

基于等概率随机法的航空发动机转子叶片排序优化*

徐广庆¹,白彦¹,孙惠斌²,付玄¹,张纲¹,彭清¹,常智勇²

(1. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 绵阳 621000;

2. 西北工业大学机电学院, 西安 710072)

[摘要] 对于盘片分离的航空发动机转子,叶片排序影响初始不平衡量,容易导致振动超限。在转子装配环节,精准、高效的叶片排序优化对于提高装配质量和效率有重要意义。针对此问题,基于单个叶片的质量矩模型,建立单级转子初始不平衡量模型,提出叶片排序优化的目标函数,研究一种基于“等概率随机”的搜索算法,实现在资源、时间消耗和优化效果之间取得平衡。仿真和验证结果表明,该研究方法可以精准、高效地优化叶片装配排序。与传统方法相比,单级转子的初始不平衡量大幅降低,转子的装配品质得到极大提高,已在实际生产中取得显著的应用效益。

关键词: 航空发动机转子;叶片排序优化;初始不平衡量;等概率随机法;装配

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.01/02.052



徐广庆

工程师,主要从事航空发动机装配技术研究。

振动超限是航空发动机的主要故障之一。振动不仅导致航空发动机不能正常工作,而且会影响航空发动机的可靠性和寿命,带来巨大的安全隐患。引起航空发动机振动的因素很多,如材料不均匀、转子不平衡、转子及静子件不同轴等。其中,转子件的不平衡是导致航空发动机振动超限的主要原因之一^[1],对发动机临界转速的振动峰值有重要影响^[2]。据统计,航空发动机约有60%的整机振动问题是由转子不平衡引起^[3]。在装配过程中,转子件的几何尺寸和物理状态存在差异,导致不平衡量分散度大、转静子间隙超差,甚至影响整机的振动特性。可见,控制转子的初始不平衡量对于控制整机振动具有重要意义。

对盘片分离的单级转子,初始不平衡量主要来源于两个方面:一是

盘体和叶片本身的不平衡量,主要是由材料致密性不一致以及制造误差造成;二是转子叶片的装配顺序,不同重量叶片排序的不均衡也会增加转子组件的初始不平衡量。在转子装配环节,若能采用一种优化的叶片排序方法,可以有效地降低转子的初始不平衡量。

工程实践中采用传统方法,根据叶片的重量依次进行叶片编号和排序。为了提高排序效果和效率,常见的方法将压气机盘分为几个象限,使每个象限叶片的总质量与相邻象限叶片的总质量之差应尽量地小,两相邻叶片间的振荡频率差应尽量地大,使用等分一枚举法或遗传算法对叶片排序进行优化。例如,刘博逵等^[4]认为,为使初始静不平衡量最小,要使各分区域叶片的总质量和尽可能接近,同时要使相对的两个叶片的重

* 基金项目: 国家科技重大专项(2017-VII-0010-0104); 装备预研领域基金(61409230204); 陕西省重点研发计划(2018ZDXM-GY-068)。

量差最小。朱本刚等^[5]提出一种分组优化的透平动叶片排序方法,先对分组内叶片优化排序,再对分组间排序进行优化。此外,贾金鑫等^[6]考虑叶片质量矩和初始不平衡量,采用遗传算法对叶片进行优化排序。朱梅玉等^[7]在称重原理的基础上,提出了基于遗传算法的动叶片安装排序的智能优化方法。袁惠群^[8]、李岩等^[9]分别采用蚁群算法和粒子群算法进行叶片排序优化。国外企业已开发了叶片排布软件,可根据转子的实际转动中心线进行数学平衡^[10],但可查阅到的公开资料非常有限。

