

基于Matlab的遍历式平衡配重精确定位分析

崔彬彬¹, 王娟¹, 邹宇宁², 李鹏飞¹, 迟贺坤¹, 李欣欣¹

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015;

2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110015)

摘要: 航空发动机装配过程中, 需要对发动机转子进行平衡, 且通常采用平衡块调整法对转子不平衡量进行修正。由于设计阶段平衡块的安装位置固定, 平衡机输出的位置可能偏离平衡块安装位置, 因此在安装平衡块的过程中需要经过多次尝试, 导致平衡块的安装效率低、精度低。利用Matlab软件对平衡配重时平衡块数量、质量及安装位置进行遍历式计算, 得到最终不平衡量的最优解, 保证平衡块安装时的精确定位, 提高转子平衡的精度和效率。

关键词: 航空发动机; 转子平衡; 平衡配重; 遍历式; 精确定位

中图分类号: V235.13

文献标识码: A

文章编号: 1672-2620(2025)01-0035-06

DOI: 10.3724/j.GTER.20250008

Accurate positioning analysis of traversal balanced counterweight based on Matlab

CUI Binbin¹, WANG Juan¹, ZOU Yuning², LI Pengfei¹, CHI Hekun¹, LI Xinxin¹

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China; 2. AECC Shenyang Liming Aeroengine Group Corporation Ltd., Shenyang 110015, China)

Abstract: During the assembly of aero-engine, it is necessary for the equilibration of the aero-engine rotor, and the balance weight adjustment method is often used to correct the rotor imbalance. Since the position of the installed balance weight is fixed in design phase, the output position of the balancing machine may deviate from the installation position of the balance weight, so many attempts are needed during the installation of the balance weight, that is inefficient and has low precision. Matlab was employed to perform traversal calculations on the quantity, quality, and installation position of the balance blocks to obtain the optimal solution for the final unbalance, ensuring accurate positioning during installation and improving the accuracy and efficiency of rotor balance.

Key words: aero-engine; rotor balance; balance weight; traversal formula; precise positioning

1 引言

航空发动机转子在工作过程中会高速旋转, 由于转子质量分布不均匀, 其在运行过程中会产生离心力和不平衡量, 引起转子振动, 极易造成发动机性能下降, 严重时还会导致发动机零部件损伤。实践表明, 转子的运行平稳性与转子的平衡品质有密切关系^[1-2]。

在装配过程中, 需要对发动机转子进行平衡。平衡面的校准通常有3种方式: 去重法、加重法和平衡块调整法^[3-5]。其中最常用的方法是平衡块调整

法, 即根据平衡机输出的不平衡量, 添加平衡块进行调节。在设计阶段, 平衡块在转子圆周方向上的安装位置是固定的, 平衡机输出的角向位置可能偏离平衡块安装位置, 因此在安装平衡块的过程中需要经过多次尝试, 从而导致平衡块的安装效率低、精度低^[6]。

为解决上述问题, 本文通过理论计算分析, 利用Matlab软件编程, 对平衡块的数量、质量、安装角向位置进行遍历式计算, 得到最终不平衡量的最优解, 保证平衡块安装时的精确定位, 提高转子平衡的精

收稿日期: 2024-12-18

作者简介: 崔彬彬(1992-), 男, 辽宁丹东人, 工程师, 硕士, 研究方向为航空发动机装配工艺。

度和效率^[7]。

2 遍历式安装计算基本方程

由于转子本身质量分布不均匀,其在平衡过程中会产生离心力。离心力大小为:

$$F = M \cdot e \cdot \omega^2 \quad (1)$$

式中: F 为转子平衡过程中产生的离心力,单位为N; M 为转子质量,单位为kg; e 为转子质心偏离旋转轴线距离,单位为m; ω 为转子旋转时转速,单位为rad/s。

工程上,将 M 和 e 的乘积定义为不平衡量,则转子的初始不平衡量可以表示为:

$$U = M \cdot e \cdot \angle \alpha \quad (2)$$

转子的初始不平衡量用复数形式可表示为^[8]:

$$U = M \cdot e \cdot \cos \alpha + j \cdot M \cdot e \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

