

蚁群算法在宽弦风扇叶片优化 排序中的应用

谢立, 刘政, 张继君, 龙长江, 张勇
(珠海保税区摩天宇航空发动机维修有限公司, 广东 珠海 519030)

摘 要: 从风扇转子的力学模型出发, 推导了同时考虑三个维度质量矩的风扇转子静不平衡量和偶不平衡量的计算公式, 并使用某型发动机风扇叶片装配和试车验证, 结果表明考虑三个维度质量矩的不平衡量计算方法能显著减少配重块的使用, 并减少配平次数。提出了基于邻域搜索改进的蚁群算法的风扇叶片排序优化方法, 对某套风扇叶片进行优化排序。本优化算法的最优不平衡量比传统蚁群算法减少 88.9%, 比改进的遗传算法减少 36.8%, 优势明显。

关键词: 邻域搜索; 蚁群算法; 宽弦; 风扇叶片; 优化排序

中图分类号: V232.4

文献标志码: A

Application of ant colony algorithm in wide-chord fan blade sequencing optimization

XIE Li, LIU Zheng, ZHANG Jijun, LONG Changjiang, ZHANG Yong
(MTU Maintenance Zhuhai Company Limited, Zhuhai Guangdong 519030, China)

Abstract: Based on the mechanical model of the fan rotor, the formulas for the calculation of static unbalance and couple unbalance considering three-dimensional mass moment were deduced, the assembly and test result of a set of fan blades showed that this unbalance calculation method can significantly reduce the use of counterweight block and the times of balancing. An improved ant colony algorithm based on neighborhood search was proposed to optimize the sequencing of fan blades. The improved ant colony algorithm had an obvious superiority, its optimal unbalance was 88.9% less than the conventional ant colony algorithm, and 36.8% less than the improved genetic algorithm.

Key words: neighborhood search; ant colony algorithm; wide-chord; fan blade; sequencing optimization

现代先进的大涵道比涡扇航空发动机广泛采用超长的宽弦风扇叶片, 一组叶片不同个体间的径向、周向和轴向质量矩相差很大, 因而给航空发动机转子平衡问题带来很大的挑战, 为低压转子不平衡力的主要来源。转子不平衡离心力是引起

发动机机械振动的主要原因, 机械振动会产生多种形式的危害, 主要包括: ①使主轴承受到动载荷作用, 影响轴承正常工作; ②引起燃油、滑油、空气和控制等管路连接件和紧固件松动和磨损, 降低发动机的可靠性; ③使发动机零部件产生高周疲

收稿日期: 2020-11-07

作者简介: 谢立(1990—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事民用航空发动机大修工作。

引用格式: 谢立, 刘政, 张继君, 等. 蚁群算法在宽弦风扇叶片优化排序中的应用[J]. 航空动力学报, 2021, 36(8): 1680-1689. XIE Li, LIU Zheng, ZHANG Jijun, et al. Application of ant colony algorithm in wide-chord fan blade sequencing optimization[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(8): 1680-1689.

劳,进而萌生裂纹直至断裂;④剧烈的振动可能造成发动机转子失稳,形成转静子间干涉并引发严重的二次损伤,令发动机空停;⑤产生大量噪声,影响乘客的身心健康^[1]。

合理的装配可以有效地消除转子的不平衡量,减小振动。发动机装配中消除转子不平衡量的主要方法有两种:一是调整零部件的安装位置,让它们的不平衡量相互抵消以使装配组件趋于平衡。这种方法常用于转子叶片安装及多级转子组合装配过程;二是在转子较重的位置去掉一部分材料,或者在转子较轻的位置加上一些平衡配重,使转子趋于平衡。其中去重法常用于旋转寿命件生产时的单件配平,加重法常用于各单元体转子的组件配平及发动机的整机配平。

风扇转子装配过程综合使用以上两种方法。先对叶片进行排序,使排序后叶片的残余不平衡量尽可能小,以满足静力学的配平要求;然后将叶片安装在风扇盘上,使用平衡机测量转子的不平衡量;最后安装配重块使转子趋于平衡。风扇叶片排序十分关键,若排序后叶片的残余不平衡量过大,将无法通过加装适量配重块来使转子达到平衡状态。

求解叶片排序问题的方法通常有两类:一种是常规组合优化方法^[2-4];另一种是启发式优化算法。常规组合优化方法一般将叶片按质量从轻到重进行排序,并将轮盘沿圆周均匀等分,按质量序列依次对等份按正序或反序进行排序,使每一等份中所有叶片质量和尽可能相等。这种方法算法复杂,而且对于某些“恶劣”的数据无法求出正确的结果^[5]。常用的启发式优化算法有遗传算法^[5-9]、模拟退火算法^[10-11]、蚁群算法^[12-14]、禁忌搜索算法等^[15-16]。启发式优化算法以转子总不平衡量为目标优化函数,求解组合优化问题时只需较少的迭代次数即达到指定的残差,但也可能收敛于局部最优解。

目前国内外的叶片排序方法大多仅考虑叶片的径向质量矩分量,将叶片简化成一个质点,仅考虑它们的质量或者径向质量矩。这种简化方法对于长度较小且弦宽较窄的压气机和涡轮叶片是有效的。究其原因一是因为以往的排序对象多为短小的压气机叶片,切向和轴向质量矩分量很小,其误差不会明显影响配平方案(配重块的质量和安装位置);二是因为切向和轴向质量矩测量困难,测量设备及工装设计难度较大。然而,大涵道比