可见,现有方法通常将盘周分为几个区域,控制区域之间的叶片质量差,采用智能优化算法进行求解。实际上,为了使排序方案更有指导性,需要直接计算各个叶片对转子不平衡量的影响;考虑到叶片数量较多,需要设计高效、实用的算法进行求解,以满足工程要求。针对此问题,本文提出一种叶片排序方法,使叶片总质量矩的和与轮盘的初始不平衡量相互抵消,通过优化算法快速求解使转子初始不平衡量符合要求的排序方案,提高了转子装配的品质和效率。

初始不平衡量计算模型

在实际装配生产中,叶片的质量

可通过天平测量,比较容易获得。基于叶片质量建立计算模型并简化,实现对质量矩的替代。经实测,测量质量耗时为测量质量矩的1/3,使用质量替代质量矩,可提升约20%的生产效率。

1 单个叶片的质量矩模型

叶片通过质量矩对转子不平衡量产生影响。叶片质量矩的构成因素有两点,一是质量误差,二是质心位置误差。

如图1所示,叶片*i*的理论质量为 m_i ,理论回转半径矢量为 \bar{r}_i ,理论质量矩为:

$$\bar{M}_{e_i} = m_i \times \bar{r}_i \quad (1)$$

叶片*i*的实际质量为 $m_i + \Delta m_i$,其中, Δm_i 为叶片实际质量与理论质量的差值。叶片*i*的实际回转半径矢量为 $\bar{r}_i + \Delta \bar{r}_i$,其中, $\Delta \bar{r}_i$ 为叶片实际回转半径与理论回转半径的差值。则,叶片*i*的实际质量矩 M_{a_i} 为:

$$\begin{aligned} \bar{M}_{a_i} &= (m_i + \Delta m_i) \times (\bar{r}_i + \Delta \bar{r}_i) = \\ & (m_i + \Delta m_i) \times \bar{r}_i + (m_i + \Delta m_i) \times \Delta \bar{r}_i \quad (2) \end{aligned}$$

经实测分析,回转半径偏差 $\Delta \bar{r}_i$ 与理论回转半径相比极其微小(不足1/100)。因此,在工程上忽略 $\Delta \bar{r}_i$ 的影响。即,实际叶片*i*的质心和理论质心重合, $\Delta \bar{r}_i = 0$,叶片*i*的实际质量矩可简化为:

$$\bar{M}_{a_i} = (m_i + \Delta m_i) \times \bar{r}_i \quad (3)$$

2 转子的初始不平衡量模型

n 个叶片对旋转轴线的质量矩的矢量和可以表示为:

$$\begin{aligned} \bar{M}_n &= \sum_{i=1}^n (m_i + \Delta m_i) \times \bar{r}_i = \\ & \sum_{i=1}^n (m_i \times \bar{r}_i) + \sum_{i=1}^n (\Delta m_i \times \bar{r}_i) \quad (4) \end{aligned}$$

在理想状态下,所有叶片对旋转轴线的质量矩的矢量和为零,即 $\sum_{i=1}^n m_i \times \bar{r}_i = 0$ 。因此, \bar{M}_n 可以简化为:

$$\bar{M}_n = \sum_{i=1}^n \Delta m_i \times \bar{r}_i \quad (5)$$

轮盘的初始不平衡量记为 \bar{M}_d 。通过优化叶片排序,使叶片质量矩的和 \bar{M}_n 与轮盘的初始不平衡量 \bar{M}_d 尽可能相互抵消,进而使转子的初始不平衡量最小。

$$\min(\bar{M}_n + \bar{M}_d) \quad (6)$$

叶片排序优化算法设计

1 优化原理

叶片排序的本质是排列组合问题。如果转子轮盘上有 n 个榫槽,叶片排列方法就有 $n!$ 种。叶片排序优化对时间(仿真耗时)和空间(计算机存储)提出了巨大的需求。随着叶片数量的增多(通常为40~60

