

文章编号：2095-6649(2020)02-0096-06

基于稳态响应下探究烟气轮机动叶片最佳 铣削频率及铣削力研究

穆书航, 王经邦, 李丙才

(兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 利用 ANSYS 软件对烟气轮机动叶片进行模态分析, 得到动叶片前 6 阶模态阵型图及叶片的固有频率, 再利用谐响应分析, 分析出动叶片在加工过程中发生强迫振动的频率范围, 从而找到最佳铣削频率。在最佳铣削频率之上施加不同切削力, 探求叶片加工位移量, 找到加工叶片的最佳切削力。为叶片在加工中提高叶片加工质量提供理论指导。

关键词: 模态分析; 谐响应分析; 烟气轮机动叶片; 铣削频率; 铣削力

中图分类号: TG714 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19335/j.cnki.2095-6649.2020.02.021

本文著录格式: 穆书航, 王经邦, 李丙才. 基于稳态响应下探究烟气轮机动叶片最佳铣削频率及铣削力研究[J]. 新型工业化, 2020, 10(2): 96-101

Research on Optimal Milling Frequency and Force of Flue Gas Turbine Blades Based on Steady-state Response

MU Shu-hang, WANG Jing-bang, LI Bing-cai

(Mechanical and Electrical Engineering College, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050)

Abstract: To carry on modal analysis of moving blade of flue gas wheel with ANSYS software, and obtain the first six order modal pattern of moving blade and its natural frequency, and analyze frequency range of forced vibration of moving blade during processing with harmonic response analysis, find the best milling frequency. Apply different cutting forces on optimal milling frequency, explore displacement of blade machining and find optimal cutting force, and provide theoretical guidance for improving machining quality of blades.

Key words: Modal analysis; Harmonic response analysis; Flue gas wheel moving blade; Milling frequency; Milling force

Citation: MU Shu-hang, WANG Jing-bang, LI Bing-cai. Research on Optimal Milling Frequency and Force of Flue Gas Turbine Blades Based on Steady-state Response [J]. The Journal of New Industrialization, 2020, 10(2): 96-101

0 引言

由于烟气轮机叶片结构复杂, 加工工艺较为困难, 目前, 国内外学者针对烟气轮机动叶片的加工振动的研究相对较少, 往往是针对特定的叶片模型通过施加恒定的铣削力或建立动力学方程进行振动研究。如 Horizon Li 建立了切削理论模型^[1], Lee 和 Altintas 等建立了切削力模型, 用以解决切削力的相关计算^[2-4], 刘志博等对压气轮叶片建立了振动数学模型, 获得振动位移曲线^[5-6], 杨勇等建立了叶片的力和力矩平衡方程, 得出了叶片受力的应力最大范围^[7]。

烟气轮机设备中最核心的工件部件之一是烟气轮机动叶片, 动叶片的加工质量越高越不容易发生折断或磨损, 一定程度上延长了烟气轮机的使用寿命。因此, 如何提高烟气轮机动叶片的加工质量就有了十分重要的研究意义。本文主要讨论加工中产生的振动对叶片加工质量的影响, 即过大的切削力会导致叶片弯曲, 过小的切削力会降低工件表面加工质量。过高的铣削频率也会导致叶片发生形变, 而过低的铣削频率无法达到预期的加工效果。通过模态分析及谐响应分析寻找合适的附加切削

作者简介: 穆书航 (1994-), 男, 硕士, 研究方向: 数控加工成套设备及其自动化研究。

力和铣削频率对叶片的加工振动进行分析并控制。

1 模态分析理论基础

模态分析原理是将 N 自由度系统的动力学特性转换为单自由度表示^[5]。

N 自由度运动微分方程表达式为：

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中： $[M]$ 为系统质量矩阵， $[C]$ 为阻尼矩阵， $[K]$ 为系统刚性矩阵； $\{\ddot{x}(t)\}$ ， $\{\dot{x}(t)\}$ ， $\{x(t)\}$ 分为加速度向量，速度向量，位移向量； $\{F(t)\}$ 激励力向量。