风扇叶片的长度和弦宽都很大,叶片的切向和轴向质量矩也显著影响整个风扇转子的平衡,不能忽略不计。此外,在民用涡扇发动机的实际使用过程中,为了便于机务人员在航线上快速更换风扇叶片并配平,要求在风扇盘直径上的每对风扇叶片的径向质量矩差值尽可能小。这是叶片排序算法的强约束条件。

基于以上两个问题,本文从风扇转子的力学模型出发,推导了风扇转子的静不平衡量和偶不平衡量的计算公式,建立了综合考虑风扇转子的静不平衡量和偶不平衡量的目标优化函数,并以叶片成对安装为约束条件,采用蚁群算法进行叶片排序。然后使用邻域搜索局部优化方法改进了蚁群算法,取得了良好的效果。

1 力学模型

1.1 考虑三个维度质量矩的不平衡量计算方法

风扇叶片被等距排列地安装在风扇盘的榫槽中,当风扇转子转动时,每片风扇叶片产生的惯性力组成一个惯性力系,其合力偶决定着风扇转子的平衡。

取风扇转子中的任一叶片,以旋转轴为 z 轴, z 轴上某设计点 O 为坐标原点,经过 O 点且与 z 轴垂直的平面与叶片所在榫槽的中弧线的交点和原点 O 的连线为叶片的径向参考线 x 轴,经过 O 点且同时与 x 轴和 z 轴垂直的线为 y 轴,建立该叶片的局部坐标系 $O-xyz$ 。设有一刚性风扇转子,叶片数量为 n ,以角速度 ω 旋转。

如图1所示,若转子的 i 号叶片质量为 m_i ,质心坐标为 $P_i(x_i, y_i, z_i)$,沿坐标轴方向的单位矢量分别为 e_x, e_y, e_z ,则叶片产生的离心力 F_i 为

$$F_i = m_i \omega^2 r_i = m_i \omega^2 (x_i e_x + y_i e_y) = \omega^2 (m_i x_i e_x + m_i y_i e_y) = \omega^2 (M_{xi} e_x + M_{yi} e_y) \quad (1)$$

其中 r_i 为叶片质心绕 z 轴旋转的矢径, M_{xi} 为叶片质量矩的径向分量, M_{yi} 为叶片质量矩的切向分量。

若已知 M_{xi}, M_{yi} 、叶片质量矩的轴向分量 M_{zi} 和叶片质量 m_i ,可得叶片所受离心力的大小为

$$F_i = \omega^2 \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2} \quad (2)$$

F_i 和 x 轴之间的夹角

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{y_i}{x_i}\right) = \arctan\left(\frac{M_{yi}}{M_{xi}}\right) \quad (3)$$

以风扇转子旋转轴为 Z 轴,第0号叶片的 x 轴为 X 轴,经过 O 点且同时与 X 轴和 Z 轴垂直的直线为 Y 轴,建立全局坐标系 $O-XYZ$ 。将 F_i 投影到

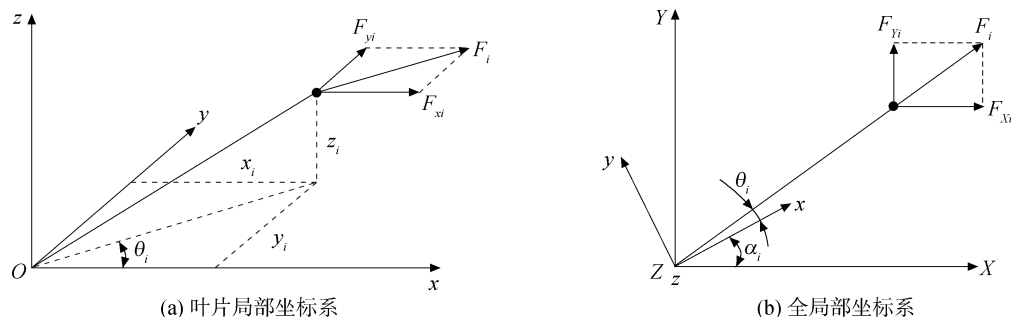


图1 风扇叶片离心力在局部坐标系和全局坐标系中的分量

Fig.1 Fan blade centrifugal force components on local coordinates and global coordinates

O -XYZ中的坐标轴上,可得

$$\begin{cases} F_{Xi} = F_i \cos(\alpha_i + \theta_i) \\ F_{Yi} = F_i \sin(\alpha_i + \theta_i) \\ F_{Zi} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 α_i 为叶片局部坐标系 x 轴与全局坐标系 X 轴之间的夹角

$$\alpha_i = \frac{i}{n} \cdot 2\pi \quad (5)$$

式中 $i=0, 1, \dots, n-1$ 。将风扇转子惯性力系向坐标原点 O 合并,在 X 轴和 Y 轴方向的合力分别为

$$\begin{cases} F_X = \sum_{i=0}^{n-1} F_{Xi} \\ F_Y = \sum_{i=0}^{n-1} F_{Yi} \end{cases} \quad (6)$$

叶片集上合力的大小和相位角分别为

$$\begin{cases} F = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2} \\ \alpha_F = \arctan\left(\frac{F_Y}{F_X}\right) \end{cases} \quad (7)$$

剔除 F 中的转速,称这个引起转子静不平衡的物理量为静不平衡(static unbalance)量,其大小和相位角分别为

$$\begin{cases} U_s = \frac{F}{\omega^2} \\ \alpha_s = \alpha_F \end{cases} \quad (8)$$