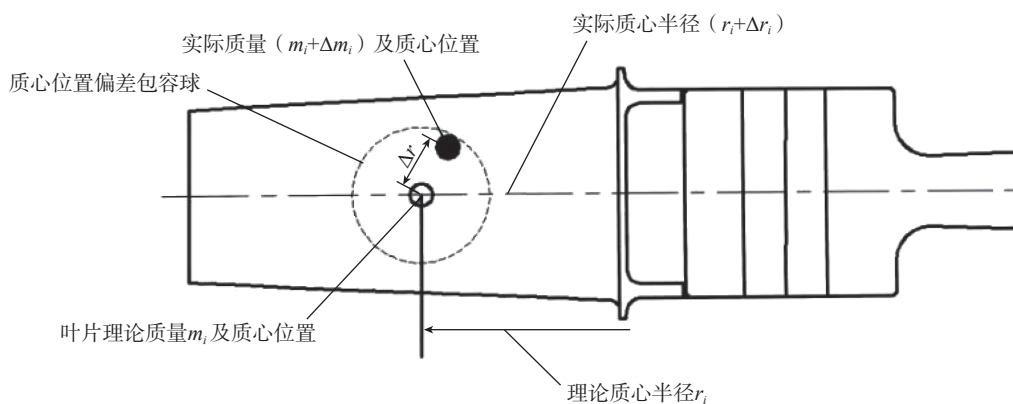


图1 叶片质量模型示意图

Fig.1 Sketch map of blade mass models

个),计算量更是惊人的增加,穷举法难以胜任。因此,需要设计一种简单有效的优化算法,在资源、时间消耗和优化效果之间取得平衡,满足工程应用的要求。

2 仿真优化算法

本文设计的仿真优化算法被称为“等概率随机法”。

用等概率随机法得到叶片排序方案1,计算求得其初始不平衡量1;再次进行随机叶片排序得到方案2,求得初始不平衡量2。两者比较,将初始不平衡量比较小的叶片排序方案保存下来,删除不平衡量较大的排序方案。按照同样的规则继续随机产生叶片排序方案,比较之后删除初始不平衡量较大的叶片排序方案。当采样量达到 N 后,输出不平衡量最小的叶片排序方案。计算流程如图2所示。

由于该种算法是一种随机采样的方法,没有穷尽所有的叶片排序方案,因此求解的是局部最优值而不是全局最优值。随着仿真样本量的不断增加,求得的初始不平衡量不断地减小,甚至远小于允许值,大大降低了后续平衡工艺的难度。这种方法解决了仿真对资源和时间的巨大消

耗,可以满足工程应用的需要。

仿真数据分析与验证

1 优化排序与传统排序的对比

传统的叶片排序方法是将 n 个叶片按质量大小给定序号,重量最大为1号,最轻的为 n 号。1号叶片与2号叶片相对安装,与 n 号叶片相邻安装,以此类推。传统叶片排序方案见图3。

以某发动机的叶片数据为例,采用传统排序方法装配,在平衡机上测定转子的初始不平衡量。同时,将叶片质量数据录入仿真程序,进行仿真计算和排序优化。对比两组数据,结果见图4。

从图4中可以看出,由于传统的排序方法叶片排序顺序已确定,因此其初始不平衡量是定值。采用仿真算法,随着仿真样本量的增大(即循环次数增加),其初始不平衡量递减。从图4中可以看出当取的样本量大于10后,其初始不平衡量已小于传统排序方法。当样本量为100万时,其优化的不平衡质量矩是传统排序方法的1/177。从计算结果来看,仿真算法的优化效果是较为明显的。在2GHz CPU、2GB内存和1TB

硬盘的普通计算机平台进行30次测试,当样本量为100万时,平均计算耗时是492s;当样本量为1000万时,平均计算耗时为1263s。一般生产中,推荐样本量是100万次。

2 计算数值与实测数值的对比分析

以某发动机高压涡轮转子为例,进行实测数据对比分析。共进行了6组实测数据的对比分析,第1组为传统排序,后5组为仿真样本量为100万的排序中选取的5组结果。通过数据对比,验证仿真算法的准确性及符合度,结果见图5。