在没有干扰力的作用下，叶片会因初位移或者初速度引起自由振动。由于阻尼不大，因此忽略阻尼的影响。叶片在无阻尼的情况下，振动就会呈现简谐运动；其运动方程为为：

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (2)$$

设方程式 (2) 解为：

$$\{x(t)\} = \{A\} \cos \omega_n t \quad (3)$$

式中： $\{A\}$ 为自由振动时的振幅向量， ω_n 为系统的频率。

将 (3) 式带入 (2) 式中，求解得：

$$([K] - \omega_n^2 [M])\{A\} = \{0\} \quad (4)$$

令 (4) 式系数行列式为零，即：

$$\Delta(\omega_n^2) = |[K] - \omega_n^2 [M]| = 0 \quad (5)$$

式 (5) 称为特征方程即频率方程。

求解式 (5) 得到 ω_n^2 的 n 个大于零的正实根， $\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2$ 称为其特征值，将特征值进行根号下求解后得到 n 个 $\omega_{nr} (r=1, 2, \dots, n)$ ，按大小排列后称为其 1 阶固有频率，2 阶固有频率，...n 阶固有频率。

2 动叶片有限元模型的建立

本文以烟气轮机动叶片为讨论对象，在第二章

节中，利用 UG 软件建立出烟气轮机动叶片的三维模型，将叶片三维模型导入到 ANSYS Workbench 中。导入叶片三维模型后，要对材料特性进行分析和设定，叶片材料为 GH864 合金，其密度为 8.24 g/cm^3 ，泊松比为 0.31。

建立好模型并设定好模型参数后，由于无法直接对叶片模型进行模态分析，需要将叶片划分成一个一个的单元，即需要对模型进行网格划分，常用的划分方法有自动划分网格法，扫掠法，四面体划分网格法等。针对烟气轮机叶片结构的复杂型，选取自动划分网格法，保持叶片整体划分单元相同，在叶片曲率变化大的地方进行更为细致的网格划分。烟气轮机叶片网格划分如图 1 所示。

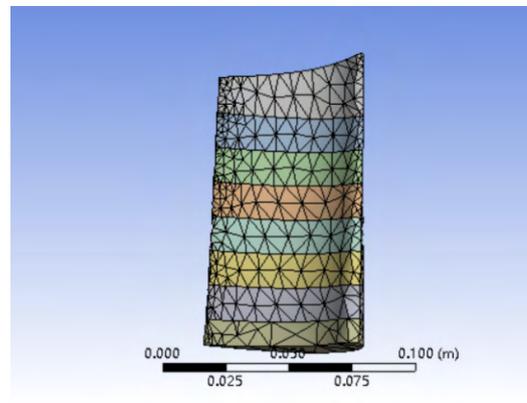


图 1 叶片网格划分
Fig. 1 Blade grid division

由于本小节中只考虑工件与刀具对加工带来的振动影响，忽略机床对加工振动带来的影响，所以在附加约束时，对工件定位位置施加位移约束，对夹紧装置施加固定约束，限制其所有自由度，消除机床对加工振动的影响^[8]。通过 ANSYS Workbench 软件计算，获得烟气轮机动叶片前 6 阶固有频率，频率如图 2 所示。

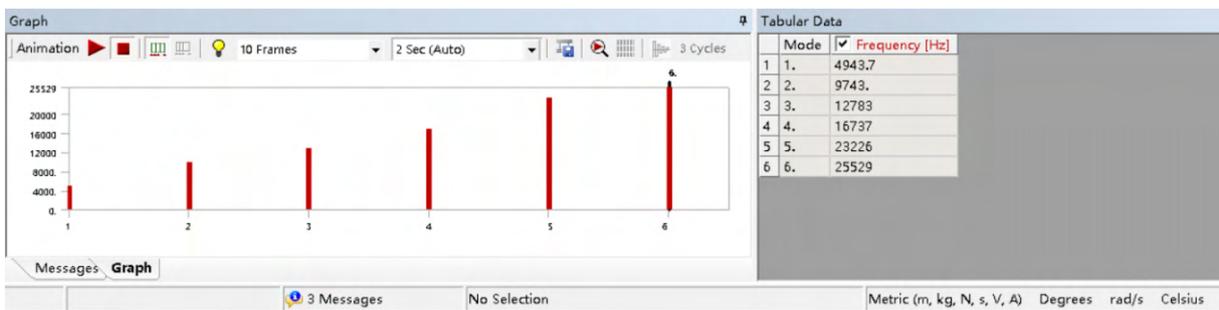


图 2 叶片固有频率图
Fig. 2 Natural frequency of blade

3 烟气轮机动叶片模态分析

通过叶片的固有频率图，可以得到加工叶片发生振动的频率值，但仅依靠叶片频率值无法直观的

分析出振动值的大小，所以需要烟气轮机动叶片进行模态分析获得叶片的振型。通过 ANSYS Workbench 软件进行分析处理，结果如图 3 所示，自上而下分别为 1-6 阶振型图。

