(M) \text{ where } M=J^T J \quad (2)$$

由上式可知,要优化蜡型陶芯定位点的布局就要增大矩阵 M 行列式的值,即优化 M 矩阵。优化过程主要就是搜索解空间,得到满足约束条件的解。但搜索解空间以得到全局最优解的计算量非常大。假定从包含 K 个初始点中找出全局最优的定位方案,其计算量为 $O(k^6)$,这在工程运用中无法实现。因此可以找一个满足给定的精度阈值的次优解。

Greedy 算法是一种不追求最优解,只得到较为满意解的一种求解算法,可以用于本文蜡型陶芯定位点的布局优化^[7-8]。算法实现过程为:在陶芯表面选取一定数量的初始点,从初始点点集中逐步删除定位点,尽量使

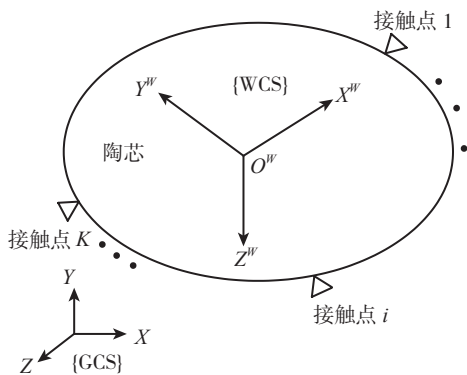


图1 陶芯的定位简图
Fig.1 Diagram of ceramic core location

得矩阵 M 的行列式变化小。假设初始点有 k 个, 矩阵写为:

$$M = J^T J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 & \cdots & J_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_1 & J_2 & \cdots & J_k \end{bmatrix}^T = \sum_{i=1}^k J_i^T J_i \quad (3)$$

假定第 j 个点删除, 同时令 $M(j)$ 为删除第 j 个点后定位点集的 M 矩阵, 则:

$$M(j) = J^T J - J_j^T J_j \quad (4)$$

$$\det(M(j)) = (1 - p_{jj}) (\det(M)) \quad (5)$$

式中, $p_{jj} = J_j M^{-1} J_j^T$ 。

由式(5)知, 随着定位初始点的删除, 矩阵 $M(j)$ 的行列式递减。删除 p_{jj} 最小的初始点可以使矩阵 M 的行列式值变化最小, 进而可使由定位源误差引起的陶芯定位误差最小。优化定位方案的流程如图 2 所示。

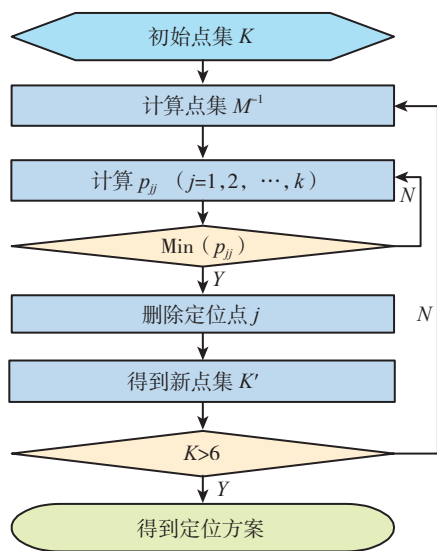


图2 基于Greedy算法的定位方案优化流程图
Fig.2 Flow chart of Greedy algorithm based on location optimization

基于 Greedy 算法, 以某叶片叶身三维模型的定位方案优化为例对其进行定位点布局优化, 如图 3 所示, 结果如图 4 所示。

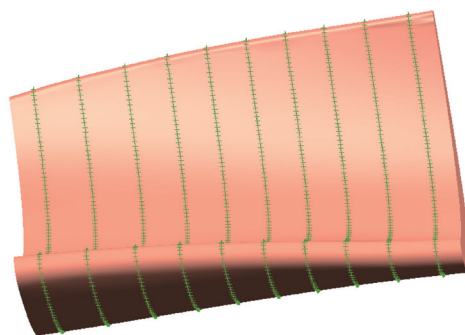


图3 陶芯示意图
Fig.3 Diagram of ceramic core

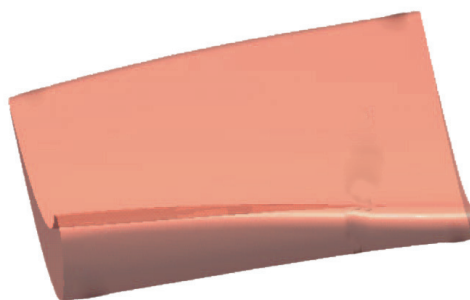


图4 基于Greedy算法的陶芯优化定位方案
Fig.4 Greedy algorithm based ceramic core optimization scheme