将式(2)~式(7)代入式(8)可得

$$\begin{cases} U_s = \sqrt{\left\{ \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2} \cos\left[\frac{i}{n} \cdot 2\pi + \arctan\left(\frac{M_{yi}}{M_{xi}}\right)\right] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2} \sin\left[\frac{i}{n} \cdot 2\pi + \arctan\left(\frac{M_{yi}}{M_{xi}}\right)\right] \right\}^2} \\ \alpha_s = \arctan\left\{ \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2} \sin\left[\frac{i}{n} \cdot 2\pi + \arctan\left(\frac{M_{yi}}{M_{xi}}\right)\right]}{\sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2} \cos\left[\frac{i}{n} \cdot 2\pi + \arctan\left(\frac{M_{yi}}{M_{xi}}\right)\right]} \right\} \end{cases} \quad (9)$$

由于力 F_{Xi} 、 F_{Yi} 和力臂 z_i 的存在,叶片的离心力对转子产生在平面 O -YZ 和平面 O -ZX 上的扭矩为

$$\begin{cases} T_{YZi} = F_{Xi} z_i = F_{Xi} \frac{M_{zi}}{m_i} \\ T_{ZXi} = F_{Yi} z_i = F_{Yi} \frac{M_{zi}}{m_i} \end{cases} \quad (10)$$

将所有叶片产生的扭矩累加可得 O -YZ 平面上和 O -ZX 平面上的总扭矩为

$$\begin{cases} T_{YZ} = \sum_{i=0}^{n-1} T_{YZi} \\ T_{ZX} = \sum_{i=0}^{n-1} T_{ZXi} \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)中两个扭矩合并,得到风扇转子上的总扭矩(T)及扭矩所在平面与平面 O -XZ 间的夹角 α_T

$$\begin{cases} T = \sqrt{T_{YZ}^2 + T_{ZX}^2} \\ \alpha_T = \arctan\left(\frac{T_{ZX}}{T_{YZ}}\right) \end{cases} \quad (12)$$

剔除扭矩 T 中的转速,称这个引起转子偶不平衡的物理量为偶不平衡(couple unbalance)量,也称为转子的惯性积或转子的离心转动惯量,其大小和相位角为

$$\begin{cases} U_c = \frac{T}{\omega^2} \\ \alpha_c = \alpha_T \end{cases} \quad (13)$$

将式(2)~式(5)和式(10)~式(12)代入式(13)可得

$$\left\{ \begin{aligned} U_c &= \left\{ \left(\sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2} \cos \left[\frac{i}{n} \cdot 2\pi + \arctan \left(\frac{M_{yi}}{M_{xi}} \right) \right] \frac{M_{zi}}{m_i} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. \left(\sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2} \sin \left[\frac{i}{n} \cdot 2\pi + \arctan \left(\frac{M_{yi}}{M_{xi}} \right) \right] \frac{M_{zi}}{m_i} \right)^2 \right\}^{1/2} \\ \alpha_c &= \arctan \left\{ \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2} \sin \left[\frac{i}{n} \cdot 2\pi + \arctan \left(\frac{M_{yi}}{M_{xi}} \right) \right] \frac{M_{zi}}{m_i}}{\sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2} \cos \left[\frac{i}{n} \cdot 2\pi + \arctan \left(\frac{M_{yi}}{M_{xi}} \right) \right] \frac{M_{zi}}{m_i}} \right\} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

当风扇转子旋转时,其总离心力和扭矩的方向始终随X轴旋转角度的变化而变化,成为引起轴承振动的激发源。所以,转子平衡的充分必要条件是转子的静不平衡量和偶不平衡量同时为零,即

$$\begin{cases} U_s = 0 \\ U_c = 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{aligned} U'_s &= \sqrt{\left[\sum_{i=0}^{n-1} M_{xi} \cos \left(\frac{i}{n} \cdot 2\pi \right) \right]^2 + \left[\sum_{i=0}^{n-1} M_{xi} \sin \left(\frac{i}{n} \cdot 2\pi \right) \right]^2} \\ \alpha'_s &= \arctan \left[\frac{\sum_{i=0}^{n-1} M_{xi} \sin \left(\frac{i}{n} \cdot 2\pi \right)}{\sum_{i=0}^{n-1} M_{xi} \cos \left(\frac{i}{n} \cdot 2\pi \right)} \right] \end{aligned} \right. \quad (16)$$

带入式(14),得

$$U'_c = 0 \quad (17)$$

可以看出,仅考虑径向质量矩分量作简化计算时,得出的静不平衡量 U'_s 以及相位角 α'_s 与式(14)有所差别,而且偶不平衡量被完全忽略。

1.3 简化的不平衡量计算方法的误差

现有某套风扇叶片,使用申克公司生产的WM系列发动机叶片质量矩秤^[17]测量,得到叶片的质量矩数据以及质量数据,汇总如表1所示。

表1 某套风扇叶片质量矩及质量数据
Table 1 Mass moments and mass of a fan blade set

叶片 编号	$M_{xi}/$ (g•mm)	$M_{yi}/$ (g•mm)	$M_{zi}/$ (g•mm)	m_i/g
0	2 118 660	8 000	−47 200	4 933
1	2 066 460	6 400	−44 800	4 822
2	2 063 260	8 760	−45 500	4 826
3	2 071 360	6 600	−46 000	4 845
4	2 070 460	6 240	−45 900	4 841
5	2 069 560	5 900	−45 640	4 836
6	2 063 960	9 500	−44 740	4 828