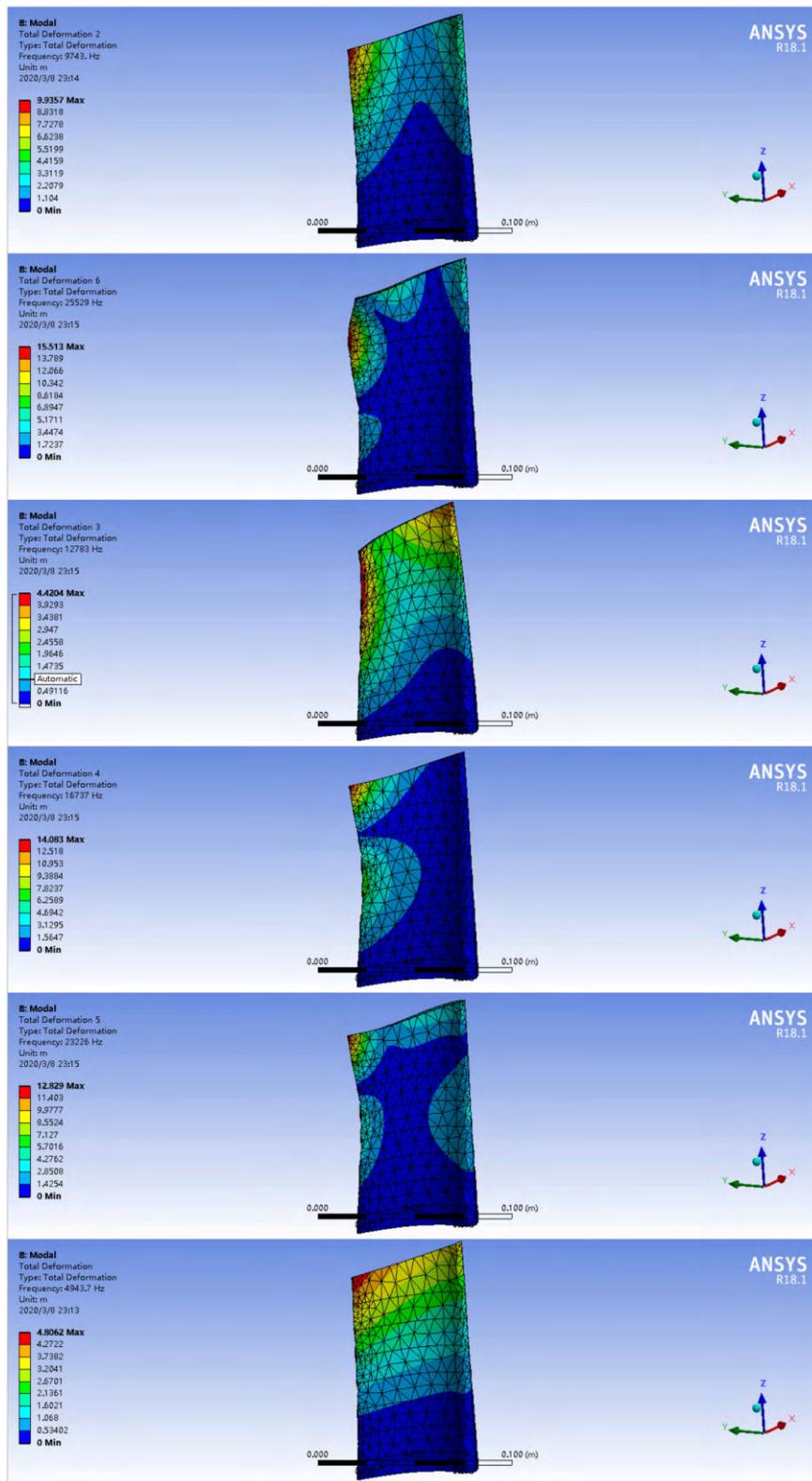


图 3 动叶片 1-6 阶振型图
Fig. 3 1-6 Vibration mode of moving blade

从叶片的前六阶模态阵型可以看出叶片的一阶、二阶阵型是弯曲振动，三阶、四阶是扭曲振动，五阶、六阶是弯曲加扭曲振动。叶片前三阶中，叶片在第三阶时形变量较小，第二阶形变量较大，前三阶整体形变量小于后三阶形变量，但是到了第四阶叶片形变量很大(15.513)，烟气轮机叶片在加工时容易在叶片顶尖位置以及叶片的边缘薄壁位置发生形变。