在优化定位方案的求解过程中, 随着迭代次数的增加, $\det(M)$ 的变化如图 5 所示。

Greedy 算法可以将三维零件定位方案优化搜索的计算复杂度从 $O(K^6)$ 降为 $O(K^2)$ 到 $O(K^3)$ 。但当定位初始点数量较大时, 其计算效率依然不高。

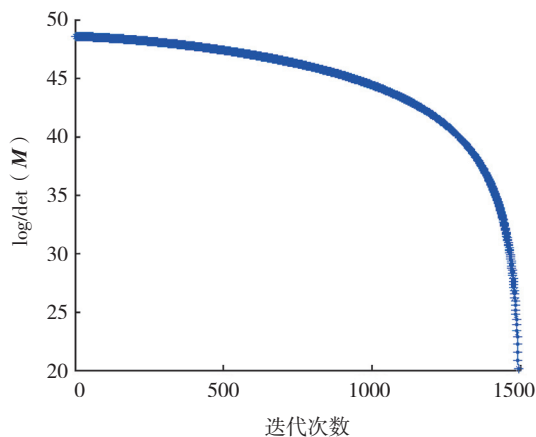


图5 $\det(M)$ 随迭代次数的变化
Fig.5 $\det(M)$ with iteration number changes

2 基于 Interchange 算法的蜡型陶芯定位布局优化

针对 Greedy 算法计算效率不高,本文提出基于 Interchange 算法的定位方案优化方法,思路为:首先从定位初始点点集中产生一个包含 6 个初始定位点的点集,然后引入定位点交换步骤,对初始定位方案中的定位点进行优化。

根据式(4)和(5),增加定位点时有:

$$\det(\mathbf{M}(j)) = (1 + p_{jj})(\det(\mathbf{M})), \quad (6)$$

其中: $p_{jj} = \mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_j^T$ 。

令初始定位矩阵为 \mathbf{M} , 删除第 j 个定位点后矩阵为 $\mathbf{M}(j)$, 增加第 k 个定位点后矩阵为 $\mathbf{M}(j, k)$ 。由公式(5)可知:

$$\det(\mathbf{M}(j, k)) = (1 + \mathbf{J}_k \mathbf{M}(j)^{-1} \mathbf{J}_k)(\det(\mathbf{M}(j))) \quad (7)$$

当交换定位点后有:

$$\det(\mathbf{M}(j, k)) = ((1 + p_{kk})(1 - p_{jj}) + p_{jk}^2)(\det(\mathbf{M})), \quad (8)$$

式中: $p_{kk} = \mathbf{J}_k \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_k^T$, $p_{jk} = \mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_k^T$ 。

由式(7)可知,在 Interchange 算法的一个循环中使 $\det(\mathbf{M}(j, k))$ 的值最大的定位点 k 为初始点。流程为:生成一个初始定位方案;计算定位方案 \mathbf{M}^{-1} , 选择一个定位点 j , 搜索定位初始点集, 找到 $\text{Max}(p_{jk})$ 的定位点 k , 用定位点 k 替代定位点 j ; 更新定位方案 \mathbf{M}^{-1} ; 重复上述过程, 直至 $\det(\mathbf{M})$ 取值增加幅度在给定阈值范围, 流程图如图 6 所示。