式中: U 为转子的初始不平衡量,单位为g·m; α 为转子初始不平衡量相位,单位为rad。

平衡过程中,对转子组件添加平衡块,用于平衡转子的初始不平衡量。单个平衡块产生的不平衡为:

$$U_{ik} = m_{it_i} \cdot r_i \cdot \cos \theta_{ik} + j \cdot m_{it_i} \cdot r_i \cdot \sin \theta_{ik} \quad (4)$$

式中: U_{ik} 为第 i 块平衡块在第 k 处角向位置上产生的不平衡量; m_{it_i} 为第 i 块平衡块的质量,单位为kg; t_i 为平衡块的组别,一般取为1,2,3; r_i 为第 i 块平衡块质

心偏离旋转轴线的距离,单位为m; θ_{ik} 为第 i 块平衡块在第 k 处角向位置; i 为平衡块序号, $i=1,2,3$ 。

由于平衡块安装位置固定,沿周向均布,角向位置并不是任意的,因此平衡块安装角向位置为:

$$\theta_{ik} = \frac{2\pi}{N} \cdot k_i \quad (5)$$

式中: N 为平衡块安装角向位置数量; $k_i=0,1,2,\dots,N$ 。

单个平衡块产生的不平衡量可改写为:

$$U_{ik} = m_{it_i} \cdot r_i \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_i \right) + j \cdot m_{it_i} \cdot r_i \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_i \right) \quad (6)$$

多个平衡块叠加产生的不平衡量为:

$$U_p = \sum_{i=1}^n \left[m_{it_i} \cdot r_i \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_i \right) + j \cdot m_{it_i} \cdot r_i \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_i \right) \right] \quad (7)$$

式中: n 为平衡块的数量,一般取值为1,2,3。

转子组件的最终不平衡量为:

$$\Delta U = U + U_p = M \cdot e \cdot \cos \alpha + \sum_{i=1}^n m_{it_i} \cdot r_i \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_i \right) + j \cdot \left[M \cdot e \cdot \sin \alpha + \sum_{i=1}^n m_{it_i} \cdot r_i \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_i \right) \right] \quad (8)$$

转子组件的最终不平衡量的大小为:

$$|\Delta U| = \sqrt{\left[M \cdot e \cdot \cos \alpha + \sum_{i=1}^n m_{it_i} \cdot r_i \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_i \right) \right]^2 + \left[M \cdot e \cdot \sin \alpha + \sum_{i=1}^n m_{it_i} \cdot r_i \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_i \right) \right]^2} \quad (9)$$

转子组件的最终不平衡量的相位为:

$$\beta = \arctan \frac{M \cdot e \cdot \sin \alpha + \sum_{i=1}^n m_{it_i} \cdot r_i \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_i \right)}{M \cdot e \cdot \cos \alpha + \sum_{i=1}^n m_{it_i} \cdot r_i \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_i \right)} \quad (10)$$

转子组件的最终不平衡量的分段函数为:

$$|\Delta U| = \begin{cases} \sqrt{\left[M \cdot e \cdot \cos \alpha + m_{1t_1} \cdot r_1 \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_1 \right) \right]^2 + \left[M \cdot e \cdot \sin \alpha + m_{1t_1} \cdot r_1 \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_1 \right) \right]^2} & (n=1) \\ \sqrt{\left[M \cdot e \cdot \cos \alpha + \sum_{i=1}^2 m_{it_i} \cdot r_i \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_i \right) \right]^2 + \left[M \cdot e \cdot \sin \alpha + \sum_{i=1}^2 m_{it_i} \cdot r_i \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_i \right) \right]^2} & (n=2) \\ \sqrt{\left[M \cdot e \cdot \cos \alpha + \sum_{i=1}^3 m_{it_i} \cdot r_i \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_i \right) \right]^2 + \left[M \cdot e \cdot \sin \alpha + \sum_{i=1}^3 m_{it_i} \cdot r_i \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{N} \cdot k_i \right) \right]^2} & (n=3) \end{cases} \quad (11)$$

