

汽轮机转子动叶片装配序列智能优化

朱梅玉¹, 李梦奇¹, 文 学^{1,2}, 李冬英¹

(1. 邵阳学院 机械与能源工程系, 湖南 邵阳 422004;

2. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410000)

摘 要: 针对某工厂因动叶片装配序列存在“不平衡量值大、叶片质量或质径积形成的聚集及特殊叶片排序不稳定”问题,而导致动叶片安装时出现动叶片中间体及围带间间隙超差等现象,在简要分析动叶片装配和称重原理的基础上,结合遗传算法的全局优化和快速收敛的特点,提出了动叶片安装排序的智能优化方法。经统计某级动叶片装配间隙数据及转子动平衡测试数据,结果表明:优化算法的采用,使整级动叶片一次性装配间隙合格率由 68.3% 提升至 86.6%,转子动平衡配重质量块减少约 49.2%,在 3000 r/min 时,转子轴颈振动值降低约 25.2%。

关 键 词: 动叶片; 间隙超差; 安装排序; 遗传算法; 不平衡量; 稳定性

中图分类号: V21; TK266

文献标志码: A

Intelligent optimization of turbine rotor blade assembly sequence

ZHU Meiyu¹, LI Mengqi¹, WEN Xue^{1,2}, LI Dongying¹

(1. Department of Mechanical and Energy Engineering,

Shaoyang University, Shaoyang Hunan 422004, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering,

Central South University, Changsha 410000, China)

Abstract: There are some problems such as “large unbalance value, aggregations of blades mass or mass-radins product and unstable assembly sequence of special blade” in rotor blades assembly sequences in a factory, which lead to ultra gaps arising between intermediates and shroud rings during the rotor blades installation. Based on a brief analysis of rotor blades assembly and weighing principle, an intelligent optimization method of rotor blades installation sort was presented in combination with the overall optimization and rapid convergence of genetic algorithm. According to fit-up gaps of a certain grade rotor blade and test data of rotor dynamic balance, the optimization algorithm improved the qualification rate of fit-up gap of the whole grade blade from 68.3% to 86.6%, reduced the rotor balancing counterweight block by about 49.2%, and decreased the journal vibration value by about 25.2% when the rotor rotated at 3000 r/min.

Key words: rotor blade; ultra gap; assembly sequence; genetic algorithm; remaining unbalance; stability

收稿日期: 2016-03-07

基金项目: 湖南省自然科学基金(2016JJ4082); 湖南省教育厅科研项目(15K113)

作者简介: 朱梅玉(1982—),女,讲师,硕士,从事机械工程可靠性研究及教学。E-mail:zmyu8302@163.com

通讯作者: 李梦奇(1977—),男,副教授,博士,从事机械工程可靠性研究。E-mail:sciencefield@126.com

引用格式: 朱梅玉,李梦奇,文学,等. 汽轮机转子动叶片装配序列智能优化[J]. 航空动力学报,2017,32(10):2536-2543. ZHU Meiyu, LI Mengqi, WEN Xue, et al. Intelligent optimization of turbine rotor blade assembly sequence[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2536-2543.

因叶根形式及围带结构不同,汽轮机动叶片的装配方式及检查方法存在较大差别,装配要求也有一定区别^[1-2]。动叶片结构按装配方式可以分为以下三类:轴向装入式,如枞树型叶片;周向装入式,如 T 型及菌型叶片;插入式叶片,如叉形叶片。相邻动叶片间的间隙值及装配后的平衡性作为动叶片装配质量的主要评判依据。由于叶片材料不均匀性、公差控制、加工误差等因素,造成同级动叶片质量、重心及叶片径向性存在一定偏差;装配后,因工序交检只能检验动叶片间间隙,往往为取得合适的间隙值,需对某些间隙超差邻近叶片进行修配,从而导致叶片安装到转子上后产生较大的不平衡量,造成转子动平衡实验负重增加;若高速动平衡实验时加重块数量太多,势必影响转子正常运行时的振动状态,同时影响整个轴系的现场动平衡^[3]。

合理的动叶片装配工艺是机组质量控制的关键环节。对动叶片装配而言,装配序列的收敛性和鲁棒性、效率性及唯一性在实际工程应用中显得尤为重要,其直接影响单级叶片的装配间隙、平衡性及整体机组维护性能。因此,对动叶片的排序研究显得非常重要。