基于 Interchange 算法, 对图 3 模型其进行定位点布局优化, 结果如图 7 所示。 $\det(\mathbf{M})$ 的变化规律见图 8。

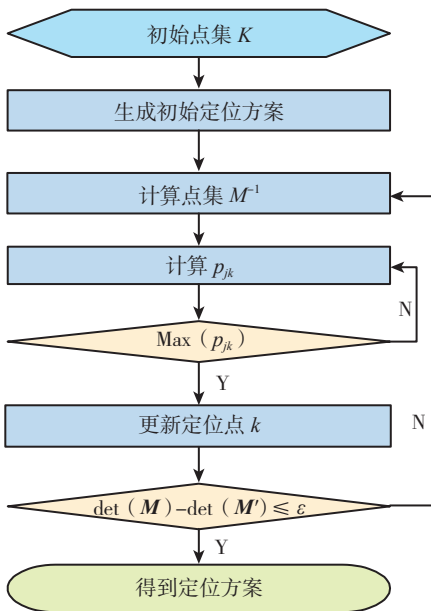


图6 优化定位方案流程图

Fig.6 Flow chart of optimal positioning program



图7 基于 Interchange 算法的陶芯优化定位方案
Fig.7 Interchange algorithm based ceramic core optimization scheme

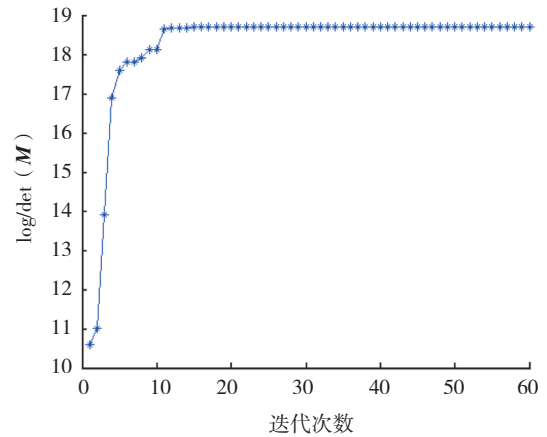


图8 基于 Interchange 算法 $\det(\mathbf{M})$ 随迭代次数的变化
Fig.8 Interchange algorithm based $\det(\mathbf{M})$ with iteration number changes

3 Greedy 算法与 Interchange 算法在求解中的对比与分析

计算时间和精度是衡量优化方法优劣的主要标准。本文以陶芯的定位优化问题作为参考标准, 对比分析 Greedy 算法与 Interchange 算法在优化运算中的计算时间和计算精度。

图 9 所示为 Greedy 算法与 Interchange 算法随定

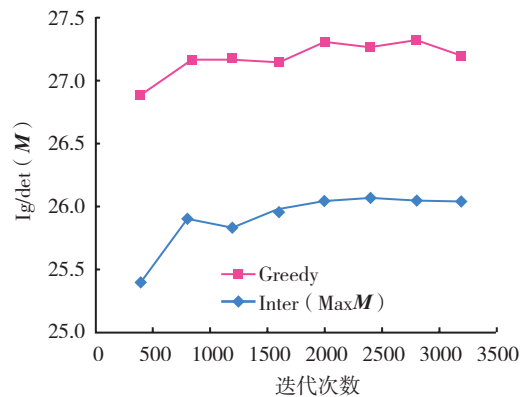


图9 $\det(\mathbf{M})$ 变化情况

Fig.9 $\det(\mathbf{M})$ change condition

位初始点规模不同而导致的 $\det(M)$ 变化情况,可以看出 Greedy 算法具有较好的计算结果,能取得较大的 $\det(M)$ 。

图 10 为 Greedy 算法与 Interchange 算法随定位初始点规模不同而导致的计算时间变化情况,从图中可以看出, Greedy 算法计算时间随着定位初始点规模增加而迅速变长,而 Interchange 算法随着定位初始点规模增加计算时间变化不大。