转子组件的最小不平衡量为:

$$U_e = \min(|\Delta U|) \quad (12)$$

3 基于Matlab的平衡块及角向选择

发动机转子平衡过程中,添加的平衡块数量一般不超过3块,平衡块的组别数量一般不超过3组。程序编写的要求为:①平衡块的组别可以重复选取,不同位置安装的平衡块质量可以相同;②平衡块安装角向位置不可以重复选择,每个角向位置仅对应1块平衡块。根据上述要求,可在Matlab软件中编程^[9-10],编程逻辑如图1所示。

所添加平衡块质量可写成1个 $\frac{(t_i+n-1)!}{(t_i-1)! \cdot n!} \times n$ 的矩阵 m_n, θ_n 的一般表达式为:

$$m_n = \begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ m_{(t_i+n-1)!} & \cdots & m_{(t_i+n-1)!} \\ \frac{(t_i+n-1)!}{(t_i-1)! \cdot n!} \cdot 1 & \cdots & \frac{(t_i+n-1)!}{(t_i-1)! \cdot n!} \cdot n \end{bmatrix} \quad (13)$$

平衡块安装角向位置可写成1个 $n \times \frac{N!}{(N-n)!}$ 的矩阵 θ_n, θ_n 的一般表达式为:

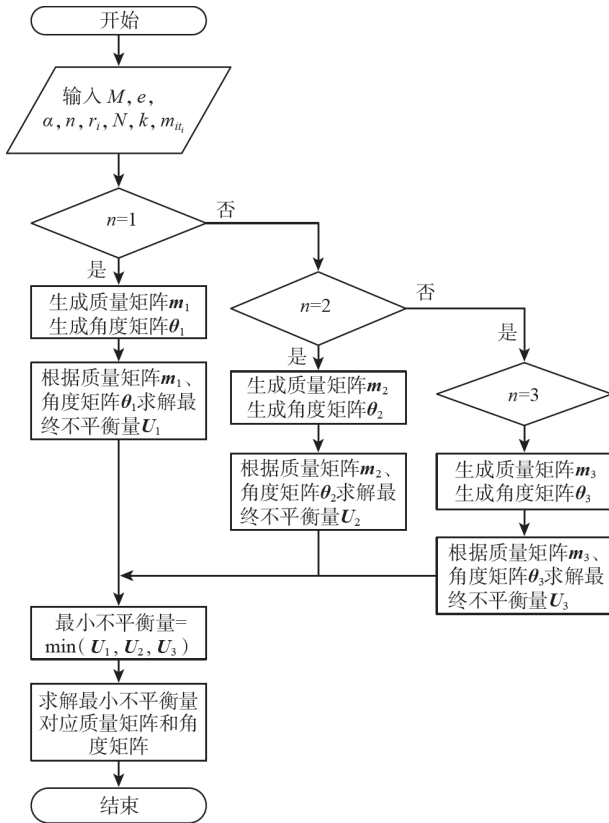


图1 Matlab程序逻辑示意图

Fig.1 Schematic diagram of the Matlab program

$$\theta_n = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \cdots & \theta_{1 \cdot \frac{N!}{(N-n)!}} \\ \vdots & & \vdots \\ \theta_{n1} & \cdots & \theta_{n \cdot \frac{N!}{(N-n)!}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

添加 n 块平衡块后最终不平衡量大小的 $\frac{(t_i+n-1)!}{(t_i-1)! \cdot n!} \times \frac{N!}{(N-n)!}$ 的矩阵 U_n 的一般表达式为:

$$U_n = \begin{bmatrix} U_{11} & \cdots & U_{1 \cdot \frac{N!}{(N-n)!}} \\ \vdots & & \vdots \\ U_{\frac{(t_i+n-1)!}{(t_i-1)! \cdot n!} \cdot 1} & \cdots & U_{\frac{(t_i+n-1)!}{(t_i-1)! \cdot n!} \cdot \frac{N!}{(N-n)!}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

当 $n=1$ 时,所添加平衡块质量可写成1个 $t \times 1$ 的矩阵:

$$m_1 = [m_{11} \ m_{21} \ \cdots \ m_{t \cdot 1}]^T \quad (16)$$

平衡块安装角向位置可写成1个 $1 \times N$ 的矩阵:

$$\theta_1 = [\theta_{11} \ \theta_{12} \ \cdots \ \theta_{1 \cdot N}] \quad (17)$$