1.2 仅考虑径向质量矩的简化不平衡量计算方法

现有叶片排序方法仅考虑叶片的径向质量矩分量,其思路表述如下。

仅考虑径向质量矩分量时,令 $M_{yi}=0, M_{zi}=0$,对式(9)进行简化得

续表

叶片 编号	$M_{xi}/$ (g•mm)	$M_{yi}/$ (g•mm)	$M_{zi}/$ (g•mm)	m_i/g
7	2 054 760	6 040	−44 800	4 809
8	2 055 460	5 800	−45 560	4 817
9	2 068 160	5 000	−46 500	4 838
10	2 065 060	2 480	−45 700	4 823
11	20 755 60	6 280	−46 660	4 849
12	2 066 560	4 400	−45 200	4 834
13	2 073 660	4 540	−45 340	4 845
14	2 079 660	3 940	−45 760	4 854
15	2 076 260	5 880	−42 420	4 845
16	2 078 660	6 460	−45 600	4 844
17	2 052 260	6 900	−44 320	4 788
18	2 097 860	7 200	−46 820	4 890
19	2 098 760	6 420	−48 940	4 893
20	2 085 060	10 500	−50 280	4 856
21	2 051 160	4 320	−44 400	4 813
22	2 084 160	8 880	−47 500	4 876
23	2 118 660	9 500	−48 100	4 933

根据文中第1.2节的简化方案,得出有一排序解A为[23,10,0,7,3,19,17,2,1,16,8,13,22,14,9,6,4,21,18,12,5,20,11,15],即将23号叶片安装在0号榫槽位置,10号叶片安装在1号榫槽位置,以此类推。将排序作南丁格尔玫瑰图如图2所示。

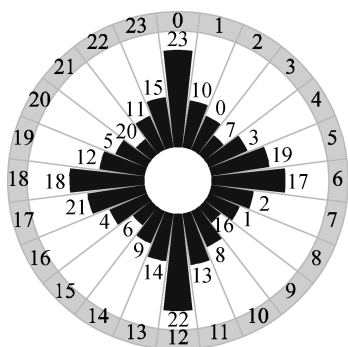


图2 风扇排序解A

Fig.2 Fan blade installation sequence A

将风扇叶片数据及排序代入式(16)中可得转子的静不平衡量和偶不平衡量大小为 $U'_s = 903.21 \text{ g} \cdot \text{mm}$, $U'_c = 0 \text{ g} \cdot \text{mm}^2$;代入式(9)和式(14)中可得转子的静不平衡量和偶不平衡量大小为 $U_s = 8530.51 \text{ g} \cdot \text{mm}$, $U_c = 1962475.36 \text{ g} \cdot \text{mm}^2$ 。

不平衡量大小是判断一个排序解优劣的依据。按照仅考虑径向质量矩分量的简化不平衡量计算方法,排序解A的不平衡量很小,该解可被评价为“优”。然而,根据式(9)和式(14),综合考虑三个维度质量矩的不平衡量,计算结果表明:该解还存在较大的静不平衡量和偶不平衡量,该解应该被评价为“劣”。可见,在设计风扇叶片排序优化程序时,忽略风扇叶片轴向和切向质量矩的不平衡量可能会让程序对一个排序解的优劣性判断产生失误,无法找出满足式(15)“真优”的排序解。因此,排序时很有必要考虑三个维度质量矩的不平衡量,综合计算以使风扇转子静不平衡量和偶不平衡量同时达到最小。

2 发动机试车振动值实测验证

为了进一步验证在风扇叶片排序算法中使用三个维度质量矩来计算转子的静不平衡量和偶不平衡量的必要性,本文对表1中的风扇叶片分别按照文中第1.3节中的排序A以及图3所示的另一排序B进行了实际安装和试车,并测量了发动机在加速和减速阶段的低压转子的振动幅值。

按照仅考虑径向质量矩分量的简化不平衡量计算方法,将叶片数据代入式(16)中可得排序B

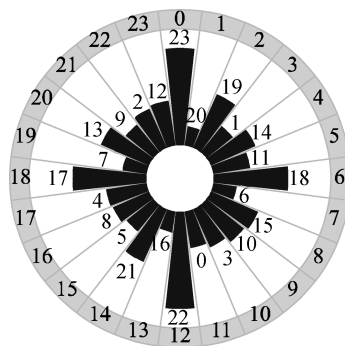


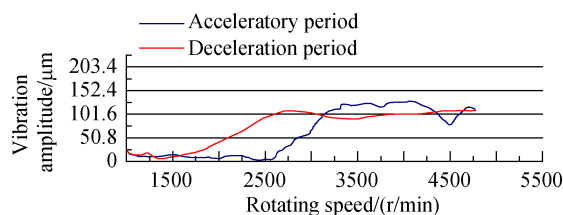
图3 风扇排序解B

Fig.3 Fan blade installation sequence B

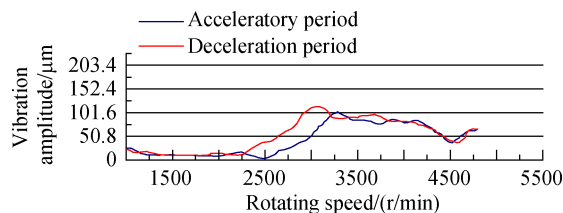
的静不平衡量和偶不平衡量大小为 $U'_s = 8962.12 \text{ g} \cdot \text{mm}$, $U'_c = 0 \text{ g} \cdot \text{mm}^2$,排序A的 $U'_s = 903.21 \text{ g} \cdot \text{mm}$, $U'_c = 0 \text{ g} \cdot \text{mm}^2$ 。按照这种不平衡量计算方法,排序A远优于排序B。