从图5中可以看出,采用仿真算法的计算值与实测值整体吻合度较好。采用仿真算法优化的5组实测数据中,最大不平衡量为 $528\text{g}\cdot\text{mm}$,仅为传统排序方案的实测值的28.13%,极大地提高了转子的装配品质。

本文提出的方法已应用于某型号发动机装配,并被写入装配工艺方案,取得了良好的效益。通过对比可以发现,本文采用等概率大样本剔除的排序方法,不需要人为设定遗传因子等参数,实用性更强。本文采用概率大样本剔除的排序方法,更加便于唯一限定每个叶片的安装位置,也为

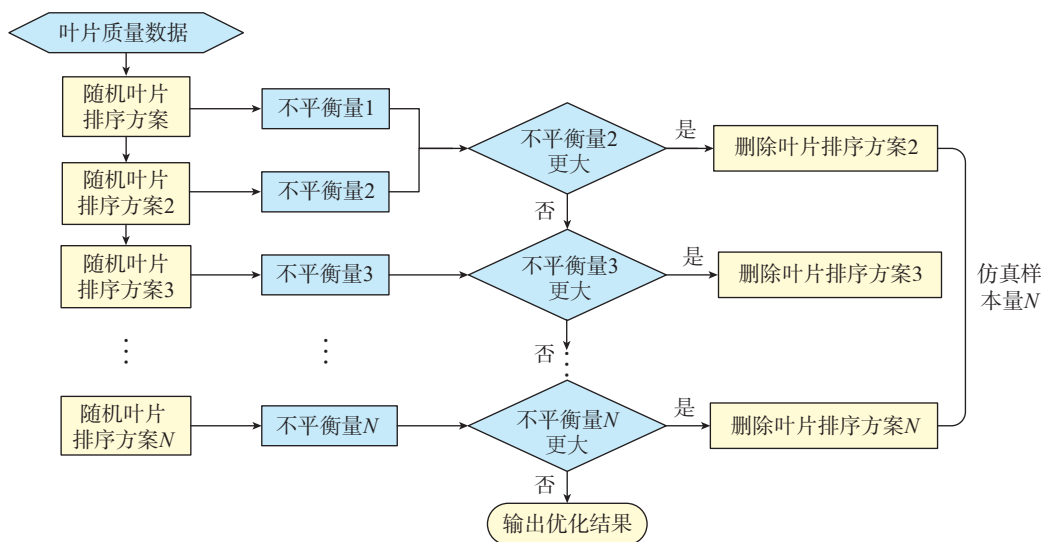


图2 叶片排序仿真优化算法流程
Fig.2 Flow chart of blade arrangement simulation

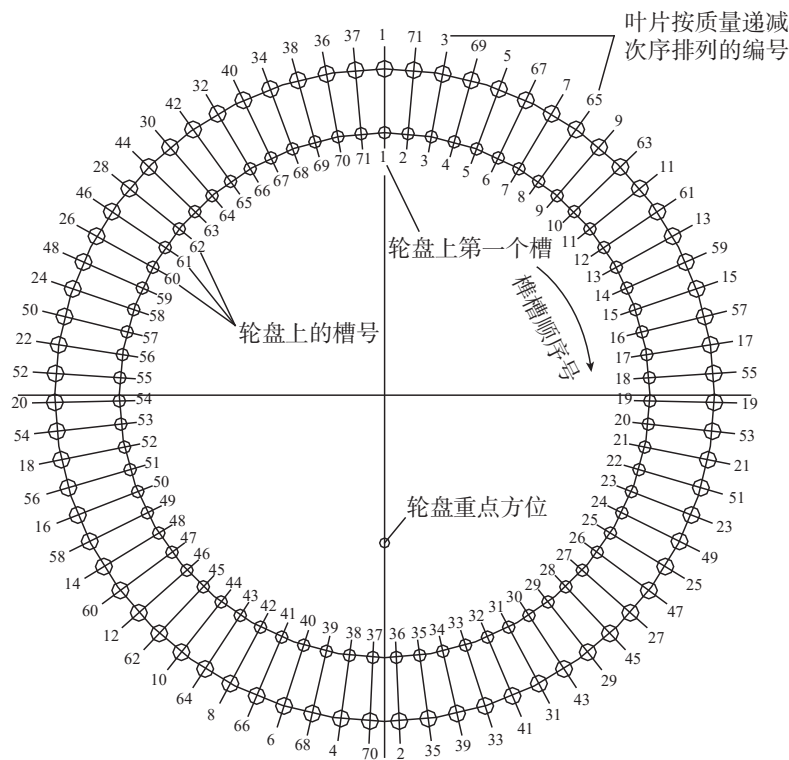


图3 传统叶片排序图

Fig.3 Traditional arrangement of blades

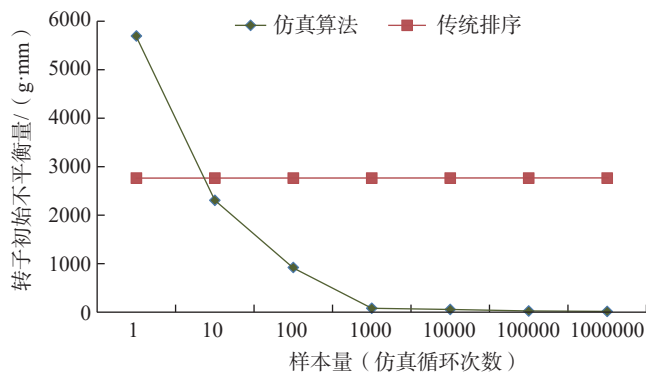


图4 仿真算法与传统排序结果对比图

Fig.4 Comparison between traditional methods and simulating