最终可得出添加1块平衡块后最终不平衡量大小的 $t \times N$ 的矩阵:

$$U_1 = \begin{bmatrix} U_{11} & \cdots & U_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ U_{t1} & \cdots & U_{tN} \end{bmatrix} \quad (18)$$

当 $n=2$ 时,所添加平衡块质量可写成1个 $\left[\frac{t(t+1)}{2}\right] \times 2$ 的矩阵:

$$m_2 = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ \vdots & \vdots \\ m_{\left[\frac{t(t+1)}{2}\right] \cdot 1} & m_{\left[\frac{t(t+1)}{2}\right] \cdot 2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

平衡块安装角向位置可写成1个 $2 \times [N(N-1)]$ 的矩阵:

$$\theta_2 = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \cdots & \theta_{1 \cdot [N(N-1)]} \\ \theta_{21} & \cdots & \theta_{2 \cdot [N(N-1)]} \end{bmatrix} \quad (20)$$

最终可得出添加2块平衡块后最终不平衡量大小的 $\left[\frac{t(t+1)}{2}\right] \times [N(N-1)]$ 的矩阵:

$$U_2 = \begin{bmatrix} U_{11} & \cdots & U_{1 \cdot [N(N-1)]} \\ \vdots & & \vdots \\ U_{\left[\frac{t(t+1)}{2}\right] \cdot 1} & \cdots & U_{\left[\frac{t(t+1)}{2}\right] \cdot [N(N-1)]} \end{bmatrix} \quad (21)$$

当 $n=3$ 时,所添加平衡块质量可写成1个

$\left[\frac{t(t+1)(t+2)}{6} \right] \times 3$ 的矩阵:

$$m_3 = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ m \left[\frac{t(t+1)(t+2)}{6} \right]_1 & m \left[\frac{t(t+1)(t+2)}{6} \right]_2 & m \left[\frac{t(t+1)(t+2)}{6} \right]_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

平衡块安装角向位置可写成1个 $3 \times [N(N-1)(N-2)]$ 的矩阵:

$$\theta_3 = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \cdots & \theta_{1 \cdot [N(N-1)(N-2)]} \\ \theta_{21} & \cdots & \theta_{2 \cdot [N(N-1)(N-2)]} \\ \theta_{31} & \cdots & \theta_{3 \cdot [N(N-1)(N-2)]} \end{bmatrix} \quad (23)$$

最终可得出添加3块平衡块后最终不平衡量大小的小的 $\left[\frac{t(t+1)(t+2)}{6} \right] \times [N(N-1)(N-2)]$ 的矩阵:

$$U_3 = \begin{bmatrix} U_{11} & \cdots & U_{1 \cdot [N(N-1)(N-2)]} \\ \vdots & & \vdots \\ U \left[\frac{t(t+1)(t+2)}{6} \right]_1 & \cdots & U \left[\frac{t(t+1)(t+2)}{6} \right]_{[N(N-1)(N-2)]} \end{bmatrix} \quad (24)$$

经过上述计算后,求得的最终不平衡量数值解的个数 A 为:

$$A = t \cdot N + \frac{t(t+1)}{2} \cdot N(N-1) + \frac{t(t+1)(t+2)}{6} \cdot N(N-1)(N-2) \quad (25)$$

在Matlab软件中进行计算,输入相关参数,运行程序进行计算,相关界面如图2所示^[11]。

从 A 个解中选择出最终不平衡量的最小解,即最小不平衡量,然后拉取矩阵中不平衡量数值最小时的质量和安装角度组合,根据求解情况,可以直接得到平衡块的安装数量、质量及安装角向位置,解决了平衡块安装多次尝试的问题,平衡工作一步到位,提高了平衡工作的精度和效率。

4 实例分析

某发动机转子平衡过程中,初始不平衡量为 $420 \angle 28^\circ \text{ g}\cdot\text{mm}$;平衡块的组别数量为3,质量分别为1.3、1.7、2.0 g;平衡块安装角向位置数量为42;平衡块安装位置半径均为130.6 mm。将上述数据带入到Matlab软件中,可得到最终不平衡量的分布情况,如图3所示。由公式(25)可求得 $A=699\ 258$ 。