按照考虑三个维度质量矩的不平衡量计算方法,将叶片数据代入式(9)和式(14)中可得排序B的静不平衡量和偶不平衡量的大小为 $U_s = 306.10 \text{ g} \cdot \text{mm}$, $U_c = 97554.06 \text{ g} \cdot \text{mm}^2$,相比之下排序A的 $U_s = 8530.51 \text{ g} \cdot \text{mm}$, $U_c = 1962475.36 \text{ g} \cdot \text{mm}^2$ 。显然,在不忽略轴向和切向质量矩的计算方法中,排序A远劣于排序B。

在实际试车过程中,在未装平衡块的情况下,排序A的低压转子振动幅值的峰值为 $129.54 \mu\text{m}$,排序B的振动峰值为 $93.98 \mu\text{m}$,排序A的振动值远大于排序B。此外,按照排序A安装风扇叶片时,发动机随后进行了两次配平和再试车,但是发动机的低压转子振动值始终超标。而按照排序B安装风扇叶片时,发动机进行了一次配平之后低压转子的振动值即降到了接受标准范围之内,结果如图4所示。



(a) 排序A, 未装平衡块试车



(b) 排序A, 第一次配平后试车

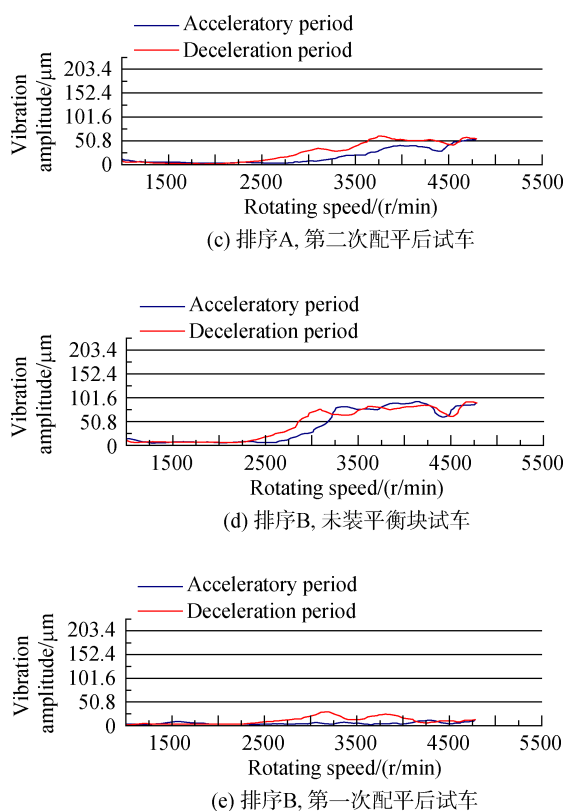


图4 风扇叶片排序A、B的发动机低压转子试车振动特性图

Fig.4 Testing vibration characteristics graphs of the low pressure rotor of engine with fan blade installation sequence A and B

以上试验表明,使用考虑三个维度质量矩的不平衡量计算方法评估出的“优秀”排序解更能减少平衡配重块的使用,同时减少发动机平衡试车次数,优势明显。

3 目标优化函数设计

在使用宽弦风扇叶片的大涵道比涡扇发动机中,通常有两类配平策略:第一类是风扇单元体装配完成之后不进行单元体阶段的配平,仅在发动机最终试车时对整机进行配平以使得发动机的振动值降至可接受的水平;第二类是在风扇

单元体安装完成之后即进行配平以消除风扇单元体的不平衡量,然后在发动机最终试车时再次对整机进行配平以使发动机振动值降至可接受水平。

根据力学原理,一个物体至少需要在两个校正面同时施加一对大小相等方向相反的反对称力,才能消除其扭矩形式的偶不平衡量。对于第一类发动机配平策略,在整机配平阶段通常只能在一个校正面上安装配重块,由风扇叶片产生的残余偶不平衡量无论如何都不能通过安装配重块来完全消除。因此,在风扇叶片排序阶段应该优先考虑将风扇转子的偶不平衡量降至可接受范围,而将残余的静不平衡量留至整机配平阶段消除。对此类发动机,设计风扇叶片排序优化程序的目标优化函数为

$$U_{\text{sum}} = U_s + CU_c \quad (18)$$

式中 C 为偶不平衡量的权重参数, C 越大最终优化结果的偶不平衡量越小,但静不平衡量越大。厂内实践经验表明,对于不同型号的发动机,风扇转子的静不平衡量和偶不平衡量的极小值相差很大。因此,参数 C 的取值要依据发动机型号合理选取,其原则是优化后保证转子静不平衡量在指定配平范围内的同时,偶不平衡量尽可能小。

对于第二类发动机配平策略,风扇转子上通常有前后两个用来安装平衡配重块的法兰边。令一个风扇转子的静不平衡量为 U_s ,相位角为 α_s ;偶不平衡量为 U_c ,相位角为 α_c ,两个法兰边所在校正面之间的距离为 D 。将静不平衡量 U_s 等效为两个法兰边所在校正面上的一组大小相等方向相同的对称不平衡量,大小为 $U_s/2$,相位角均为 α_s 。将偶不平衡量 U_c 等效为两个法兰边所在校正面上的一组大小相等方向相反的反对称不平衡量,大小为 U_c/D ,方向为 α_c 和 $\alpha_c + 180^\circ$ 。将两个校正面上的不平衡量分别合并,可得出前校正面上不平衡量的大小和相位角为

$$\begin{cases} U_{d1} = \sqrt{\left(\frac{U_s}{2} \cos \alpha_s + \frac{U_c}{D} \cos \alpha_c\right)^2 + \left(\frac{U_s}{2} \sin \alpha_s + \frac{U_c}{D} \sin \alpha_c\right)^2} \\ \alpha_{d1} = \arctan \left(\frac{\frac{U_s}{2} \sin \alpha_s + \frac{U_c}{D} \sin \alpha_c}{\frac{U_s}{2} \cos \alpha_s + \frac{U_c}{D} \cos \alpha_c} \right) \end{cases} \quad (19)$$