4 基于谐响应分析确定最佳铣削频率及铣削力

在叶片加工中，刀具是直接跟工件接触，通过刀具铣削，施加一定的铣削力，达到消除工件材料的目的。通过加工振动产生的原因可知，除了工件自身导致的振动产生，另一个主要因素就是刀具加工时产生的工件振动。在实际生产工程中，正是由于刀具施加了不合适的铣削力，或施加的铣削频率

不合适，直接导致工件加工产生了形变。那么如何选择刀具铣削力的大小以及如何控制刀具铣削频率的数值就成了控制加工振动的重要因素^[9-10]。

本文中应用有限元谐响应分析去计算刀具铣削频率的最佳范围，以及铣削力的大小。谐响应分析要求所分析的结构为线性结构，且承受的载荷随时间按照正弦规律变化，只应用于稳态下的响应分析。在分析过程中，将叶片结构简化为线性结构，施加载荷为恒定值，同时简化计算过程，只针对结构的稳态受迫振动进行计算，忽略瞬态振动的影响。

为探究发生共振现象下加载激振力的范围：选择谐响应的频率为 0~30000 Hz、35000~60000 Hz、85000~120000 Hz、10000 Hz~15000 Hz 和 13000~18000 Hz，在烟气轮机叶片上加载 Y 方向的载荷 $F=500\text{ N}$ 。因为在施加载荷的节点烟气轮机叶片变形最大，所以谐响应分析得到的是该节点的谐响应，一共 6 组谐响应曲线，结果如图 4~5 所示。