图2 最小不平衡量计算界面

Fig.2 The minimum unbalance calculation interface

在平衡块数量分别为1、2、3时,转子组件的最小不平衡量如表1所示。由表可知: $n=1$ 时,在角度 $8\pi/7$ 处添加1个质量为2.0 g的平衡块,可得最小不平衡量为 $159.348\ 7 \text{ g}\cdot\text{mm}$; $n=2$ 时,在角度 $4\pi/3$ 处添加1个质量为1.7 g的平衡块,在角度 π 处添加1个质量为2.0 g的平衡块,可得最小不平衡量为 $5.091\ 4 \text{ g}\cdot\text{mm}$; $n=3$ 时,在角度 $32\pi/21$ 处添加1个质量为1.3 g的平衡块,在角度 $25\pi/21$ 处添加1个质量为1.7 g的平衡块,在角度 $6\pi/7$ 处添加1个质量为1.7 g的平衡块,可得最小不平衡量为 $0.866\ 2 \text{ g}\cdot\text{mm}$ 。

在实际的平衡过程中,最终不平衡量的数值也不能过小。当不平衡量的数值小于平衡机的最小可达不平衡量^[12]时,其输出结果不再准确,平衡机的最小可达不平衡量与平衡机的平衡精度等级、转子质量均有关^[13-15]。

平衡块的数量通常不宜过多,应尽量减少。究其原因,一是低速平衡时添加的平衡块在高速试验时可能起到反作用,二是不利于转子减重。为此,在计算过程中添加约束条件(式(26)),在此取值范围内,计算出最终结果后,根据平衡要求文件,综合考虑平衡块数量和最小不平衡量,选择最优解,添加平