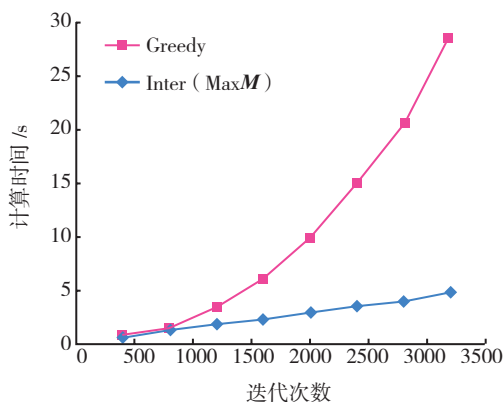


图10 计算时间变化情况
Fig.10 Calculation of time changes

4 结束语

本文针对涡轮叶片精密铸造工艺中需对蜡型陶芯定位点布局进行优化,提出利用 Greedy 算法和 Interchange 算法对优化方案求解,并分析了求解结果的计算精度和计算效率。其中 Greedy 算法求解的陶芯定位点布局优化方案精度较高; Interchange 算法求解的陶芯定位点布局优化方案的效率较高。实际工程运用中,初始定位点一般数量较多,所以在精度允许的前提下,应优先考虑使用 Interchange 算法求解蜡型陶芯定位点布局优化方案。

参考文献

- [1] Kang K. Computer-aided fixture design verification [D]. Worcester Polytechnic Institute, 2001.
- [2] Kim P, Ding Y. Optimal design of fixture layout in multistation assembly processes. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2004, 1(2): 133-145.
- [3] Kleinberg J, Tardos E. Algorithm Design. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, 2005.
- [4] Lee R C T, Chang R C, Tseng S S, et al. Introduction to the Design and Analysis of Algorithms. Taiwan: Unalis Press, 2005.
- [5] 马骊溟,姜虹,贞敏,等. 大型复杂曲面类毛坯加工定位的全局优化算法. 系统仿真学报, 2005(4): 825-826, 830.
- [6] Asada H, By A B. Kinematic analysis of workpiece fixturing for flexible assembly with automatically reconfigurable fixtures. IEEE Journal

of Robotics and Automation, 1985, RA-1(2): 86-94.

[7] Kleinberg J, Tardos E. Algorithm Design. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, 2005.

[8] Lee R C T, Chang R C, Tseng S S, et al. Introduction to the Design and Analysis of Algorithms. Unalis Press, 2005.

(责编 三丰)

(上接第 136 页)

题。要分析维修过程,对维修流程进行优化,加快维修的速度及质量,缩短装备的置换维修时间,也可以达到提高可用度的目的。

4 结论

装备可用度可以通过可靠性设计及优质的制造过程实现高水平的可用度,还可在使用阶段利用检查、维护、预防维修等措施保持高的可用度。然而,由于装备系统的功能要求复杂,所以依靠设计、制造阶段提高可用度的能力受到技术、工艺及管理能力的限制,这两个阶段提升可用度的能力十分有限,如何在使用阶段利用预防维护措施控制高装备的可用度就显得十分重要。

本文假定装备的故障密度函数服从威布尔分布,利用函数关系求出该分布的可靠度函数及其期望函数(装备平均寿命时间)。在建立了似然函数后,用最大似然估计方法建立了联合方程组,利用计算工具求出了形状参数及尺度参数估计函数,该函数与装备有效运行时间有关,这样即获得了装备的平均寿命时间函数。在可用度限定条件下,利用可用度函数求出了装备的最佳预防维修周期及其维修次数。最后,以某装备为实例,在已知参数的条件下,求出了该装备的最优预防维修周期及其维修次数,证明了模型的有效性。

参考文献

- [1] 杜清玲,李美芳,刘家科. 机械设备预防维修周期的确定. 机床与液压, 2000(6): 92-93.
- [2] 韩东,李石磊. 基于可用度的电子装备预防维修周期研究. 军械工程学院学报, 2008, 20(5): 12-14.
- [3] 李扬彬,俞志强. 一种基于可靠度的预防维修决策方案. 空军雷达学院学报, 2009, 23(6): 399-401.
- [4] 盛天文,陈晓慧,易树平. 寿命型设备的预防维修策略研究. 计算机集成制造系统, 2009, 15(3): 598-603.
- [5] 谭林,程志君,郭波. 考虑不完全维修的可修串联系统可用度模型. 国防科技大学学报, 2009, 31(6): 100-105.
- [6] 方瑛,黄征,肖枝洪,等. 复杂串联系统预防维修策略研究[J]. 湖北工业大学学报, 2011, 26(3): 17-19.
- [7] 毛德军,李庆民,张志华. 以装备可用度为中心的保障方案优化方法. 兵工学报, 2011, 32(5): 636-640.

(责编 深蓝)