1 汽轮机动叶片装配及排序

经调研,某厂汽轮机转子动叶片装配时,动叶片的安装序列常会出现如下 3 个问题:

- 1) 排序后的结果剩余不平衡量值较大。
- 2) 各级具有特殊叶片的排序乱,序列实际装配要求位置不符。
- 3) 动叶片质量或质径积(质量×回转半径)在轴向排序后出现相近的质量或质径积集中在一个相位,形成“大大、小小”聚集现象,装配时常会出现质量和质径积偏大相位的叶根、拉筋凸台及围带区域间隙超差,如图 1 所示。

动叶片装配在汽轮机转子叶轮的相应轮槽中,不同叶根型线及叶冠形式具有不同的装配方

法,但都遵循如下装配流程:转子轮槽及动叶片清理→预装(装配)动叶片→叶片编号→动叶片称重排序→复装动叶片(微量间隙调整)。要求装配后的相邻动叶片,其叶根型线、叶根中间体、拉筋凸台、围带等各部分间隙均能达到图纸要求;各动叶片汽道高度一致;则能实现高质量的动平衡品质(G2.5 级)^[4-5]。排除动叶片材料不均匀性,加工中常会出现叶根中间体厚度、叶冠部位等尺寸公差及叶片径向性不一致,上公差的叶片质量偏大,下公差的质量偏小,装配后的整级动叶片形成“大大、小小”聚集现象,导致装配时叶根间隙、叶冠间隙超差^[6]。图 2 为转子某级动叶片(共 56 片)排列与围带间隙趋势图,整级动叶片一次性装配间隙合格率约为 68.3%,其排序后的整级剩余不平衡质径积为 0.379 g·m,不平衡角度为 20.8°。动叶片在周向安装位置下的质径积分布如图 2(a)所示,间隙分布如图 2(b)所示。

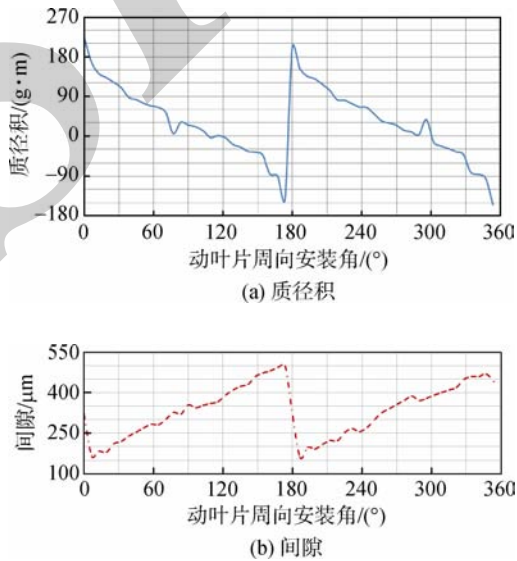


图 2 质径积与间隙分布图(传统排列)
Fig. 2 Mass-radius product and clearance distribution (traditional arrangement)

由图 2 可以看出:在传统算法排序模式下,质径积或者质量在叶轮半圆周由大到小分布,间隙呈相反的变化趋势。为满足动叶装配要求,则需采取修配或者更换叶片完成装配,降低了平衡性和效率,同时增加高速动平衡实验负重。

由此可见,动叶片安装排序方式不同,产生的不平衡量大小、安装位置及叶片间间隙也不同。通过获取各动叶片质量或模拟装配后质径积值,利用智能排序算法(模拟退火算法、遗传算法等),对同级动叶片按一定规则排序,以装配后的质量

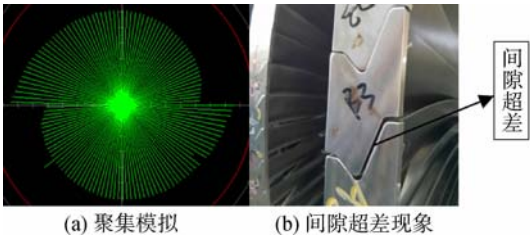


图 1 传统排列问题
Fig. 1 Traditional arrangement problem

矢量或质径积值矢量和合格为最终目标值,选择最接近目标范围值的序列作为最终安装序列作为本文的研究思路。

2 智能算法及其装配中的应用情况

为了使转子达到静平衡精度,国内外采用了多种方法对叶片进行排序,早期采用配对对称安装法,其简便快捷,但精度不高;后来又引入了各种优化算法,包括局部穷举迭代法、逐步调优模拟搜索算法、模拟退火及遗传算法等^[7-8]。不仅实现了动叶片排序自动化,而且具有很高的准确度。文献[9-13]中研究了遗传算法及退火算法在航空发动机转子上的智能排序情况,平衡结果较为理想,但主要侧重于航空发动机转子叶片装配,所涉及叶片数量少,未提及安装序列的唯一性、叶片安装间隙及特殊叶片排序处理事情。