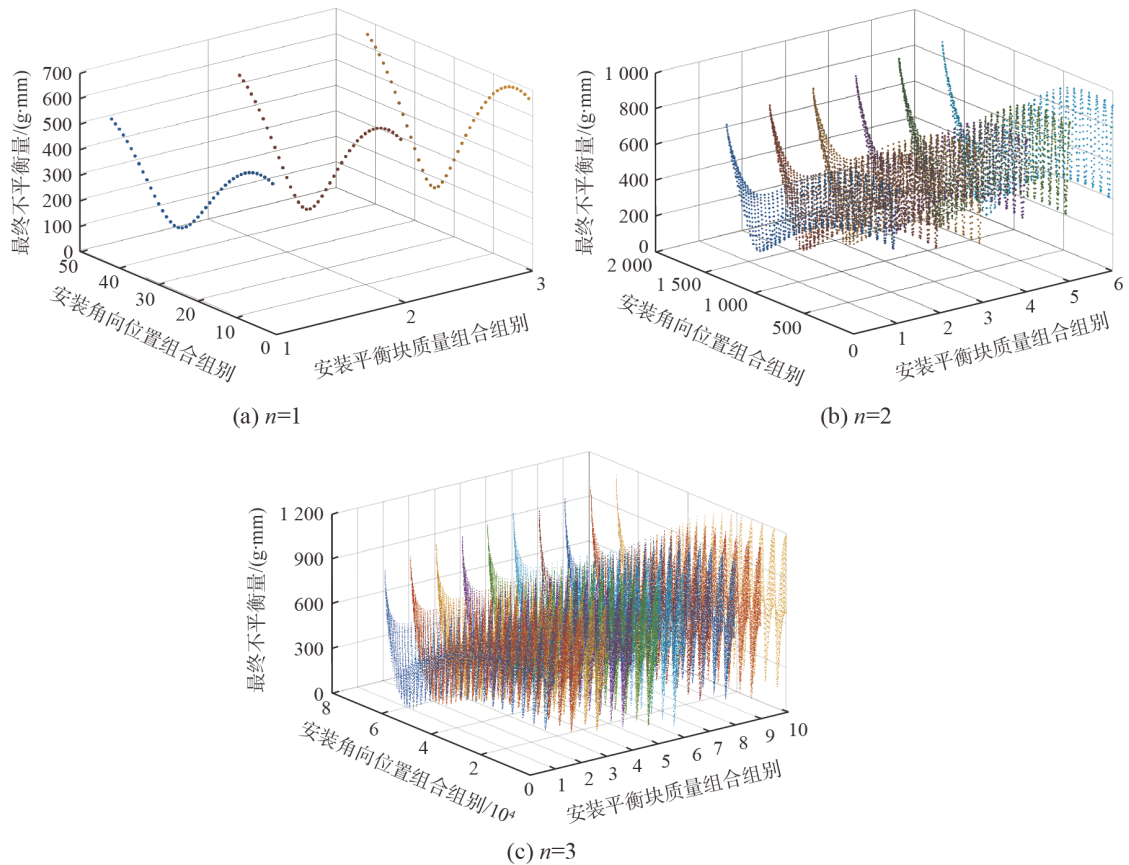


图3 最终不平衡量分布示意图
Fig.3 Schematic diagram of the final unbalance distribution

表1 不同数量下平衡块最小不平衡量示意表
Table 1 Table of the minimum unbalance of the balance weight at different quantities

平衡块数量	不平衡量/(g·mm)	对应质量/g	对应角度
1	159.348 7	2.0	$8\pi/7$
2	5.091 4	[1.7, 2.0]	$[4\pi/3, \pi]$
3	0.866 2	[1.3, 1.7, 1.7]	$[32\pi/21, 25\pi/21, 6\pi/7]$

衡块,对转子进行最终平衡。

$$U_{\varepsilon} \leq |\Delta U| \leq U_{\text{PER}} \quad (26)$$

式中: U_{ε} 为平衡机的最小可达不平衡量; U_{PER} 为转子许用不平衡量。

本台发动机转子平衡时,根据平衡机的平衡精度等级、转子质量,经过计算可以得到 $U_{\varepsilon} = 40 \text{ g} \cdot \text{mm}$,而设计要求中 $U_{\text{PER}} = 70 \text{ g} \cdot \text{mm}$,因此不平衡量约束条件可以写成 $40 \text{ g} \cdot \text{mm} \leq |\Delta U| \leq 70 \text{ g} \cdot \text{mm}$ 。在此条件下进行计算可以得到在平衡块数量分别为1、2、3时,转子组件的最小不平衡量,如表2所示。

由表2可知: $n=1$ 时,无满足要求解; $n=2$ 时,在角度 $29\pi/21$ 处添加1个质量为2.0 g的平衡块,在角度

表2 约束条件不同数量下平衡块最小不平衡量示意表
Table 2 Table of the minimum unbalance of the balance weight at different quantities of constraints

平衡块数量	不平衡量/(g·mm)	对应质量/g	对应角度
1	无满足要求	无满足要求	无满足要求
2	40.360	[2.0, 2.0]	$[29\pi/21, 19\pi/21]$
3	40.023	[2.0, 2.0, 2.0]	$[2\pi/3, 10\pi/7, 25\pi/21]$

$19\pi/21$ 处添加1个质量为2.0 g的平衡块,最终最小不平衡量为40.360 g·mm; $n=3$ 时,在角度 $2\pi/3$ 处添加1个质量为2.0 g的平衡块,在角度 $10\pi/7$ 处添加1个质量为2.0 g的平衡块,在角度 $25\pi/21$ 处添加1个质量为2.0 g的平衡块,最终最小不平衡量为40.023 g·mm。

依据前文约束条件($40 \text{ g} \cdot \text{mm} \leq |\Delta U| \leq 70 \text{ g} \cdot \text{mm}$),计算出最终结果后,根据平衡要求文件,综合考虑平衡块数量和最终最小不平衡量,选择 $n=2$,在角度 $29\pi/21$ 处添加1个质量为2.0 g的平衡块,在角度 $19\pi/21$ 处添加1个质量为2.0 g的平衡块,最小不平衡量为40.360 g·mm。按照该方案进行平衡块添加,最终实际输出不平衡量为42.6 g·mm,相对误差为5.6%,在可接受范围内。

5 结束语

利用Matlab软件编程,对转子平衡过程中平衡块的数量、质量、安装角向位置进行遍历式计算,得到最终不平衡量的最优解,减少了安装平衡块过程中的多次尝试,保证了平衡块安装时的精确定位,平衡过程一次成功,提高了转子平衡的精度和效率。