后校正面上不平衡量的大小和相位角为

$$\begin{cases} U_{d2} = \sqrt{\left(\frac{U_s}{2} \cos \alpha_s - \frac{U_c}{D} \cos \alpha_c\right)^2 + \left(\frac{U_s}{2} \sin \alpha_s - \frac{U_c}{D} \sin \alpha_c\right)^2} \\ \alpha_{d2} = \arctan \left(\frac{\frac{U_s}{2} \sin \alpha_s - \frac{U_c}{D} \sin \alpha_c}{\frac{U_s}{2} \cos \alpha_s - \frac{U_c}{D} \cos \alpha_c} \right) \end{cases} \quad (20)$$

以上方法可将转子的静不平衡量和偶不平衡量转化为两个平衡校正面上的动不平衡量(dynamic unbalance)。

令前校正面上的配重块安装半径为 R_1 ,后校正面上的配重块安装半径为 R_2 。在前校正面上 $\alpha_{d1} + 180^\circ$ 位置安装质量为 $m_{d1} = U_{d1}/R_1$ 的配重块,并在后校正面上 $\alpha_{d2} + 180^\circ$ 位置安装质量为 $m_{d2} = U_{d2}/R_2$ 的配重块,转子即可达到配平状态。

为了使转子配平时需要安装的平衡配重块总质量最小,设计风扇叶片排序程序的目标优化函数为两个校正面上的总动不平衡量

$$U_{d, \text{sum}} = U_{d1} + U_{d2} \quad (21)$$

当风扇转子的总动不平衡量越小时,转子越接近平衡状态,配平需要安装的配重块总质量越小。

4 优化算法

4.1 蚁群算法

蚁群算法通过模仿蚂蚁在觅食过程中寻找从巢穴到食物的最短路径的方法求解待优化问题的最优解。用蚂蚁的行走路径表示待优化问题的可行解,整个蚂蚁群体的所有路径构成待优化问题的解空间。路径较短的蚂蚁释放的信息素量较多,随着时间的推移,较短的路径上累积的信息素浓度逐渐增高,选择该路径的蚂蚁个数也愈来愈多。最终,整个蚂蚁会在正反馈的作用下集中到最佳的路径上,此时对应的便是待优化问题的最优解^[18]。

为了使风扇盘任一直径上的每对风扇叶片的径向质量矩差值较小,需要对径向质量矩相近的叶片两两配对安装。具体方法是,首先保留叶片称重编号,将所有叶片按照径向质量矩的大小由

高到低进行排序并新增一组编号。然后,将0号叶片(径向质量矩排序编号,下同)和1号叶片作为一组,2号叶片和3号叶片作为一组,以此类推。叶片数量为 n ,蚂蚁数量为 l ,散发信息素的蚂蚁数量为 p ,第 t 次迭代叶片 i 和 j 之间连接的信息素用 $\tau_{ij}(t)$ 表示,所有的信息素存储在 $n \times n$ 的二维信息素矩阵 τ 中,信息素挥发速度为 ρ 。

每只蚂蚁在每次迭代时,均使用0号叶片作为起点。以图5为例,风扇盘上有24个榫槽,编号为0~23,该蚂蚁选择路径的步骤为

- 1) 0号叶片安装在0号榫槽。
- 2) 1号叶片安装在0号榫槽的直径对角线,即12号榫槽中。
- 3) 在选择1号榫槽中的叶片时,以0号榫槽中的叶片编号为依据,按信息素矩阵第0行各列的信息素浓度为概率随机选择叶片,图5中选择的是5号叶片。
- 4) 4号叶片和5号叶片为一组,因此将4号叶片安装在13号榫槽。
- 5) 在选择2号榫槽中叶片时与之前类似,以照信息素矩阵第5行各列的信息素浓度为概率选择叶片,图5中选择的是18号叶片。
- 6) 然后将18号叶片的配偶叶片19号叶片安装在14号榫槽中。
- 7) 以此类推,直至所有的榫槽都安装上叶片,该蚂蚁的路径选择完成。

所有蚂蚁的路径都选择完成之后,对产生的 l 条路径按照目标优化函数值从小到大进行排序,并从中选择最优的 p 条路径,用于更新信息素矩阵 τ 。

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (22)$$

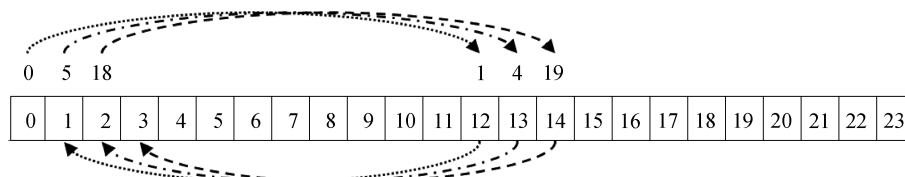


图5 风扇叶片排序中的蚂蚁路径选择方法

Fig.5 Path selection method of ants in fan blade installation sequence optimization

$$\Delta\tau_{ij}=\sum_{k=1}^p\Delta\tau_{ij}^k$$

(23)

$$\Delta\tau_{ij}^k=\begin{cases}1 & \text{若第}k\text{条路径中蚂蚁经过}(i,j) \\ 0 & \text{否则}\end{cases}$$