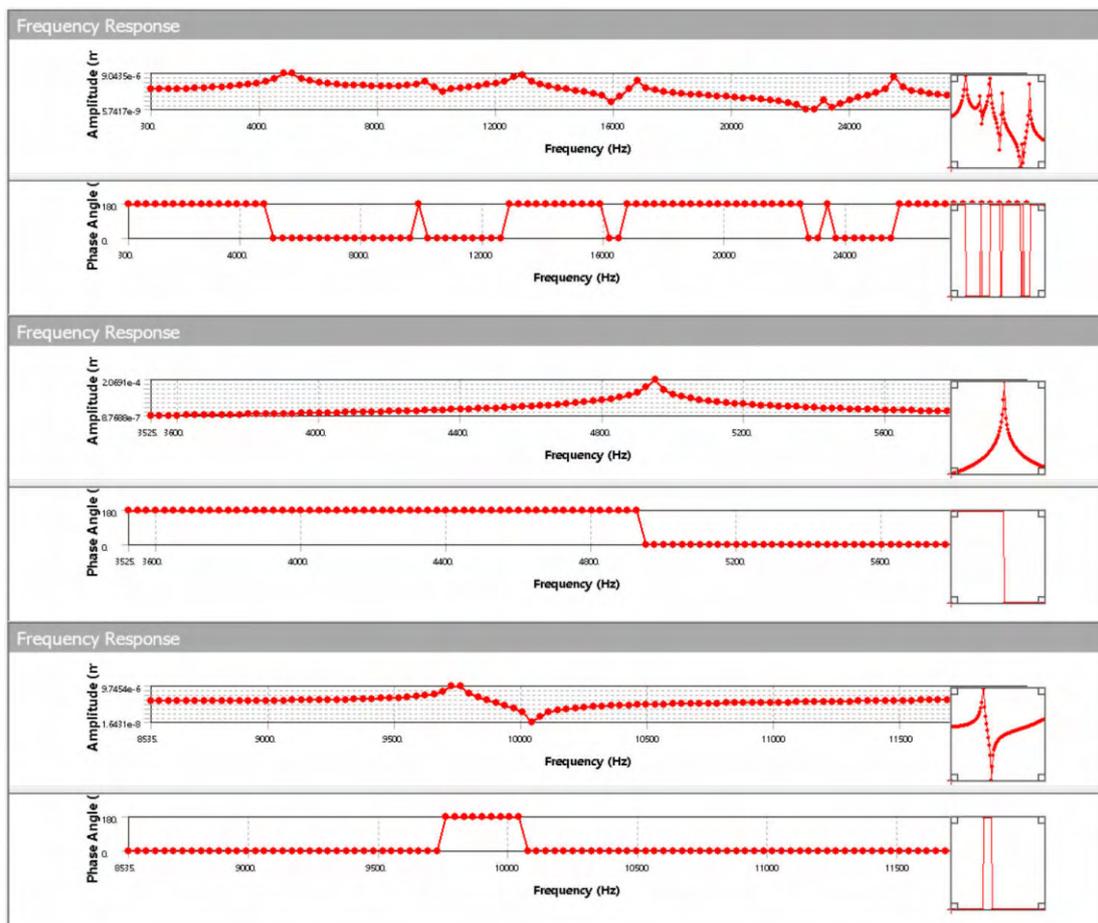


图 4 前三组谐响应分析
Fig. 4 Analysis of the first three groups of harmonic response

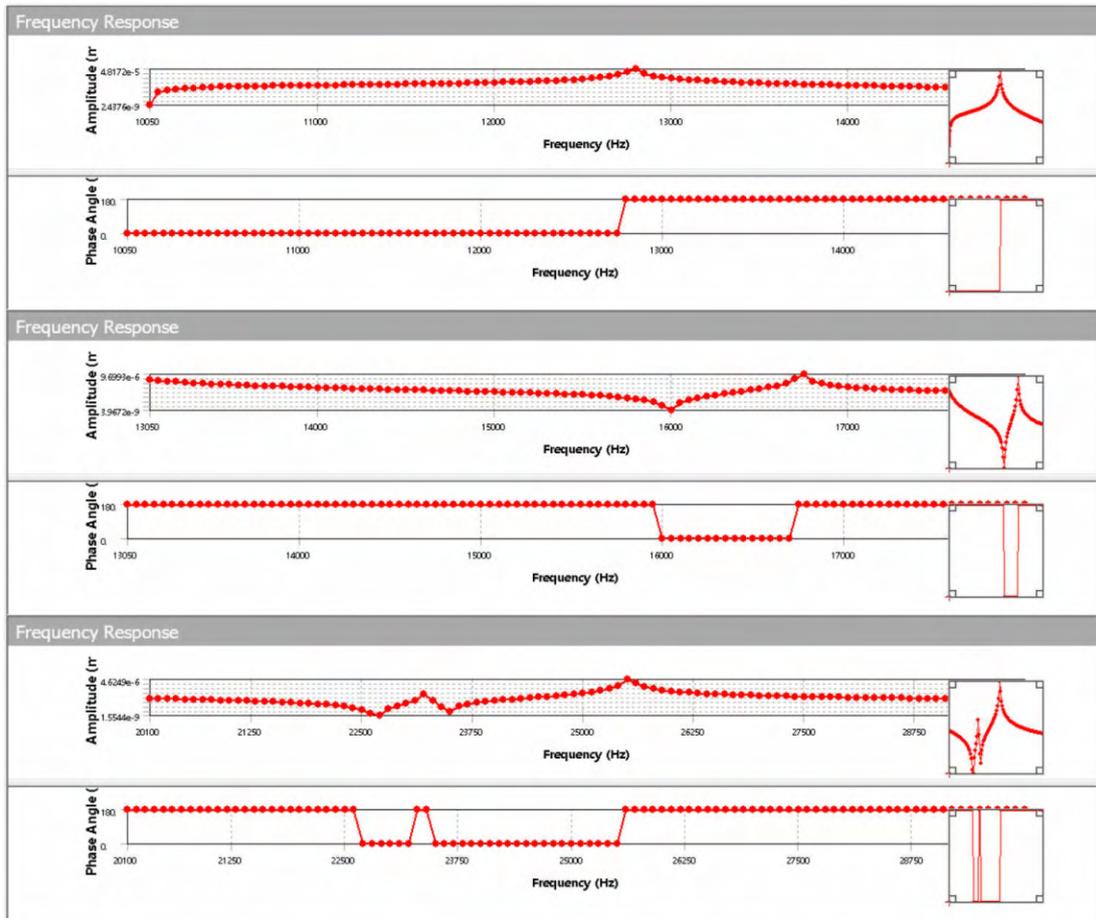


图 5 后三组谐响应分析
Fig. 5 Analysis of the last three harmonic responses

根据谐响应频率分析以及叶片固有频率阵型可以明确，叶片的最佳铣削频率在 4000 HZ，此时铣削频率高，相对变形量较小。因此控制谐响应频率范围为 4000 HZ。

在确定了最佳铣削频率后，基于该频率施加不同铣削力，分析不同铣削力在最佳铣削频率下对工件加工变形的影响。取施加在叶片 Y 方向切削力分别为：

500 N , 1000 N , 1500 N , 2000 N , 分析如图 6~7 所示。