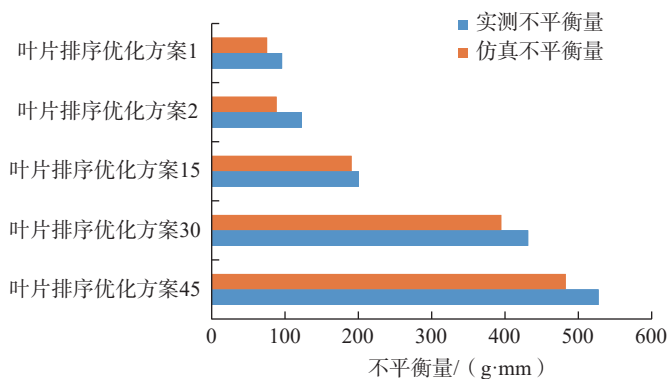


图5 优化算法与实测数据比较

Fig.5 Comparison data between optimized results and actual measurement

一个叶片在多个备选安装位置中优化排序提供了可能;可以满足在发动机叶片动应力测试中,将带测点的叶片(平均重量比正常叶片重15g)安装在指定位置。

结论

本文针对优化盘片分离转子的叶片排序问题,建立了转子的初始不平衡量模型,提出了叶片排序优化模型和算法,并通过实例进行验证,得到如下结论:

(1)本仿真优化方法对减小叶盘类转子组件的初始不平衡量效果显著且寻优效率高,有较强的工程应用价值;

(2)在生产中开展仿真计算时,可以根据实际需要来选择合适的样本量(仿真循环次数);

(3)在算法设计时,可以通过分组限定及一一限定满足特殊的装配位置需求;

(4)该仿真算法具有较强的通用性,可以应用至军品及民品中。军品可以应用于航空发动机的涡轮转子或压气机单盘平衡仿真,民品可以应用于轮盘分离的汽轮机盘、鼓风机盘、风力发电机叶轮等转子平衡装配中。

参考文献

[1] 郑旭东,张连祥.航空发动机整机振动典型故障分析[J].航空发动机,2013,39(1):34-37.