戴义平等^[14]将遗传算法应用到叶片安装排序优化系统中,但主要侧重于描述遗传算法在转子叶片的排序效率。杨达莉等^[15]研究了模拟退火算法在汽轮机转子动叶片的排序优化,效果较好,但受编程参数设定的影响,对整级叶片的相应平衡效果不及遗传算法,在长叶片的重力矩排序尤为明显。本文拟以解决某厂汽轮机转子动叶片装配问题为研究目标,以典型的周向装入式叶片为切入点,探讨装配序列优化问题。

3 动叶片称重排序智能优化

3.1 排序模型

结合某厂的经验及排序要求:按动叶片叶身汽道高度 120 mm 作为评判称重排序时的称重排序依据。对于汽道高度小于 120 mm 的动叶片,称为“短汽道叶片”,用单台电子秤完成质量数据采集,按质量数据为依据对整级动叶片排序;对于大于 120 mm 的动叶片,称为“长汽道叶片”,用两台电子秤按图 3 模式完成质量数据采集,并计算相应力矩,按质径积数据作为依据,进行安装排序。其目标为使所有叶片的质量或者质径积和在 x 、 y 方向的分量都无限接近零或达到最小^[15]。

根据称重原理,当叶片数量有为 n 片时,其短叶片及长叶片的数学模型如下。

1) 短汽道叶片

短叶片汽道短,其由动叶片质量引起的惯性矩基本在转子叶轮外圆,汽道段的不平衡对整体影响较小,采取直接称重方式。如图 3(a)。

$$m_x = \sum_{i=1}^n m_i \cos \theta_i \tag{1}$$

$$m_y = \sum_{i=1}^n m_i \sin \theta_i \tag{2}$$

$$m_{\text{left}} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \tag{3}$$

$$\beta = \arctan \frac{m_y}{m_x} \tag{4}$$

式中 m_x 、 m_y 为质量和分别在 x 方向和 y 方向的分量; m_i 为第 i 片叶片质量; θ_i 为第 i 片叶片的径向线和 x 轴的夹角; m_{left} 为剩余不平衡质量; β 为剩余不平衡量的角度。

2) 长汽道叶片

由图 3(b)可得 $m_i = T_i + B_i$, $x_i = \frac{T_i L_i}{m_i}$, 则每片叶片的不平衡质径积 M_i 如式(5)

$$M_i = m_i (x_i + R) = m_i \left(\frac{T_i L_i}{m_i} + R \right) = T_i L_i + m_i R \tag{5}$$

一级的 n 片叶片,其剩余不平衡质径积计算如式(6)~式(9)所示。

$$M_x = \sum_{i=1}^n M_i \cos \theta_i \tag{6}$$

$$M_y = \sum_{i=1}^n M_i \sin \theta_i \tag{7}$$

$$M_{\text{left}} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \tag{8}$$

$$\alpha = \arctan \frac{M_y}{M_x} \tag{9}$$

式中 M_x 、 M_y 为质径积和分别在 x 方向和 y 方向的分量; M_i 为第 i 片叶片质径积值; θ_i 为第 i 片叶片的质径积向量与 x 轴的夹角,投影到 x - y 轴上表示成 M_{left} 为剩余不平衡质径积; α 为剩余不平

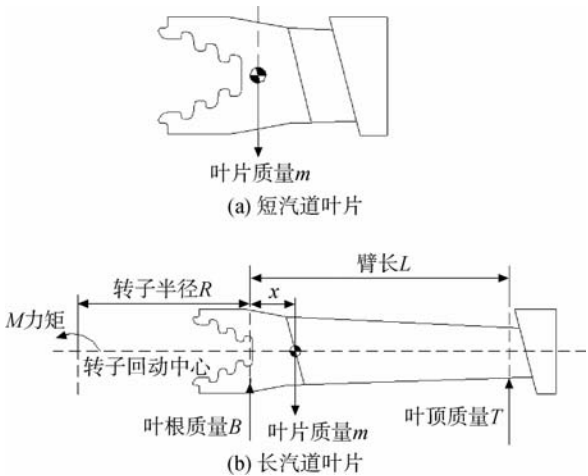


图 3 转子动叶片称重示意图

Fig. 3 Weighing principle of rotor blades

衡量的角度。

3.2 算法与参数选择

3.2.1 遗传算法

遗传算法(genetic algorithm,简称 GA)是一种以自然选择和遗传理论为基础,将生物进化过程中适者生存规则与种群内部染色体的随机信息交换机制相结合的随机化搜索算法^[16-17]。