通过控制铣削频率在 0-4000 Hz 时，施加不同的力进行振幅分析可知，在施加 250~1000 N 时，振幅逐渐增大，当施加铣削力为 1500 N 时，振幅最小为 1.0039e-006~1.0458e-006，当施加铣削力为 2000 N 时，振幅又逐渐增大。可以得出最佳铣削力范围在 1500~2000 N 之间。

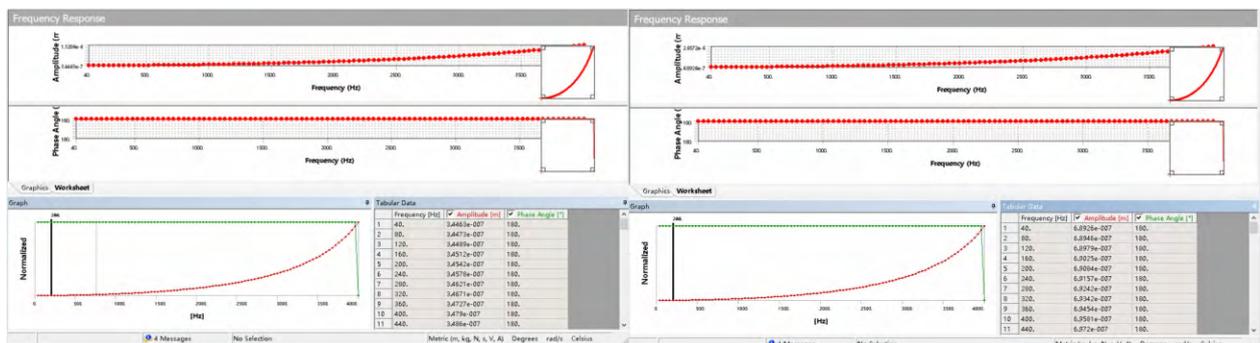


图 6 F=500 N、F=1000 N 分析图
Fig. 6 Analysis chart of F=500 N and F=1000 N

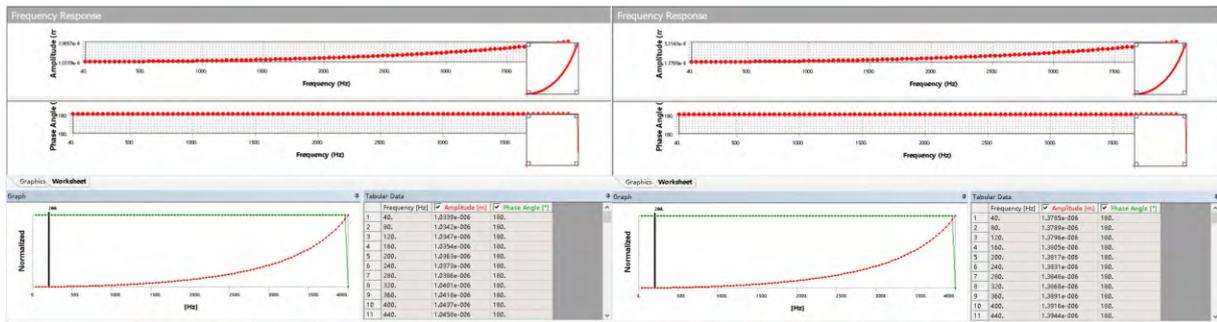


图 7 $F=1500\text{ N}$ 、 $F=2000\text{ N}$ 分析图
Fig. 7 Analysis chart of $F=500\text{ N}$ and $F=1000\text{ N}$