参考文献:

- [1] 肖理杰. 一种民用航空发动机转子动平衡方法[J]. 航空维修与工程, 2019, (11): 65-67.
XIAO Lijie. A method of rotor dynamic balance for civil aero-engine[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2019, (11): 65-67. (in Chinese)
- [2] 朱文, 唐家兵, 刘飞, 等. 转子平衡中平衡块在平衡面内的精确定位分析[J]. 机电工程技术, 2004, 33(7): 74-75.
ZHU Wen, TANG Jiabing, LIU Fei, et al. Accurate positioning analysis of the balance block within the balance surface in rotor balancing[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2004, 33(7): 74-75. (in Chinese)
- [3] 岳峰杰, 安婧红. 矢量合成法在转子动平衡中的应用[J]. 风机技术, 2004, (4): 38.
YUE Fengjie, AN Jinghong. Application of vector synthesis method in rotor dynamic balance[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2004, (4): 38. (in Chinese)
- [4] 王艳军. 不同平衡块对机体振动的影响分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
WANG Yanjun. Analysis of the influence of different balance blocks on body vibration[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [5] RODRIGUES D J, CHAMPNEYS A R, FRISWELL M I, et al. Two-plane automatic balancing: a symmetry breaking analysis[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2011, 46(9): 1139-1154.
- [6] 张炳华. 影响转子动平衡质量的因素及解决方法[J]. 防爆电机, 2009, 44(5): 46-48.
ZHANG Binghua. The factors to influence rotor dynamic balancing quality and the solutions[J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2009, 44(5): 46-48. (in Chinese)
- [7] 张林. 汽轮机转子不平衡及平衡块加装分析[J]. 河南科技, 2019, (11): 61-63.
ZHANG Lin. Analysis of steam turbine rotor unbalance and balancing block installation[J]. Henan Science and Technology, 2019, (11): 61-63. (in Chinese)
- [8] 杨国安. 转子动平衡实用技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012.
YANG Guoan. Practical techniques for dynamic balancing of rotors[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2012. (in Chinese)
- [9] 阳明盛, 熊西文, 林建华. MATLAB基础及数学软件[M]. 辽宁大连: 大连理工大学出版社, 2003.
YANG Mingsheng, XIONG Xiwen, LIN Jianhua. Fundamental of MATLAB and mathematical software[M]. Liaoning Dalian: Dalian University of Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [10] 刘浩, 韩晶. MATLAB R2012a完全自学一本通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
LIU Hao, HAN Jing. MATLAB R2012a teach yourself everything[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013. (in Chinese)
- [11] 罗华飞. MATLAB GUI设计与学习手记[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
LUO Huafei. MATLAB GUI design learning notes[M]. Beijing: Beihang University Press, 2009. (in Chinese)
- [12] 于梅, 于仲敏. 平衡机最小可达剩余不平衡度测试方法的研究[J]. 计量技术, 2001, (4): 16-18.
YU Mei, YU Zhongmin. Study on the test method of minimum attainable residual unbalance degree of balancing machine[J]. Measurement Technique, 2001, (4): 16-18. (in Chinese)
- [13] 周骏, 潘晓铭, 周哲为. 转子动平衡的技术研究[J]. 机械设计与制造, 2007, (4): 151-153.
ZHOU Jun, PAN Xiaoming, ZHOU Zhewei. Rotator dynamic balance technology studies[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007, (4): 151-153. (in Chinese)
- [14] 杨顺银. 离心泵转子动静平衡的测试[J]. 石油和化工设备, 2010, 13(6): 41-42.
YANG Shunyin. Testing of dynamic and static balance of centrifugal pump rotors[J]. Petro & Chemical Equipment, 2010, 13(6): 41-42. (in Chinese)
- [15] 陈娟. 转子动平衡及允许不平衡量计算[J]. 设备管理与维修, 2012, (7): 21-22.
CHEN Juan. Rotor dynamic balance and allowable unbalance calculation[J]. Plant Maintenance Engineering, 2012, (7): 21-22. (in Chinese)