ZHENG Xudong, ZHANG Lianxiang. Typical failure analysis of aeroengine vibration[J]. Aeroengine, 2013, 39(1): 34-37.

[2] 柏树生,艾廷廷,翟学,等.航空发动机整机振动常见故障及其排除措施[J].航空维修与工程,2011(1):43-45.

BO Shusheng, AI Yanting, ZHAI Xue, et al. Analysis and solution of common faults in body vibration of aeroengine[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2011(1): 43-45.

[3] 李敏.民用航空发动机整机转子

动平衡浅析[J]. 内燃机与配件, 2018(13): 73-75.

LI Min. Analysis on the dynamic balance of the rotor of civil aero-engine[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018(13): 73-75.

[4] 刘博逵, 曹立庭, 黄超, 等. 航空发动机转子叶片排序策略与静平衡技术[J]. 机电工程技术, 2019, 48(4): 127-129.

LIU Bokui, CAO Liting, HUANG Chao, et al. Arrangement strategy for aero-engine rotor blades and static balancing[J]. Mechanical Electrical Engineering Technology, 2019, 48(4): 127-129.

[5] 朱本刚, 王曙光, 张恩慧, 等. 一种透平动叶片排序方法[J]. 燃气轮机技术, 2018, 31(3): 44-47.

ZHU Bengang, WANG Shuguang, ZHANG Enhui, et al. A method of turbine buckets arrangement[J]. Gas Turbine Technology, 2018, 31(3): 44-47.

[6] 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.

[7] 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): 2537-2543.

ZHU Meiyu, LI Mengqi, WEN Xue, et al. Intelligent optimization of turbine rotor blade assembly sequence[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2537-2543.

[8] 袁惠群, 张亮, 韩清凯, 等. 基于蚁群算法的航空发动机失谐叶片减振排序优化分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(11): 169-172.

YUAN Huiqun, ZHANG Liang, HAN Qingkai, et al. Optimization of mistuning

blades arrangement for vibration absorption in an aero-engine based on artificial ant colony algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(11): 169-172.

[9] 李岩, 袁惠群, 梁明轩. 基于改进DPSO算法的航空发动机失谐叶片排序[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(4): 569-572.

LI Yan, YUAN Huiqun, LIANG Mingxuan. Mistuned blade sorting based on improved DPSO algorithm for aero-engine[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(4): 569-572.

[10] Axiam Incorporated. Axiam's assembly optimization procedures[EB/OL]. [2019-12-19]. <http://www.axiam.com/AOP-components.html>.

通讯作者: 孙惠斌, 副教授, 博士生导师, 研究方向为智能制造、精密装配等, E-mail: sun_huibin@nwpu.edu.cn.

Optimizing Blade Arrangement for Aero-Engine Rotor Based on Random Equiprobability Algorithm

XU Guangqing¹, BAI Yan¹, SUN Huibin², FU Xuan¹, ZHANG Gang¹, PENG Qing¹, CHANG Zhiyong²

(1. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] As to disk-separated aero-engine rotor, blade arrangement affects initial unbalance of the rotor, and leads to vibration. During the rotor assembly process, precise and efficient blade arrangement is believed to improve assembly quality and efficiency. Aiming at this problem, a rotor initial unbalance model is built based on mass moment of a single blade. The fitness function of blade arrangement optimization is put forward. A searching algorithm is designed to make a trade-off between resource, time-consumption and optimization. Simulation and validation verify that blades could be distributed precisely and efficiently by using the proposed method. Compared with traditional methods, the initial unbalance is decreased dramatically, and the assembly quality is improved greatly. The proposed method has created valuable benefit in real assembly process.

Keywords: Aero-engine rotor; Blade arrangement optimization; Initial unbalance; Random equiprobability algorithm; Assembly

(责编 逸飞)