对于汽轮机动叶片排序,大量叶片的优化排序过程实质上是一个强非线性、多参数复杂优化过程。遗传算法的运算过程如图 4 所示。

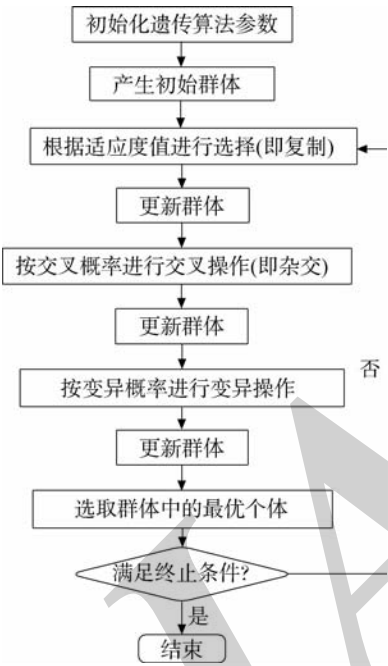


图 4 遗传算法计算基本流程
Fig. 4 Basic processes of genetic algorithm

3.2.2 参数选择

依据遗传算法基本特点,并结合动叶片排序的目标要求,进行参数选择^[18]。

1) 编码

在对叶片排序问题进行编码时,采用 1~ n 这 n 个自然数顺序编码 n 只叶片,以叶片在转子上的排列顺序作为遗传算法的编码,通过这 n 个自然数的不同排列表示叶片在转子上的分布情况。

2) 产生初始群体

假设一级叶片数为 n ,由于排序中不允许有重复的叶片出现,则群体规模最大值只能是 $n!$ 。经综合考虑个体数目、全局最优解质量及运行时间,本文综合选取为 50。

3) 适应度函数

在叶片排序问题中,适应度可用问题的目标函数来表示。目标函数如式(1)、式(2)、式(6)、式(7)分别表示的叶片质量分量与叶片质径积分量,将相应分量综合,就得到了相应的质量和与质径积和;希望目标函数值越小越好,因此为了统一成最大值问题,适应度函数取为叶片质量和的倒数与叶片质径积和的倒数,且满足适应度 ≥ 0 要求。

4) 复制

在叶片排序中,采用 Holland 提出的转轮法来选择复制对象。

5) 杂交

动叶片排序属于 TSP 问题,又属顺序编码,若采用简单的一点交叉或多点交叉策略,会产生未能完全遍历所有叶片的非法排列。针对 TSP 问题的交叉部分匹配交叉(PMX)、顺序交叉(OX)、循环交叉(CX)3种^[13]。本文选用了部分匹配交叉(PMX)。杂交概率一般为 0.5~0.9,且为产生新个体的主要手段,本文概率取 0.8。

6) 变异

对于动叶片排列问题的顺序编码,本文采用了两元素优化变异算子。即:对于按照变异概率选择的个体,随机选取该个体的某两个位置上叶片交换,得到新的叶片排列。对父代所有个体都按照变异概率进行如上变异操作,直到产生下一代群体为止。其变异概率一般为 0.001~0.01,本文取为 0.01。

7) 算法终止条件

设定遗传算法的终止法则要求同时满足两个条件:其一是迭代次数(即遗传代数)要达到 5000;其二是目标函数值(最终排列的质径积和或者质量和)小于实际生产要求的限度值的1/10。

8) 同级特殊叶片排序

转子动叶片不仅结构形式多,而且同级因装配需求存在不同于常规的特殊叶片,这些叶片安装位置固定,给排序计算带来一定的困难。如:大、小节距型、锁口组、内(背)弧叶片等。针对这类型动叶片,文中采取锁定其位置,参与计算,不参与排序的处理方法。