5 结论

通过对烟气轮机动叶片的模态分析以及谐响应分析得到结论如下：

(1) 根据叶片前 6 阶固有频率及模态阵型可知，烟气轮机动叶片在加工时容易在叶片顶尖位置以及叶片的边缘薄壁位置发生形变，在加工时要小心叶片该部位发生形变。

(2) 当施加频率在 $0\sim 30000\text{ Hz}$ 时，发生了共振现象，且共振频率为 4943 Hz ， 9743 Hz ， 127830 Hz ， 16737 Hz ， 23226 Hz ， 25529 Hz 。共振频率刚好符合烟气轮机叶片的固有频率或与固有频率成倍数的频率，因此在加工时，要避免施加与烟气轮机叶片固有频率相同或成倍数的铣削频率，尽量保证铣削频率低于 5000 Hz 。

(3) 施加不同的力进行振幅分析可知，在施加 $250\sim 1000\text{ N}$ 时，振幅逐渐增大，当施加铣削力为 1500 N 时，振幅最小为 $1.0039\text{e-}006\sim 1.0458\text{e-}006$ ，当施加铣削力为 2000 N 时，振幅又逐渐增大。可以得出最佳铣削力范围在 $1500\sim 2000\text{ N}$ 之间。通过以上结论，找到最佳铣削频率以及施加叶片最佳切削力的范围，对叶片的加工振动进行分析并控制，为叶片加工中提高加工质量提供理论指导。

参考文献

- [1] 王旭光, 冯泽君. 烟气轮机动叶片数控加工中的受力分析[J]. 工具技术, 2017, 51(5): 67-70.
WANG Xu-guang, FENG Ze-jun. Stress Analysis in Numerical

Control Machining of Flue Gas Wheel Blades [J]. Tool Technology, 2017, 51 (5): 67-70.

- [2] 李丙才, 武强强. YL型烟气轮机动叶片五轴联动数控加工的运动模型及编程[J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40(3): 38-43.
LI Bing-cai, WU Qiang-qiang. Kinematic Model and Programming of Five Axis CNC Machining of YL Type Flue Gas wheel Moving Blade [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2014, 40 (3): 38-43.
- [3] 陈志静. 烟气轮机动叶片断裂失效分析[J]. 化工机械, 2013, 40(2): 250-252.
CHEN Zhi-jing. Fracture Failure Analysis of Flue Gas Turbine Blades [J]. Chemical Machinery, 2013, 40 (2): 250-252.
- [4] 冯桂荣, 魏玉垒, 范磊, 等. 三催化烟气轮机动叶片断裂原因分析[J]. 石油和化工设备, 2011, 14(10): 44-47.
FENG Gui-rong, WEI Yu-lei, FAN Lei, et al. Causes Analysis of Blade Fracture of Three Catalytic Flue Gas Wheel [J]. Petroleum and Chemical Equipment, 2011, 14 (10): 44-47.
- [5] 于洋, 王晓放, 李丽丽. 烟气轮机动叶片冲蚀机理的数值研究与分析[J]. 燃气轮机技术, 2011, 24(2): 51-55.
YU Yang, WANG Xiao-fang, LI Li-li. Numerical Study and Analysis of Erosion Mechanism of Flue Gas Turbine Blades [J]. Gas turbine Technology, 2011, 24 (2): 51-55.
- [6] 刘志博, 尹洪, 邓小文等. 压气机动叶片振动数学模型建立及动态特性研究[J]. 广东电力, 2016, 29(7): 24-28.
LIU Zhi-bo, YIN Hong, DENG Xiao-wen, et al. Mathematical Model Establishment and Dynamic Characteristics of Compressor Blades [J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29 (7): 24-28.
- [7] 杨勇, 孙保群, 翟华, 等. 液压式离合器油楔和叶片的受力分析[J]. 煤矿机械, 2013, 34(3): 97-99.
YANG Yong, SUN Bao-qun, ZHAI Hua, et al. Stress Analysis of Hydraulic Clutch oil Wedge and Blade [J]. Coal Mining Machinery, 2013, 34 (3): 97-99.
- [8] 杨彦涛. 分析机械加工工艺对零件加工精度的影响[J]. 新型工业化, 2019, 9(4): 55-58.
YANG Yan-Bao. Influence Analysis of Machining Process on Machining Accuracy of Parts [J]. The Journal of New Industrialization, 2019, 9 (4): 55-58.