(24)

将每一代蚂蚁产生的路径的最优解与历史最优解对比,产生新的最优解,并进入下一次迭代过程。经过一定的迭代次数之后,所有路径收敛于某一局部最优解,程序退出。

4.2 邻域搜索改进的蚁群算法

文献[6]使用邻域搜索对遗传算法进行改进,对每次交叉和变异结果进行局部寻优,加速了遗传算法的收敛速度,并改善了排序算法的稳定性。在邻域搜索中,将排列在某个基因码之后的所有基因码组合定义为该基因码的邻域,从第一个基因码开始,依次对组合内的基因码与其邻域中的基因码两两交换,如果交换后个体更加优异则交换成立,否则交换取消。当所有基因码均与其邻域中的基因码完成交换比较之后,邻域搜索过程结束。

本文基于邻域搜索改进蚁群算法。具体方法是,当某只蚂蚁在某次迭代中返回了一条路径,立刻对该路径做邻域搜索优化,并使用优化后的路径作为信息素更新的依据。对于 n 片叶片,每次邻域搜索需要进行 $(n-1)+(n-2)+\cdots+2+1=n(n-1)/2$ 次叶片交换和总不平衡量计算。需要注意的是,为满足径向质量矩相近的风扇叶片两两配对安装的强约束,在邻域搜索时,两片叶

片位置交换的同时,它们的配偶叶片也要相互交换。

使用式(17)作为目标优化函数,取偶不平衡量的权重参数 $C=0.5$,分别使用传统蚁群算法和邻域搜索改进后的蚁群算法对表 1 中风扇叶片进行 10 次优化排序,它们的参数如表 2 所示,结果如表 3 所示。

由表 3 看出,尽管改进的蚁群算法使用了更少的蚂蚁和更小的迭代次数,但其 10 次优化产生的排序解的不平衡量均值仍比传统蚁群算法减少 88.9%,远优于传统蚁群算法。也就是说,改进的蚁群算法的全局寻优能力更强,不容易收敛到较差的局部最优解。

分别使用传统蚁群算法和改进的蚁群算法做一次优化,记录它们的蚁群在优化过程中每次迭代产生的排序解集的平均不平衡量和最优不平衡量数据,并作图如下。

由图 6 看出,传统蚁群算法经过 460 次迭代才将蚁群的最优解不平衡量从 472 642.6 优化至 18 497.2。而改进的蚁群算法在第 1 次迭代之后产生的最优解的不平衡量即为 4 159.8,并且经过 106 次迭代最终优化至 1 358.1。也就是说,改进的蚁群算法的收敛速度远快于传统蚁群算法。

综上所述,改进的蚁群算法中使用的邻域搜索对每只蚂蚁在每次迭代中产生的路径进行了局部优化,一方面加快了收敛速度,另一方面打乱了叶片的排序,产生了类似于遗传算法中的变异,可以帮助算法跳出局部最优解,提高了算法的全局

表 2 传统蚁群算法和改进的蚁群算法参数
Table 2 Parameters of traditional and improved ant colony algorithms

算法	迭代次数	蚂蚁数量	散发信息素的蚂蚁数量	信息素挥发速度
传统蚁群算法	1000	50	12	0.05
改进蚁群算法	200	30	8	0.05

表 3 传统蚁群算法和改进的蚁群算法优化结果对比
Table 3 Optimization results comparison between traditional and improved ant colony algorithms

算法	优化次序										均值	标准差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
传统蚁群算法	9 525.1	17 520.2	10 617.3	18 001.6	8 588.7	6 469.3	16 334.1	18 193.2	12 849.0	15 361.1	13 346.0	4 096.3
改进的蚁群算法	980.2	1 814.0	1 493.6	2 028.3	1 595.9	943.4	2 013.0	927.0	1 559.9	1 358.0	1 471.3	396.7

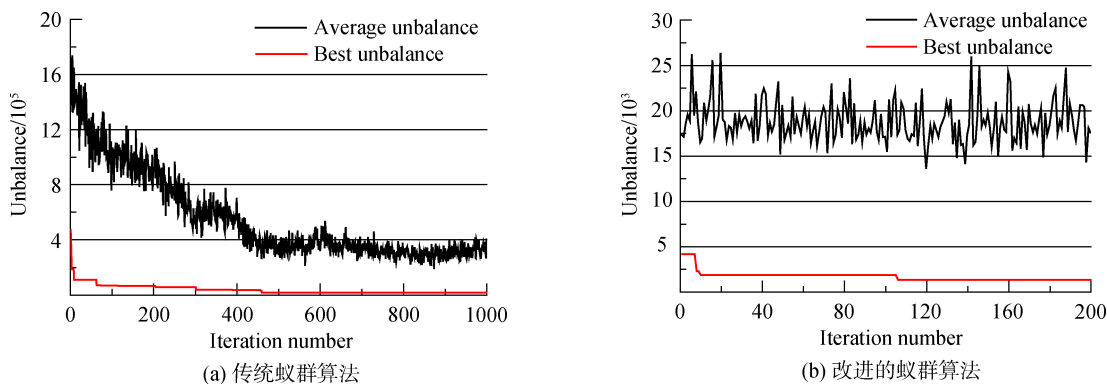


图6 传统蚁群算法与改进的蚁群算法收敛速度对比

Fig.6 Convergence speed comparison of traditional and improved ant colony algorithms