9) 陷入局部最小处理

在该算法的执行过程中,由于有限的种群大小和遗传代数的限制,排序计算时也会陷入局部最小的情况,即迭代次数已经达到最大值,可是目标函数值没有达到实际要求。对于该类问题,采用了简单地丢弃这次程序运行的结果、换一个随机种子重新运行整个算法流程的方法,以确保叶

片排序的正常进行。

10) 结果恒定及唯一性

遗传算法每次计算结果虽然在目标函数上达到要求,但排序不具唯一和恒定性。考虑到动叶片更换及叶片排序唯一性要求,在该文中,选取 20 个固定的随机数种子,并分别调用遗传算法,将结果最好的一次作为最终结果输出,倘若这 20 个固定的随机种子都没有得到满足要求的结果,则继续产生随机数种子,直到得到满足系统要求的结果为止。由于固定了随机种子,所以对同一组数据在相同初始参数条件下得到的排序结果恒定且唯一。

4 实例分析

结合现场,制定图 5 的数据管理结构图。运用平衡、编程及数据库相关知识,以 VC++ 为平台,开发了动叶片称重数据快速智能排序^[19]及数据管理系统。如图 6 所示。

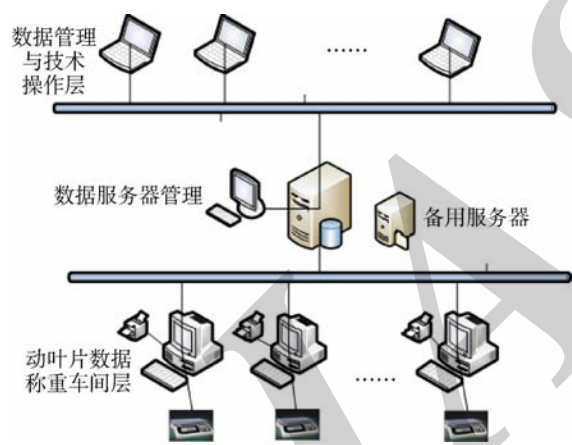


图 5 叶片安装序列数据管理结构图
Fig. 5 Data management drawing of blades assembly



图 6 叶片优化排序模块运行状态
Fig. 6 Running state of blades optimal sorting module

4.1 长汽道叶片

图 7(a)是传统对称算法对 129 片长汽道叶

片排序结果,在该种排序方式下的剩余不平衡质径积为 $0.073\text{ g}\cdot\text{m}$,整圈叶片的布局为“质径积大的叶片→质径积小的叶片→质径积大的叶片→质径积小的叶片”,由于质径积大的叶片根部一般较宽,这种排列方式给相邻叶片间的间隙调整带来了困难,常会出现质径积大的叶片位置修配量大,间隙太小;质径积小的叶片位置间隙太大,超差严重。

图 7(b)是遗传算法的排序结果,剩余不平衡质径积为 $0.006\text{ g}\cdot\text{m}$,远小于传统算法的结果,是一个接近于全局最优解的局部最优解,且符合装配及装配间隙要求。

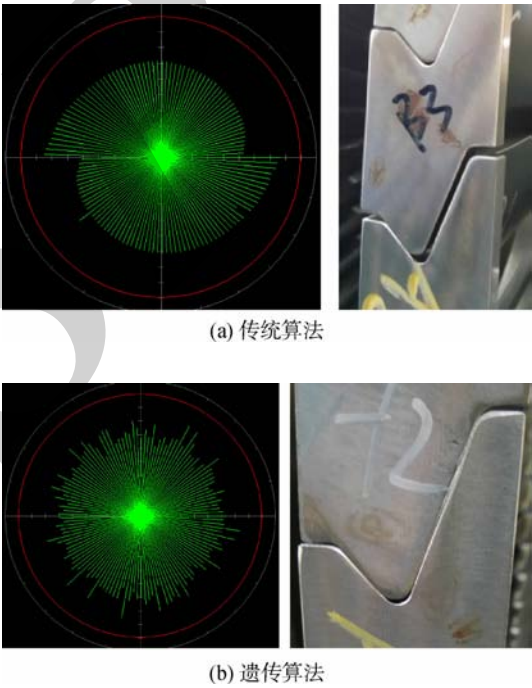
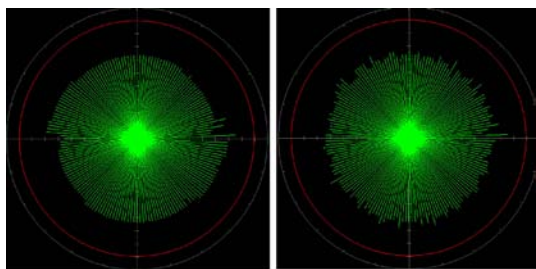


图 7 长汽道叶片排序结果对比图
Fig. 7 Comparison charts of long blades sorting results

4.2 短汽道叶片

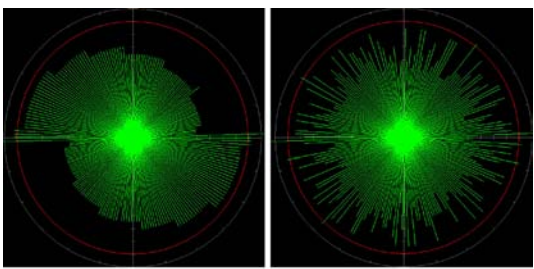
图 8(a)传统算法对 168 片短汽道叶片排序计算的剩余不平衡质量为 0.047 g ;图 8(b)为遗传算法的排序结果,其剩余不平衡质量为 0.003 g 。遗传算法的剩余不平衡量远远小于以前算法,其质量在周向排列为“大-小-大-小”交叉相间形式,无叶片质量堆积现象,同时在一定程度上解决了叶片装配的间隙问题。经测试,虽计算时间略多于以前算法,但对于 300 片动叶片的排序,按现在模式,其计算时间也在 3 min 之内,满足工程实际需求。



(a) 传统算法 (b) 遗传算法

图 8 短汽道叶片对比图

Fig. 8 Comparison charts of short blades



(a) 特殊叶片未指定 (b) 特殊叶片位置指定

图 9 特殊叶片排序对比图

Fig. 9 Comparison charts of special blades

4.3 特殊叶片排序位置模拟

对大小节距型叶片的排序结果如图 9 所示。图 9(a)为优化前的剩余不平衡质径积,结果为 0.086 g·m,其大小节距型应该交叉排列,但图 9(a)中叶片仅仅按质径积进行了对称排列,无法满足装配要求;图 9(b)为优化后的剩余不平衡质径积,结果为 0.01 g·m,剩余不平衡质径积不仅小于以前算法,且特殊叶片的排序也得到了很好的稳定性处理。

4.4 序列稳定性与唯一性

表 1^[15]是用传统算法和遗传算法对 6 级长叶片组和 4 级短叶片组的计算排序结果对比数据。由此可以看出:遗传算法的鲁棒性较好,其运算结果远远小于以前及设计允许剩余值,其结果很接近于全局最优解,且保证了每次排序结构恒定、唯一,给相应机组叶片更换及后续叶片数据管理带来了便利;同时解决了质量或质径积堆积现象,在一定程度上减少了汽轮机动叶片安装时间隙调整时间,符合实际生产要求,提高效率。

4.5 排序装配与高速动平衡

为了装配间隙要求,常对小间隙采取修配,间

隙偏大的位置采取叶片更换或喷涂;相应方法解决了间隙要求,但增加了劳动时间,降低了生产成本。而采取装配序列优化方法对整级叶片的间隙调整明显改善了叶片的平衡性、提高了安装效率具有明显提升。以图 2 所示的同型动叶片排序,整级动叶片一次性装配间隙合格率约为 86.6%,排序后的整级剩余不平衡质径积为 0.0156 g·m,不平衡角度为 249.258°,其剩余不平衡质径积远小于图 2 序列的整级剩余不平衡质径积为 0.379 g·m。优化排序后的动叶片在周向安装位置下的质径积分布如图 10(a)所示,间隙分布如图 10(b)所示。

由图 10 可得,算法优化后的动叶片安装序列在质量或力矩上呈“大小”相间布置,质量偏重的大叶片在一定程度上分担了相邻叶片的间隙,使得最终间隙在相对合格范围内波动,降低了动叶片装配时的修配量,减少或避免了叶片更换数量,减少了生产成本,提高了生产效率。

统计某厂转子在动叶片排序算法优化前后的高速动平衡测试情况,分别以的 30、60、100 MW 同类型机型的转子作说明,其校正位置如图 11 所示。相应转子平衡面在高速动平衡实验时增加的平衡块质量如表 2 所示。