寻优能力。

4.3 不同优化算法之间的比较

遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法、禁忌搜索算法等启发式优化算法均可应用于叶片优化排序,但是它们的性能还是有一定的差异。文中第4.2节使用邻域搜索改进的蚁群算法对表1中风

扇叶片进行了排序,现仍使用式(17)作为目标优化函数,取偶不平衡量的权重参数 $C=0.5$,使用邻域搜索改进的遗传算法、模拟退火算法以及禁忌搜索算法分别对表1中风扇叶片进行10次排序,结果如表4所示。

表4 不同启发式优化算法的优化结果对比
Table 4 Optimization results of different heuristic optimization algorithms

算法	优化次序										均值	标准差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
改进的蚁群算法	980.2	1 814.0	1 493.6	2 028.3	1 595.9	943.4	2 013.0	927.0	1 559.9	1 358.0	1 471.3	396.7
改进的遗传算法	2 799.8	2 108.8	1 784.1	2 653.4	1 629.7	2 240.1	2 732.9	2 719.4	2 407.4	2 680.8	2 328.5	393.4
模拟退火算法	3 474.3	1 777.8	3 264.7	4 411.3	1 176.6	1 730.1	4 654.5	2 563.2	5 747.2	5 162.9	3 387.6	1 573.9
禁忌搜索算法	4 451.2	5 191.1	5 992.6	2 669.2	3 221.4	6 974.3	9 872.8	8 586.6	5 183.6	7 138.7	6 092.2	2 210.9

从表4中可以看出,以上4种算法均可用于解决风扇叶片排序问题,其中以改进的蚁群算法效果最好,改进的遗传算法次之,模拟退火算法和禁忌搜索算法再次之。改进的蚁群算法的排序解不平衡量均值比次好的改进的遗传算法减少36.8%,优势明显。

5 结 论

1) 对风扇叶片进行力学建模,推导出考虑三个维度质量矩的风扇转子静不平衡量和偶不平衡量的计算公式,并使用一套风扇叶片的质量矩及

质量数据验证了仅考虑径向质量矩分量的简化不平衡量计算方法的误差。

2) 使用同一套风扇叶片按照两组排序进行安装、试车和配平,进一步验证了在风扇叶片排序时使用考虑三个维度质量矩的不平衡量计算方法的必要性。

3) 根据不同发动机的配平策略,分别设计了两种目标优化函数。

4) 为了便于航线上更换风扇叶片,设计出满足风扇叶片成对安装要求的蚁群算法,并使用邻域搜索对其进行改进,大大加快了算法的收敛速

度,同时提高了算法的全局寻优能力。

5) 通过对比其他启发式优化算法的优化计算结果,证明了改进的蚁群算法的明显优势。

参考文献:

- [1] 戴祯宁.多自由度动平衡机摆架结构的设计与分析[D].重庆:重庆大学,2009.
DAI Zhenning. Design and analyses on dynamic balancing machine swing frame structure with multi-degrees of freedom [D].Chongqing:Chongqing University,2009.(in Chinese)
- [2] 刘博远,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):113-115.
LIU Bokui, CAO Liting, HUANG Chao, et al. Arrangement strategy for aero-engine rotor blades and static balancing[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2019, 48(4):113-115.(in Chinese)
- [3] 耿炎,贺尔铭,王沛.一种发动机转子叶片简易排序的新方法[J].航空维修与工程,2003,2(9):25-26.
GENG Yan, HE Erming, WANG Pei. A new method for blade arrangement of engine rotor[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2003, 2(9):25-26.(in Chinese)
- [4] CHOI W, KANG H, BAEK T. A turbine-blade balancing problem[J]. International Journal of Production Economics, 1990, 60/61(1):405-410.
- [5] 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)
- [6] ZHAI W, GONG W B. Optimal blade placement for large turbofan balancing[C]//Proceedings of International Conference on Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology. Troy, NY, US: IEEE Computer Society, 1994:261-266.
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] 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.(in Chinese)
- [10] 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.
YANY Dali, WEN Xue, LIU Jian. Application of simulated annealing algorithm in optimization of rotor blade sorting[J]. Dongfang Turbine, 2014(2):29-33.(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 optimizing sequencing of compressor vanes based on simulated annealing partheno genetic algorithm[J]. Gas Turbine Technology, 2009, 22(4):49-53.(in Chinese)
- [12] 李丹丹,陈勇,于达仁.基于改进的蚁群算法的汽轮机叶片安装优化排序研究[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(9):187-191.
LI Dandan, CHEN Yong, YU Daren. Research of optimizing arrangement for turbine blade installation based on ant colony algorithm[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(9):187-191.(in Chinese)
- [13] 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布优化分析[J].振动与冲击,2012,31(11):176-179.
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):176-179.(in Chinese)
- [14] PISKIN A, AKTAS H E, TOPAL A, et al. Rotor balancing with turbine blade assembly using ant colony optimization for aero-engine applications[EB/OL].[202-10-25].<https://doi.org/10.1515/tjj-2017-0060>.
- [15] PITSOULIS L S, PARDALOS P M, HEARN D W. Approximate solutions to the turbine balancing problem[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(1):147-155.
- [16] CHOI W, STORER R H. Heuristic algorithms for a turbine-blade-balancing problem[J]. Computers and Operations Research, 2004, 31(8):1245-1258.
- [17] Schenck Process GmbH. Series WM moment weighing scales for jet-engine blades[EB/OL].[2020-10-25].<https://schenck-rotec.com/products/product-finder/product-detail-page/en-series-wm.html>.
- [18] 郁磊,史峰,王辉,等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 2版.北京:北京航空航天大学出版社,2015.

(编辑:陈越)