表 1 排序数据对比

Table 1 Comparison charts of sorting data

长叶片				短叶片			
叶片数/片	允许剩余不平衡质径积/(g·m)	剩余不平衡质径积/(g·m)		叶片数/片	允许剩余不平衡量/g	剩余不平衡量/g	
		传统算法	遗传算法			传统算法	遗传算法
129	0.738	0.073	0.006	168	0.500	0.047	0.003
94	2.513	0.231	0.036	142	0.500	0.083	0.005
129	0.732	0.058	0.015	168	0.500	0.072	0.006
94	2.529	0.172	0.018	142	0.500	0.060	0.005
94	1.965	0.162	0.031				
94	3.157	0.299	0.004				

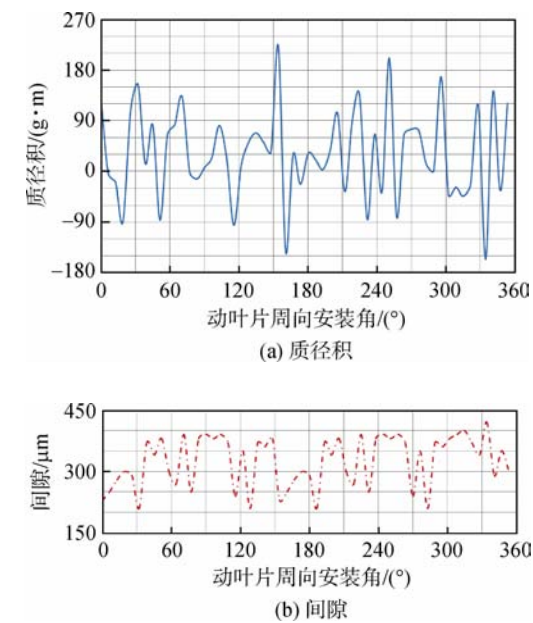


图 10 质径积与间隙分布(优化排列)

Fig. 10 Mass-radius product and clearance distribution (optimal alignment)

由于工厂资源及工程限制,无法对光轴转子实施单独动平衡实验,更无法追述不带动叶片转

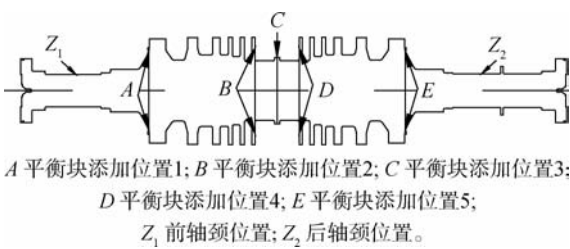


图 11 转子平衡校正位置图

Fig. 11 Rotor balance correction position diagram

子的高速动平衡情况;鉴于均为同一类型转子,且锻件毛坯来源相同,可认为相同型号的光轴转子平衡性一致;其高速动平衡实验后,在转子各设计的平衡校正面增加的平衡块质量数据的差距,大部分可认为是由于动叶片序列不同引起的。从表 2 可以得出,用优化后的算法(遗传)对动叶片排序,其转子高动平衡时加重质量较小,最少的 60 MW 转子配重质量减少约 49.2%,且最终的转子在 3 000 r/min 时,两端轴颈位置振动比之前更小,其最少的 100 MW 转子较之前振动值降低约 25.2%。

表 2 平衡校正数据

Table 2 Blance correction data

机型	排列 算法	A/g	B/g	C/g	D/g	E/g	轴颈振动幅值/(mm/s)	
							Z ₁	Z ₂
30 MW	原型对称	2 064	2 983	950			0.093	0.275
	遗传	470	140				0.157	0.135
60 MW	原型对称	2 400	1 000				0.621	0.210
	遗传	530	800	350	46		0.160	0.336
100 MW	原型对称	1 356	1 136		110	116	0.895	0.623
	遗传	345	600		77	129	0.525	0.669

5 结 论

结合动叶片类型及装配要求,利用遗传智能优化算法,对动叶片安装的序列排序进行研究;并利用数据处理及编程相关知识,实现了动叶片安装序列的智能排序。经过大量的工程实践对比及应用分析,本文研究成果基本达到了如下工程目标:

1) 优化后的算法使其最终剩余不平衡量满足装配允许平衡需求,且最终剩余不平衡量远远小于传统排列算法,降低了转子在高速动平衡测试时平衡校正面的加重质量和轴颈振动值。

2) 避免了动叶片序列质量或质径积的“大大、小小”堆积现象,在一定程度上解决了动叶片安装间隙超差与干涉问题。

3) 实现了装配序列唯一性及特殊叶片排序指派位置稳定性问题,为排序数据的工程应用性及旧机组动叶片更换提供了可靠的数据依据。

参考文献:

[1] 黄树红. 汽轮机原理[M]. 北京:中国电力出版社,2008.

[2] 朱佳生. 透平机械制造工艺学[M]. 北京:机械工业出版社,1980.

[3] 广东电网公司电力科学研究院. 汽轮机设备及系统[M]. 北京:中国电力出版社,2011.

[4] 杨国安. 转子动平衡实用技术[M]. 北京:中国石化出版社,2012.

[5] 周仁睦. 转子动平衡—原理、方法和标准[M]. 北京:化学工业出版社,1992.

[6] 郭宗锋. 汽轮机动叶片装配仿真及排序优化的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

GUO Zongfeng. Research on assembly simulation and arrangement optimization of turbine moving blades[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2008. (in Chinese)

[7] TAGAM I. Study on application method of genetic algorithms for combinatorial optimization problem[D]. Tokushima:University of Tokushima,1995.

[8] FU Xuhui,KANG Ling. Study of the premature convergence of genetic algorithms[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology,2003,12(3):345-348.

[9] 贺乐铭,耿炎,贺利,等. 遗传算法在发动机转子叶片平衡排序中的应用[J]. 机械科学与技术,2003,22(4):554-555.

HE Erming,GENG Yan,HE Li,et al. Application of genetic algorithm in blade arrangement of engine[J]. Mechanical Science and Technology,2003,22(4):554-555. (in Chinese)

[10] 杨训,邢建华. 基于遗传算法的转子叶片优化排序[J]. 计算机仿真,2008,25(11):94-97.

YANG Xun,XING Jianhua. Optimum arrangement of rotor blades based on genetic algorithms[J]. Computer Simulation,2008,25(11):94-97. (in Chinese)

[11] 张海,浦健,张啸澄. 基于退火单亲算法的压气机叶片排序[J]. 燃气轮机技术,2009,22(4):49-53.

ZHANG Hai,PU Jian,ZHANG Xiaocheng. A opmizing sequencing of compressor vanes based on simulated annealing partheno genetic algorithm[J]. Gas Turbine Technology,2009,22(4):49-53. (in Chinese)

[12] 唐绍军,王旭,朱斌. 遗传算法对压气机叶片排序的应用[J]. 航空动力学报,2005,20(3):518-522.

TANG Shaojun,WANG Xu,ZHU Bin. Research on genetic algorithm applied to sequencing of compressor vanes[J]. Journal of Aerospace Power,2005,20(3):518-522. (in Chinese)

[13] 贾金鑫,李全通,高星伟,等. 叶片质量矩优化排序中遗传算法的应用[J]. 航空动力学报,2011,26(1):204-209.

JIA Jinxin,LI Quantong,GAO Xingwei,et al. Application of genetic algorithm in optimizing arrangement of engine blades based on initial unbalance[J]. Journal of Aerospace Power,2011,26(1):204-209. (in Chinese)

[14] 戴义平,江才俊,卢世明. 基于遗传算法的叶片安装排序优化系统的开发及应用[J]. 汽轮机技术,2003,45(5):270-272.

DAI Yiping,JIANG Caijun,LU Shiming. Development and application of blades installation arrangement order optimizing system based on genetic algorithm[J]. Turbine Technology,2003,45(5):270-272. (in Chinese)

[15] 杨达莉,文学,刘健. 模拟退火算法在汽轮机转子动叶排序优化技术中的应用[J]. 东方汽轮机,2014(2):29-33.

YANG Dali,WEN Xue,LIU Jian. Application of simuiated anneaing algorithm in optimization of rotor blade sorting [J]. Dongfang Turbine,2014(2):29-33. (in Chinese)

[16] 施光燕,董加礼. 最优化方法[M]. 北京:高等教育出版社,2001.

[17] 玄光男,程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[18] 陈国良,王煦法,庄镇泉. 遗传算法及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,1996.

[19] 赵德胜,张雪,李彩琴. 基于遗传算法的多级叶片优化排序的快速收敛研究[J]. 制造业自动化,2011,33(14):8-10.

ZHAO Desheng,ZHANG Xue,LI Caiqin. Optimum arrangement of series blades based on genetic algorithm with complex restraints[J]. Manufacturing Automation,2011,33(14):8-10. (in Chinese)

(编辑:叶 青)